

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI AGRARIA

DIPARTIMENTO TERRITORIO E SISTEMI AGROFORESTALI

ANALISI DEI PROCESSI
GEOMORFOLOGICI DI BACINI
ALPINI CON DATI TOPOGRAFICI
ACQUISITI MEDIANTE
TECNOLOGIA LIDAR

Relatore: Prof. Giancarlo Dalla Fontana

Correlatore: Dott. Paolo Tarolli

Laureando: Denis Amadio

AA 2006/2007

Indice

1.	Introduzione	pag. 5
2.	Tecnologia LiDAR: nuove tecniche di rilievo topografico mediante laserscanner montato su aeromobile	pag. 7
3.	Metodi	pag. 11
3.1	Il modello digitale del terreno, DTM	pag. 11
3.2	Calcolo area contribuente	pag. 12
3.3	Relazione area-pendenza	pag. 16
4.	Area di studio	pag. 17
4.1	Bacino idrografico del torrente Agozza	pag. 18
4.2	Bacino idrografico del torrente Miozza	pag. 19
4.3	Bacino idrografico del torrente Moscardo	pag. 20
4.4	Rilievo LiDAR	pag. 21
5.	Discussione dei risultati	pag. 25
5.1	Relazione area-pendenza: influenza dell'algoritmo per il calcolo dell'area drenata	pag. 25
5.2	Relazione area-pendenza: influenza della risoluzione di cella utilizzata	pag. 26
5.3	Analisi processi dominanti nei tre bacini	pag. 30
6.	Conclusioni	pag. 33
7.	Bibliografia	pag. 35
	Ringraziamenti	pag. 39
	Appendice I	pag. 41
	Appendice II	pag. 47

1. Introduzione

Le caratteristiche topografiche, idrografiche e vegetazionali dei territori a morfologia complessa sono in grado di esercitare un controllo, in alcuni casi dominante, sulla risposta idrologica e sui processi erosivi sia a scala locale che a scala di bacino idrografico. Il motore di tutte le elaborazioni è costituito dal modello digitale del terreno (DTM), punto di partenza per la costruzione di più o meno elaborati schemi modellistici dove il gradiente topografico locale gioca un ruolo fondamentale nel verificarsi dei movimenti gravitativi di versante e processi idrologici di generazione del deflusso. Meno consolidato nell'uso corrente, ma altrettanto importante è il modello digitale della superficie (DSM), punto di partenza per l'analisi e rappresentazione della struttura della copertura vegetale che assume rilevanza nel verificarsi di tutti quei processi fisici ad essa correlati. La risoluzione di scala, per l'analisi ed interpretazione dei processi fisici che si manifestano in natura, si rivela un punto cruciale in quanto a seconda della qualità di dettaglio sul quale vengono basate le analisi, un processo può essere più o meno correttamente rappresentato (Tarolli e Tarboton, 2006; Tarolli e Dalla Fontana, 2006a, b; Tarolli e Dalla Fontana, 2007). La qualità e il dettaglio dell'informazione topografica disponibile sono progressivamente migliorate in relazione alla crescente diffusione della cartografia tecnica numerica oramai comunemente distribuita dai servizi cartografici competenti a livello sia nazionale che regionale. Un ulteriore significativo apporto giunge da nuove tecniche di rilievo che fanno riferimento all'impiego di sensori laser montati su aeromobile. Il sensore laser opera nell'infrarosso vicino e misura ad altissima frequenza la distanza tra il terreno e il sensore con una precisione di pochi centimetri. La tecnica, nota in letteratura con l'acronimo LiDAR (Ligth Detection And Ranging) ha consentito un significativo miglioramento nel dettaglio e qualità dell'analisi della topografia delle superfici terrestri. Grazie ad essa è stato possibile sviluppare una nuova generazione di modelli digitali della superficie (DSM) e modelli digitali del terreno (DTM) ad una risoluzione spaziale anche inferiore ad 1 m e quindi di gran lunga superiore a quella conseguita con tecniche tradizionali.

Mediante l'impiego di DSM e DTM ad alta risoluzione è possibile: i) individuare aree interessate da movimenti franosi mediante il calcolo del grado di scabrezza della superficie terrestre (McKean and Roering, 2004; Glenn et al., 2006), ii) condurre analisi di dettaglio sulla morfologia del sistema alveo versante (Storesund and Minear, 2006), iii) identificare per categorie di altezza la copertura vegetale. La consapevolezza dell'importanza dell'assetto morfologico, unitamente alla capacità di descrivere in modo realistico la topografia del bacino attraverso modelli digitali del terreno di qualità crescente, ha portato

molti ricercatori a privilegiare quei metodi di indagine che assegnano alla topografia un ruolo chiave nell'interpretazione dei processi idrologici (Dalla Fontana e Marchi, 2003). Parametri topografici che combinano l'area contribuyente e la pendenza locale sono in grado di identificare, nel modello digitale del rilievo di un bacino, i possibili punti di inizio dei collettori che costituiscono la rete idrografica (Montgomery e Foufoula-Georgiou, 1993; Desnet et al., 1999). L'aggregazione dell'area contribuyente lungo le direzioni di drenaggio fornisce un'indicazione della concentrazione dei deflussi e può quindi essere utilizzata come un surrogato della portata, mentre la pendenza locale, come indicatore di un gradiente energetico, influenza la loro erosività (Moglen e Bras, 1995; Prosser e Abernethy, 1996). La relazione fra la pendenza locale e l'area drenata ha la potenzialità di indicare il processo idro-erosivo dominante in un bacino idrografico (Montgomery e Foufoula-Georgiou, 1993). Nel presente lavoro sono state condotte analisi di sensibilità, al variare della risoluzione della cella del DTM, sulla distribuzione area-pendenza in grafici a scala logaritmica dai quali è stato possibile estrapolare più o meno evidenti relazioni descrittive il processo idromorfologico dominante per l'area di studio considerata. I DTM sono stati derivati da dati ricavati da rilievi LiDAR effettuati da elicottero. Nel capitolo 2 viene riportata la descrizione della tecnologia LiDAR, nel capitolo 3 sono riportate le metodologie adottate per le analisi (DTM, calcolo area drenata, concetto relazione area pendenza), nel capitolo 4 viene descritta l'area di studio (3 bacini alpini situati in Carnia, una regione del Friuli ai confini con l'Austria) e le specifiche del volo LiDAR effettuato, nel capitolo 5 vengono riportati i risultati e la discussione di essi, mentre il capitolo 6 riguarda le considerazioni conclusive. A fine lavoro sono raggruppate in due apposite appendici immagini raster 2D dell'area di studio relative a hillshade e pendenza, dove viene evidenziata l'efficacia di un DTM ad alta risoluzione, ottenuto mediante dati LiDAR, nella rappresentazione del territorio.

2. Tecnologia LiDAR: nuove tecniche di rilievo topografico mediante laserscanner montato su aeromobile

LiDAR è l'acronimo di Light Detection And Ranging, una tecnica di analisi remota che sfrutta l'impulso laser per eseguire rilievi della superficie terrestre. Essa è basata sulla scansione del territorio sorvolato con telemetri laser, la cui posizione ed assetto sono determinati mediante misure differenziali GPS (Global Position System) e misure INS (Inertial Navigation System).

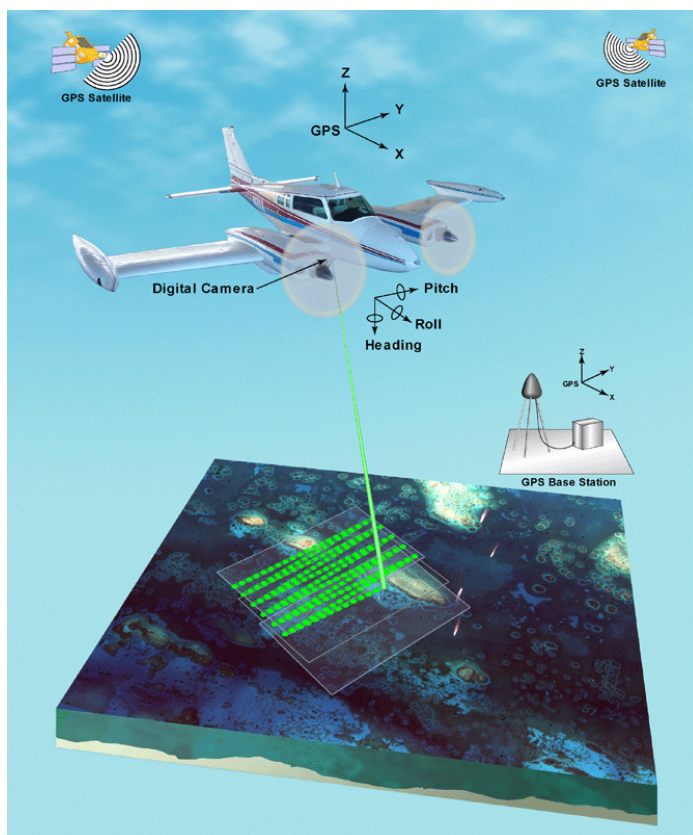


Figura 2.1 – *Schema del sistema di rilevamento LiDAR*

Nelle Figure 2.1 e 2.2 sono riportate due rappresentazioni schematiche del sistema di rilevamento LiDAR mediante aeromobile. Nella figura 2.1 viene anche messo in evidenza il sistema GPS dell'intero sistema: GPS montato su aeromobile e GPS stazione totale situato a terra per la correzione in tempo reale dei dati acquisiti.

La scansione laser rappresenta una tecnologia efficiente per l'acquisizione dei modelli digitali del terreno e di superficie (DTM e DSM) di ampie porzioni di territorio. I Modelli Digitali del Terreno (DTM) possono essere generati ad elevata risoluzione e dettaglio, rendendo la tecnologia più efficiente in termini di costi rispetto ai tradizionali metodi fotogrammetrici. Il sistema LiDAR può essere montato sia su elicotteri sia su aerei ad ala fissa, consentendo sia il rilievo ad alta risoluzione di fasce territoriali (corridoi) per le

applicazioni d'ingegneria sia la registrazione del modello digitale delle elevazioni (DSM e DTM) di vaste superfici per il settore ambientale e cartografico.

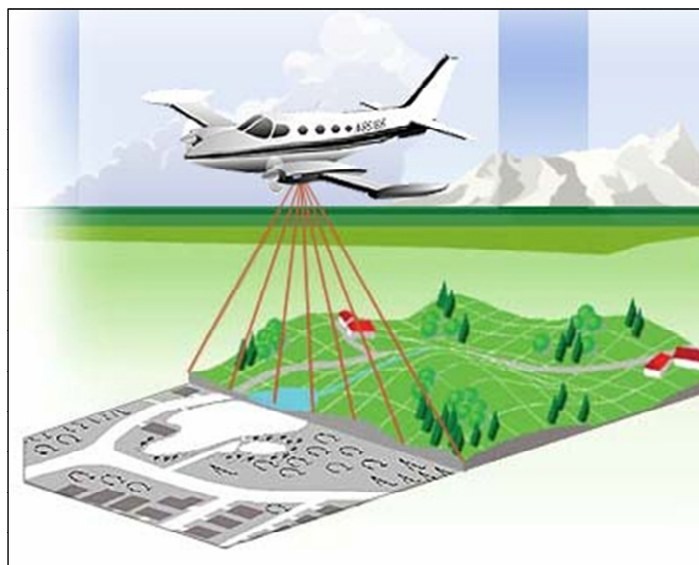


Figura 2.2 – *Schema del sistema di rilevamento LiDAR*

Tanto i sistemi LiDAR su elicottero che quelli su aerei ad ala fissa hanno la capacità di rilevare una superficie con una velocità di scansione variabile tra 50 e 100 impulsi al secondo. Grazie alla possibilità dell'impulso laser di insinuarsi tra i varchi della copertura fogliare e di raggiungere il suolo, si può predisporre di una buona banca dati riguardante la superficie terrestre anche in presenza di fitta copertura forestale (Figura 2.3).

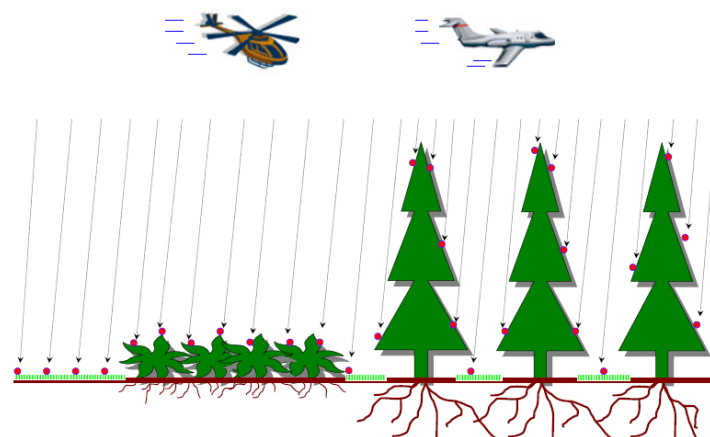


Figura 2.3 – *Illustrazione schematica del raggio laser attraverso la coltre vegetativa*

Il risultato finale è una densa nube di punti quotati e georeferenziati riguardante sia vegetazione che suolo. Tale nube deve essere opportunamente filtrata per poter discriminare i vari tipi di superficie fra cui il terreno, la vegetazione arbustiva, la

vegetazione arborea e gli edifici. Le operazioni di filtraggio sono molto importanti perché determinano la qualità dei modelli digitali ottenuti (Figura 2.3, 2.4).

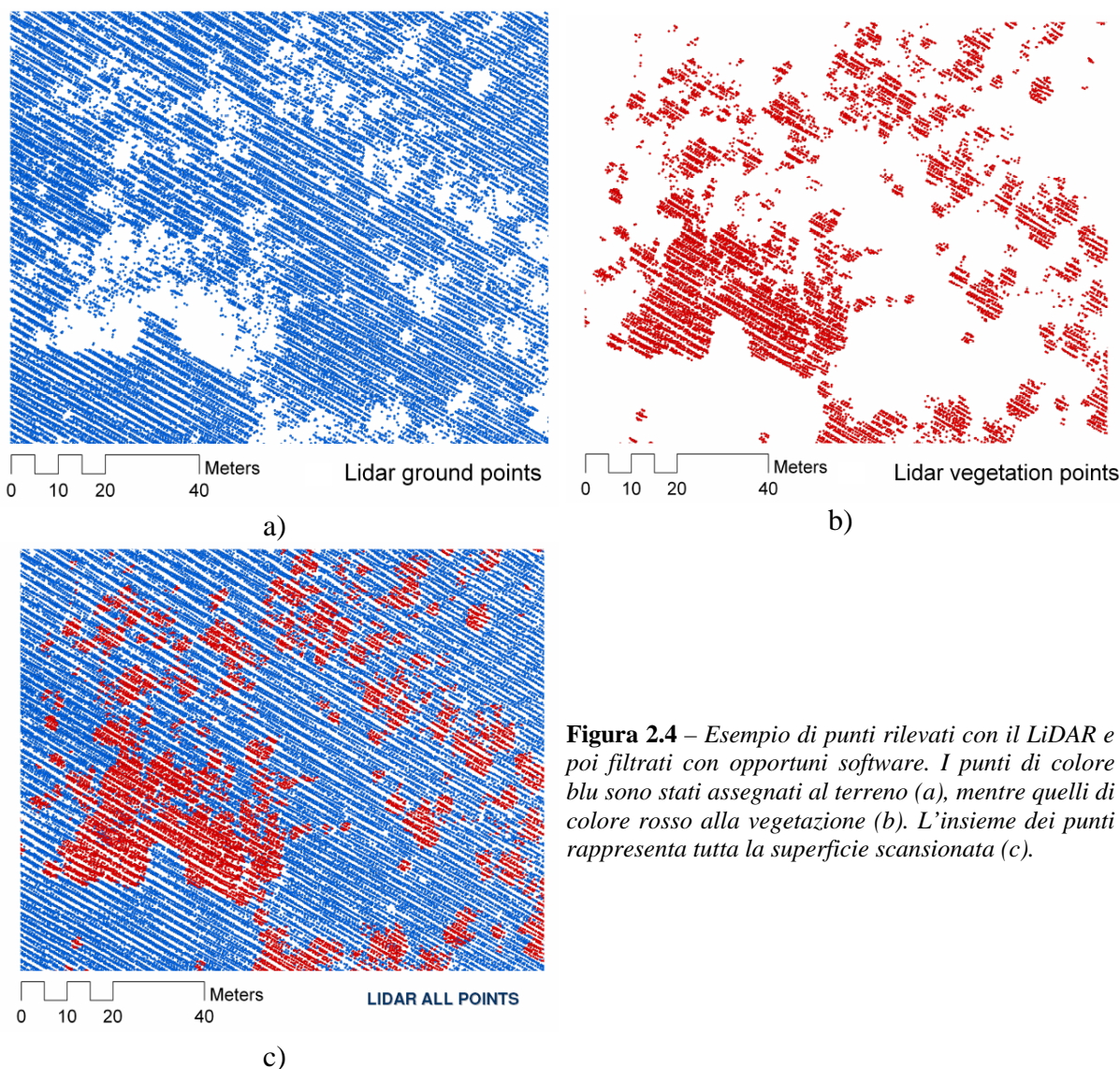


Figura 2.4 – Esempio di punti rilevati con il LiDAR e poi filtrati con opportuni software. I punti di colore blu sono stati assegnati al terreno (a), mentre quelli di colore rosso alla vegetazione (b). L'insieme dei punti rappresenta tutta la superficie scansionata (c).

Nel caso di rilievi in aree boscate, la qualità del DTM è data dall'effetto combinato di almeno due fattori: la precisione dei punti che raggiungono il suolo e la corretta individuazione di quali di questi appartengono al terreno. Diventano quindi fonte di errore la densità della copertura vegetale e la pendenza del terreno. La tecnologia LiDAR presenta comunque anche degli errori propri, indipendenti dalle condizioni della superficie da scansionare. Questi errori sono dovuti ai parametri di volo, quali altezza e velocità, al posizionamento relativo tra i vari componenti del sistema, ossia il GPS, l'apparato inerziale ed il telemetro laser. Anche le condizioni atmosferiche interferiscono sulla precisione della

scansione: in presenza di eventi meteorici e nubi il rilievo risulterebbe povero e inutilizzabile poiché la maggior parte degli impulsi verrebbe riflessa.

I vantaggi offerti da questa nuova tecnologia sono comunque enormi. Oltre alla possibilità di creare DTM ad elevato dettaglio utili per analisi geomorfologiche del territorio, permette di rilevare elementi infrastrutturali di vario tipo come edifici, strade, ponti e di acquisire lo spessore e la copertura della coltre vegetativa. Numerose sono le applicazioni per le quali i rilievi LiDAR si prestano (Figura 2.5): i) si può eseguire un'analisi della morfologia fluviale ed individuare le zone potenzialmente soggette ad esondazione, ii) si può classificare l'uso del suolo, iii) determinare la quantità di biomassa delle foreste, iv) individuare la presenza di frane nei versanti dei bacini montani, v) derivare la coesione radicale sulla differenziazione di specie vegetali, v) derivare indici sulla copertura forestale come il LAI (Leaf Area Index), vi) eseguire applicazioni ingegneristiche di dettaglio.

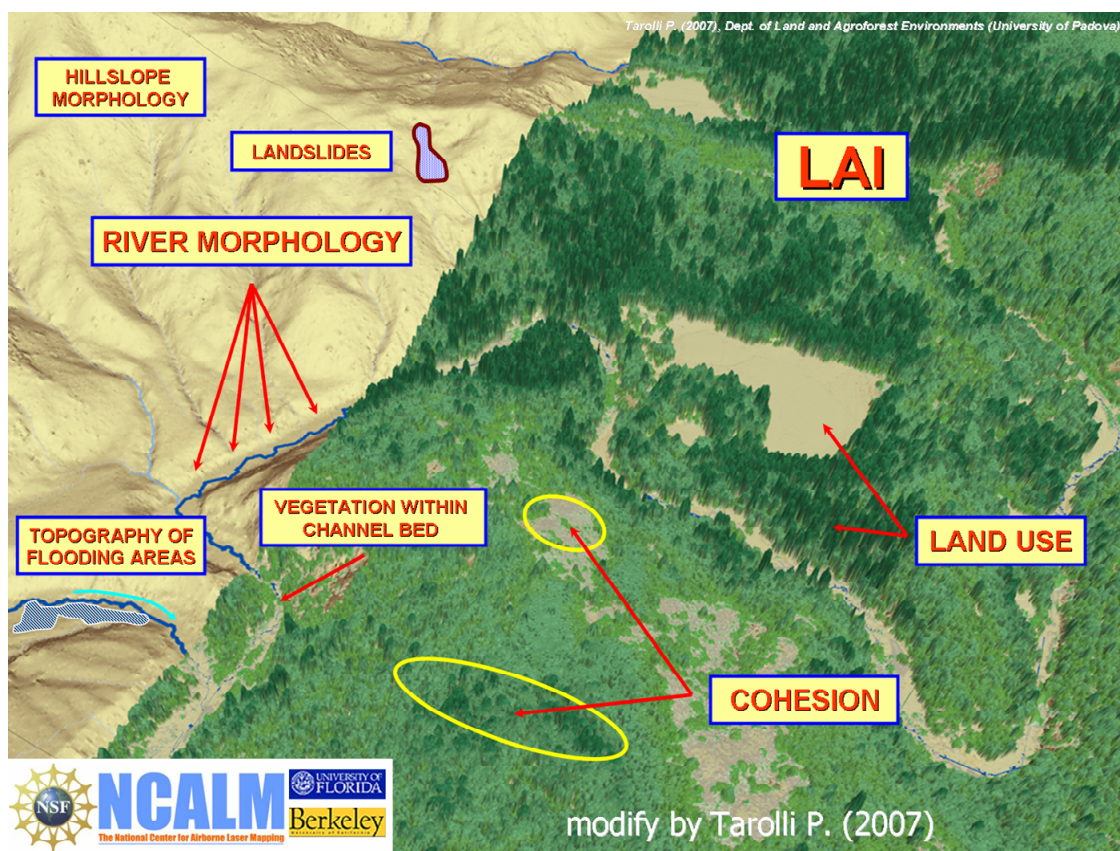


Figura 2.5 – Esempio delle possibili applicazioni ottenibili attraverso l'elaborazione di dati LiDAR

3. Metodi

3.1 Il modello digitale del terreno, DTM

Il DTM, “*Digital Terrain model*”, ovvero “Modello Digitale del Terreno”, è l’elemento di base per la rappresentazione numerica della morfologia del terreno, ed è probabilmente il dato di partenza più comunemente utilizzato nella misura, analisi e modellazione dei processi idrologici di versante. I DTM sono costituiti da matrici georeferenziate di valori d’elevazione del terreno: i dati in esse contenuti possono essere organizzati in griglie regolari generalmente a maglia quadrata (DTM in formato “raster”), in reti di triangoli irregolari i cui vertici appoggiano sui punti di rilievo (TIN: “*Triangular Irregular Networks*”). Il DTM consente il calcolo di una serie di attributi, come la pendenza, l’esposizione, la curvatura, e di una serie di indici topografici. I DTM in formato raster, come quelli trattati in questo lavoro, sono prodotti per interpolazione a partire da punti ottenuti con rilievo topografico (Gps, LiDAR, Radar, Satellite). I DTM si differenziano dai DSM per il fatto che rappresentano solo le superfici prive di elementi vegetativi. Nell’immagine sottostante è riportato un esempio della differenza tra un DTM ed un DSM.

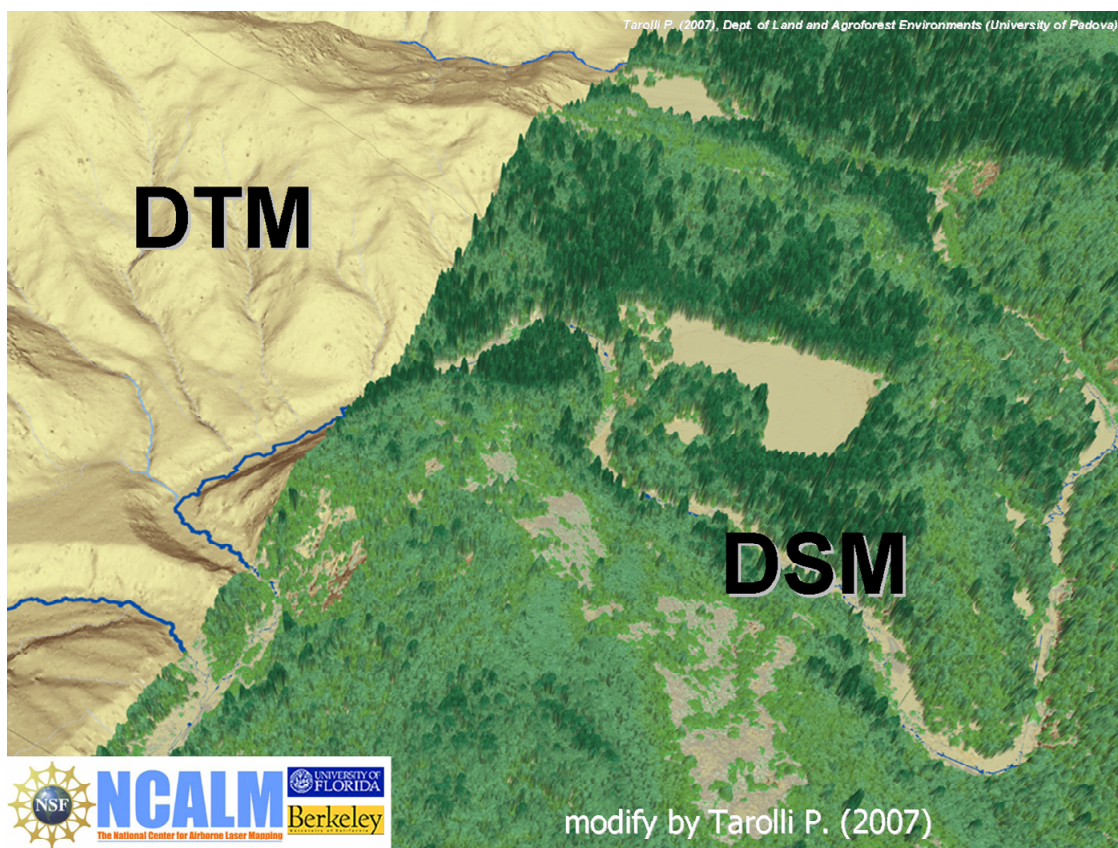


Figura 3.1 – Differenze tra DTM (*digital terrain model*) e DSM (*digital surface model*)

3.2 Calcolo area contribuyente

L'area contribuyente è la porzione planimetrica d'area a monte di un elemento topografico discreto, estesa sino allo spartiacque, che contribuisce alla formazione del deflusso nell'elemento considerato. Il calcolo dell'area contribuyente non è univoco, ma dipende dall'adozione di alcuni algoritmi per l'identificazione delle direzioni di deflusso.

a) Algoritmo D8

Nell'algoritmo D8 (O'Callaghan e Mark, 1984) viene ipotizzato che il deflusso che attraversa una generica cella del DTM (modello digitale delle elevazioni) si muova interamente lungo la direzione che esprime il massimo gradiente topografico negativo tra la cella in esame e quelle adiacenti. Le possibili direzioni esplorate dall'algoritmo sono otto ovvero quelle degli assi di simmetria che si irradiano dal centro della cella (da cui il nome dell'algoritmo D8).

b) Algoritmo D ∞

Secondo l'algoritmo D-infinito (Tarboton, 1997) il deflusso che attraversa una certa cella si muove verso valle lungo una sola direzione, ma a differenza di quanto accade per il D8, tale direzione non deve necessariamente coincidere con uno degli otto assi principali di simmetria. La superficie di ciascuna cella viene suddivisa in otto porzioni triangolari con vertice condiviso al centro della cella (Figura 3.2); a ciascuna di esse viene assegnata una pendenza in funzione della quota dei baricentri delle celle confinanti (Figura 3.3)

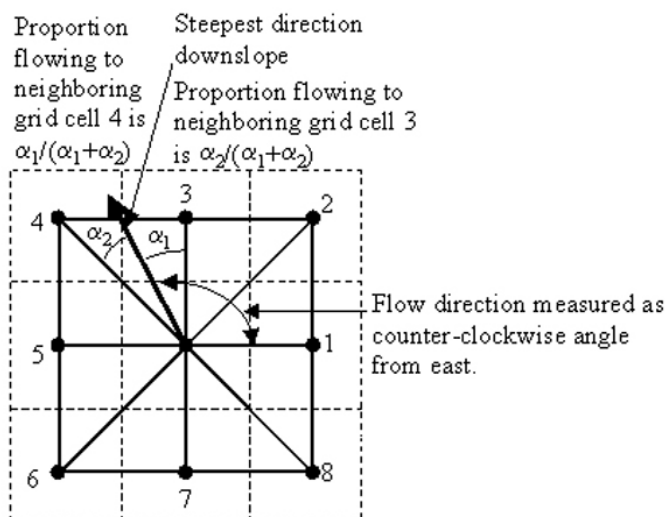


Figura 3.2 – Definizione della direzione di deflusso lungo la direzione di massima pendenza tra le otto porzioni triangolari di superficie centrate nel baricentro della cella.

Con riferimento ad una sola delle porzioni triangolari, ad esempio la 1 di Figura 3.2, la pendenza è rappresentata dalle seguenti formulazioni:

$$\begin{aligned} s_1 &= (e_0 - e_1) / d_1 \\ s_2 &= (e_1 - e_2) / d_2 \end{aligned} \quad (3.1)$$

in cui e_i sono le quote delle celle e d_i le distanze come rappresentate in Figura 3.3.

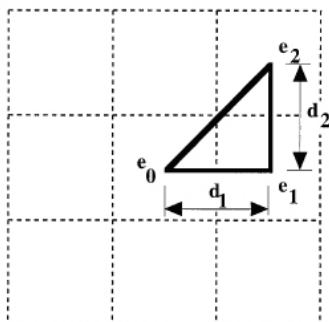


Figura 3.3 – Definizione delle variabili per il calcolo della pendenza per una delle otto porzioni triangolari di superficie in cui è scomposta una singola cella del DTM.

Nota il vettore (s_1, s_2) , il modulo s della pendenza e la direzione r associata alla porzione di superficie sono definite dalle relazioni:

$$\begin{aligned} r &= \arctan(s_2 / s_1) \\ s &= \sqrt{s_1^2 + s_2^2} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Se la direzione r risulta esterna alla superficie della porzione triangolare rappresentata in Figura 3.3, la direzione di deflusso viene fatta coincidere con il più prossimo dei due lati $\overline{e_0e_2}$, $\overline{e_0e_1}$, ed il deflusso ridirezionato alla cella adiacente in direzione cardinale o diagonale senza subire ripartizione. Nel caso in cui la direzione individuata ricade all'interno della porzione, essa viene ripartita tra le due celle in direzione cardinale e diagonale in modo inversamente proporzionale agli angoli α_1 ed α_2 formati da r con le due direzioni principali di simmetria (Figura 3.2). Ne consegue che il deflusso che caratterizza una cella, nel muoversi verso le celle adiacenti a quota inferiore, o non viene ripartito o viene ripartito al più tra due di esse. La pendenza locale associata alla cella è la maggiore tra quelle calcolate per le otto porzioni triangolari.

c) Algoritmo Multiple Flow

L'algoritmo Multiple Flow (Quinn et al., 1991) è, tra quelli considerati, quello che presenta la maggior dispersione del deflusso tra una generica cella e quelle adiacenti a quota inferiore. In esso non viene effettuata la "scelta" di una direzione, ma s'ipotizza che il deflusso si ripartisca tra tutte le celle sottostanti in misura proporzionale a: i) pendenza tra cella ricevente e cella contribuente, ii) lunghezza del tratto di isoipsa che il deflusso attraversa ortogonalmente per raggiungere la cella ricevente (Figura 3.4). Come per il D8, le possibili direzioni di deflusso sono rappresentate dagli assi principali di simmetria della

cella: il deflusso può essere ripartito al massimo in otto parti, se la cella risulta essere la più alta tra tutte le circostanti. Le pendenze tra la cella considerata e le adiacenti a quota inferiore fungono da pesi per determinare la porzione di deflusso in ciascuna delle direzioni. Se si associa valore unitario all'area contribuente relativa ad una singola cella, la frazione di deflusso DF_{acc_i} che viene attribuita alla i -esima cella ad essa adiacente a quota inferiore è data da:

$$\Delta F_{acc_i} = 1 \cdot \frac{\tan b_i L_i}{\sum_{j=1}^n \tan b_j L_j} \quad (3.3)$$

in cui sono definiti:

n : numero totale di celle adiacenti di quota inferiore;

$\tan b_i$: pendenza verso l' i -esima cella;

L_i : lunghezza della linea di livello nella i -esima direzione.

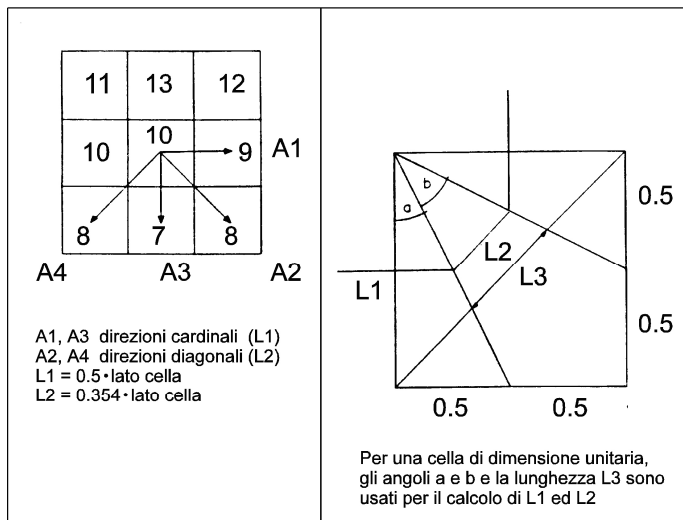


Figura 3.4 – Algoritmo per la definizione del drenaggio multidirezionale (Quinn e al. 1991).

La pendenza associata alla cella centrale risulta, in maniera analoga, dalla media delle pendenze verso le celle adiacenti a quota inferiore pesate dalle rispettive lunghezze dei tratti di isoipsa che intercettano il deflusso:

$$\tan \beta = \frac{\sum_{j=1}^n \tan \beta_j L_j}{\sum_{j=1}^n L_j} \quad (3.4)$$

In virtù della maggiore “dispersione del deflusso” da una cella a quelle di valle che caratterizza l’algoritmo Multiple Flow, le distribuzioni d’area drenata ottenute da esso risultano organizzate in modo più graduale di quelle derivanti dai precedenti algoritmi. Sotto sono riportate tre immagini raffiguranti l’area drenata espressa in forma logaritmica

calcolata rispettivamente mediante l'algoritmo D8 (Figura 3.5a), l'algoritmo D• (Figura 3.5b) e l'algoritmo Multiple Flow (Figura 3.5c).

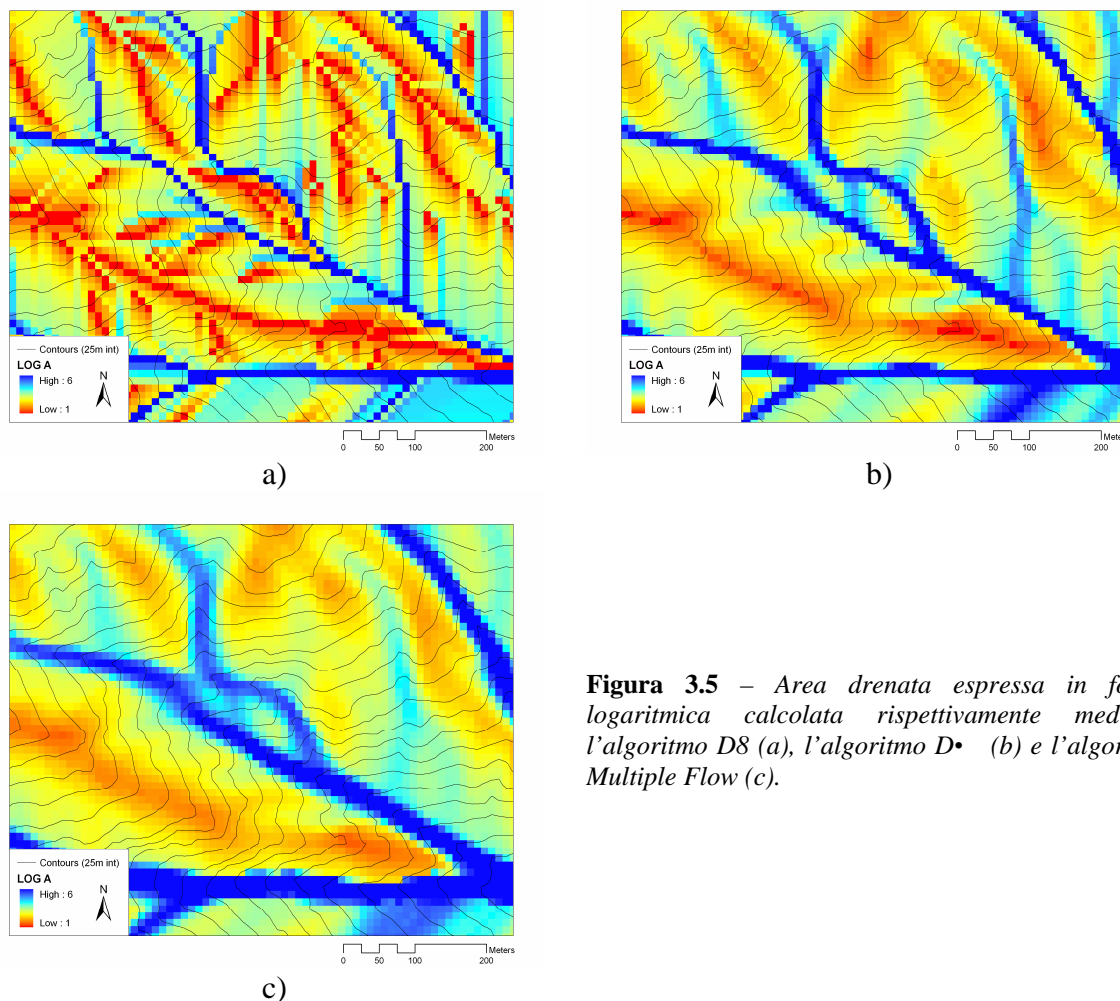


Figura 3.5 – Area drenata espressa in forma logaritmica calcolata rispettivamente mediante l'algoritmo D8 (a), l'algoritmo D• (b) e l'algoritmo Multiple Flow (c).

Confrontando i grafici dell'area drenata ottenuti con i tre algoritmi, si nota immediatamente che il D8 da un'interpretazione molto schematica delle direttrici di deflusso, con variazioni tra celle adiacenti anche piuttosto elevate. Gli algoritmi D• e Multiple Flow, invece, permettono di ottenere grafici che presentano variazioni più graduali. In entrambi le direttrici di deflusso sono più marcate. Il Multiple Flow, però, presenta una maggior dispersione rispetto al D•. Si nota, infatti, una minore percezione delle superfici a minor deflusso ed una maggiore concentrazione lungo le direttrici principali. Si ritiene quindi più efficace l'algoritmo D• in quanto rappresenta il giusto compromesso tra il D8 ed il Multiple Flow.

3.3. Relazione area-pendenza

La forma morfologica di un bacino è determinata dall'interazione dei differenti processi erosivi in atto nel bacino stesso. Dall'analisi della morfologia, è perciò possibile stabilire il processo erosivo dominante e la soglia morfologica che lo discrimina dagli altri processi (Montgomery and Foufoula-Georgiou, 1993; Ijjasz-Vasquez and Bras, 1995; Tucker and Bras, 1998; Stock and Dietrich, 2003, McNamara et al., 2006). Tale analisi viene effettuata attraverso la relazione tra pendenza locale ed area drenata considerando tutte le celle presenti nel raster rappresentante il bacino. Inserendo i dati di pendenza mediati su intervalli regolari di classi di area, si ottiene un grafico in scala logaritmica con un andamento caratteristico (Figura 3.6).

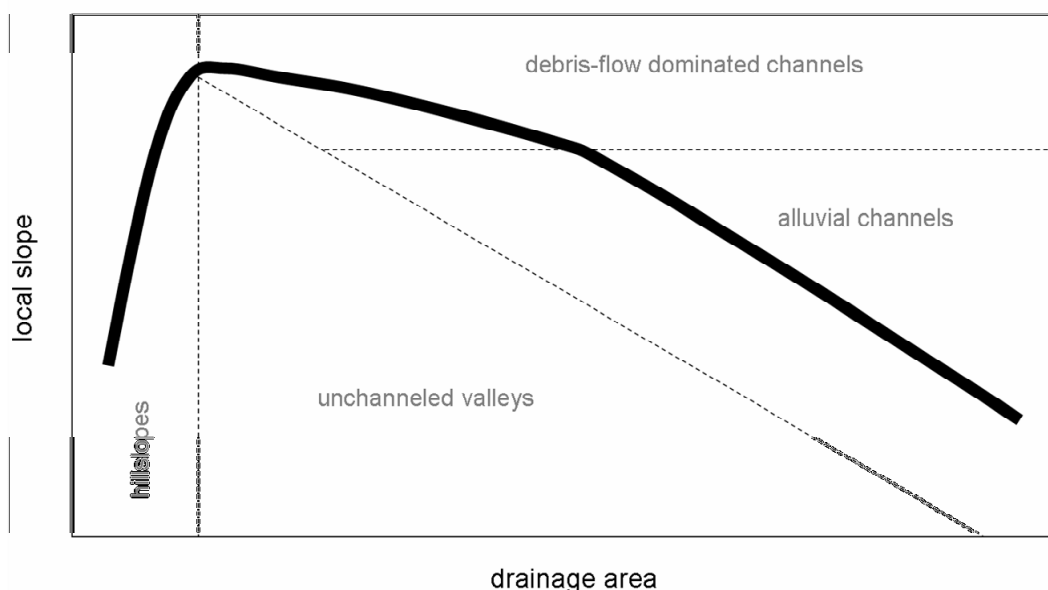


Figura 3.6 – *Illustrazione schematica della relazione tra area drenata e pendenza locale (Montgomery e Foufoula-Georgiou, 1993).*

Osservando l'andamento della relazione area-pendenza si possono distinguere delle zone, con gradiente costante, indicanti potenzialmente il processo geomorfologico dominante per quel settore di bacino. Nel settore di sinistra (hillslopes), a fronte di una pendenza locale anche molto elevata con gradiente positivo, i valori di area drenata sono ridotti. Questa parte della relazione fa riferimento alla superficie superiore del bacino dove prevalgono i processi di versante. Qui il deflusso superficiale, pur possedendo elevata energia cinetica, si propaga in maniera distribuita contribuendo a fenomeni di erosione non canalizzati più o meno diffusi. Nel settore superiore (debris-flow dominated channels) la relazione presenta un lieve gradiente negativo dopo aver raggiunto l'apice, il quale indica la soglia

morfologica oltre la quale iniziano i processi canalizzati. La pendenza locale si mantiene elevata mentre l'area drenata aumenta notevolmente. L'aumento dell'area drenata in relazione con pendenze elevate, favorisce lo sviluppo dei processi di formazione dei canali. A parità di valori elevati di pendenza, l'incremento progressivo in area drenata è indice anche di una maggiore capacità di erosione dovuta a deflusso maggiore. Questo favorisce il manifestarsi di fenomeni di franamento superficiale che il più delle volte evolvono in colate detritiche. Nel settore di destra (alluvial channel) la pendenza locale diminuisce sempre più a fronte di un progressivo aumento di area drenata. Ci troviamo nella parte inferiore del bacino dove i processi geomorfologici dominanti sono quelli canalizzati. Il deflusso, che qui si può intendere come portata del reticolo idrografico, è elevato ma la pendenza modesta ne limita la capacità erosiva e di trasporto solido.

4. Area di Studio

Le aree oggetto di studio sono 3, tutte situate nelle alpi Carniche, nella regione Friuli Venezia Giulia (Figura 4.1) e riguardano i bacini idrografici del torrente Agozza, del torrente Miozza e del torrente Moscardo. La regione presenta un clima tipico delle Alpi Nord Orientali con brevi periodi di siccità rilevati per lo più durante l'inverno e l'estate ed una precipitazione media annuale superiore ai 2000 mm con valori estremi compresi fra i 1300 mm ed i 2500 mm. Si tratta di una delle aree più piovose dell'Italia. Soprattutto durante l'autunno e la primavera vengono rilevati i picchi massimi di precipitazione. Il deflusso durante i mesi di maggio e giugno è dominato dai processi di scioglimento nivale. Durante gli eventi meteo più intensi sono comuni fenomeni come le piene improvvise, colate detritiche e processi di instabilità alveo versante.

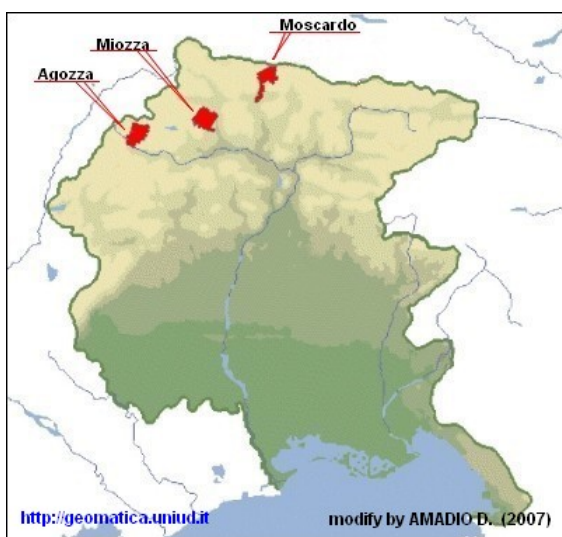


Figura 4.1 – Localizzazione dei bacini idrografici in esame nella regione Friuli Venezia Giulia

4.1 Bacino idrografico del torrente Agozza

Il bacino del torrente Agozza, affluente in sinistra del fiume Tagliamento, ricade all'interno del comune di Forni di Sopra. Nella parte alta (NO) del bacino si trova una fascia di pascoli alpini ai piedi di pareti caratterizzate da forte erosione. In questa area si trovano le maggiori sorgenti di sedimento, che determinano una disponibilità di materiale solido relativamente ampia. La parte intermedia del bacino è caratterizzata da versanti ad elevata pendenza, coperti da fitta vegetazione rappresentata soprattutto da abete rosso. La parte bassa del bacino è caratterizzata da ampie aree di deposito di sedimento.

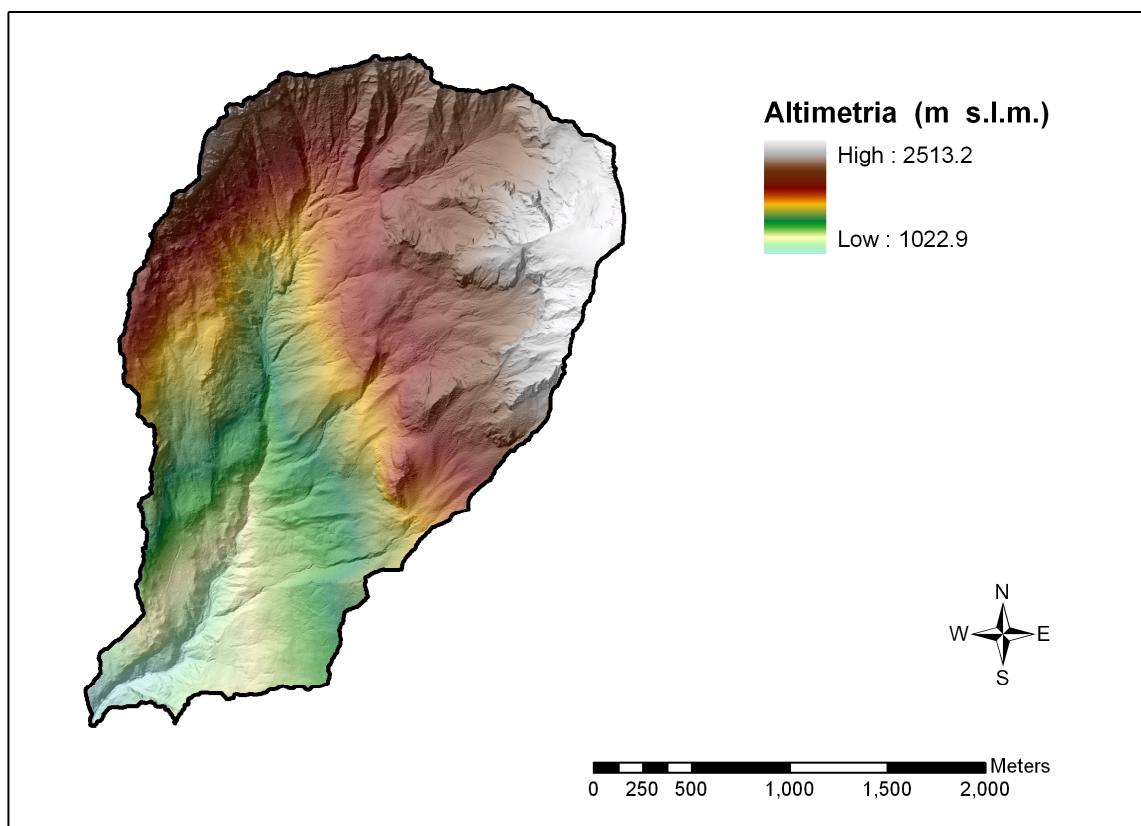


Figura 4.2 – *Bacino idrografico del torrente Agozza*

Tabella 4.1 : *Parametri morfometrici*

Area (km ²)	5.78
Quota minima (m s.l.m.)	1023
Quota media (m s.l.m.)	1719
Quota massima (m s.l.m.)	2513
Pendenza minima (°)	0
Pendenza media (°)	32
Pendenza massima (°)	83

4.2 Bacino idrografico del torrente Miozza

Il torrente Miozza è un affluente di destra del torrente Degano, a sua volta affluente del fiume Tagliamento. Circa il 40% della superficie del bacino è ricoperta da una coltre eluvio-colluviale formata da depositi morenici di fondo misti a detriti sciolti, che rappresenta il substrato ideale per l'innescò di fenomeni franosi superficiali. Si tratta di un'area priva di abitazioni; la presenza dell'uomo è limitata alla sola attività silvopastorale. La vegetazione interessa il 94% del bacino e consiste in foresta ad alto fusto (74%), arbusti (10%) e pascolo di alta quota (10%); il rimanente 6% è rappresentato da formazioni rocciose, detrito, frane. Lo spessore del suolo varia da 0.2-0.5 m a 1.5 m. In questo studio è stato analizzato il sottobacino nord del torrente Miozza.

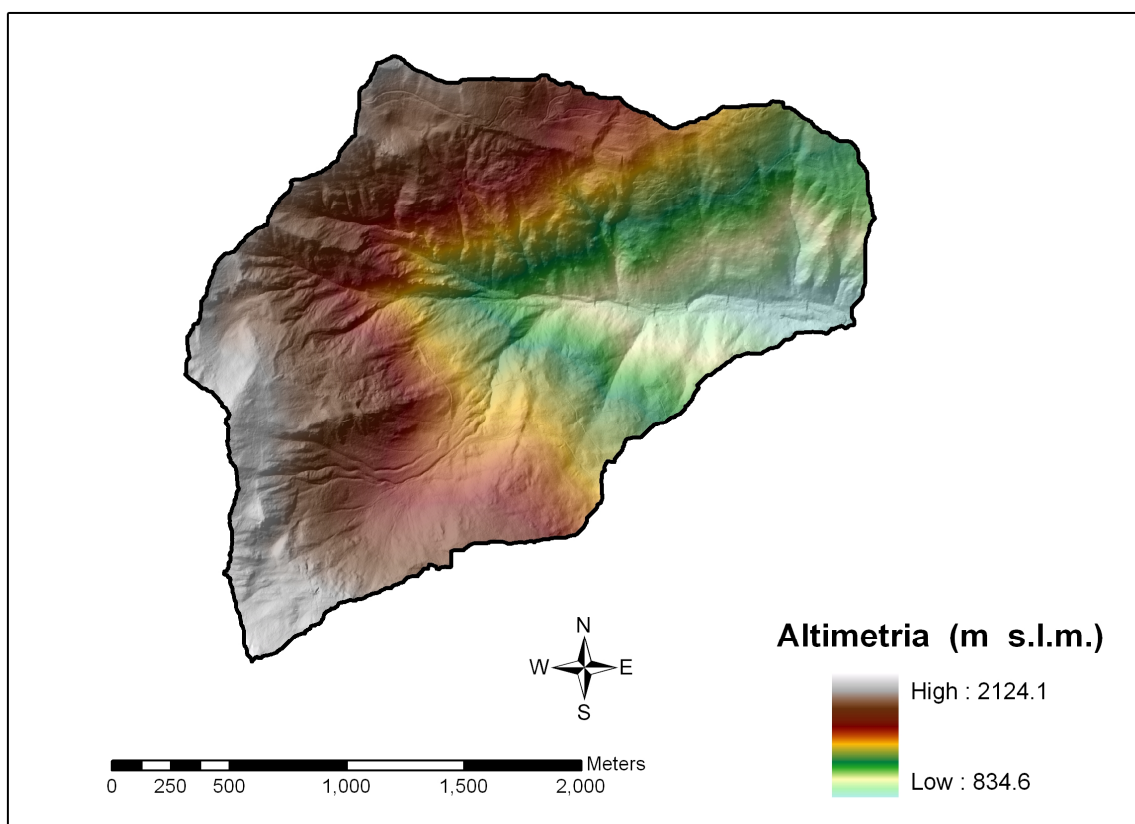


Figura 4.3 – Sottobacino nord del torrente Miozza

Tabella 4.2 : Parametri morfometrici

Area (km ²)	4.44
Quota minima (m s.l.m.)	834
Quota media (m s.l.m.)	1504
Quota massima (m s.l.m.)	2124
Pendenza minima (°)	0
Pendenza media (°)	35
Pendenza massima (°)	74

4.3 Bacino idrografico del torrente Moscardo

Il torrente Moscardo è un affluente in sinistra del torrente But. Il torrente Moscardo ha due affluenti: il rio Laris ed il rio Cenglarins. Il primo, in destra idrografica, proviene da una vasta area in frana: il primo tratto è in erosione, mentre il secondo è sostanzialmente in equilibrio. Il rio Cenglarins è invece un affluente in sinistra idrografica e presenta delle caratteristiche piuttosto diverse dal corso d'acqua principale. Se si esclude, infatti, un'area in frana in sinistra a circa 1185 metri di quota, non si hanno importanti aree sorgenti di sedimentazione sui versanti o lungo l'alveo. In questo studio è stato analizzato il sottobacino sud del torrente Moscardo.

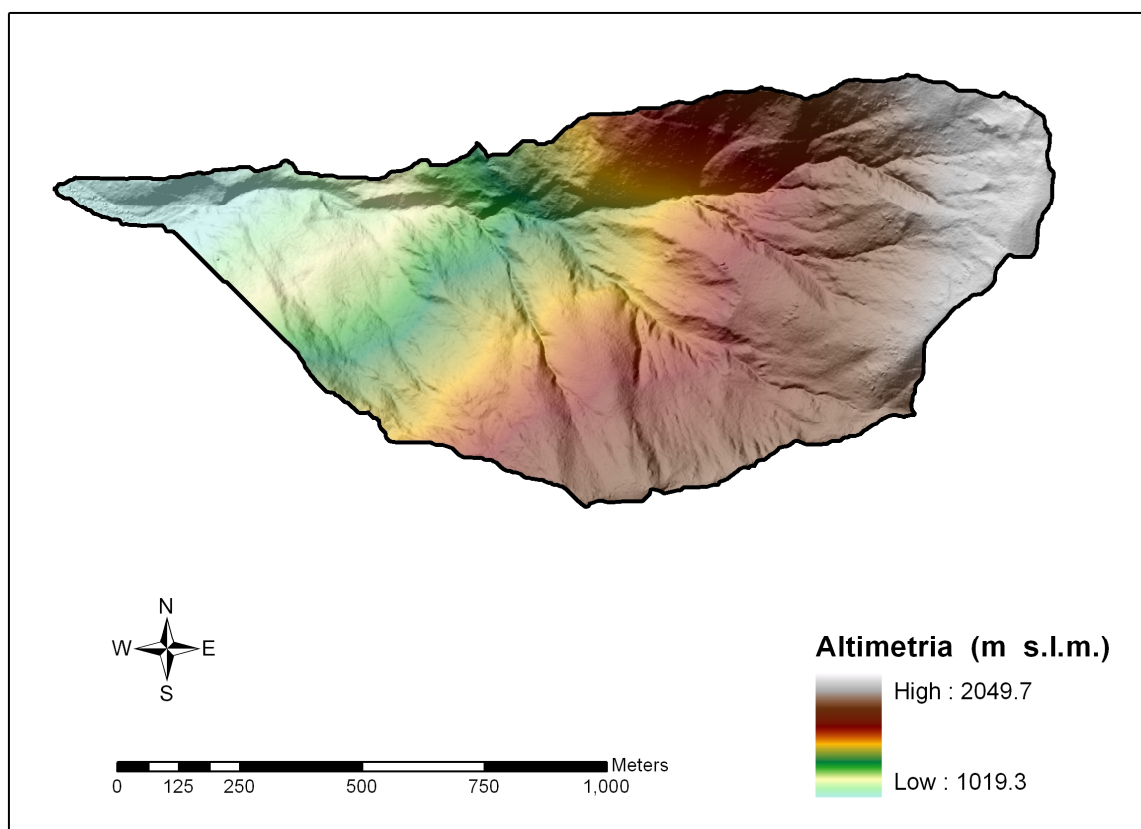


Figura 4.4 – Sottobacino sud del torrente Moscardo

Tabella 4.3 : Parametri morfometrici

Area (km ²)	1.04
Quota minima (m s.l.m.)	1019
Quota media (m s.l.m.)	1591
Quota massima (m s.l.m.)	2049
Pendenza minima (°)	0
Pendenza media (°)	37
Pendenza massima (°)	70

4.4. Rilievo LiDAR

I dati Lidar utilizzati sono stati acquisiti all'interno del Progetto INTERREG IIIA dal titolo *"Ricomposizione della cartografia catastale e uso di nuove tecnologie per la realizzazione di basi di dati topografiche a grande scala in Friuli Venezia Giulia"* svolto in sinergia tra l'Università degli Studi di Udine, la Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, la Commissione Europea e l'Istituto Geodetico della Slovenia. Il sensore LiDAR utilizzato per l'acquisizione dei dati geometrici, è un ALTM 3033 della canadese Optech, montato su un aeromobile Eurocopter AS 350 B2 della società Helica di Amaro (UD). Il progetto INTERREG IIIA ha beneficiato, grazie alla collaborazione con altri istituti sia pubblici che privati, di un sensore iper-spetttrale AISA Eagle prodotto dalla SPECIM. Le campagne di rilievo sono state effettuate durante gli anni 2003-2004. Il volo è stato eseguito ad una quota nominale di circa 1000 m sul terreno, con angolo di scansione di 18 gradi ed una divergenza del fascio luminoso di 0.2 mrad. L'elaborazione delle misure acquisite dallo strumento fornisce le coordinate cartografiche e le relative intensità di riflessione di due echi di ritorno per ogni impulso emesso dal telemetro laser (first & last pulse) per un totale di circa 2 punti/m². I dati così acquisiti sono stati elaborati utilizzando il software commerciale TerrascanTM al fine di ottenere una classificazione dei punti laser in terreno e vegetazione.

A livello qualitativo, il risultato del filtraggio lascia intravedere i limiti della tecnica LiDAR, in quanto solo il 10% dei punti viene classificata come terreno. Al netto del filtraggio, quindi, si dispone di un'informazione altimetrica relativa al terreno con una frequenza di circa 0.2 punti/m². Per quanto riguarda il bacino del torrente Moscardo gli errori del rilievo LiDAR, confrontati con un rilievo topografico a terra eseguito mediante stazione totale, risultano compresi tra i 10 cm quelli planimetrici, mentre quelli altimetrici rientrano per il 95% all'interno dell'intervallo ± 50 cm. Le differenze significative sono minime (solo il 5% supera 1 metro) e limitate alle zone morfologicamente complesse in cui, anche per la riduzione nella frequenza di campionamento dovuta alla presenza della vegetazione, la tecnica LiDAR, alla densità di scansione impiegata, non permette un'acquisizione dettagliata delle linee di discontinuità che caratterizzano le forme morfologiche di piccola estensione (micro-morfologia). L'andamento statistico di tali differenze assume la forma di una distribuzione normale con media pari a 0.01 m e deviazione standard di 0.45 m. (Barilotti et al., 2006).

Tabella 4.4 : Specifiche tecniche del sensore ALTM 3033 fornite dalla Optech

Airborne Module	Operating altitude Elevation accuracy Range resolution Scan angle Swath width Scan frequency Horizontal accuracy Position / Orientation System GPS receiver LASER repetition rate Data storage Beam divergence LASER classification Eyesafe range Power requirements Operating temperature Humidity	175 – 3,000 m nominal 15 cm at 1,200 m; 35 cm at 3,000 m (1 sigma) 1 cm Variable from 0 to $\pm 20^\circ$ Variable from 0 to 0.68 x altitude 0 -100 Hz, depending on scan angle Better than 1/2,000 x altitude Applanix – Optech Custom Novatel Millennium 33 Hz 8 mm digital tape Dual 0.2 mrad (1/e) or 1.0 mrad (1/e) Class IV (FDA CFR 21) 175 m @ 1.0 mrad, 550 m @ 0.2 mrad nominal 28 VDC, 24 A average, 35 A peak 10 – 35° C 0 – 95% non-condensing
Sensor	Fits standard camera mounts or mounts directly to floor Dimension: Overall Minimum Opening Weight	29.6 x 32 x 55.5 cm 16.5 x 22.8 (flight direction) cm 20 Kg (44 lbs)
Control Racks	Two, each in a stackable, vibration-isolated case POLE/LASER: Dimension Weight Computer: Dimension Weight Video output Data storage	60 x 44 x 40 cm 36 Kg with shipping covers 60 x 44 x 49 cm 45 Kg with shipping covers and cables NTSC or PAL (annotated video out) 8 mm digital data tape
Processing Software	REALM Survey Suite	Differential Kinematic GPS solution Trajectory optimization from multiple base-stations XYZ point calculations module Vegetation feature extraction/classification Windows NT/2000 compatible
GPS support	Ground Multiple Base Stations	Sercel NR103T, Trimble 4000/7400, Ashtech Z12 or other Rinex 2.0 compliant device

Di seguito si riportano alcune delle caratteristiche principali del volo LiDAR eseguito sui bacini idrografici studiati.

Tabella 4.5 : *Il bacino idrografico del Torrente Agozza*

Numero di punti	46,030,552
Numero di strisciate	11
Densità media	2.5 p.ti/m ²
Superficie 2D	14 km ²
Periodo di acquisizione	Novembre 2003
Valore minimo di quota	855.9 m (WGS84)
Valore massimo di quota	2129.1 m (WGS84)

Tabella 4.6 : *Il bacino idrografico del Torrente Miozza*

Numero di punti	84,318,706
Numero di strisciate	13
Densità media	2.5 p.ti/m ²
Superficie 2D	23.8 km ²
Periodo di acquisizione	Novembre 2003
Valore minimo di quota	514.7 m (WGS84)
Valore massimo di quota	2125.3 m (WGS84)

Tabella 4.7 : *Il bacino idrografico del Torrente Moscardo*

Numero di punti	55,219,558
Numero di strisciate	11
Densità media	2 p.ti/m ²
Superficie 2D	13.6 km ²
Morfologia del terreno	montuosa - pianeggiante
Periodo di acquisizione	Novembre 2003
Valore minimo di quota	564.7 m (WGS84)
Valore massimo di quota	2092.7 m (WGS84)

5. Discussione dei risultati

5.1 Relazione area pendenza: influenza dell' algoritmo per il calcolo dell' area drenata

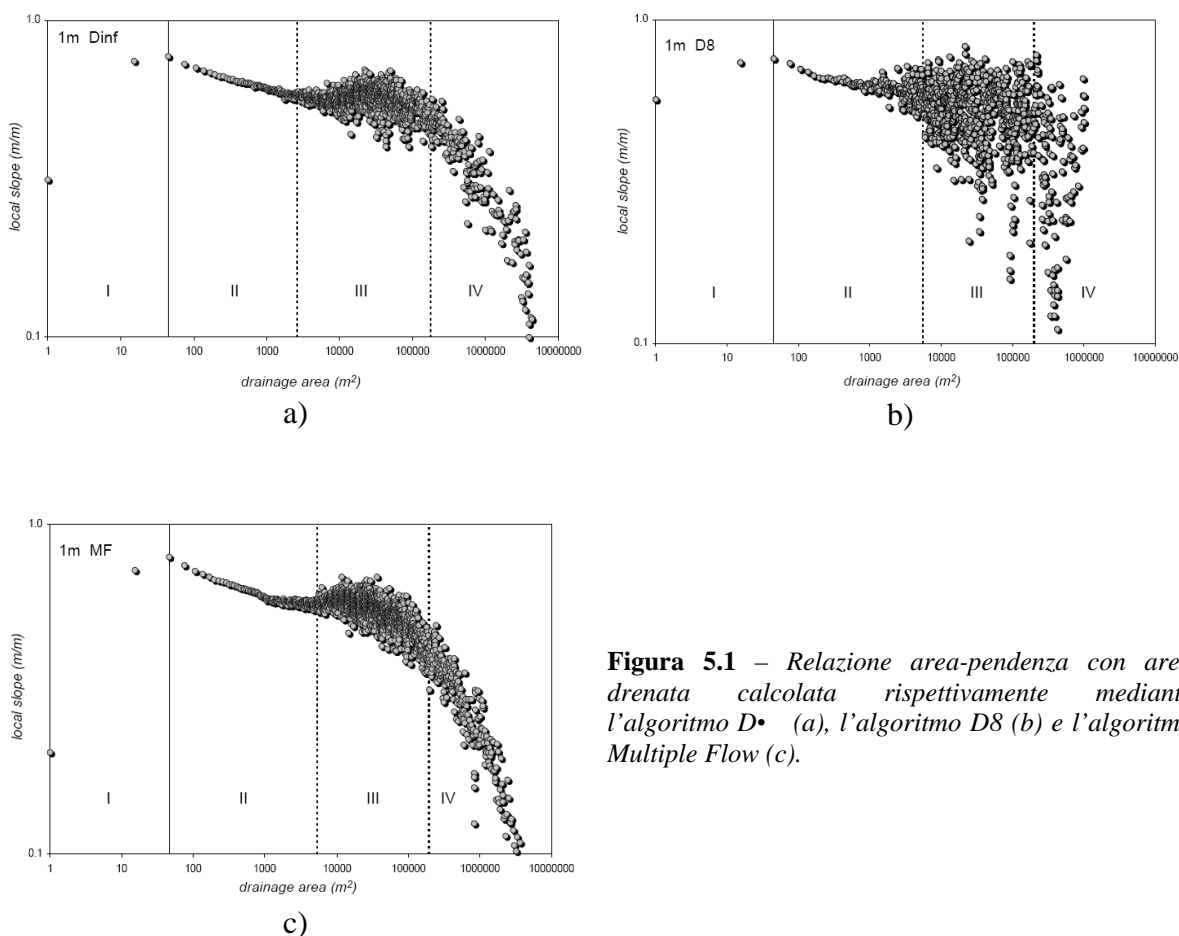


Figura 5.1 – Relazione area-pendenza con area drenata calcolata rispettivamente mediante l' algoritmo D• (a), l' algoritmo D8 (b) e l' algoritmo Multiple Flow (c).

Per l'area di studio del bacino del Miozza è stato effettuato un confronto diagnostico sulle potenzialità dei tre 3 diversi algoritmi di calcolo dell'area drenata nella rappresentazione dei processi idrogeomorfologici dominanti mediante la relazione area-pendenza. La scelta delle dimensioni della cella del DTM, su cui applicare questa analisi, è stata di 1 m perché permette di evidenziare maggiormente le differenze tra gli algoritmi. Tutti i grafici presentano lo stesso andamento nella prima parte (settori I e II), il punto d' inversione di gradiente viene raggiunto per valori molto simili di area drenata e di pendenza, mentre si riscontra una differenza elevata del valore di pendenza relativo al punto iniziale del grafico. Molto più importanti sono invece le differenze nei settori III e IV dei grafici. Il D8 assume una forma molto dispersa nella quale si può notare un cambio di gradiente appena percettibile fra il settore II e III. I grafici ottenuti con gli altri due algoritmi, D• e Multiple Flow, sono invece molto simili e manifestano entrambi una chiara distinzione fra il settore

III e IV. Tuttavia, poiché come viene anche riportato in letteratura (Tarboton, 1997) la procedura D_{∞} di calcolo dell'area drenata risulta come il migliore compromesso fra il metodo D8 e MF, nel presente lavoro di tesi verranno considerati nelle analisi le relazioni area-pendenza derivate solo mediante il calcolo dell'area con il metodo D_{∞} .

5.2. Relazione area pendenza: influenza della risoluzione di cella utilizzata

Per valutare l'influenza della dimensione di cella sulla relazione area-pendenza è stato preso come esempio l'area di studio del bacino del Miozza. È stato fatto un primo confronto tra i raster delle pendenze ottenute dall'analisi di DTM a diverse risoluzioni di cella (App. II). Dalle figure riportate nell'Appendice II si può notare come al diminuire della risoluzione della cella, a parità di classi di pendenza, si assiste ad un progressivo decremento dei valori di pendenza. Man mano che le dimensioni delle celle aumentano, da 1m (Figura 2, App. II), fino a 50 m (Figura 7, App. II), il range di valori della pendenza diventa sempre più ristretto ed omogeneo. Le porzioni di superficie a pendenza elevata, contraddistinte dal colore rosso, diminuiscono fino a scomparire del tutto nelle immagini con dimensione di cella di 30 (Figura 6, App. II) e 50 m (Figura 7, App. II). Il bacino in questo modo appare con una morfologia molto semplificata rispetto alla realtà. Ciò impedisce una corretta analisi dei fenomeni geomorfologici che riguardano il bacino stesso. I risultati sopra riportati vengono espressi con chiarezza dai valori riportati nella Tabella 5.1, dove aumentando le dimensioni della cella (diminuzione della risoluzione) la pendenza massima progressivamente diminuisce, passando da 74.1° a ben 45.2° . Questo è dovuto al fatto che con celle di dimensioni elevate la descrizione delle asperità del terreno diminuisce fortemente perché il valore di elevazione di ogni cella rappresenta una media delle quote reali. In questo modo le superfici maggiormente inclinate subiscono un appiattimento (smoothing effect) quando vengono rappresentate nel DTM e di conseguenza l'intero bacino viene rappresentato con forme molto più dolci rispetto alla realtà. Nella Tabella 5.1 vengono anche riportati i valori di pendenza per le aree in frana del bacino così da evidenziare anche per queste zone l'effetto risoluzione del DTM. Quanto detto appare evidente anche nella Figura 5.2 dove sono rappresentate le curve della pendenza cumulata per diverse dimensioni di cella. A risoluzione maggiore, 1m, la curva della pendenza cumulata è più allargata e raggiunge un valore di pendenza massima superiore alle altre risoluzioni. A risoluzione minore, 50 m, la curva della pendenza cumulata è più concentrata e raggiunge un valore di pendenza massima inferiore.

Tabella 5.1 : *Variazione della pendenza minima e massima al variare della risoluzione*

risoluzione di cella (m)		1	5	10	20	30	50
bacino	pendenza min (°)	0.0	0.1	0.6	3.0	0.4	3.1
bacino	pendenza max (°)	74.1	64.1	58.0	50.6	47.3	45.2
bacino	pendenza media (°)	34.7	34.0	33.2	32.2	31.3	30.1
frane	pendenza min (°)	0.9	11.8	18.9	19.6	21.2	12.9
frane	pendenza max (°)	74.1	64.1	58.0	50.6	45.1	40.8
frane	pendenza media (°)	41.7	40.1	39.0	37.3	36.0	34.5

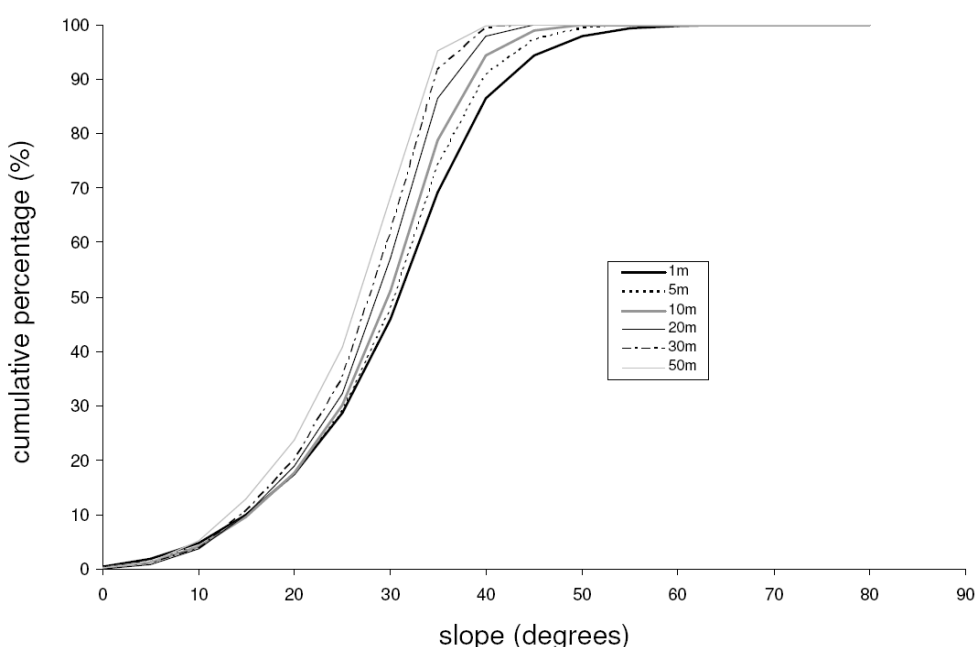


Figura 5.2 – *Variazione della pendenza cumulata al variare della risoluzione di cella*

Nella Figura 5.3 viene riportata l’area drenata cumulata al variare della risoluzione di cella. Anche in questo caso emerge l’influenza della risoluzione sulla distribuzione di area drenata che con risoluzioni più dettagliate presenta per valori di area drenata minori di 1000m² una maggiore estensione sul territorio. La differente risoluzione di cella si ripercuote ovviamente anche sull’interpretazione della relazione area-pendenza. Si sono ricavati i valori d’area drenata e pendenza locale per la costruzione della relazione logaritmica area-pendenza con dimensioni di cella di 1, 5, 10, 20, 30 e 50 m rappresentata nella Figura 5.4. Con risoluzioni di dettaglio, fino a 10 m, si riesce ad avere una migliore identificazione del punto di inversione nel grafico.

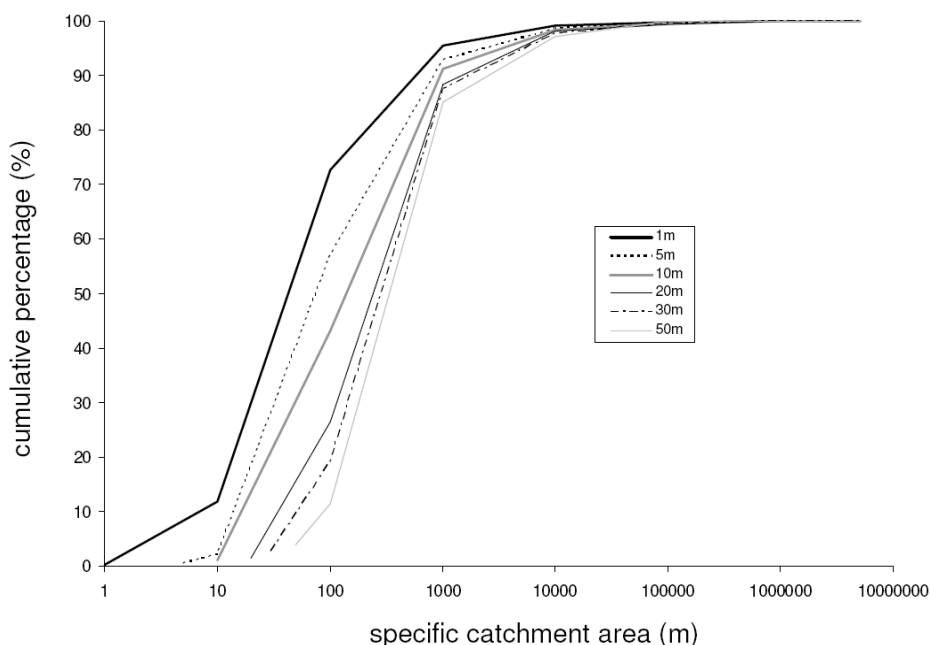


Figura 5.3 – *Variatione dell' area cumulata al variare della risoluzione di cella*

Tale punto rappresenta il limite più probabile nel quale un processo di versante diviene canalizzato, ma non necessariamente l'esatto punto di inizio dei canali. Il valore d'area drenata corrispondente è di circa 45 m². Tale valore aumenta progressivamente all'aumentare delle dimensioni della cella fino a superare i 1000 m² per la risoluzione di 20 m e raggiungere i 10000 m² per la risoluzione di 50 m. Con l'aumentare delle dimensioni della cella diminuisce il numero di dati disponibili (es. figure in App. I) e quindi la qualità del grafico. Fino alla risoluzione di 10 m la relazione ha una forma ben definita e si riescono a distinguere 4 settori caratterizzati da un diverso gradiente. Questa è la base per identificare i diversi processi geomorfologici attivi nel bacino. Ad ogni settore si può associare un processo dominante. Oltre i 20 m di risoluzione i grafici perdono molto di significato. I settori si riducono a 3 e la loro identificazione diventa piuttosto approssimativa. Nei primi 3 grafici (Figura 5.4 a,b,c) il settore III presenta una gobba che, come appurato dai rilievi in campo, indica la presenza di un'area in frana. Tale forma scompare completamente nei grafici successivi, cioè con dimensioni di cella superiore ai 10 m. Inoltre, come si è affermato in precedenza, con dimensione di cella più elevata, 50 m, il valore massimo di pendenza è minore rispetto alla dimensione di 1 m. In conclusione si può ritenere migliore l'utilizzo di un DTM ad elevata risoluzione, 1 m, per il calcolo dell'area drenata e quindi della relazione area-pendenza perché è quello che evidenzia in maniera più dettagliata la presenza di settori differenti per gradiente caratterizzati da

processi geomorfologici dominanti. Nella Figura 1 (App. I) viene con chiarezza evidenziato il dettaglio informativo, ricavato da DTM con risoluzione ad 1m, della morfologia del bacino analizzato.

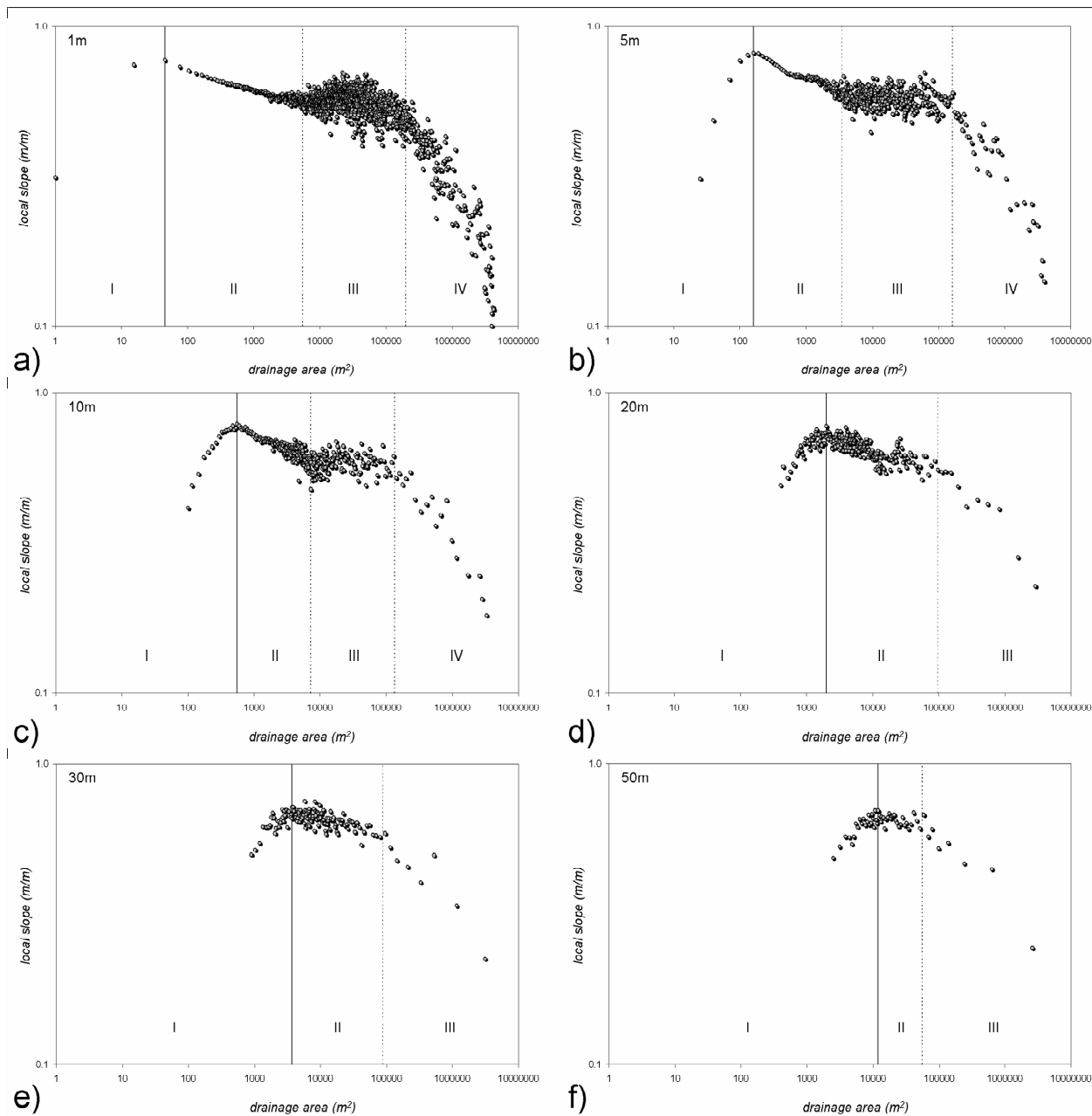


Figura 5.4 – Relazione area drenata-pendenza locale ottenuta mediante dati ricavati da DTM con dimensioni delle celle di 1m (a), 5m (b), 10m (c), 20m (d), 30m (e), 50m (f).

5.3. Analisi processi dominanti nei tre bacini

Per l'analisi dei processi idromorfologici dominanti nei tre bacini presi in esame si sono messe a confronto le relazioni area-pendenza ricavate solamente con DTM a risoluzione di 1 m, quale migliore soluzione per l'identificazione dei processi idromorfologici dominanti.

Agozza

Il grafico relativo al bacino del torrente Agozza presenta un andamento caratteristico, cioè tratto ascendente iniziale e successivo tratto discendente ben definiti, per terminare con una coda più ampia. La transizione tra la zona I, dominata dai processi di versante, e la zona II, dominata dai processi canalizzati avviene ad un valore d'area drenata di circa 15 m². Questo significa che la morfologia del bacino nella parte superiore presenta pendenze sostenute che determinano un elevato gradiente energetico in grado di innescare fin da subito i processi canalizzati. Nel settore II il grafico passa, in maniera repentina, da una forma lineare ad una più diffusa, indice della presenza di un'importante variazione della morfologia del bacino che, però, non si può attribuire con certezza a particolari fenomeni geomorfologici, tipo le frane. Tra la zona II e la zona III c'è una variazione di gradiente, dovuta probabilmente ad una diminuzione della pendenza della valle nel tratto terminale del bacino.

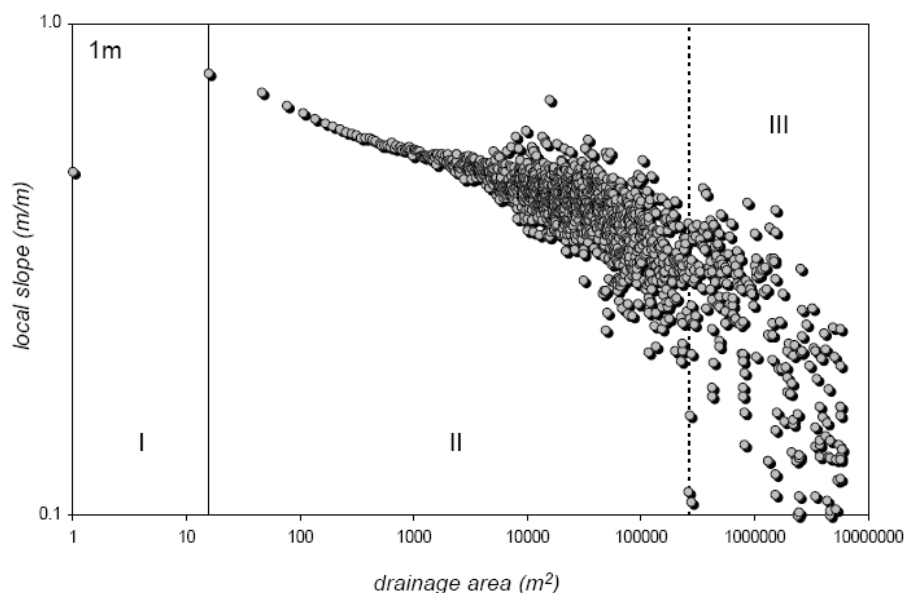


Figura 5.5 – *Relazione area drenata-pendenza locale bacino Agozza con dimensione di cella ad 1 m.*

Miozza

Si rimanda la discussione a quanto detto nel paragrafo 5.2 per la Figura 5.4a. Il grafico relativo al sottobacino nord del torrente Miozza presenta un andamento caratteristico nei settori I, II e IV cioè tratto ascendente iniziale e successivo tratto discendente ben definiti, per terminare con una coda più ampia. La transizione tra la zona I, dominata dai processi di versante, e la zona II, dominata dai processi canalizzati avviene ad un valore di area drenata di circa 45 m^2 . Il settore III presenta una variazione della pendenza della curva ed una forte dispersione dei punti che sta ad indicare una zona dove dominano processi di franamento superficiale. Questo bacino in effetti, come appurato dai rilievi in campo, presenta un'estesa zona in frana. Nel settore IV il gradiente di pendenza cambia indicando che il tratto terminale del bacino, ovvero la zona con i valori maggiori di area drenata, presenta una pendenza modesta.

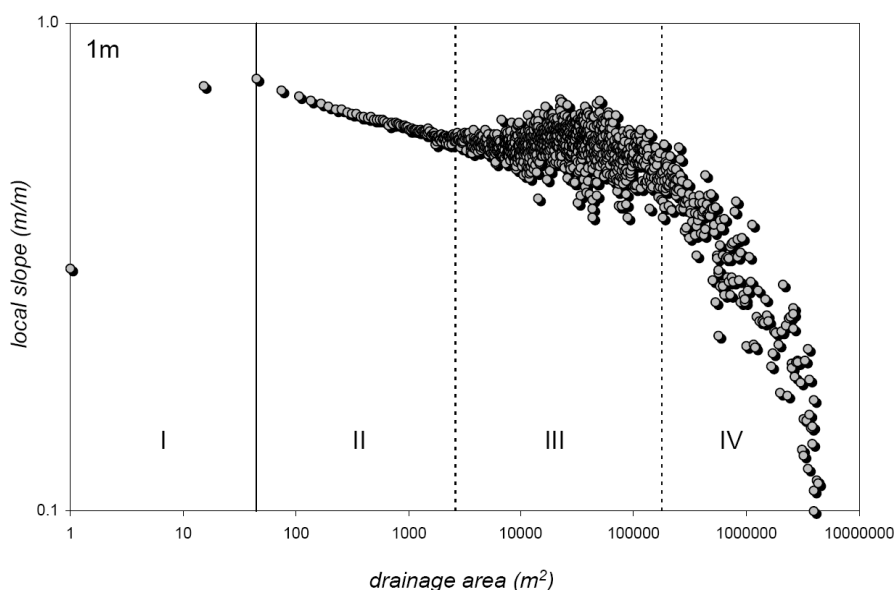


Figura 5.6 – *Relazione area drenata-pendenza locale del bacino Miozza con dimensione di cella ad 1 m.*

Moscardo

Il grafico relativo al sottobacino sud del torrente Moscardo presenta un andamento abbastanza caratteristico. La transizione tra la zona I, dominata dai processi di versante, e la zona II, dominata dai processi canalizzati avviene ad un valore di area drenata di circa 15 m^2 . Questo significa che la morfologia del bacino nella parte superiore presenta pendenze sostenute che determinano un elevato gradiente energetico in grado di innescare fin da subito i processi canalizzati. Il settore II ha un gradiente di pendenza modesto pur aumentando di molto l'area drenata, quindi in tale zona si possono prospettare fenomeni

quali le colate detritiche. Il settore III presenta una lieve variazione di pendenza della curva. Da osservare l'improvviso cambiamento del gradiente della pendenza nel settore IV. Nel tratto terminale del bacino, evidentemente, l'alveo del torrente, ovvero la zona dove si ha la maggiore area drenata, è caratterizzato da una notevole e repentina diminuzione della pendenza.

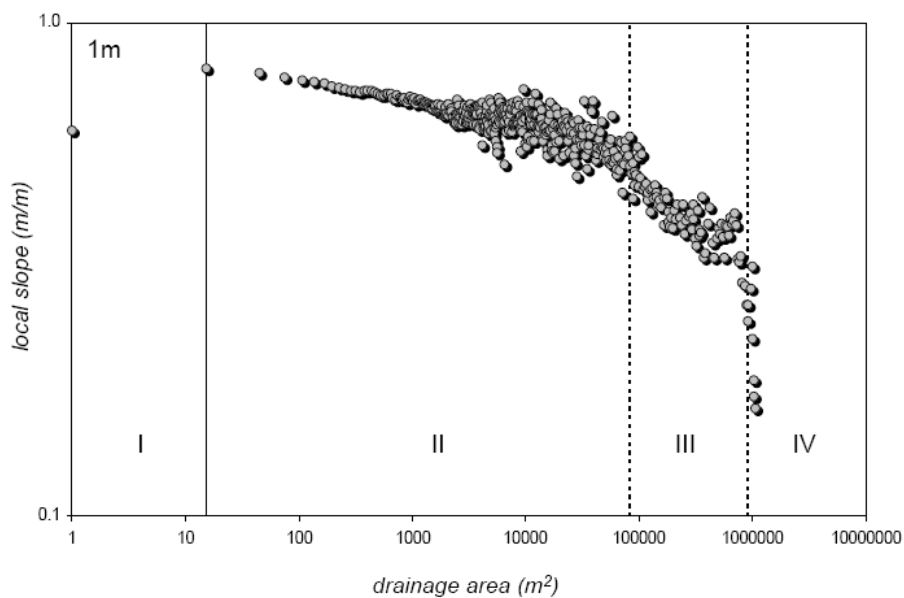


Figura 5.7 – *Relazione area drenata-pendenza locale del bacino Moscardo con dimensione di cella ad 1 m.*

6. Conclusioni

Il lavoro svolto ha riguardato l'analisi delle potenzialità di DTM ad alta risoluzione ricavati da dati LiDAR. E' stata effettuata un'analisi della relazione area-pendenza al variare della dimensione della cella del DTM per l'interpretazione di processi idromorfologici in area alpina. Sono stati considerati 3 bacini alpini della Regione Friuli Venezia Giulia dove negli scorsi anni sono stati effettuati rilievi LiDAR. Le risoluzioni di cella prese in considerazione sono state di 1-5-10-20-30 e 50 metri. I risultati ottenuti mettono in evidenza che risoluzioni di cella elevate (1 m) sono in grado di fornire una rappresentazione della morfologia di un bacino molto simile alla realtà. Questo ha permesso di estrapolare informazioni, quali la pendenza locale e l'area drenata, che inserite in un grafico a scala logaritmica, mostrano una relazione caratteristica in grado di descrivere quali sono i processi idromorfologici dominanti nelle diverse parti del bacino. Il bacino del Miozza e Moscardo pur presentando alcune differenze, presentato una relazione area-pendenza che evidenzia regioni distinte dove prevalgono processi di versante, di erosione, di franamento superficiale e canalizzati. Il bacino dell'Agozza non presenta un chiaro segno topografico di processi di franamento superficiale e/o colata detritica in atto: è infatti assente nella Figura 5.5 la caratteristica regione indicatrice di processi di frana. Nella stessa figura si possono distinguere invece con chiarezza aree con dominanza di processi di versante, di erosione e canalizzati. Tutti questi dati estrapolati dall'interpretazione della relazione area-pendenza trovano riscontro con la reale situazione del territorio per i tre bacini esaminati. Il bacino del Miozza e del Moscardo sono infatti caratterizzati da evidenti fenomeni di franamento superficiale e colata detritica. La possibilità di eseguire questo tipo di analisi su DTM di qualità sempre maggiore rende i risultati sempre più affidabili e confrontabili con la realtà. Prima era impensabile avere DTM così precisi per zone poco praticabili e con densa copertura vegetale. La tecnologia LiDAR rappresenta senza alcun dubbio uno strumento strategico per l'analisi idro-geomorfologica del territorio gettando le basi di un nuovo capitolo per questo settore disciplinare.

7. Bibliografia

- 1) Barilotti, A., A. Beinat, B. Fico, and E. Sossai (2006), Produzione e verifica di DTM da rilievi LiDAR aerei su aree montane ricoperte da foresta, 51° Convegno Nazionale della Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia, Castellaneta Marina 14-16/6, Taranto, Italy, pp. 9, ISBN 88-901939-2-1.
- 2) Dalla Fontana, G., and L. Marchi (2003), Pendenza-area relationships and sediment dynamics in two alpine streams. *Hydrological Processes*, 17(1), 73-87
- 3) Desmet, P. J., J. Poesen, G. Govers, and K. Vandaele (1999), Importance of pendenza gradient and contributing area for optimal prediction of the initiation and trajectory of ephemeral gullies, *Catena*, 37, 377-392.
- 4) Glenn, N. F., D. R. Streutker, D. J. Chadwick, G. D. Tahckray, and S. J. Dorsch (2006), Analysis of LIDAR-derived topography information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity, *Geomorphology*, 73, 131-148.
- 5) Ijjasz-Vasquez, E., and R. L. Bras (1995), Scaling regimes of local pendenza versus contributing area in digital elevation models, *Geomorphology*, 12(4), 299–311.
- 6) McKean, J., and J. Roering (2004), Objectivelandslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology*, 57, 331-351.
- 7) McNamara, J. P., A. D. Ziegler, S. H. Wood, and J. B. Vogler (2006), Channel head locations with respect to geomorphologic thresholds derived from a digital elevation model: A case study in northern Thailand, *Forest Ecology and Management*, 224, 147-156, doi:10.1016/j.foreco.2005.12.014.
- 8) Moglen, G. E., and R. L. Bras (1995), The importance of spatially heterogeneous erosivity and the cumulative area distribution within a basin evolution model. *Geomorphology*, 12 (4), 173-185.

- 9) Montgomery, D. R., and E. Foufoula-Georgiou (1993), Channel network source representation using digital elevation models, *Water Resour. Res.*, 29(12), 3925–3934.
- 10) O’Callaghan, J., and D. Mark (1984), The extraction of drainage networks from digital elevation models. *Computer Vision Graphics and Image Processing*, 28, 328–344.
- 11) Prosser, I. P., and B. Abernethy (1996), Predicting the topographic limits to a gully network using digital terrain model and process threshold. *Water Resources Research*, 32 (7), 2289-2298.
- 12) Quinn, P., K. Beven, P. Chevallier and O. Planchon (1991), "The Prediction of Hillpendenza Flow Paths for Distributed Hydrological Modeling Using Digital Terrain Models," *Hydrological Processes*, 5: 59-80.
- 13) Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Progetto Interreg IIIA Italia-Slovenia 2000-2006. *Ricomposizione della cartografia catastale e uso di nuove tecnologie per la realizzazione di basi di dati topografiche a grande scala in Friuli Venezia Giulia*. Università degli studi di Udine, Dipartimento di Georisorse e Territorio
- 14) Stock, J., and W. E. Dietrich (2003), Valley incision by debris flows: Evidence of a topographic signature, *Water Resource Research*, 39(4), 1089, doi:10.1029/2001WR001057.
- 15) Storesund, R., and J. Minear (2006), Evaluation of Ground-Based LiDAR for use in Fluvial Geomorphology and River Restoration, *Eos Trans. AGU*, 87(52), Fall Meet. Suppl., Abstract G53C-0915.
- 16) Tarboton, D. G. (1997), A new method for the determination of flow directions and uppendenza areas in grid digital elevation models, *Water Resour. Res.*, 33, 309–319.

- 17) Tarolli, P., and D. G. Tarboton (2006). A New Method for Determination of Most Likely Landslide Initiation Points and the Evaluation of Digital Terrain Model Scale in Terrain Stability Mapping, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 663-677.
- 18) Tarolli, P. (2007), Potenzialità della tecnologia per l'analisi e l'interpretazione delle caratteristiche del sistema alveo versante in area alpina, presentazione workshop LiDAR, Dip. Tesaf, Università di padova.
- 19) Tarolli, P., and G. Dalla Fontana (2007), Analysis of the headwater basins' morphology by high resolution LiDAR-derived DTM, Proceedings at the 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology, Padova, 28-30 Maggio 2007.
- 20) Tarolli, P., and G. Dalla Fontana (2006a), Evaluation of LIDAR DEM resolution to terrain stability hazard mapping. *Geophysical Research Abstracts*, 8, 03503. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-03503
- 21) Tarolli, P., and G. Dalla Fontana (2006b), The accuracy and limits of high resolution LiDAR-derived DEM for the analysis of topographic surface and some related physical processes. *Eos Trans. AGU* 87(52): Fall Meet. Suppl., Abstract H53B-0628.
- 22) Tucker, G. E., and R. L. Bras (1998), Hillslope processes, drainage density, and landscape morphology, *Water Resour. Res.*, 34, 2751– 2764

Siti web consultati

- www.blomasa.com
- www.quantasystem.com
- <http://geomatica.uniud.it>
- www.optech.ca
- www.helica.it

Ringraziamenti

Desidero ringraziare la mia famiglia ed in particolare i miei genitori che mi hanno sopportato per altri 5 anni.

Ringrazio Mauro per avermi aiutato a conciliare lavoro e studio e Riccardo per le pacche sulla spalla e le ripetizioni di matematica.

Ringrazio tutti coloro che mi hanno accompagnato durante questa avventura rendendola più piacevole.

Infine un ringraziamento speciale a Catia per avermi dato ancora più forza e determinazione per il raggiungimento del traguardo finale.

APPENDICE I

(ombreggiamento)

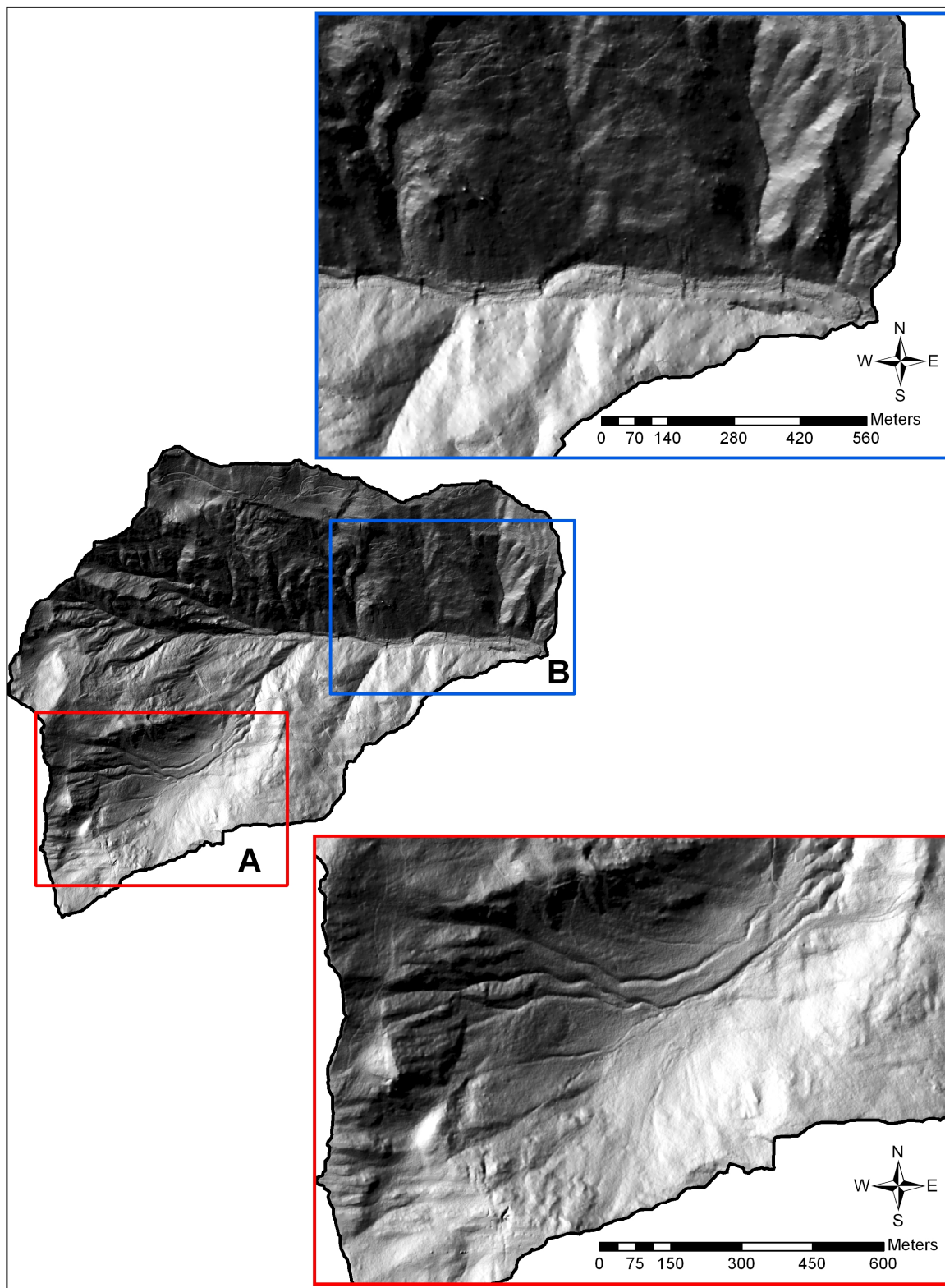


Figura 1 – Immagine del bacino, a risoluzione di 1 m, con ombreggiamento (hillshade): a) particolare di una zona di testata con evidenti segni di erosione, b) particolare della sezione di chiusura con presenza in alveo di alcune briglie.

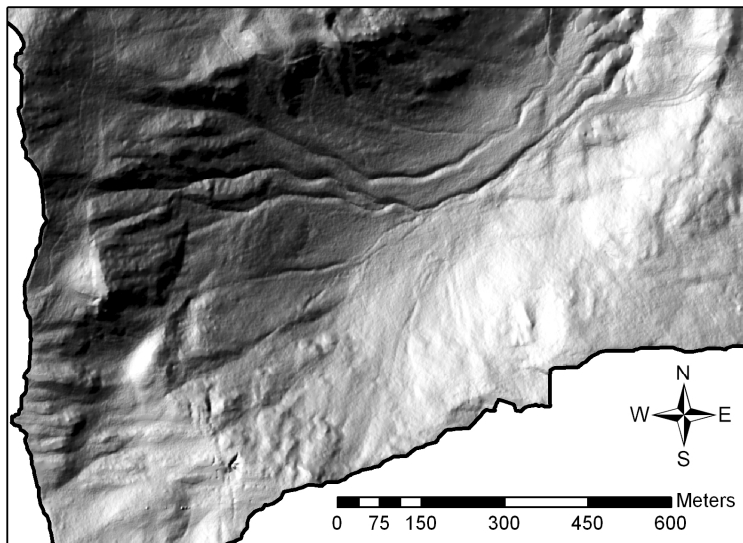


Figura 2 – *Particolare (a)*
con risoluzione di 1 m

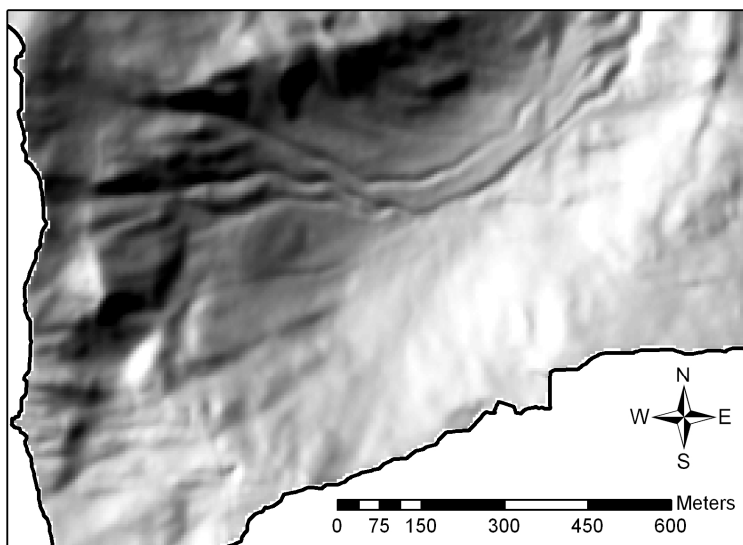


Figura 3 – *Particolare (a)*
con risoluzione di 5 m

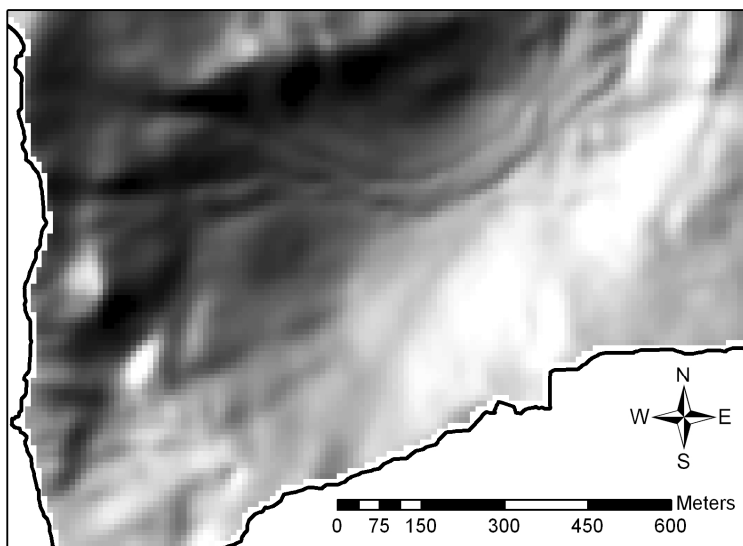


Figura 4 – *Particolare (a)*
con risoluzione di 10 m

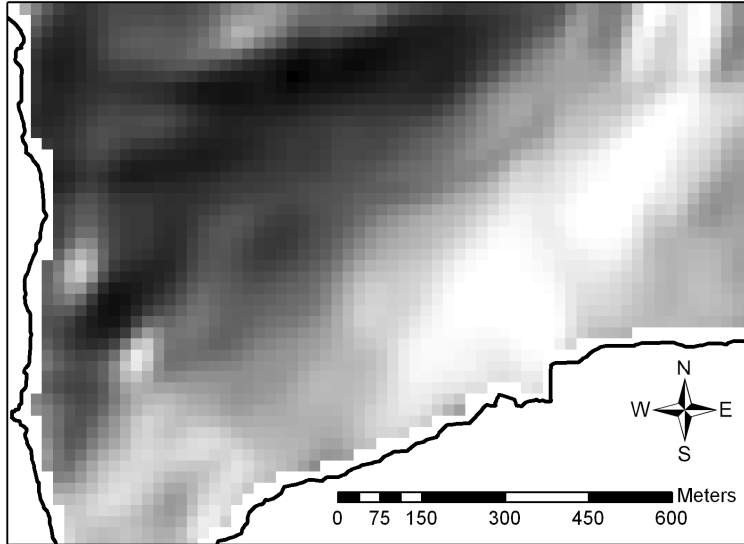


Figura 5 – Particolare (a)
con risoluzione di 20 m

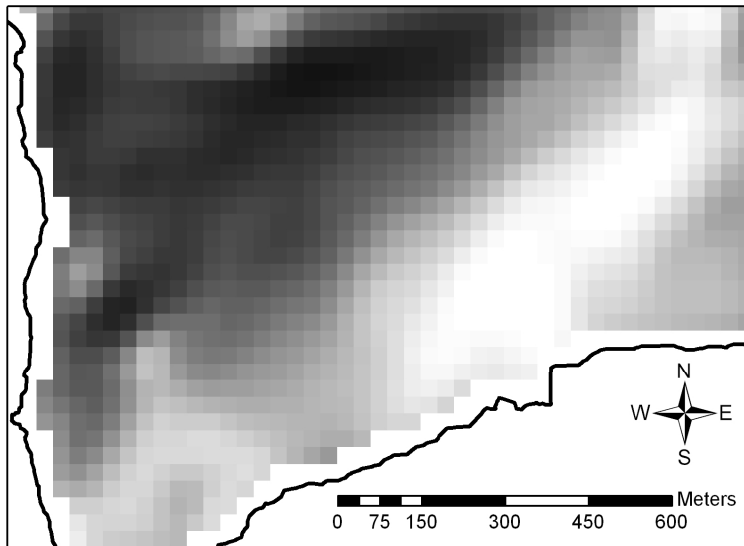


Figura 6 – Particolare (a)
con risoluzione di 30 m

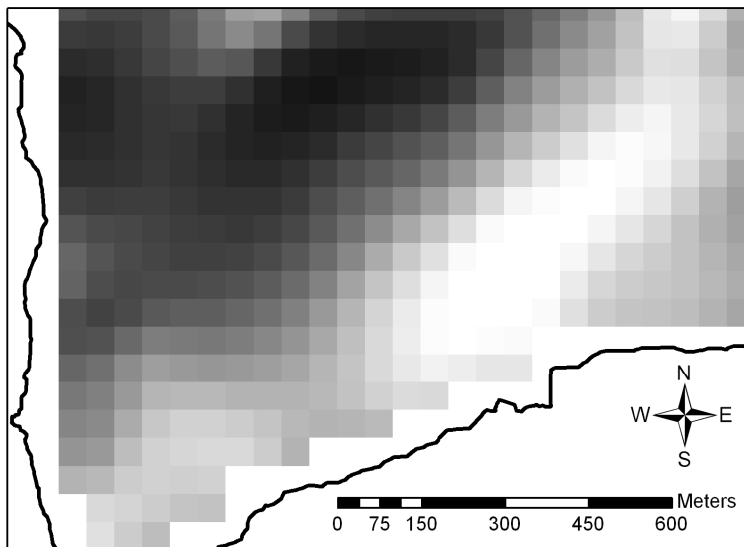


Figura 7 – Particolare (a)
con risoluzione di 50 m

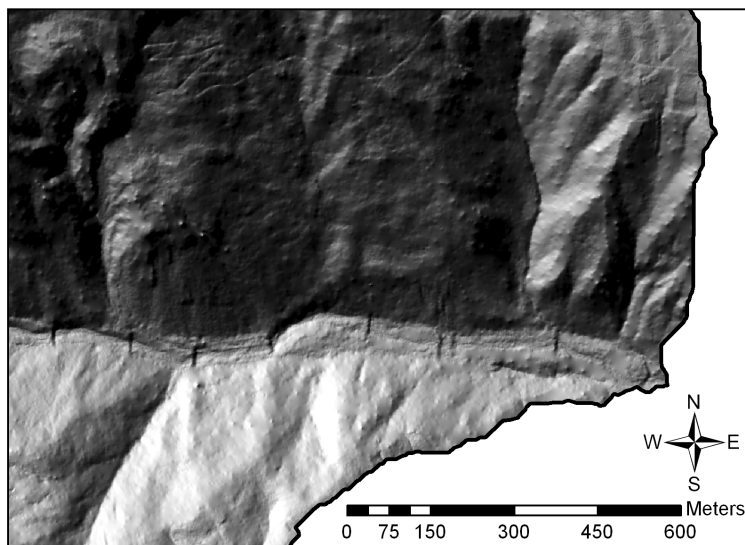


Figura 8 – Particolare (b)
con risoluzione di 1 m

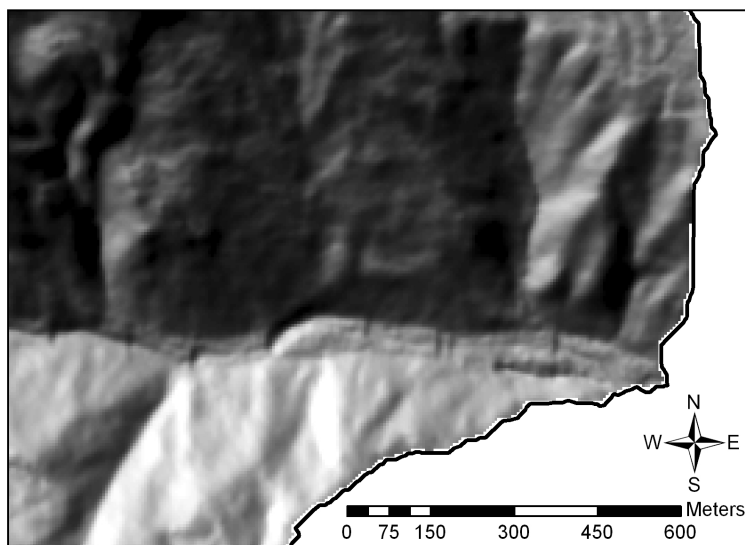


Figura 9 – Particolare (b)
con risoluzione di 5 m

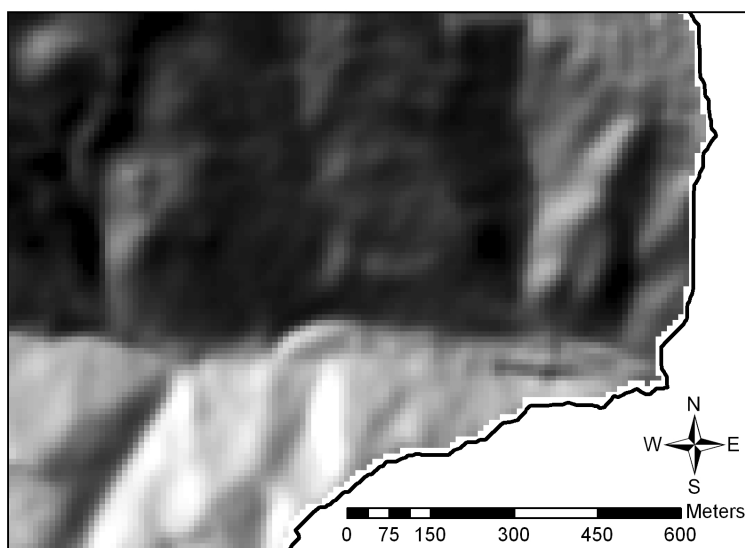


Figura 10 – Particolare (b)
con risoluzione di 10 m

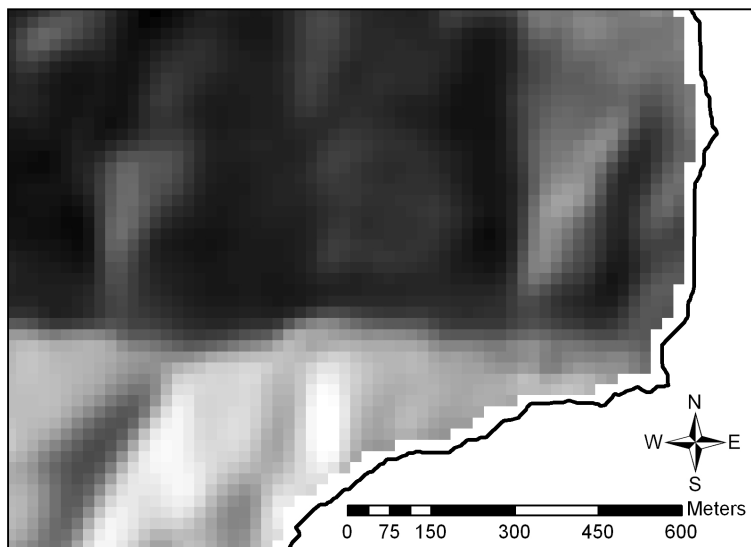


Figura 11 – *Particolare (b)*
con risoluzione di 20 m

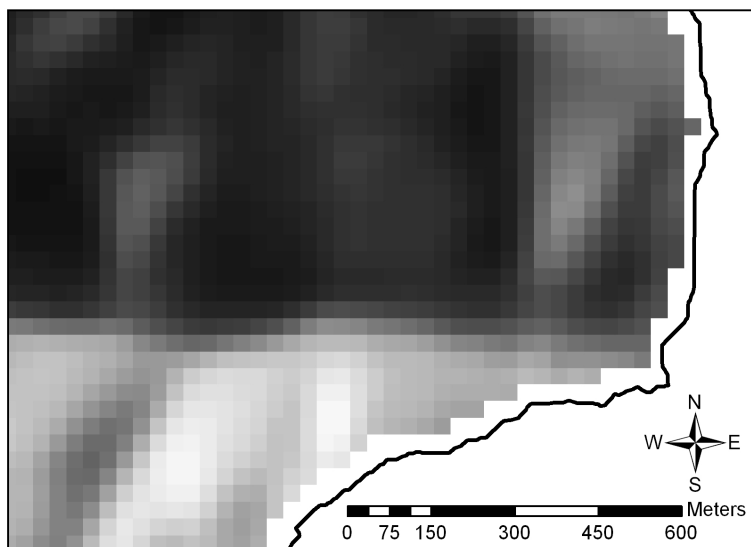


Figura 12 – *Particolare (b)*
con risoluzione di 30 m

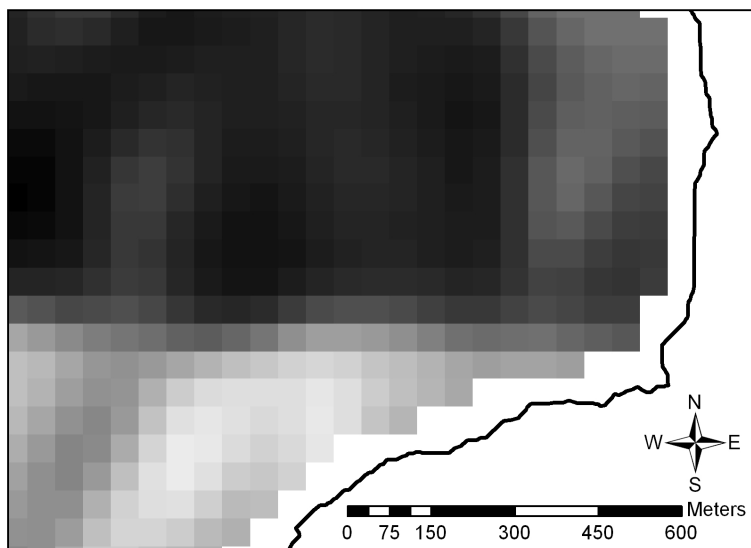


Figura 13 – *Particolare (b)*
con risoluzione di 50 m

APPENDICE II

(pendenza)

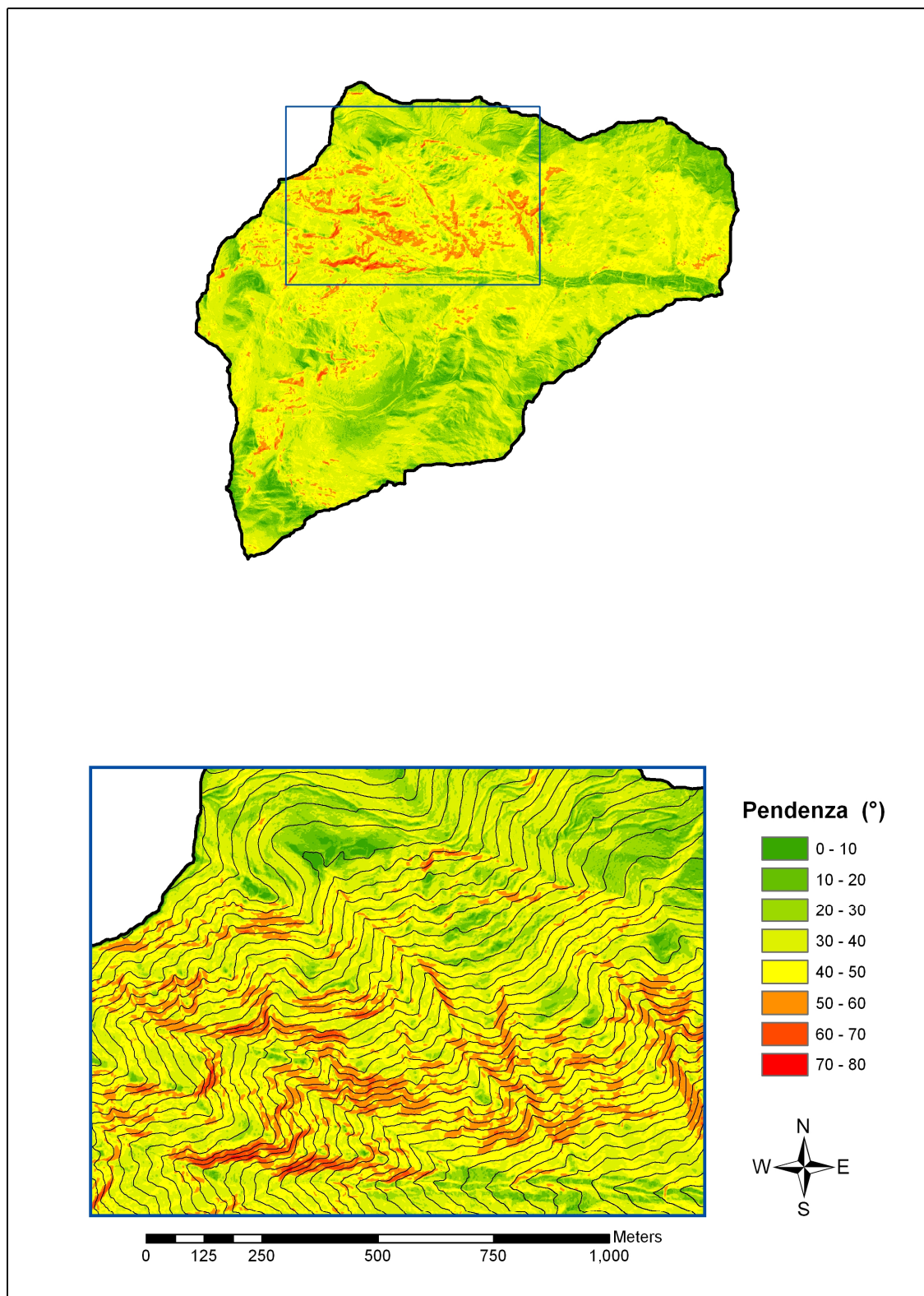


Figura 1 – *Mappa delle pendenze, a risoluzione di 1 m, per il bacino del Miozza: particolare di una zona di testata ad elevata pendenza.*

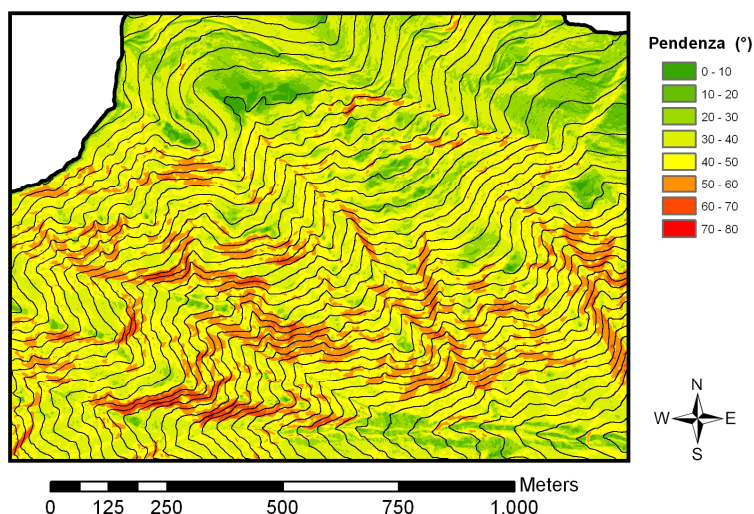


Figura 2 – Mappa pendenze con DTM a risoluzione di cella di 1m. Nella figura vengono messe in evidenza le curve di livello calcolate ogni 20m di intervallo

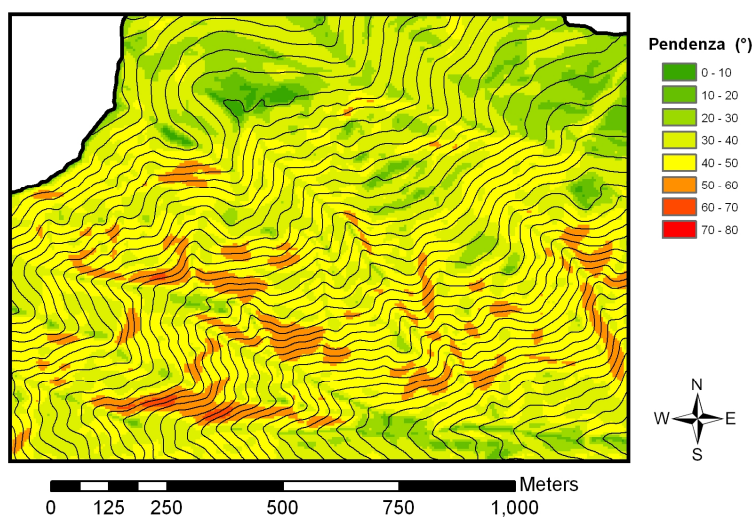


Figura 3 – Mappa pendenze con DTM a risoluzione di cella di 5m. Nella figura vengono messe in evidenza le curve di livello calcolate ogni 20m di intervallo

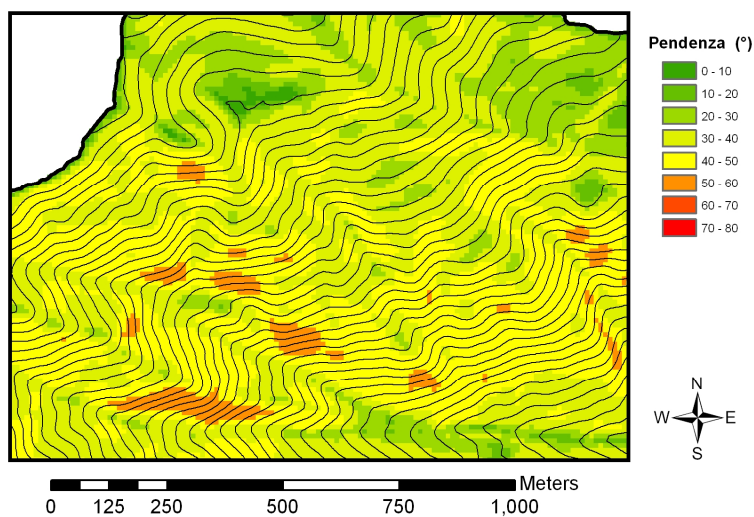


Figura 4 – Mappa pendenze con DTM a risoluzione di cella di 10m. Nella figura vengono messe in evidenza le curve di livello calcolate ogni 20m di intervallo

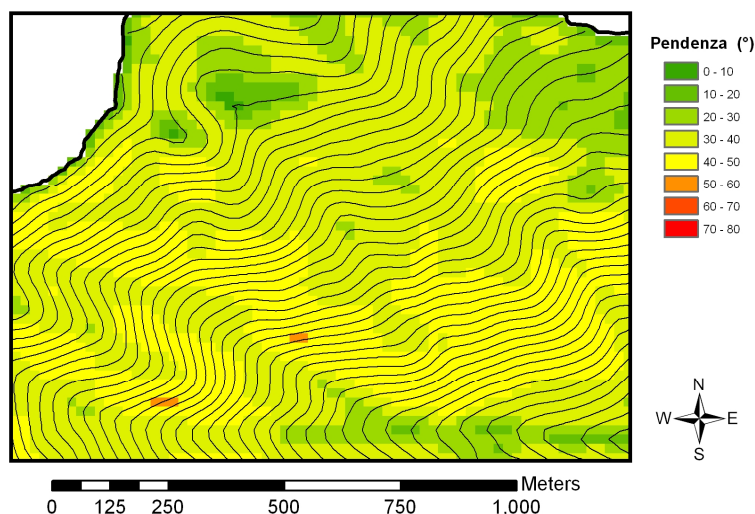


Figura 5 – Mappa pendenze con DTM a risoluzione di cella di 20m. Nella figura vengono messe in evidenza le curve di livello calcolate ogni 20m di intervallo

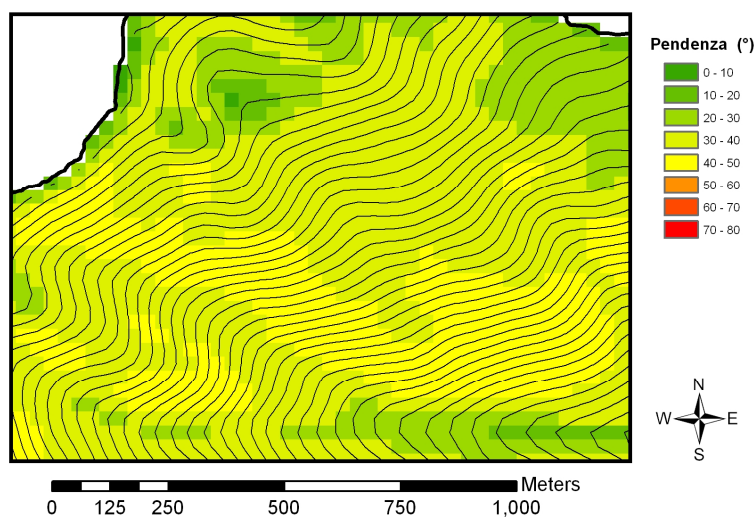


Figura 6 – Mappa pendenze con DTM a risoluzione di cella di 30m. Nella figura vengono messe in evidenza le curve di livello calcolate ogni 20m di intervallo

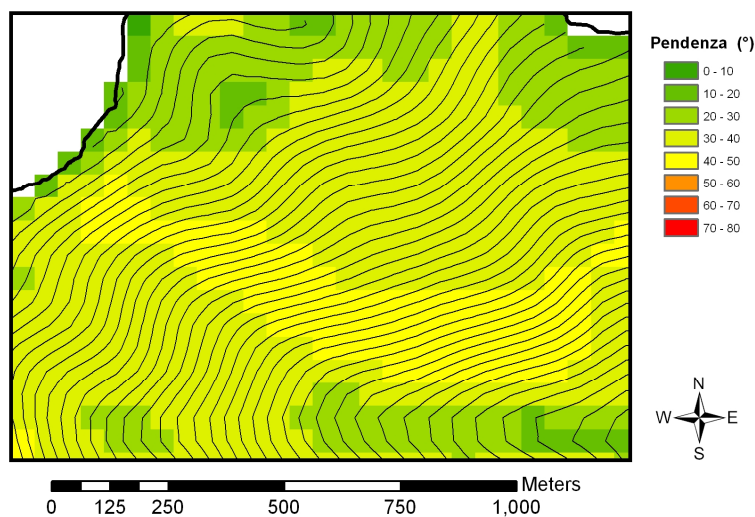


Figura 7 – Mappa pendenze con DTM a risoluzione di cella di 50m. Nella figura vengono messe in evidenza le curve di livello calcolate ogni 20m di intervallo

