



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dip. Territorio e Sistemi Agro-forestali

Corso di Laurea in Scienze Forestali e Ambientali

***IMPIEGO DI DATI LiDAR A SUPPORTO DI INTERVENTI DI
MIGLIORAMENTO DELLA VIABILITA' FORESTALE***

Relatore:

Dott. Stefano Grigolato

Correlatore:

Prof. Raffaele Cavalli

Dott. Marco Pellegrini

Laureando:

Federico Pezzin

Matricola n. 1034602

ANNO ACCADEMICO 2012 - 2013

INDICE

RIASSUNTO	5
ABSTRACT	6
1 INTRODUZIONE	9
1.1 Funzione della viabilità forestale.....	9
1.2 Esigenze di miglioramento della viabilità forestale.....	10
1.3 Tecnologie a supporto della progettazione.....	11
1.4 Possibilità di impiego di dati LiDAR nella progettazione della viabilità forestale	12
1.5 Obiettivi	12
2 MATERIALI E METODI	14
2.1 Area di studio.....	14
2.2 Analisi costi di costruzione	16
2.2.1 Acquisizione dati.....	16
2.2.2 Organizzazione dei dati e del foglio di calcolo.....	17
2.2.3 Analisi dei dati	20
2.3 Analisi precisione del dato LiDAR	24
2.3.1 Protocollo rilievi a terra.....	25
2.3.2 Metodo per il confronto dei dati a terra con i dati LiDAR	27
2.3.3 Analisi dell'errore	29
2.4 Applicazione del dato LiDAR.....	29
2.4.1 Progettazione di un nuovo tracciato	30
2.4.2 Miglioramento di un tracciato esistente	31
3 RISULTATI	32
3.1 Costi di costruzione	32
3.1.1 Standard attuali	32
3.1.2 Standard intermedi.....	33
3.1.3 Standard elevati.....	34
3.2 Precisione del dato LiDAR.....	35
3.2.1 Verifica dell'accuratezza del dato LiDAR	36
3.2.2 Modello per la stima della precisione in relazione alla densità dei punti a terra	40
3.3 Applicazione del dato LiDAR.....	41
3.3.1 Progettazione del nuovo tracciato	41
3.3.2 Miglioramento di un tracciato esistente	42

4	DISCUSSIONE RISULTATI	44
4.1	Costi di costruzione e di miglioramento della viabilità forestale	44
4.2	Valutazione sull'applicabilità del dato LiDAR	45
5	CONCLUSIONI	47
6	BIBLIOGRAFIA.....	48
	ALLEGATI	51

RIASSUNTO

La viabilità forestale rappresenta l'elemento basilare per permettere una gestione del bosco efficiente. Tuttavia, essa non è sempre caratterizzata da standard costruttivi che garantiscono un'efficiente utilizzazione dei lotti in termini logistici e in termini di sicurezza per gli operatori.

Nella maggior parte dell'arco alpino la dotazione di viabilità forestale è sufficientemente buona dal punto di vista della densità viaria, tuttavia le strade presenti non sono sempre percorribili dai mezzi deputati all'esbosco quali autocarri e *forwarder*.

Nell'Altopiano dei Sette Comuni, dove attualmente sono operativi sette *forwarder*, si sente la necessità di migliorare la viabilità esistente per migliorare le condizioni operative e logistiche nell'impiego di queste macchine.

In questo studio è stata valutata la possibilità di utilizzare modelli digitali del terreno (DTM), ottenuti da dati LiDAR *full waveform* ad alta densità di punti, nella pianificazione di interventi di miglioramento della viabilità esistente.

È stato quindi fatto uno studio sulla viabilità nel territorio dell'Altopiano dei Sette Comuni, analizzando gli standard costruttivi e i costi di costruzione. Successivamente è stata fatta un'analisi della precisione del dato LiDAR nell'individuazione degli standard costruttivi della viabilità esistente e per finire un'analisi applicata per la modifica di un tracciato esistente con necessità di miglioramento.

ABSTRACT

The forest road network is the basic element to guarantee an efficient management of the forest. However, often the construction standards of the roads does not ensure the rational execution of forest operation, as the access to the logging and landing areas results problematic, especially if we consider the safety of the operators that work in the forest.

In the majority of the Alpine area, the presence of forest road network is good enough considering the road density value, but the roads are often not adapt to support the traffic of big machine like trucks and forwarder that nowadays are mostly used in logs extraction and transportation. This lack in adequate road standards result in higher extraction costs.

In the "*Altopiano dei Sette Comuni*", where many forest enterprises recently bought such big machine, there is a need to adapt the existing road network to allow the transit of these vehicles.

In this study, is evaluated the possibility of using Digital Terrain Models (DTM), obtained from high density LiDAR data, to evaluate the possibility of upgrading the existing roads.

In the first part have been conducted a study on the road system of the "*Altopiano dei Sette Comuni*", analyzing the construction standards and the construction costs. Afterwards have been done an analysis of the accuracy of LiDAR data for the identification and characterization of the existing roads standards and finally it was made a practical test to modify an existing path.

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare i miei genitori che mi hanno sostenuto in tutta la mia carriera scolastica e soprattutto in questi ultimi cinque anni di università, i miei fratelli Adriano e Francesca, tutti i familiari e gli amici per essermi stati sempre vicini. Paola per l'aiuto e il sostegno che non mi ha mai fatto mancare.

Un particolare ringraziamento a tutti coloro che hanno reso possibile la realizzazione di questo lavoro. In particolare: il Dott. Diego Sonda per la disponibilità e la pazienza nel chiarire i miei dubbi, il Dott. Giorgio Cocco e la Comunità Montana Spettabile Reggenza Sette Comuni nella persona del Geom. Corrado Tolin, per aver gentilmente fornito gli elaborati tecnici dei progetti di strade forestali. Il Dott. Maurizio Novello e il Dott. De Cesero Ludovico per avermi permesso di visitare i cantieri di alcune strade forestali in fase realizzazione. La guardia boschiva di Lusiana, Sig. Fabio Pozza, per le informazioni e le autorizzazioni relative al comune di Lusiana. Le imprese boschive Maino, Omizzolo, Dalle Ave, Sambugaro, Corazzola e Bussolaro per avermi fornito numerose informazioni sulle problematiche della viabilità forestale dell'Altopiano. Il Dott. Francesco Pirotti per la collaborazione nell'elaborazione dei dati LiDAR.

1 INTRODUZIONE

1.1 Funzione della viabilità forestale

La viabilità forestale è l'elemento infrastrutturale che sta alla base della gestione forestale di un'area e rappresenta la premessa indispensabile per la selvicoltura: "La selvicoltura senza strade è solo un'illusione"(Hippoliti, 2003). È inoltre fondamentale per permettere l'accesso al bosco anche per scopi non indirizzati unicamente alle utilizzazioni, ma anche per la valorizzazione delle altre funzioni del bosco (Cavalli et al., 2013; Marchi e Spinelli, 1997). La legge regionale del Veneto 14/1992 che disciplina la viabilità silvo-pastorale, la definisce come "via di penetrazione situata all'interno di aree forestali e pascolive in cui possono circolare mezzi impiegati nei lavori forestali, di vigilanza e di assistenza sanitaria e veterinaria".

Le funzioni che può svolgere la viabilità forestale sono quindi molteplici, Hippoliti nel 1976 definiva le strade forestali come elementi infrastrutturali che hanno l'unico scopo di favorire le utilizzazioni. Con il passare degli anni invece la funzione delle strade forestali non è più unicamente legata al solo prodotto legnoso, ma si è evoluta pari passo con il cambiamento della concezione del bosco.

Le funzioni che può svolgere la viabilità forestale sono diverse a seconda della nazione e dipendono dalla cultura e dalle tradizioni (Potocnik, 1996). In Italia le strade silvo-pastorali oltre a svolgere la funzione di utilizzazione boschiva, sono anche importanti per la fruizione turistica e ricreativa (Chirici et al., 2003; Cavalli et al, 2010), per la protezione del territorio e la lotta contro gli incendi (Guderzo e Cavalli, 2001; Calvani et al. 1999), per permettere l'accesso alle malghe e favorire le operazioni di soccorso (Grigolato et al., 2012).

La presenza di strade forestali genera però degli impatti sull'ecosistema che non devono essere sottovalutati, esse sono le strutture più espansive e distruttive presenti in bosco quindi devono essere valutate e progettate attentamente (Hayati et al., 2012). L'opinione pubblica tende, infatti, ad essere favorevole nei confronti della presenza di nuove strade per scopi ricreativi mentre presenta timori per strade con finalità produttive (Bengston et al., 1999). Se da un lato la presenza di una rete viaria forestale garantisce numerosi vantaggi, dall'altro comporta uno scompenso notevole in termini di equilibrio idrologico, degradazione di habitat, perdita di superficie forestale,

incremento della pressione antropica e disturbo della fauna selvatica, soprattutto se le strade presentano carenze in termini progettuali (Lugo e Gucinski, 2000).

Per cercare di minimizzare questi aspetti negativi si deve perciò mettere in atto una politica di gestione, che valuti attentamente la pianificazione, la progettazione, la realizzazione e la manutenzione delle infrastrutture viarie necessarie per lo sfruttamento dei beni silvo-pastorali (Cielo et al., 2003).

1.2 Esigenze di miglioramento della viabilità forestale

La viabilità forestale presente nell'area della pedemontana veneta è caratterizzata per la maggior parte da strade trattorabili caratterizzate da una percorribilità limitata, che permette solo l'accesso ai mezzi forestali tradizionali quali trattori con rimorchio forestale e verricello (Cavalli e Grigolato, 2010).

La continua innovazione tecnologica nel settore della meccanizzazione forestale sta registrando negli ultimi anni la presenza di macchine forestali con maggiori capacità di carico e di conseguenza di dimensioni sempre maggiori. Questo ha permesso alle imprese utilizzatrici di poter utilizzare maggiori quantità di legname in minor tempo e di ridurre i costi necessari per l'esbosco. Attualmente, le ditte boschive che si trovano ad operare nel contesto alpino, con particolare riferimento al territorio dell'Altopiano dei Sette Comuni, possono essere dotate di un parco macchine costituito da mezzi forestali semoventi quali *harvester e forwarder* e autocarri e autoarticolati per il trasporto del legname.

Si osserva quindi che le imprese boschive modificano e aggiornano il loro parco macchine più velocemente dell'adattamento da parte dei proprietari boschivi delle proprie strade. Questi mezzi non sono però sempre adatti ad essere utilizzati nella viabilità presente.

A tal proposito, Cavalli et al. (2010) hanno osservato come nell'area della pedemontana veneta la maggior parte delle strade forestali sono trattorabili e poco adatte ad essere sfruttate da una meccanizzazione forestale che si basa su macchine di notevoli dimensioni.

Inoltre, anche lo stato di manutenzione delle strade non garantisce lo sfruttamento delle stesse e la loro percorrenza senza rischi. È stato infatti osservato, che la maggior parte delle strade forestali presenta problemi di erosione legato all'assenza di opere di drenaggio con una conseguente

minore percorribilità e maggiori problemi di carattere ambientale legati alla produzione di sedimento (Pellegrini et al., 2013).

Lo stato di manutenzione e gli standard costruttivi utilizzati attualmente per la costruzione delle strade, non sono pertanto sufficienti a garantire il loro utilizzo in piena sicurezza (Zambon, 2012). C'è quindi la necessità di intervenire al fine di migliorare la percorribilità delle strade e la loro utilità andando a modificare gli standard costruttivi e permettendo la transitabilità dei mezzi ad oggi utilizzati nelle operazioni forestali.

1.3 Tecnologie a supporto della progettazione

La progettazione della viabilità silvo-pastorale ha subito negli anni notevoli cambiamenti legati al continuo sviluppo della tecnologia. In passato, la progettazione si basava su un rilievo tradizionale eseguito a livello di sezioni con clisimetro per il calcolo delle pendenze, bussola per il calcolo degli azimut e cordella metrica per le distanze. Sulla base dei dati rilevati venivano poi redatte le varie tavole, calcolati i volumi ottenendo così il progetto definitivo del nuovo tracciato.

Oggi la tecnologia ha permesso di accantonare parzialmente questi strumenti che sono stati sostituiti da strumenti elettronici, quali telemetro laser e ricevitori GPS. Questa strumentazione è quella attualmente più utilizzata e permette di ottenere risultati con precisioni sufficientemente buone per la pianificazione e successiva progettazione di strade forestali.

Alternativamente, per ottenere rilievi con la massima precisione possibile si può ricorrere all'utilizzo del teodolite, che assicura una precisione elevata anche sotto copertura ma comporta tempi e quindi costi di rilievo eccessivamente elevati per la costruzione di una strada forestale.

A supporto della progettazione e della pianificazione della viabilità forestale negli ultimi vent'anni sono stati sviluppati i Sistemi Informativi Geografici (GIS). Ormai questi sistemi sono ampiamente utilizzati in tutti gli ambiti del settore forestale con svariate metodologie. Numerosi sono gli studi e i lavori fatti per l'utilizzo del GIS nell'ambito della viabilità forestale, sia in termini di pianificazione (Abdi et al., 2009), sia di progettazione (Rogers, 2005) e anche per la valutazione della viabilità esistente (Pellegrini, 2012; Lubello, 2008).

Nell'ambito dei software a supporto della progettazione si stanno diffondendo inoltre specifici software che permettono di progettare l'intera strada sulla base di dati ottenuti con rilievi a terra

o con modelli digitali del terreno (Cielo et al., 2001), e fogli di calcolo (Bruce et al., 2011) e modelli per il calcolo dei costi di costruzione (Ghajar et al., 2013).

Infine nell'ultimo decennio si è sempre più diffuso l'utilizzo di dati LiDAR (*Light Detenction and Ranging*) da aereomobile (*Aerial Laser Scanner - ALS*) per l'ottenimento di DTM ad alta precisione.

1.4 Possibilità di impiego di dati LiDAR nella progettazione della viabilità forestale

La tecnologia LiDAR è ad oggi è tra le tecnologie più studiate e con il maggior potenziale di sviluppo per le analisi in ambito forestale. Negli ultimi anni sono stati sviluppati numerosi studi per la valutazione del suo utilizzo nei vari ambiti forestali, soprattutto nella caratterizzazione idrologia dei bacini idrografici (Cavalli, 2009), nella caratterizzazione dei popolamenti forestali, nella redazione di inventari forestali, nella gestione degli incendi e nella pianificazione delle operazioni forestali (Akay et al., 2009).

A riguardo della possibilità di utilizzo del dato LiDAR per la viabilità forestale numerosi studi hanno dimostrato che i modelli digitali del terreno ottenuti con questa tecnologia permettono la realizzazione di accurate banche dati geografiche della viabilità (White et al., 2010) e di essere strumento di supporto per la progettazione di nuovi tracciati (piano delle viabilità) con elevata precisione. Proprio in quest'ottica numerosi autori hanno dimostrato che l'utilizzo di DTM ottenuti da dato LiDAR consente di calcolare i volumi di scavo con maggior precisione rispetto al rilievo tradizionale (Coulter et al., 2002; Aruga et al., 2005; Contreras et al., 2012) o posizionare i tracciati con un minor costo possibile (Akay et al., 2006 e Stükelberger et al., 2008). Tuttavia rimane ancora sconosciuto l'utilizzo del dato LiDAR per la modifica dei tracciati esistenti.

1.5 Obiettivi

L'utilizzo del dato LiDAR per la progettazione di nuove strade è stato sufficientemente documentato ed è quindi dimostrata la sua affidabilità. Non è chiara invece la sua accuratezza nella riprogettazione dei tracciati esistenti.

Il seguente lavoro ha quindi lo scopo di valutare la precisione del dato LiDAR per il miglioramento della viabilità esistente.

Lo studio è stato suddiviso in tre parti: dapprima è stata analizzata la viabilità esistente in termini di standard e costi di costruzione e sono stati ipotizzati scenari di progettazione con standard

costruttivi superiori a quelli attuali. Nella seconda parte è stata fatta la valutazione della precisione del dato LiDAR per il rilievo della viabilità esistente fuori e sotto copertura. Mentre nella terza parte è stata fatta un'applicazione pratica dell'utilizzo del dato LiDAR per la progettazione di nuovi tracciati e per il miglioramento di quelli esistenti.

2 MATERIALI E METODI

2.1 Area di studio

Lo studio è stato fatto su un'area situata nella parte sud dell'Altopiano dei Sette Comuni in provincia di Vicenza. Il sito, denominato "Boscon", ha una superficie di 32 km², ripartita tra i comuni di Asiago, Lusiana, Roana e in minima parte Lugo Vicentino, Caltrano, Calvene e Cogollo del Cengio. L'area rientra inoltre in uno dei due siti interessati dal volo LiDAR del progetto di ricerca europeo NewFOR (*NEW technologies for a better mountain FORest timber mobilization*) (Figura 2.1).

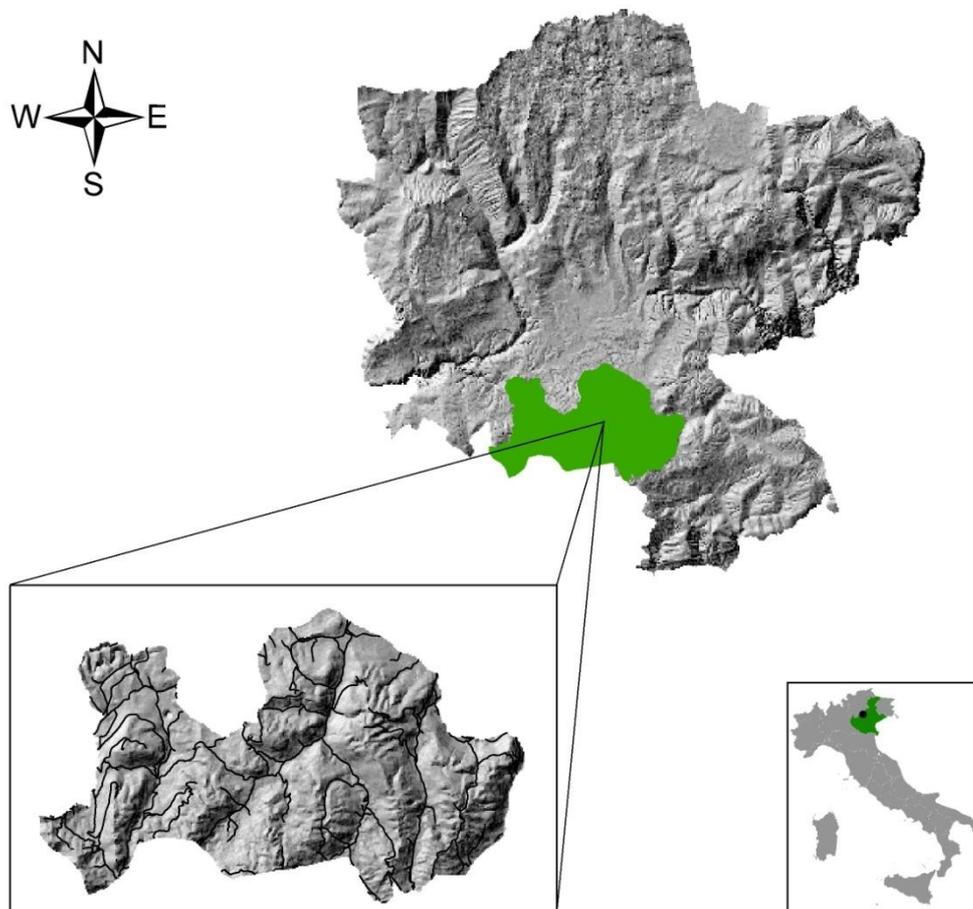


Figura 2.1 Localizzazione dell'area di studio "Boscon".

L'area è costituita prevalentemente da popolamenti di abete rosso (*Picea abies*), abete bianco (*Abies alba*) e faggio (*Fagus sylvatica*), sia in purezza che in formazioni miste, e in minor parte da pascoli (Allegato A: carta di uso del suolo).

L'intera superficie boscata è classificata come foresta produttiva ed costantemente utilizzata. La tecnologia utilizzata dalle imprese boschive per la fase di utilizzazione varia in relazione alla morfologia del territorio. Nelle aree più accessibili vengono utilizzati mezzi di grosse dimensioni (*harvester e forwarder*), mentre nelle aree meno accessibili, per via delle pendenze elevate o dell'eccessiva scabrezza del suolo, vengono utilizzati mezzi tradizionali, quali trattore e verricello, o gru a cavo.

La topografia del sito è caratterizzata dalla presenza di un continuo alternarsi di rilievi e piccole valli con un dislivello che va da 900 a 1500 m s.l.m., le pendenze medie dell'area si attestano intorno al 16 % mentre la pendenza massima arriva al 60 % (Allegato A: carta delle pendenze).

Tutta l'area, come la restante parte dell'Altopiano, è caratterizzata dalla forte presenza del fenomeno del carsismo che evita il ristagno idrico e facilita la percolazione dell'acqua in profondità ma che d'altra parte ostacola le utilizzazioni creando uno scenario ricco di massi sporgenti, salti e doline che rendono difficoltoso l'ingresso dei mezzi in bosco (Figura 2.2).



Figura 2.2 Esempio di terreno ad elevata accidentalità

La viabilità all'interno dell'area è ben distribuita con 100 km di strade di cui 1,5 km di strade di collegamento, 46 km di strade locali multi-funzione e 52,5 km di strade silvo-pastorali con una densità media dell'intera area di 31,3 m/ha. Dei tracciati forestali presenti, solo 4,5 km sono percorribili con autocarri, 16 km con *forwarder* e i restanti 32 km solamente da trattori o *mini-forwarder* (Allegato A: carta della viabilità).

2.2 Analisi costi di costruzione

2.2.1 Acquisizione dati

Lo studio è stato impostato su alcuni progetti di strade silvo-pastorali realizzate negli ultimi dieci anni nel territorio dell'Altopiano dei Sette Comuni e finanziate con la misura 125 dei fondi PSR 2007-2013. Lo studio ha preso in esame undici progetti realizzati tra il 2003 e il 2012 e un progetto approvato ma non ancora realizzato (Figura 2.3). In totale sono stati analizzati 20,6 km di strade e un numero complessivo di 480 sezioni trasversali.

Al fine di supportare l'analisi sulle caratteristiche costruttive standard e i relativi costi di realizzazione, l'acquisizione dati ha incluso:

- planimetria;
- sezioni trasversali;
- profilo longitudinale;
- computo metrico estimativo;
- relazione tecnica.

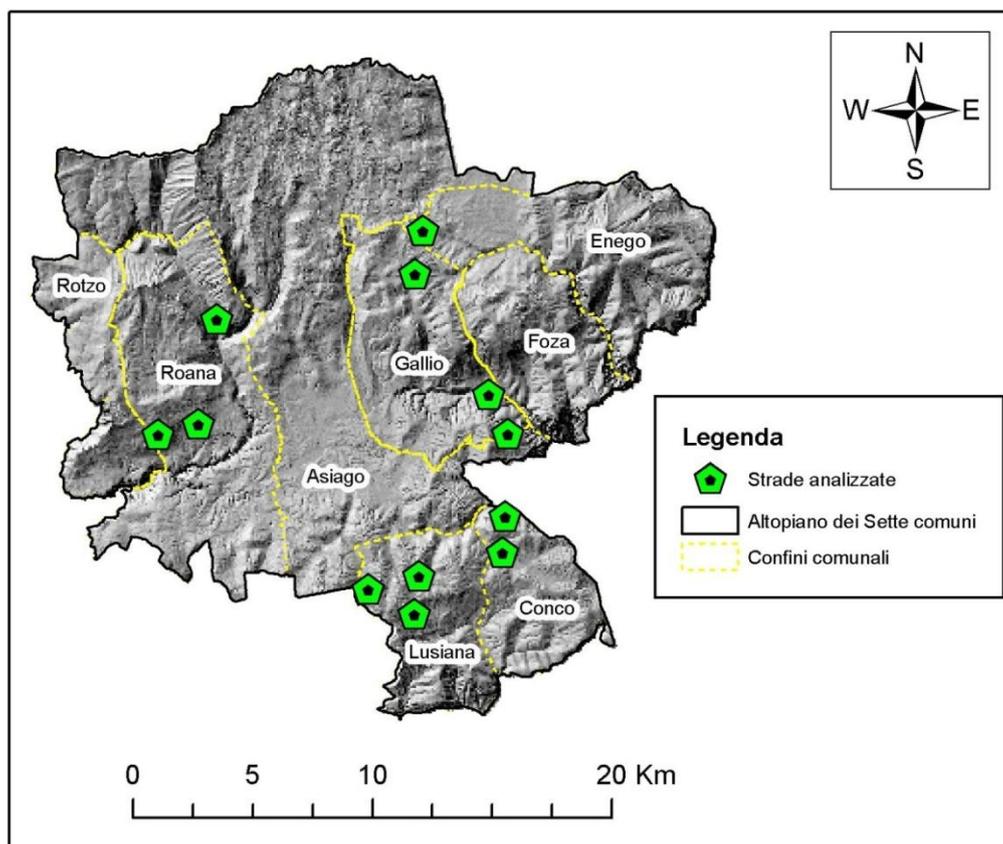


Figura 2.3 Localizzazione delle strade analizzate

I progetti sono stati realizzati in parte dalla Comunità Montana Spettabile Reggenza Sette Comuni e in parte da liberi professionisti tecnici forestali.

2.2.2 Organizzazione dei dati e del foglio di calcolo

Per ogni strada è stato predisposto un foglio di calcolo in cui inserire i seguenti parametri:

- comune proprietario;
- progettista;
- anno di costruzione;
- larghezza carreggiata;
- portata max;
- percentuale di roccia nel terreno;
- pendenza scarpate;
- eventuali note.

Lo stesso foglio di calcolo è stato quindi suddiviso in ulteriori due tabelle riportanti le caratteristiche costruttive e le voci di costo (Figura 2.4).

Caratteristiche costruttive									Costi																	
Sez. n.	Pend. versante	Pend. media	Distanza	Pend. tratto	Largh. Fascia esbosco	Area scavo	Larghezza scarpate	Costo apertura tracciato	Costi di sbancamento		Scavo in roccia		Sottofondo stradale			Fornitura stabilizzato			Inerbimento scarpate			Totale				
u.m.	%	%	m	%	m	mq	m	mq	€	€/m	mc	€	€/m	mc	€	€/m	mc	€	€/m	mc	€	€/m	mq	€	€/m	€/m
1	41.5	38.0	50	0	4.33	0.61	2.47	233.3	349.3	7.0	27.3	144.4	2.9	19.1	335.7	6.7	30.0	377.1	7.5	7.5	168.7	3.4	200.0	160.0	3.2	30.7
2	34.5	42.8	50	0	4.40	0.48	1.86	261.8	392.6	7.9	33.8	178.9	3.6	23.6	415.8	8.3	30.0	377.1	7.5	7.5	168.7	3.4	200.0	160.0	3.2	33.9
3	51	42.8	50	0	6.07	0.87	3.66	261.8	392.6	7.9	33.8	178.9	3.6	23.6	415.8	8.3	30.0	377.1	7.5	7.5	168.7	3.4	200.0	160.0	3.2	33.9
4	34.5	31.5	50	0	4.40	0.48	1.86	213.0	320.3	6.4	22.0	116.6	2.3	15.4	271.0	5.4	30.0	377.1	7.5	7.5	168.7	3.4	200.0	160.0	3.2	28.3
5	28.5	30.5	50	0	4.14	0.40	1.51	213.0	319.5	6.4	21.3	112.6	2.3	14.9	261.8	5.2	30.0	377.1	7.5	7.5	168.7	3.4	200.0	160.0	3.2	28.0
6	32.5	33.5	50	0	4.38	0.45	1.80	219.5	329.3	6.6	23.5	124.6	2.5	16.5	289.5	5.8	30.0	377.1	7.5	7.5	168.7	3.4	200.0	160.0	3.2	29.0
7	34.5	35.5	50	0	4.40	0.49	1.86	223.3	334.3	6.7	25.0	132.5	2.7	17.5	308.0	6.2	30.0	377.1	7.5	7.5	168.7	3.4	200.0	160.0	3.2	29.6
8	36.5	38.5	50	0	4.53	0.51	2.00	234.0	351.0	7.0	27.5	145.8	2.9	19.3	338.8	6.8	30.0	377.1	7.5	7.5	168.7	3.4	200.0	160.0	3.2	30.8
9	40.5	38.5	50	0	4.83	0.59	2.35	234.0	351.0	7.0	27.8	147.1	2.9	19.4	341.9	6.8	30.0	377.1	7.5	7.5	168.7	3.4	200.0	160.0	3.2	30.9
10	36.5	36.5	50	0	4.53	0.52	2.00	226.5	339.8	6.8	26.0	137.8	2.8	18.2	320.3	6.4	30.0	377.1	7.5	7.5	168.7	3.4	200.0	160.0	3.2	30.1
11	36.5	38.5	50	0	4.53	0.52	2.02	234.0	351.0	7.0	27.4	145.1	2.9	19.2	337.3	6.7	30.0	377.1	7.5	7.5	168.7	3.4	200.0	160.0	3.2	30.8
12	40.5	38.5	50	0	4.83	0.58	2.37	234.3	351.4	7.0	27.6	146.4	2.9	19.3	340.3	6.8	30.0	377.1	7.5	7.5	168.7	3.4	200.0	160.0	3.2	30.9
13	36.5	36.5	50	0	4.54	0.53	2.01	226.8	340.1	6.8	26.3	139.1	2.8	18.4	323.4	6.5	30.0	377.1	7.5	7.5	168.7	3.4	200.0	160.0	3.2	30.2
14	36.5	36.5	50	0	4.53	0.52	2.01	226.5	339.8	6.8	26.0	137.8	2.8	18.2	320.3	6.4	30.0	377.1	7.5	7.5	168.7	3.4	200.0	160.0	3.2	30.1
15	36.5	41.5	50	0	4.53	0.52	2.01	247.5	371.3	7.4	31.0	164.3	3.3	21.7	381.9	7.6	30.0	377.1	7.5	7.5	168.7	3.4	200.0	160.0	3.2	32.5
16	46.5				5.37	0.12	2.96																			

Figura 2.4 Esempio di foglio di calcolo con riportate le caratteristiche costruttive e il calcolo dei costi per ogni sezione e tratto.

Le caratteristiche costruttive sono state analizzate per ogni tratto e sezione trasversale di progetto. Queste sono riassunte in Tabella 2.1:

Tabella 2.1 Informazioni prese in considerazione per ogni progetto.

Dati sezione trasversale	Unità misura
Sigla progettista	
Sigla strada	
N. sezione	#
Larghezza carreggiata	m
Pendenza versante	%
Distanza progressiva	m
Larghezza apertura tracciato	m
Area di scavo terreno sciolto	m ²
Area di scavo in roccia	m ²
Larghezza scarpate	m
Altezza opere di sostegno/trattenuta	m
Dati tratto	Unità misura
Sigla progettista	
Sigla strada	
n. tratto	#
Larghezza carreggiata	m
Pendenza media versante	%
Lunghezza tratto	m
Pendenza tratto	m
Percentuale scavo in roccia	%
Tornante	Presenza/assenza
Copertura arborea	Presenza/assenza
Opere di sostegno/trattenuta	Presenza/assenza
Lunghezza opere di sostegno/trattenuta	m

Il costo di costruzione è stato calcolato a livello di tratto, sulla base delle voci di costo presenti nel computo metrico di ogni progetto e raggruppate in categorie (Figura 2.5).

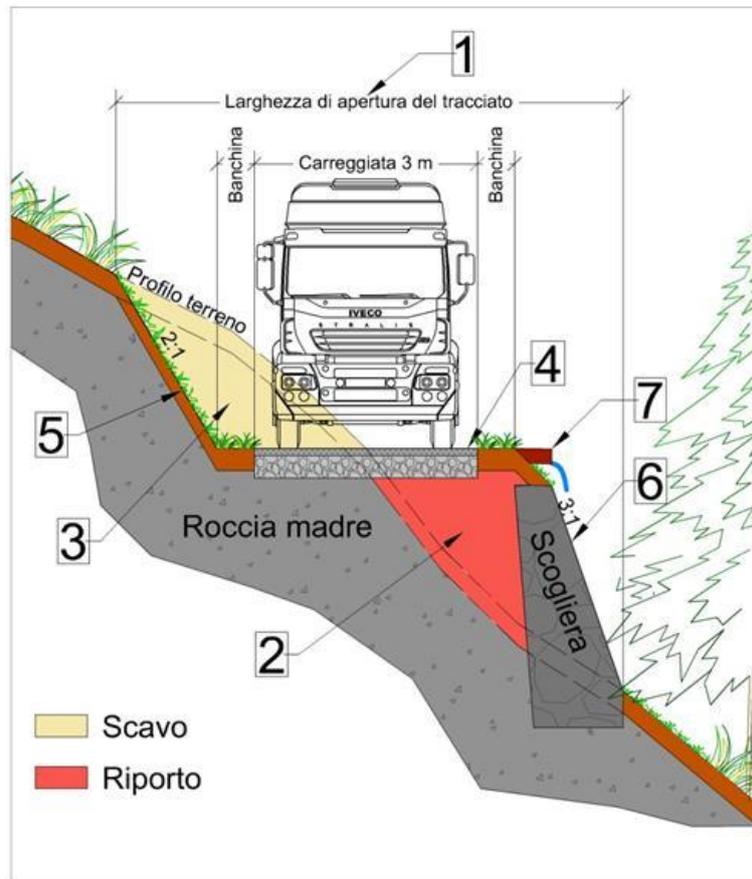


Figura 2.5 Sezione tipo con le categorie di costi analizzate: 1- Apertura tracciato, 2- Scavo di sbancamento, 3- Scavo in roccia, 4- Formazione della massiccata stradale, 5- Inerbimento scarpate, 6- Opere di trattenuta e sostegno, 7- Opere per la regimazione delle acque.

- **Apertura del tracciato:** comprende i costi di: abbattimento, allestimento e accatastamento ai lati della strada della vegetazione arborea che insiste all'interno della fascia di esbosco. Non è compresa l'estirpazione delle ceppaie.
- **Sbancamento e sistemazione scarpate:** comprende i costi di: scavo di sbancamento per la formazione della sede stradale in terreni di qualsiasi natura e consistenza, esclusa la roccia dura e trovanti di dimensione superiore a 1 m^3 , estirpazione delle ceppaie, trasporto del materiale all'interno del cantiere, riporto del materiale di risulta per la formazione dei rilevati, scoronamento e regolarizzazione del profilo delle scarpate.
- **Scavo in roccia:** comprende i costi di: scavo di sbancamento in roccia e demolizione di trovanti superiori a 1 m^3 e trasporto del materiale all'interno del cantiere.
- **Formazione della massiccata:** comprende i costi di: realizzazione strato di sottofondo, strato superficiale con materiale di adeguata pezzatura compreso il costipamento a umido e scarifica.

- **Inerbimento scarpate:** comprende i costi di: fornitura e semina di specie erbacee o terra vegetale.
- **Opere di trattenuta e sostegno:** comprende i costi di: realizzazione di scogliere, gabbionate, palizzate, palificate, muratura in calcestruzzo armato, terre rinforzate e reti di trattenuta, compreso lo scavo di fondazione.
- **Opere per la regimazione delle acque:** comprende i costi di: posa di canalette trasversali e/o longitudinali per lo smaltimento delle acque superficiali.

Non tutte le categorie sono presenti in ogni progetto, per questo motivo in ogni foglio di calcolo, sono state inserite solo le voci presenti nel computo metrico relativo alla realizzazione della strada.

Per ogni categoria sono state calcolate le quantità relative ad ogni tratto utilizzando la formula di Torricelli (1).

$$V_{tratto} = \frac{V_1 + V_2}{2} \cdot L \quad (1)$$

Dove:

- V_{tratto} : quantità (superficie - m^2 , volume - m^3) della categoria calcolata a livello di tratto;
- V_1 ; V_2 : quantità (larghezza - m, superficie - m^2) della categoria per la sezione iniziale e finale del tratto;
- L: lunghezza del tratto (m).

Moltiplicando tali quantità per le relative voci presenti nel prezziario/computo metrico si è ottenuto il costo di realizzazione del tratto.

Le voci di costo utilizzate sono le stesse presenti nei computi metrici relativi ad ogni strada utilizzando i valori del prezziario delle opere forestali del Veneto e della Provincia autonoma di Trento (Regione Veneto, 2009 e Provincia autonoma di Trento, 2012). Il costo totale di ogni tratto è stato poi diviso per la lunghezza del tratto stesso così da ottenere il costo unitario di realizzazione per metro lineare per tutti i singoli segmenti di strada.

2.2.3 *Analisi dei dati*

Sono state percorse alcune strade forestali dell'Altopiano dei Sette Comuni per osservare quali sono le principali criticità che la viabilità presenta. Una volta individuate le necessità d'intervento

per il miglioramento della viabilità, è stato rifatto il calcolo dei costi per la costruzione delle strade modificando gli standard progettuali e calibrandoli in relazione all'utilizzo che queste strade dovrebbero avere per permettere l'accesso al bosco e quindi il loro sfruttamento in piena sicurezza. L'analisi dei dati e la successiva analisi dei costi è stata impostata su due livelli di standard costruttivi. I progetti iniziali sono stati rivisti in termini di sezione trasversale e dei principali parametri che influiscono sulla transitabilità dei mezzi. L'impostazione del lavoro ha previsto di mantenere originali sia il profilo longitudinale che il profilo planimetrico.

Al fine della transitabilità dei mezzi sono stati definiti i due seguenti livelli di standard costruttivi:

- **Livello di standard costruttivo intermedio:** strade forestali secondarie di penetrazione all'interno delle superfici forestali, interessate da un traffico saltuario, legato solo ai periodi di utilizzazione boschiva dei lotti situati in prossimità della strada, adatte al transito di trattori con rimorchio e forwarder.
- **Livello di standard costruttivo elevato:** strade forestali principali di accesso ad ampie comprese forestali e interessate da un traffico regolare, adatte al transito di autocarri con rimorchio e autoarticolati;

Per ciascun livello di standard costruttivo sono stati considerati i seguenti parametri:

- **Apertura tracciato**

- standard elevati: larghezza maggiorata di un metro a monte rispetto all'area di interesse dalla strada, per non compromettere la stabilità delle piante, non intaccare l'apparato radicale durante le operazioni di sbancamento (Hippoliti, 2003);
- standard intermedi: larghezza pari all'area di interesse della strada senza maggiorazioni.



Figura 2.6 Esempio di apertura del tracciato per la realizzazione di una nuova strada.

- **Massicciata**

- standard elevati: massicciata costituita da uno strato di sottofondo dello spessore di 15 cm costituito da materiale grossolano di diametro inferiore a 10 cm e uno strato superficiale dello spessore di 10 cm costituito da stabilizzato calcareo di diametro inferiore a 3 cm.
- standard intermedi: massicciata costituita da uno strato di sottofondo dello spessore di 10 cm costituito da materiale grossolano di diametro inferiore a 10 cm e uno strato superficiale dello spessore di 5 cm costituito da stabilizzato calcareo di diametro inferiore a 3 cm.



Figura 2.7 Esempio di stesura della massicciata.

- **Regimazione delle acque**

- standard elevati: canalette trasversali classiche in legno con densità variabile in relazione alla pendenza del tratto come in Tabella 2.2;



Figura 2.8 Esempio di canalette trasversali classiche in legno.

- standard intermedi: canalette trasversali più economiche costituite da due tondelli affiancati con densità variabile come in Tabella 2.2.



Figura 2.9 Esempio di canalette costituite da tondelli in legno affiancati.

Tabella 2.2 Spaziatura delle canalette al variare della pendenza della strada (Hippoliti, 2003).

Pendenza (%)	Spaziatura (m)
6	50
8	42
10	38
12	33
14	29
16	26
18	23
20	21
22	20

- **Inerbimento scarpate**

Standard elevati e standard intermedi inerbimento con semina a spaglio.



Figura 2.10 Esempio di scarpate inerbite

- **Opere di sostegno**

- standard elevati: costruzione di scogliera con massi ciclopici dove la pendenza del versante supera il 62,5 %;

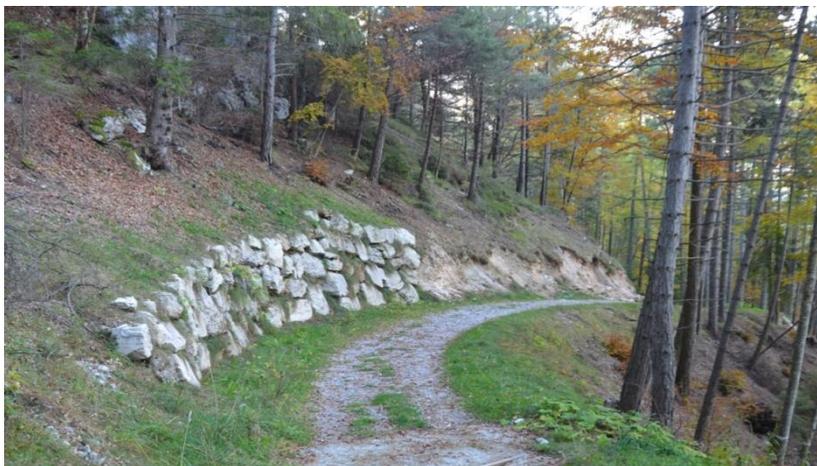


Figura 2.11 Esempio di scogliera.

- standard intermedi: assenza di scogliera, posizionamento alla base della scarpata dei trovanti dello scavo.

I costi al metro lineare ottenuti per ogni tratto di strada sono stati raggruppati per classi di pendenza del terreno con scarto del 10 %. I dati di ogni classe di pendenza sono stati mediati per ottenere un valore medio di costo al metro per ogni voce. È stato quindi creato un istogramma così da poter osservare la variazione delle voci di costo di ogni categoria all'aumentare della pendenza del versante nei diversi scenari ipotizzati.

2.3 Analisi precisione del dato LiDAR

Tutta l'area oggetto di studio è stata coperta da un volo LiDAR *Full waveform* effettuato nel mese di Luglio 2012, mediante laser installato su elicottero. Le caratteristiche del volo sono riassunte in Tabella 2.3.

Tabella 2.2.3 Caratteristiche del volo LiDAR.

Sensore	OPTECH ALTM 3100EA
Altezza di volo media	420 m
Densità media di punti	11 punti/m ²
Lunghezza d'onda	1024 nm
Angolo massimo di scansione	19°
RMSE altimetrico	0.05 m
RMSE planimetrico	0.03 m

Nei paragrafi successivi è riportata la procedura per l'analisi della precisione del dato LiDAR con il possibile utilizzo nella modifica della viabilità esistente. Per tale scopo è stata quindi fatta una campagna di rilievi nel periodo primavera-estate 2013, dove sono state rilevate alcune sezioni forestali sotto copertura arborea e fuori copertura mediante telemetro laser (Trupluse® 360B - Lasertech). Di ogni sezione sono stati misurati alcuni parametri, in particolare l'area della sezione e le quote dei punti misurati. Gli stessi parametri sono stati misurati anche su profili ottenuti nelle stesse sezioni da DTM a densità diverse. Successivamente è stato fatto un confronto tra i dati misurati in campo e i dati ottenuti da LiDAR per valutarne la differenza ed è stato valutato l'errore generato dal dato LiDAR.

2.3.1 Protocollo rilievi a terra

All'interno dell'area coperta dal volo LiDAR sono state rilevate 30 sezioni in strade fuori copertura arborea e 36 sezioni su strade sotto copertura.

Le sezioni fuori copertura sono state raggruppate in 3 blocchi da 5 sezioni in 2 aree diverse: Malga Carriola-Bar Alpino e Monte Corno (Figura 2.12). Sullo stesso blocco le sezioni erano distanziate 3-5 m una dall'altra, mentre i blocchi erano posti a una distanza variabile per permettere una certa eterogeneità tra gli stessi. Le sezioni sotto copertura sono state invece suddivise in 12 blocchi di 3 sezioni ciascuna, posizionate in aree con condizioni di copertura e morfologia della strada diverse, per assicurare anche in questo caso una maggiore variabilità e per rappresentare tutte le condizioni presenti.

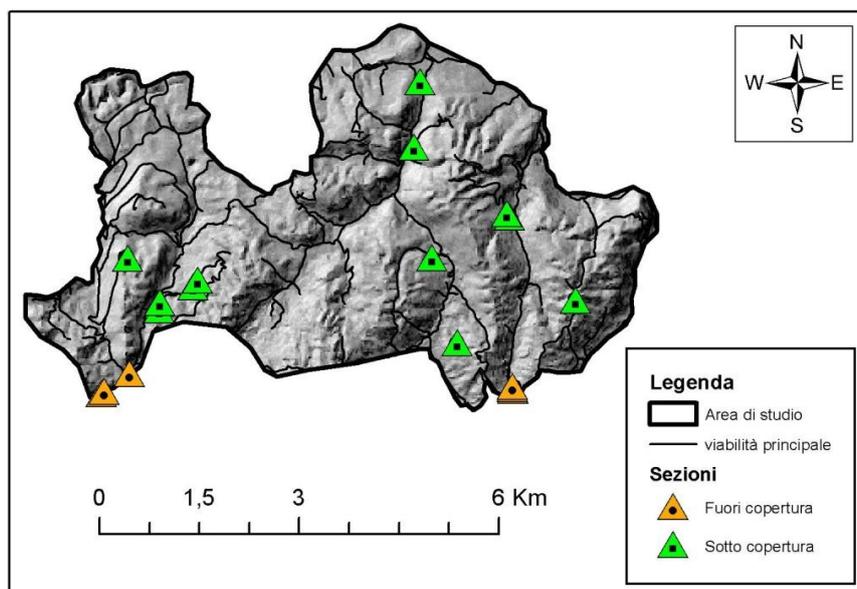


Figura 2.12 Localizzazione dei blocchi di sezioni rilevati all'interno dell'area di studio.

Il rilievo è stato fatto con i seguenti strumenti (Figura. 2.13):

- GPS professionale con correzione in post-processing (antenna Trimble® PROXH con palmare Trimble® NOMAD)
- Telemetro laser Trupulse® 360B collegato via bluetooth con il computer da campo;
- Palina con riflettore;
- Computer da campo Panasonic® o Trimble® collegato via bluetooth al telemetro;
- Cordella metrica;
- Macchina fotografica;
- Blocco note.



Figura 2.13 Strumentazione utilizzata per il rilievo.

Il protocollo di rilievo consisteva nel posizionare il GPS in un punto con una copertura arborea sufficientemente rada da permettere la ricezione dei satelliti e dal quale fosse visibile almeno una sezione. Dopo aver registrato il punto GPS, per aumentare ulteriormente la precisione di posizionamento, l'operatore con il telemetro e il computer si posizionava sul punto GPS e rilevava la posizione di alcuni elementi (piante, steccati, rocce, ecc.), posti nelle vicinanze del GPS e facilmente individuabili anche dalla nuvola di punti LiDAR. Questo ha permesso quindi di agganciare il punto GPS a punti di coordinate note e di ridurre ulteriormente l'errore generato dal GPS. Dallo stesso punto si rilevava poi la posizione dei punti dell'asse stradale di ogni sezione andando a mirare l'organo riflettore posizionato sulla palina, che il secondo operatore posizionava in corrispondenza dei punti da rilevare. Di seguito l'operatore con il telemetro si spostava nel punto centrale di ogni sezione e rilevava tutta la sezione partendo da monte e procedendo verso valle e facendo attenzione che l'operatore con la palina fosse sempre in direzione perpendicolare

all'asse stradale. In ogni sezione sono stati rilevati tutti i cambi di pendenza più significativi per una distanza di 7,5 m a monte e 7,5 m a valle. Le sezioni risultavano quindi essere lunghe 15 metri. Ogni blocco di sezioni è stato numerato con una cifra identificativa diversa nell'ordine delle migliaia, le sezioni con una cifra nell'ordine delle centinaia e infine ogni punto con un codice identificativo nell'ordine delle unità, con un andamento crescente da monte a valle. Il punto centrale di ogni sezione è stato identificato con il codice della sezione (1100, 1200, 1300, ecc.). Nella Figura 2.14 è riportata una sezione esempio rilevata con il metodo descritto.

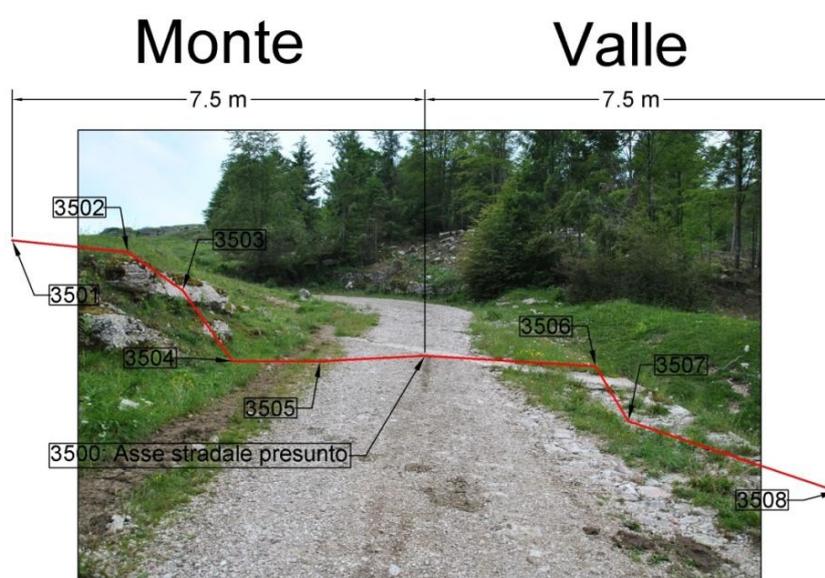


Figura 2.14 Esempio di sezione rilevata con la relativa numerazione progressiva da monte verso valle della sezione 3500 del Monte Corno.

Per ogni sezione è stata poi rilevata la larghezza della carreggiata stradale e la posizione del punto centrale presunto rispetto all'effettivo asse stradale.

2.3.2 Metodo per il confronto dei dati a terra con i dati LiDAR

I dati ottenuti dai rilievi con telemetro sono stati georeferenziati tramite software GIS. Per ogni sezione rilevata con Trupulse® sono state poi estratte le coordinate di dislivello e distanza di ogni punto rispetto al punto centrale della sezione. È stato quindi possibile riportare i punti in Autocad® e ricreare il profilo delle sezioni su un piano cartesiano.

Al fine di permettere il confronto tra i dati rilevati e il dato LiDAR, sono stati estratti i profili delle stesse sezioni mediante l'applicazione 3D analyst del software ArcGIS®, partendo da DTM con una risoluzione spaziale di 0,5 m x 0,5 m e aventi densità di punti diverse. Per l'ottenimento dei DTM a diverse densità fuori copertura è stata fatta una riduzione del numero dei punti a terra rispetto al

DTM con la massima densità, applicando un coefficiente riduttivo di 2, 4, 8, 16, 32 e 100 mediante LAS tools. Ciò significa che si è passati da una densità di 4,02 punti/m² a una densità di circa 1 punto ogni 25 m² (Figura 2.15). Questo ha permesso di confrontare il cambiamento dei profili delle sezioni con DTM a densità diverse. I profili estratti sono stati riportati anch'essi in cad.

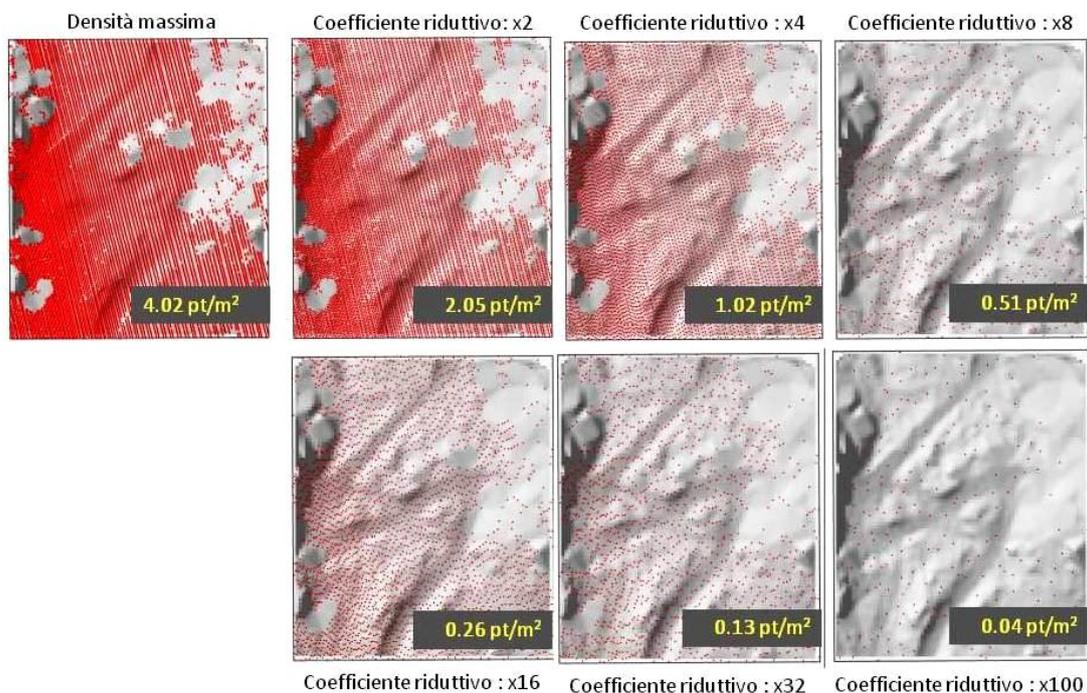


Figura 2.15 Riduzione della densità dei punti all'aumentare del coefficiente riduttivo nell'area del Monte Corno interessata dalle sezioni fuori copertura.

Per ogni profilo di ogni sezione sono stati infine misurati due parametri: l'area sottesa dalla sezione, distinguendo l'area di monte da quella di valle e il dislivello di ogni punto rispetto al punto centrale della sezione, nel caso dei profili estratti da DTM (Figura 2.16).

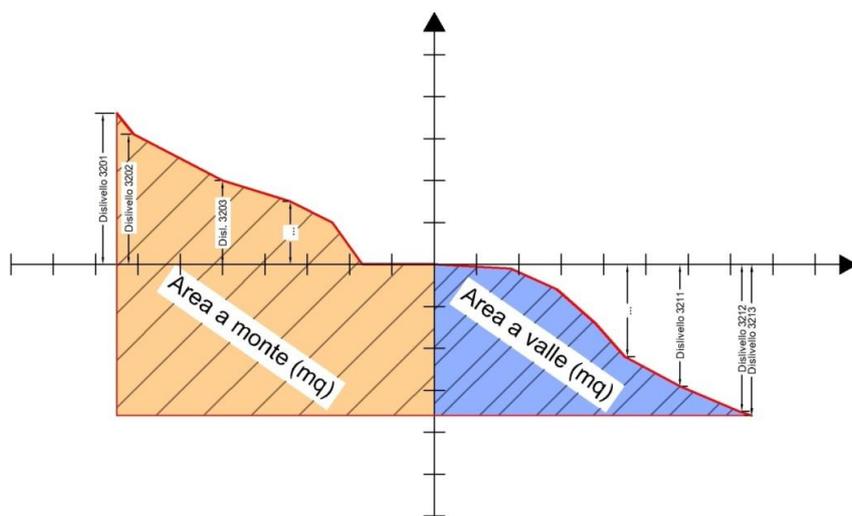


Figura 2.16 Parametri misurati in ogni profilo: Area a monte e a valle e dislivelli di ogni punto rispetto al punto centrale della sezione.

I valori ottenuti sono stati inseriti in un foglio di calcolo e divisi per aree fuori copertura e sotto copertura e per valori di aree e di quote. Per entrambi i tipi di copertura è stato fatto un confronto tra le aree calcolate sulle sezioni ottenute con DTM a diversa densità o Trupulse®, mediante grafici di dispersione. Nel caso delle sezioni fuori copertura il confronto è stato fatto rispetto al DTM con massima densità di punti perché garantisce una maggior precisione rispetto al rilievo a terra dato che questo è soggetto a un errore umano e strumentale. Nel caso delle sezioni sottocopertura il confronto è stato invece fatto rispetto al rilievo a terra con telemetro.

2.3.3 Analisi dell'errore

Per valutare l'errore che la riduzione della densità dei punti genera nel dato LiDAR, è stato utilizzato l'indice RMSE che rappresenta lo scarto medio di valori di area o di quota tra il DTM di riferimento e il DTM considerato. Nel caso delle sezioni fuori copertura è stato valutato come varia l'RMSE in relazione all'aumento del coefficiente di riduzione della densità nei vari DTM. Nel caso delle sezioni sotto copertura, è stato anche qui calcolato l'RMSE, sia per le aree che per le quote di tutte le sezioni utilizzando però come riferimento ai dati da telemetro.

Al fine di poter confrontare l'errore fuori e sotto copertura, è stato calcolato il numero di punti a terra presenti in prossimità di ogni sezione entro una distanza di 0,5 m dalla sezione. Nel caso delle sezioni fuori copertura è stato poi calcolato l'RMSE medio delle aree per ogni riduzione di densità di punti. Le sezioni fuori copertura sono state invece suddivise in 4 classi di densità di punti a terra (0,0-0,1; 0,3-0,7; 0,8-1,1; 1,2-1,4) ed è stato calcolato l'RMSE medio di classe. Infine è stato creato, un modello che rappresenti la variazione dell'RMSE in relazione alla densità di punti a terra sia per le sezioni fuori copertura che sotto copertura.

2.4 Applicazione del dato LiDAR

Dopo aver valutato la precisione del dato LiDAR, è stata fatta una prova pratica dell'utilizzo del dato LiDAR per la progettazione di nuovi tracciati forestali e per la sistemazione di un tracciato esistente il software di progettazione Roadeng® (Softree®).

In entrambi i casi è stato fatto un confronto tra la progettazione mediante la tecnica tradizionale che prevede il rilevamento delle sezioni trasversali e la progettazione mediante l'utilizzo del dato LiDAR. Inoltre, sia per la riprogettazione che per la progettazione del nuovo tracciato, sono stati previsti due scenari di strada con una carreggiata di larghezza di 2,7 m e 3,0 m.

Il rilievo è stato fatto con Trupulse®, collegato a GPS e palmare sul quale era installato il software di rilievo Roadeng Survey® e palina con organo riflettente.

L'area presa in esame per le prove è stato il versante est dell'area "Zovolongo", caratterizzato da una copertura densa di Faggio e Abete rosso (Figura 2.17).

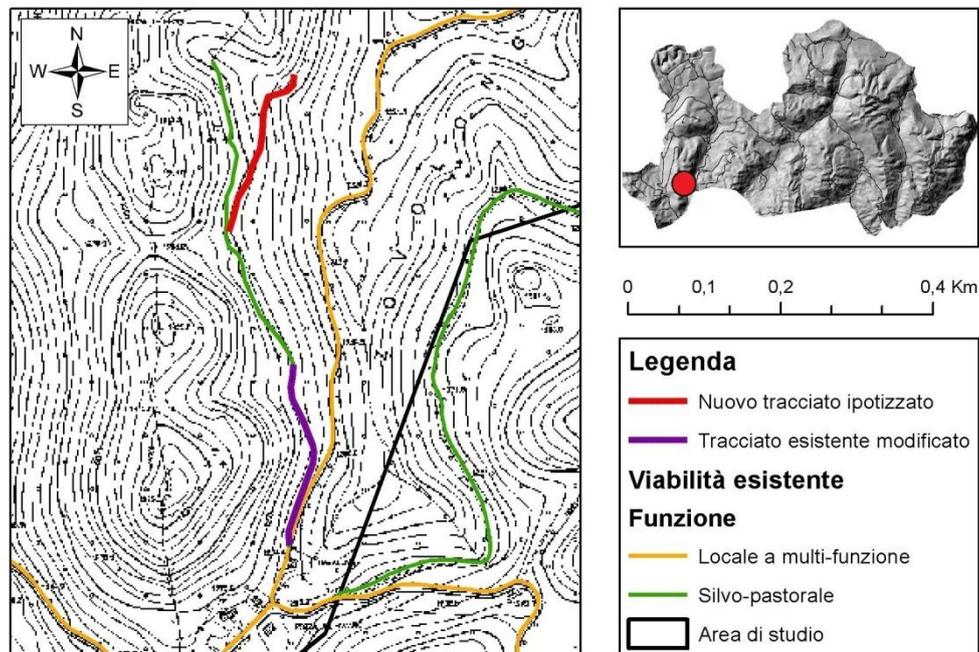


Figura 2.17 Localizzazione della strada soggetta a miglioramento e del nuovo tracciato.

2.4.1 Progettazione di un nuovo tracciato

Il tracciato ipotetico della nuova strada è stato ideato a solo scopo di verifica del dato LiDAR, quindi è stata scelta una zona in cui non era realmente necessaria la costruzione di un nuovo tracciato, ma che fosse facilmente raggiungibile per facilitare i rilievi.

Il tracciato ipotizzato è situato in un versante con una pendenza media del 30-40 %, è lungo 237 m e con pendenze longitudinali medie intorno al 15 %.

Il rilievo consisteva nel rilevare le sezioni trasversali ad ogni cambio di pendenza o cambio di direzione lungo il tracciato ipotizzato con battute di circa 20 m. Su ogni sezione trasversale sono stati poi rilevati i cambi di pendenza a monte e a valle per una lunghezza totale della sezione di circa 20 m.

I dati sono stati poi riportati in Roadeng® ed è stata fatta la progettazione della strada con carreggiata a 2,7 e 3,0 m, sulla base di un DTM creato a partire dalle sezioni rilevate nel caso della

progettazione da rilievo tradizionale o da DTM ottenuto a partire dalla nuvola di punti nel caso di progettazione utilizzando il dato LiDAR.

Sulla base dei valori forniti dal software è stato fatto un confronto tra i volumi di movimento terra che i due metodi generano ed è stato calcolato il costo al metro del tracciato ipotizzando uno standard di costruzione intermedio.

2.4.2 Miglioramento di un tracciato esistente

Per la riprogettazione di un tracciato esistente è stato preso in esame un tratto di una strada forestale della lunghezza di 268,0 m, con problemi di transitabilità dovuta alla presenza di tratti con carreggiata ristretta a 2,2 metri. L'intervento ipotizzato ha avuto quindi lo scopo di allargare la carreggiata al fine di permettere il transito in sicurezza dei mezzi. Anche in questo caso sono stati ipotizzati due scenari di intervento, allargando la strada a 2,7 e 3,0 metri.

Il rilievo anche in questo caso è stato fatto per sezioni trasversali posizionate nei cambi di pendenza o di direzione del tracciato. In ogni sezione sono stati rilevati i bordi carreggiata, i bordi strada, l'inizio e la fine della scarpata di monte e di valle e i cambi di pendenza più esterni per una lunghezza totale della sezione di circa 20 m.

I dati sono stati poi analizzati in Roadeng® modificando la larghezza della carreggiata sul DTM creato a partire dalle sezioni e sul DTM ottenuto a partire dalla nuvola di punti LiDAR. Inoltre è stata fatta un'ulteriore prova ipotizzando la larghezza della carreggiata a 2,2 metri per verificare l'errore del dato LiDAR in termini di volumi di terra movimentati. Anche in questo caso, è stato quindi fatto un confronto sui volumi di terra movimentati sulla base dei vari DTM.

3 RISULTATI

3.1 Costi di costruzione

3.1.1 Standard attuali

L'analisi dei progetti delle strade esaminate ha permesso di individuare gli standard attualmente utilizzati per la costruzione di nuovi tracciati (Figura 3.1). Questi sono:

- Apertura tracciato di larghezza pari o inferiore alla superficie occupata dal movimento terra;
- Carreggiata di 3,0 m;
- Massicciata costituita da uno strato di sottofondo con materiale grossolano (diametro 5-10 cm) di spessore variabile 30-40 cm, e in alcuni casi uno strato superficiale, di spessore 5-10 cm, di stabilizzato di cava (diametro 2-3 cm);
- Pendenza scarpata di monte: 60° (2:1) o maggiore, pendenza scarpata di valle: 45° (1:1);
- Consolidamento scarpate con semina a spaglio di specie erbacee o, in presenza di roccia, utilizzo di terra vegetale;
- Utilizzo di canalette in calcestruzzo o scannafossi;
- Pendenze del tracciato comprese tra 0 e 25 %;
- Mezzi previsti dal progettista per il transito: autocarri;

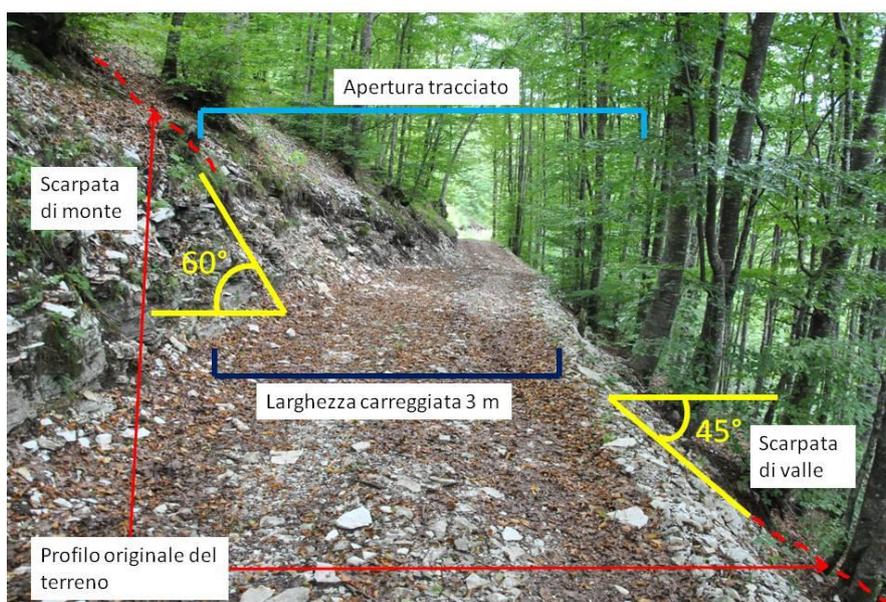


Figura 3.1 Standard attualmente utilizzati nella costruzione di nuove strade.

Sulla base dei computi metrici dei progetti esaminati, sono stati calcolati i costi per metro lineare medi che attualmente vengono sostenuti dagli enti proprietari per la costruzione di nuove strade.

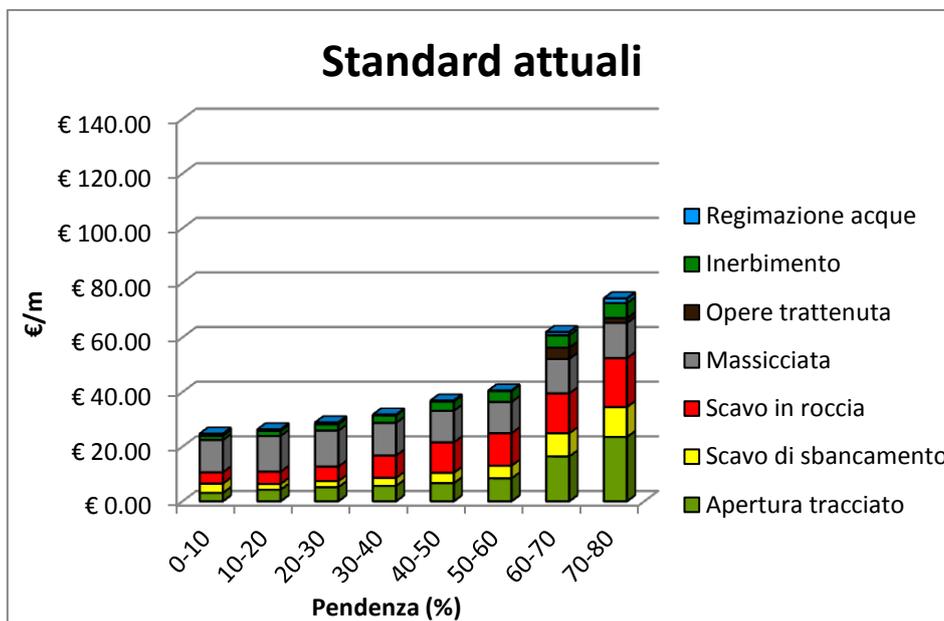


Figura 3.2 Ripartizione delle diverse categorie di costo al variare della pendenza gli con standard attualmente utilizzati.

Nella Figura 3.2 sono riportati i costi al metro per ogni categoria di costo al variare della pendenza del versante. I valori di costo vanno da un minimo di 24,73 € a un massimo di 74,31 € e aumentano all'aumentare della pendenza, con uno scarto tra una classe e l'altra che tende ad aumentare con la pendenza. Questo perché con l'aumentare della pendenza le superfici di apertura, i volumi interessati e la larghezza delle scarpate sono sempre maggiori e non aumentano linearmente. Quindi risulta che i costi di apertura tracciato, scavo e inerbimento, aumentano con la pendenza, mentre i costi relativi alla massicciata stradale rimangono costanti perché viene mantenuta una larghezza della carreggiata costante pari a 3,0 m. Attualmente la spesa principale risulta essere dovuta allo scavo, soprattutto quello in roccia, e alla realizzazione dello strato di massicciata. Anche i costi di apertura tracciato non sono trascurabili, tuttavia questi sono in genere ammortizzati con la vendita del legname ottenuto. Si può invece osservare che i costi riguardanti le opere di trattenuta e di regimazione delle acque sono di scarsa entità e solo con le pendenze maggiori sono previsti costi per opere di trattenuta.

3.1.2 Standard intermedi

Lo scenario relativo al livello di standard costruttivi intermedi ha definito il calcolo dei costi al metro lineare di strada con standard per il transito di mezzi quali trattore e rimorchio forestale o

forwarder. L'elaborazione dei costi determinati sulle sezioni trasversali di progetto in relazione alla pendenza del terreno è presentata in Figura 3.3.

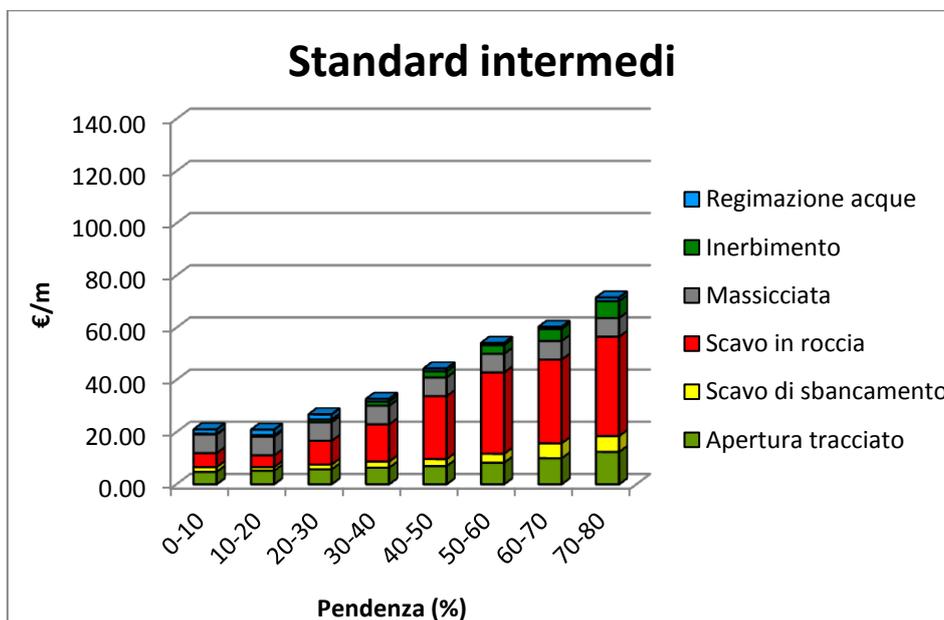


Figura 3.3 Ripartizione delle diverse categorie di costo al variare della pendenza gli con standard intermedi.

Come si può osservare dal grafico, la componente principale di costo anche in questo caso è relativa allo scavo in roccia. A differenza dei costi di progetto però, dove lo scavo in roccia era calcolato come sovrapprezzo dello scavo di sbancamento, qui è calcolato sulla base dei metri cubi di roccia previsti per lo scavo in relazione alla percentuale di roccia presente nel terreno con costi di scavo in roccia maggiori. Di conseguenza i costi di sbancamento risultano minori. Un'ulteriore differenza è il costo per la massicciata, che in questo caso è minore, ma comunque costante, e il costo per l'inerbimento delle scarpate che è maggiore e tende ad aumentare con l'incremento della pendenza. Nonostante quindi ci sia una diversa distribuzione dei costi, il valore di costo totale al metro non aumenta ma anzi diminuisce, infatti, in questo caso si va da 21,03 € per pendenze fino al 10 % a 71,55 € per pendenze fino all'80 %. La crescita è però lineare con uno scarto tra le classi pressoché costante.

3.1.3 Standard elevati

Con il secondo scenario di progettazione, ossia quello relativo a standard progettuali per il transito di mezzi pesanti come autocarri e autocarri con rimorchio, si possono notare notevoli differenze rispetto alle due situazioni precedenti.

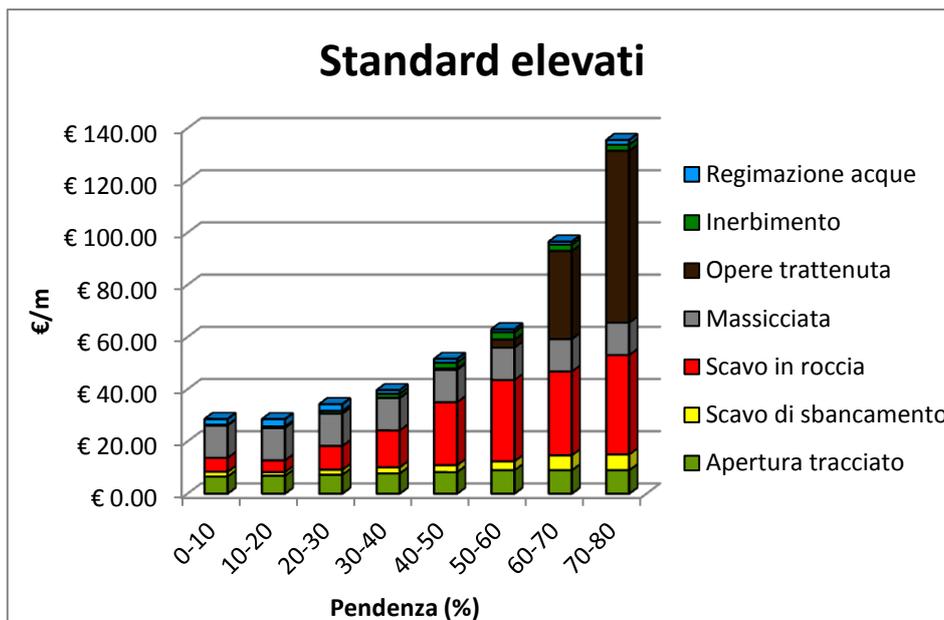


Figura 3.4 Ripartizione delle diverse categorie di costo al variare della pendenza gli con standard elevati.

Osservando il grafico in Figura 3.4, si può notare come i costi siano molto più alti rispetto agli standard precedenti, in questo caso, infatti, si va da un minimo di 28,62 € per le pendenze minori a 135,52 € per le pendenze maggiori. Come con gli standard attuali lo scarto tra una classe e l'altra cresce all'aumentare della pendenza. Confrontando lo scenario con standard intermedi, si osserva inoltre che i costi di scavo di sbancamento e scavo in roccia rimangono costanti, mentre aumentano i costi per la posa della massicciata. C'è un maggior costo anche per la posa di opere di regimazione delle acque. Per pendenze superiori al 60% si osserva invece che il costo principale è relativo alle opere di trattenuta e in particolare per la costruzione di scogliere. Proprio per questo motivo a pendenze maggiori corrisponde un minor costo di apertura del tracciato e di inerbimento, in quanto la costruzione di scogliere permette di avere scarpate più strette.

3.2 Precisione del dato LiDAR

I risultati dei rilievi delle sezioni hanno reso possibile l'analisi dell'errore solo su 15 sezioni fuori copertura, in particolare solo le sezioni dell'area del Monte Corno. Le sezioni dell'area Malga Carriola/Bar alpino non sono state invece prese in esame, poiché si è verificato un evidente errore di posizionamento dovuto alla presenza di un campo elettromagnetico generato da un traliccio della corrente, che ha alterato la ricezione del segnale GPS. Ciò non ha comunque compromesso la validità delle analisi sulle rimanenti sezioni.

3.2.1 Verifica dell'accuratezza del dato LiDAR

Fuori copertura

Lo studio fatto sulle sezioni fuori copertura permette di osservare la diretta correlazione che c'è tra la densità di punti a terra del dato LiDAR e la sua precisione nell'analisi delle sezioni. In Figura 3.5 dove sono riportati i grafici di dispersione per ogni riduzione di densità, si osserva il confronto tra i dati di area del DTM con la massima densità di punti (DTM di riferimento) con i DTM a densità sempre minori. Si nota infatti, come la nuvola di punti sia sempre più espansa sia per le aree a monte che quelle a valle con la crescente riduzione della densità.

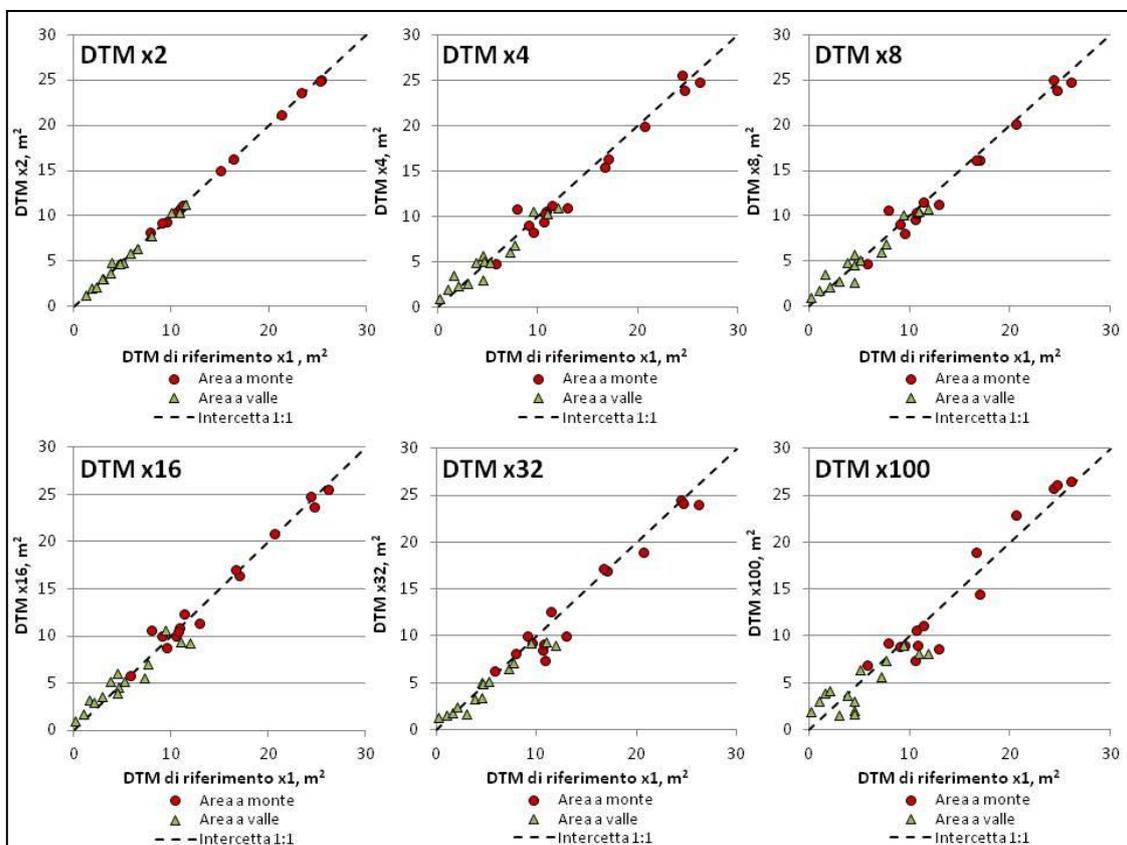


Figura 3.5 Confronto tra il DTM di riferimento con i DTM a densità ridotta sulla base del parametro area.

Le stesse considerazioni valgono anche per le differenze di quota (Figura 3.6).

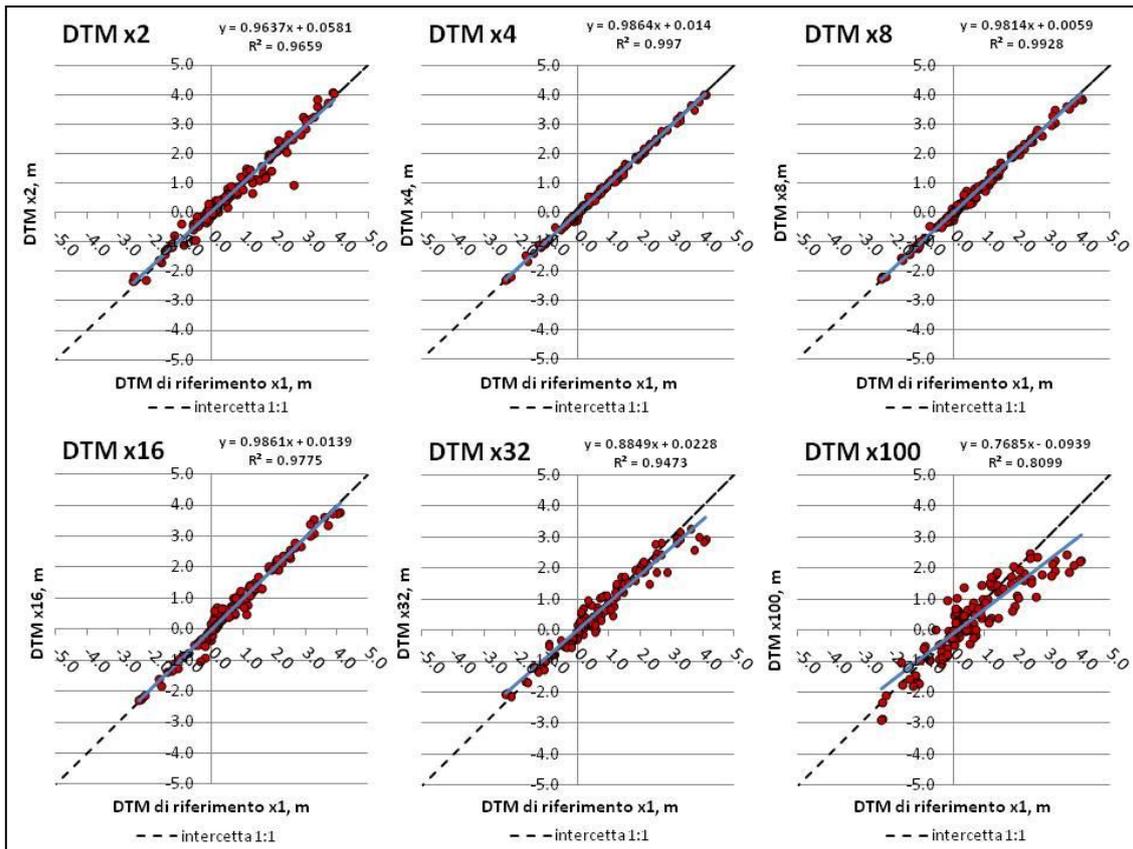


Figura 3.6 Confronto tra il DTM di riferimento con i DTM a densità ridotta sulla base del parametro area.

Analizzando il grafico in Figura 3.7 si può osservare come ci sia una diretta relazione tra l'errore RMSE e la riduzione della densità, infatti, all'aumentare della riduzione dei punti si nota un incremento dell'errore passando da un errore di $0,26 \text{ m}^2$ con una riduzione del 50%, a un errore di $1,81 \text{ m}^2$ con riduzioni del 100%.

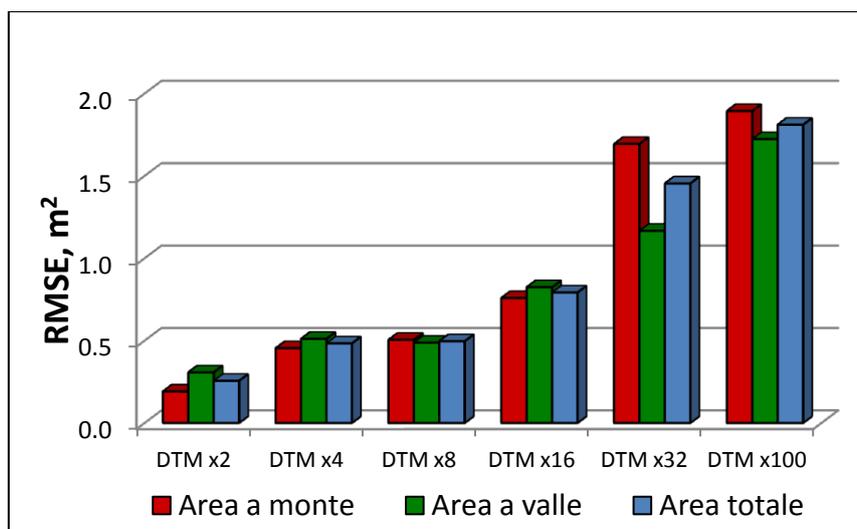


Figura 3.7 Errore RMSE in relazione alla riduzione della densità di punti a terra per le aree nelle sezioni fuori copertura.

Si nota invece nella Tabella 3.1 come l'errore aumenta al diminuire della densità di punti a terra, ma che questa riduzione non è regolare tra monte e valle ma si comporta in modo diverso ad ogni riduzione.

Tabella 3.1 Variazione dell' errore RMSE in relazione alla riduzione della densità di punti per le aree a monte e a valle su sezioni fuori copertura.

DTM		DTM x1	DTM x2	DTM x4	DTM x8	DTM x16	DTM x32	DTM x100
Densità (Punti/m²)		3,20	1,59	0,79	0,38	0,17	0,08	0,03
RSME	Area a monte	0,00	0,19	0,45	0,50	0,76	1,69	1,89
	Area a valle	0,00	0,31	0,51	0,49	0,82	1,17	1,72
	Area totale	0,00	0,26	0,48	0,50	0,79	1,45	1,81

Dall'analisi dell'errore RMSE delle quote (Figura. 3.8) si può invece osservare che anche in questo caso l'errore aumenta con la riduzione della densità fino ad un massimo di 0,6 m con riduzioni del 100%. Si nota comunque che con una riduzione x8 l'errore rimane sotto i 10 cm che è paragonabile all'errore che commette il telemetro. Quindi, per quanto riguarda le quote, la perdita di precisione comincia ad avere una certa importanza solo con densità inferiori a 0,3 punti/m².

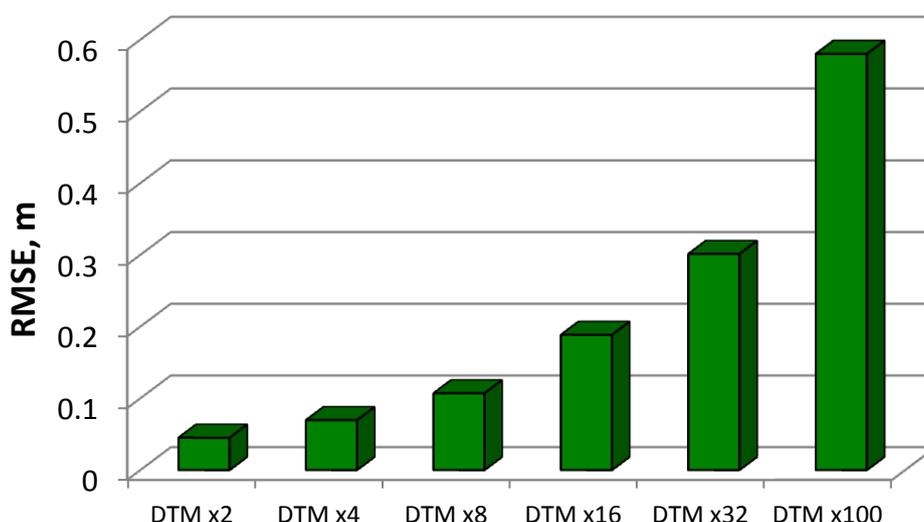


Figura 3.8 Errore RMSE in relazione alla riduzione della densità di punti a terra per le quote nelle sezioni fuori copertura.

Sotto copertura

Nel caso delle sezioni sotto copertura analizzando la Figura 3.9, dove è riportato il confronto tra le aree Trupulse® con le aree DTM, si osserva che lo scarto rispetto all'intercetta è maggiore rispetto alle condizioni fuori copertura e ciò è dovuto all'estrema variabilità di densità di punti a terra in prossimità di ogni sezione.

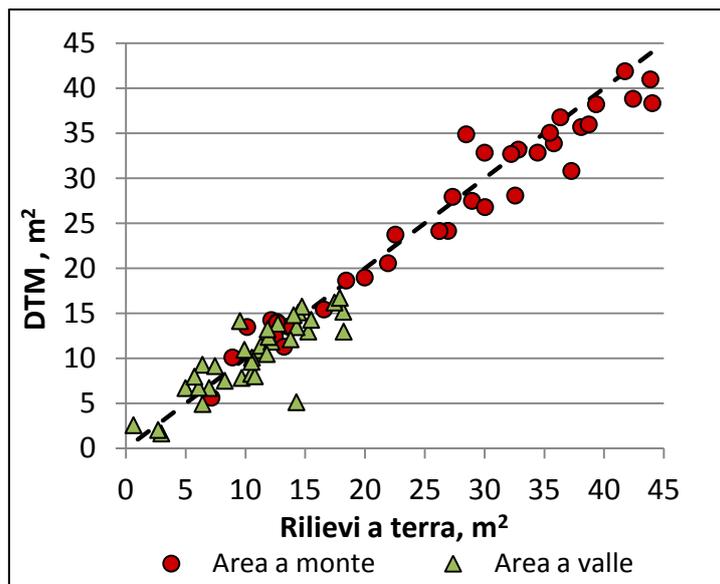


Figura 3.9 Confronto tra il DTM e i rilievi a terra con Trupulse sulla base del parametro area.

In Tabella 3.2 sono riportati i valori medi di densità di punti a terra del DTM. In prossimità delle sezioni suddivise in classi e si osserva come questa varia da 0,392 punti/m² nella classe a densità minore fino a 3,74 punti/m² per la classe a densità maggiore.

Tabella 3.2 Variazione dell' errore RMSE in relazione alla riduzione della densità di punti per le aree a monte e a valle su sezioni sotto copertura.

Classe di densità		1	2	3	4
Densità (punti/m ²)		0,39	1,32	1,92	3,74
N° sezioni		9	13	5	6
RMSE	Area a monte	3,01	2,61	1,10	0,85
	Area a valle	2,38	2,02	1,31	0,92
	Area totale	2,71	2,33	1,21	0,89

Tra le sezioni analizzate la densità massima è stata di 5,1 punti/m² mentre quella minima è pari a 0 punti/m². Di conseguenza anche l'errore RMSE rispecchia lo stesso andamento con valori di 2,71 m² per la classe a densità minore e 0,89 m² per la classe a densità maggiore (Figura 3.10). Anche in questo caso non c'è uno scarto costante tra l'area di valle e di monte all'aumentare dell'errore ma in ogni classe si comporta in modo diverso.

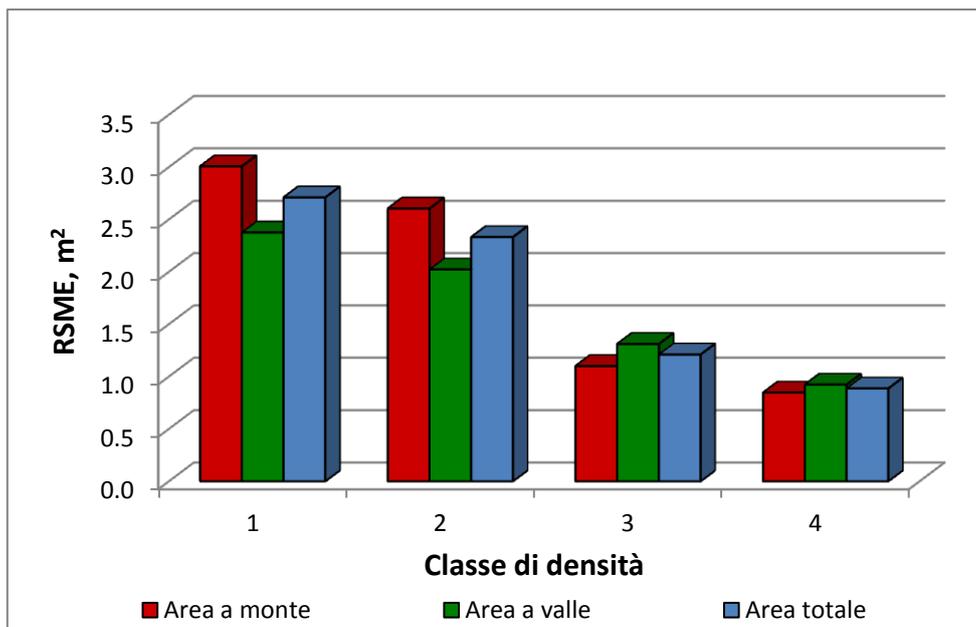


Figura 3.10 Variazione dell'errore RMSE in relazione alla riduzione della densità di punti a terra per le aree nelle sezioni fuori sotto copertura

L'analisi della differenza di quota nelle sezioni sotto copertura (Figura 3.11), evidenzia invece che a differenza delle sezioni fuori copertura c'è una variabilità maggiore, con errori maggiori e di conseguenza una nuvola più espansa.

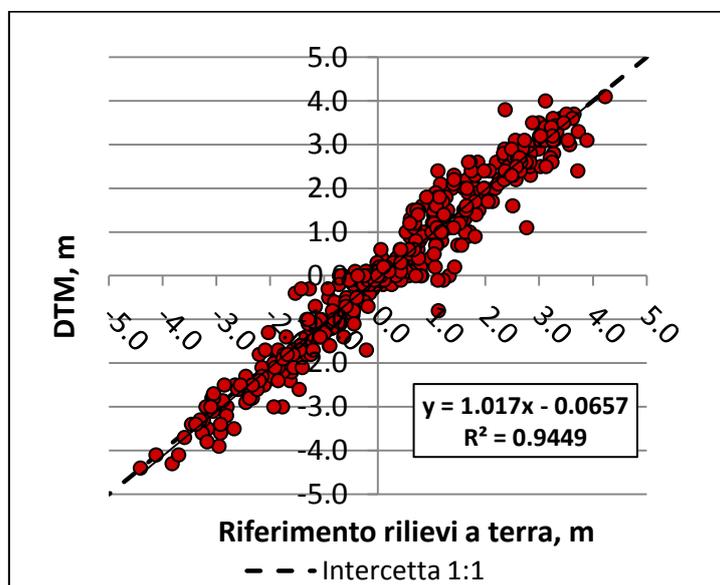


Figura 3.11 Confronto tra il DTM e i rilievi a terra con Trupulse sulla base del parametro quote.

3.2.2 Modello per la stima della precisione in relazione alla densità dei punti a terra

Al fine di confrontare l'errore generato dal LiDAR fuori e sotto copertura è stato creato un modello che mette in relazione l'RMSE con la densità di punti a terra (Figura 3.12).

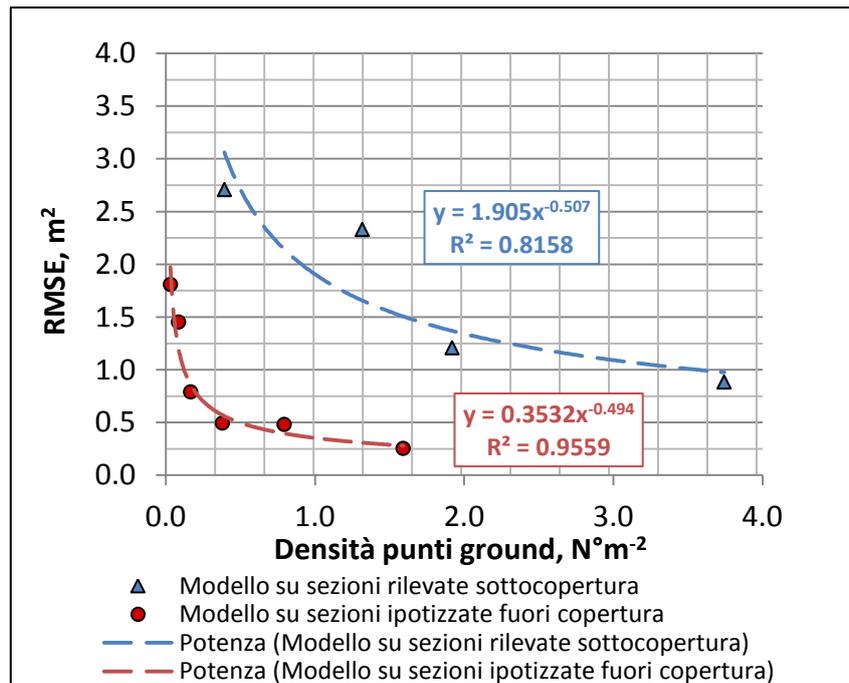


Figura 3.12 Modello per la stima dell'errore RMSE fuori e sotto copertura.

Dal grafico si nota come l'errore, ottenuto fuori copertura mediante una riduzione dei punti teorica, all'aumentare della densità dei punti a terra, sia molto minore rispetto all'RMSE ottenuto per le aree di sezioni sotto copertura.

3.3 Applicazione del dato LiDAR

3.3.1 Progettazione del nuovo tracciato

La progettazione del nuovo tracciato mediante il software Roadeng® ha permesso di calcolare i volumi di scavo e riporto sulla base di DTM ottenuti dal rilievo tradizionale con Trupulse® e da LiDAR. I risultati riportati nella Tabella 3.3 mostrano i volumi di movimento terra generati dallo scavo della strada. Si osserva che, come prevedibile, la strada con carreggiata di 3,0 metri genera volumi maggiori di quella con larghezza di 2,7 metri e che i volumi generati dal LiDAR sono sempre maggiori rispetto a quelli rilevati in modo tradizionale, soprattutto con larghezza della carreggiata a 2,7 metri.

Tabella 3.3 Volumi di scavo e riporto generati per la costruzione del nuovo tracciato.

	Tradizionale		LiDAR		Differenza	
	Scavo m ³	Riporto m ³	Scavo m ³	Riporto m ³	Scavo m ³	Riporto m ³
Larghezza 2,7 m	116,1	119,3	158,5	134,6	42,4	15,3
Larghezza 3,0 m	158,5	134,6	183,5	163,9	25	29,3

Dall'analisi dei costi si nota invece la differenza di costi che la costruzione del tracciato comporta con i due metodi diversi (Tabella 3.4), si nota, infatti, che i costi maggiori si hanno con progettazioni a partire dal dato LiDAR. Inoltre la maggior parte dei costi rimane pressoché invariata con i due metodi, mentre la differenza maggiore si ha proprio nelle voci riguardanti lo scavo. Un'altra voce in cui c'è una certa differenza è quella relativa alle canalette, in quanto il tracciato su dato LiDAR presenta pendenze longitudinali più elevate.

Tabella 3.4 Costi per la realizzazione della nuova strada.

	LiDAR		Tradizionale		Differenza	
	2.7 m	3.0 m	2.7 m	3.0 m	2.7 m	3.0 m
Apertura tracciato	€ 1 302.00	€ 1 444.95	€ 1 303.50	€ 1 450.05	-€ 1.50	-€ 5.10
Scavo di sbancamento	€ 540.36	€ 627.57	€ 397.06	€ 482.22	€ 143.30	€ 145.35
Scavo in roccia	€ 4 722.62	€ 5 484.82	€ 3 470.23	€ 4 214.49	€ 1 252.39	€ 1 270.33
Strato di sottofondo	€ 804.35	€ 893.73	€ 804.35	€ 893.73	€ 0.00	€ 0.00
Strato di usura	€ 719.57	€ 799.52	€ 719.57	€ 799.52	€ 0.00	€ 0.00
Inerbimento	€ 343.20	€ 376.80	€ 344.40	€ 383.20	-€ 1.20	-€ 6.40
Canalette	€ 640.80	€ 747.60	€ 400.50	€ 467.25	€ 240.30	€ 280.35
Totale	€ 9 072.90	€ 10 374.98	€ 7 439.61	€ 8 690.46	€ 1 633.29	€ 1 684.53
€/m	€ 38.28	€ 43.78	€ 31.39	€ 36.67	€ 6.89	€ 7.11

3.3.2 Miglioramento di un tracciato esistente

L'analisi dei volumi generati dalla sistemazione di un tracciato esistente tramite Roadeng®, ha permesso di calcolare i volumi generati per la sistemazione della strada ipotizzando due diverse larghezze: 2,7 m e 3,0 m.

Nella Tabella 6.5 sono riportati i volumi di scavo e riporto generati dallo scavo per il miglioramento e la differenza di volume tra LiDAR e tradizionale per le larghezze di progetto ipotizzate e dalla larghezza reale misurata (2,2 m).

Si osserva che per quanto riguarda la larghezza reale, il dato LiDAR non riesce a rappresentare perfettamente la strada generando un volume di circa 27 m³ per riportare la strada alle condizioni attuali. Questa differenza va quindi ad aggiungersi anche ai volumi generati per l'allargamento a 2,7 e 3,0 metri generando dei quantitativi maggiori a partire dal dato LiDAR.

Tabella 3.5 Volumi di scavo e riporto generati per la modifica del tracciato esistente.

	Tradizionale		LiDAR		Differenza	
	Scavo	Riporto	Scavo	Riporto	Scavo	Riporto
	m ³					
Larghezza 2.2 m	0	0	27.3	28.1	27.3	28.1
Larghezza 2.7 m	14.7	11.2	41.4	45.7	26.7	34.5
Larghezza 3.0 m	18.6	16.2	53.8	60.6	35.2	44.4

Se si analizzano i costi riportati in Tabella 3.6, si osserva che anche in questo caso, come per la progettazione di un nuovo tracciato, il dato LiDAR comporta dei costi maggiori, soprattutto in relazione allo scavo in roccia, mentre i costi per la posa della massicciata rimangono costanti. Inoltre non è prevista l'installazione di canalette trasversali date le pendenze longitudinali pressoché nulle con la risultante voce di costo nulla.

3.6 Costi per la modifica del tracciato esistente.

	LiDAR		Tradizionale		Differenza	
	2.7 m	3.0 m	2.7 m	3.0 m	2.7 m	3.0 m
Apertura tracciato	€ 243.00	€ 403.50	€ 135.00	€ 355.95	€ 108.00	€ 47.55
Scavo di sbancamento	€ 141.59	€ 184.00	€ 49.93	€ 63.61	€ 91.66	€ 120.38
Scavo in roccia	€ 1 237.45	€ 1 608.08	€ 436.39	€ 555.95	€ 801.05	€ 1 052.13
Strato di sottofondo	€ 168.31	€ 269.30	€ 168.31	€ 269.30	€ 0.00	€ 0.00
Strato di usura	€ 813.08	€ 903.42	€ 813.08	€ 903.42	€ 0.00	€ 0.00
Inerbimento	€ 154.88	€ 194.40	€ 50.96	€ 66.08	€ 103.92	€ 128.32
Canalette	€ 0.00	€ 0.00	€ 0.00	€ 0.00	€ 0.00	€ 0.00
Totale	€ 2 758.31	€ 3 562.70	€ 1 653.68	€ 2 214.32	€ 1 104.63	€ 1 348.38
€/m	€ 10.30	€ 13.30	€ 6.18	€ 8.27	€ 4.12	€ 5.04

4 DISCUSSIONE RISULTATI

4.1 Costi di costruzione e di miglioramento della viabilità forestale

Lo studio delle condizioni della viabilità silvo-pastorale presente nell'Altopiano dei Sette Comuni ha evidenziato che nonostante sia presente una buona densità viaria (circa 33 m/ha), questa può non risultare sufficiente a garantire un efficiente sfruttamento della risorsa forestale.

La presenza di strade che presentano criticità in termini di standard costruttivi comportano un limitato accesso al bosco da parte dei mezzi forestali operativi e una minor valorizzazione del prodotto legno rispetto al suo potenziale, in accordo con quanto affermato da Cavalli et al. (2010).

Dall'analisi dei costi di costruzione emerge che attualmente le strade vengono progettate con standard costruttivi simili. In linea generale si adottano soluzioni costruttive semplici contenendo i costi di costruzione. Ne consegue che la transitabilità delle strade è spesso limitata a mezzi forestali di medie dimensioni per il trasporto del legname e a mezzi esclusivamente fuoristrada per il trasporto di persone e attrezzature. In alcuni casi le strade presentano limiti alla percorrenza di autocarri, ma anche a mezzi come forwarder e harvester in particolare per limiti di raggi di curvatura e in alcuni casi per larghezze o per la combinazione di pendenze e fondo stradale che non consentono il transito in sicurezza del mezzo a pieno carico.

Si osserva che le voci di spesa maggiori sono relative allo scavo e alla formazione della massicciata, mentre i costi secondari, relativi alla stabilizzazione delle scarpate e alla regimazione delle acque sono minoritari, in accordo con Pellegrini et al. (2013).

Questo è dovuto alle scelte progettuali che mirano ad un maggior sviluppo possibile dei tracciati in termini planimetrici, permettendo lo sfruttamento della maggior superficie boscata possibile. Di conseguenza, per mantenere contenuti costi di costruzione, vengono adottati standard di costruzione semplificati e ciò comporta il possibile utilizzo in sicurezza delle strade solo da parte dei mezzi con minor capacità di carico, rispetto a mezzi più pesanti quali autocarri. In questa condizione i costi di trasporto sostenuti dalle imprese di utilizzazione aumentano a fronte di un'organizzazione della logistica articolata con più mezzi e in più fasi di trasporto. Ne conseguente un prezzo di macchiatico minore e quindi anche un minor guadagno per il proprietario.

Analizzando i risultati ottenuti con standard di costruzione più elevati si nota invece, che andando a modificare gli standard a favore di una maggiore percorribilità delle strade anche per i mezzi più

pesanti, quindi strade con maggiori capacità di portata e fondi più compatti, i costi di costruzione risultano essere lievemente maggiori con standard intermedi o molto maggiori con standard elevati. In questo caso la percorribilità risulta essere adatta al transito in sicurezza dei mezzi anche più pesanti con una riduzione dei costi di trasporto dovuti alla maggiore efficienza della logistica.

Questo tipo di analisi permette quindi di stabilire che, una progettazione delle nuove strade con standard variabili in relazione alle condizioni morfologiche del territorio e adatti all'utilizzo previsto del bosco, permette di garantire una maggior accessibilità dei boschi soprattutto in termini di sicurezza per gli operatori che si trovano a lavorare in bosco. Lo stesso concetto vale anche per la modifica della viabilità esistente: il suo miglioramento con interventi di manutenzione straordinaria per l'allargamento della carreggiata va a favorire lo sfruttamento del bosco con maggior sicurezza e minori costi di trasporto. Inoltre ciò consente di ridurre i costi di manutenzione ordinaria, di aumentare il valore del prodotto legno e, non da ultimi, di facilitare l'ingresso dei mezzi di soccorso (Grigolato et al. 2012) e garantire l'utilizzo del bosco anche per scopi turistici.

4.2 Valutazione sull'applicabilità del dato LiDAR

La scansione di un territorio con l'utilizzo della tecnologia LiDAR permette di ottenere informazioni dettagliate su larga scala sia a livello di popolamento forestale che di morfologia del terreno, inclusa la viabilità forestale. La copertura LiDAR dell'area di studio si caratterizza per una densità media di 11 punti/m², che ha permesso di fare alcune considerazioni relative all'utilizzo del dato LiDAR ad alta densità nella progettazione e miglioramento della viabilità forestale.

Dalle analisi effettuate per la stima dell'errore generato dal LiDAR per il rilievo della viabilità forestale, si è osservato come ci sia una notevole differenza tra i dati fuori e sotto copertura arborea.

Nel caso delle sezioni fuori copertura si osserva una diminuzione significativa della precisione nella stima delle aree e delle quote solo con densità inferiori a 0,3 punti/m², mentre sottocopertura anche con densità maggiori (3-4 punti/m²) la precisione è minore, sia per la stima delle aree che delle quote. Ciò è dovuto alle molteplici variabili che vanno a influire sulla distribuzione dei punti a terra (presenza di alberi, densità della copertura, scabrezza del terreno) e all'interpolazione effettuata dai software per la creazione del modello digitale del terreno.

Nel campo della viabilità forestale diversi studi (Aruga et al., 2005; Akay et al., 2009; Contreras et al., 2012) hanno dimostrato che l'utilizzo di DTM ottenuti da LiDAR permettono di stimare con precisione maggiore del rilievo tradizionale i volumi generati dallo scavo per la costruzione di un nuovo tracciato, anche con densità di punti a terra inferiori a quelle utilizzate in questo studio. Con le prove fatte in questo lavoro, si possono confermare le considerazioni fatti dagli autori citati; si osserva, infatti, che la differenza tra un rilievo tradizionale e un rilievo LiDAR per la progettazione di nuovi tracciati, non comporta grosse differenze in termini quantitativi. Analizzando i volumi di scavo ottenuti nel tracciato ipotizzato, si nota che il LiDAR fa una sovrastima del volume rispetto al rilievo tradizionale di $0,1 \text{ m}^3$ per metro di tracciato nel caso di tracciati con larghezza di 3,0 m e di $0,18 \text{ m}^3/\text{m}$ per larghezze di 2,7 m. I volumi ottenuti dal dato LiDAR tendono quindi a sovrastimare il reale quantitativo, ma risultano comunque essere più precisi del rilievo tradizionale in quanto quest'ultimo non permette di calcolare il volume misurando tutta la superficie interessata dallo scavo, ma solo la superficie stimata dai rilievi delle sezioni trasversali. Ragionando in termini di sezioni, si può quindi dire che il dato LiDAR è più preciso perché permette di ottenere una stima dei volumi basandosi su sezioni ipotetiche poste a mezzo metro di distanza una dall'altra.

L'utilizzo del dato LiDAR per la modifica di un tracciato esistente a quanto risulta dalla ricerca bibliografica effettuata non è ancora stato trattato. Dalle prove effettuate in questo studio è stato osservato che nonostante il volo realizzato abbia una densità di punti elevata, sottocopertura questa non è ancora sufficiente a garantire un dato sufficientemente accettabile per permettere una progettazione senza l'utilizzo di rilievi tradizionali. La differenza di volumi generati per la modifica di un tracciato tra dato LiDAR e rilievo tradizionale risulta essere ancora troppo elevata per poter essere totalmente affidabile.

5 CONCLUSIONI

Le analisi fatte e i risultati ottenuti hanno fatto emergere che nel territorio dell'Altopiano dei Sette Comuni la viabilità forestale presenta una buona densità, in grado di servire buona parte della superficie forestale. Essa non è però sempre caratterizzata da standard di percorribilità tali da permettere l'ingresso dei mezzi pesanti adibiti al trasporto del legname quali autocarri e talvolta anche forwarder. Questa criticità, va a ridurre il valore della risorsa legno poiché per il suo utilizzo sono necessari costi maggiori in particolare per il trasporto. Si ritiene quindi ci sia la necessità di intervenire andando a modificare le caratteristiche delle strade esistenti e di progettare i nuovi tracciati andando a prevedere degli standard costruttivi più idonei all'attuale diffusione di macchine delle ditte di utilizzazione forestale.

A tal proposito è stata quindi valutata la possibilità di utilizzare il dato LiDAR ottenuto con un volo ad alta densità di punti, per il miglioramento della viabilità esistente e la progettazione di nuove strade. Ciò che è emerso dalle elaborazioni fatte permette di constatare che il dato LiDAR presenta una precisione molto variabile a seconda delle condizioni di copertura forestale. In assenza di copertura il dato è molto preciso anche con una densità di punti ridotta, mentre sottocopertura la precisione scende drasticamente. Tuttavia, questa è sufficiente a garantire una stima precisa dei volumi generati dalla costruzione di un nuovo tracciato, ma non è tale da garantire una precisione sufficiente nelle opere di miglioramento della viabilità esistente.

L'utilizzo di questo strumento risulta quindi essere molto efficace nella progettazione di nuovi tracciati, permettendo di ridurre dei tempi necessari per i rilievi in campo. Ciò garantisce quindi una maggior precisione e una riduzione dei tempi per la realizzazione del progetto, soprattutto nella fase di stima dei volumi di scavo. L'utilizzo del dato LiDAR non è però la soluzione a tutti i problemi, la capacità di valutazione, la conoscenza e l'esperienza del tecnico forestale svolgono ancora il ruolo principale nella progettazione della viabilità forestale in quanto permettono di avere una visione olistica dell'area su cui intervenire, soprattutto nella fase di pianificazione.

Nel caso del miglioramento dei tracciati esistenti invece, l'utilizzo del dato LiDAR non è ancora sufficientemente preciso per poterlo utilizzare con piena affidabilità e quindi il ruolo del tecnico forestale in grado di svolgere il rilievo tradizionale è ancora la soluzione migliore. Tuttavia, in futuro, l'utilizzo integrato del laser scanner aereo e di quello terrestre permetteranno di ottenere modelli digitali del terreno ad alta precisione lungo la rete stradale forestale.

6 BIBLIOGRAFIA

2009. Prezzario regionale agroforestale. Regione Veneto.

2012. Elenco prezzi provinciale. Provincia autonoma di Trento.

Abdi E., Majnounian B., Darvishsefat A., Mashayekhi e Z. Sessions J. 2009. A GIS-MCE based model for forest road planning. *Journal of Forest Science*, 55 (4): 171–176

Akay A.E. 2006. Minimizing total costs of forest roads with computer-aided design model. *Sadhana AcaDTMy Proceedings in Engineering Sciences* 31:621-633.

Akay AE, Oguz H, Karas IR, Aruga K. Using LiDAR technology in forestry activities. *Environ Monit Assess* (2009) 151:117-125.

Aruga K, Sessions J, Akay AE. Application of an airborne laser scanner to forest road design with accurate earthwork volumes. *J Forest Res-Jpn* (2005) 10:113-123.

Bengston, David N., Fan e David P. 1999. The public debate about roads on the National Forests: an analysis of the news media, 1994-98. *Journal of Forestry* (97)8: 4-10.

Bruce J.C., Han H.S., Akay A.E. e Chung W. 2011. ACCEL: Spreadsheet-based cost estimation for forest road construction. *Western Journal of Applied Forestry* 26:189-197.

Calvani G., Marchi E., Piegai F e Tesi E. 1999. Funzioni, classificazione, caratteristiche e pianificazione della viabilità forestale per l'attività di antincendio boschivo. *L'Italia forestale e Montana*. 3: 109-125.

Cavalli M. 2009. Caratterizzazione idrologica e morfologica dei bacini montani mediante scansione laser da aeromobile. *Relatore Dalla Fontana G.. Dipartimento Territorio e sistemi agro-forestali, Facoltà di Agraria, Università degli studi di Padova, Legnaro.*

Cavalli R. e Grigolato S. 2010. Influence of characteristics and extension of a forest road network on the supply cost of forest woodchips. *J Forest Res-Jpn* 15:202-209.

Cavalli R., Cappellari E., Grigolato S. 2010. Metodologia per la valutazione delle esigenze di viabilità silvo-pastorale in un contesto montano (Method for assessment of forest road network requirement in a mountain area). *L'Italia Forestale e Montana*, 65 (3): 313-330

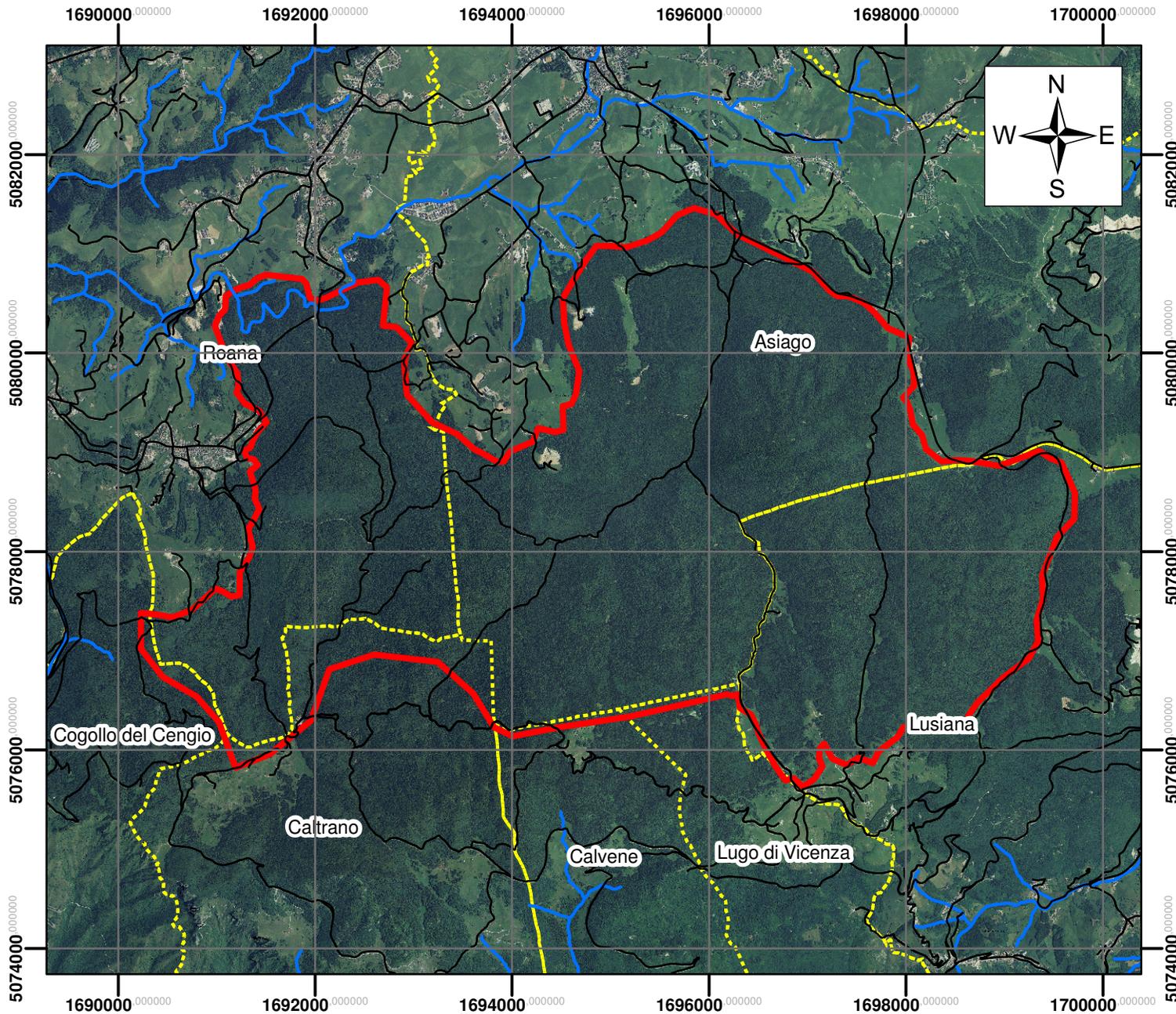
Cavalli R., Grigolato S., Pellegrin M., Ciesa M., Albergucci M., Cappellari E. 2013. La viabilità forestale in Veneto: stato dell'arte e prospettive future. *Unità di progetto Foreste e parchi, Regione Veneto*. P. 113.

Chirici G., Marchi E., Rossi V. e Scotti R. 2003. Analisi e valorizzazione della viabilità forestale tramite G.I.S.: la foresta di Badia Prataglia (AR). *L'Italia Forestale e Montana*, 58 (6): 460-481

Cielo P., Gottero F., Morera A. e Terzuolo P. 2003. La viabilità agro-silvopastorale: elementi di pianificazione e progettazione. *IPLA – Regione Piemonte*: 106 p.

- Cielo P., Morera A. e Pesce F. 2001. La progettazione della viabilità forestale su computer: le possibilità di impiego "RoadEng-Forest Engineering Software". In Atto Convegno Viabilità forestale: aspetti ambientali, legislativi e tecnico-economici, 201-203. 2-3 ottobre 1998. Lago Laceno.
- Contreras M, Aracena P, Chung W. Improving Accuracy in Earthwork Volume Estimation for Proposed Forest Roads Using a High-Resolution Digital Elevation Model. *Croatian Journal of Forest Engineering* (2012) 33:125-142.
- Coulter ED, Chung W, Akay AE, Sessions J (2002) Forest road earthwork calculations for linear road segments using a high resolution digital terrain model generated from LIDAR data. In: *Proceedings of the first international precision forestry symposium*. University of Washington College of Forest Resources, Seattle, WA, USA, pp 125–129.
- Ghajar I., Najafi A., Karimimajd A., Boston K. e Torabi S. 2013. A program for cost estimation of forest road construction using engineer's method, *Forest Science and Technology* (2013): 1-7.
- Grigolato S., Ciesa M., Cavalli R. e Pellegrini M. 2012. Trails as accessibility management tools in mountain areas. In: *Forest Engineering: Concern, Knowledge and Accountability in Today's Environment*. CAVTAT, 8-12 Ottobre. Cavtat: FORMEC 2012.
- Guderzo S. e Cavalli R. 2001. Proposta metodologica per la rilevazione delle caratteristiche della viabilità stradale finalizzata alla produzione di cartografia di supporto agli interventi AIB. *Rivista di ingegneria agraria*, 4: 253-263.
- Hayati E., Majnounian B. e Abdi E. 2012. Qualitative evaluation and optimization of forest road network to minimize total costs and environmental impacts. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 5: 121-125.
- Hippoliti G. 1976. Sulla determinazione delle caratteristiche della viabilità forestale. *L'Italia Forestale e Montana* (1976): 1370-1384.
- Hippoliti G. 2003. Note pratiche per la realizzazione della viabilità forestale. Arezzo: Compagnia delle foreste. p. 96.
- Lubello D. 2008. A rule-based SDSS for integrated forest harvesting planning. Relatore Cavalli R. Dipartimento Territorio e sistemi agro-forestali, Facoltà di Agraria, Università degli studi di Padova, Legnaro.
- Lugo AE, Gucinski H. Function, effects, and management of forest roads. *Forest Ecology and Management* (2000) 133:249-262.
- Marchi E. e Spinelli R. 1997. L'impatto ambientale delle strade forestali. *L'Italia forestale e montana*. 4:221-239

- Pellegrini M. 2012. Support tools for planning and management of a forest road network. Relatore Cavalli R. Dipartimento Territorio e sistemi agro-forestali, Facoltà di Agraria, Università degli studi di Padova, Legnaro.
- Pellegrini M., Grigolato S., Cavalli R. 2013. Spatial Multi-Criteria Decision Process to Define Maintenance Priorities of Forest Road Network: an Application in the Italian Alpine Region. *Croatian journal forest engineering*. 34(2013): 31-42.
- Potočnik I. 1996. The multiple use of forest roads and their classification. The Seminar on Environmentally Sound Forest Roads and Wood Transport. Sinaia, Romania. Proceedings, 103–117.
- Rogers, L.W. 2005. Automating contour based road projection for preliminary forestry road designs using GIS, MSc. Relatore Schiess P., Washington State University, College of Forest Resources, p 59.
- Stückelberger JA, Heinimann HR, Chung W, Ulber M. Automatic road-network planning for multiple objectives. In: Proceedings of the 29th Council on Forest Engineering Conference (2006). 233-248.
- White R.A., Dietterick B.C., Mastin T., Strohman R. Forest Roads Mapped Using LiDAR in Steep Forested Terrain. *Remote Sens*. 2010, 2, 1120-1141.
- Zambon M. 2012. Utilizzazioni forestali, viabilità e sicurezza. *Sherwood*, 18: 22-23.



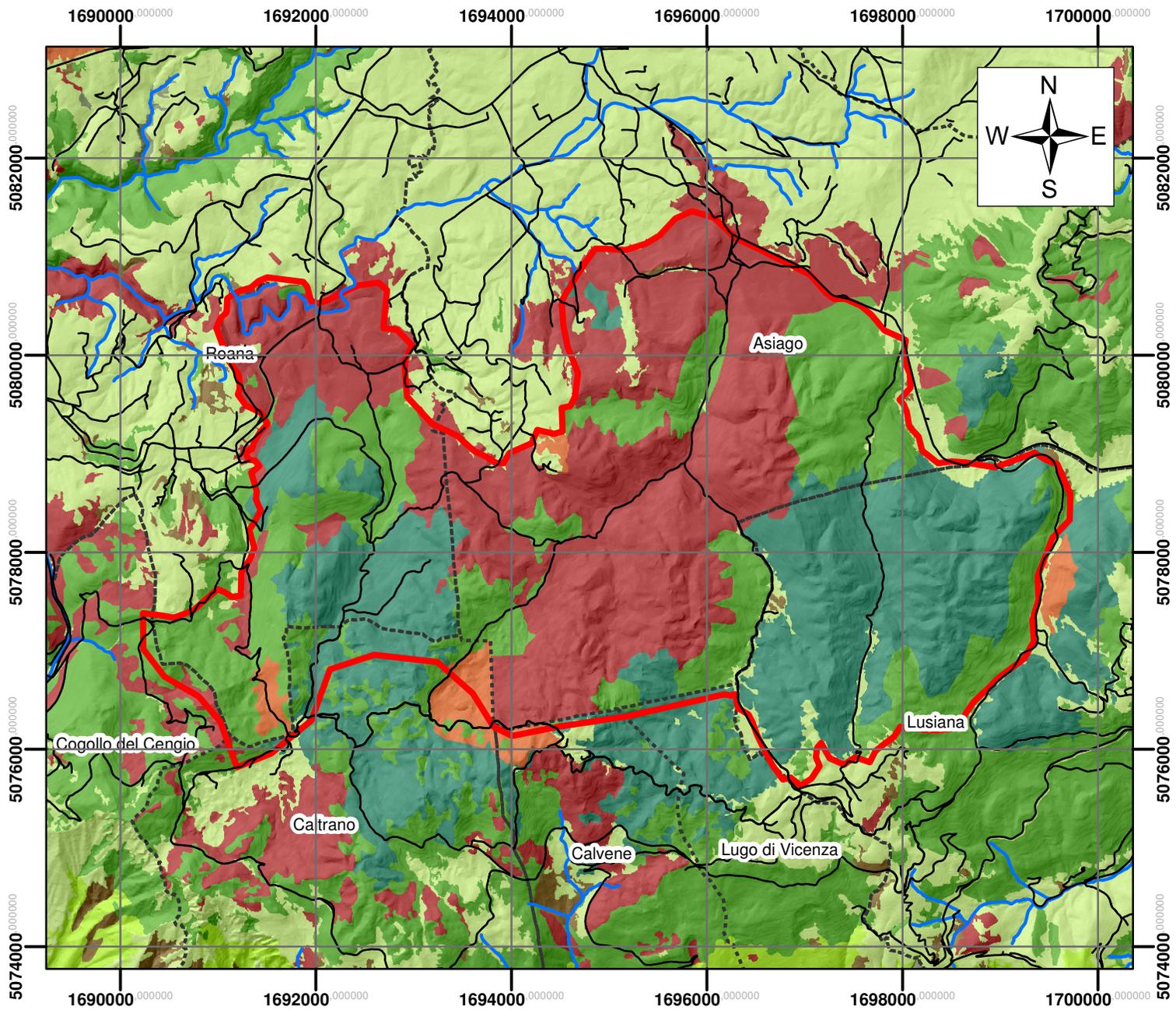
Allegato A: INQUADRAMENTO



Legenda

- Viabilità principale
- Reticolo idrografico
- ▭ Area di studio
- - - Confini comunali

Allegato A: USO DEL SUOLO



Allegato A: PENDENZE

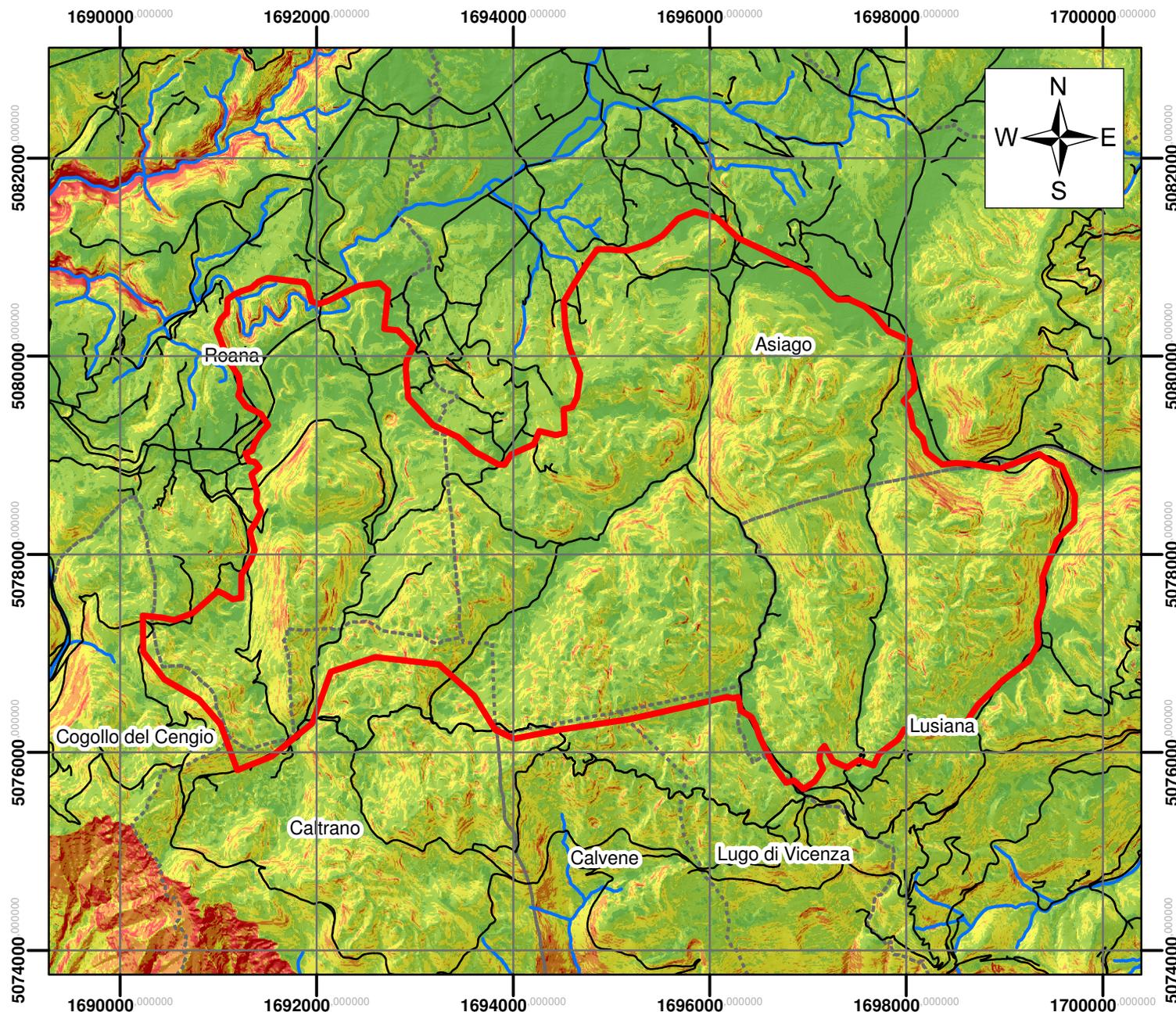


Legenda

- Area di studio
- Viabilità principale
- Reticolo idrografico
- Confini comunali

Pendenza

- %
- <10
 - 10 - 20
 - 20 - 30
 - 30 - 40
 - >40



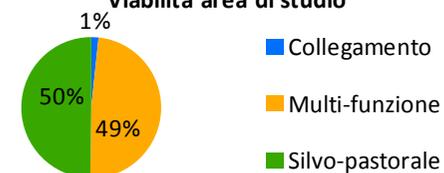
Allegato A: VIABILITÀ



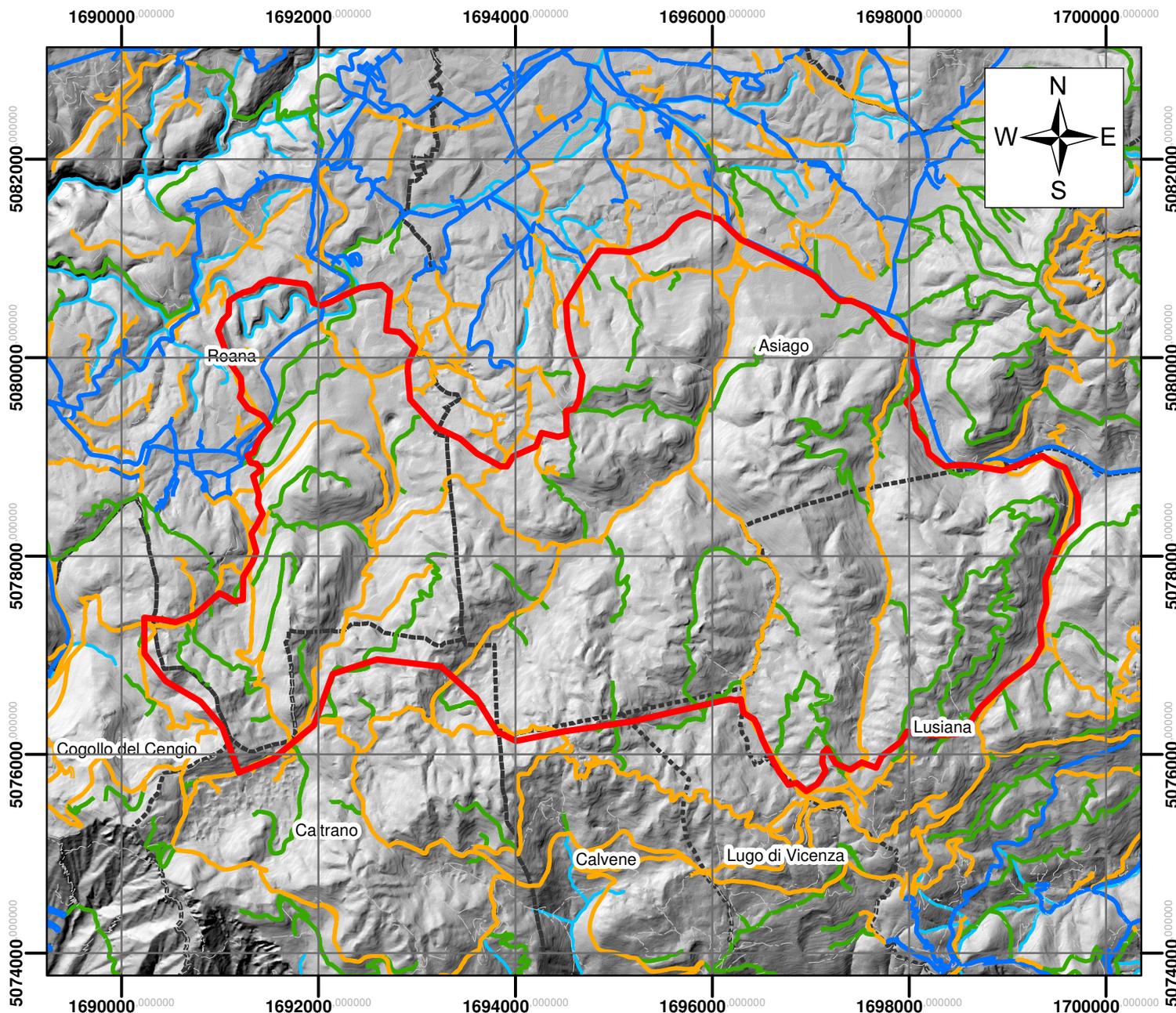
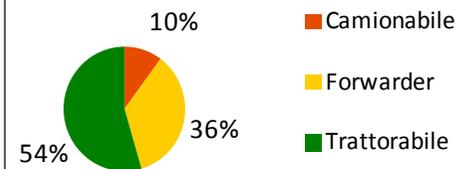
Legenda

-  Area di studio
-  Confini comunali
-  Reticolo idrografico
- Viabilità**
- Funzione**
-  Collegamento/Accesso
-  Locale a multi-funzione
-  Silvo-pastorale
-  Non percorribile con mezzi

Viabilità area di studio



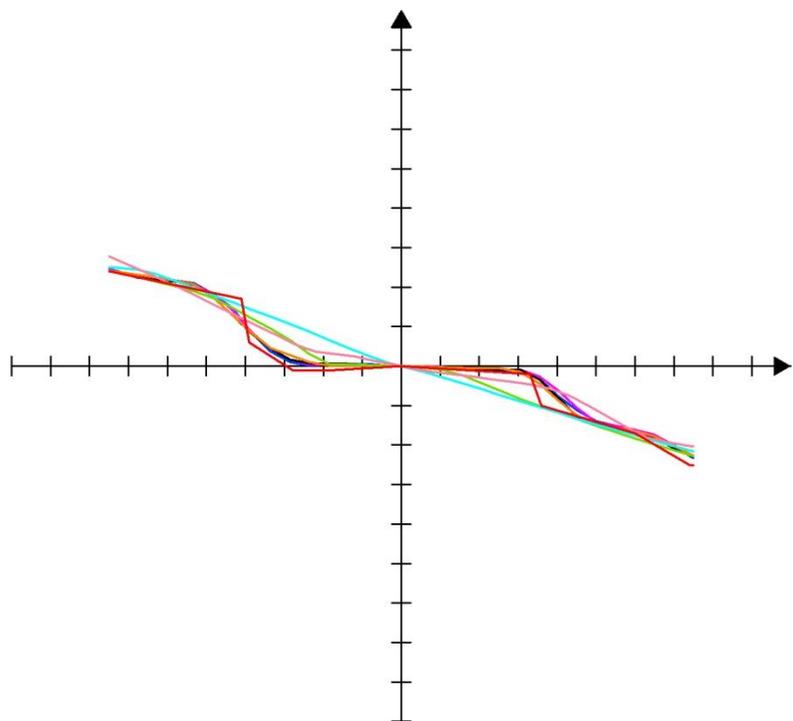
Strade forestali area di studio



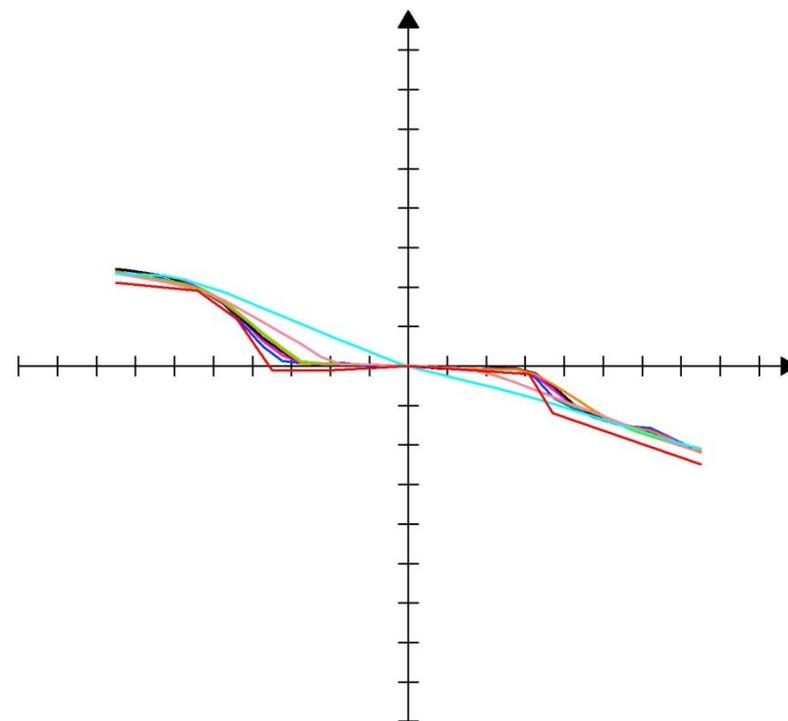
ALLEGATO B

Estratto tavole di confronto delle sezioni da LiDAR fuori copertura

Sezione 3400								
	Trupulse	Dem	Dem x2	Dem x4	Dem x8	Dem x16	Dem x32	Dem x100
Area monte	26.18	25.23	24.95	24.85	24.78	25.48	24.05	26.47
Area valle	11.96	11.44	11.33	10.94	10.79	9.16	9.01	8.09



Sezione 3500								
	Trupulse	Dem	Dem x2	Dem x4	Dem x8	Dem x16	Dem x32	Dem x100
Area monte	24.72	23.33	23.94	23.91	23.85	23.63	24.16	26.12
Area valle	10.96	9.96	10.38	10.35	10.55	9.30	9.35	8.16



ALLEGATO C

Estratto foglio di calcolo costi realizzazione nuove strade forestali

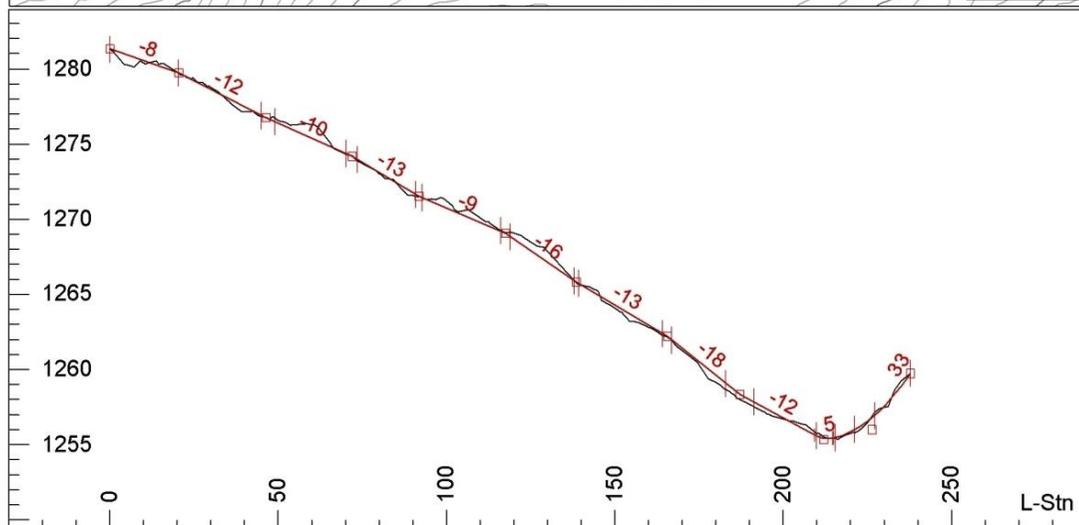
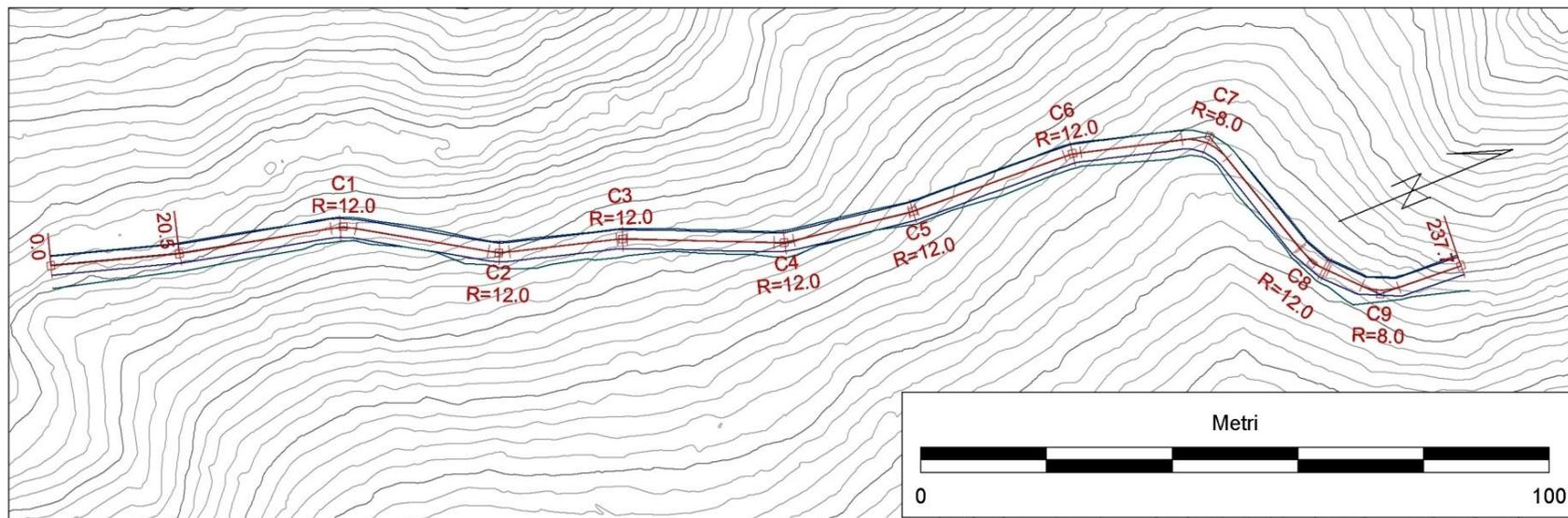
Parametri							caratteristiche strutturali						
Progettista	tratto n.	Sez n.	careggiata	Roccia	Copertura	scogliera	Pend. versante	Pend. media	Distanza	Pend. tratto	Largh. Apertura tracciato	Area scavo	Larghezza scarpate
		n.	m	%			%	%	m	%	m	m ²	m
		1					14.00				3.46	0.19	0.68
FP	1-2	3	80	sì	no		14.00	14.00	50.00	10.00			
		2					14.00				3.48	0.17	0.62
FP	2-3	3	80	sì	no			15.80	50.00	5.00			
		3					17.60				3.48	0.23	0.80
FP	3-4	3	80	sì	no			23.15	50.00	10.00			
		4					28.70				3.87	0.37	1.39
FP	4-5	3	80	sì	no			31.55	50.00	5.00			
		5					34.40				4.16	0.48	1.86
FP	5-6	3	80	sì	no			44.90	50.00	0.00			
		6					55.40				5.67	0.94	4.20
FP	6-7	3	80	sì	no			48.95	50.00	5.00			
		7					42.50				4.59	0.63	2.54
FP	7-8	3	80	sì	no			37.50	50.00	5.00			
		8					32.50				4.08	0.46	1.74
FP	8-9	3	80	sì	no			33.50	50.00	5.00			
		9					34.50				4.17	0.49	1.87
FP	9-10	3	80	sì	no			38.50	50.00	5.00			
		10					42.50				4.56	0.62	2.46
FP	10-11	3	80	sì	no			46.75	50.00	5.00			
		11					51.00				5.27	0.83	3.58
FP	11-12	3	80	sì	no			54.35	50.00	5.00			

costi																						
apertura tracciato			sbancamento			scavo in roccia			sottofondo stradale			strato superficiale			semina scarpate			canalette			Tot	€/m
m ²	€	€/m	m ³	€	€/m	m ³	€	€/m	m ³	€	€/m	m ³	€	€/m	m ²	€	€/m	n	€	€/m	€	€/m
173.50	260.25	5.21	1.79	20.35	0.41	7.14	304.88	6.10	15.00	188.55	3.77	7.50	168.68	3.37	32.50	26.00	0.52	1.00	106.80	2.14	1075.50	21.51
174.00	261.00	5.22	2.00	22.80	0.46	8.00	341.60	6.83	15.00	188.55	3.77	7.50	168.68	3.37	35.50	28.40	0.57	0.00	0.00	0.00	1011.03	20.22
183.75	275.63	5.51	3.00	34.20	0.68	12.00	512.40	10.25	15.00	188.55	3.77	7.50	168.68	3.37	54.75	43.80	0.88	1.00	106.80	2.14	1330.05	26.60
200.75	301.13	6.02	4.25	48.45	0.97	17.00	725.90	14.52	15.00	188.55	3.77	7.50	168.68	3.37	81.25	65.00	1.30	0.00	0.00	0.00	1497.70	29.95
245.75	368.63	7.37	7.10	80.94	1.62	28.40	1212.68	24.25	15.00	188.55	3.77	7.50	168.68	3.37	151.50	121.20	2.42	0.00	0.00	0.00	2140.67	42.81
256.50	384.75	7.70	7.85	89.49	1.79	31.40	1340.78	26.82	15.00	188.55	3.77	7.50	168.68	3.37	168.50	134.80	2.70	0.00	0.00	0.00	2307.05	46.14
216.75	325.13	6.50	5.45	62.13	1.24	21.80	930.86	18.62	15.00	188.55	3.77	7.50	168.68	3.37	107.00	85.60	1.71	1.00	106.80	2.14	1867.74	37.35
206.25	309.38	6.19	4.75	54.15	1.08	19.00	811.30	16.23	15.00	188.55	3.77	7.50	168.68	3.37	90.25	72.20	1.44	0.00	0.00	0.00	1604.25	32.09
218.25	327.38	6.55	5.55	63.27	1.27	22.20	947.94	18.96	15.00	188.55	3.77	7.50	168.68	3.37	108.25	86.60	1.73	1.00	106.80	2.14	1889.21	37.78
245.75	368.63	7.37	7.25	82.65	1.65	29.00	1238.30	24.77	15.00	188.55	3.77	7.50	168.68	3.37	151.00	120.80	2.42	0.00	0.00	0.00	2167.60	43.35
279.50	419.25	8.39	9.15	104.31	2.09	36.60	1562.82	31.26	15.00	188.55	3.77	7.50	168.68	3.37	203.75	163.00	3.26	1.00	106.80	2.14	2713.41	54.27
250.50	375.75	7.52	7.30	83.22	1.66	29.20	1246.84	24.94	15.00	188.55	3.77	7.50	168.68	3.37	159.25	127.40	2.55	1.00	106.80	2.14	2297.24	45.94
193.00	289.50	5.79	3.65	41.61	0.83	14.60	623.42	12.47	15.00	188.55	3.77	7.50	168.68	3.37	69.75	55.80	1.12	1.00	106.80	2.14	1474.36	29.49

ALLEGATO D

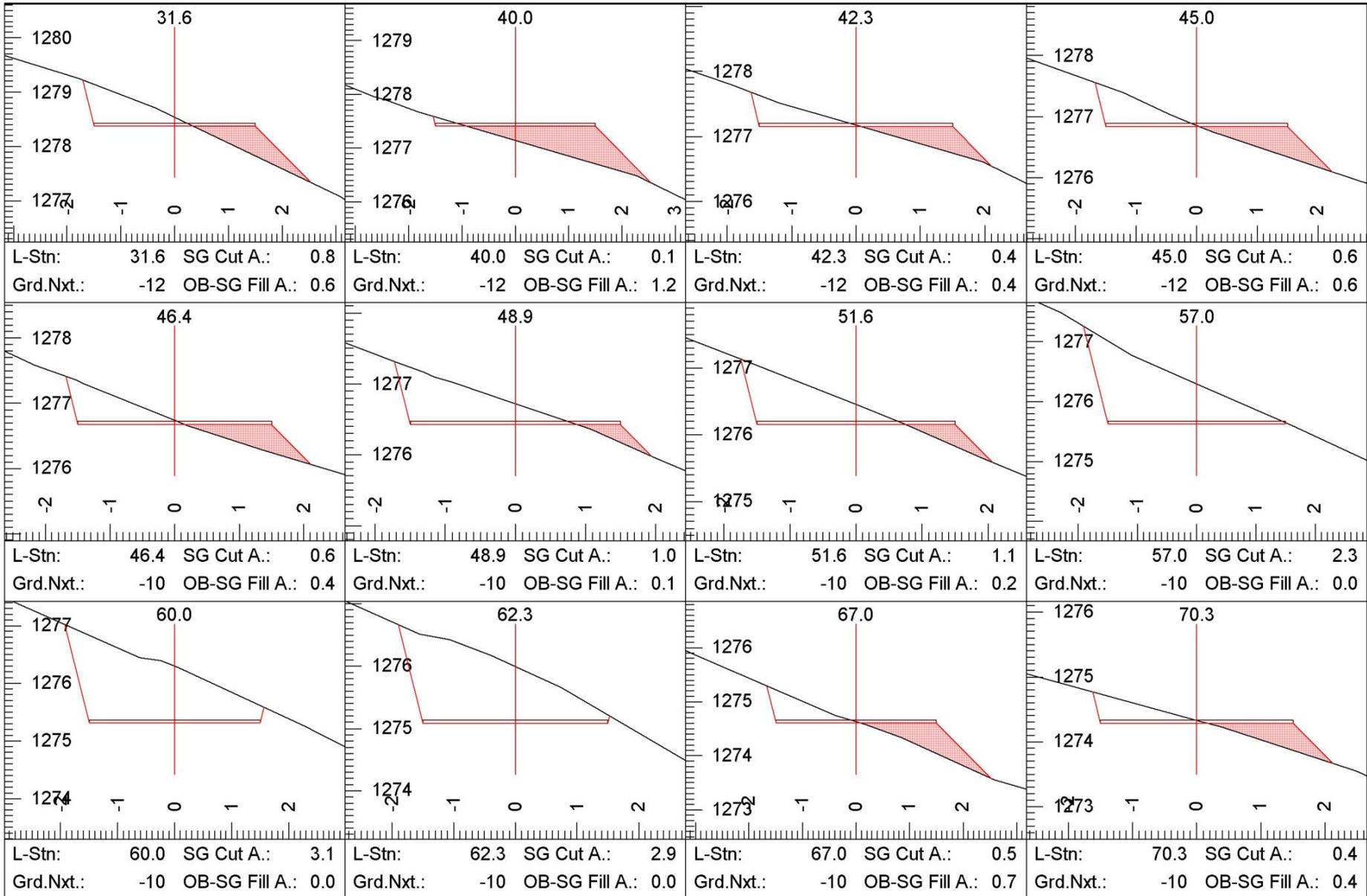
Estratto tavole Roadeng®

Planimetria, profilo longitudinale e computo metrico Nuovo tracciato LiDAR 3.0 m

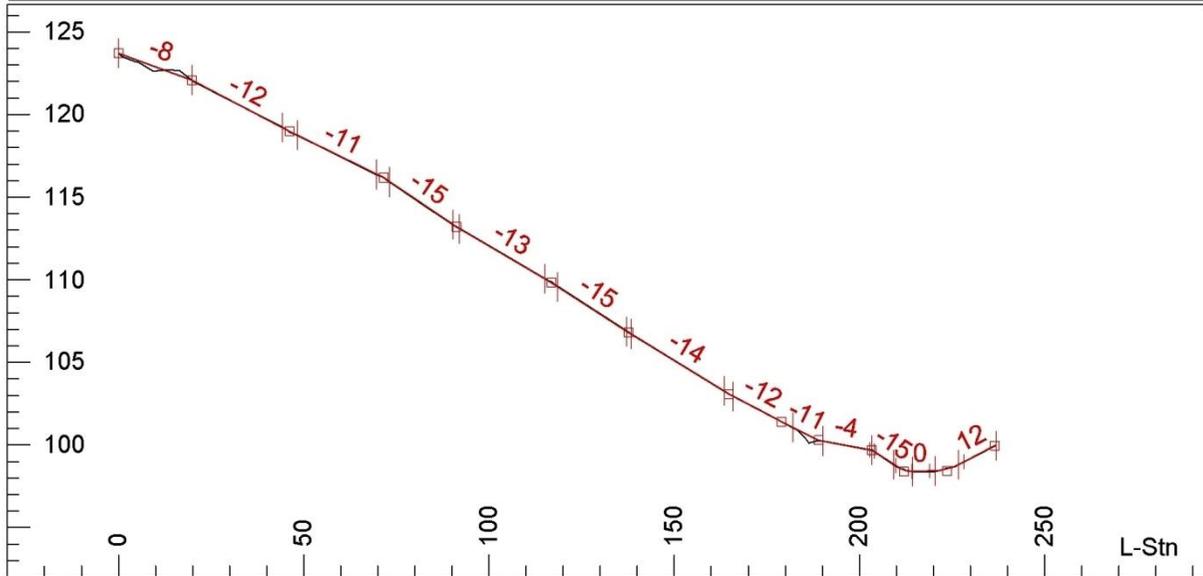
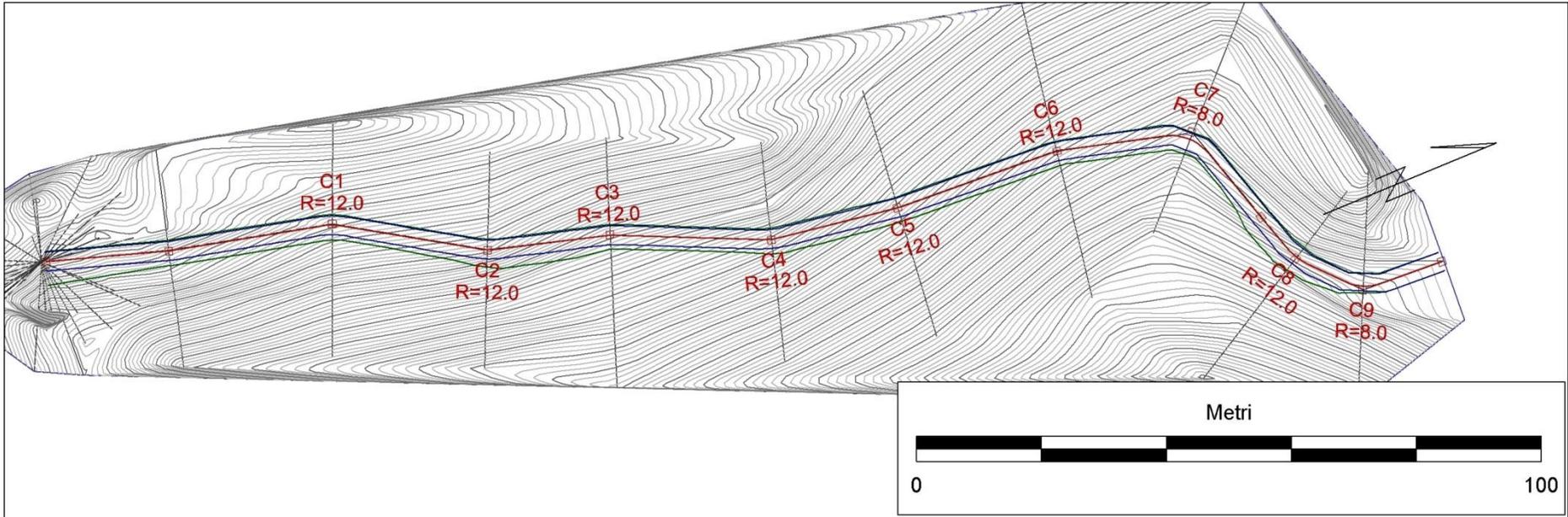


L-Stn m.	Grade %	SG Cut V. Cu. m.	SG Fill V. Cu. m.	Mass H. Cu. m.
0.0				0.0
20.5	-8	9.4	25.8	-16.4
46.4	-12	13.9	20.1	-22.6
72.0	-10	39.7	5.9	11.1
91.8	-13	10.6	21.7	0.0
117.6	-9	31.5	7.2	24.3
138.6	-16	34.2	2.3	56.1
165.6	-13	10.6	15.9	50.9
187.2	-18	3.3	25.4	28.8
209.4	-12	10.1	13.4	25.5
214.5	p -4	4.3	1.8	28.0
215.0	5	0.3	0.3	28.1
237.7	p 19	15.6	24.1	19.5
237.7	33	0.0	0.0	19.5

Estratto sezioni Nuovo tracciato LiDAR 3.0 m



Planimetria, profilo longitudinale e computo metrico Nuovo tracciato rilievo tradizionale 3.0 m



L-Stn m.	Grade %	SG Cut V. Cu. m.	SG Fill V. Cu. m.	Mass H. Cu. m.
0.0				0.0
19.7	-8	10.9	21.1	-10.2
46.1	-12	19.9	15.5	-5.8
71.5	-11	13.4	14.3	-6.7
91.1	-15	11.3	20.1	-15.6
116.9	-13	19.3	11.3	-7.5
137.7	-15	16.5	13.3	-4.3
164.8	-14	14.5	14.6	-4.4
179.0	-12	7.4	7.5	-4.6
189.0	-11	4.3	5.6	-5.8
202.9	-4	6.2	6.2	-5.9
203.9	p -10	0.5	1.2	-6.6
209.7	-15	4.0	6.7	-9.3
214.3	p -7	3.1	5.0	-11.2
219.0	0	2.2	4.3	-13.3
228.2	p 6	3.7	2.8	-12.3
236.6	12	3.3	0.0	-9.0

Estratto sezioni Nuovo tracciato rilievo tradizionale 3.0 m

