

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di Laurea magistrale in Scienze Forestali e Ambientali

Applicazione della tecnica “Structure from Motion”
per la modellazione topografica e l’analisi
multitemporale del fenomeno franoso “Lore”
(San Giovanni Ilarione, VR)

Relatore:

Dott. Francesco Bettella

Correlatori:

Prof. Vincenzo D’Agostino

Dott.ssa Roberta Pastorello

Laureando:

Leonardo Dalla B`a

Matricola n. 1203109

ANNO ACCADEMICO 2019-2020

Indice generale

Riassunto.....	7
Abstract.....	9
1. La stabilità dei versanti.....	13
1.1. Il Dissesto idrogeologico in Italia	13
1.2. Tipologie di frana e caratterizzazione morfologica	15
1.2.1. Classificazione dei fenomeni franosi	15
1.2.2. Morfologia di una frana	23
1.3. Fattori condizionanti la stabilità del versante	24
1.3.1. Analisi di stabilità del versante	24
1.3.2. Parametri e cause della franosità	29
1.4. Metodologie di intervento generali per la stabilizzazione di frane	30
2. La frana delle “Lore” (San Giovanni Ilarione, Verona)	36
2.1. Inquadramento geografico del sito	36
2.2. Caratterizzazione geo-morfologica del sito	39
2.3. Analisi storica del fenomeno franoso “Lore” e principali interventi di sistemazione effettuati ..	42
2.4. Risultati del monitoraggio dell’area di frana nel periodo 2007-2017	51
3. Obiettivi.....	56
4. Materiali e metodi	58
4.1. Area di studio.....	58
4.2. Rilievo fotogrammetrico: principi e strumenti.....	60
4.2.1. Mezzi di presa: UAV	65
4.2.2. Punti di controllo a terra e GPS	71
4.3. Modelli Digitali di Elevazione (DEM)	75
4.4. Elaborazione fotogrammetrica del DEM	78
4.5. DEM differencing	86
4.6. Elaborazione del DoD.....	88
5. Risultati	90
5.1. Elaborazione del modello digitale del terreno	90
5.2. Elaborazione del DEM of Difference (DoD)	95
6. Discussione	98
6.1. Analisi del procedimento di elaborazione del DTM	98
6.2. Analisi del DoD 2006 – 2019	102
7. Conclusioni	106

Ringraziamenti.....108
Bibliografia109

Riassunto

L'utilizzo delle tecnologie UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) sta conoscendo oggi un notevole incremento, grazie alle numerose applicazioni per le quali è possibile sfruttare i droni e i mezzi aerei a pilotaggio remoto. La praticità d'uso, i costi contenuti e la disponibilità di software di elaborazione delle immagini di ottima qualità sono alcuni dei punti di forza del rilievo fotogrammetrico moderno. Questi strumenti permettono di produrre dei modelli digitali del terreno di qualità anche per aree che sono difficilmente accessibili per l'operatore e che non potrebbero essere agevolmente rilevate con le consuete metodologie di misurazione.

L'idea di applicare la tecnologia UAV e l'analisi fotogrammetrica per il monitoraggio di frane e dissesti idrogeologici si è diffusa negli ultimi anni seguendo lo sviluppo e il miglioramento dei droni e delle camere fotografiche. Inoltre la continua evoluzione del comparto tecnologico dell'elaborazione e processamento dei dati, con la creazione di software e strumenti dedicati alla fotogrammetria e alla *computer vision* (Agisoft Photoscan, 3DF Zephyr, Pix4D, LiMapper) ha facilitato notevolmente il processo di creazione di modelli digitali da nuvole di punti tridimensionali.

Il sito scelto per l'indagine di tipo fotogrammetrico è posto nella zona orientale della provincia di Verona, all'interno del territorio comunale di San Giovanni Ilarione, in prossimità del confine amministrativo con la provincia di Vicenza. È noto come frana delle "Lore", dal nome del piccolo abitato presente nelle vicinanze, e rappresenta oggi uno dei fenomeni franosi più estesi nella provincia di Verona. Si tratta di un fenomeno franoso di natura rotatorio-traslativa che si sviluppa all'interno del versante di sinistra della valle del Cavalletto, un affluente del torrente Alpone. L'area instabile occupa una superficie di circa 10 ettari, in un intervallo di quota tra i 300 e i 450 metri, assumendo una forma semicircolare di lunghezza pari a 390 metri e larghezza di 300 metri. Il volume in movimento stimato nell'intera zona di dissesto è di circa 1.000.000 m³.

L'area è stata sottoposta a rilievo LiDAR nel 2006 ed in seguito è stata oggetto di sistemazioni idraulico-forestali da parte del Servizio Forestale Regionale di Verona in più occasioni.

Il rilievo fotogrammetrico con drone, effettuato alla fine di novembre 2019, ha riguardato in particolare una superficie di 3,9 ettari lungo il corso del torrente Cavalletto, che lambisce il piede della frana e ha causato nel corso degli anni numerosi cedimenti spondali oltre al danneggiamento delle opere di sistemazione realizzate dal Servizio Forestale di Verona.

Gli obiettivi di questo lavoro di tesi sono in primo luogo la produzione di un modello digitale del terreno per l'area di studio che rappresenti lo stato attuale utilizzando il software di elaborazione fotogrammetrica Agisoft Photoscan; in secondo luogo si vuole valutare il comportamento della frana, confrontando tra loro i modelli digitali del 2019 e del 2006, e definire quali siano state le aree maggiormente interessate da variazioni di quota. È stata per questo adottata la tecnica del *DEM of Difference* (DoD).

I dati raccolti con il volo UAV sono stati sottoposti ad elaborazione e processamento con Agisoft Photoscan, arrivando a produrre una nuvola di punti della zona di indagine. Data la presenza di vegetazione, che poteva alterare le quote del livello del suolo, la nuvola di punti è stata ripulita utilizzando il software open-source CloudCompare, ed è stato generato il modello digitale del terreno con celle di 0,5 metri. Con QGIS è stato infine condotto il confronto dei due DTM per ottenere il *DEM of Difference* per il periodo temporale 2006-2019.

I risultati mostrano come la zona di indagine sia stata interessata da movimento e da erosione spondale da parte del corso d'acqua in sinistra idrografica, particolarmente nella parte caratterizzata da un'ansa del torrente, dove le variazioni di quota registrate hanno raggiunto valori fino a 10 metri. Si è stimato che la superficie che ha mostrato variazioni negative di quota nell'area di studio sia pari a circa a 7000 m² e il volume ad essa associato sia di 16 610 m³.

L'approccio di tipo fotogrammetrico ha mostrato tuttavia delle criticità in alcune zone particolari, dove, a causa della vegetazione arborea densa e predominante od in presenza di configurazioni topografiche complesse, la stima delle quote è stata falsata ed ha prodotto delle variazioni in positivo dell'altitudine nel DoD. Si può comunque affermare che gli obiettivi posti sono stati raggiunti e soddisfatti.

Il ricorso alla fotogrammetria quale mezzo di rilievo di aree in frana è una possibilità interessante, data la facilità di rilievo del sito e dei costi contenuti, anche se richiede una maggior attenzione durante la fase di filtraggio della nuvola di punti in presenza di vegetazione.

Abstract

The use of UAV (Unmanned Aerial Vehicle) technologies is experiencing a significant increase today, thanks to the numerous applications for which it is possible to use drones and remotely piloted aircraft. The ease of use, low costs and the availability of high-quality image processing software are some of the strengths of modern photogrammetric survey. These tools allow you to produce good digital models of the terrain even for areas that are difficult to access for the operator and that could not be easily detected with the usual measurement methods.

The idea of applying UAV technology and photogrammetric analysis for the monitoring of landslides and hydrogeological instabilities has spread in recent years, following the development and improvement of drones and cameras. Furthermore, the continuous evolution of the data processing technology sector, with the creation of software and tools dedicated to photogrammetry (Agisoft Photoscan, 3DF Zephyr, Pix4D, LiMapper) has greatly facilitated the process of creating digital models from three-dimensional point clouds.

The site chosen for the photogrammetric survey is located in the eastern area of the province of Verona, in the township of San Giovanni Ilarione, near the administrative border with the province of Vicenza. It is known as landslide movement "Lore", from the name of a near small town, and today represents one of the largest landslides in the province of Verona. It is a landslide phenomenon of a rotary-translational nature that develops inside the left side of the Cavalletto valley, a left tributary of the Alpone stream. The unstable area occupies an area of about 10 hectares, in an altitude range between 300 and 450 meters, assuming a semicircular shape with a length of 390 meters and a width of 300 meters. The estimated moving volume in the entire area is about 1.000.000 m³.

The area was subjected to a LiDAR survey in 2006 and was subsequently the subject of hydraulic-forestry arrangements by the Regional Forest Service of Verona on several occasions. The photogrammetric survey with drone, carried out at the end of November 2019, concerned in particular an area of 3.9 hectares along the course of the Cavalletto creek, which erodes the foot of the landslide and has caused over the years numerous bank subsidence and damage of the refurbishment works carried out by the Forest Service.

The aims of this thesis work are mainly the production of a digital terrain model for the study area that represents the current state using the Agisoft Photoscan photogrammetric processing

software; secondly, we want to evaluate the behavior of the landslide by comparing the digital models of 2019 and 2006 and define which areas are most affected by changes in altitude. For this reason the DEM of Difference (DoD) technique was adopted.

The data collected with the UAV flight were processed with Agisoft Photoscan, resulting in the production of a point cloud of the survey area. The presence of vegetation could alter ground level elevations, so the point cloud was cleaned up using the open-source CloudCompare software, and the digital terrain model with 0.5-meter cells was generated. Finally, with QGIS, the comparison of the two DTMs was conducted to obtain the DEM of Difference for the time period 2006-2019.

The results show how the survey area was affected by movement and bank erosion by the river on the left bank, particularly in the part characterized by a bend in the stream, where the recorded altitude variations reached values up to 10 meters. It has been estimated that the surface that has shown negative changes in altitude is approximately 7000 m² and the associated volume is 16 610 m³.

The photogrammetric approach, however, has shown some criticalities in some particular areas, where due to dense and predominant tree vegetation or in the presence of complex topographic configurations, the estimate of the altitudes has been distorted and has produced positive changes in altitude. However, it can be said that the aims have been achieved and satisfied. The use of photogrammetry as a method of surveying landslide areas is an interesting possibility, thanks to the ease of surveying the site and low costs, even if it requires greater attention during the filtering phase of the point cloud in the presence of vegetation.

1. La stabilità dei versanti

1.1. Il Dissesto idrogeologico in Italia

In un territorio come quello italiano, costituito per il 75% da zone collinari e montane, le tematiche della stabilità del suolo e del dissesto idraulico-geologico risultano essere determinanti in riferimento alla valutazione del pericolo e del rischio del territorio.

La definizione in termini giuridici dei processi di natura geologico-idraulica trova riferimento nell'ordinamento italiano a partire dal r.d. 30 dicembre 1923, n.3267, *Riordinamento e riforma della legislazione in materia di boschi e di terreni montani* (legge Serpieri) con l'imposizione del vincolo idrogeologico. Il dissesto idrogeologico è inoltre al centro della legge 18 maggio 1989, n.183 *Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo*, e all'interno del più recente *Codice dell'Ambiente* d.lgs. 3 aprile 2006, n.152 (sezione I, parte III, artt. 53-72) (Ferrucci, 2015).

La Commissione interministeriale De Marchi per lo studio della sistemazione idraulica e della difesa del suolo, istituita con la legge n. 632/1967, nel definire il dissesto idrogeologico faceva riferimento principalmente ai fenomeni di tipo erosivo, dai più lenti e contenuti sino a quelli più imponenti, come le frane, senza però menzionare i processi di alluvionamento, cioè le piene (APAT, 2006).

Nel tempo la normativa si è mossa verso una visione più unitaria dei fenomeni, considerando le caratteristiche fluidodinamiche dell'insieme suolo-atmosfera ed i comportamenti più prettamente gravitativi in un'unica definizione di dissesto idraulico-geologico, definito nel d.lgs. 152/2006 come "la condizione che caratterizza aree ove processi naturali o antropici, relativi alla dinamica dei corpi idrici, del suolo o dei versanti, determinano condizioni di rischio sul territorio".

In relazione a fenomeni di dissesto geologico-idraulico si definiscono le azioni di difesa del suolo come "il complesso delle azioni ed attività riferibili alla tutela e salvaguardia del territorio, dei fiumi, dei canali e collettori, degli specchi lacuali, delle lagune, della fascia costiera, delle acque sotterranee, nonché del territorio a questi connessi, aventi le finalità di ridurre il rischio idraulico, stabilizzare i fenomeni di dissesto geologico, ottimizzare l'uso e la gestione del patrimonio idrico, valorizzare le caratteristiche ambientali e paesaggistiche collegate" (d.lgs

152/2006, art. 54). Questa serie di azioni è messa in atto per ridurre e mitigare il rischio geologico, definito come “la combinazione della pericolosità geologica e della potenziale vulnerabilità antropica di un territorio, espresso in termini di rapporto tra i prevedibili eventi di pericolosità geologica, la loro intensità e frequenza e le relative interferenze con le attività antropiche” (Bolt et al., 1975). La valutazione del rischio tiene conto quindi del grado di esposizione e vulnerabilità di un territorio di fronte ai processi geologico-idraulici.

I fenomeni di dissesto sono rappresentati, come visto in precedenza, da tutti quei casi in cui i processi sono originati a partire da una forza agente esogena: tale forza può essere costituita dall’acqua di dilavamento superficiale o di scorrimento in profondità, nonché dalla gravità nel caso di dissesti su versante. Le due forze agiscono spesso in modo simultaneo determinando la complessità del processo. I fenomeni di dissesto geologico-idraulico su versante sono strettamente correlati con quelli che determinano il dissesto idraulico. Essi possono infatti avere conseguenze dirette sulla dinamica dei corsi d’acqua dello stesso bacino, così come viceversa può accadere che il corso d’acqua guidi l’evoluzione della stabilità del versante.

In questo testo si tratterà in particolar modo di frane, ma i fenomeni di instabilità che possono interessare il versante sono più numerosi e comprendono le categorie riportate in figura 1.0.

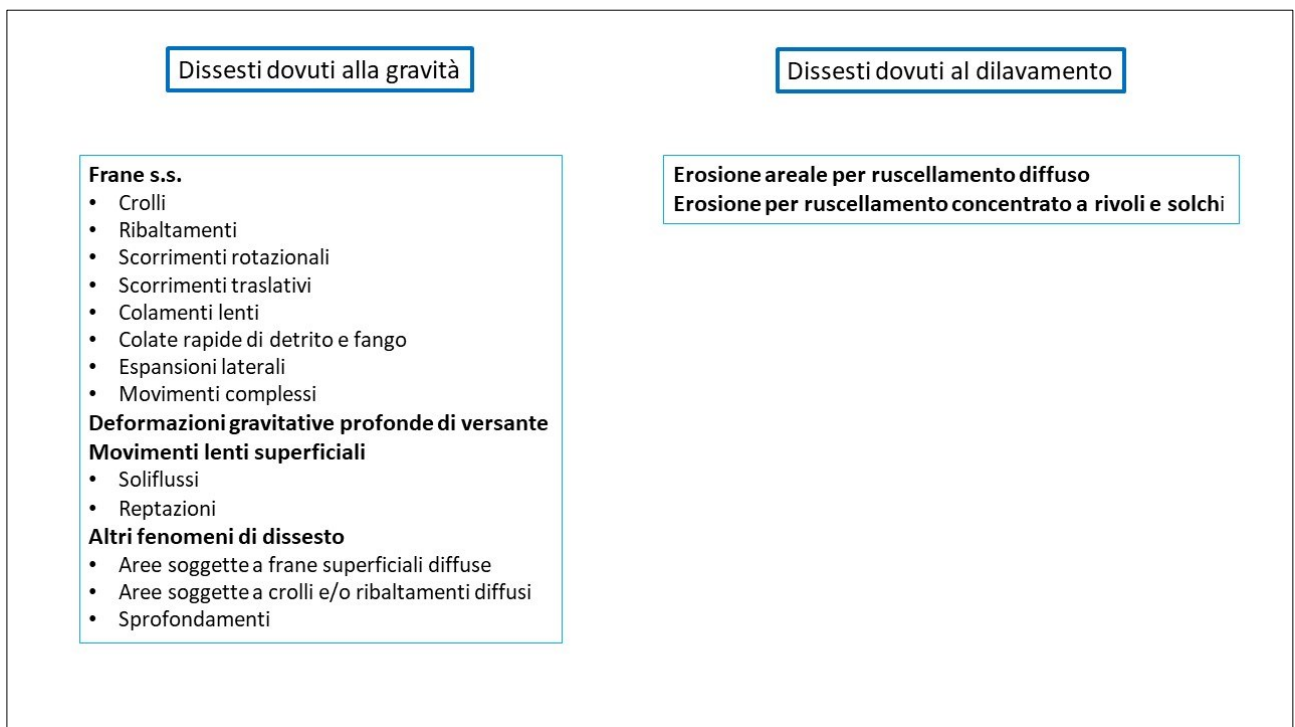


Figura 1.0: Schema di classificazione dei fenomeni di dissesto geologico-idraulico (APAT, 2006; modificato).

1.2. Tipologie di frana e caratterizzazione morfologica

1.2.1. Classificazione dei fenomeni franosi

Con i termini frana o fenomeno franoso si intende il movimento lungo un versante di parti più o meno superficiali del pendio, che possono essere costituite da roccia, detrito o terra. La forza principale che determina il moto è la gravità, ma sono molteplici le cause che concorrono nel determinare l'alterazione della condizione di equilibrio del versante (Grotzinger e Jordan, 2016). Tra queste si considerano la geologia del pendio, le condizioni idrologiche, geomorfologiche e climatiche del sito, nonché l'influsso delle azioni antropiche (Panizza, 2014).

I fenomeni franosi possono essere analizzati in funzione dell'aspetto di interesse, e per questo esistono numerose classificazioni basate su parametri diversi. Si possono classificare le frane definendo l'intensità del fenomeno (*I*) riferendosi alle volumetrie movimentate, come proposto da Fell (1994) (tabella 1.0).

Tabella 1.0: scala di intensità delle frane basata sul volume movimentato (Fell, 1994).

Intensità (I)	Descrizione	Volume (m ³)
2	Estremamente piccola	$< 5 \cdot 10^2$
2,5	Molto piccola	$5 \cdot 10^2 \div 5 \cdot 10^3$
3	Piccola	$5 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^4$
4	Media	$5 \cdot 10^4 \div 2,5 \cdot 10^5$
5	Mediamente grande	$2,5 \cdot 10^5 \div 10^6$
6	Molto grande	$10^6 \div 5 \cdot 10^6$
7	Estremamente grande	$> 5 \cdot 10^6$

Un'altra classificazione basata sull'intensità dei fenomeni franosi è stata proposta da Cruden e Varnes (1994) usando i parametri di velocità di scorrimento e i danni provocati a persone e/o cose (tabella 1.1). I due ricercatori hanno individuato 7 classi con fenomeni ad intensità crescente.

Una seconda classificazione proposta da Varnes (1978) e successivamente precisata da Cruden e Varnes nel 1996 è particolarmente esauriente da un punto di vista geomorfologico. Essa fa riferimento a tutti i movimenti di versante, includendo anche processi che non sono frane in senso stretto ma piuttosto deformazioni dei pendii. Non sono invece considerati i fenomeni di sprofondamento tipici di ambienti carsici o dovuti a cavità di origine antropica.

Tabella 1.1: scala di intensità delle frane basata sulla velocità e sul danno prodotto (Parisi, 2016).

Classe	Descrizione	Velocità tipica	Osservazioni sui danni
I	Estremamente lento	6 mm/anno	Impercettibile senza strumenti di monitoraggio, costruzione di edifici possibile con precauzioni.
II	Molto lento	16 mm/anno	Alcune strutture permanenti possono essere danneggiate dal movimento.
III	Lento	1,6 m/anno	Possibilità di intraprendere i lavori di rinforzo e restauro durante il movimento.
IV	Moderato	13 m/mese	Alcune strutture temporanee o poco danneggiabili possono essere mantenute.
V	Rapido	1,8 m/h	Evacuazione possibile; distruzione di strutture, immobili ed installazioni permanenti.
VI	Molto rapido	3 m/min	Perdita di vite umane, velocità troppo elevata per permettere l'evacuazione.
VII	Estremamente rapido	5 m/s	Catastrofe di eccezionale violenza, edifici distrutti per l'impatto del materiale spostato, molti morti.

I fenomeni franosi sono classificati sulla base di due criteri: il tipo di movimento e il tipo di materiale coinvolto. Per quanto riguarda il tipo di movimento, Cruden e Varnes distinguono cinque categorie principali:

- Crollo (*fall*)
- Ribaltamento (*topple*)
- Scivolamento (*slide*)
- Espansione laterale (*spread*)
- Colata (*flow*).

La suddivisione in riferimento ai materiali coinvolti prevede invece due tipi principali:

- Roccia lapidea o roccia (*rock*): materiale lapideo dotato di elevato grado di coesione anche se immerso in acqua per periodi prolungati;
- Roccia sciolta o terra (*engineering soil*): comprende il detrito grossolano (*debris*) e detrito fine o terra (*earth*) a formare un insieme di particelle solide poco coesive separabili con modeste sollecitazioni.

Di seguito vengono descritte sinteticamente le tipologie di frana proposte da Varnes sulla base del tipo di movimento (Panizza, 2014).

- Crollo: in questo tipo di fenomeno franoso si verificano distacchi di materiale da scarpate ad elevata pendenza con moto libero in aria della massa solida, che può

essere soggetta a rimbalzo o rotolamento fino al raggiungimento della zona di accumulo alla base della scarpata (figura 1.1). I crolli si verificano in genere su versanti in roccia interessati da discontinuità di tipo strutturale preesistenti (faglie, fratture). Sono in genere eventi improvvisi caratterizzati da elevata velocità di caduta dei materiali coinvolti.

- Ribaltamento: il movimento avviene per rotazione intorno ad un asse posto al di sotto del baricentro della massa in caduta (figura 1.2). Questi fenomeni si verificano in presenza di versanti ad andamento verticale o sub-verticale e costituiti da roccia fratturata. Si può parlare di ribaltamento a blocchi o di ribaltamento flessurale a seconda della cinematica del fenomeno e del materiale coinvolto.

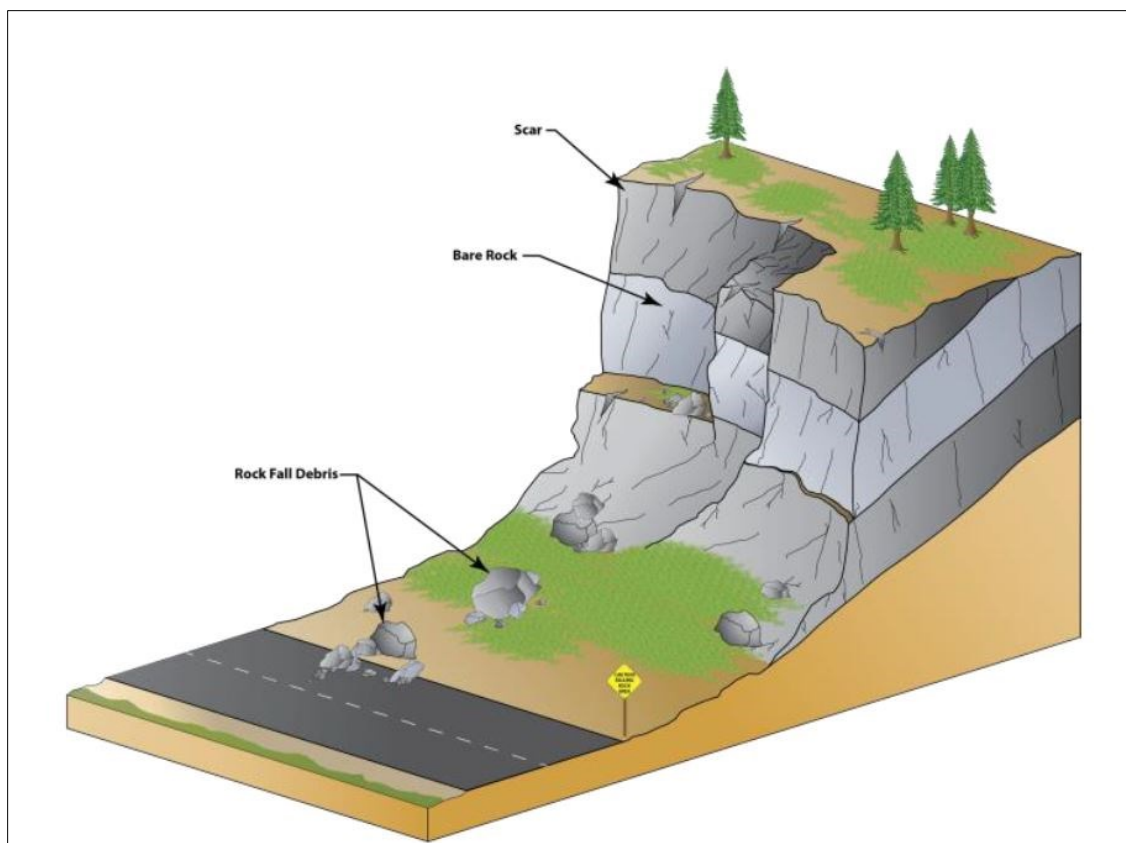


Figura 1.1: frana da crollo (Wyoming State Geological Survey).

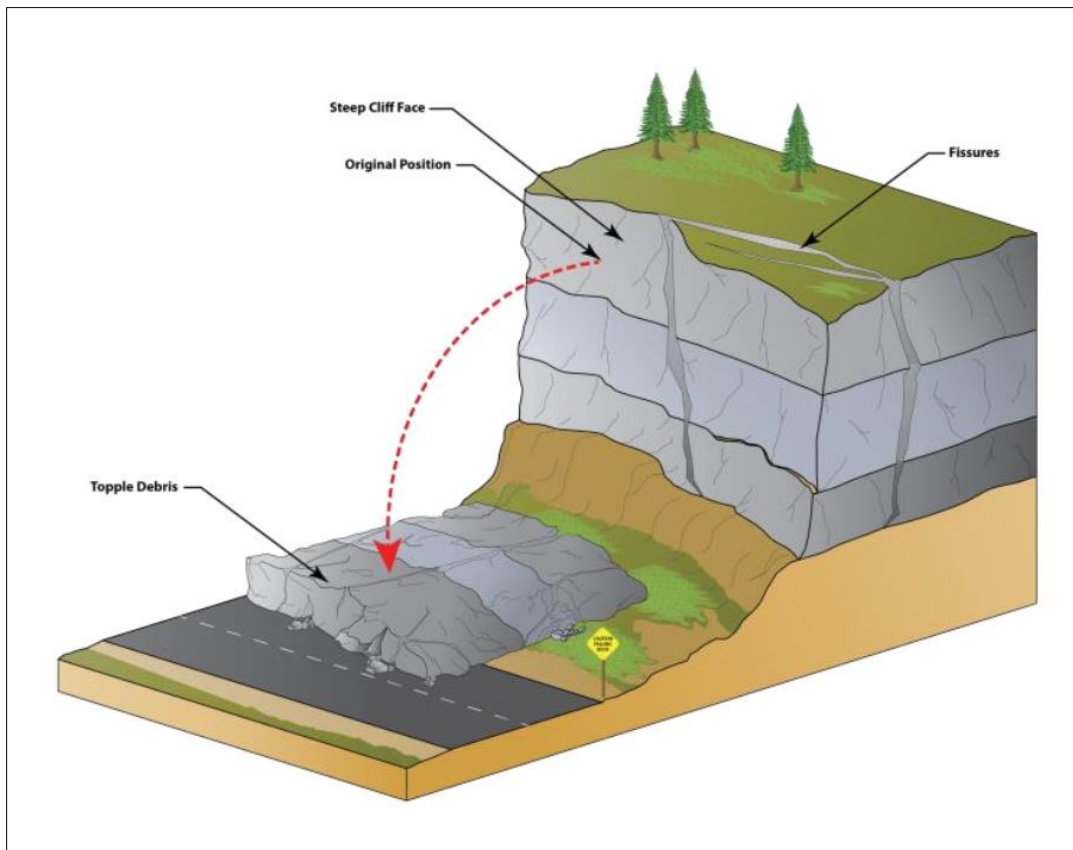


Figura 1.2: frana da ribaltamento (Wyoming State Geological Survey).

- Scivolamento: si tratta di movimenti in massa di roccia, terra o detrito lungo superfici di rottura nel versante dove si concentra uno sforzo di taglio che supera le resistenze. Anche in questo caso si possono distinguere due forme di movimento: si parla di scivolamento rotazionale quando esso si sviluppa su superfici di neoformazione concave (figura 1.3). Possono essere presenti superfici di rottura multiple che danno luogo alla formazione di scarpate di frana secondarie.
 Nel caso di fenomeni di scivolamento traslativo invece la massa tende a muoversi al di sopra di superfici di scorrimento preesistenti di tipo planare ed inclinata nella direzione del pendio. Tali processi possono originarsi in corrispondenza di una frattura o di altre zone di debolezza. Il corpo di frana può muoversi rimanendo pressoché integro oppure disgregarsi (figura 1.4).

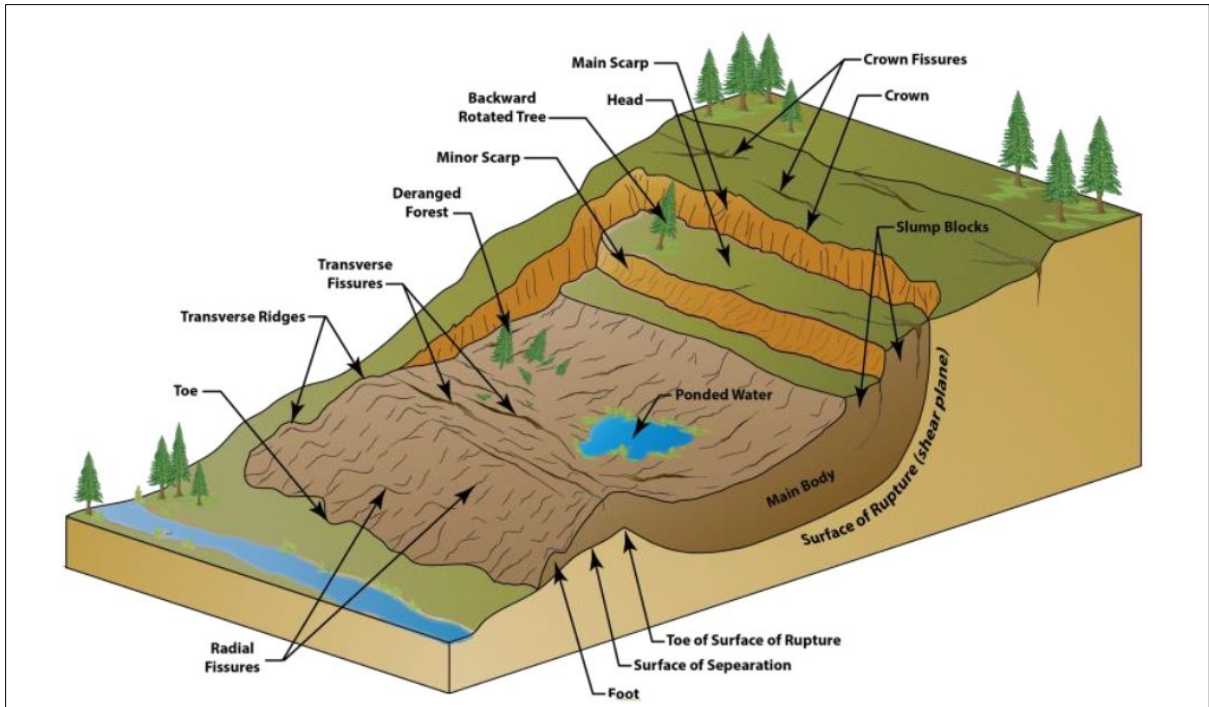


Figura 1.3: frana da scivolamento rotazionale (Wyoming State Geological Survey).

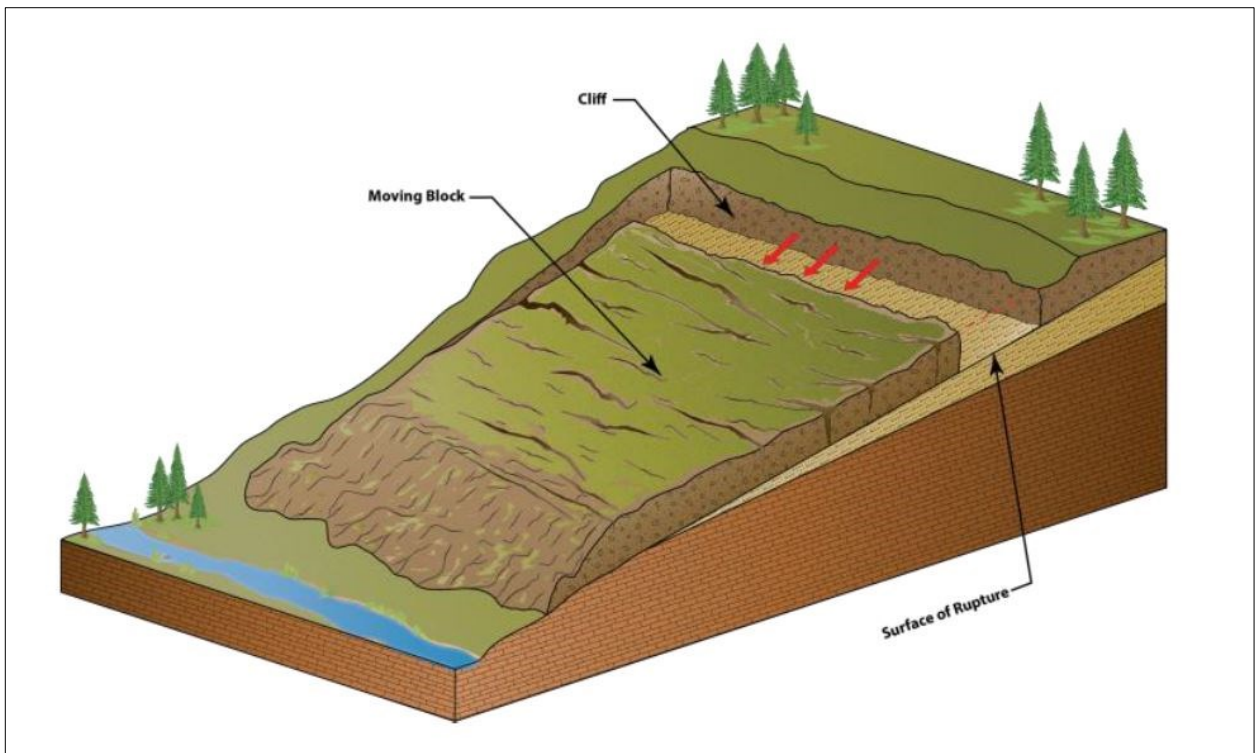


Figura 1.4: frana da scivolamento traslativo planare (Wyoming State Geological Survey).

- Espansioni laterali: si possono distinguere due tipologie di movimento a partire dalle caratteristiche litologiche del materiale roccioso. Si parla di espansioni laterali in rocce omogenee quando esse assumono un comportamento fragile e non è ben individuabile una superficie di taglio basale (figura 1.5a). Un secondo caso è quello delle espansioni laterali in terreni a comportamento fragile sovrapposti a terreni a comportamento visco-plastico. In questo contesto il processo di espansione laterale è determinato dal rigonfiamento del materiale visco-plastico che provoca la fratturazione dello strato fragile. In siti interessati dal processo sono frequentemente presenti le trincee, i fossati e le depressioni nella zona superficiale (figura 1.5b).

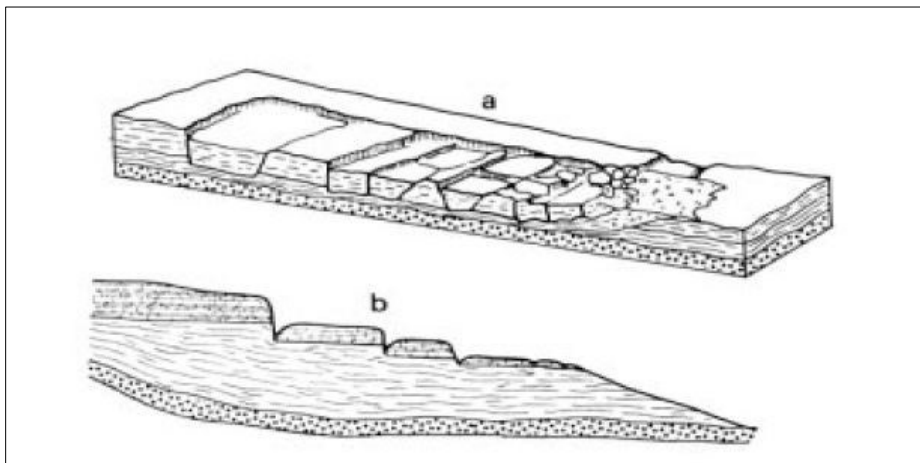


Figura 1.5: frana da espansione laterale (Guerra, 2008).

- Colate: si tratta di fenomeni di trasporto di massa che possono manifestarsi con reologie molto diverse a seconda del materiale trasportato e della sua concentrazione. Le superfici di taglio sulle quali il processo franoso prende inizio sono temporanee e non vengono preservate in occasione di eventi successivi. I terreni potenzialmente interessati da questa tipologia di fenomeno sono quelli costituiti da rocce alterate, coperture sedimentarie e accumuli di frana preesistenti. Si generano miscele di materiale solido ed acqua che presentano viscosità elevata. Si può parlare di colate di terra (*mud flow*), colate di detrito (*debris flow*) e colate di roccia (*rock flow*). A queste tre tipologie di colata sono in genere associate velocità decrescenti, volumi mobilitati e profondità di erosione differenti (figura 1.6).

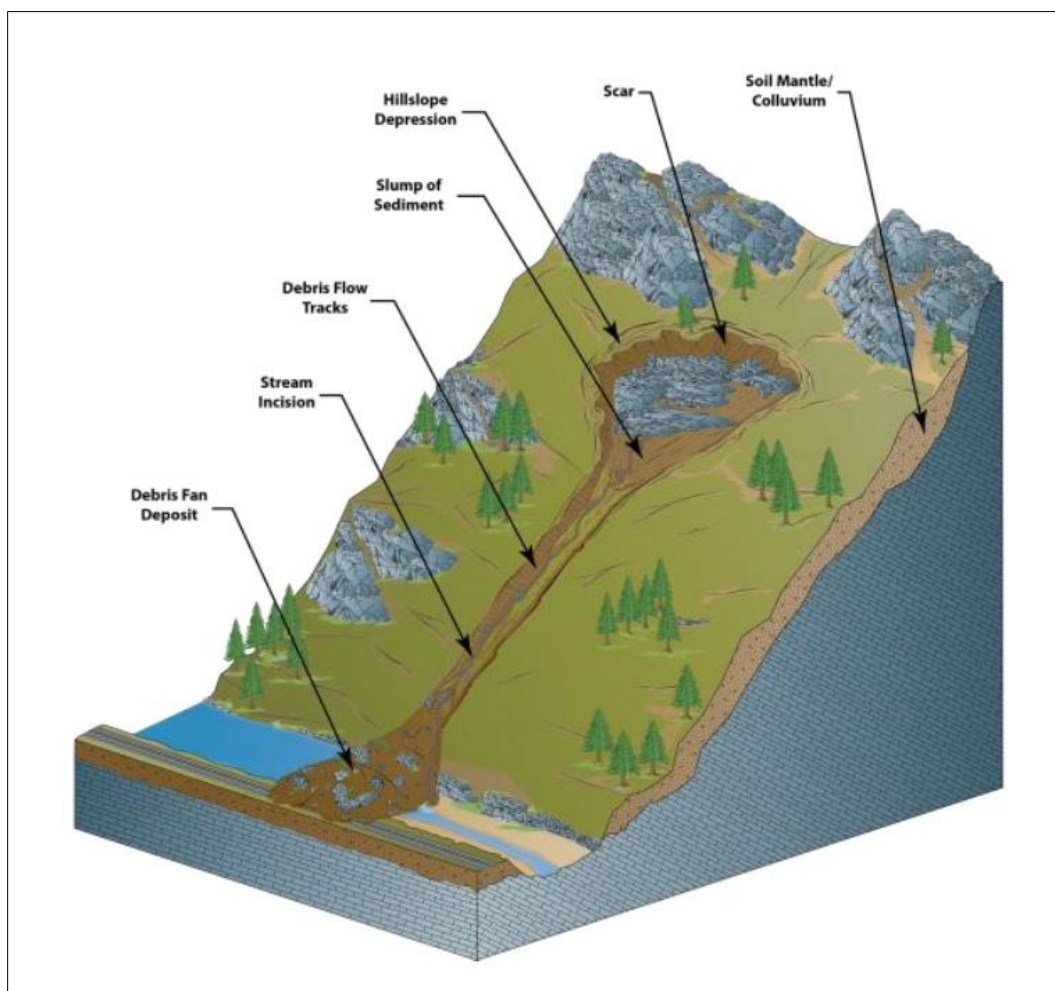


Figura 1.6: fenomeno di colata (Wyoming State Geological Survey).

Esiste una sesta categoria di fenomeni, oltre le cinque individuate da Cruden e Varnes (1996), che viene indicata con il termine di deformazione gravitativa profonda di versante. Quest'ultima è determinata dall'evoluzione in un periodo temporale molto lungo di interi versanti, con il coinvolgimento di volumi nell'ordine delle centinaia di milioni di metri cubi su superfici fino a qualche chilometro quadrato e con spessori della superficie in movimento di alcune decine di metri.

Oltre la classificazione del tipo di movimento secondo gli schemi proposti è bene considerare che nella realtà si possono verificare fenomeni di franosità complessi in cui il movimento è dato dalla combinazione di più tipi di frana. Generalmente è sempre individuabile un tipo di movimento predominante da un punto di vista spaziale o temporale, ma questi casi richiedono particolare attenzione nell'analisi della dinamica del fenomeno per poter intervenire in modo adeguato.

Nel tempo sono stati proposti degli aggiornamenti della nota classificazione di Varnes, proprio per tener conto della complessità dei fenomeni di frana, individuando delle nuove tipologie di processi riconducibili a 32 categorie (Hungri et al., 2014) (tabella 1.2).

Tabella 1.2: classificazione di Varnes modificata da Hungri et al. (2014).

Type of movement	Rock	Soil
Fall	1. <i>Rock/ice fall</i> ^a	2. <i>Boulder/debris/silt fall</i> ^a
Topple	3. <i>Rock block topple</i> ^a	5. <i>Gravel/sand/silt topple</i> ^a
	4. <i>Rock flexural topple</i>	
Slide	6. <i>Rock rotational slide</i>	11. <i>Clay/silt rotational slide</i>
	7. <i>Rock planar slide</i> ^a	12. <i>Clay/silt planar slide</i>
	8. <i>Rock wedge slide</i> ^a	13. <i>Gravel/sand/debris slide</i> ^a
	9. <i>Rock compound slide</i>	14. <i>Clay/silt compound slide</i>
	10. <i>Rock irregular slide</i> ^a	
Spread	15. <i>Rock slope spread</i>	16. <i>Sand/silt liquefaction spread</i> ^a
		17. <i>Sensitive clay spread</i> ^a
Flow	18. <i>Rock/ice avalanche</i> ^a	19. <i>Sand/silt/debris dry flow</i>
		20. <i>Sand/silt/debris flowslide</i> ^a
		21. <i>Sensitive clay flowslide</i> ^a
		22. <i>Debris flow</i> ^a
		23. <i>Mud flow</i> ^a
		24. <i>Debris flood</i>
		25. <i>Debris avalanche</i> ^a
		26. <i>Earthflow</i>
		27. <i>Peat flow</i>
	Slope deformation	28. <i>Mountain slope deformation</i>
29. <i>Rock slope deformation</i>		31. <i>Soil creep</i>
		32. <i>Solifluction</i>

Una ulteriore distinzione delle frane può essere fatta in riferimento al tempo, o meglio alla fase evolutiva in cui essa si trova. Ci sono 3 fasi di attività possibili: si parla di frane attive, frane quiescenti e frane stabilizzate o inattive (Amanti et al., 1996). Per frane attive si intendono quei siti caratterizzati da un movimento in corso o che si è verificato l'ultima volta entro l'anno. Le frane quiescenti sono invece quelle per le quali permangono le cause del movimento e che possono dunque essere riattivate. Si parla di fenomeni franosi inattivi o stabilizzati dove non può verificarsi la riattivazione da parte delle cause innescanti originarie. La stabilizzazione può avvenire in modo naturale quando le forzanti originarie non esercitano più alcuna influenza sulla stabilità del versante, oppure si può realizzare attraverso interventi di stabilizzazione artificiale con azioni antropiche.

1.2.2. Morfologia di una frana

Le frane, seppur determinate da movimenti di tipo diverso, possono essere descritte da un punto di vista morfologico ricorrendo ad un modello condiviso che indica le parti fondamentali del corpo di frana.

All'interno della superficie di pendio interessata da fenomeni franosi si possono distinguere tre zone principali:

- Zona di distacco: area del versante dove si verifica il distacco. È caratteristica la forma a semicerchio a formare una nicchia allargata alla sommità.
- Zona di pendio o di scorrimento: parte del versante intermedia sulla quale si è mosso il materiale di frana e dove le superfici di scorrimento sono state messe a nudo.
- Zona di accumulo: area posta alla base del versante dove, data una minore pendenza, l'insieme dei materiali forma un accumulo rilevato rispetto alla superficie topografica preesistente.

All'interno di ciascuna di queste zone possono essere individuate le principali forme morfologiche.

In riferimento alla figura 1.7 si trovano:

- Scarpata principale: superficie ad elevata pendenza che delimita la zona di distacco rispetto alla parte di pendio indisturbata, ed originata dall'allontanamento del materiale di frana dalla parte del pendio staticamente in equilibrio.
- Scarpata secondaria: si può formare sul materiale mobilitato a seguito di movimenti all'interno della frana dovuti a sforzi differenziali.
- Testa: la parte più elevata del corpo di frana, posta al limite tra il corpo di frana e la scarpata principale.
- Margine inferiore: posto alla distanza maggiore dalla scarpata principale, rappresenta il limite del corpo di frana.
- Piede: parte del corpo di frana che si trova a valle della zona di distacco.
- Corona: costituita dal materiale che è rimasto quasi indisturbato e posto in prossimità delle parti più alte della scarpata principale.

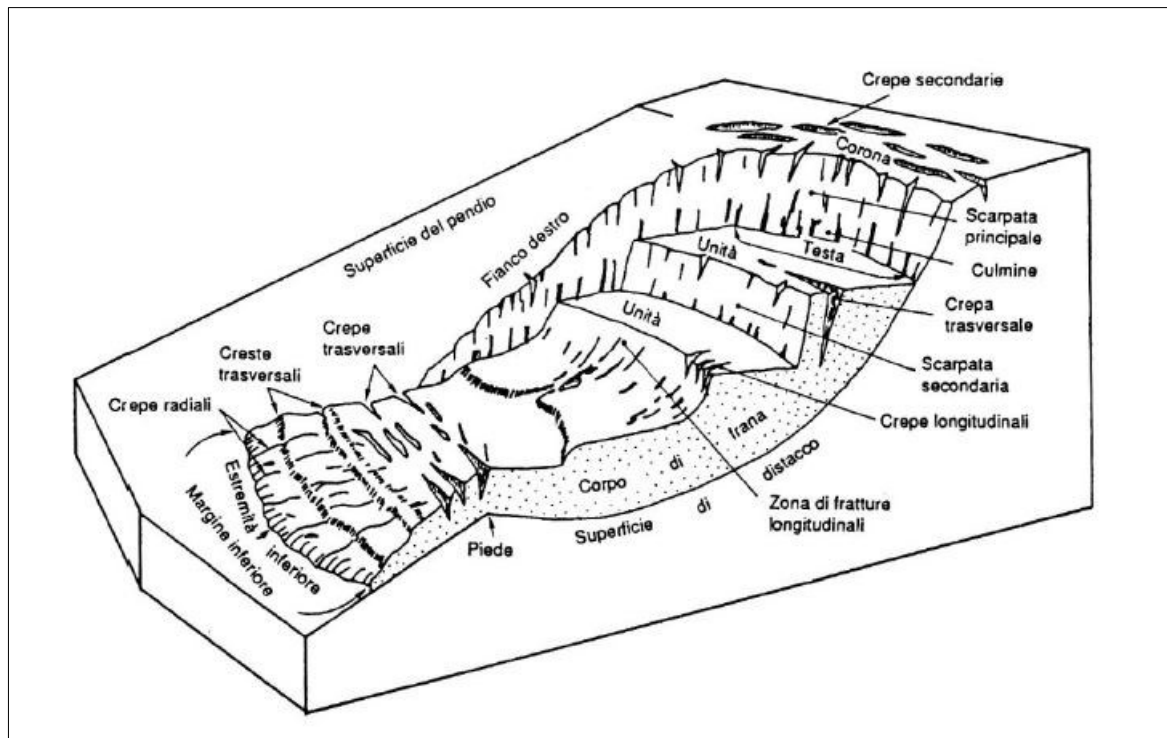


Figura 1.7: elementi morfologici di una frana (Panizza, 2014).

Lungo il versante possono inoltre formarsi crepe e fessurazioni dovute alle forze di trazione che hanno generato il fenomeno franoso, in particolare nella zona di distacco al di sopra della corona di frana.

1.3. Fattori condizionanti la stabilità del versante

1.3.1. Analisi di stabilità del versante

Per esprimere un giudizio sulla stabilità dei pendii si ricorre ai principi della geotecnica, la scienza che studia il movimento delle terre, con particolare attenzione per quei fenomeni determinati dalla forza di gravità. Tale giudizio si basa sulla definizione di un fattore di sicurezza (F_s) che quantifica il livello di equilibrio di un particolare tipo di suolo. I metodi di analisi della stabilità di un pendio cui si fa riferimento più spesso sono denominati metodi dell'equilibrio limite. L'ipotesi alla base di questa famiglia di metodi è che il terreno non subisca deformazione fino al raggiungimento di una condizione di rottura, e che quando questo limite viene raggiunto la resistenza al taglio si mantenga costante e indipendente dalle deformazioni accumulate (Facciorusso, 2011).

Il metodo del pendio indefinito appartiene a questa famiglia di metodi di analisi, ed è applicabile nel caso di frane che si verificano su pendio naturale e caratterizzate da uno spessore ridotto

dello strato instabile rispetto alla lunghezza della frana. Questo metodo prevede alcune assunzioni iniziali (Leoni, 2009):

- Il suolo ha un comportamento plastico, e in presenza di sollecitazioni le deformazioni sono crescenti fino al raggiungimento di un valore costante;
- Il materiale è in condizioni di isotropia, ovvero le proprietà meccaniche sono costanti in tutte le direzioni;
- L'area di analisi è un pendio a superficie indefinita, pendenza costante e caratteristiche pedologiche omogenee.

La stabilità del versante è definita a partire dal confronto tra le forze stabilizzanti e quelle destabilizzanti, e risulta nel fattore di sicurezza F_s . Il comportamento delle resistenze del suolo, dovute a coesione e attrito delle particelle del materiale, varia in relazione alla tipologia di terreno: in figura 1.8 viene riportato l'andamento di tali forze per suoli sciolti (S) e per suoli densi (D). Nel primo caso la resistenza aumenta all'aumentare degli sforzi (Δl) fino al raggiungimento di un punto di asintoto oltre il quale rimane costante. Nel caso di suoli densi invece la resistenza τ cresce fino a raggiungere un valore di picco, per poi subire una rapida decrescita ed attestarsi attorno ad un valore costante definito resistenza residua (Leoni, 2009).

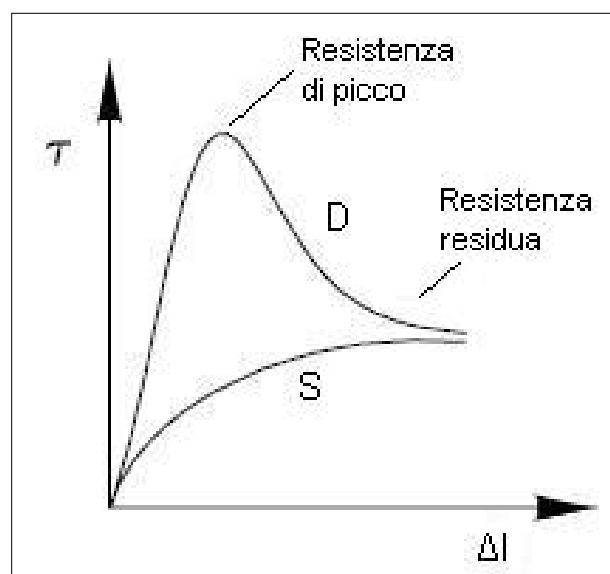


Figura 1.8: andamento della resistenza in funzione della tipologia di suolo (Leoni, 2009).

Facendo riferimento al metodo del pendio indefinito le forze in gioco possono essere schematizzate come in figura 1.9.

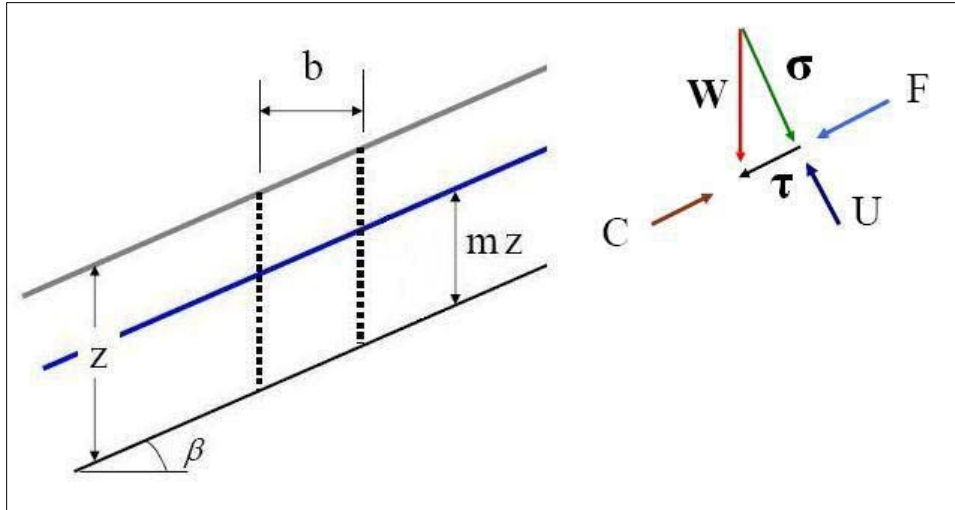


Figura 1.9: schematizzazione del metodo del pendio indefinito (Leoni, 2009).

Nel versante, avente uno spessore dello strato coinvolto z ed inclinazione pari all'angolo β , l'altezza dello strato al di sotto della falda è data da mz , dove m rappresenta un coefficiente di falda variabile tra 0 e 1. Il prodotto tra b e z corrisponde al volume di suolo mobilitato nel tratto di versante di lunghezza pari a b . Per semplicità si considera saturo anche lo strato posto superiormente rispetto il livello di falda. Le forze destabilizzanti sono W , componente del peso tagliante, F spinta dalla falda di suolo a monte e τ componente della forza peso parallela al pendio.

$$W = \gamma b z \quad (1.1)$$

$$\tau = \gamma b z \sin\beta \quad (1.2)$$

$$F = \gamma_w m z b \sin\beta \quad (1.3)$$

dove γ e γ_w rappresentano rispettivamente il peso specifico del suolo e dell'acqua.

Analogamente possiamo indicare le forze resistenti come C forza di coesione nel tratto di pendio interessato, σ componente della forza peso perpendicolare al pendio e U spinta idrostatica nel tratto in funzione del livello di falda mz .

$$C = c' \frac{b}{\cos\beta} \quad (1.4)$$

$$\sigma = \gamma b z \cos\beta \quad (1.5)$$

$$U = \gamma_w m z \cos^2\beta \frac{b}{\cos\beta} \quad (1.6)$$

Il fattore di sicurezza F_s , dato dal rapporto tra forze resistenti e forze destabilizzanti, diventa:

$$F_s = \frac{c' \frac{b}{\cos\beta} + \left[(\gamma b z \cos\beta) - (\gamma_w m z \cos^2\beta \frac{b}{\cos\beta}) \right] \tan\varphi}{(\gamma b z \sin\beta) + (\gamma_w b m z \sin\beta)} \quad (1.7)$$

Un pendio si può definire stabile se $F_s > 1$. Viceversa è definito instabile se il fattore di sicurezza F_s risulta minore di 1.

Un modello di frana a cui si fa riferimento con eguale frequenza è quello noto come modello del pendio di altezza limitata. Esso viene applicato in caso di frane di scorrimento dove l'influenza delle porzioni di sommità e di piede è importante, ovvero dove lo spessore dello strato in movimento è confrontabile con la lunghezza della frana. La condizione di instabilità si rende osservabile con la formazione di fessurazioni di trazione nella parte superiore del pendio. La rottura avviene in presenza di una superficie di forma curva-ellissoidale. A partire dalla posizione della linea di rottura rispetto al piede si possono distinguere frane di piede, frane di pendio o frane di base (figura 1.10). Alla prima tipologia appartengono quei casi dove la linea di rottura interseca il piede di frana; all'interno delle frane di pendio si considerano invece quei fenomeni dove la linea di rottura si posiziona al di sopra del piede di frana, all'interno del pendio; all'ultima tipologia appartengono invece le frane la cui linea di rottura si pone al di sotto del livello del piede.

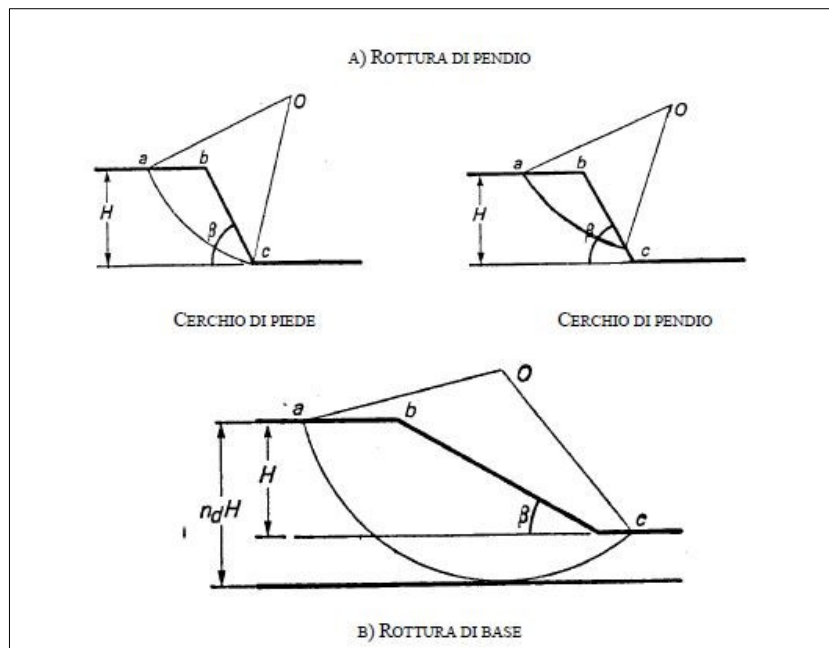


Figura 1.10: schemi di rottura di un pendio di altezza limitata lungo una superficie di scorrimento circolare (Facciorusso, 2011).

Per valutare la stabilità di versanti naturali caratterizzati dalla complessità della morfologia e delle condizioni geotecniche si fa riferimento al metodo delle strisce, proposto da Petterson nel 1916 e perfezionato da Fellenius e Bishop (Utali e Crosta, 2015). Il pendio viene suddiviso in più sezioni lungo la linea di massima pendenza a formare una serie di n conci posti su una superficie di slittamento di forma circolare. Il cerchio, detto critico, deve soddisfare la condizione per la quale il rapporto tra il momento delle forze resistenti e quello delle forze destabilizzanti sia minimo. Il rapporto tra i momenti indica il coefficiente di sicurezza, e come per il metodo del pendio indefinito il valore che assicura la stabilità del versante è maggiore di 1.

Con il metodo di Bishop (figura 1.11) viene aggiunta l'ipotesi per la quale la risultante delle componenti delle forze agenti sulle facce laterali nella direzione verticale è nulla. Il peso di ciascuna striscia è applicato nel suo baricentro e agisce sull'arco di cerchio della superficie di slittamento corrispondente nelle sue componenti normali e di taglio N_i e T_i .

$$N_i = W_i \cos \alpha \quad (1.8)$$

$$T_i = W_i \sin \alpha \quad (1.9)$$

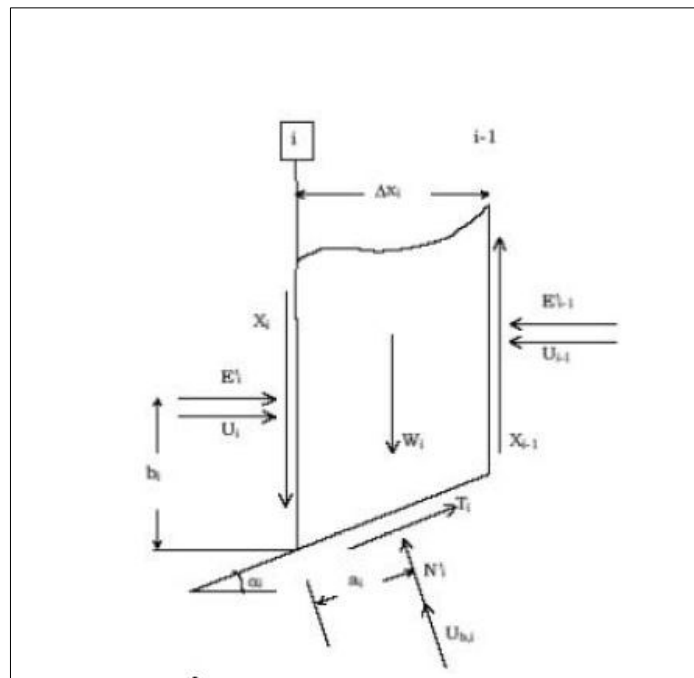


Figura 1.11: geometria del concio i -esimo e forze agenti su di esso (Parisi, 2016).

La somma delle forze di taglio deve essere controbilanciata dalle forze resistenti del terreno. Il coefficiente di sicurezza F_s è dato dal rapporto tra forze stabilizzanti e destabilizzanti. Se è

presente una falda occorre considerare nel calcolo anche l'effetto della pressione neutrale u lungo il piano di scorrimento che riduce la pressione efficace, come indicato da Terzaghi (1936).

1.3.2. Parametri e cause della franosità

I fattori che condizionano la stabilità di versanti sono molteplici e si possono raggruppare nelle seguenti categorie:

- Fattori litologici: versanti in roccia o in materiale sciolto hanno comportamenti diversi;
- Fattori strutturali: la disposizione degli strati (orizzontale, a reggipoggio, a franapoggio) determina il maggiore o minor grado di stabilità;
- Fattori morfologici: acclività del versante (pendenze minori comportano maggiore stabilità), conformazione del pendio (displuvio/compluvio), altezza del versante;
- Fattori idrogeologici: permeabilità del suolo; grado di copertura vegetale;
- Fattori antropici: disboscamento, scavi e modifiche del profilo del versante, sovraccarico dovuto alla presenza di edifici.

Tali fattori possono agire sul grado di stabilità del versante determinando un incremento degli sforzi di taglio destabilizzanti o riducendo la resistenza del versante. Nel primo gruppo si possono inserire processi come l'erosione ad opera dei corsi d'acqua, la rimozione del piede del versante ad opera dell'uomo, le infiltrazioni d'acqua nel versante e le pressioni dovute al rigonfiamento degli strati del suolo (es. argille). Nel gruppo dei fattori che riducono la resistenza si possono indicare le caratteristiche di composizione geologica del versante (es. rocce sedimentarie argillose, tufi) e la tessitura sciolta del terreno, oltre che le variazioni alla resistenza dovute all'azione dell'acqua.

Le cause di innesco di fenomeni franosi possono essere suddivise in tre classi:

- Cause predisponenti: le caratteristiche morfologiche, idrologiche e geologiche che determinano la potenziale instabilità di un versante. Si tratta di fattori naturali o antropici che fungono da facilitatori per un'azione più efficace di altri processi. Tra i fattori naturali si possono considerare le condizioni climatiche, l'inclinazione del pendio, la struttura tettonica e la disposizione degli strati rispetto al pendio, microsismi e movimenti orogenici, circolazione delle acque superficiali e sotterranee.
- Cause preparatorie: possono essere pensate come dei processi che progressivamente destabilizzano il versante. Si tratta di fattori dinamici di origine naturale o antropica

(periodi piovosi prolungati, periodi siccitosi, erosione da parte delle acque, disboscamento, terrazzamenti e sbancamenti) che agiscono più efficacemente dove la propensione del versante al dissesto è già presente.

- Cause innescanti: si tratta di stimoli interni o esterni al versante che determinano un aumento degli sforzi o una riduzione della resistenza al taglio. Possono essere cause innescanti forzanti meteorologiche come precipitazioni eccezionali o sgelò improvviso, sovraccarichi improvvisi per caduta massi o per carico da valanga, lo scalzamento delle ripe fluviali per piene straordinarie dei corsi d'acqua (Dalla Fontana, 2013).

1.4. Metodologie di intervento generali per la stabilizzazione di frane

Qualsiasi intervento mirato ad aumentare la stabilità di un versante interessato da frana deve essere preceduto da una fase di analisi e studio del sito per conoscere i processi alla base del problema, approfondendo in modo particolare gli aspetti legati a:

- Geologia e pedologia del pendio
- Clima e idrologia
- Orografia e topografia
- Copertura vegetale
- Presenza di impatti antropici.

Una volta noti questi aspetti fondamentali è possibile formulare delle ipotesi di progetto a seconda della tipologia di frana che interessa il versante. Possiamo essere in presenza di frane superficiali dovute alla disgregazione di uno strato di spessore ridotto, oppure di frane di massa che scorrono su superfici di rottura poste in profondità (Benini, 1990).

Nel caso di frane superficiali l'intervento di consolidamento va iniziato dall'alto con lo scoronamento della zona di distacco, rimuovendo i massi in equilibrio precario e riducendo la pendenza del tratto sommitale con l'asportazione del ciglio di frana e il suo livellamento. In presenza di cigli di distacco ad elevata pendenza è possibile intervenire con la realizzazione di gradonamenti.

Alla fase preliminare di scoronamento segue lo scavo di un fosso di guardia per catturare ed allontanare le acque di scorrimento superficiale provenienti dalla parte di versante al di sopra della zona dissestata, impedendo così l'infiltrazione e l'erosione superficiale del pendio in frana.

Le acque devono essere convogliate in collettori e canalette appositi che scorrono ai lati della superficie instabile. Possono rendersi necessarie anche opere di drenaggio sotto-superficiale (trincee e pozzi drenanti) per catturare l'acqua che si infiltra e che potrebbe affiorare all'interno del corpo di frana o che potrebbe ridurre ulteriormente la resistenza del pendio (figura 1.12). Altro esempio di regimazione idrica è rappresentato dalla protezione del piede della frana dall'erosione dovuta all'azione di un corso d'acqua mediante la realizzazione di opere (pennelli, scogliere, gabbionate) che allontanino il flusso dalla base del pendio.

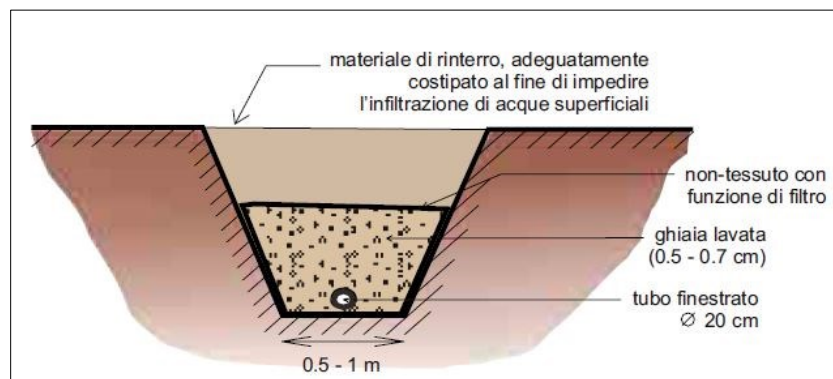


Figura 1.12: esempio di trincea drenante (APAT, 2002).

La regimazione idrica, oltre che nella zona di contorno, deve essere messa in atto anche all'interno del corpo di frana con la posa di dreni e canalette disposte in genere a spina di pesce e confluenti in un collettore centrale. Il drenaggio può essere realizzato con l'impiego di vari materiali: per le canalette superficiali si può ricorrere a legname e pietrame, mentre per i drenaggi sotto-superficiali possono essere usati sistemi combinati di geotessile a funzione filtrante e tubi fessurati in materiale plastico.

Alla regimazione idrica segue la modellazione vera e propria del corpo di frana e il suo consolidamento mediante interventi di tipo meccanico che mirano a ridurre la pendenza del versante laddove l'angolo di attrito interno del materiale non sia compatibile con l'acclività del pendio. È necessario spesso realizzare opere di trattenuta e di sostegno del terreno, che avranno caratteristiche diverse in funzione delle qualità fisico-strutturali del terreno e dell'inclinazione del versante. Le principali tipologie di opere che possono essere realizzate sono le seguenti:

- Gradonata con materiale vegetale
- Fascinata
- Vimate
- Muretti a secco

- Palizzata in legname con talee
- Grate in legname con talee
- Palificata a parete singola o doppia (figura 1.13)
- Terra rinforzata con georeti o geotessili.

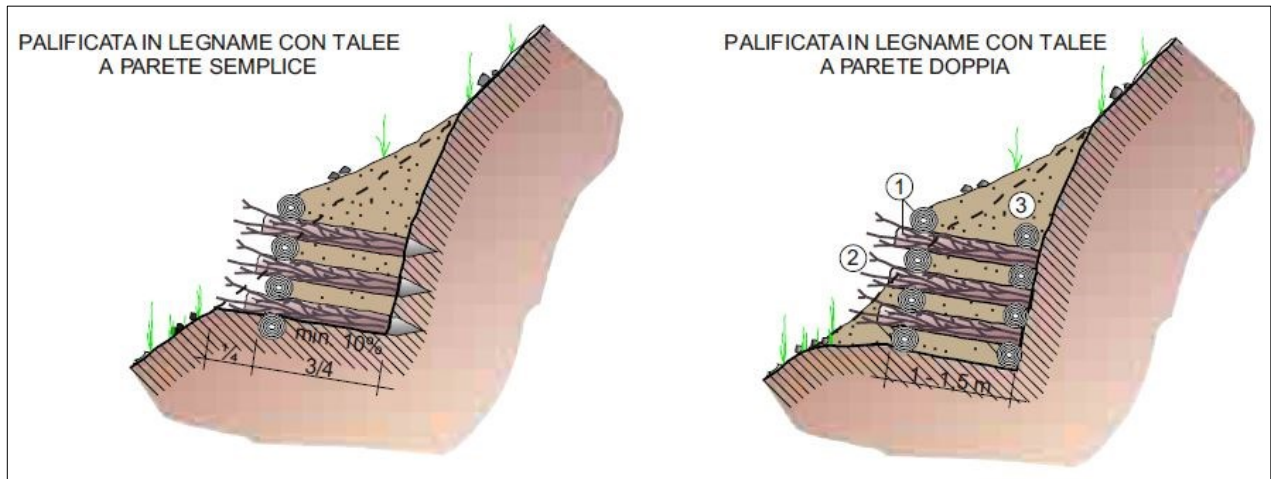


Figura 1.13: schema di palificata a parete singola o doppia (APAT, 2002).

La conclusione dell'intervento di consolidamento di frane superficiali può prevedere la realizzazione di un muro di sostegno al piede della frana e il rinverdimento del corpo di frana mediante specie vegetali diverse, che una volta insediate assicurano una buona protezione contro l'erosione superficiale del pendio.

È indispensabile provvedere già in fase di progettazione ad un piano di manutenzione delle opere di consolidamento realizzate, in particolare dei sistemi di drenaggio. Nell'ambito delle operazioni di manutenzione possono essere inseriti anche tutti quegli interventi colturali relativi alla componente vegetale (concimazione, irrigazione, potatura, ceduzione, diradamento, risarcimento) contribuenti alla stabilità del versante.

Nel caso di frane profonde o di massa i provvedimenti per tentare di arrestare o rallentare lo scorrimento sono piuttosto costosi e in genere non garantiscono risultati sempre soddisfacenti. Le frane di massa sono principalmente determinate da due cause tipiche: la prima è la mancanza di contrasto al piede dovuta all'azione erosiva retrograda di un torrente che determina la modifica di uno stato di equilibrio presente prima dell'erosione (Benini, 1990); la seconda causa è legata alla modifica dell'attrito e del grado di coesione in corrispondenza di uno stato di

scorrimento in profondità, o all'aumento del peso complessivo del materiale in seguito a processi di infiltrazione d'acqua.

Note le cause all'origine, si può affermare che l'azione di consolidamento proposta per fenomeni franosi da erosione al piede deve favorire l'aumento del contrasto con la formazione di un deposito di materiale, ad esempio mediante la costruzione di una briglia a valle del punto dove si vuole creare l'accumulo.

Il consolidamento di frane determinate dalla modifica della coesione o dell'aumento del peso del corpo di frana ad opera dell'acqua viene realizzato allontanando la componente liquida dal corpo di frana. Si provvede quindi alla realizzazione di un sistema di regimazione e di drenaggio dell'acqua. Spesso questi provvedimenti si rivelano insufficienti in quanto l'acqua giunge al corpo di frana per via sotterranea scorrendo in profondità. Quando è possibile è bene costruire un sistema di drenaggio possibilmente più profondo del piano di scorrimento.

Altro aspetto fondamentale è il monitoraggio del fenomeno franoso nel tempo, al fine di seguirne l'evoluzione e verificare l'efficacia degli interventi di stabilizzazione. Il monitoraggio può essere effettuato ricorrendo a strumenti di misura diversi e analizzando parametri differenti. È buona cosa associare una misurazione dei fattori meteorologici (stazioni meteo) che possono influenzare il comportamento della frana e dei sistemi di monitoraggio. I parametri per la scelta del sistema di monitoraggio sono:

- Tipo di fenomeno
- Velocità e grado di attività
- Accessibilità al sito
- Condizioni in cui si opera (emergenza/post-emergenza)
- Tempo a disposizione
- Presenza di elementi esposti al pericolo
- Risorse economiche disponibili
- Condizioni climatiche
- Protezione dei componenti da atti vandalici e furti.

Il monitoraggio può avvenire ricorrendo a strumenti di rilievo topografico (teodoliti, distanziometri, total station) su picchetti infissi nel corpo di frana. Si possono sfruttare le

tecnologie GPS e interferometriche da satellite (radar) o da terra, il processo di laser scanning (Carlà et al., 2019).

Per il monitoraggio di fenomeni franosi di massa si ricorre a strumentazioni come gli inclinometri, estensimetri a filo, piezometri con o senza diaframma (Simeoni et al., 2020). L'obiettivo del monitoraggio in questo caso è individuare la profondità della superficie o delle superfici di movimento, quantificare gli spostamenti e valutare la volumetria del corpo in scorrimento.

Gli inclinometri sono strumenti tradizionalmente usati, che consentono di misurare la profondità della superficie di rottura, lo spessore dello strato in movimento, la sua velocità e la direzione di spostamento principale. Il principio sul quale si basa questo strumento è la misura della deviazione della verticale di punti in un foro di sondaggio mediante un accelerometro (figura 1.14).

Il principio alla base del funzionamento dell'estensimetro a filo è legato alla registrazione mediante micrometro della variazione di lunghezza di un cavo introdotto in profondità attraverso un foro di sondaggio. La variazione della lunghezza del cavo è indice di deformazioni, delle quali possono essere stimate velocità e distribuzione, con un sistema di monitoraggio multibase con cavi ancorati a profondità diverse.



Figura 1.14: inclinometro in opera (Fanti, 2015).

Il piezometro, infine, è uno strumento usato per correlare la profondità dello strato di scorrimento con gli afflussi meteorici, definendo i livelli piezometrici. Esistono diverse tipologie di piezometri con caratteristiche e proprietà differenti. Il piezometro a tubo aperto è il tipo più semplice ed è costituito da un tubo di metallo o plastica introdotto in un foro di sondaggio e dotato di un tratto finestrato nella zona alla profondità di interesse. Il livello dell'acqua è rilevato mediante un freaticometro (figura 1.15).

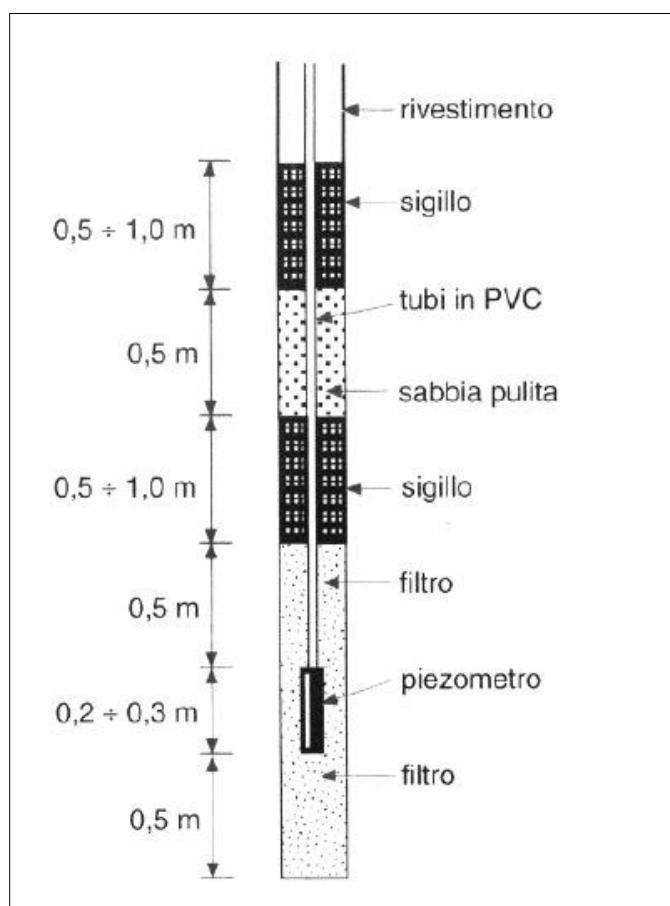


Figura 1.15: schema di un piezometro (Fanti, 2015).

2. La frana delle “Lore” (San Giovanni Ilarione, Verona)

2.1. Inquadramento geografico del sito

La frana delle “Lore” è situata nel settore orientale dei Monti Lessini, all’interno del territorio comunale di San Giovanni Ilarione (VR), al confine tra le province di Verona e Vicenza (figura 2.0). Essa prende il nome da un piccolo abitato nelle vicinanze, posto a circa 350 m a nord della zona dissestata.

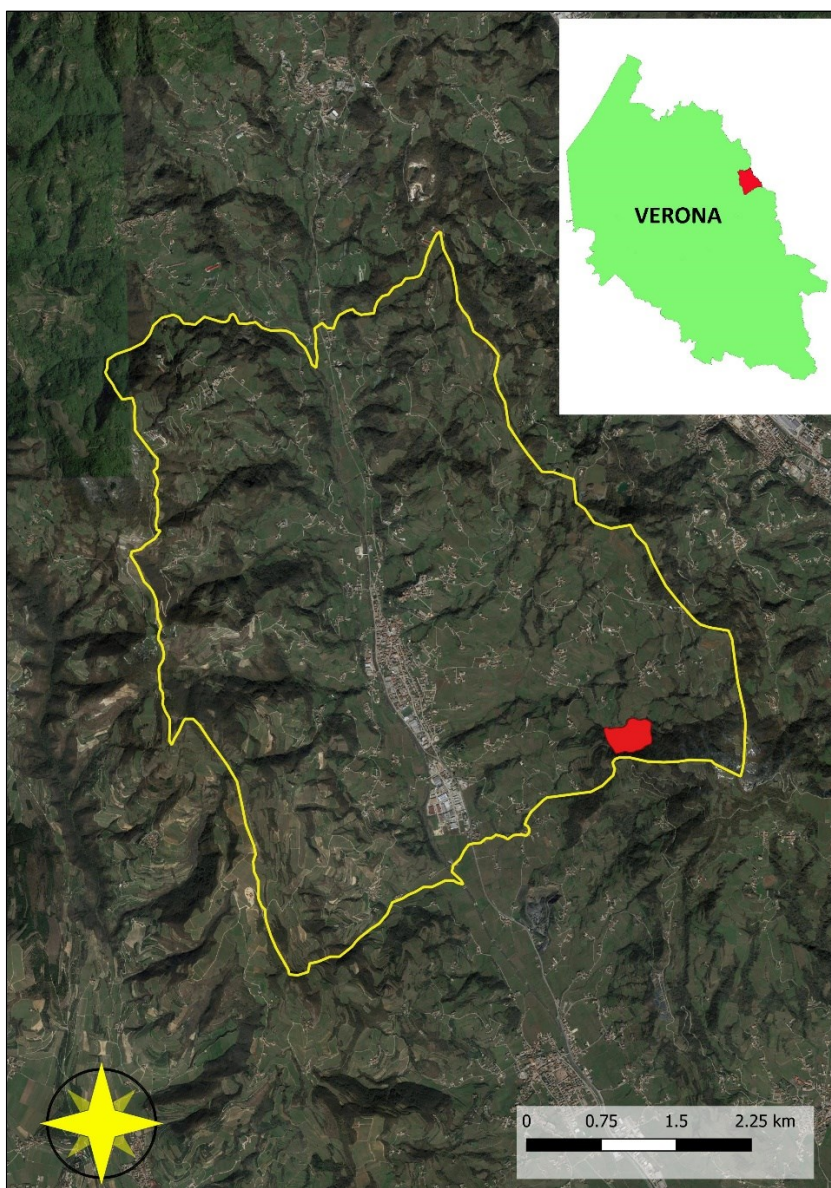


Figura 2.0: inquadramento geografico dell’area di frana delle Lore nel Comune di San Giovanni Ilarione (VR).

La frana occupa il versante settentrionale del Monte Calvarina (682 m s.l.m.). L’area ricade interamente nel bacino idrografico della Valle Rugolarà (è significativa la denominazione della

valle in quanto toponimo derivante dall'espressione dialettale "rugolare", che indica un movimento per rotolamento), affluente di sinistra del torrente Alpone (figura 2.1).



Figura 2.1: vista della frana e della zona di distacco (Archivi dei Servizi Forestali Regionali del Veneto).

La frana si sviluppa su una superficie di circa 10 ettari e interessa la parte di versante posta in sinistra idrografica del torrente Cavalletto, che scorre alla base del pendio, in un intervallo di quota compreso tra 300 e 450 m s.l.m. circa. Il bacino della valle del Cavalletto è costituito da versanti ad elevata pendenza lungo il lato sud orientale, delimitato dalla linea di cresta del Monte Calvarina. A nord-ovest del torrente la morfologia del bacino è costituita da una complessa serie di ripiani che si susseguono, interrotti da scarpate ripide di altezza variabile fino a 20 metri. Sui ripiani si sono sviluppati gli insediamenti antropici, le coltivazioni di vite o ciliegio e i prati. Nelle zone a minore accessibilità si è invece progressivamente imposta la vegetazione spontanea, costituita da latifoglie miste (castagno, acero, frassino, nocciolo, robinia).

La particolare morfologia a ripiani e scarpate della zona è indicatrice di una instabilità diffusa che va oltre l'area di frana propriamente individuata, e che può essere ricondotta a movimenti di tipo rotatorio-traslativo del versante. Si possono individuare in sito (figura 2.2) gli elementi

morfologici caratteristici di questa tipologia di frana, come ad esempio la scarpata principale (1), la zona del terrazzo principale (3), la scarpata (2) e il terrazzo di accumulo secondario (4), l'unghia di frana incisa dal torrente (5).



Figura 2.2: elementi morfologici caratteristici della frana (Guerra, 2008).

L'area di frana delle Lore è caratterizzata da una forma semicircolare con una lunghezza media di 390 m e una larghezza di circa 300 m. L'estensione del fronte di distacco della frana è di circa 390 m e il volume in movimento stimato è di 1 000 000 m³.

La zona del terrazzo di deposito è stata modificata nel tempo, sia durante gli interventi di sistemazione che in seguito con l'avvio di una coltivazione di un frutteto e di un vigneto. La coltivazione comporta frequenti interventi di eradicazione e sostituzione delle piante, che possono in parte accentuare la capacità di infiltrazione dell'acqua superficiale e la sua permanenza in situ.

Il rischio legato a questa frana è che il materiale che si accumula al piede possa ostruire il corso d'acqua favorendo il formarsi di ristagni idrici, con conseguenti colate di fango lungo la valle che potrebbero danneggiare gravemente le infrastrutture stradali in prossimità dei centri abitati posti nelle vicinanze, oltre a creare un danno ambientale notevole.

2.2. Caratterizzazione geo-morfologica del sito

L'area in esame rientra nel complesso noto come Semi-Graben vulcano tettonico dell'Alpone-Chiampo, delimitato ad ovest dalla linea di faglia di Castelvero (con direzione NNO-SSE) e ad est da una controsoglia che non costituisce una linea tettonica vera e propria (Gaspari, 2002). In questa paleo-formazione, come nel resto del Veneto, l'attività vulcanica fu intensa tra il Paleocene e l'Eocene, anche se non continua: alle rocce vulcaniche, sia di ambiente subacqueo che sub-aereo, sono consociate rocce sedimentarie come arenarie e calcari marnosi, formatesi con la risedimentazione del materiale vulcanico, e calcari a nummolites.

La successione stratigrafica vede la presenza, dal basso verso l'alto, di basalti di colata massicci, che possono essere individuati in prossimità del torrente al piede di frana, di vulcaniti di ambiente marino costituite da alternanze di pillow breccia, tufiti stratificate e vulcanoclastiti fini stratificate (De Giuli et al.). Nella zona di dissesto studiata è particolarmente rilevante la presenza di basalti e di depositi eluviali o colluviali. Per quanto riguarda il materiale derivante dal complesso vulcanico, la successione stratigrafica inizia con lave a cuscino (*pillow*), brecce di cuscini lavici (*pillow breccias*) e lave vetrose di origine subacquea. Queste rocce sono caratterizzate da un significativo grado di fragilità, aspetto che le rende particolarmente soggette a fratturazione e quindi più facilmente erodibili. La sequenza stratigrafica continua con lave da colata compatte e lave a fessurazione colonnare. Si possono trovare anche livelli, di spessore compreso tra qualche centimetro fino a qualche decimetro, costituiti da argille rosse e tufi fini che possono rappresentare possibili piani di debolezza in corrispondenza dei quali si possono sviluppare fenomeni di scorrimento. La parte superficiale del suolo è costituita fino ad una profondità di circa 2 metri da una copertura quaternaria colluviale derivante dall'azione di alterazione dei materiali vulcanici e sedimentari indicati in precedenza. Si tratta di terreni argillosi, leggermente limosi, di colore rosso o giallastro.

Le principali strutture morfologiche che si possono osservare nell'area di frana, riportate in figura 2.3, sono:

- Coronamento di frana, costituito da pareti di basalto a fessurazione colonnare.
- Scarpata di erosione torrentizia, che raggiunge altezze fino a 10 metri e con sponde ad elevata pendenza.

- Depressioni e contropendenze che permettono il ristagno d'acqua per tempi prolungati e quindi l'infiltrazione nel corpo di frana.
- Fessurazioni e gradini all'interno del corpo di frana, dovuti alle forze di trazione, e che favoriscono ulteriormente la percolazione in profondità dell'acqua piovana (figura 2.4).

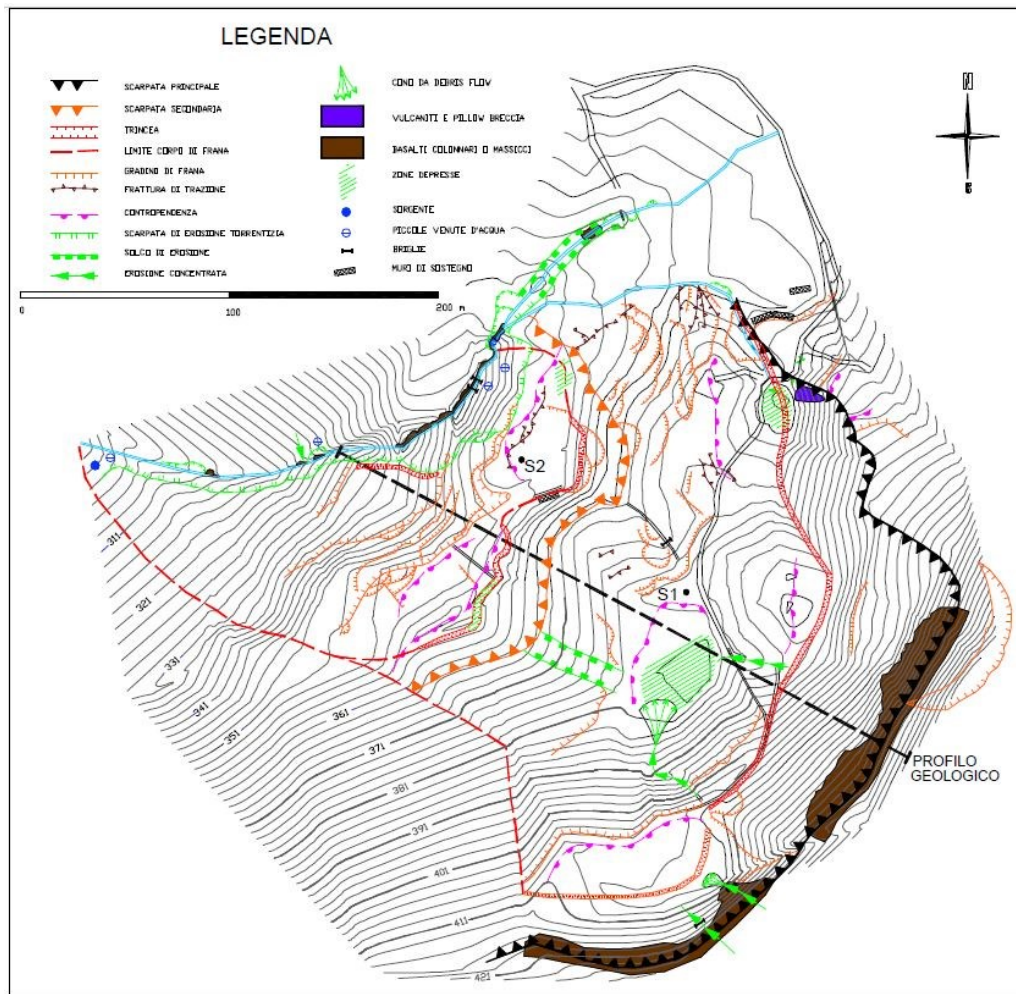


Figura 2.3: carta geomorfologica della zona di frana (Gaspari, 2002).

Dall'analisi geologica e geomorfologica del sito si è potuto vedere come i corpi di frana siano in realtà due, ovvero si può individuare una seconda superficie in movimento all'interno di quella principale. Il corpo di frana principale manifesta una parziale stabilità, con movimenti contenuti e molto lenti, mentre quello secondario, individuato da una scarpata secondaria, è più attivo e veloce. Particolarmente importante è la presenza del torrente Cavalletto al piede della frana. Nonostante si manifesti usualmente come un piccolo corso d'acqua, in presenza di precipitazioni ordinarie esso è in grado di operare un'azione erosiva molto intensa che comporta il cedimento delle sponde laterali e l'incisione dell'alveo in senso verticale. Questo comportamento è

facilitato dalla elevata erodibilità delle stesse, in quanto sono costituite da matrice fine (argille e limi) con la presenza di elementi grossolani immersi in essa (figura 2.5).



Figura 2.4: gradini e fessurazioni superficiali osservabili in sito.



Figura 2.5: erosione spondale lungo il corso del T. Cavalletto (Archivi dei Servizi Forestali Regionali del Veneto).

2.3. Analisi storica del fenomeno franoso “Lore” e principali interventi di sistemazione effettuati

La storia del fenomeno franoso delle Lore è caratterizzata dalla mancanza di dati almeno fino alla metà dello scorso secolo, epoca alla quale si riferiscono i primi interventi di sistemazione da parte del Corpo Forestale dello Stato. I pochi dati precedenti sono stati ricavati da testimonianze verbali o scritte, molto spesso lacunose e frammentarie, degli abitanti del luogo più anziani. Da queste fonti è emerso come negli anni '50 la situazione fosse già tanto compromessa da richiedere la realizzazione di una serie di opere per limitare l'erosione del torrente al piede del versante, favorire il drenaggio profondo e il deflusso delle acque superficiali (figura 2.6). In alcuni punti sono anche stati fatti interventi di rimodellamento del versante. Le opere realizzate dal Corpo Forestale sono una serie di briglie in pietrame e calcestruzzo lungo la valle del Cavalletto, che ad oggi risultano sepolte dal materiale franato. Un particolare da sottolineare è la presenza di un tratto del torrente dove si sviluppa una cascata in roccia (figura 2.7) che rappresenta un punto del substrato dotato di particolare stabilità.



Figura 2.6: rete di drenaggio superficiale realizzata negli anni '50 (Archivi dei Servizi Forestali Regionali del Veneto).

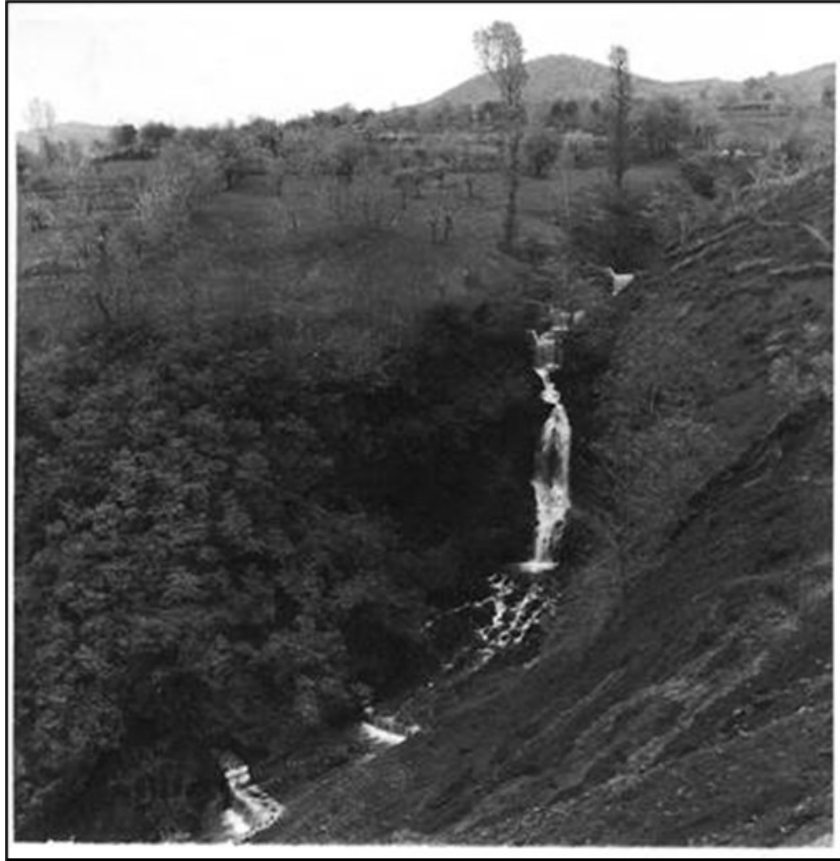


Figura 2.7: cascata in roccia come appariva negli anni '50, con briglie lungo il corso del Cavalletto (Archivi dei Servizi Forestali Regionali del Veneto).

Ancora oggi la zona del salto in roccia rappresenta il punto più critico dove il torrente erode la sponda laterale e induce l'occlusione della sezione idraulica. Già in occasione dei primi lavori di sistemazione sono emersi alcuni grossi tronchi di alberi sepolti dalla frana in precedenza, indici di un elevato grado di attività della zona di dissesto fin da quell'epoca.

In seguito agli interventi del Corpo Forestale la stabilità della zona è stata pressoché mantenuta nei successivi decenni, fino agli anni 1994-1995 quando si sono manifestati segnali di instabilità crescente, con episodi di caduta di porzioni di roccia dalla zona di distacco riportati da testimoni del luogo (Gaspari, 2002). Il Servizio Forestale Regionale ha iniziato i rilievi topografici nell'autunno del 1998 con la posa di capisaldi e monitoraggio degli spostamenti successivi nell'ottobre 2001 e giugno 2002, registrando significativi spostamenti in direzione ovest e nord-ovest. Contemporaneamente sono state previste misure di indagine geognostica con 4 fori di sondaggio, in cui sono stati inseriti tubi piezometrici a profondità diverse (24 ÷ 40 m) (figura 2.8). La zona di frana è stata studiata anche da un punto di vista geologico e geotecnico da parte del Dott. Geol. Dario Gaspari nel 2002, che ha evidenziato le caratteristiche geolitologiche riportate nel sottocapitolo 2.2. Inoltre sono state eseguite prove di laboratorio sui materiali estratti dai

fori di sondaggio (granulometria, contenuto naturale d'acqua, limiti di consistenza, peso) e una indagine audiomagnetotellurica sulla parte inferiore del corpo di frana, attualmente occupata da frutteto, lungo un transetto di circa 130 m (figura 2.9).



Figura 2.8: esecuzione dei sondaggi piezometrici sul corpo di frana (Archivi dei Servizi Forestali Regionali del Veneto).

Questa analisi, effettuata dal Dott. Luigi Veronese del laboratorio geotecnico della Provincia Autonoma di Trento, ha rivelato come il complesso di rocce vulcaniche si presenti disarticolato e composto da strutture che tendono ad isolare corpi integri all'interno di ammassi di argille da alterazione. La superficie di scorrimento basale potrebbe essere collocata ad una profondità di circa $35 \div 40$ m, ma sono riconoscibili anche altri piani di movimento più superficiali (figura 2.10).

Nella primavera del 2005 si è verificato un nuovo movimento di massa all'interno del versante, con movimenti complessi (crollo, scorrimento rotazionale e planare). In questa occasione la valle del Cavalletto è stata completamente occlusa e ha dato origine ad una zona di invaso dell'acqua di scolo a monte, accrescendo il processo di infiltrazione soprattutto nella zona del piede di frana. Vista la rapida evoluzione dell'area in dissesto nel 2006 il Servizio Forestale ha dato inizio ad una fase dapprima di studio e poi di intervento. Inizialmente è stato previsto un rilievo con LiDAR/Laser-scan aviotrasportato, supportato da una serie di misure a terra, su una superficie

di circa 2 km², relativa al bacino idrografico del torrente che lambisce il piede della frana (Sonda, 2006).



Figura 2.9: esecuzione dell'analisi audiomagnetotellurica (Archivi dei Servizi Forestali Regionali del Veneto).

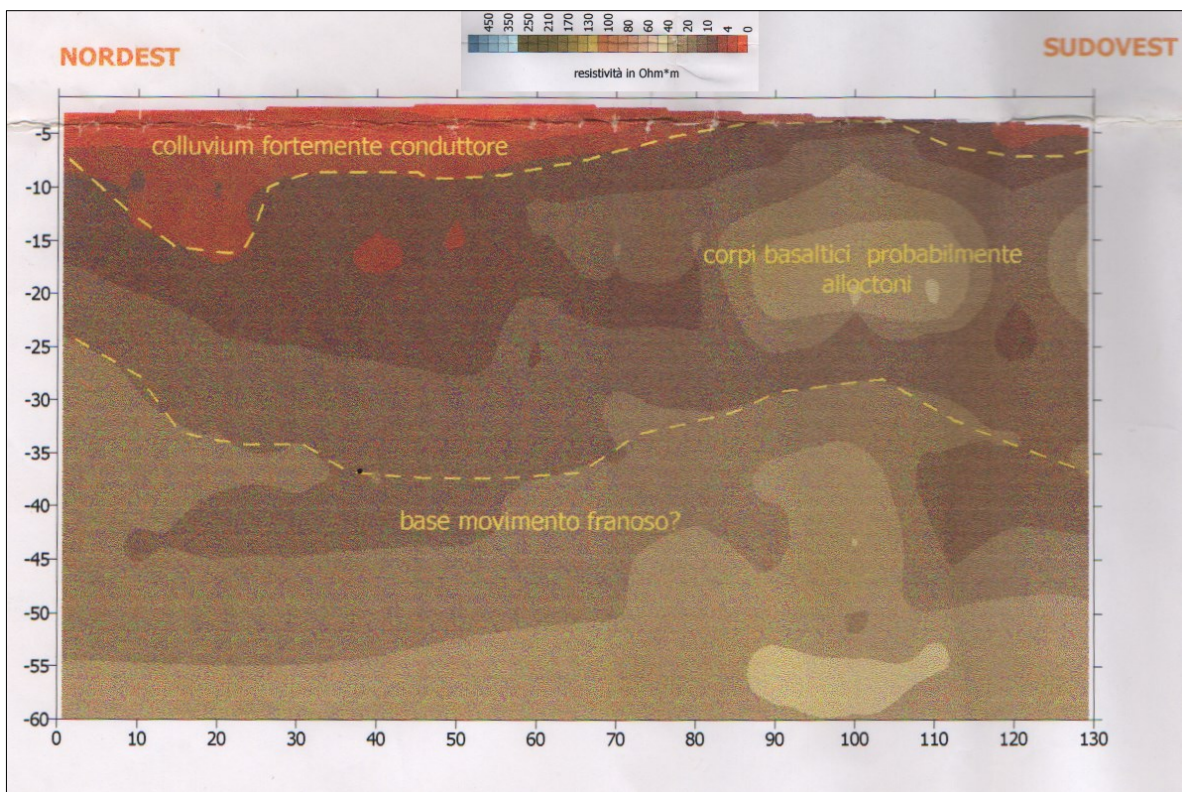


Figura 2.10: risultati dell'indagine audiomagnetotellurica (Gaspari, 2002).

In contemporanea al rilievo LiDAR sono state acquisite anche le ortofoto dell'area di frana tramite una camera digitale installata in modo solidale a bordo dell'elicottero usato per il volo. Il materiale derivante dal rilievo ha condotto alla elaborazione di un modello della superficie del terreno, usato per l'analisi e la progettazione degli interventi successivi.

La causa innescante del movimento franoso è l'acqua d'infiltrazione, che si spinge anche a notevole profondità determinando un innalzamento della falda, e forma delle zone di accumulo negli invasi che vengono a crearsi nelle zone di contropendenza (figura 2.11). Ciò si traduce in un aumento degli sforzi di taglio e in una riduzione della resistenza lungo il piano di scivolamento.



Figura 2.11: invaso d'acqua formatosi in una zona di contropendenza all'interno del corpo di frana (Archivi dei Servizi Forestali Regionali del Veneto).

A partire da queste considerazioni l'intervento messo in atto dal Servizio Forestale nel 2007 si è posto come obiettivo il drenaggio superficiale e sotterraneo del corpo di frana e la mitigazione dell'erosione al piede da parte del torrente. Le misure adottate sono quindi di tipo estensivo e si possono riassumere nei seguenti punti:

- Realizzazione di una rete drenante costituita da canalette in materiale sufficientemente elastico e adattabile ai movimenti del terreno (“Trenchmat®”) (figura 2.13)
- Ripristino della sezione idraulica della valle del Cavalletto e posa di una trincea drenante composta da materiali innovativi adatti a resistere allo schiacciamento;
- Monitoraggio tramite la posa e il rilievo periodico di capisaldi di riferimento all’interno del corpo di frana.

La rete di drenaggio superficiale è stata realizzata con un tipo di canaletta costituita da un materiale geocomposito a più strati, adattabile e di facile messa in opera. Questo materiale si ottiene accoppiando tra loro materiali geosintetici e a base naturale, e svolge in genere più funzioni (di rinforzo, antiersiva e drenante) (Ferro, 2006). La sezione idraulica del torrente è stata sistemata garantendo la capacità drenante dell’alveo, dove giungono le acque che attraversano il corpo di frana, anche in caso di temporanea occlusione, attraverso la posa di una trincea drenante sub-alveo lungo tutto il tratto al piede di frana (figura 2.14). La soluzione sperimentale adottata è stata quella di gabbioni metallici rivestiti da geotessuto (“gabbiodren®”) modificati da Borghi Azio S.p.a. di San Polo d’Enza (RE) con l’introduzione di spezzoni di tubo in polietilene corrugato quale componente drenante (De Giuli et al., 2009) (figura 2.12).



Figura 2.12: trincea drenante gabbiodren® usata nell’intervento di sistemazione (Archivi dei Servizi Forestali Regionali del Veneto).



Figura 2.13: operazioni di posa delle canalette di drenaggio superficiale (Archivi dei Servizi Forestali Regionali del Veneto).



Figura 2.14: operazioni di posa della trincea drenante sub-alveo nell'intervento di sistemazione del 2007 (Archivi dei Servizi Forestali Regionali del Veneto).

Oltre a questi sono stati realizzati una serie di interventi accessori, come il drenaggio delle aree di invaso dell'acqua che si formavano nelle zone di contropendenza nel corpo di frana. Per questo è stato realizzato un doppio sistema formato da una canaletta superficiale accoppiata con una trincea drenante a 2 m di profondità. Inoltre sono state realizzate anche opere di miglioramento fondiario (attraversamenti del corso d'acqua), di rivegetazione del versante, di stabilizzazione dell'alveo con briglie in legname e pietrame (figura 2.15) e di mitigazione dell'erosione superficiale del pendio (palizzate, viminate, gradonate).



Figura 2.15: briglia in legname e pietrame lungo il corso del torrente al piede della frana come si presenta oggi.

L'ultima misura prevista è stata il monitoraggio della frana mediante la posa di 16 capisaldi, riferiti ad una serie di coordinate note di punti stabili fuori dall'area di frana (WGS84) con rilievo tramite GPS. I monitoraggi sono stati eseguiti nell'ottobre 2008, novembre 2009, marzo 2011, novembre 2012, novembre 2013 e ottobre 2017. I risultati ottenuti verranno illustrati nel sottocapitolo 2.4.

In seguito al massiccio intervento l'area in dissesto ha subito in generale un assestamento, pur continuando nella sua evoluzione. Si sono resi necessari alcuni interventi di ripristino nel corso

degli anni successivi (2008 – 2012), specialmente lungo l'asta principale del Cavalletto per rimediare a processi di erosione spondale (figura 2.16) ed aggiramento delle briglie (figura 2.17).



Figura 2.16: supporto spondale realizzato nel 2012 in seguito a erosione spondale nella zona della cascata (Archivi dei Servizi Forestali Regionali del Veneto).



Figura 2.17: situazione della Valle del Cavalletto nel 2011 (Archivi dei Servizi Forestali Regionali del Veneto).

2.4. Risultati del monitoraggio dell'area di frana nel periodo 2007-2017

Come detto in precedenza l'evoluzione della frana è stata monitorata con la posa e il rilievo di una serie di 16 cippi all'interno dell'area instabile (figura 2.18).

Dei 16 capisaldi iniziali posizionati soltanto 8 sono ancora oggi localizzabili in sito. I mancanti sono stati sepolti dal materiale detritico franato oppure sono stati danneggiati e divelti durante le operazioni agronomiche per la coltivazione del frutteto presente sopra il corpo di frana.

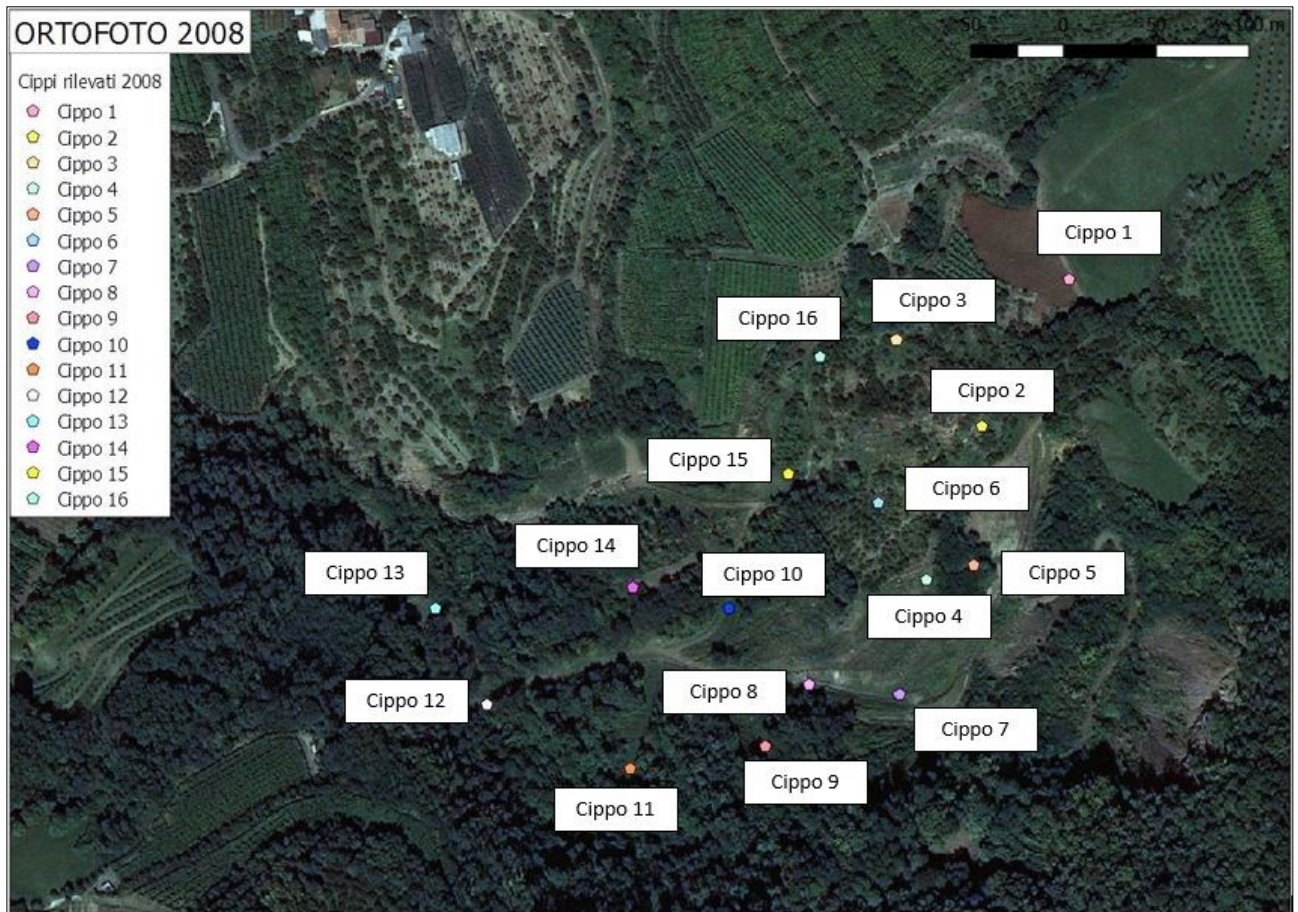


Figura 2.18: posizione dei 16 cippi all'interno dell'area disastata.

L'ultima campagna di monitoraggio è stata effettuata dallo scrivente durante il periodo di tirocinio svolto presso il Servizio Forestale di Verona, e risale all'ottobre del 2017. Sono stati rilevati i capisaldi tramite l'utilizzo di un Rover Trimble SPS985L con stazionamento di 3-4 minuti per ciascun cippo. Dove possibile è stato necessario scavare e rimuovere lo strato di detrito depositatosi per riportare in luce i cippi sepolti (figura 2.19). In Tabella 2.0 sono riassunte le variazioni subite da ogni cippo lungo la direzione nord-sud ed est-ovest, i fenomeni di innalzamento o abbassamento di quota ortometrica, lo spostamento planimetrico e quello totale, che comprende la componente verticale.



Figura 2.19: fasi di rilievo di uno dei cippi sepolti.

I risultati ottenuti dal monitoraggio dei cippi hanno evidenziato come negli anni immediatamente successivi agli ultimi interventi di sistemazione il corpo di frana si sia presumibilmente stabilizzato, con spostamenti massimi registrati nell'ordine delle decine di cm. Tuttavia, a partire dalla campagna di rilievo del 2011 l'area in dissesto ha iniziato a mostrare un aumento degli spostamenti. Nel novembre 2013 i valori di spostamento annuale registrati rispetto al 2012 hanno raggiunto l'ordine dei metri (573 cm cippo 15; 431 cm cippo 10) nella zona più centrale della frana, che si è rivelata essere la più attiva. Anche i rilievi effettuati nel corso dell'ultima campagna di monitoraggio hanno evidenziato un grado di attività più marcato nell'area centrale, ma appare evidente dall'entità degli spostamenti degli ultimi quattro anni che il moto abbia subito un rallentamento, ritornando a valori che sono confrontabili con quelli registrati nelle campagne di monitoraggio precedenti al 2013. Il periodo 2012-2013 rappresenta un'anomalia nel comportamento complessivo, in quanto si è assistito ad un movimento

improvviso ed esteso a tutta la superficie del corpo di frana, comprese le aree laterali dove gli spostamenti si limitavano a qualche centimetro. È stata avanzata l'ipotesi che tale fenomeno sia correlato in qualche maniera con l'andamento delle precipitazioni nel corso del decennio. Per verificare tale ipotesi sono state analizzate le precipitazioni registrate presso la stazione pluviometrica di San Giovanni Ilarione (VR) a partire dal 2007 fino al 2017.

Tabella 2.0: sintesi dello spostamento rilevato per ciascun caposaldo nel periodo 2007-2017.

RILIEVO DICEMBRE 2007				RILIEVO OTTOBRE 2017		
n. caposaldo	Gauss Boaga Fuso Ovest			Gauss Boaga Fuso Ovest		
	nord (m)	est (m)	quota (m s.l.m.)	nord (m)	est (m)	quota (m s.l.m.)
1	Cippo divelto					
2	5042709,898	1677098,656	377,13	5042709,95	1677098,724	377,09
3	5042756,648	1677052,772	363,193	5042756,687	1677052,729	363,276
4	Cippo divelto					
5	5042634,863	1677094,238	381,233	5042635,234	1677093,556	381,14
6	Cippo divelto					
7	Cippo ricoperto da materiale detritico					
8	Cippo ricoperto da materiale detritico					
9	Cippo ricoperto da materiale detritico					
10	5042611,587	1676962,741	353,743	5042613,666	1676959,843	350,892
11	5042524,886	1676909,399	362,504	5042525,036	1676909,134	362,484
12	5042559,543	1676832,156	332,985	5042559,696	1676831,946	332,858
13	5042611,441	1676804,247	316,839	5042611,634	1676804,147	316,943
14	Cippo divelto					
15	5042684,187	1676994,75	356,852	5042684,264	1676989,083	353,803
16	Cippo divelto					

DIFFERENZE					
n. caposaldo	Variazione			Scostamento	
	nord (m)	est (m)	quota (m)	Plan. (m)	Totale (m)
1	Cippo divelto				
2	0,052	0,068	-0,04	0,086	0,094
3	0,039	-0,043	0,083	0,058	0,101
4	Cippo divelto				
5	0,371	-0,682	-0,093	0,776	0,782
6	Cippo divelto				
7	Cippo ricoperto da materiale detritico				
8	Cippo ricoperto da materiale detritico				
9	Cippo ricoperto da materiale detritico				
10	2,079	-2,898	-2,851	3,567	4,566
11	0,15	-0,265	-0,02	0,305	0,305
12	0,153	-0,21	-0,127	0,26	0,289
13	0,193	-0,1	0,104	0,217	0,241
14	Cippo divelto				
15	0,077	-5,667	-3,049	5,668	6,436
16	Cippo divelto				

I dati pluviometrici sono stati reperiti tramite il sito dell’Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (ARPAV). Attraverso il calcolo delle precipitazioni medie annuali del periodo 2007-2017 è stato messo in luce il fatto che non sembra esserci correlazione tra l’intensità delle precipitazioni medie registrate nell’area e il movimento della frana. Analizzando inoltre l’andamento delle precipitazioni annuali e mensili si è visto come gli anni caratterizzati dalla maggior piovosità siano stati il 2010 e il 2014. Il 2012 e 2013 presentano invece valori di pioggia annuale compresi nella media (1300 mm/anno).

Pur non avendo individuato una chiara correlazione tra le precipitazioni e il movimento della frana, non è possibile escludere che esistano relazioni tra i due fattori. Infatti non sono stati presi in considerazione gli effetti dovuti ad eventi di intensità straordinaria che si sono verificati nel periodo 2007-2017. Questa scelta è legata all’impossibilità di stabilire, con le conoscenze e gli strumenti a disposizione, in modo preciso gli effetti di eventi discreti sulla base di registrazioni dei movimenti riferibili ad un intervallo non inferiore all’anno.

L’area centrale della frana, dunque, rimane ad oggi la più attiva, con uno spostamento totale nel decennio di monitoraggio di 6,4 m e 4,5 m in corrispondenza rispettivamente dei cippi n.15 e n.10. Il primo si trova attualmente all’interno della zona attiva, mentre il cippo 10 si trova al margine di essa. Dagli ultimi dati rilevati è possibile evidenziare come si sono verificati spostamenti considerevoli in aree della frana, poste nelle zone laterali, che in precedenza avevano mostrato solo variazioni centimetriche dovute al naturale assestamento in seguito agli interventi di sistemazione (cippi n.5, n.12 e n.13). Sembra che il fenomeno franoso si stia allargando in senso laterale e che l’effetto di “richiamo” legato al movimento della regione centrale si manifesti anche nella parte sud-occidentale, che già in precedenza mostrava una crescente dinamicità, e nella zona orientale del versante, dando inizio a fenomeni di dissesto anche in quest’area. La direzione di scorrimento del corpo di frana prevalente rimane comunque quella verso nord-ovest, con la sola eccezione data dal caposaldo n.2 che si è spostato verso nord-est (figura 2.20). Il cippo aveva mostrato una particolarità fin dal primo rilevamento, in quanto traslava inizialmente verso nord-est. A partire dal 2011 la direzione di spostamento è mutata, diventando sud-ovest, fino al 2013. In occasione del monitoraggio del 2017 il cippo sembra mostrare una ripresa dello scorrimento verso nord-est. Non è chiaro se tale dato sia da attribuire ad una reale mutazione delle forze agenti nell’intorno del caposaldo, o più probabilmente sia da imputare a qualche intervento di tipo agronomico, operato dai proprietari

dei terreni sui quali la frana si sviluppa, che abbia apportato una modifica alla posizione del riferimento.

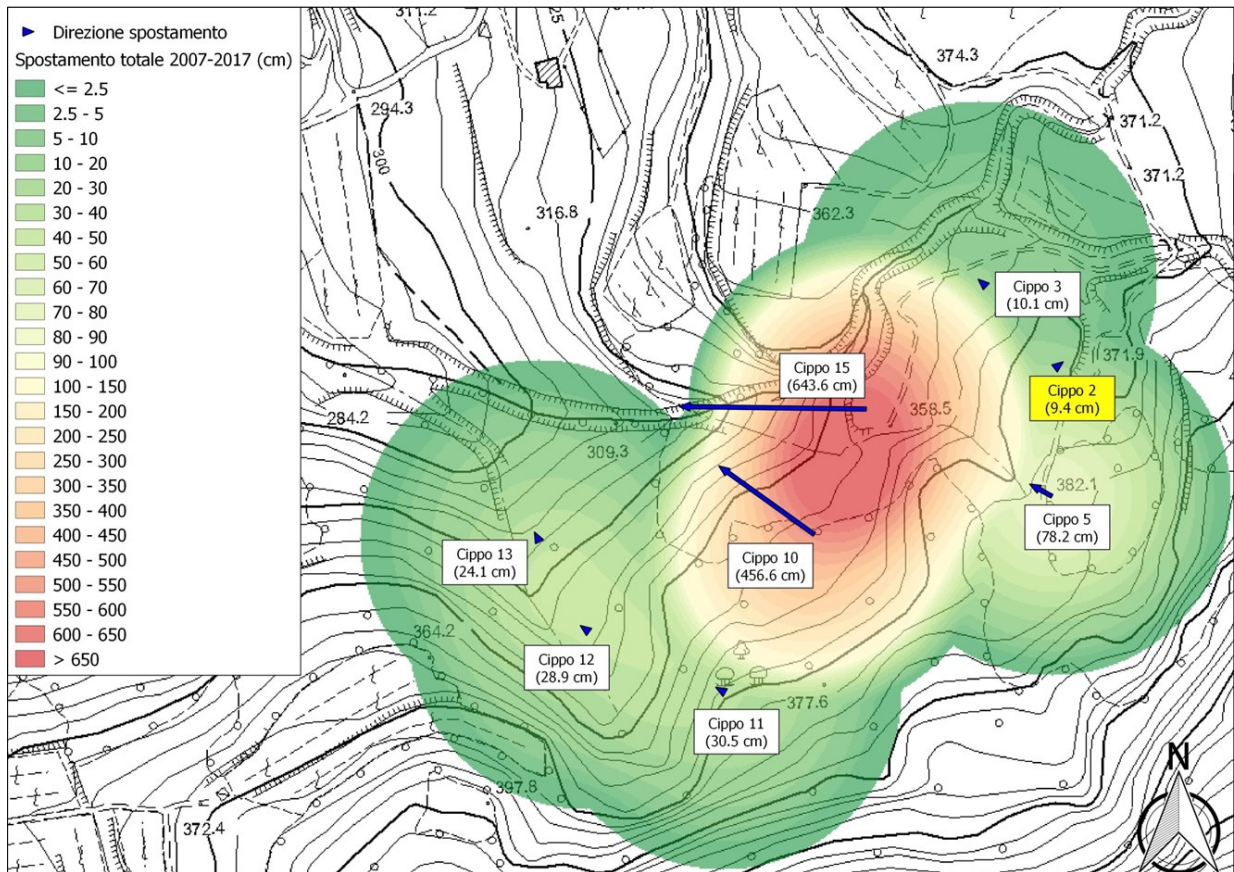


Figura 2.20: mappa degli spostamenti totali dei capisaldi nel decennio 2007-2017.

3. Obiettivi

Il monitoraggio della frana delle Lore, posta nel comune di San Giovanni Ilarione (VR) al confine con la provincia di Vicenza, è sempre stato nel tempo uno degli aspetti di maggior interesse per il Servizio Forestale di Verona, fin dalla realizzazione degli ultimi massicci interventi di sistemazione nel 2007. Data la profondità del piano di scorrimento e l'estensione del fenomeno di dissesto su un'ampia area del versante, l'efficacia degli interventi realizzati assicura prevedibilmente un controllo del moto del versante limitato nel tempo e la valutazione degli spostamenti della zona in frana assume particolare importanza nella fase di pianificazione delle risposte da mettere in atto per tentare di rallentare il processo di scorrimento.

Come indicato nel capitolo precedente, il monitoraggio è stato condotto fino ad ora in riferimento ad una serie di capisaldi posti nella zona di dissesto con campagne di rilevamento GPS ad intervallo annuale o pluriennale che hanno permesso di seguirne progressivamente l'evoluzione.

In questo lavoro di tesi un primo obiettivo è quello di valutare la condizione attuale dell'area di frana applicando un approccio di tipo fotogrammetrico che, a partire dalla combinazione di una serie di foto aeree con alcuni punti georiferiti a terra, permetta di costruire un modello digitale di elevazione (DEM).

Dall'applicazione di software di analisi fotogrammetrica dedicati si possono infatti ottenere una serie di prodotti differenti, tra i quali ortofoto, modelli 3D e modelli digitali utili ai fini dell'analisi del territorio e necessari come base di partenza per l'analisi geomorfologica del sito di studio.

Il secondo obiettivo, che costituisce il fine ultimo di questo lavoro, è definito dall'analisi dell'evoluzione dell'area di frana nel periodo tra il 2006 e il 2019 e dalla valutazione degli spostamenti registrati nel corso degli ultimi 15 anni, con lo scopo di produrre un'informazione di sintesi del processo in atto nell'area delle Lore e fornire una valutazione indicativa dei volumi in movimento.

Tale valutazione è basata sulla realizzazione di un DoD (*DEM of difference*), risultato del confronto tra due modelli digitali di epoche diverse, che permette di individuare le differenze plano-altimetriche della zona analizzata. La costruzione del DoD avviene in ambiente GIS, sfruttando gli strumenti di calcolo e gli algoritmi implementati nei software.

Con questo strumento si possono vedere quali sono state le zone del corpo di frana più attive nel periodo temporale indagato ed avere informazioni utili sul comportamento dell'area in dissesto.

4. Materiali e metodi

I movimenti franosi sono processi di elevato interesse per il rischio che spesso rappresentano per gli elementi antropici esposti.

Per questo motivo nel corso del tempo sono stati proposti diversi strumenti per il rilievo delle frane che si basano su principi differenti, presentando punti di forza e di debolezza che li rendono più o meno preferibili a seconda del contesto operativo in cui ci si trova a lavorare. Analizzando i rilievi che permettono di ottenere un modello digitale delle elevazioni dell'area in frana, troviamo esempi di rilievo basati su dati da laser scanner (Kasai et al., 2009; Shi et al., 2018), su tecnologia satellitare (Schlögel et al., 2015) o su dati di tipo fotogrammetrico (Hugenholtz et al., 2013; Comert et al., 2019). Per questo lavoro di tesi è stato scelto di utilizzare un approccio di tipo fotogrammetrico, che permette di ottenere un modello digitale dell'area di frana allo stato attuale da confrontare con il modello digitale risalente al 2006 e derivato da dati di tipo LiDAR. La preferenza per un rilievo di tipo aerofotogrammetrico è stata determinata dalla scelta di indagare una particolare porzione della frana di ridotta estensione, ovvero quella in prossimità del corso d'acqua. Dato che i livelli di precisione tra laser scanner e fotogrammetria a questa scala sono comparabili, si è preferito utilizzare il secondo approccio perché meno complesso e più gestibile anche in fase di rilievo in campo.

4.1. Area di studio

Questo lavoro di tesi si concentra in particolar modo nella zona della frana a contatto con il corso d'acqua che scorre nella valle del Cavalletto e che ospita anche una cascata in roccia (figura 4.0).

Il motivo principale della scelta di ridurre l'area di indagine rispetto alla superficie totale della frana è dovuto in primo luogo a limitazioni imposte dal mezzo di rilevamento: se nel 2006 le misure erano state effettuate ricorrendo alla tecnologia laser scanner elitrasmportata, per il rilievo della situazione attuale con un approccio di tipo fotogrammetrico sono stati utilizzati come materiali di partenza le immagini derivanti da un volo con drone. L'estensione di terreno che può essere rilevata con questi mezzi è molto più ridotta rispetto a quella rilevabile con elicotteri ed altri velivoli. Rispetto ai mezzi a motore il drone è infatti fortemente limitato dall'autonomia di volo, legata alla durata delle batterie di alimentazione.

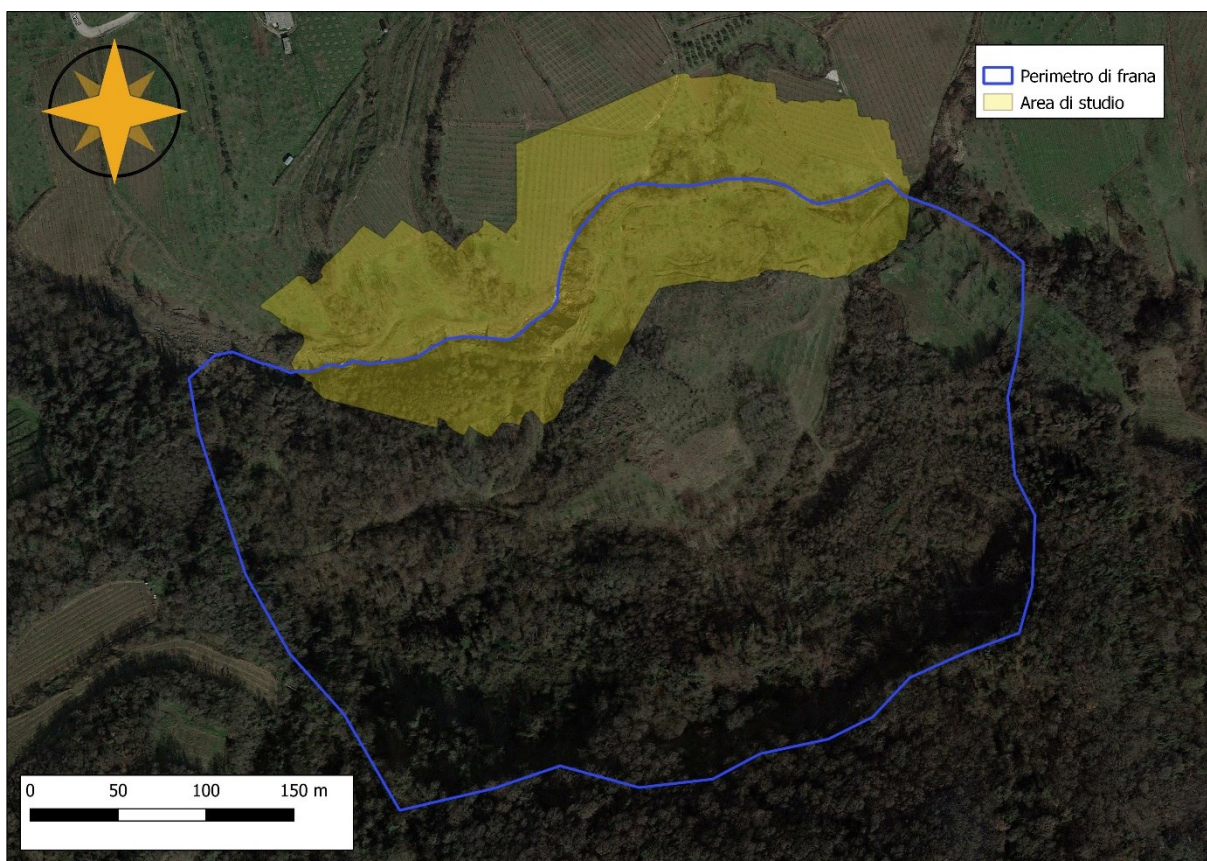


Figura 4.0: Area di studio indagata in riferimento alla zona di frana storica.

Inoltre il rilievo fotogrammetrico richiede che vengano posati a terra nell'area di misurazione dei target di riferimento per la georeferenziazione della nuvola di punti. Tali riferimenti non possono essere posizionati in zone inaccessibili per l'operatore e rappresentano quindi un fattore limitante per la definizione della superficie rilevabile.

La zona del corso d'acqua è quella che storicamente si è dimostrata più interessante perché maggiormente soggetta ad instabilità, sia per il movimento della massa franosa che per l'azione erosiva del torrente (figura 4.1).

La zona di studio è attualmente interessata da una rilevante presenza di vegetazione arborea ed arbustiva, rappresentata sia da elementi del vicino frutteto che da vegetazione riparia. Da un punto di vista geomorfologico si riconoscono invece zone di erosione superficiale nella zona della cascata, dove l'incisione fluviale determina l'instabilità delle sponde e il ricorrente scivolamento di materiale in alveo. Inoltre si riscontrano gradonamenti e fessurazioni all'interno dell'area di studio, che testimoniano gli sforzi ancora in atto nella regione.



Figura 4.1: erosione spondale nella zona della cascata allo stato attuale.

La zona della cascata è caratterizzata dalla presenza di sponde in erosione di elevata altezza, che danno luogo a frequenti scivolamenti di materiale. In presenza di occlusioni parziali dell'alveo si sono verificati in passato eventi di aggiramento delle opere di consolidamento, e si sono quindi resi necessari diversi interventi di riparazione.

4.2. Rilievo fotogrammetrico: principi e strumenti

La fotogrammetria è quella tecnica che consente di definire la posizione, la forma e le dimensioni degli oggetti sul terreno utilizzando le informazioni contenute in opportune immagini fotografiche degli stessi oggetti, riprese da punti di vista diversi (Cannarozzo et al., 2012). Più precisamente le tecniche fotogrammetriche permettono di calcolare le coordinate tridimensionali di punti che compongono una superficie attraverso la comparazione di più immagini con diversi punti di ripresa, passando da una proiezione prospettica ad una ortogonale. Per questo la fotogrammetria costituisce uno dei metodi attualmente più utilizzati per la creazione di modelli digitali del terreno o DEM (*Digital Elevation Model*).

A tale scopo sono necessarie camere di qualità sufficiente a garantire un'adeguata precisione di misura a partire dai fotogrammi scattati.

La fotogrammetria può essere classificata in funzione del tipo di presa, del tipo di elaborazione e del tipo di fotografia utilizzata. Per quanto concerne la tipologia di presa si parla di:

- Fotogrammetria terrestre: le prese vengono effettuate da terra e sono tipicamente riferite ad edifici o elementi posti a distanze ridotte (<200 m) (*Close-Range Photogrammetry*);
- Fotogrammetria aerea: le prese avvengono da un velivolo, con distanze dal suolo maggiori.

La classificazione basata sul tipo di elaborazione distingue tra:

- Fotogrammetria analogica: la ricostruzione degli oggetti avviene con dispositivi fisici (bacchette metalliche, raggi luminosi) che invertono il fenomeno della presa;
- Fotogrammetria analitica: la ricostruzione degli oggetti si ottiene elaborando mediante software numerici le misure effettuate direttamente sui fotogrammi.

Infine la classificazione basata sul tipo di fotografia distingue tra:

- Fotogrammetria classica: le fotografie sono ottenute dallo sviluppo di emulsioni fotosensibili su pellicola;
- Fotogrammetria digitale: le fotografie sono ottenute sotto forma numerica e organizzate in pixel.

I prodotti che possono essere ottenuti da operazioni di tipo fotogrammetrico sono essenzialmente rappresentazioni grafiche (carte topografiche o disegni), rappresentazioni numeriche (coordinate di punti) o ulteriori immagini digitali e fotografie rettificate (ortopiani).

Il principio alla base della fotogrammetria è che vi sia la possibilità di determinare le posizioni dei punti di un oggetto nell'ambiente fisico reale utilizzando le rispettive posizioni dei punti sulla fotografia, mediante delle relazioni di tipo geometrico tra le posizioni tridimensionali dei punti. Ad ogni punto dell'oggetto corrisponde un punto omologo sul piano della fotografia, ma con una sola fotografia non si possono ricavare informazioni sufficienti per la definizione della posizione e delle dimensioni di un oggetto tridimensionale, in quanto ad un punto A^l sulla fotografia corrispondono più punti sul terreno A, A_1, A_2, A_3 (figura 4.2) e il problema risulta indeterminato.

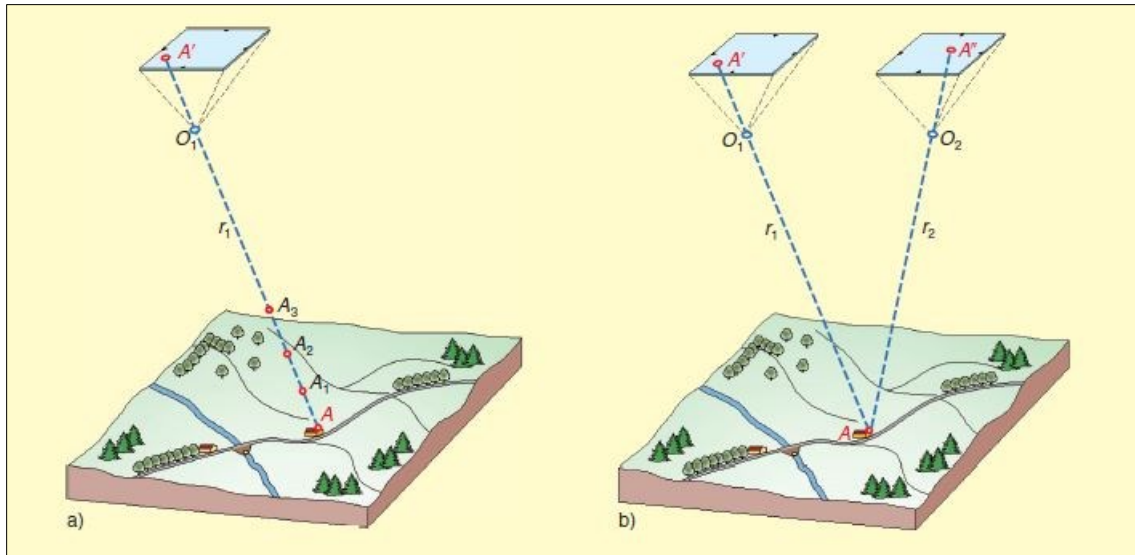


Figura 4.2: determinazione della posizione del punto A al suolo a partire dal punto omologo A' fotografico con un solo fotogramma o due immagini distinte (Cannarozzo et al., 2012).

Disponendo di due fotogrammi che riprendono lo stesso oggetto da due punti di vista differenti tali informazioni possono essere ricavate definendo il punto A come punto di intersezione dei raggi proiettanti r_1 e r_2 che lo congiungono con i punti omologhi A^I e A^{II} . In questo modo è possibile idealmente ricostruire il modello del terreno a partire dall'intersezione dei punti sfruttando i raggi omologhi.

La prospettiva di cattura dei fotogrammi deve possibilmente essere non perpendicolare al terreno, per aumentare la precisione di calcolo e per ridurre l'errore dovuto alla deformazione dei margini (effetto "Dumping") (figura 4.3).

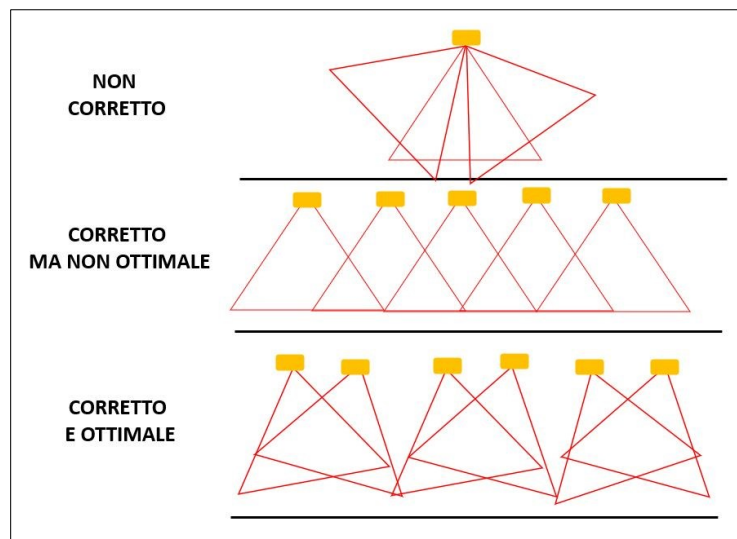


Figura 4.3: effetto della prospettiva di presa dei fotogrammi sulla precisione del modello.

La posizione dei centri di presa O_1 e O_2 e l'orientamento dei fotogrammi non sono noti a priori, e sono quindi necessari dei punti di riferimento al suolo le cui posizioni sono determinate per via topografica.

L'analisi fotogrammetrica si basa sui parametri della camera fotografica e sui punti di controllo a terra (*target*), risolvendo un sistema complesso di equazioni implementando il metodo dei minimi quadrati.

Il ricorso alla fotogrammetria ha subito un forte incremento a partire dai primi anni del '900 con gli studi di Von Orel, Wild, Nistri e Santoni che hanno condotto allo sviluppo di restitutori analogici (Cannarozzo, 2012). Con l'avvento della prima guerra mondiale la fotogrammetria aerea è divenuta strumento fondamentale per l'elaborazione di mappe e carte di superfici estese, sostituendo tutti gli altri metodi per la realizzazione di questi prodotti. Grazie all'avvento del computer, che ha permesso la definizione dei primi concetti di fotogrammetria digitale con il finlandese Tapani Sarjakoski, e allo sviluppo della fotografia digitale si è passati dalla fotogrammetria analitica, basata sullo sviluppo numerico di una serie di equazioni tramite computer per passare da una coppia di fotogrammi alla relativa proiezione ortogonale, a quella digitale, che sfrutta immagini di tipo numerico strutturate in matrici di pixel.

L'elemento fondamentale nel processo di acquisizione delle immagini è la camera da presa, da cui dipende in primo luogo il grado di precisione del modello dell'area rilevata. La camera fotografica deve permettere di registrare le informazioni metriche e di poterle visionare con minime deformazioni. La precisione del prodotto finale dipende poi da una serie di altri fattori come il metodo di attuazione delle prese, la quota di volo, la velocità del mezzo (Manzino, 2000).

La camera fotogrammetrica è costituita da una serie di elementi che ne definiscono la geometria interna (figura 4.4) (Capra e Costantino, 2007):

- O centro dell'obbiettivo, è il punto di simmetria tra i raggi che provengono dall'oggetto e quelli corrispondenti che costituiscono l'immagine (raggi immagine);
- A asse ottico dell'obbiettivo, che passa per il centro di tutte le lenti ortogonalmente al piano focale;
- f distanza focale tra il centro dell'obbiettivo e il piano focale;
- α l'angolo formato tra un raggio proveniente dall'oggetto (punto P) e l'asse ottico.

Le marche fiduciali servono per la materializzazione di un sistema di riferimento interno alla camera da presa e sono in genere costituite come in figura 4.5.

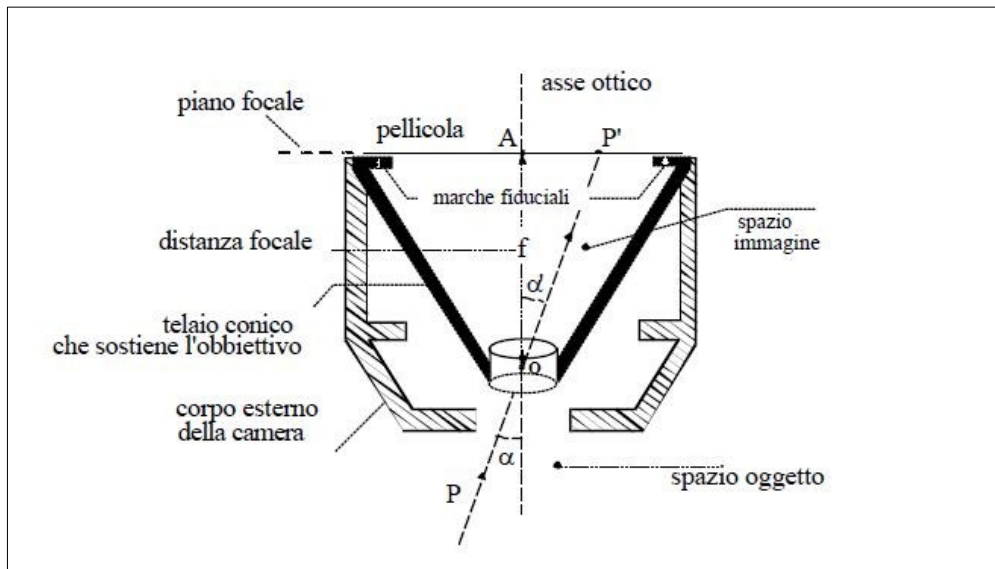


Figura 4.4: schema degli elementi fondamentali di una camera da presa (Galetto e Spalla, 1998).

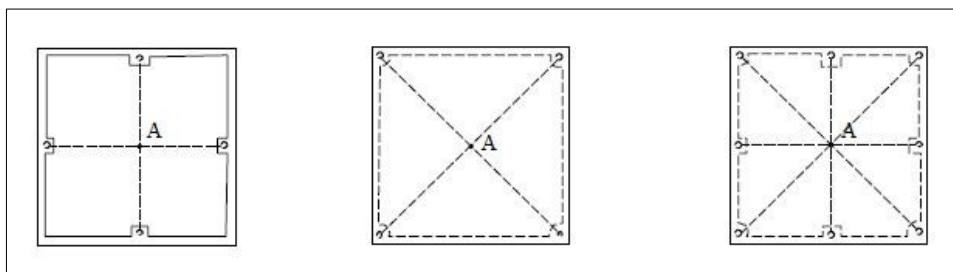


Figura 4.5: marche fiduciali più frequenti (Galetto e Spalla, 1998).

Con l'evoluzione e il miglioramento delle camere fotografiche nel tempo si è passati da sistemi di presa aerea molto pesanti e ingombranti agli attuali molto più leggeri e precisi, che possono essere trasportati in volo molto più agevolmente e con mezzi innovativi come i droni.

Gli strumenti di presa utilizzabili sono vari: si può fare riferimento a camere di tipo metrico o camere comuni (non metriche). Tra queste ultime si possono individuare diversi livelli di qualità, con conseguenti differenti livelli di precisione e risoluzione delle fotografie.

Il metodo di analisi del territorio adottato nell'ambito di questo lavoro di tesi è noto come *Structure from Motion* e costituisce una particolare evoluzione delle classiche tecniche fotogrammetriche. Più propriamente si tratta di una tecnica basata su algoritmi di *computer vision* sviluppati in software dedicati: a partire da una serie di immagini prese da angolazioni differenti, in modo automatizzato avviene l'identificazione di punti caratteristici e

l'orientamento dei fotogrammi a formare un'unica superficie in un sistema di riferimento arbitrario (figura 4.6).

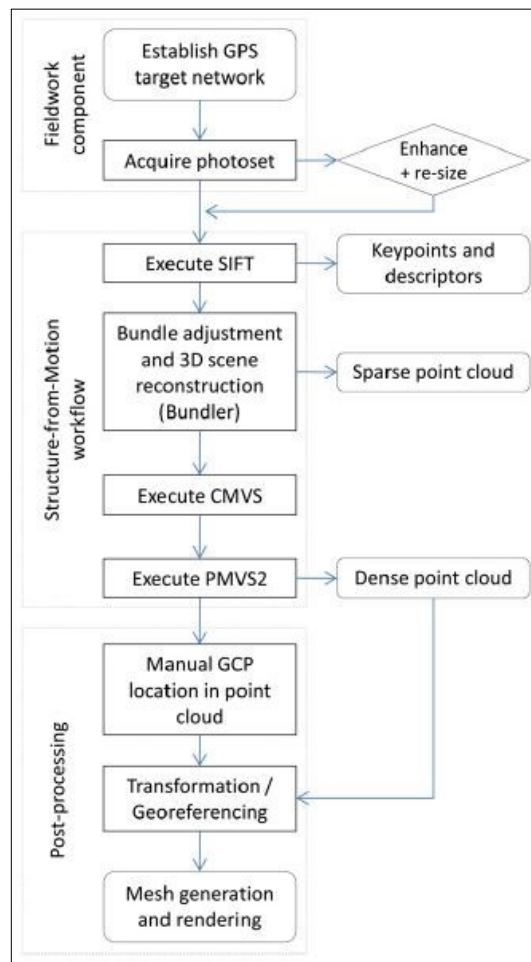


Figura 4.6: procedimento operativo del metodo SfM (Westoby et al. 2012).

Vengono stimate automaticamente le posizioni delle camere e viene generata una nuvola di punti non georiferita. In funzione del sistema di riferimento di una serie di punti di controllo noti all'interno della superficie d'indagine, la nuvola di punti viene georeferenziata adottando il sistema di coordinate corretto. L'aspetto che differenzia il metodo *Structure from Motion* (Sfm) dalla fotogrammetria tradizionale è la risoluzione automatica del posizionamento e orientamento delle camere ricorrendo a sovrapposizioni ridondanti tra immagini (Westoby et al., 2012).

4.2.1. Mezzi di presa: UAV

Altro aspetto da considerare, oltre alla camera fotografica è il mezzo di trasporto usato per rilevare l'area di studio. Le soluzioni a disposizione sono essenzialmente riassumibili nei seguenti punti:

- Trasporto manuale su aste: adatto per il rilievo di aree ridotte (150 x 150 m) o per elementi lineari di larghezza inferiore a 15 m (aste fluviali, canali).
- Trasporto con droni o mezzi aerei a pilotaggio remoto: fino a scala 500 x 500 m, metodo adatto per il rilievo di parti di frane, parti di conoidi o di aree di deposito da debris flow.
- Trasporto con mezzi aerei con pilota (elicotteri e aerei): il rilievo può interessare superfici ampie fino a qualche chilometro quadrato, come nel caso di tratti fluviali o aree di conoide.

Oggi i mezzi che possono essere utilizzati per la fotogrammetria aerea sono molteplici e molto spesso sono delle soluzioni a basso costo. I mezzi aerei a pilotaggio remoto (UAV – *Unmanned Aerial Vehicle*) negli ultimi 15 anni hanno assunto notevole importanza per applicazioni nel campo civile ed agro-ambientale, in associazione con le tecniche fotogrammetriche. In agricoltura i modelli 3D e le ortofoto sono spesso utilizzati per valutare i danni alle colture o per registrare problemi di tipo fitosanitario, per il calcolo della quantità di biomassa o per l'agricoltura di precisione (Tosoni, 2017). Altre applicazioni del rilievo UAV si possono trovare in ambito architettonico o archeologico. Per quanto concerne le applicazioni in tema ambientale questi strumenti di rilievo sono efficaci nella mappatura di aree in dissesto idrogeologico, per valanghe e frane. Zapico et al. (2020) hanno utilizzato il metodo *Structure from Motion* (SfM) combinato con il rilievo UAV per seguire l'evoluzione geomorfologica di una frana in Spagna, mediante analisi multitemporale dei modelli digitali dell'area. Altre applicazioni del rilevamento con mezzi UAV sono state fornite da Fey e Krainer (2020) per la valutazione delle condizioni del ghiacciaio di Lazaun in Val Senales (BZ), analizzando ancora una volta in un contesto multitemporale l'evoluzione della massa glaciale; Niculiță et al. (2020) hanno confrontato il sistema UAV con il metodo di rilievo LiDAR per il monitoraggio di zone in erosione canalizzata nella regione nordorientale della Romania. In ambito fluviale il rilievo UAV permette di indagare l'evoluzione della morfologia fluviale e di quantificare la massa legnosa presente in alveo (Watanabe et al., 2016; Sanhueza et al., 2019).

Nex e Remondino (2014) suddividono i mezzi UAV in funzione del mezzo di propulsione in:

- Mezzi senza sistema di propulsione: palloni aerostatici, aquiloni, alianti;
- Mezzi con sistema di propulsione: dirigibili, alianti a motore, mezzi ad elica con motore a scoppio o elettrico.

Un'altra classificazione è basata sulle caratteristiche aerodinamiche:

- Mezzi più leggeri dell'aria: palloni aerostatici, dirigibili;
- Mezzi con elica rotante (con uno o più rotori);
- Mezzi ad ala fissa.

L'utilizzo di mezzi UAV permette di rilevare superfici con un'estensione che varia da pochi metri a qualche chilometro (figura 4.7) e con una densità di punti comparabile alle altre tecnologie (LiDAR, Telerilevamento da satellite).

Oggi tra i mezzi UAV i droni rappresentano la soluzione più accessibile ed economica sul mercato, grazie alla loro efficienza e affidabilità. Essi sono dotati di sensori di precisione e di giroscopi che permettono di controllare la posizione e l'allineamento dell'aeromobile, e di un computer che agevola la navigazione manuale con pilota. Con l'avvento di GPS ad elevata precisione e di fotocamere sempre più leggere, i droni si sono sostituiti progressivamente a tecnologie satellitari, laser scanner o total station in particolari applicazioni grazie ad un minor costo e ad una minore intensità di lavoro necessaria per ottenere i prodotti finali. Le componenti principali di un sistema UAV sono riassunte in figura 4.8.

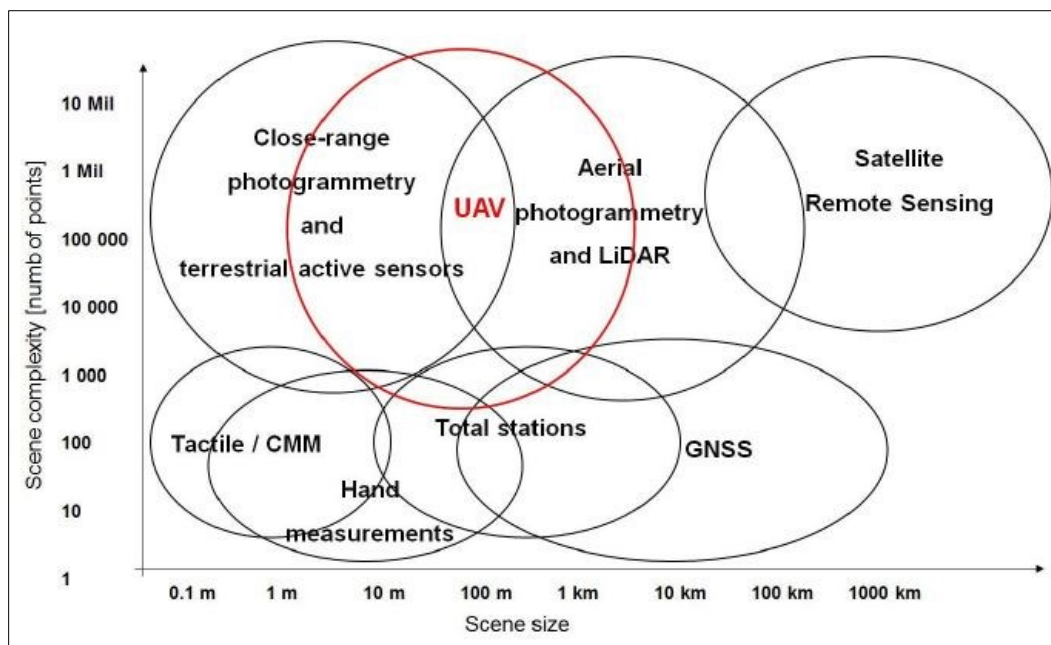


Figura 4.7: Caratteristiche operative delle tecnologie UAV in funzione di estensione dell'area da rilevare e della complessità della superficie (Nex e Remondino, 2014).

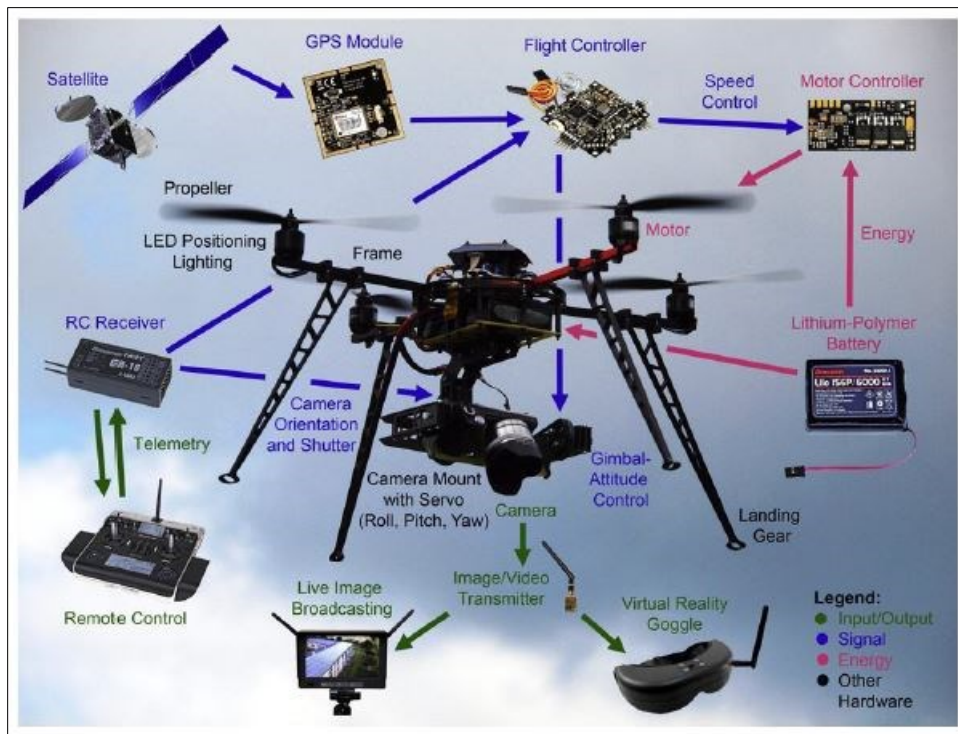


Figura 4.8: Componenti principali di un sistema UAV (Siebert e Teizer, 2014).

I multicotteri sono droni dotati di eliche rotanti (generalmente 4), ed hanno una elevata stabilità e flessibilità; sono in grado di portare carichi fino a 5 kg, permettendo il trasporto di sistemi di rilevamento complessi e pesanti (Rocco, 2017). L'utilizzo dei droni è regolato per motivi di sicurezza a livello nazionale, con il rilascio di un patentino certificato che attesta le capacità del pilota di mantenere il controllo del mezzo anche in risposta agli imprevisti che possono insorgere. Il volo è comunque permesso soltanto all'interno del campo visivo dell'operatore.

La pianificazione del volo trae origine dalla definizione di uno schema di ripresa fotogrammetrica dell'area da analizzare. Si deve fare in modo che il mezzo in transito riprenda ogni punto del terreno in almeno due fotografie. Ciò si ottiene facendo in modo che la sovrapposizione tra le immagini successive sia del 60% almeno.

Il mezzo sorvola il terreno ad una quota relativa H nota eseguendo delle strisciate di fotogrammi in serie secondo uno schema di volo programmato che permette di coprire tutta la superficie da cartografare con una sovrapposizione tra le strisciate del 20% (figura 4.9). In questo modo la numerosità dei fotogrammi della copertura fotogrammetrica risulta di molto superiore a quelli necessari per avere una semplice copertura fotografica della zona (Galetto e Spalla, 1998).

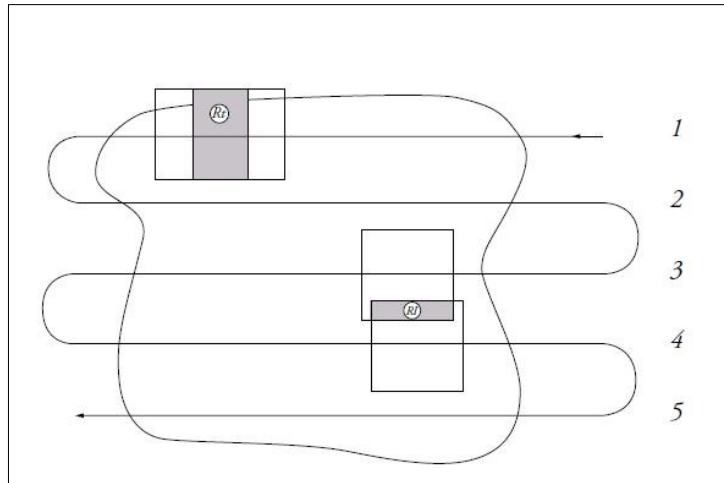


Figura 4.9: esempio di uno schema di volo e delle zone di sovrapposizione (Manzino, 2000).

Le condizioni meteorologiche sono un elemento rilevante nella determinazione della buona riuscita di un rilievo fotogrammetrico. Per tale scopo si dovrebbe poter godere dell'assenza di nubi sotto e sopra la quota di volo, che potrebbero causare una riduzione della visibilità dell'area o la formazione di ombre. Inoltre si dovrebbero evitare rilevamenti fotogrammetrici in presenza di foschia (minor qualità dell'immagine) e di forte vento che può alterare la condizione di equilibrio del mezzo in volo, con conseguenze sull'ortogonalità della presa fotografica. Il ruolo svolto dal sole deve essere tenuto in considerazione operando quando l'inclinazione dei raggi solari è maggiore di 30° e non si formano ombre lunghe che rendono difficoltoso il riconoscimento di particolari a terra. Infine sono fondamentali le caratteristiche di copertura del suolo, ed in modo particolare la presenza di vegetazione. Quest'ultima, se densa e continua, può rappresentare un limite in quanto impedisce l'osservazione corretta del terreno.

Il rilievo fotogrammetrico è costituito da una serie di passaggi che portano alla restituzione dei prodotti finali. Le principali fasi che si possono individuare sono:

- **Acquisizione:** costituita da tutte quelle operazioni e strumenti necessari alla presa delle immagini.
- **Orientamento:** serie di operazioni che permettono di posizionare i centri di presa e i fotogrammi nella stessa posizione spaziale che avevano al momento della presa.
- **Ricostruzione del modello:** determinazione delle dimensioni, forma e posizione degli oggetti ripresi.

- Restituzione: realizzazione delle misure sul modello dello spazio ricostruito utilizzando restitutori che permettono di ottenere un disegno, un insieme di coordinate o altri prodotti.

In questo lavoro di tesi il volo per il rilievo dell'area in frana è stato effettuato il giorno 25 novembre 2019, con condizioni meteorologiche buone e ventosità assente. Il mezzo utilizzato è un PHANTOM 4 PRO, prodotto dall'azienda cinese DJI, dotato di radiocomando per la visualizzazione in tempo reale dei dati e con autonomia di volo di circa 30 minuti. È equipaggiato con una fotocamera CMOS 1" da 20 MP per riprese foto e video.

Il drone è in grado di resistere a velocità del vento fino a 10 m/s ed è dotato di sistema di posizionamento GPS/GLONASS.

Il rilievo ha interessato una porzione di territorio di lunghezza intorno ai 400 m e larghezza di 150 m. Per riprendere l'area sono stati realizzati due voli, partendo da punti base differenti (figura 4.10), con una copertura totale della zona realizzata per mezzo di 230 fotogrammi.



Figura 4.10: punto di decollo e atterraggio del drone in fase di rilievo.

Per la progettazione del volo ci si è serviti dell'applicazione DJI Ground Station Pro (DJI GS Pro), disponibile all'interno del sito del produttore. L'applicazione è in grado di determinare in modo automatico il piano di volo una volta che l'utente ha definito la zona da riprendere e la risoluzione desiderata.

4.2.2. Punti di controllo a terra e GPS

Nei paragrafi precedenti è stato affermato che sono necessari dei punti di riferimento a terra per ottimizzare il processo di orientamento e di ricostruzione del modello digitale della superficie nel corso dell'elaborazione fotogrammetrica. Infatti, il rilievo fotogrammetrico fornisce una nuvola di punti adimensionale e priva di un orientamento (Martínez-Carricondo et al., 2018). È necessario impostare un sistema di riferimento a terra, i cui punti sono denominati target, che permetta di definire il piano di riferimento e il dimensionamento della nuvola di punti. In via teorica basterebbero 3 punti per definire il piano di riferimento, ma è sempre bene avere una ridondanza di target per ottenere un orientamento corretto su tutta la superficie da rilevare. Durante la pianificazione del rilievo si potrebbe decidere di utilizzare un qualsiasi punto riconoscibile all'interno della scena come riferimento. Tuttavia si preferisce ricorrere all'utilizzo di target artificiali ad alta visibilità (figura 4.11) che permettono di migliorare l'accuratezza del rilievo, ed essendo facilmente riconoscibili semplificano la fase di post-elaborazione. I target possono avere dimensioni differenti a seconda delle caratteristiche del rilievo e della quota di volo. La disposizione dei riferimenti all'interno della zona di rilievo è importante per la determinazione del risultato finale: essi devono essere posizionati in modo da includere in interpolazione la maggior parte dell'area di interesse, considerando le tre dimensioni. Devono essere evitate disposizioni troppo allineate per evitare errori di *tilting* e deve essere considerata anche la variabilità lungo la verticale.

Molti degli attuali software di elaborazione fotogrammetrica si basano su algoritmi che permettono di estrarre modelli tridimensionali anche da foto a diversa quota e da differenti angolazioni. Ne è un esempio il metodo *Structure-from-Motion* (Sfm), che riesce a risolvere automaticamente la geometria della scena, la posizione delle prese e il loro orientamento anche senza un sistema di riferimento a terra. La disposizione dei target in relazione alla superficie da rilevare è correlata all'accuratezza del modello digitale finale. Martínez-Carricondo (2018) hanno dimostrato come la migliore distribuzione dei target per minimizzare l'errore planimetrico sia quella che pone i riferimenti lungo il margine dell'area di rilievo. Per quanto

riguarda la precisione in senso verticale, la distribuzione migliore è quella stratificata che interessa tutta la superficie. Anche il numero di target a disposizione durante il rilievo è proporzionalmente legato all'accuratezza delle misure, con risultati migliori con una serie numerosa di riferimenti a terra.



Figura 4.11: target di riferimento utilizzato in fase di rilievo.

L'area della frana delle Lore è stata georiferita ricorrendo alle coordinate di 15 target posati all'interno della regione del rilievo (figura 4.12), disposti a quote diverse in prossimità delle sponde del torrente Cavalletto.

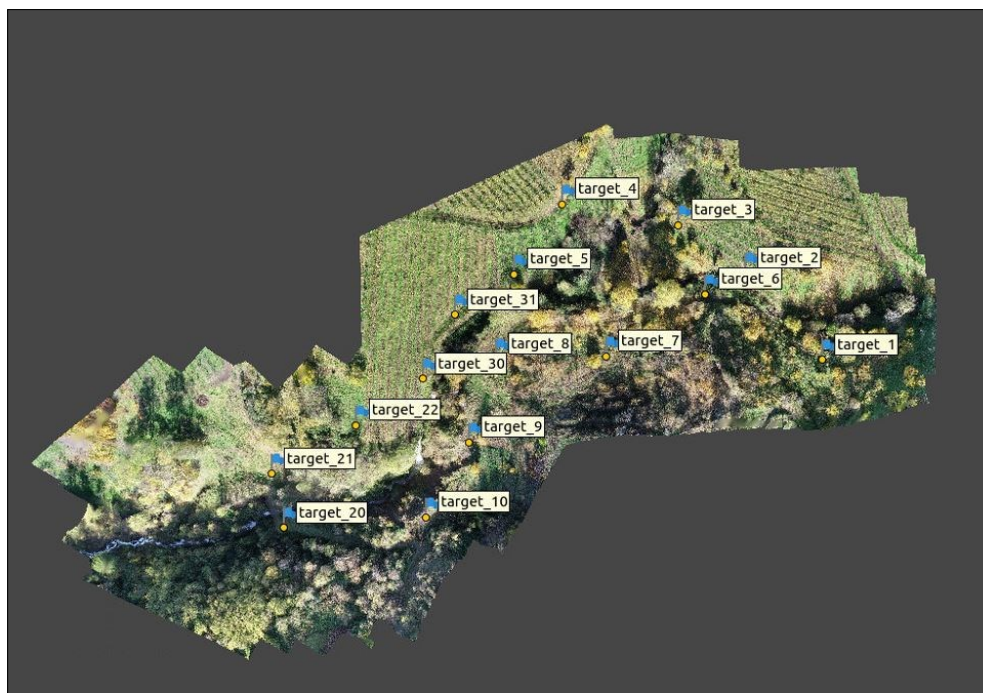


Figura 4.12: disposizione dei target nell'area di frana.

Il rilievo dei target avviene attraverso l'utilizzo di strumenti topografici GPS (*Global Positioning System*) che permettono la rilevazione delle coordinate di punti nello spazio. Il funzionamento del sistema GPS è basato su una costellazione di una trentina di satelliti, disposti su 6 piani orbitali intorno al pianeta Terra, e sull'analisi del tempo che intercorre tra la partenza e l'arrivo di un segnale radio tra un satellite e il ricevitore a terra. Generalmente in condizioni operative ottimali è richiesta la ricezione di almeno 4 satelliti per ottenere misurazioni corrette.

La posizione di un punto è quindi definibile in coordinate cartesiane ortogonali (X, Y, Z) o in coordinate geografiche ellissoidiche (φ , λ , h), attraverso una triangolazione tra la posizione del ricevitore a terra e dei satelliti nello spazio.

Il segnale GPS è unidirezionale, in quanto viene trasmesso soltanto dai satelliti ai ricevitori, e complesso: esso è infatti costituito da due portanti sinusoidali L_1 e L_2 generate dagli oscillatori dei satelliti e modulate da codici binari. Il codice P (*Precision*) è il principale e modula entrambe le portanti, mentre il codice C/A (*Coarse/Acquisition*) modula soltanto una replica della portante L_1 sfasata di 90° (Capra e Costantino, 2007). Tutte le componenti trasportano il messaggio di navigazione D, i cui dati sono necessari alla determinazione della posizione dei satelliti nello spazio. La funzione del codice P è di permettere la determinazione dei parametri del modello matematico per l'analisi della propagazione ionosferica del segnale, mentre il codice C/A svolge il servizio noto come SPS (*Standard Positioning Service*) per il calcolo dell'errore di posizionamento.

La complessità del sistema GPS è dovuta a diverse ragioni (Manzino, 2000):

- Deve supportare un numero virtualmente illimitato di utenti ed essendo stato sviluppato per scopi militari la posizione del ricevitore non è comunicata al satellite (metodo di sola andata);
- È necessario identificare ogni satellite agganciato durante un posizionamento sfruttando il differente codice assegnato a ciascuno di essi;
- L'apertura ad usi civili del sistema GPS ha reso necessaria l'esistenza di due tipi di segnali (P e C/A) con differenti livelli di precisione;
- La necessità di apportare correzioni per l'effetto della ionosfera implica che si utilizzino due portanti diverse poiché l'effetto dipende dalla frequenza del segnale.

Durante il rilievo dell'area di frana i target sono stati rilevati utilizzando un ricevitore Topcon Hiper2 Rover con controller FC236 (figura 4.13) utilizzando il sistema di riferimento WGS-84.



Figura 4.13: ricevitore GPS Topcon Hiper2 Rover (Rocco, 2017).

Spesso vi è la necessità di operare una trasformazione fra sistemi di riferimento, in quanto a livello nazionale si usano maggiormente datum geodetici particolari (ROMA 40, ED50). Il passaggio tra sistemi di coordinate e datum avviene applicando una serie di equazioni note, che nella maggior parte dei casi non comportano la perdita di precisione dei dati di partenza.

Il metodo di misurazione GPS è affetto da una serie di errori che derivano da diverse sorgenti:

- Errori nella posizione dei satelliti: possono essere dovuti ad asimmetrie del campo gravitazionale terrestre, alla pressione solare o all'effetto attrattivo dei corpi celesti. Possono essere corretti a posteriori ricorrendo ad effemeridi precise;
- *Selective Availability (S/A)*: degradazione del segnale GPS introdotta intenzionalmente a scopi militari dal Dipartimento della Difesa statunitense per rendere più impreciso il posizionamento nei confronti di un eventuale nemico;
- *Antispoofing*: un'ulteriore limitazione imposta a scopi militari. Sostituisce il codice P con un codice criptato (Y code) non utilizzabile da utenti civili;
- Effetti ionosferici: la ionosfera può determinare un ritardo nella propagazione del segnale GPS, con una conseguente sovrastima delle distanze;
- Effetti troposferici: anche la troposfera può, come la ionosfera, determinare dei ritardi nella propagazione del segnale;
- *Multipath*: riflessione multipla del segnale GPS per effetto delle superfici circostanti l'antenna del ricevitore e conseguenti possibili ritardi di lettura;

- Errori del ricevitore: riconducibili allo sfasamento dell'orologio interno, al tipo di antenna ed al rumore di fondo;
- Degradazione della precisione: dipende dalla configurazione geometrica dei satelliti rispetto al ricevitore e si manifesta nelle 4 dimensioni (x, y, z, t) (CIRGEO).

Occorre considerare questi tipi di errore nella valutazione dell'accuratezza complessiva del modello digitale prodotto.

4.3. Modelli Digitali di Elevazione (DEM)

La morfologia del terreno è un elemento fondamentale da conoscere per operare qualsiasi tipo di analisi della superficie terrestre e dei processi di trasformazione che la riguardano. Negli ultimi decenni lo sviluppo degli strumenti per lo studio del terreno ha permesso di ottenere dati a risoluzione e precisione sempre migliori. A partire dal modello digitale del sito, divenuto l'informazione fondamentale per lo studio dei processi geomorfologici, si possono derivare elaborazioni e mappe di sintesi dei processi in atto (Cavalli, 2009).

Per evitare confusione occorre effettuare una distinzione dei termini oggi comunemente utilizzati per indicare i modelli digitali: si parla in genere di DEM o modelli digitali di elevazione per indicare in modo generico una rappresentazione delle quote di punti senza distinguere a priori le diverse superfici riflettenti, e sono così indicati in genere i modelli derivati da carte topografiche.

Nella categoria dei DEM si possono poi distinguere i modelli digitali della superficie o DSM e i modelli digitali del terreno o DTM (figura 4.14). Alla prima categoria appartengono quelle rappresentazioni che sono costituite dai punti della prima superficie riflettente individuata, e quindi comprensiva della vegetazione e degli edifici; nel secondo gruppo sono invece inseriti quei modelli in cui la superficie di riferimento è quella del terreno nudo e privato quindi delle componenti vegetali ed architettoniche. Questa distinzione riveste un'importanza rilevante a seconda delle finalità per le quali vengono generati i modelli digitali e del settore di applicazione.

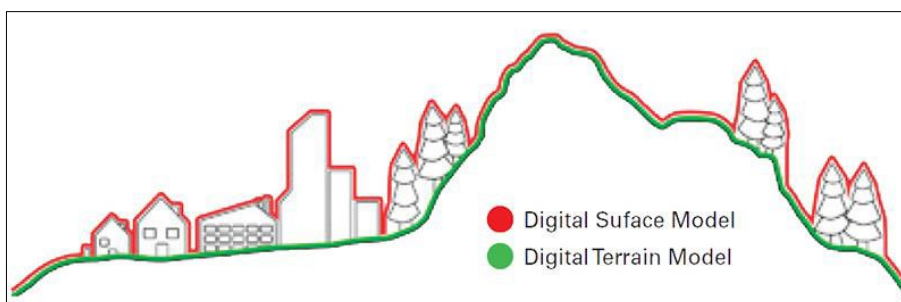


Figura 4.14: distinzione tra DSM e DTM (Rocco, 2017).

I modelli digitali del terreno trovano applicazione in moltissimi campi, dalla progettazione di opere (dighe, strade) agli studi di tipo geomorfologico del territorio, all'analisi della dinamica fluviale (Picco et al., 2013), e possono essere organizzati in due strutture di dati (Biallo, 2005):

- *DEM grid*: deriva da una griglia regolare a celle quadrate, in cui ognuna contiene il valore medio di quota della porzione di territorio rappresentata;
- *Triangulated Irregular Networks (TIN)*: rappresentazione della morfologia del suolo attraverso una rete di triangoli irregolari i cui vertici sono quotati.

Ognuna delle due strutture ha dei punti di forza e dei punti di debolezza: i *grid* sono in genere ridondanti nelle aree pianeggianti caratterizzate da ridotta variabilità in senso verticale, mentre tendono a far perdere il dettaglio in quelle zone a pendenza più elevata o più morfologicamente complesse. È tuttavia semplice da gestire per i programmi di calcolo e facilmente implementabile negli algoritmi per le analisi *raster*. La struttura TIN è dotata di una migliore capacità di rappresentazione della morfologia, in quanto la densità dei vertici dei triangoli si adatta alla scabrezza del territorio, evitando le ridondanze in aree poco complesse.

La crescente disponibilità di tecniche di rilevamento in grado di acquisire dati altimetrici con elevati livelli di accuratezza e densità di punti ha portato alla progressiva diminuzione della dimensione delle celle e ad un aumento della risoluzione del dato. Le fonti di dati da cui possono essere derivati i modelli digitali sono essenzialmente riassumibili in tre categorie (Cavalli, 2009):

- Carte topografiche;
- Rilievo del terreno;
- *Remote sensing*.

Dalle carte topografiche si ricavano informazioni altimetriche attraverso la digitalizzazione delle curve di livello. Il rilievo del terreno può invece essere realizzato ricorrendo al sistema GPS in modalità differenziale (dGPS), con correzione della posizione via segnale radio, e con una

precisione sub-metrica in senso orizzontale e metrica in verticale. Nel caso del remote sensing i dati altimetrici derivano da piattaforme aeree o satellitari e si riferiscono a estensioni territoriali maggiori. Le metodologie principali di remote sensing sono rappresentate dalla fotogrammetria, dalla tecnologia radar e dal LiDAR (tabella 4.0).

Tabella 4.0: caratteristiche delle differenti metodologie di acquisizione di dati per la produzione di DEM (Buzzi, 2012).

	Metodologia	Strumentazione impiegata	Qualità misurabile dei dati	Autonomazione del metodo	Accuratezza del metodo
Cartografia	Scansione	Scanner	Elevata	Buona (in modalità semiautomatica)	Media (in funzione di qualità/scala della carta e solo se in modalità semiautomatica)
	Digitalizzazione	Tavolo digitalizzatore	Elevata	Scarsa	Media (in funzione di qualità/scala della carta)
Rilievo topografico	Topografia classica	Stazione totale	Media	Nulla	Elevata
	Geodesia spaziale	GPS	Media	Nulla	Elevata
Rilievo fotogrammetrico	Approccio analitico	Stereocomp. Analitico	Elevata	Scarsa	Buona/elevata
	Approccio digitale	Stazione digitale	Molto elevata	Ottima	Buona/elevata
Telerilevamento	Ripresa spaziale	Elaborazione digitale delle immagini	Elevata	Ottima	Media

Attraverso le tecniche fotogrammetriche è possibile derivare un DEM a partire da stereo foto digitali geo-riferite e da punti di controllo a terra. Sono necessari *software* e *hardware* con buone prestazioni, dato il volume elevato di dati immagazzinato dalle foto aeree. Il metodo di tipo fotogrammetrico attuale è il risultato di decenni di ricerche e quindi presenta un approccio standardizzato e di buona qualità. Sono comunque da considerare gli svantaggi derivanti dal metodo: ci possono essere errori dovuti a effetti di distorsione della camera, errori altimetrici dovuti alla presenza di vegetazione a diversi livelli, disturbi legati alle condizioni meteo, nonché errori dovuti al rilievo del posizionamento dei punti di controllo.

In contesti territoriali particolarmente ricchi di vegetazione sono stati ottenuti risultati migliori, per quanto riguarda l'accuratezza del DEM, a partire da dati derivanti da tecnologia LiDAR rispetto a informazioni di natura fotogrammetrica, come indicato da Hugenholtz et al. (2013). Gli errori di precisione verticale del modello digitale in siti fortemente vegetati possono arrivare

al mezzo metro o più, e possono essere ridotti solo parzialmente con l'utilizzo di target a terra (Akturk e Altunel, 2019); in condizioni di suolo poco o non vegetato la precisione del modello aumenta, con un intervallo di errore verticale di qualche centimetro (Uysal et al., 2015).

4.4. Elaborazione fotogrammetrica del DEM

La realizzazione del modello digitale dell'area della frana delle Lore a partire dai dati fotogrammetrici derivanti dal rilievo del novembre 2019 è stata effettuata ricorrendo a un software per *Structure from Motion*, a strumenti di analisi delle nuvole di punti ottenute, e a strumenti GIS per il confronto fra i DTM (figura 4.15).

In particolare per la parte di elaborazione delle immagini aeree UAV è stato utilizzato Agisoft Photoscan: il software permette di generare una nuvola di punti a partire da una serie di immagini digitali sfruttando un particolare metodo di calcolo noto come *Structure-from-Motion* (SfM) e basato su un insieme di algoritmi di *computer vision*. Il processo inizia con l'allineamento dei fotogrammi e dei target per concludersi con la creazione della nuvola di punti georeferenziata, dalla quale si può ricostruire il modello tridimensionale (Westoby et al., 2012). Il metodo SfM trova applicazione in molti campi, come ad esempio la modellazione idrologica fluviale (Javernick et al., 2014) e l'analisi dell'evoluzione degli ambienti glaciali e periglaciali (Bearzot, 2016).

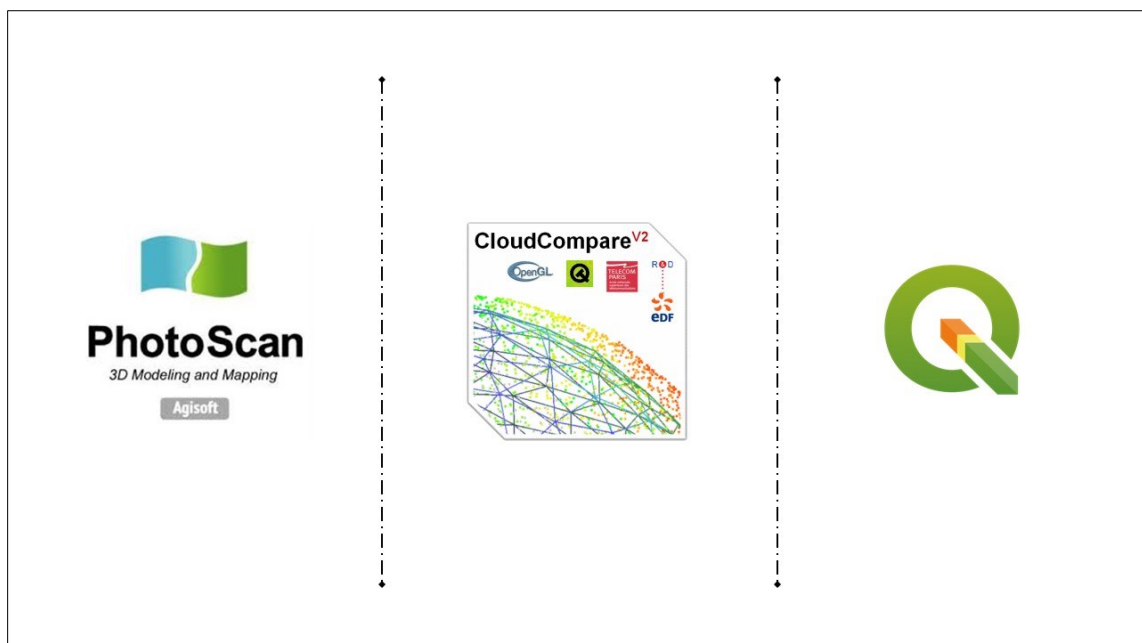


Figura 4.15: software utilizzati durante l'elaborazione e l'analisi dei dati.

Il software open source CloudCompare è stato utilizzato per ripulire la nuvola di punti precedentemente generata con Agisoft Photoscan, eliminando tutti quei punti costituiti da vegetazione arborea e arbustiva presenti nell'area della frana, per poter passare da un modello della superficie (DSM) ad un modello del terreno (DTM).

La nuvola di punti prodotta con Agisoft Photoscan è stata ottenuta seguendo una serie di passaggi successivi:

- Caricamento delle immagini aeree e settaggio dei parametri di base;
- Allineamento dei fotogrammi;
- Creazione della nuvola di punti di base;
- Filtraggio della nuvola di punti;
- Aumento della densità dei punti;
- Ripulitura della nuvola di punti densa;
- Posizionamento dei target e georeferenziazione;
- Creazione della mesh e della texture;
- Produzione degli output.

Il caricamento delle immagini in Photoscan e il successivo filtraggio delle foto permettono di analizzare la qualità del materiale disponibile. I valori di qualità si pongono in un intervallo compreso tra 0 e 1, e in genere per le elaborazioni vengono richiesti valori superiori a 0,6. Il rilievo della frana delle Lore ha restituito materiale fotografico di qualità elevata, con valori in generale superiori a 0,85 per tutte le immagini.

L'allineamento delle immagini mostra il punto di presa di ciascuna foto (figura 4.16), al di sopra della nuvola di punti di base. L'analisi della disposizione delle singole prese permette di individuare la presenza di eventuali falsi piani, ovvero di piani non correttamente orientati, e di eliminarli.

Per migliorare l'accuratezza generale è possibile effettuare un primo filtraggio dei punti della nuvola di base con strumenti di selezione graduale automatica che eliminano quei punti con errore di riproiezione oltre una soglia definita dall'utente.

Il passaggio successivo è la densificazione della nuvola di base, dalla quale si ottiene la nuvola densa di punti. Questa operazione avviene impostando alcuni parametri nella finestra di dialogo (figura 4.17), come la qualità e il *depth filtering*. Il parametro qualità specifica il dettaglio e

l'accuratezza geometrica che deriva dall'elaborazione. In questo caso il livello di qualità utilizzato è stato quello elevato (*high*). Il parametro *depth filtering* permette invece di definire il controllo sulla creazione di punti *outliers* generati in fase di ricostruzione densa attraverso l'applicazione di algoritmi adatti a diverse condizioni: in aree con importante presenza di vegetazione e assenza di strutture fini (elementi di dettaglio) il parametro è settato su "Agressiva".

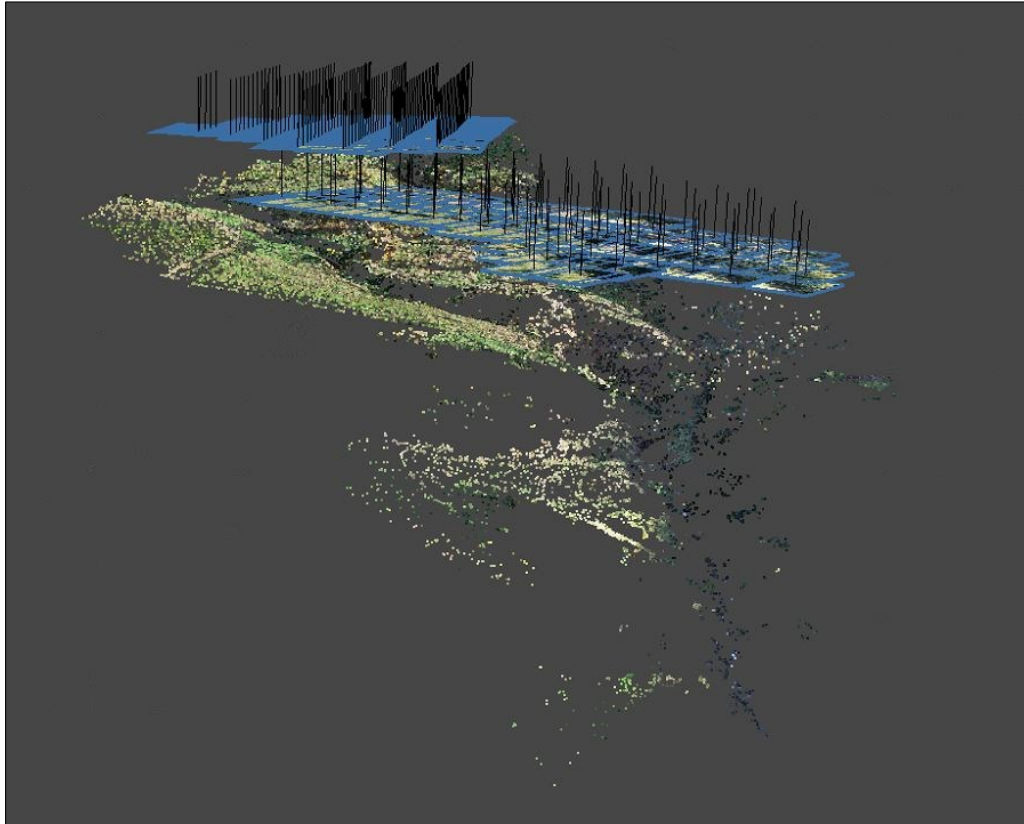


Figura 4.16: allineamento delle camere e vista dei punti di presa.

La densificazione della nuvola di base ha permesso di passare da 57 914 punti a 118 833 419 punti finali (figura 4.18).

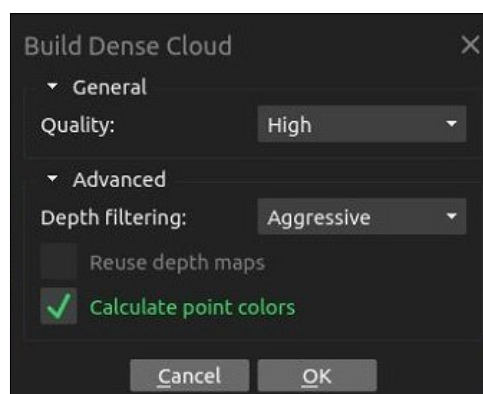


Figura 4.17: settaggio dei parametri per la densificazione della nuvola di base.

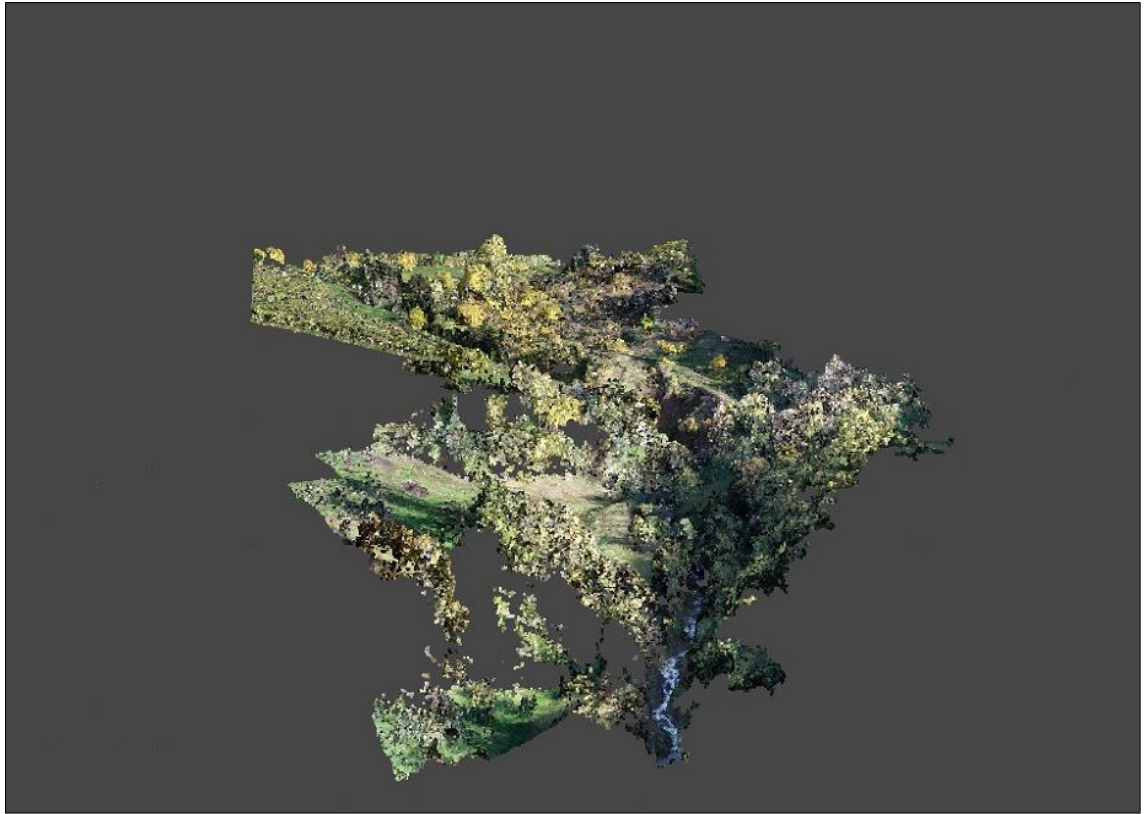


Figura 4.18: nuvola densa della zona di frana.

A questo punto è necessario georeferenziare la nuvola di punti così generata importando e posizionando i punti di controllo a terra rilevati in campo. L'operazione di *targeting* avviene assegnando le coordinate di ciascun target: occorre individuare i riferimenti nelle immagini aeree e cliccando al centro degli stessi posizionare il marker corrispondente. Le coordinate di ciascun marker sono riportate in una tabella, con una serie di ulteriori informazioni (figura 4.19). Dopo aver inserito i primi due target il software procede in automatico al posizionamento dei rimanenti riferimenti in tutte le immagini presenti, ma occorre comunque confermare manualmente la posizione corretta dei markers.

L'errore di posizionamento totale associato ai markers è risultato essere pari a 2,3 cm.

A questo punto la nuvola di punti può essere già esportata per ulteriori elaborazioni con altri software. In alternativa Photoscan permette di costruire una mesh, ovvero una superficie elementare costituita da triangoli, e di applicare una texture con dettagli visivi e colori. Inoltre è anche possibile produrre ortofoto e modelli tridimensionali del sito.

Nel caso della nuvola di punti generata per il sito delle Lore, la presenza di vegetazione arborea e arbustiva all'interno dell'area del rilievo è molto abbondante e costituisce un limite alla

corretta definizione delle quote relative al livello del suolo. È stato necessario procedere ad una ripulitura della nuvola di punti per tentare di eliminare la porzione vegetale. Tale operazione è stata effettuata ricorrendo a CloudCompare.

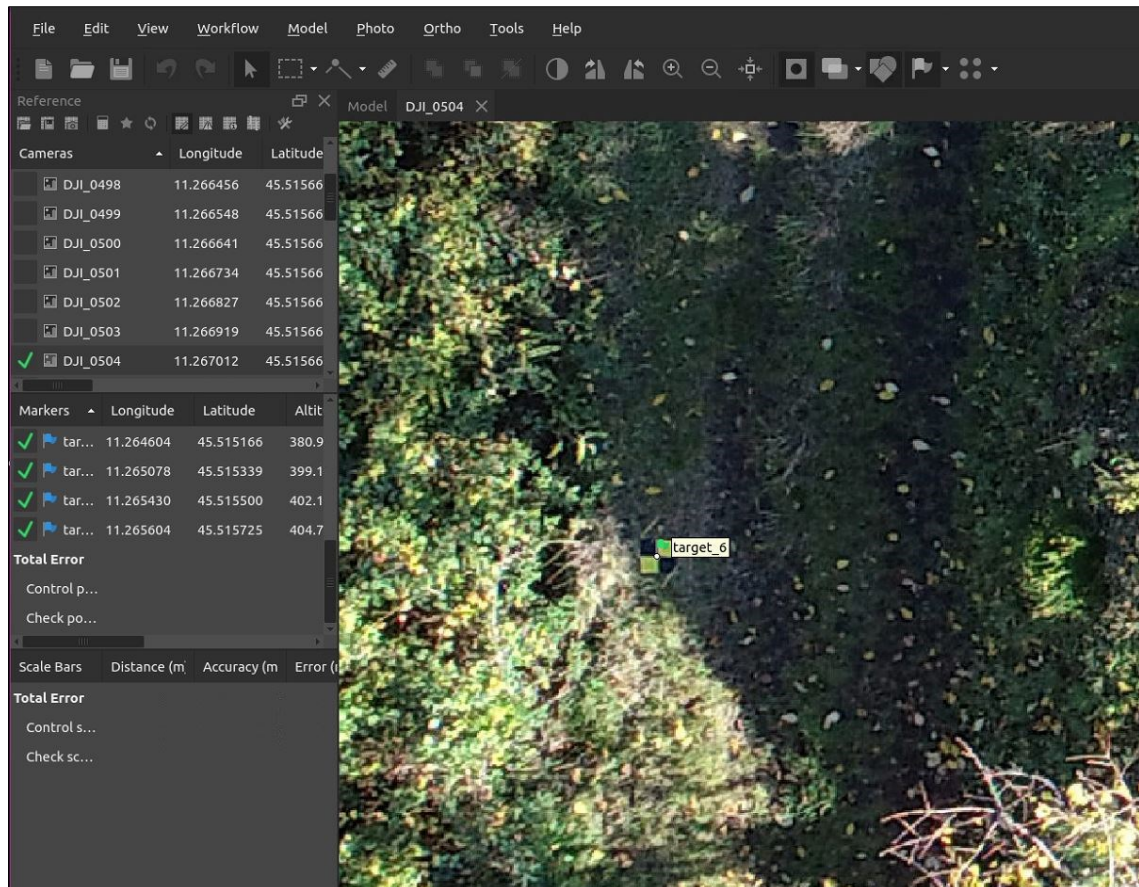


Figura 4.19: operazione di targeting con il posizionamento del marker.

Questo è un software di analisi e processamento di nuvole 3D dotato di pacchetti e strumenti che permettono di pulire e filtrare i punti.

È possibile filtrare la nuvola mediante un procedimento automatizzato o manualmente a seconda delle necessità. Con il *plugin CSF – Cloth Simulation Filter* (Zhang et al., 2016) presente in CloudCompare, è possibile effettuare una pulizia automatica della nuvola definendo alcuni parametri generali ed avanzati. Lo strumento permette di estrarre i punti riconosciuti come appartenenti al livello del terreno (*ground points*) e di separarli dai rimanenti (*off-ground points*) costituiti da altri elementi.

I parametri avanzati richiesti dal plugin sono tre:

- *Cloth Resolution*: si riferisce alla dimensione della griglia usata per coprire l'area di indagine e ha effetti sulla risoluzione del DTM che si può ottenere.

- *Max Iterations*: si riferisce alla numerosità delle iterazioni per la simulazione del terreno.
- *Classification Threshold*: la soglia di classificazione si riferisce a un limite che permette di separare i punti appartenenti al suolo da quelli che non vi appartengono (vegetazione, edifici, ecc.) sulla base della differenza di quota tra i punti della nuvola e il livello del suolo calcolato dal software.

Per la pulizia della nuvola di punti, dopo alcuni tentativi di prova per ottimizzare il risultato, sono stati utilizzati i seguenti valori:

- *Cloth Resolution*: 0,3
- *Max Iterations*: 500
- *Classification Threshold*: 0,1.

Nelle figure 4.20 e 4.21 sono riportati i confronti tra la situazione antecedente e successiva la pulizia, sia in una visione prospettica che lungo sezioni trasversali dell'area di studio.

Dopo aver eliminato la componente arborea e arbustiva è necessario generare il modello digitale del terreno così ripulito. CloudCompare permette di rasterizzare la nuvola di punti tramite il comando *Rasterize*. Nel processo di generazione del DTM l'utente deve definire alcuni parametri di base. In primo luogo è necessario definire la risoluzione del raster che si vuole generare, stabilendo la dimensione della cella nella sezione *Grid* nella finestra di dialogo (figura 4.22).

In seguito si definiscono i metodi di riempimento delle celle vuote (*Empty cells*), mediante interpolazione delle quote in riferimento ai valori medi delle celle circostanti.

È possibile generare il DTM tramite il comando *Update grid* ed esportare varie ulteriori informazioni. Il DTM si può esportare come raster in formato GeoTIFF con il comando *Raster*, ma è possibile anche estrarre le curve di livello (*Contour plot*) o una mappa dell'ombreggiamento (*Hillshade*).

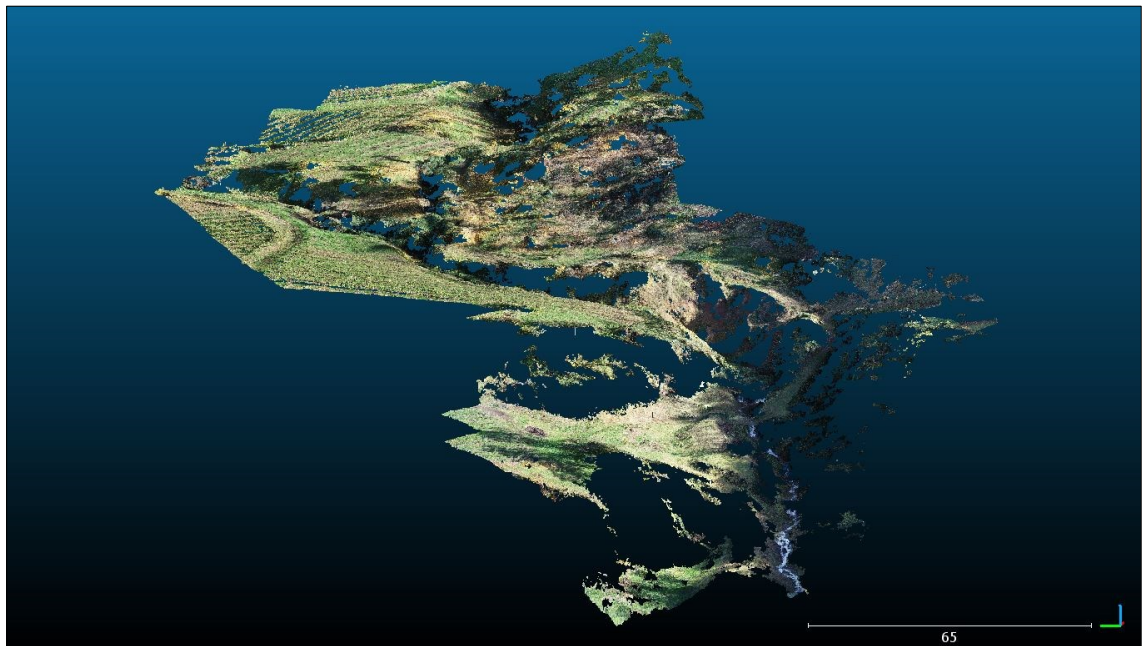
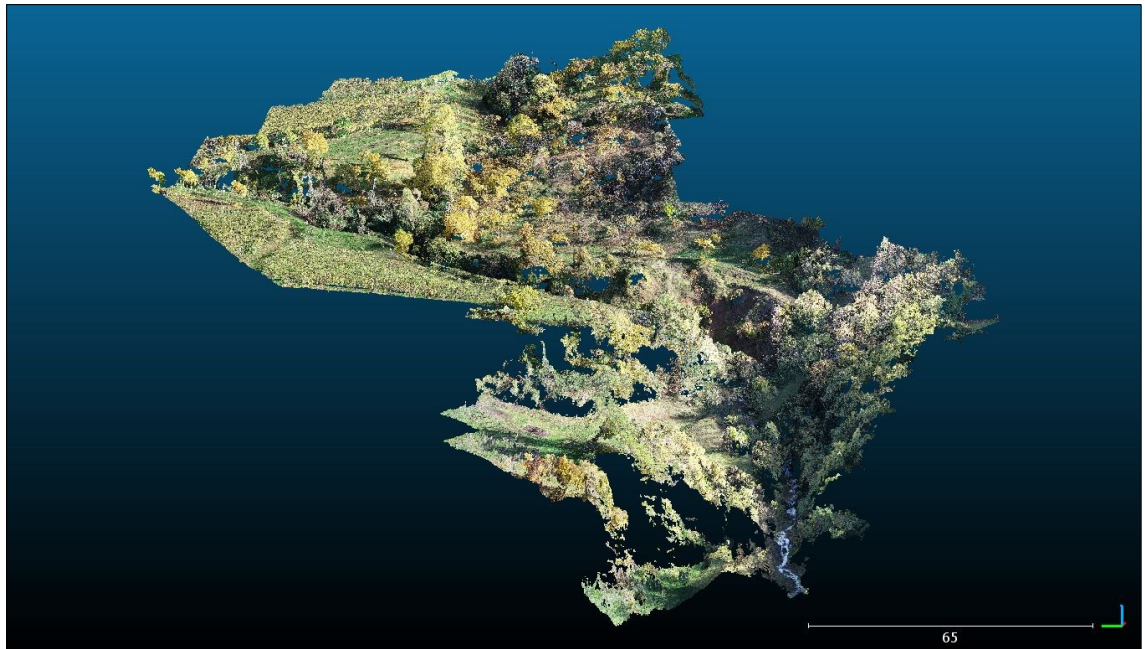


Figura 4.20: nuvola di punti originale (sopra) e nuvola di punti ottenuta tramite la rimozione della vegetazione con il plugin CSF di Cloud Compare (sotto).

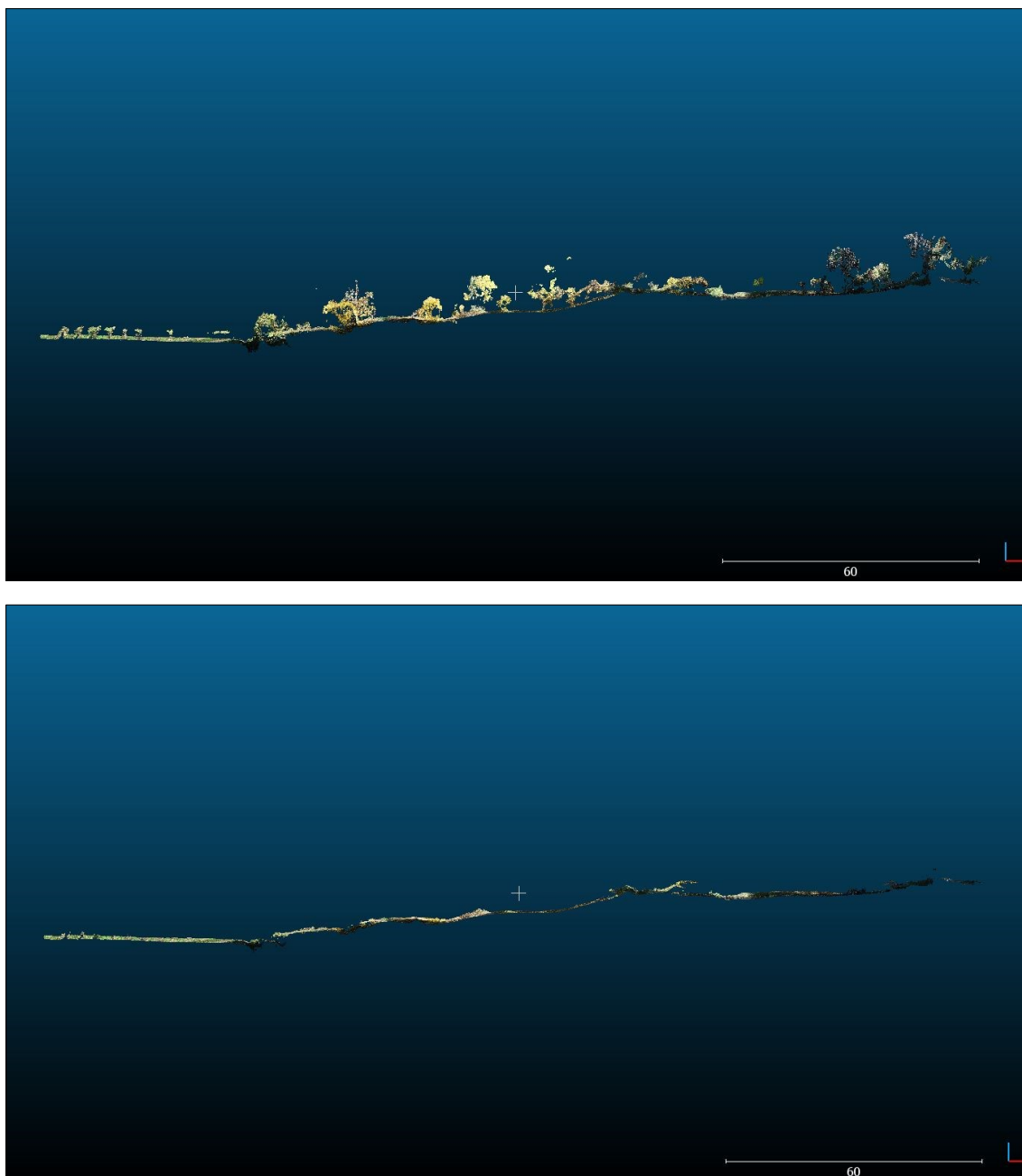


Figura 4.21: comparazione di una sezione trasversale prima (sopra) e dopo (sotto) la rimozione della vegetazione dalla nuvola di punti.

Lo stesso procedimento di generazione del DTM è stato adottato per i dati derivanti dal rilievo del 2006 del Dott. For. Sonda. Il file di testo originale, con estensione .xyz, è stato trattato come una nuvola di punti e rasterizzato con CloudCompare, utilizzando gli stessi parametri indicati in figura 4.22.

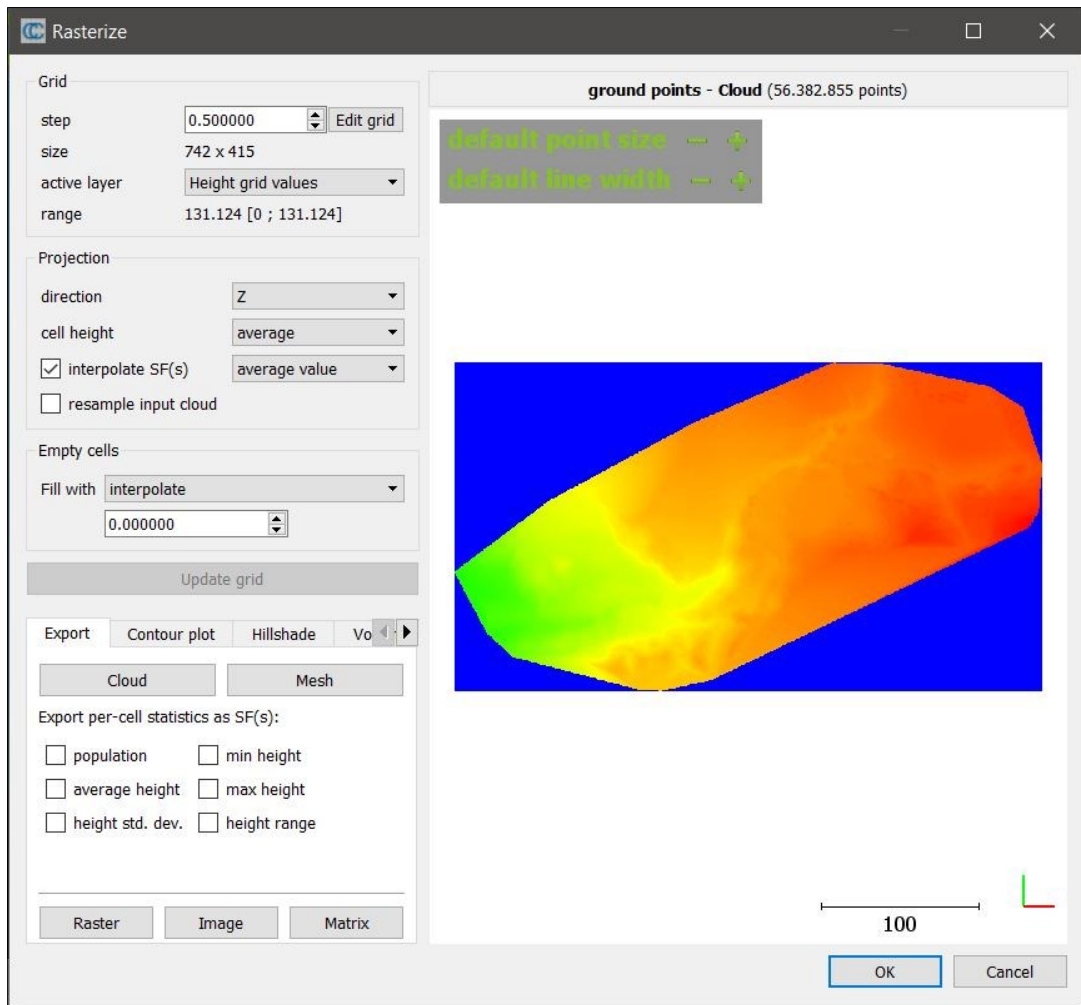


Figura 4.22: rasterizzazione della nuvola di punti con CloudCompare.

4.5. DEM differencing

Per *DEM of Difference* (DoD) si intende una tipologia di analisi multi-temporale attualmente molto in uso in numerosi campi di applicazione. Essa è basata sul confronto di due Modelli Digitali del Terreno (DTM), riferiti a istanti temporali diversi, per individuare variazioni geomorfiche nelle componenti plano-altimetriche del sito (figura 4.23) (D'Agostino et al., 2018). La tecnica del DoD trova applicazione nel contesto dell'analisi fluviale per la determinazione delle aree in erosione o in deposito all'interno dell'alveo (Picco et al., 2013; Wheaton et al., 2013), soprattutto in corsi d'acqua a morfologia "braided" (Wheaton et al., 2010), ma viene utilizzata anche per la valutazione di movimenti franosi lenti (Gatter et al., 2018) (figura 4.24) e per le analisi dell'evoluzione di ghiacciai e nevai di alta quota (Berthier et al., 2014). Con questo approccio è possibile quantificare superfici e volumi interessati dai fenomeni di tipo dinamico.

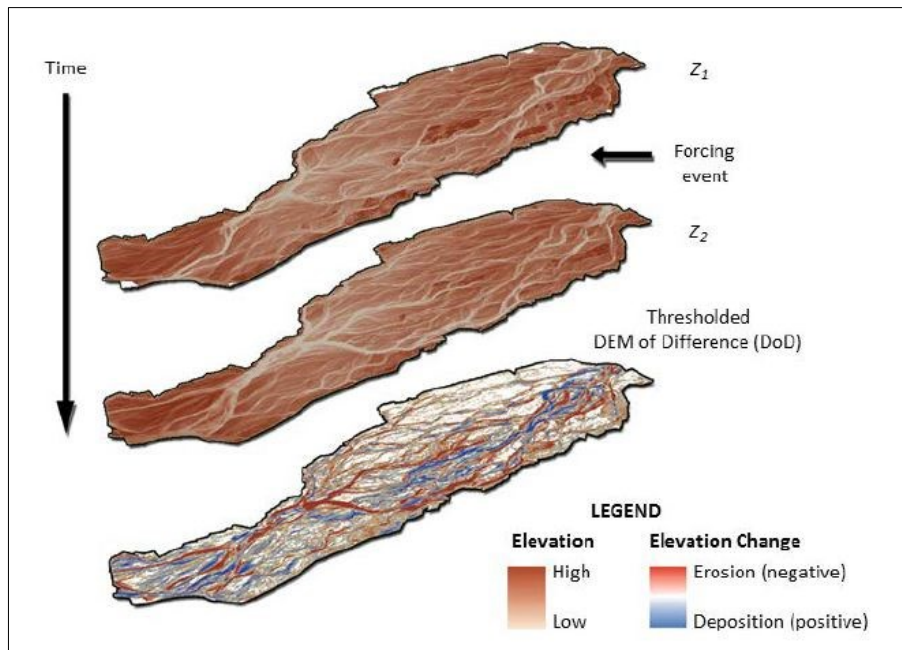


Figura 4.23: rappresentazione schematica della tecnica di analisi DoD nel caso di applicazione alla dinamica fluviale (Williams, 2012).

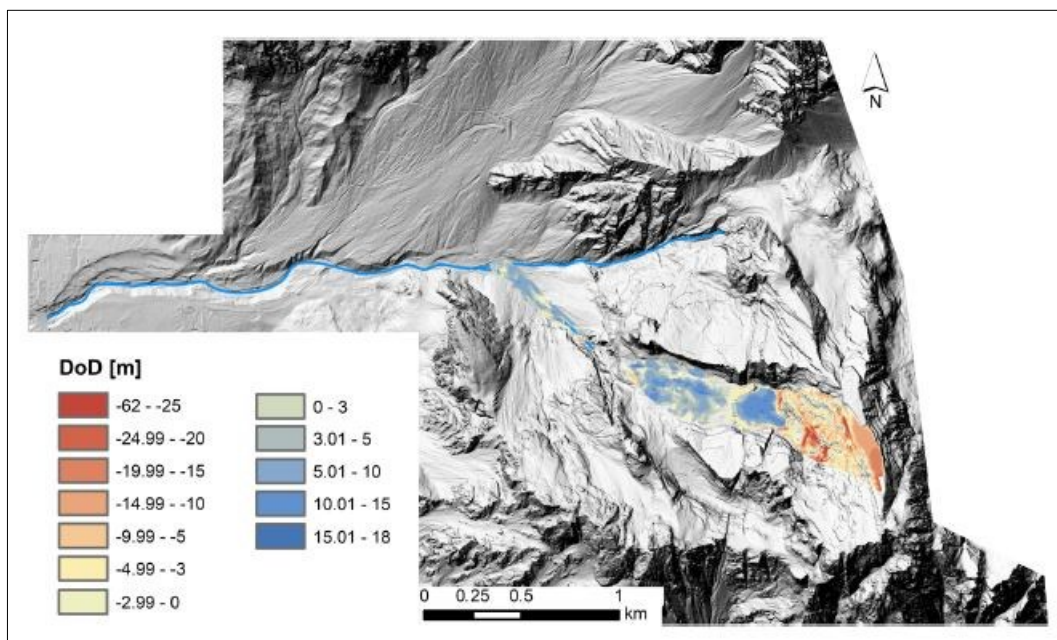


Figura 4.24: applicazione del DoD a un sito interessato da frana (Gatter et al., 2018).

Nel caso di fenomeni di tipo franoso sono state effettuate molte prove ed applicazioni di questa tecnica di indagine, come indicato in tabella 4.1, con intervalli temporali variabili da qualche giorno a qualche decina d'anni a seconda della natura dinamica del processo di frana.

Tabella 4.1: studi ed applicazioni del DoD per il monitoraggio di fenomeni franosi (Williams, 2012).

Geomorphological field	Application	Geomatics technology	Monitoring duration	Survey frequency	Approximate spatial extent	Reference
Mass movements	Mudflow	Cartographic data	45 years	1 - 18 years	1.2 km ²	van Westen and Lulie Getahun (2003)
	Landslide	Kinematic GPS	18 months	7 - 11 months	0.04 km ²	Mora <i>et al.</i> (2003)
	Earthquake triggered landslide and river erosion of deposit	Aerial photogrammetry and airborne LiDAR	14 years	1 - 11 years	6 km ²	Chen <i>et al.</i> (2006)
	Rockfall and slope failure (coast)	TLS	32 months	Monthly	0.1 km ²	Rosser <i>et al.</i> (2007)
	Rockfall and slope failure (deglaciated terrain)	TLS	1 year	1 day - 6 months	0.06 km ²	Oppikofer <i>et al.</i> (2008)
	Landslide (deep seated, Tertiary sediments)	Aerial photogrammetry and airborne LiDAR	50 years	6 - 21 years	0.8 km ²	Dewitte <i>et al.</i> (2008)
	Rockslide (fjord)	TLS	2 years	Annual	0.6 km ²	Oppikofer <i>et al.</i> (2009)
	Landslide (slope undercut by river)	TLS	18 months	2 - 6 months	0.01 km ²	Prokop and Panholzer (2009)
	Rockfall from landslide scar	TLS	10 months	2 - 8 months	0.004 km ²	Abellán <i>et al.</i> (2010)
	Debris flow and flood	Airborne LiDAR	Event	Pre- and post-event	0.4 km ²	Bull <i>et al.</i> (2010)
Earthflow (soil and weathered bedrock)	Airborne LiDAR	4 years	Start and end of monitoring	0.06 km ²	DeLong <i>et al.</i> (2012)	

È necessario però considerare che se i modelli digitali del terreno sono originariamente rappresentazioni imperfette della realtà, in quanto affetti da errori e imprecisioni (errori di rilievo, complessità del sito, precisione dei punti di controllo, metodi di elaborazione dei dati, interpolazione dei punti), i prodotti del DoD possono propagare e amplificare queste incertezze, divenendo poco affidabili ai fini dell'analisi del territorio.

Sono stati proposti nel corso degli anni una serie di indici utili per valutare gli errori associati al DoD, come ad esempio il *Minimum Level of Detection* (Williams, 2012):

$$\delta U_{DoD} = \sqrt{\delta z_1^2 + \delta z_2^2} \quad (4.0)$$

L'errore combinato di un DoD, indicato con δU_{DoD} , può essere calcolato a partire dagli errori associati ai due modelli di partenza, δz_1 e δz_2 .

Ad oggi esistono strumenti e software in grado di condurre all'elaborazione di un *DEM of Difference*. Si tratta di prodotti GIS e software di programmazione (ESRI ArcGIS, Mathworks MATLAB, QGIS) dotati di appositi pacchetti per l'analisi multi-temporale di processi dinamici.

4.6. Elaborazione del DoD

Il DoD della zona della frana delle Lore è stato realizzato utilizzando il software open source QGIS. A partire dai modelli digitali del terreno prodotti in precedenza è stata calcolata la variazione altimetrica dell'area di studio nell'intervallo di tempo 2006 – 2019, riuscendo ad individuare in via teorica le zone più interessate da cedimento ed erosione da parte del corso d'acqua al piede della frana.

I modelli digitali del terreno presentavano sistemi di riferimento ed estensione del raster differenti. Per questo è stato necessario riproiettare i file in uno stesso sistema di coordinate (WGS84 – UTM32N) ed estrarre la zona di interesse mediante ritaglio dei raster con una maschera vettoriale dell'area di studio.

Il calcolatore raster è lo strumento utilizzato per l'elaborazione del *DEM of Difference*, in quanto esso consente di eseguire calcoli sulla base dei valori dei pixel esistenti nel raster e di creare un nuovo livello dotato di nuovi dati derivanti dalle operazioni eseguite (figura 4.25).

Il DoD è calcolato semplicemente come differenza tra i raster del 2006 e del 2019, utilizzando come valore di confronto la quota delle celle.

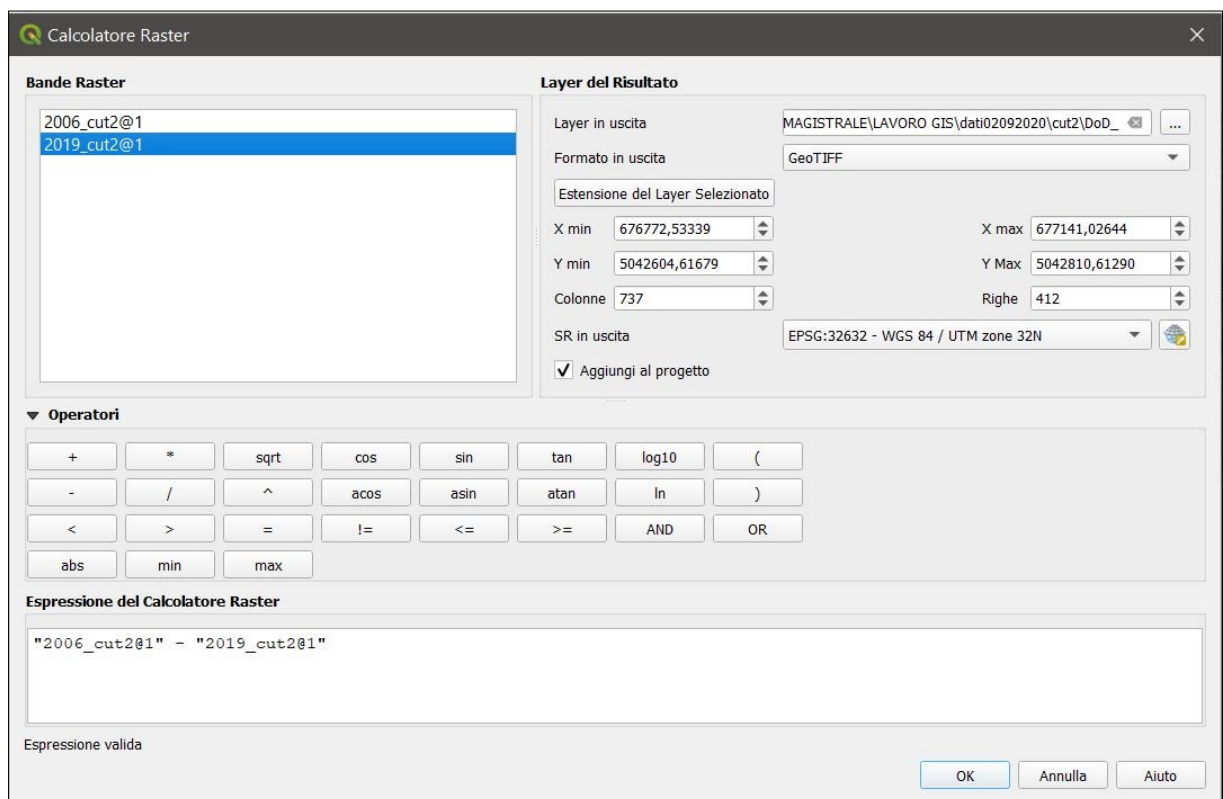


Figura 4.25: calcolo del DoD tramite il calcolatore raster di QGIS.

5. Risultati

In questo capitolo verranno esposti gli esiti delle elaborazioni descritte nel capitolo precedente, volte alla creazione di un modello digitale dell'area di studio delle Lore e alla valutazione dell'evoluzione geomorfologica della zona di frana in un arco temporale di 15 anni.

5.1. Elaborazione del modello digitale del terreno

Il rilievo dell'area di studio della frana delle Lore a San Giovanni Ilarione (VR) è stato effettuato il 25 novembre 2019 con condizioni meteo ottimali e con assenza di vento. La quota di volo media è stata di 47.6 m e sono state scattate 230 immagini su una superficie di 3,9 ha.

Il materiale fotografico raccolto dal volo è risultato essere di alta qualità e la sovrapposizione tra le singole immagini è nel complesso buona, con valori più elevati nella zona centrale e prevedibilmente più bassi ai bordi dell'area di studio (figura 5.0).

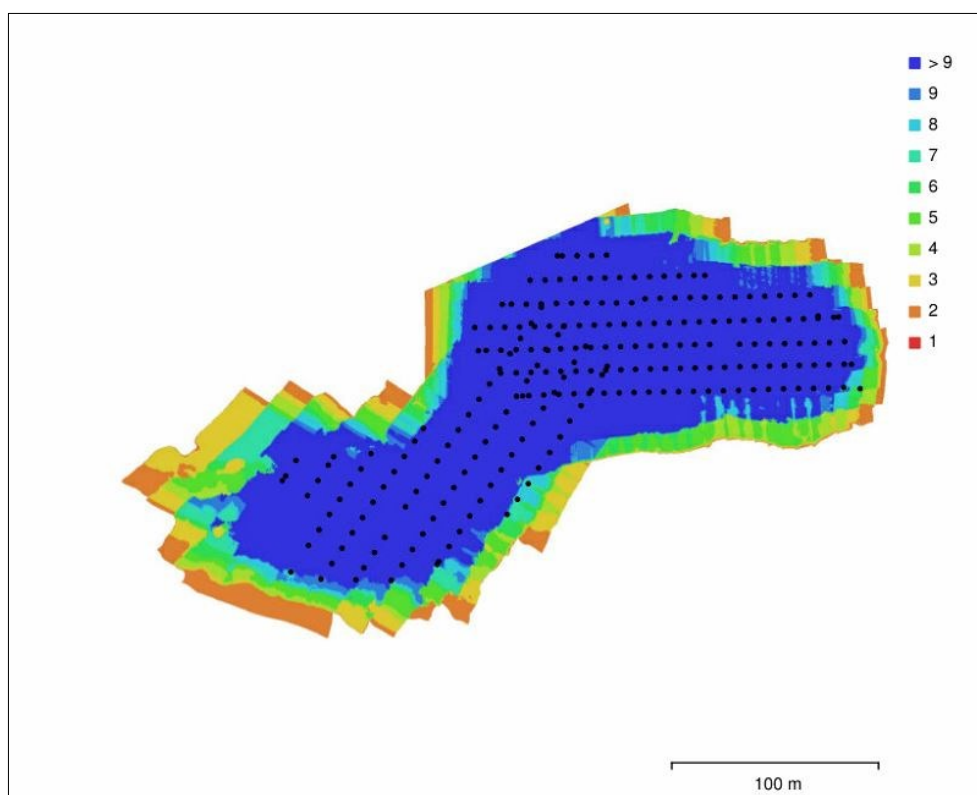


Figura 5.0: grado di sovrapposizione delle camere nell'area di studio (numero di immagini).

Il DTM derivato dai dati del 2019 è stato estratto partendo dalla nuvola densa di punti (figura 5.1).

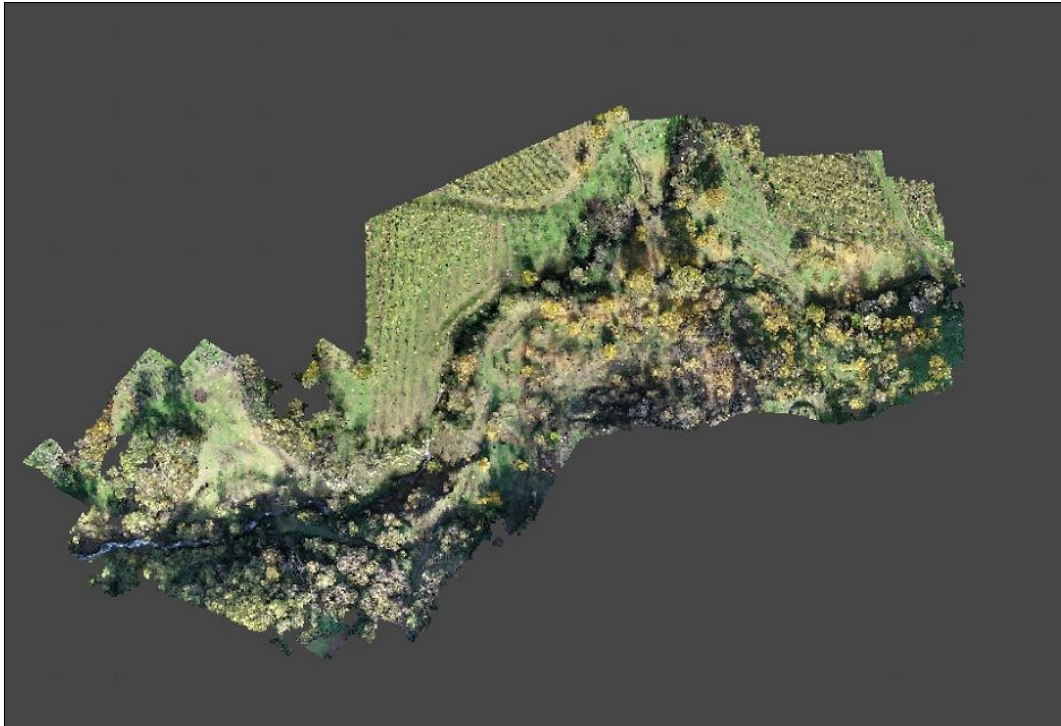


Figura 5.1: nuvola densa di punti dell'area di studio, punto di partenza per il processo di generazione del DTM.

La pulizia della nuvola di punti con CloudCompare ha permesso di eliminare parte della vegetazione presente in occasione dell'ultimo rilievo, individuando e separando i punti appartenenti allo strato del terreno (*ground points*) e a quello arboreo (*off-ground points*) (figura 5.2). La percentuale di punti mantenuti in seguito al filtraggio è del 47,4%, mentre i punti classificati come non appartenenti al suolo sono pari al 52,6%.

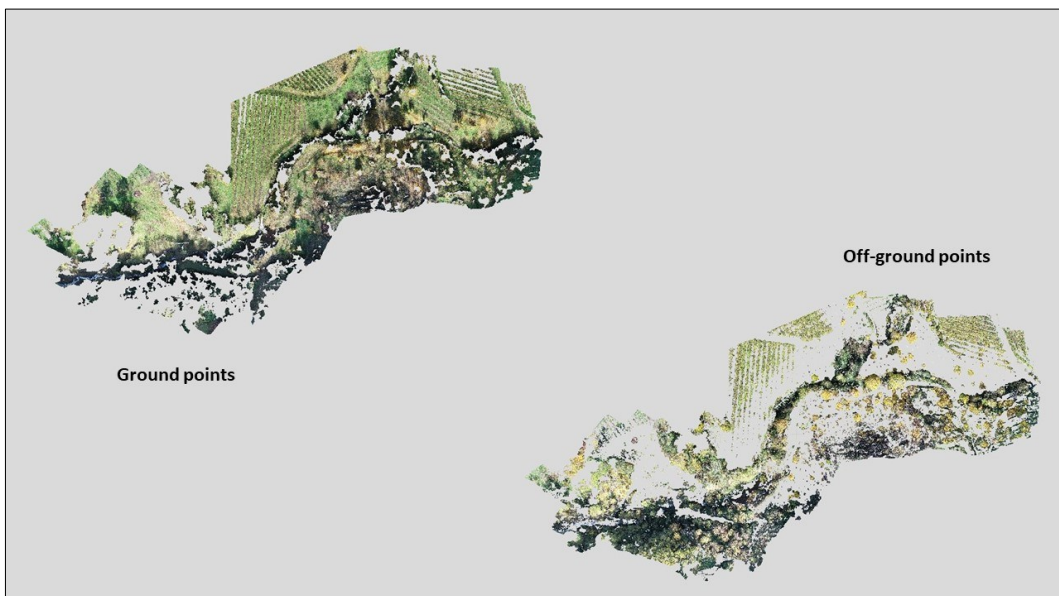


Figura 5.2: pulizia della nuvola di punti con CloudCompare e separazione tra *ground points* e *off-ground points*.

Il DTM, elaborato utilizzando in combinazione Agisoft Photoscan e CloudCompare, ha celle di dimensione pari a 0,5 metri e si estende per una superficie di circa 3,9 ettari (figura 5.3). Con CloudCompare è stato elaborato anche il DTM del 2006 (figura 5.4), trasformando il file di testo originale .xyz della nuvola di punti nel formato raster GeoTIFF necessario per l'analisi DoD.

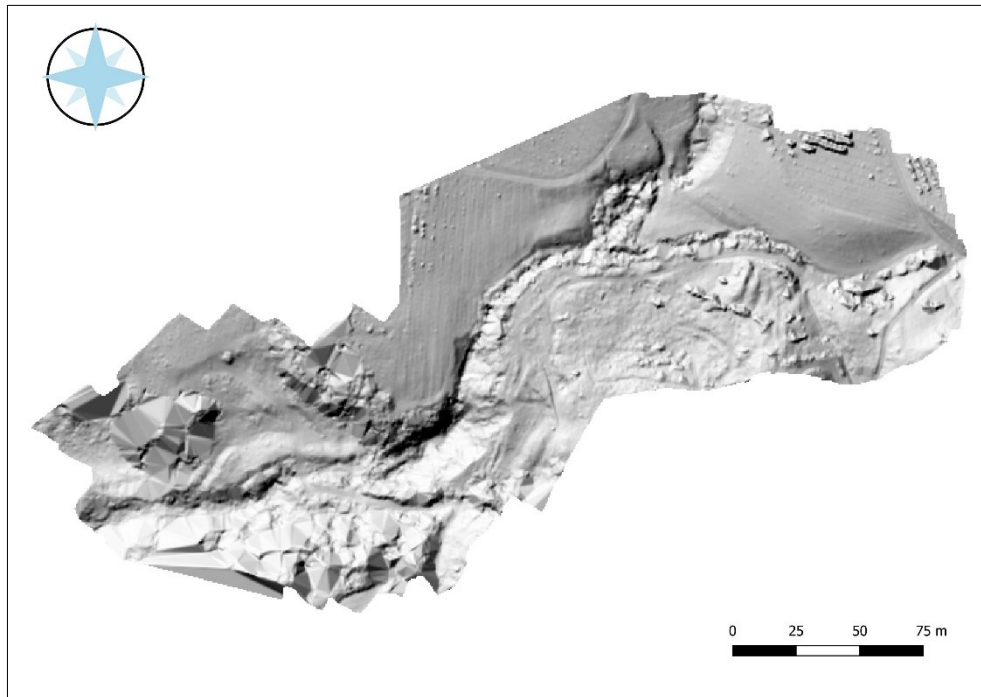


Figura 5.3: DTM dell'area di studio elaborato a partire dalle informazioni del rilievo del 2019.

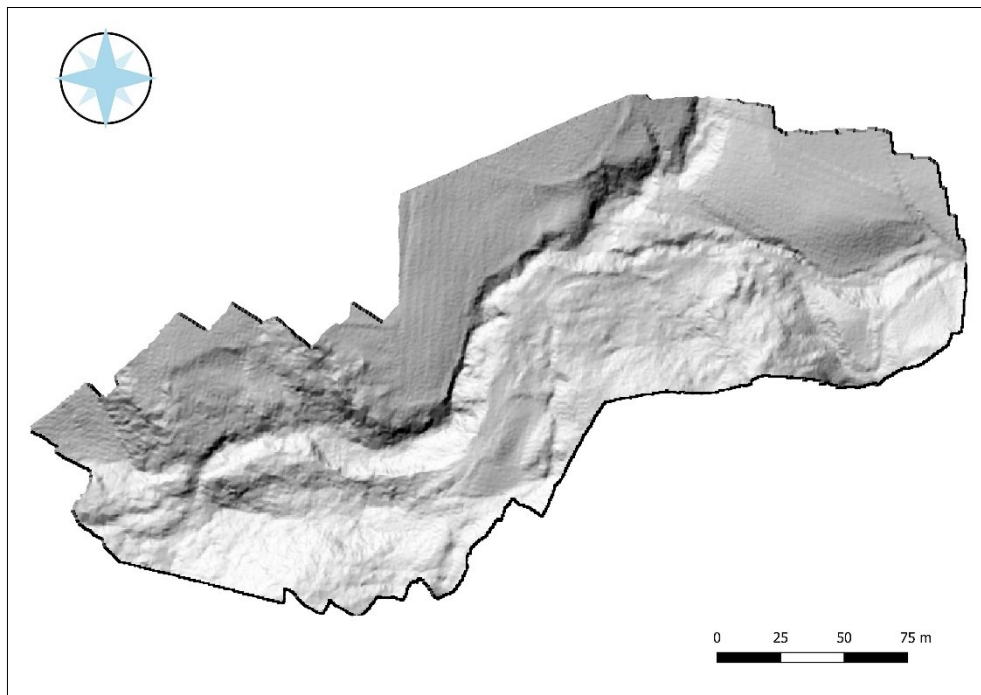


Figura 5.4: DTM del 2006 derivato da dati LiDAR.

Ad una prima osservazione si nota come il modello digitale del 2019 risulti affetto dalla persistenza in alcune porzioni di residui di vegetazione: in particolare si possono individuare alcune parti di filari di vite nella zona in destra idrografica del Cavalletto a nord est, alcuni residui di alberi da frutto nell'area di pianoro in sinistra idrografica, così come parti della vegetazione riparia lungo il corso d'acqua. Al contrario il DTM del 2006 si presenta con una maggiore pulizia, anche in quelle aree più complesse come le rive del corso d'acqua o le scarpate in frana. Queste differenze verranno discusse nel capitolo successivo.

La precisione del modello ottenuto dal rilievo del 2019 è risultata dalla differenza tra le coordinate dei target all'interno dell'area di indagine e le coordinate degli stessi individuate sul modello georiferito. Il valore dell'errore totale calcolato da Agisoft Photoscan è di 2.64 cm (tabella 5.0). Questo valore è legato al piano di riferimento utilizzato dal software in fase di elaborazione della nuvola di punti, ed è generalmente caratterizzato da una maggiore precisione rispetto al modello digitale del terreno (DTM) che viene esportato come prodotto. L'errore di quest'ultimo, infatti, è legato alla risoluzione, ovvero alla dimensione della cella del DTM di output. L'errore medio è stato quindi ricalcolato confrontando le quote dei target ottenute dal rilievo GPS e quelle degli stessi punti all'interno del DTM. Il risultato ottenuto (tabella 5.1) mostra come l'errore associato al DTM dell'area nel 2019 sia pari a 4 cm.

Nel caso del DTM ottenuto nel 2006 con dati da laser scanner aviotrasportato l'errore medio è risultato pari a 20 cm, come riportato nella relazione tecnica del Dott. Sonda (2006).

Tabella 5.0: errore di posizionamento dei target ed errore totale.

Etichetta	errore X (cm)	errore Y (cm)	errore Z (cm)	Totale (cm)	Immagine (pix)
target_1	-0.199372	-0.283453	0.988643	1.04762	0.763 (15)
target_2	-1.22755	0.52613	-0.884102	1.60166	0.742 (21)
target_3	2.3533	1.87327	-1.55743	3.38715	0.620 (21)
target_4	-0.616844	1.31666	2.90176	3.24566	0.698 (21)
target_5	-1.2588	1.08511	-1.92488	2.54307	0.822 (50)
target_6	-1.40757	-2.28892	0.740815	2.78733	0.656 (33)
target_7	-2.15463	-2.26122	-0.884101	3.2461	0.580 (28)
target_8	0.971393	0.623019	-0.651076	1.32501	0.685 (40)
target_9	1.17226	-0.996989	2.92212	3.30257	0.876 (15)
target_10	1.73123	0.288684	-0.0392266	1.75557	0.761 (12)
target_20	-0.727686	-0.215403	-1.97021	2.11131	0.375 (31)
target_21	-1.49917	-0.0667243	2.72945	3.11478	0.683 (30)
target_22	0.682718	1.0069	-0.564086	1.34095	0.501 (15)
target_30	2.70643	-0.195147	-3.49005	4.42078	0.806 (24)
target_31	-0.525703	-0.411917	1.68236	1.81007	2.111 (33)
Totale	1.45677	1.15087	1.88441	2.64532	0.904

Tabella 5.1: calcolo dell'errore associato al DTM 2019.

N. target	QUOTA DTM (m.s.l.m.)	QUOTA GPS (m.s.l.m.)	DIFFERENZA DI QUOTA (m)	ERR.VALORE ASSOLUTO (m)
1	373,19	373,12	0,068	0,068
2	368,74	368,73	0,012	0,012
3	366,86	366,89	-0,028	0,028
4	365,50	365,54	-0,038	0,038
5	359,64	359,66	-0,023	0,023
6	365,74	365,78	-0,035	0,035
7	361,58	361,58	0,006	0,006
8	358,35	358,31	0,041	0,041
9	357,80	357,79	0,005	0,005
10	351,37	351,36	0,014	0,014
20	333,92	333,97	-0,044	0,044
21	332,54	332,50	0,045	0,045
22	350,82	350,71	0,107	0,107
30	353,68	353,72	-0,037	0,037
31	356,39	356,29	0,091	0,091
SOMMA				0,596
ERR. TOTALE				0,040

5.2. Elaborazione del DEM of Difference (DoD)

L'analisi DoD multi-temporale ha messo a confronto i due modelli digitali della zona di studio della frana delle Lore, e con l'utilizzo dello strumento "calcolatore raster" di QGIS ha prodotto l'informazione di sintesi indicata in figura 5.5.

In rosso sono indicate tutte quelle superfici che sono state interessate da un abbassamento di quota rispetto al 2006, mentre in blu sono riportate quelle aree che presentano valori altitudinali più elevati rispetto al rilevamento precedente.

Ai fini dell'indagine della dinamica della frana rivestono particolare importanza le aree che presentano un abbassamento di quota, mentre quelle che indicano un incremento in altitudine possono essere dovute ad errori nell'elaborazione del modello digitale del terreno e al disturbo dovuto alla vegetazione.

L'entità dell'errore del DoD può essere valutata in relazione agli errori associati ai singoli modelli digitali che lo hanno generato, secondo l'equazione (4.0) descritta nel capitolo precedente:

$$\delta U_{DoD} = \sqrt{\delta z_1^2 + \delta z_2^2} \quad (4.0)$$

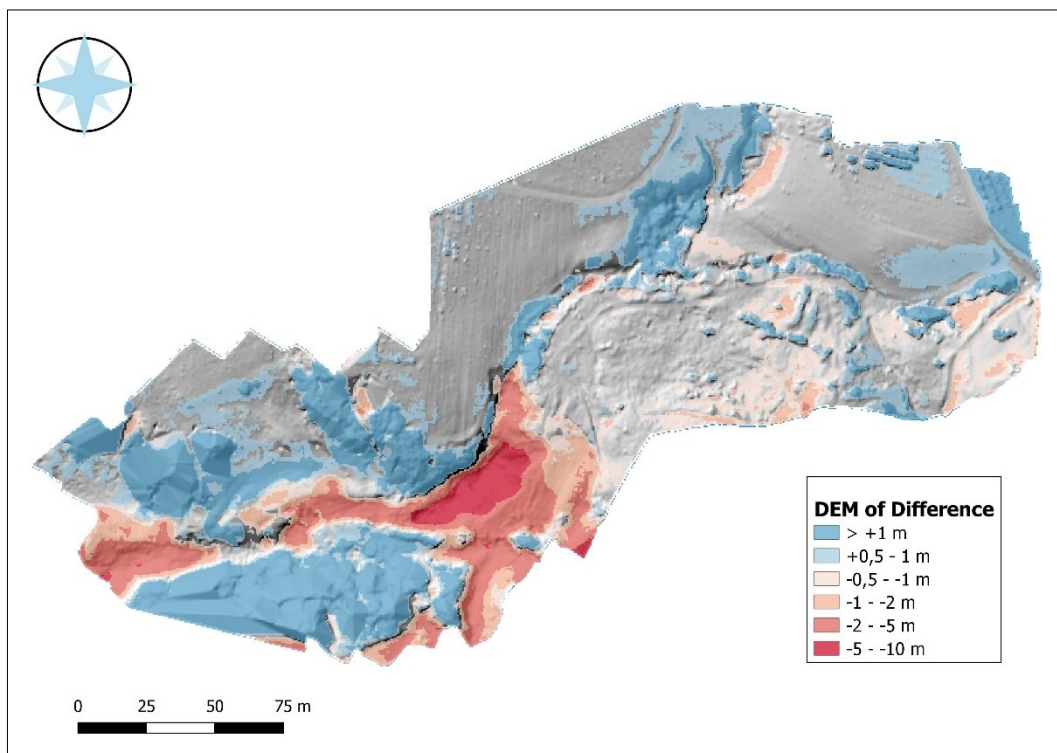


Figura 5.5: DoD dell'area di studio delle Lore.

Considerando un errore di 4 cm per il DTM del 2019 e di 20 cm per quello del 2006, l'errore totale del DoD diventa:

$$\delta U_{DoD} = \sqrt{0.04^2 + 0.20^2} \quad (5.0)$$

L'errore totale del *DEM of Difference*, ottenuto dall'equazione (5.0), è di 20.4 cm. Tuttavia, l'errore del DTM del 2019 non considera i possibili errori dovuti al filtraggio della vegetazione. Per questo motivo, è stato scelto di considerare come variazioni di quota effettive quelle superiori a 0.5 m, in quanto la soglia di 20.4 cm si è dimostrata estremamente sensibile e porterebbe a valutazioni errate nella stima delle aree soggette a spostamento e dei volumi di sedimento movimentati.

La figura 5.6 mette in evidenza come il processo erosivo del torrente Cavalletto, combinato con l'azione di scorrimento della frana, abbiano prodotto un abbassamento di quota in modo diffuso lungo tutto il percorso del corso d'acqua, ma in modo particolare nel tratto a valle della cascata in roccia dove il corso d'acqua compie un'ampia curva verso destra. In quest'area le differenze altimetriche tra i modelli del terreno confrontati raggiungono il valore massimo di 10 metri. Molte altre parti lungo l'alveo e le sponde del Cavalletto si sono abbassate di un intervallo di quota più ridotto, compreso tra 1 e 5 metri.

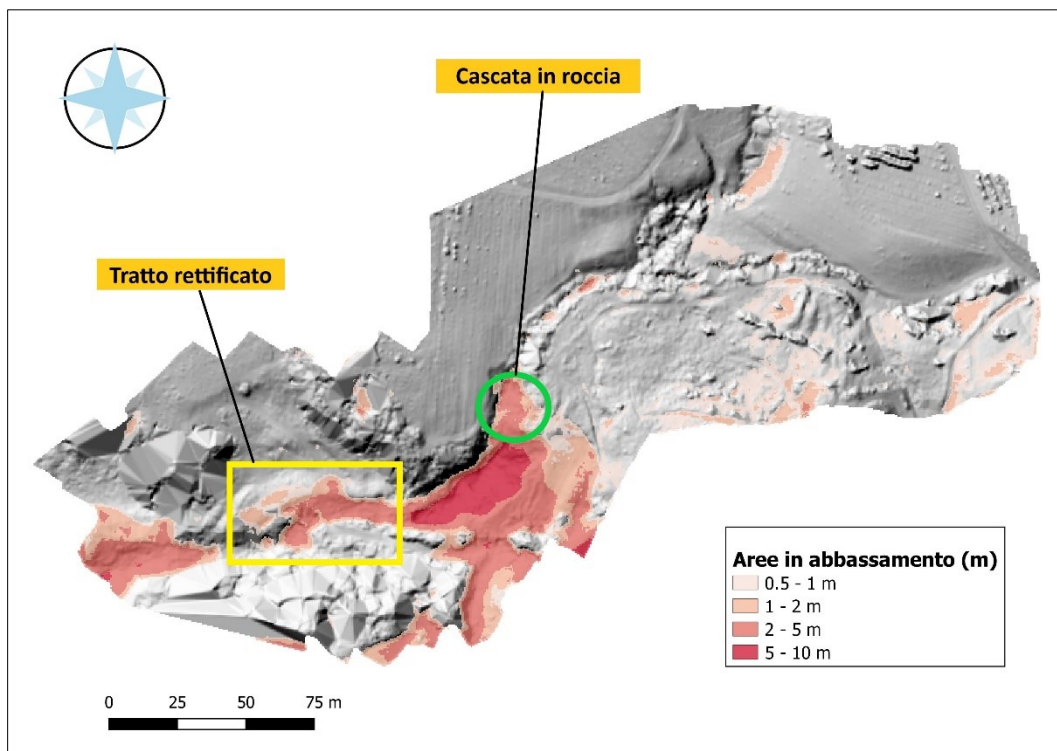


Figura 5.6: Superfici in erosione nell'area di studio.

Occorre escludere dall'analisi il tratto del torrente che è stato oggetto di rettifica negli interventi del 2007 da parte del Servizio Forestale (figura 5.6). Le aree evidenziate non hanno subito variazioni di quota a causa dell'erosione o del processo di scivolamento della frana, ma per gli interventi di sistemazione che hanno reso rettilineo il tratto del corso d'acqua. Pertanto non saranno di seguito considerate nel calcolo di volumi e superfici in dissesto.

Considerando l'estensione delle superfici appartenenti a ciascuna delle 4 classi di variazione altimetrica individuate in figura 5.6 è stato possibile stimare il volume mobilitato nella zona in dissesto (tabella 5.2). Una volta calcolate le superfici in erosione per ciascuna classe il volume è stato ottenuto come prodotto tra l'area e la variazione di quota media di classe.

Tabella 5.2: aree in erosione e volumi mobilitati nell'area di studio.

Classe	ΔQuota (m)	Area in frana (m²)	Volume mobilitato (m³)
1	0,5 - 1	2455	1841,4
2	1 - 2	1733	2600,1
3	2 - 5	2219	7766,2
4	5 - 10	587	4404,2
		6995	16611,9

All'interno della zona di studio, la superficie in erosione o in abbassamento è di 6995 m² e il volume associato è di circa 16 612 m³. Ne deriva che dei 3,9 ha interessati da rilievo fotogrammetrico il 17,9% è rappresentato da superfici che hanno subito abbassamenti di quota.

Osservando i dati in tabella 5.2 si nota come le classi di variazione di quota predominanti per quanto riguarda l'area sono quelle con intervallo 2,0 – 5,0 m e 0,5 – 1,0 m, che da sole rappresentano il 66,8% del totale. Il contributo maggiore in termini di volume è dato ancora una volta dalla classe 2 – 5 metri (46,7%), seguita dalla classe 5 – 10 metri (26,5%).

Se si considera l'area in frana come parametro di ponderazione e si assume come fattore moltiplicativo il valore medio dell'intervallo di classe di quota, la variazione media ponderata di quota della zona di studio è pari a 2,6 metri.

6. Discussione

6.1. Analisi del procedimento di elaborazione del DTM

La realizzazione di modelli digitali del terreno facendo ricorso a tecniche fotogrammetriche rappresenta una soluzione vantaggiosa per molti aspetti, come per esempio la rapidità e l'economicità del rilievo. Esistono tuttavia alcune criticità del metodo che non lo rendono adatto a tutte le situazioni.

Il rilievo dell'area di studio con drone o altro mezzo aereo UAV è relativamente rapido e può interessare anche superfici che non risulterebbero accessibili all'operatore con i consueti strumenti di rilievo (GPS, stazione totale). Oggi sono disponibili sul mercato numerosi modelli di mezzi aerei a pilotaggio remoto con ottime caratteristiche di volo e di resistenza al vento, in grado di permettere un utilizzo della fotogrammetria anche in condizioni difficili. Un punto critico del rilievo aereo con drone è rappresentato dalla ridotta durata delle batterie, che varia a seconda della strumentazione montata a bordo del mezzo e che determina comunque un limite importante nella capacità di rilevamento di un sito: la superficie mediamente rilevabile utilizzando i mezzi UAV si aggira solitamente in un intervallo di area di qualche ettaro (Nex e Remondino, 2014). Al di sopra di questa soglia il rilievo è possibile, eseguendo più voli, ma richiede uno sforzo di misurazione maggiore, aspetto che rende preferibili altre modalità di indagine (LiDAR, rilievo satellitare).

L'elaborazione delle immagini aeree trova in Agisoft Photoscan uno strumento valido e di semplice comprensione anche per i neofiti, almeno per quel che riguarda le funzionalità di base per produrre la nuvola densa di punti.

Il rilievo dell'area di frana delle Lore è stato effettuato alla fine di novembre 2019 per ridurre al minimo il disturbo di stima della quota dovuto alla presenza di vegetazione arborea e arbustiva. Diversamente dalla tecnologia LiDAR, nella quale il segnale è in grado di penetrare gli strati di vegetazione e di raggiungere il livello del suolo (Doyle e Woodroffe, 2018; Wang e Kumar, 2019), il rilievo fotogrammetrico incontra un ostacolo nel piano delle chiome e non riesce a fornire informazioni riguardanti le quote del terreno al di sotto dello strato arboreo. È quindi frequente che la qualità dei modelli digitali derivati da rilievo fotogrammetrico rispetto a quelli prodotti a partire da dati da laser scanner sia influenzata in modo più sensibile dalla presenza di vegetazione.

L'area di studio era, nonostante la scelta del periodo, fortemente interessata dalla presenza di vegetazione densa, in modo particolare lungo le sponde del torrente Cavalletto e nella zona in sinistra idrografica a sud della cascata in roccia (figura 6.0).

Nel complesso la componente arborea si concentra in sinistra del corso d'acqua proprio a causa della presenza della frana, che con l'instabilità dei terreni rende quella zona inadatta a coltivazioni di valore. Al contrario i vigneti sono posti in destra idrografica, su quelle superfici che sono risultate più stabili.

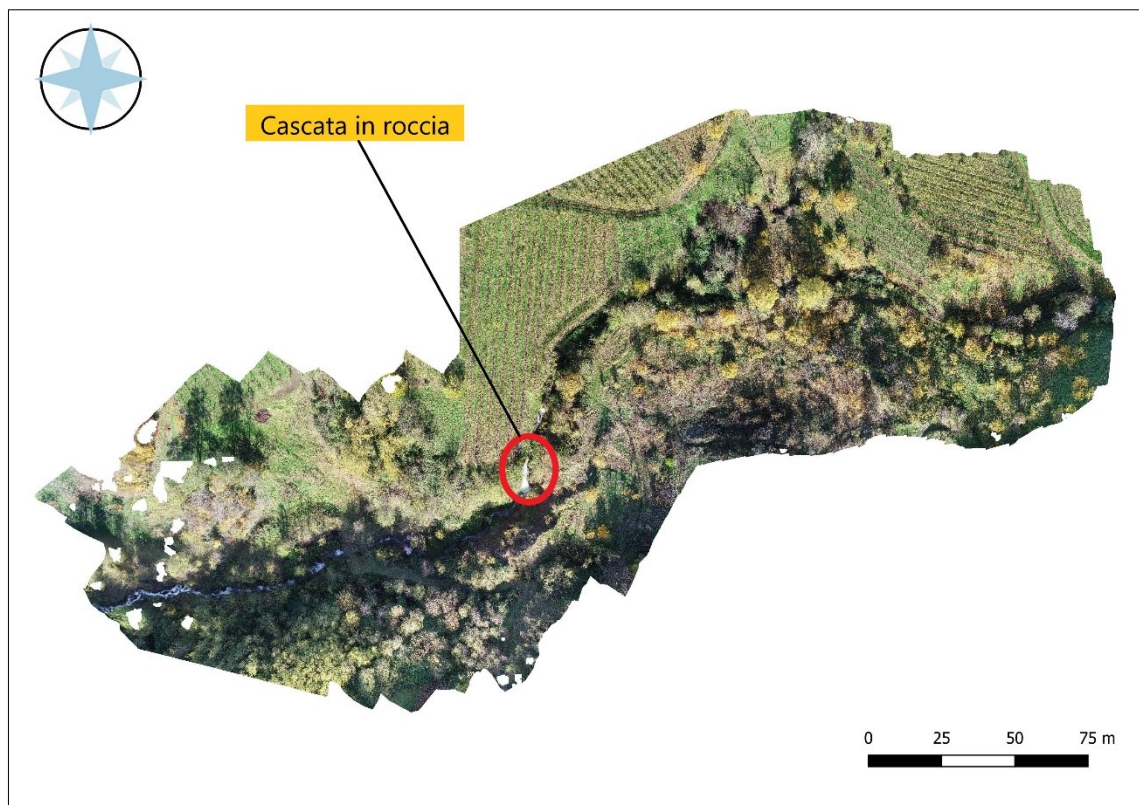


Figura 6.0: ortofoto dell'area di studio nella condizione attuale.

La pulizia della nuvola di punti dalla vegetazione delle zone con presenza di alberi e arbusti, è stata realizzata utilizzando il software CloudCompare. Questa operazione si è dimostrata nel complesso buona, in quanto ha permesso la classificazione e l'eliminazione della maggior parte dei punti costituiti da vegetazione, nonostante la permanenza di alcuni residui visibili nella zona a vigneto e in quella a frutteto (figura 6.1). Si sottolinea, tuttavia, che la profondità della pulizia messa in atto con il *plugin* CSF - *Cloth Simulation Filter* ha generato localmente nella nuvola di punti delle aperture molto estese. Tali zone, richiuse per interpolazione delle quote dei punti

vicini classificati come suolo, rappresentano delle semplificazioni della realtà che possono comportare un aumento dell'errore del DTM in queste zone (figura 6.1).

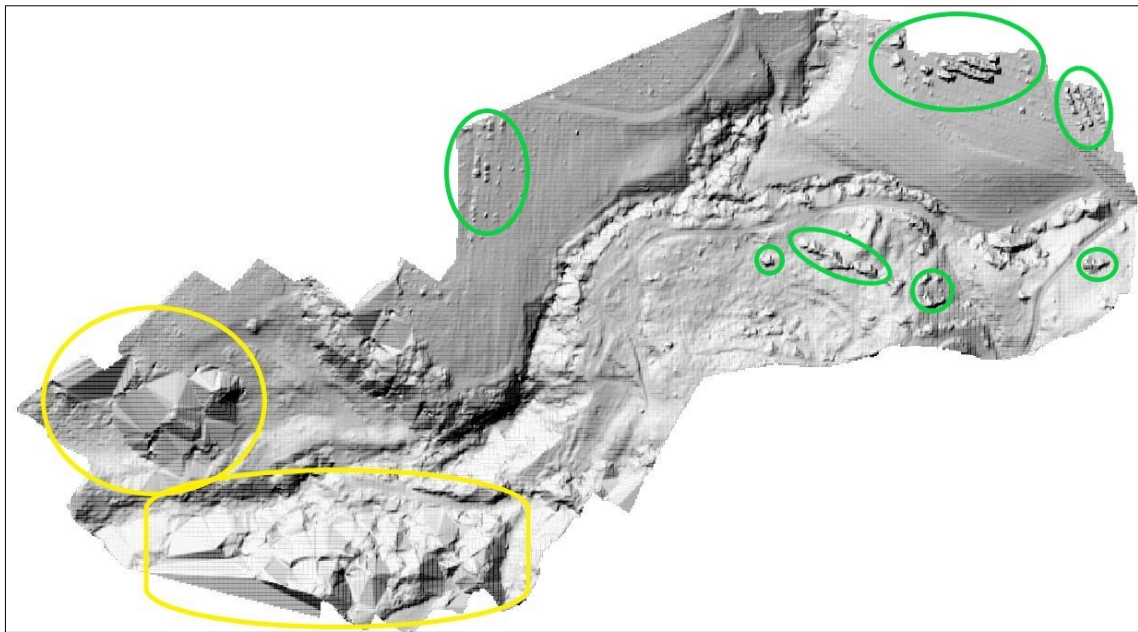


Figura 6.1: In verde sono individuate le aree in cui la vegetazione residua permane; in giallo sono indicate le aperture nella nuvola di punti ricostruite per interpolazione delle quote dei punti vicini.

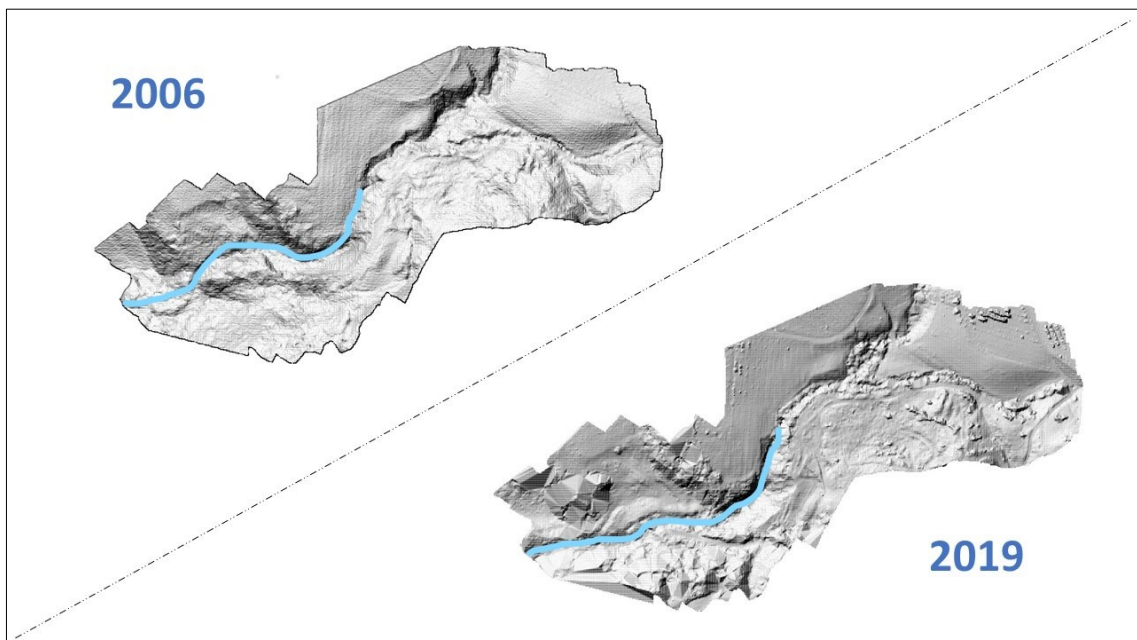


Figura 6.2: Confronto tra DTM. In azzurro è evidenziata la modificazione del tracciato del Torrente Cavalletto nella parte bassa dell'area di studio.

Osservando il confronto tra i due modelli digitali dell'area di studio (figura 6.2) si può vedere come la diversa qualità del dato iniziale determini una sostanziale differenza anche per il risultato finale: i dati LiDAR, con una maggior numerosità di punti a livello del suolo nelle zone

più densamente occupate da vegetazione, hanno permesso di effettuare una pulizia più mirata e una ricostruzione più realistica della superficie del terreno.

Anche se la numerosità di punti della nuvola è comparabile, il rilievo LiDAR è sicuramente la soluzione migliore in situazioni di questo tipo, in quanto permette di affrontare il problema della componente arborea ottenendo esiti migliori rispetto ad un approccio di tipo fotogrammetrico

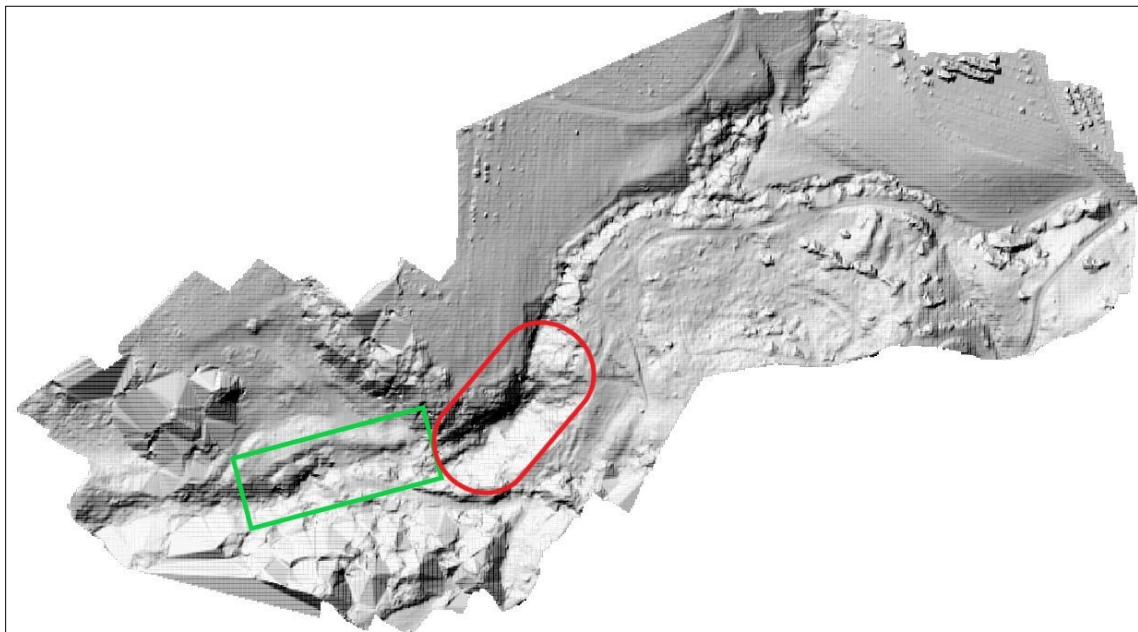


Figura 6.3: in verde il tratto inferiore del torrente rettificato nel 2007; in rosso la zona in erosione spondale ai piedi della cascata.

In figura 6.2 si possono valutare in modo preliminare le modificazioni subite dalla zona di frana, specialmente in riferimento al tratto del torrente Cavalletto al di sotto della cascata in roccia, dove il tracciato ha subito una alterazione ben visibile. Occorre tenere in considerazione l'azione di rettifica del tracciato fluviale messa in atto con gli interventi di sistemazione del Servizio Forestale Regionale nel corso degli anni, aspetto che sicuramente ha determinato la riduzione della sinuosità del tratto rispetto alla condizione del 2006 (figura 6.3) e l'abbassamento del potere erosivo del torrente Cavalletto nella sezione inferiore dell'area di studio. Tuttavia il problema dell'erosione spondale permane nella parte superiore del corso d'acqua (non interessata direttamente dai lavori di sistemazione), ai piedi della cascata, dove una curva verso destra espone la sponda sinistra del torrente all'asportazione di materiale e al cedimento della scarpata. Ne consegue l'arretramento del processo erosivo e il continuo scivolamento di materiale in alveo. Il meccanismo descritto è alla base della naturale tendenza del torrente Cavalletto ad assumere un andamento più sinuoso in questo breve tratto: la formazione di

occlusioni parziali in alveo causa la deviazione del flusso di corrente verso la sponda destra, innescando nel lungo periodo processi erosivi anche su quel lato. È ipotizzabile che alla base dei fenomeni di aggiramento e danneggiamento delle opere di sistemazione realizzate nella valle del Cavalletto nel corso degli anni vi sia anche questa ragione, anche se le cause sono certamente più complesse e numerose. Sarebbe dunque da valutare l'ipotesi di proteggere la zona in erosione della curva con opere di difesa spondale che impediscano la formazione di depositi in alveo, considerando al contempo come possibile conseguenza una maggior incisione del letto del torrente da parte del flusso.

6.2. Analisi del DoD 2006 – 2019

L'obiettivo finale di questo lavoro è la valutazione dell'evoluzione dell'area di studio rilevata facendo riferimento alla rappresentazione che deriva dal *DEM of Difference*. Questo prodotto, pur essendo semplice, fornisce un'elevata quantità di informazioni utili. In primo luogo rivela quali sono le zone che di fronte ai processi di erosione fluviale e di scivolamento della frana hanno subito le variazioni maggiori. Inoltre permette una quantificazione dei volumi movimentati nella zona.

Come si poteva ipotizzare, la regione che, all'interno dell'area di indagine, si è dimostrata come la più interessata dall'abbassamento di quota è quella della sponda sinistra ai piedi della cascata, dove a causa dell'ansa verso destra del torrente Cavalletto l'estradosso della curva è esposto ad erosione. Si tratta di una zona che è sempre stata soggetta a franamenti ed instabilità, come testimoniano anche le fotografie storiche degli anni '50 riportate nei capitoli introduttivi.

Tuttavia è necessario osservare che, oltre all'indubbia influenza dell'azione erosiva del torrente, l'area in oggetto si trova al centro del nucleo di frana più mobile, come è risultato anche dai monitoraggi dei capisaldi condotti negli anni dal Servizio Forestale Regionale di Verona (vedi Cap. 2.4). In prossimità della riva del torrente sono posizionati i cippi 15 e 10, che in occasione dell'ultimo monitoraggio dell'ottobre 2017 mostravano spostamenti complessivi di 6,43 m e 4,56 m rispettivamente. Questo dato testimonia come la regione che ha subito variazioni di quota elevate (2 – 10 m) si estenda oltre il limite meridionale dell'area di studio, in accordo con quanto lascia prevedere la figura 6.4, e che l'abbassamento di quota rilevato con l'ultima indagine sia dovuto anche al processo di scivolamento che interessa una zona più ampia. Il cippo 3, posizionato nella porzione nord-orientale dell'area di indagine, nel monitoraggio del 2017 mostrava una variazione di quota di 8 cm, valore che risulta comparabile con i risultati attuali in

quanto è posto in una zona non classificata perché caratterizzata da variazioni di quota minori di mezzo metro. Non possono invece essere utilizzate le informazioni relative agli altri cippi presenti, perché troppo distanziati dall'area di indagine.

Il DoD mette in evidenza una variazione considerevole (2 – 5 m) anche nella parte sud-occidentale dell'area di studio, nel tratto terminale della valle del Cavalletto. In questo tratto l'andamento rettilineo del torrente non presenta aspetti morfologici particolarmente rilevanti che possano produrre erosione spondale. Osservando la zona (figura 6.4) si può vedere come la variazione di quota interessi entrambi i lati del letto fluviale: è ipotizzabile che sia in atto un processo di incisione dell'alveo in quel tratto, in associazione con il movimento di scorrimento della frana. Si può invece considerare sostanzialmente stabile la regione in destra idrografica del torrente, a testimonianza del fatto che il dissesto è limitato al versante opposto e che da un punto di vista geologico non si sono sviluppati nuovi piani di scorrimento più profondi.

In generale il processo erosivo interessa soprattutto la zona sud-occidentale dell'area di studio, mentre le superfici rialzate a est, occupate dal frutteto e dagli impianti di vite, hanno subito variazioni di quota contenute nell'intervallo 0,5 – 1 metro, in accordo con i dati precedentemente discussi, ottenuti dal monitoraggio dei cippi.

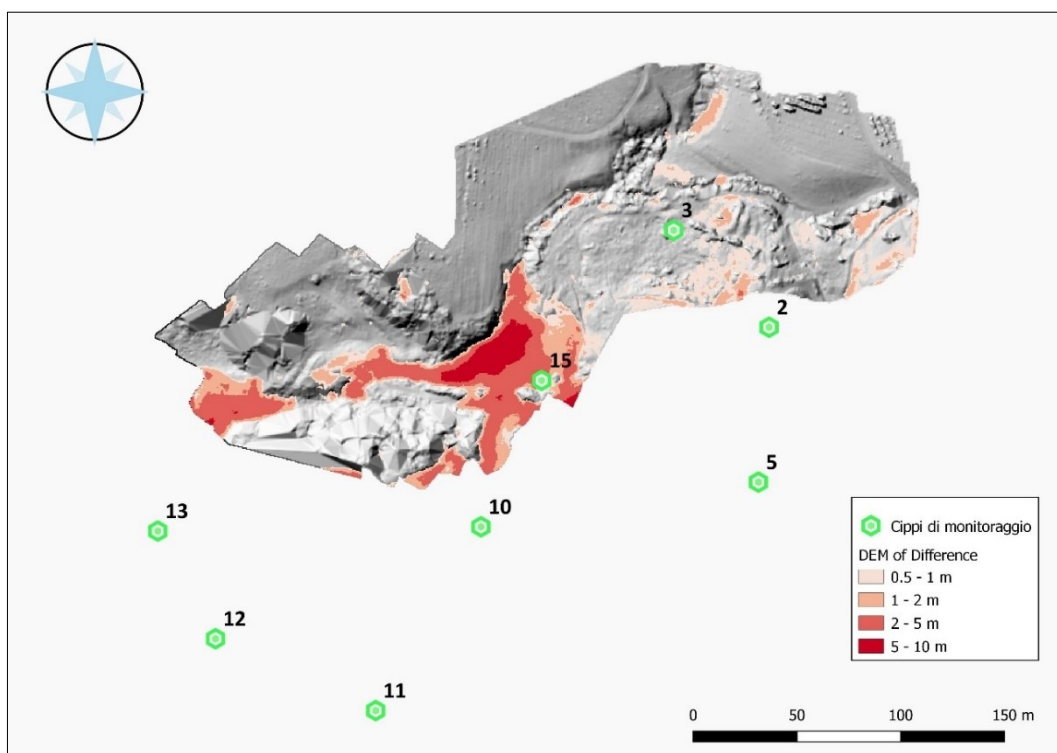


Figura 6.4: DoD dell'area di studio e posizioni dei cippi di monitoraggio più prossimi ad essa.

I volumi e le aree con variazione di quota negativa per erosione e scivolamento del piano basale della frana sono importanti se si considera la ridotta estensione dell'area di indagine. Si tratta di circa 16 600 m³ di materiale distribuito su una superficie di quasi 7000 m², con una variazione di quota media di 2,6 m. Le zone caratterizzate da una variazione di quota molto consistente (5 – 10 m) costituiscono fortunatamente una parte minoritaria in termini di superficie in erosione, anche se il loro contributo in termini di volume è considerevole. All'interno dell'area di studio prevalgono invece le zone con variazioni di quota basse (0,5 – 1 m) o consistenti (2 – 5 m), le prime nella porzione nord-orientale coltivata, le seconde a sud e sud-ovest, nella zona storicamente più critica.

Con la tecnica del *DEM of Difference* è possibile considerare solamente una variazione in senso altitudinale e non si possono ricavare dati sullo spostamento del corpo di frana in senso trasversale. Per questo i valori di volume ed area delle superfici in abbassamento sono indicativi e come tali devono essere considerati, considerato anche il livello di errore associato al modello digitale delle differenze.

Il DoD dell'area di studio ha prodotto delle superfici con variazione positiva di quota, indicate in blu in figura 6.5: confrontando tali superfici con l'ortofoto della zona di indagine si può notare come esse siano costituite da porzioni più o meno densamente vegetate. Per la maggior parte si tratta di vegetazione riparia, ma sono presenti anche elementi del vigneto e del frutteto. Oltre all'effetto dovuto alla componente vegetale, la difficoltà di classificazione dei punti della nuvola da parte del *plugin* CSF di CloudCompare può essere stata determinata dalla complessità topografica di alcune particolari zone, come quelle ai lati del torrente nella parte occidentale dell'area di studio (figura 6.5). In queste aree la pendenza del terreno è elevata, ed è associata a formazioni arboree dense. Ne è scaturita una maggior incertezza in fase di costruzione del DTM, come descritto in precedenza, ed un livello di errore maggiore per il DoD da esso derivato.

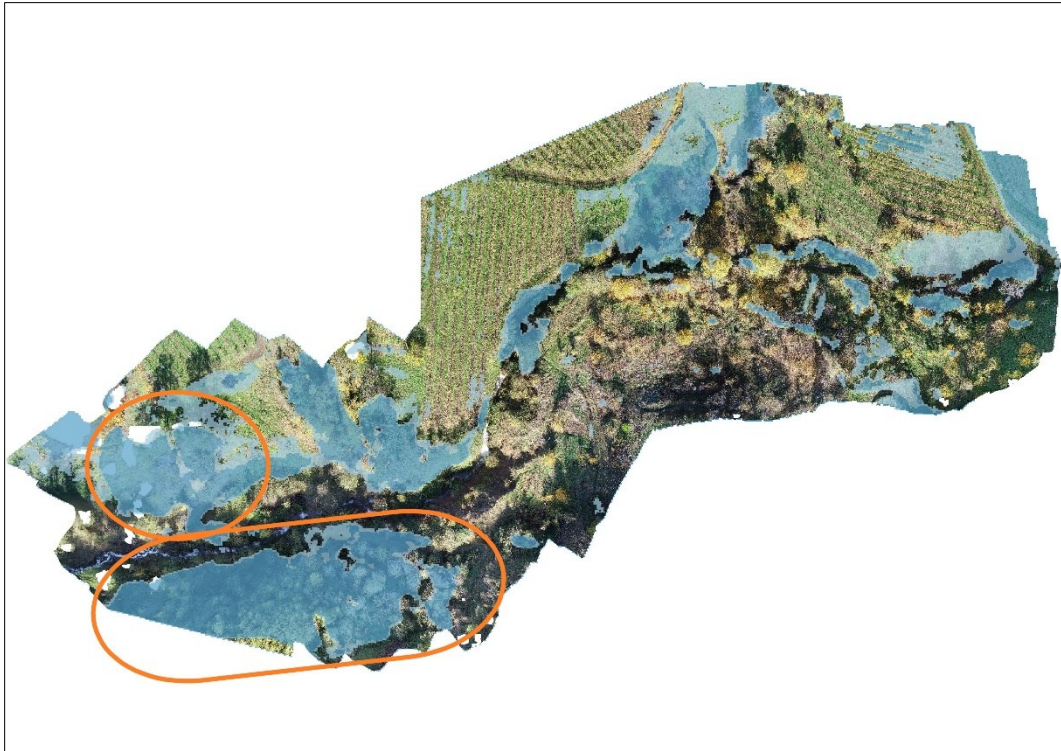


Figura 6.5: Superfici interessate da errore del DoD legato alla presenza di vegetazione. Sono evidenziate le due aree con livelli di errore più elevato.

7. Conclusioni

L'area della frana delle Lore, a San Giovanni Ilarione (VR), rappresenta nella provincia di Verona uno degli esempi più complessi di fenomeni di dissesto di versante. Date le superfici e i volumi in movimento (10 ha; 1 000 000 m³), oltre che la profondità del piano di scorrimento (35 ÷ 40 m), è possibile intervenire soltanto con interventi periodici di sistemazione dei drenaggi superficiali e profondi e con il consolidamento dell'alveo del torrente Cavalletto che scorre al piede del versante in frana. Altro aspetto fondamentale in queste condizioni è il monitoraggio frequente della zona, ricorrendo a mezzi e strumenti che possono essere molteplici (capisaldi fissi con rilievo GPS, rilievo fotogrammetrico con mezzi UAV, rilievo LiDAR, rilievo satellitare).

Con questo lavoro di tesi la zona della valle del Cavalletto è stata sottoposta a rilievo aerofotogrammetrico con UAV per ottenere un modello digitale aggiornato. Lo scopo finale è costituito dalla valutazione dell'evoluzione della porzione di frana a contatto con il torrente nel periodo 2006 – 2019 utilizzando la tecnica del *DEM of Difference* (DoD), che mette a confronto due modelli digitali del terreno riferiti a momenti differenti. Il DTM dell'area di studio nelle condizioni attuali è stato costruito ricorrendo al metodo *Structure from Motion* (SfM) utilizzando software di computer vision (Agisoft Photoscan) e di trattamento delle nuvole di punti (CloudCompare). Il calcolo del DoD è stato invece condotto ricorrendo al software QGIS.

Le analisi del DoD mostrano come critico il tratto di torrente ai piedi della cascata in roccia, dove le variazioni di quota misurate hanno raggiunto il livello massimo di 10 metri. In questo tratto è ipotizzabile la realizzazione di opere di difesa spondale contro l'erosione, come arce o palificate in legname e pietrame. In questo modo il processo di scivolamento di materiale dalla scarpata fluviale sarebbe interrotto e potrebbe essere fornita complessivamente una maggiore stabilità al tratto, pur nella consapevolezza che la componente di movimento legata allo scorrimento della frana nella zona retrostante la riva fluviale continuerà e potrà causare danni alle sistemazioni.

I risultati ottenuti da questo studio sono stati soddisfacenti e in generale hanno confermato la tendenza evidenziata dalle precedenti campagne di monitoraggio effettuate nella zona della frana, sia per quanto riguarda i valori di variazione altitudinale ottenuti, sia in riferimento alle aree più instabili. Si tratta però di informazioni che, a causa del livello di errore associato al DoD,

possono essere utilizzate come elementi informativi della tendenza evolutiva dell'area di studio, ma vanno utilizzati con cautela nella definizione dei volumi.

In fase conoscitiva e di progettazione la tecnica del *DEM of Difference* restituisce in modo immediato un'idea quali-quantitativa dei processi in atto, e dunque si pone come valido strumento per definire il grado di sostenibilità degli interventi di sistemazione, anche da un punto di vista economico. In aree critiche, dove le caratteristiche dei fenomeni sono tali da comportare frequenti danneggiamenti alle opere di sistemazione, il DoD è uno strumento utile per capire meglio l'entità delle forze in campo e per definire risposte commisurate.

Il metodo di rilievo adottato in questa occasione, ovvero il rilievo fotogrammetrico con drone e ricostruzione del modello digitale del terreno con la tecnica *Structure from Motion* (SfM), ha permesso di soddisfare gli obiettivi che erano stati posti, con la generazione del DTM della condizione attuale e il calcolo del *DEM of Difference* (DoD) dell'area di studio scelta. Alcune problematiche sono sorte a causa della presenza di formazioni arboree dense in alcune parti del sito di indagine che hanno impedito una ricostruzione perfettamente realistica del modello del terreno, ma in generale si tratta di una modalità di rilievo che si può utilizzare con buoni risultati in contesti simili a quello studiato in questo lavoro di tesi.

Ringraziamenti

Al termine di questo percorso di studio voglio ringraziare prima di tutto la mia famiglia e tutte le persone che mi sono state al fianco durante questo periodo di impegno e lavoro, ma anche di soddisfazioni.

Un doveroso ringraziamento al Dott. Francesco Bettella, al Prof. Vincenzo D'Agostino e alla Dott.ssa Roberta Pastorello che mi hanno dato la possibilità di sviluppare questo tema e mi hanno seguito con disponibilità e pazienza. Ringrazio inoltre il Dott. Alessandro De Giuli e tutti i tecnici dell'ufficio del Servizio Forestale Regionale di Verona che mi hanno introdotto alla conoscenza della frana delle Lore e mi hanno aiutato con il reperimento di dati e informazioni storiche del fenomeno.

È stato un percorso molto stimolante e ricco di sfide, che mi ha arricchito di nuove conoscenze tecniche.

Un grazie a tutti.

Bibliografia

- AKTURK E., ALTUNEL A.O., 2019 – Accuracy assessment of a low-cost UAV derived digital elevation model (DEM) in a highly broken and vegetated terrain. *Measurement* (136) 382-386.
- AMANTI M., CASAGLI N., CATANI F., D'OREFICE M., MOTTERAN G., 1996 - Guida al censimento dei fenomeni franosi e alla loro archiviazione, In *Miscellanea del Servizio Geologico Nazionale*, n° 7, pp. 109, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.
- APAT. Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici, 2006 - Fenomeni di dissesto geologico – idraulico sui versanti. Classificazione e simbologia. APAT - Servizio Stampa ed Editoria. Ufficio Pubblicazioni. Roma.
- APAT. Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici, 2002 - Atlante delle opere di sistemazione dei versanti. APAT - Servizio Stampa ed Editoria. Ufficio Pubblicazioni. Roma.
- ARCHIVI DEI SERVIZI FORESTALI REGIONALI DEL VENETO – Direzione Operativa Unità Organizzativa Forestale Ovest – Sede di Verona.
- BEARZOT F., 2016 – Analisi dei processi periglaciali tramite l'utilizzo della fotogrammetria terrestre: il caso di Cima Uomo (Dolomiti). Tesi di Laurea. Relatore Carton A., Correlatore Zanoner T., Dipartimento di Geoscienze. Scuola di Scienze. Università degli Studi di Padova.
- BENINI G., 1990 – Sistemazioni idraulico-forestali. UTET. Torino.
- BERTHIER E., VINCENT C., MAGNUSSON E., GUNNLAUGSSON A., PITTE P., LE MEUR E., MASIOKAS M., RUIZ L., PALSSON F., BELART J.M.C., WAGNON P., 2014 – Glacier topography and elevation changes derived from Pléiades sub-meter stereo images. *The Cryosphere*. 2257-2291.
- BIALLO G., 2005 – Introduzione ai Sistemi Informativi Geografici. MondoGIS Editore. Roma.
- BOLT B.A., HORN W.L., MACDONALD G.A., SCOTT R.F., 1975 - *Geological Hazards*. Springer-Verlag. Berlino.
- BUZZI E., 2012 – Indagine sulle variazioni luvio-morfologiche di breve termine del fiume Tagliamento mediante l'impiego di TLS. Tesi di Laurea. Relatore Lenzi M.A., Correlatore Picco L., Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Scuola di Agraria e Medicina Veterinaria, Università degli Studi di Padova.

- CANNAROZZO R., CUCCHIARINI L., MESCHIERI W., 2012 – Misure, rilievo, progetto. IV ed., Zanichelli editore. Bologna.
- CAPRA A., COSTANTINO D., 2007 – Geomatica per Corsi di Laurea e di Laurea Specialistica. Mandese Editore, Taranto.
- CARLÀ T., TOFANI V., LOMBARDI L., RASPINI F., BIANCHINI S., BERTOLO D., THUEGAZ P., CASAGLI N., 2019 – Combination of GNSS, satellite InSAR, and GBInSAR remote sensing monitoring to improve the understanding of a large landslide in high alpine environment. *Geomorphology* (335) 62-75.
- CAVALLI M., 2009 – Caratterizzazione idrologica e morfologica dei bacini montani mediante scansione laser da aeromobile. Tesi di Dottorato. Supervisore Dalla Fontana G., Co-supervisore Marchi L., Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali. Scuola di Dottorato di ricerca in Territorio, Ambiente, Risorse e Salute. Università degli Studi di Padova.
- CIRGEO – Centro Interdipartimentale di Ricerca in Cartografia, Fotogrammetria, Telerilevamento e SIT. 2016 - Materiale didattico del corso di Topografia. Anno accademico 2015-2016. Corso di Laurea in Riassetto del Territorio e Tutela del Paesaggio. Scuola di Agraria e Medicina Veterinaria. Università degli Studi di Padova.
- COMERT R., AVDAN U., GORUM T., NEFESLIOGLU H. A., 2019 – Mapping of shallow landslides with object-based image analysis from unmanned aerial vehicle data. *Engineering Geology* (260).
- CRUDEN D.M., VARNES D.J., 1996 – Landslides types and Processes. In *Landslides: investigation and mitigation*, ed. Turner & Schuster. Transportation Research Board, National Academy of Sciences. Washington.
- D'AGOSTINO V., PASTORELLO R., BETTELLA F., 2018 – Analisi storica degli eventi di piena, analisi idrologica e reologica dei fenomeni di trasporto solido e di massa nel torrente Bigontina a monte dell'abitato di Alverà, in Comune di Cortina d'Ampezzo per l'individuazione delle opere idrauliche per la messa in sicurezza d'infrastrutture viarie ed abitati. Consulenza tecnico-scientifica. Regione del Veneto. Direzione operativa Unità Organizzativa Forestale Est – Sede di Belluno.
- DALLA FONTANA G., 2013 – Materiale didattico del corso di Idrologia e Sistemazioni Idraulico-Forestali. Anno accademico 2013-2014. Corso di Laurea in Tecnologie Forestali e Ambientali. Scuola di Agraria e Medicina Veterinaria. Università degli Studi di Padova.

- DE GIULI A., GASPARI D., SCALZOTTO M., Studio geotecnico sul movimento franoso “Lore”. Dati non pubblicati. Regione del Veneto. Direzione Operativa Unità Organizzativa Forestale Ovest – Sede di Verona.
- DE GIULI A., VESENTINI F., GUERRA F., 2009 – Nel segno della leggerezza. ACER (2) 2009 45-49.
- DOYLE T.B., WOODROFFE C.D., 2018 – The application of LiDAR to investigate foredune morphology and vegetation. *Geomorphology* (303) 106-121.
- FACCIORUSSO J., 2011 – Materiale didattico del corso di Geotecnica. Anno accademico 2010-2011. Corso di Laurea in Ingegneria Edile. Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale. Università degli Studi di Firenze.
- FANTI R., 2015 – I fenomeni franosi: descrizione e monitoraggio. In Atti del corso “Previsione e prevenzione del rischio idrogeologico”. Ordine Geologi Regione Marche – Fondazione Ingegneri della Provincia di Ascoli Piceno. Appignano del Tronto. 15 Aprile 2015.
- FELL R., 1994 - Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotechnical Journal*. 31(2): 261-272.
- FERRO V., 2006 – La sistemazione dei bacini idrografici. II ed. McGraw-Hill. Milano.
- FERRUCCI N. (a cura di), 2015 - Diritto forestale e ambientale. Profili di diritto nazionale ed europeo. Giappichelli Editore. Torino.
- FEY C., KRAINER K., 2020 – Analyses of UAV and GNSS based flow velocity variations of rock glacier Lazaun (Ötztal Alps, South Tyrol, Italy). *Geomorphology* (365).
- GALETTO R., SPALLA A., 1998 – Capitolo VIII: Fotogrammetria. In *Lezioni di Topografia*, 220-288. Cooperativa Universitaria Studio e Lavoro (CUSL), Pavia.
- GASPARI D., 2002 – Studio geologico della frana Lore nel territorio comunale di S. Giovanni Ilarione. Regione del Veneto. Direzione Operativa Unità Organizzativa Forestale Ovest – Sede di Verona.
- GATTER R., CAVALLI M., CREMA S., BOSSI G., 2018 – Modelling the dynamics of a large rock landslide in the Dolomites (eastern Italian Alps) using multi-temporal DEMs. *PeerJ*.
- GROTZINGER J.P., JORDAN T.H., 2016 – Capire la terra. III ed. Zanichelli Editore. Bologna.
- GUERRA F., 2008 – Lavori di sistemazione e manutenzione del fenomeno franoso “Lore”. Tesi di Laurea. Relatore D’Agostino V., Correlatore De Giuli A., Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Scuola di Agraria e Medicina Veterinaria, Università degli Studi di Padova, Legnaro.

- HUGENHOLTZ C. H., WHITEHEAD K., BROWN O. W., BARCHYN T. E., MOORMAN B. J., LECLAIR A., RIDDELL K., HAMILTON T., 2013 – Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. *Geomorphology* (194) 16-24.
- HUNGR O., LEROUEIL S., PICARELLI L., 2014 – The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* (11) 167-194.
- JAVERNICK L., BRASINGTON J., CARUSO B., 2014 – Modelling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology* (213) 166-182.
- KASAI M., IKEDA M., ASAHINA T., FUJISAWA K., 2009 – LiDAR-derived DEM evaluation of deep-seated landslides in a steep and rocky region of Japan. *Geomorphology* (113) 57-69.
- LEONI A., 2009 – Il contributo radicale alla stabilità dei pendii: stato delle ricerche. Tesi di Laurea. Relatore D'Agostino V., Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Scuola di Agraria e Medicina Veterinaria, Università degli Studi di Padova, Legnaro.
- MANZINO A., 2000 – Lezioni di topografia Parte IV: Cenni di fotogrammetria; Il sistema GPS. Otto Editore, Torino.
- MARTÍNEZ-CARRICONDO P., AGÜERA-VEGA F., CARVAJAL-RAMÍREZ F., MESAS-CARRASCOSA F. J., GARCÍA-FERRER A., PÉREZ-PORRAS F. J., 2018 – Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*. (72) 1-10.
- NEX F., REMONDINO F., 2014 – UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics* (6) 1-15.
- NICULIȚĂ M., MĂRGĂRINT M. C., TAROLLI P., 2020 – Using UAV and LiDAR data for gully geomorphic changes monitoring. *Developments in Earth Surface Processes* (23) 271-315.
- NIETHAMMER U., JAMES M.R., ROTHMUND S., TRAVELLETTI J., JOSWIG M., 2012 – UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. *Engineering Geology* (128) 2-11.
- PANIZZA M., 2014 – Geomorfologia. IV ed., Pitagora Editrice. Bologna.
- PARISI D., 2016 - Studio del fenomeno franoso che insiste sul versante a monte dell'abitato di Siror: verifiche di stabilità ed elaborazione dei dati di monitoraggio. Tesi di Laurea. Relatore D'Agostino V., Correlatore Bossi G., Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Scuola di Agraria e Medicina Veterinaria, Università degli Studi di Padova, Legnaro.

- PICCO L., MAO L., CAVALLI M., BUZZI E., RAINATO R., LENZI M.A., 2013 – Evaluating short-term morphological changes in a gravel-bed braided river using terrestrial laser scanner. *Geomorphology* (201) 323-334.
- ROCCO A., 2017 – UAV e variazioni morfologiche: migliorare il protocollo per ottimizzare i risultati. Tesi di Laurea. Relatore Picco L., Correlatore Rainato R., Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Scuola di Agraria e Medicina Veterinaria, Università degli Studi di Padova, Legnaro.
- SANHUEZA D., PICCO L., RUIZ-VILLANUEVA V., IROUMÉ A., ULLOA H., BARRIENTOS G., 2019 – Quantification of fluvial wood using UAVs and structure from motion. *Geomorphology* (345).
- SCHLÖGEL R., DOUBRE C., MALET J., MASSON F., 2015 – Landslide deformation monitoring with ALOS/PALSAR imagery: A D-InSAR geomorphological interpretation method. *Geomorphology* (231) 314-330.
- SHI W., DENG S., XU W., 2018 – Extraction of multi-scale landslide morphological features based on local G_i^* using airborne LiDAR-derived DEM. *Geomorphology* (303) 229-242.
- SIEBERT S., TEIZER J., 2014 – Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. *Automation in Construction*. (41) 1-14.
- SIMEONI L., RONCHETTI F., COSTA C., JORIS P., CORSINI A., 2020 – Redundancy and coherence of multi-method displacement monitoring data as key issues for the analysis of extremely slow landslides (Isarco valley, Eastern Alps, Italy). *Engineering Geology* (267).
- SONDA D., 2006 – Relazione tecnica: rilievo topografico della frana delle Lore. Regione del Veneto. Direzione Operativa Unità Organizzativa Forestale Ovest – Sede di Verona.
- TOSONI M., 2017 – Impiego di droni per il monitoraggio e il mantenimento dei terrazzamenti agricoli in Valle Camonica. Tesi di Laurea. Relatore Tarolli P., Correlatore Roder G., Sofia G., Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali e Ambiente, Scuola di Agraria e Medicina Veterinaria, Università degli Studi di Padova, Legnaro.
- UTILI S., CROSTA G.B., 2015 – Analysis Tools for Mass Movement Assessment. Ed. SHROEDER J.F., DAVIES T., 441-465, Amsterdam. Elsevier.
- UYSAL M., TOPRAK A.S., POLAT N., 2015 – DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. *Measurement* (73) 539-543.

- VALKANIOTIS S., PAPATHANASSIOU G., GANAS A., 2018 – Mapping an earthquake-induced landslide based on UAV imagery; case study of the 2015 Okeanos landslide, Lefkada, Greece. *Engineering Geology* (245) 141-152.
- VARNES D.J., 1978 - Slope movement types and processes. In *Landslides, analysis and control*, ed. Schuster R.L. & Krizeck R.J. Transportation Research Board, n.176, 11-33. Washington.
- WANG K., KUMAR P., 2019 – Characterizing relative degrees of clumping structure in vegetation canopy using waveform LiDAR. *Remote Sensing of Environment* (232).
- WATANABE Y., KAWAHARA Y., 2016 – UAV photogrammetry for monitoring changes in river topography and vegetation. *Procedia Engineering* (154) 317-325.
- WESTOBY M.J., BRASINGTON J., GLASSER N.F., HAMBREY M.J., REYNOLDS J.M., 2012 – “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* (179) 300-314.
- WHEATON J.M., BRASINGTON J., DARBY S.E., KASPRAK A., SEAR D.A., VERICAT D., 2013 – Morphodynamic signatures of braiding mechanisms as expressed through change in sediment storage in a gravel-bed river. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* (118) 759-779.
- WHEATON J.M., BRASINGTON J., DARBY S.E., SEAR D.A., 2010 – Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms* (35) 136-156.
- WILLIAMS R.D., 2012 – DEMs of Difference. *Geomorphological Techniques*. British Society for Geomorphology, Londra.
- ZAPICO I., MOLINA A., LARONNE J.B., SANCHEZ CASTILLO L., MARTIN DUNQUE J.F., 2020 – Stabilization by geomorphic reclamation of a rotational landslide in an abandoned mine next to the Alto Tajo Natural Park. *Engineering Geology* (264).
- ZHANG W., QI J., WAN P., WANG H., XIE D., WANG X., YAN G., 2016 – An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote Sensing* (8) 501.

