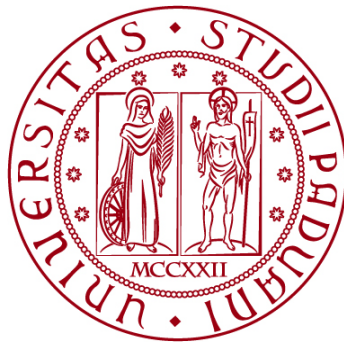


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA

Corso di Laurea in Scienze Naturali e Ambientali



ELABORATO DI LAUREA

**ANALISI DI STABILITÀ DEL VERSANTE
MERIDIONALE DEL MONTE GRUMO (CARRÈ, VI)**

Tutor: Prof. Ascanio Rosi
Dipartimento di Geoscienze

Laureando: Pietro Cercato

ANNO ACCADEMICO 2025/2026

ABSTRACT

Il dissesto geo-idrologico è una delle principali cause di instabilità del territorio e delle infrastrutture presenti nell'area pedemontana veneta. Questo lavoro di tesi si è posto come obiettivo quello di esaminare il seguente tema andando ad analizzare la stabilità del versante meridionale del Monte Grumo, situato nel Comune di Carrè, in provincia di Vicenza, un'area caratterizzata da un'elevata suscettibilità da frana. Il pendio oggetto di studio è caratterizzato da tre strati, ricoperti superficialmente da vegetazione. Il primo orizzonte è costituito da un limo sabbioso-argilloso, il secondo da sabbia limosa, mentre il terzo da roccia vulcanica alterata.

In seguito alla descrizione dell'area di studio e dei suoi parametri geotecnici, ottenuti tramite letteratura, si è passati all'analisi del versante. I dati sono stati implementati all'interno di GEO5, una suite software per l'ingegneria civile, geotecnica e geologia che ha permesso l'analisi della stabilità, applicando il metodo dell'equilibrio limite (LEM), tramite approccio Morgenstern-Price. L'analisi ha previsto due scenari: il posizionamento della linea di falda a diverse altezze e l'applicazione di sovrappressioni al piano campagna tramite l'utilizzo del valore R_u , andando a simulare precipitazioni intense e prolungate.

I risultati dello studio hanno evidenziato presenza di superfici di scivolamento critiche per valori di $R_u = 0,71$. La saturazione dei livelli a bassa coesione che compongono il versante causa un aumento delle pressioni interstiziali, quindi una diminuzione della resistenza al taglio, favorendo l'innescio del dissesto.

INDICE

INTRODUZIONE	4
1. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-TECNICO	5
1.1. Inquadramento geologico	5
1.2. Inquadramento geomorfologico	6
1.3. Inquadramento geotecnico	9
1.4. Uso del suolo	10
2. AREA DI STUDIO	12
2.1. Fenomeni franosi nell'area	14
3. METODOLOGIE E DATI	17
3.1. Software	17
3.1.1. Metodo di analisi Morgenstern-Price	17
3.2. Dati	19
3.2.1. Creazione del versante	20
4. ANALISI DI STABILITÀ	22
4.1. Assenza di falda	22
4.2. Falda posta tra il terzo e secondo strato	23
4.3. Falda posta tra il secondo e primo strato	23
4.4. Falda posta sul piano campagna	24
4.5. Sovrapressioni sul piano campagna	24
4.5.1. $R_u = 0,50$	25
4.5.2. $R_u = 0,60$	25
4.5.3. $R_u = 0,70$	26
4.5.4. $R_u = 0,71$	26
5. DISCUSSIONE DEI RISULTATI	28
6. CONCLUSIONI	32
Bibliografia	33

INTRODUZIONE

Il seguente elaborato ha voluto porre l'attenzione su eventi che negli ultimi anni stanno sempre di più colpendo in maniera significativa la nostra penisola. Il dissesto geo-idrologico è una delle principali cause di instabilità dei centri abitati, delle infrastrutture e del territorio in generale. L'area pedemontana veneta, in particolar modo il territorio nei dintorni di Vicenza, è una delle zone maggiormente soggette a questo tipo di fenomeni, come si può anche osservare dai dati riportati nell'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (IFFI).

L'analisi di stabilità del versante meridionale del Monte Grumo, situato nel Comune di Carrè in Provincia di Vicenza, ha l'obiettivo di esaminare in maniera più approfondita questo tema.

Il saggio si articola in tre parti: la prima si pone l'obiettivo di descrivere la geologia, la geomorfologia, la caratterizzazione geotecnica e l'uso del suolo dell'area di studio.

La seconda parte si focalizza maggiormente sull'elaborazione dei dati, derivati dalla letteratura, descrivendo i software utilizzati e le analisi di stabilità effettuate sul versante.

Infine, nell'ultima parte dell'elaborato si discutono i dati ottenuti dalle analisi svolte per determinare quali possano essere le principali cause e soluzioni a questo tipo di fenomeno.

1. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-TECNICO

1.1. Inquadramento geologico

L'area studio selezionata per questo lavoro è situata all'interno dell'arco Sud-Alpino, in particolar modo nella zona collinare del Marosticano, compresa tra i fiumi Astico e Brenta, in Provincia di Vicenza (Figura 1).

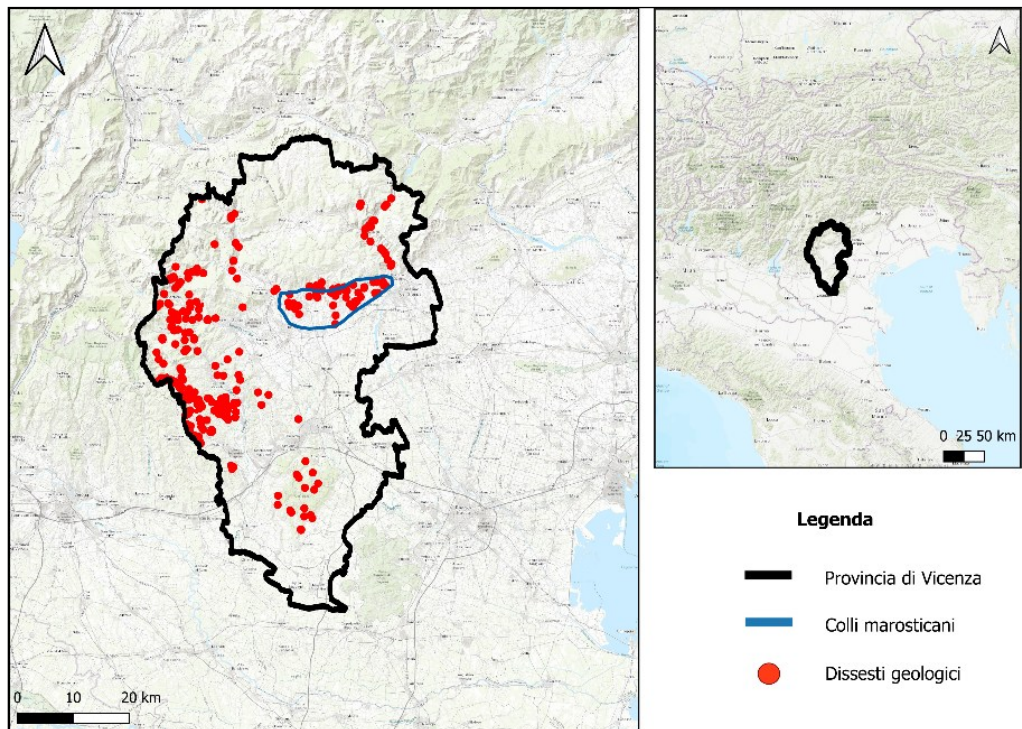


Figura 1 Inquadramento della Provincia di Vicenza con relativi dissesti geologici (Dato vettoriale della Provincia di Vicenza).

Paleogeograficamente la zona è situata all'interno della piattaforma carbonatica terziaria del Veneto e del Trentino, sviluppata sulla struttura di età giurassica-cretacea-paleocenica denominata Piattaforma di Trento (Trevisani, 1994). In seguito all'orogenesi alpina, legata allo scontro tra l'Europa e il promontorio africano, e alla formazione di faglie dirette, la struttura è stata frammentata in "alti" e "bassi" strutturali, che successivamente sono stati interessati da una significativa attività vulcanica basica (Beccaluva et al., 2007). Nell'Eocene inferiore, gli "alti" strutturali permisero la formazione di un ambiente di sedimentazione carbonatica di tipo lagunare tropicale, rendendo possibile la formazione di una piattaforma carbonatica denominata *Lessini Shelf* (Bosellini,

1989, 2004), collegata a Nord alla terra emersa e circondata, per il resto, da mare profondo.

Durante il Cenozoico, in particolar modo il periodo di tempo compreso tra il Paleocene Superiore e l'Oligocene, la porzione centro-settentrionale del Sud-Alpino (odierno Veneto) è stata interessata da un'intensa attività magmatica basica e ultrabasica, che ha permesso la formazione della Provincia Vulcanica Veneta (Bellieni, 2010).

L'area in questione si divide in due zone principali: i Monti Lessini, divisi in Occidentali ed Orientali, ed il Marosticano.

I Lessini Occidentali si estendono dal Monte Baldo fino alla Linea Schio-Vicenza, sono stati interessati da un'elevata attività vulcanica subacquea tra il Paleocene Superiore ed Eocene Medio, con produzione principale di ialoclastiti, cioè rocce che si originano per il raffreddamento veloce del magma a contatto con l'acqua, tufi e *pillow* lava.

I Lessini Orientali, delimitati dalla Linea Schio-Vicenza ad est e dalla Faglia di Castelvero a ovest, sono caratterizzati da lave, tufi, ialoclastiti, brecce e vulcaniti, messi in posto durante la principale attività magmatica avvenuta nell'Eocene Medio.

Il Marosticano, invece, è racchiuso ad ovest dalla Linea Schio-Vicenza, ad est dal Brenta. Questa porzione di territorio, vista anche l'elevata distanza dai Lessini interessati in maniera più significativa dalle attività vulcaniche, è caratterizzata generalmente da prodotti effusivi subaerei depositati dal vulcanismo sviluppatosi nell'Oligocene Medio.

1.2. Inquadramento geomorfologico

Geomorfologicamente l'area studio è caratterizzata dal contatto tra il sistema collinare pedemontano, rappresentato dalla porzione occidentale del Marosticano e dalle Colline delle Breganze, e l'apparato alluvionale dell'Astico. Quest'ultimo è un conoide sedimentario dominato da corsi d'acqua. La seguente

struttura rappresenta un'area a rapida sedimentazione che si sviluppa quando un flusso confinato, per esempio in una valle, si espande lateralmente, in un fondovalle o pianura, promuovendo la deposizione dei materiali precedentemente presi in carico. Le granulometrie di questi depositi diventano sempre più fini man mano che si si allontana dall'apice, passando da depositi grossolani a limoso-argillosi.

Questo corpo deposizionale si è formato durante l'Ultimo Massimo Glaciale (LGM - Last Glacial Maximum), avvenuto tra i 30.000 e 17.500 anni fa. Durante questo intervallo di tempo la maggior parte dei detriti glaciali diretti verso la pianura pedemontana si sono mossi attraverso Piovene Rocchette, località limitrofa a Carrè, alimentando il conoide di Thiene. Con l'inizio della deglaciazione, la diminuzione del carico sedimentario ha portato i fiumi post-glaciali, tra cui l'Astico, ad incidere sullo stesso conoide, con conseguente formazioni di profonde valli delimitate da scarpate fluviali ripide e terrazzi fluviali, rappresentazioni fisiche di un continuo abbassamento dell'alveo del fiume. L'incapacità del fiume di esondare sulla superficie del conoide ha portato alla sua disattivazione, trasformandolo in una forma relitta.

In seguito a questa disattivazione, il trasporto dei materiali smantellati dal conoide di Thiene sono stati portati ancora più a valle, permettendo la formazione del conoide di Sandrigo. L'insieme di queste due strutture formano il conoide dell'Astico (Rossato et al., 2013).

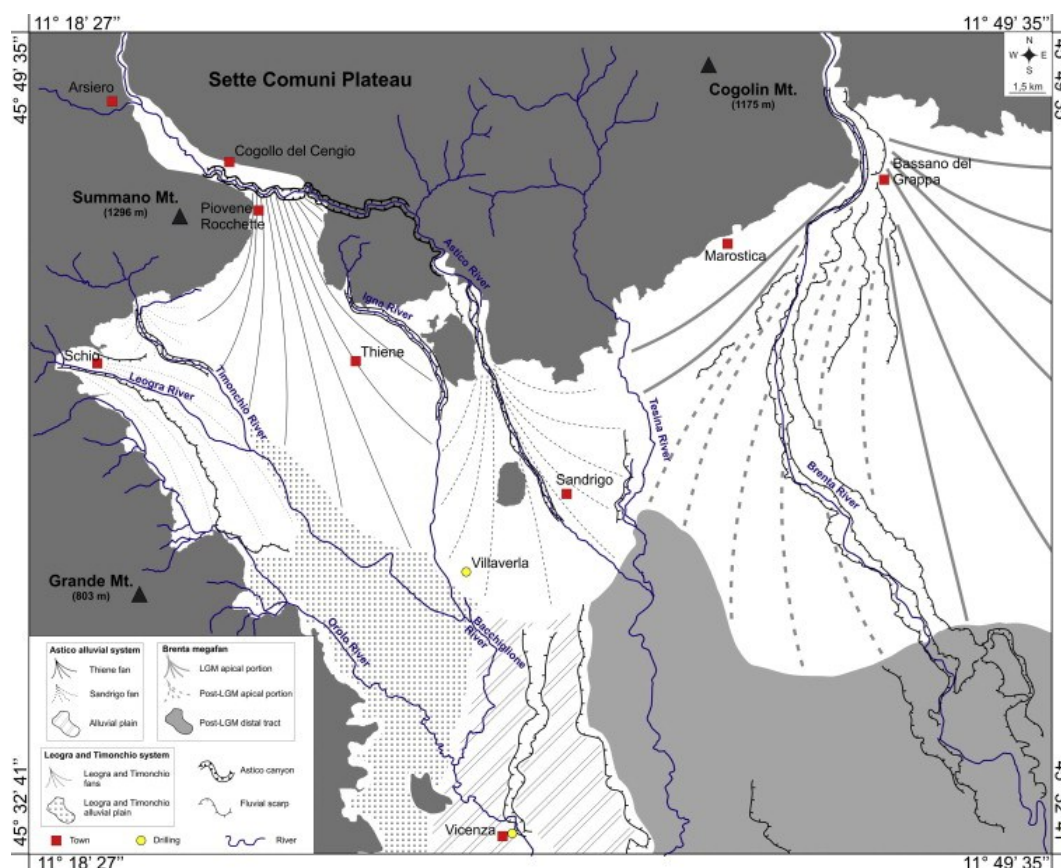


Figura 2 Schema della geomorfologia della pianura pedemontana tratto da Rossato et al., 2013.

Oltre ai depositi vulcanici dell'Oligocene e ai conoidi alluvionali, nei promontori prossimi a Carrè sono frequenti i depositi colluviali, una particolare tipologia di depositi di versante. Il colluvio si presenta massivo e privo di strutture sedimentarie evidenti; si forma lungo i versanti per effetto dell'acqua e della gravità, che mobilitano le alteriti già presenti sul crinale, nel caso specifico derivate da rocce vulcaniche. L'origine di questi depositi può essere collegata anche alle attività antropiche, tra cui l'agricoltura. Durante la preparazione dei campi per la semina, gli operatori agricoli tendono a raccogliere e accumulare le rocce più grandi ai margini delle aree coltivate.

Questa pratica favorisce l'alterazione fisica e chimica delle rocce, accelerando la trasformazione dei basalti in argilla, attraverso il processo di lisciviazione delle rocce da parte dell'acqua, per effetto dell'idrolisi. La successiva ricombinazione degli elementi più pesanti e poco solubili con il silicio dà luogo a minerali argillosi, più instabili e che possono essere mobilitati più facilmente (Di Francesco, 2019).

1.3. Inquadramento geotecnico

Tramite l'esame di 15 progetti di sistemazione di dissesti avvenuti nel Marosticano e le relative relazioni geologiche-tecniche, è stato possibile creare un modello geologico-tecnico dell'area studio (Tabella 1).

Orizzonte	Descrizione	Spessore [m]	γ [kN/m ³]	C_u [kPa]	ϕ' [°]
A	terreno vegetato/antropizzato	0.5-2.5			
B1	deposito argilloso-limoso da molle a mediamente consistente	1.0-6.8	16-19	5-50	0-24
B2	deposito limoso-argilloso da mediamente a molto consistente con inclusi basaltici/tufacei	0.6-4.0	18-20	13-330	0-38
C	substrato roccioso costituito da basalto/tufi (da -2.0 a -8.0 m)		21-24		

Tabella 1 Profilo geotecnico dell'area interessata da movimenti franosi nel Marosticano (tratto da Busnardo, 2016).

Nel Marosticano, come rappresentato nella tabella, sono individuabili 4 orizzonti. Il primo è rappresentato da copertura vegetale e terreno antropizzato. Il secondo orizzonte è caratterizzato da uno strato argilloso-limoso mediamente consistente ($C_u = 5-50$ kPa). Segue poi uno strato limoso-argilloso molto consistente con inclusioni basaltiche e tufacee, che lo rendono maggiormente stabile ($C_u = 13-330$ kPa). L'ultimo orizzonte è caratterizzato da un substrato roccioso formato da basalti e tufi, con un elevato valore di coesione, tipico di rocce magmatiche.

Dalle relazioni studiate (Busnardo, 2016 e Dalla Costa, 2014) emerge che solitamente i dissesti geologici si sviluppano tra l'orizzonte B1 e B2, in quanto terreni maggiormente instabili.

1.4. Uso del suolo

Con suolo si intende la porzione più superficiale della crosta terrestre composto da particelle minerali, sostanza organica, acqua, aria ed organismi viventi. Oltre ad essere importante come elemento paesaggistico, esso ha un importante ruolo nella stabilità del versante e nella filtrazione dell'acqua sotterranea.

L'area di studio è caratterizzata da un contesto pedologico di transizione tra la pianura vicentina e il complesso collinare delle Bregonze. Tramite la cartografia dell'Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale (ARPAV) è stato possibile individuare due tipi di suoli, ognuno con le proprie caratteristiche.

Il terreno posto ai piedi della collina, come riportato in precedenza, è dominato da depositi fluvioglaciali legati al conoide di Thiene, caratterizzati da una buona frazione calcarea. Nell'area prevalgono la coltivazione di mais e i prati destinati al sostentamento delle bovine da latte.

Lungo le colline delle Bregonze, invece, si ha un substrato ricco di rocce silicatiche, in particolare lave, tufi e brecce basaltiche fortemente alterabili, che a seguito di eventi atmosferici si trasformano in argilla.

I versanti collinari, una volta ricchi di foreste di querce e castagni, nel tempo, sono stati disboscati per far spazio alla viticoltura, modificando le caratteristiche del terreno e favorendo una maggiore suscettibilità.

Le foreste, caratterizzate da alberi ad alto fusto, oltre ad avere un'elevata importanza a livello di ecosistema, presentano un apparato radicale di grande diametro, che permette la formazione di strutture ramificate ad elevate profondità (Figura 3), aumentando la resistenza al taglio del terreno e garantendo una maggiore stabilità del pendio.

La presenza di alberi contribuisce inoltre a rallentare il *run-off*, ossia il deflusso superficiale che si genera quando l'intensità delle precipitazioni supera la capacità di infiltrazione del suolo. In assenza di vegetazione, tale processo potrebbe favorire fenomeni significativi di erosione superficiale.



Figura 3 Illustrazione in ordine di grandezza del rinforzo radicale considerando scale che vanno dalla singola radice al popolamento forestale: (a) scala della singola radice; (b) scala di un fascio di radici; (c) sistema radicale di un singolo albero; e (d) scala di un popolamento forestale su un versante. (Immagine tratta da Schwarz et al., 2010; recuperabile presso l'indirizzo online: www.interscience.wiley.com/journal/espl)

Le vigne, coltivazioni molto presenti nelle Colline delle Bregonze e nella nostra area studio, al contrario, sono caratterizzate da un apparato ipogeo corto che rimane più superficiale. Di conseguenza, in caso di precipitazioni intense e saturazione del terreno argilloso derivato dalle alterazioni del substrato basico, l'aumento delle pressioni neutre positive implica una riduzione degli sforzi normali efficaci (σ'), dell'attrito inter-granulare e una conseguente diminuzione della resistenza al taglio (τ). Si ha quindi un crollo della forza d'attrito all'interfaccia suolo-radice ed in questo contesto, la tipologia di radice liscia e di limitata profondità come quella delle vigne, è un fattore critico che facilita lo sfilamento delle radici dal terreno, secondo un processo definito *slip-out* (Schwarz et al., 2010).

La mancanza di "sostegni" naturali all'interno del versante e l'aumento delle pressioni neutre positive sono fenomeni che rendono il pendio più instabile e più suscettibile a fenomeni franosi.

2. AREA DI STUDIO

L'area studio è situata nella zona collinare delle Bregonze, compresa tra i centri abitati di Carrè (Ovest) e Lugo di Vicenza (Est), più precisamente in Via Valdaro (Figura 4).

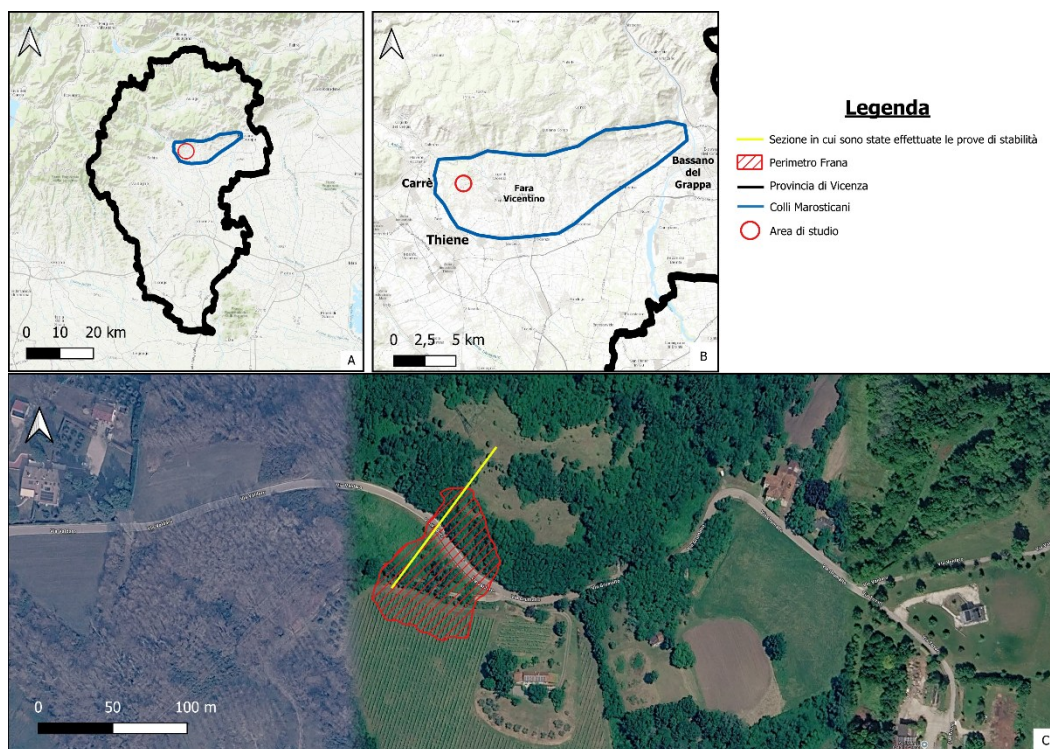
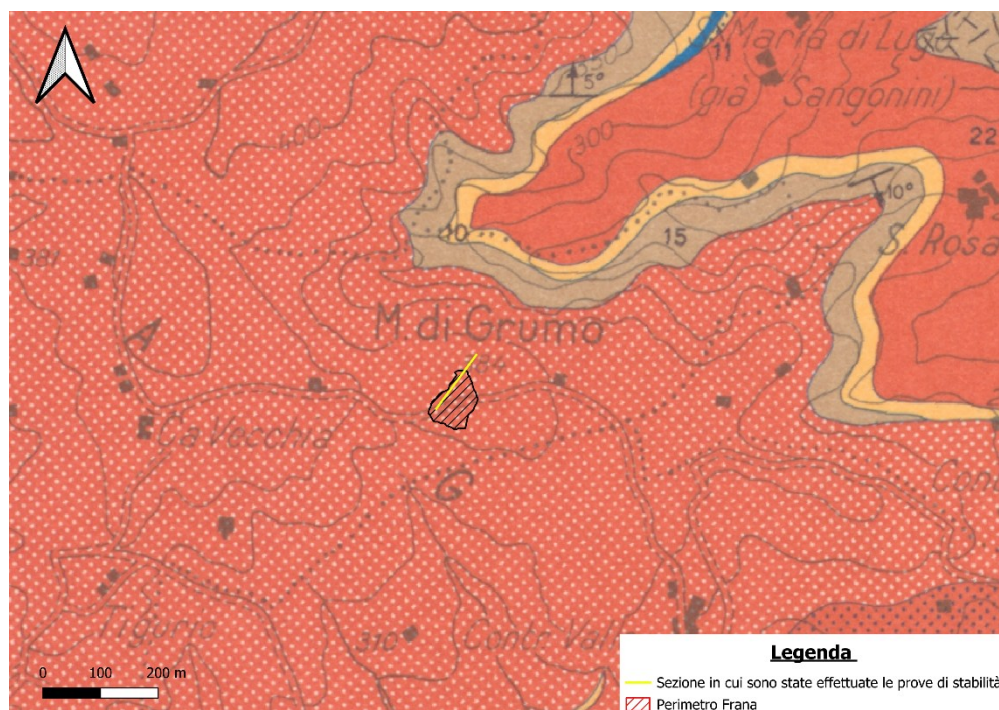


Figura 4 Inquadramento geografico dell'area di studio e ubicazione del perimetro della frana. (A) Localizzazione area di studio all'interno della Provincia di Vicenza. (B) Dettaglio della zona di interesse all'interno dei Colli Marosticani. (C) Immagine satellitare in dettaglio di Via Valdaro con perimetro del corpo di frana (rosso) e sezione in cui sono state effettuate le analisi di stabilità (giallo). (Dati vettoriali della Provincia di Vicenza).

Attraverso la consultazione della Carta Geologica del Marosticano Occidentale in scala 1:20.000 è stato possibile determinare la geologia specifica dell'area (Figura 5), caratterizzata principalmente da prodotti di vulcanismo subaereo.



10 OLIGOCENE INF. E MEDIO: Marne con ligniti, intercalate alle rocce vulcaniche (Bragonze, Lugo, Fara).

14 OLIGOCENE INF. E MEDIO: Calcari a litotamni, nummuliti (*N. vascus* JOLY e LEYMERIE, *N. intermedius* D'ARCH.) e coralli, con *Trochus lucasianus* BRONGN., *Natica crassatina* LAM., *Strombus auriculatus* GRAT..

15 OLIGOCENE INFERIORE: Arenarie e calcari arenacei in lenti limitate, con *N. vascus* JOLY e LEYMERIE, *Pecten arcuatus* (BROCCHI), *Cardita laurae* BRONGN., *Pholadomya puschi* GOLDF., *Turritella incisa* BRONGN., *Voluta elevata* SOW., ecc. (Bragonze) (Arenarie di Sangonini = S. Maria di Lugo).

16 OLIGOCENE-MIOCENE: Breccie e tufi stratificati; rocce vulcano-sedimentarie e vulcano-terrigene stratificate; id. id. spesso fossiliferi.

20 OLIGOCENE-MIOCENE: Breccie e tufi caotici.

22 OLIGOCENE-MIOCENE: Lave subaeree, talora scoriacee, grigie o rossastre, spesso con alterazione argillosa.

22 OLIGOCENE-MIOCENE: Lave massicce, talora con alterazione argillosa.

Figura 5 Geologia dell'area di studio estratto dalla Carta Geologica del Marosticano Occidentale (scala 1:200.000).

La sezione considerata per l'analisi di stabilità è composta da 3 strati, sormontati da copertura vegetale (Figura 6). Il profilo stratigrafico, partendo dall'alto verso il basso è costituito da: uno strato di limo sabbioso-argilloso profondo circa 5 metri (Strato A), uno strato sottostante di sabbia limosa con uno spessore di circa 1.5 m (Strato B). L'ultimo strato è costituito da roccia vulcanica alterata (Strato C) che facilmente si trasforma in argilla.

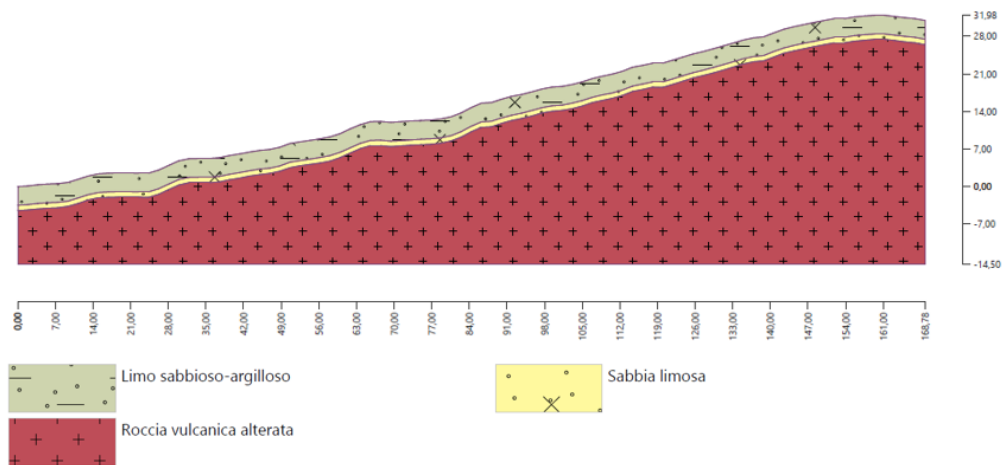


Figura 6 Rappresentazione grafica del versante preso in analisi. In ordine dall'alto al basso sono rappresentati gli strati A, B, C. L'unità di misura di entrambi gli assi è in metri.

2.1. Fenomeni franosi nell'area

Il versante analizzato in questo elaborato, nel corso del tempo ha subito numerosi episodi di instabilità, da sottolineare in particolar modo quello avvenuto in seguito agli eventi calamitosi di gennaio-febbraio del 2014, che ha portato alla completa chiusura di Via Valdaro (Carrè, VI).

Il fenomeno gravitativo in questione, secondo la classificazione di Varnes (1978), è stato descritto come uno scivolamento traslativo di terra (Tabella 2) che è la tipologia più presente in Veneto assieme alle colate di detrito (Figura 7).

Tipo di movimento	Materiale		
	Roccia (<i>bedrock</i>)	Detrito (<i>debris</i>)	Terra (<i>earth</i>)
Crollo (<i>fall</i>)	Crollo di roccia	Crollo di detrito	Crollo di terra
Ribaltamento (<i>topple</i>)	Ribalt. di roccia	Ribalt. di detrito	Ribalt. di terra
Scivolamento rotazionale (<i>slump</i>)	Sciv. rot. di roccia	Sciv. rot. di detrito	Sciv. rot. di terra
Scivolamento traslativo (<i>slide</i>)	Sciv. tras. di roccia	Sciv. tras. di detrito	Sciv. tras. di terra
Espansione laterale (<i>lateral spread</i>)	Esp. di roccia	Esp. di detrito	Esp. di terra
Colamento (<i>flow</i>)	Col. di roccia	Col. di detrito	Col. di terra
Complesso (<i>complex</i>)	Associazione di diversi meccanismi		

Tabella 2 Classificazione delle frane di Varnes (1978).

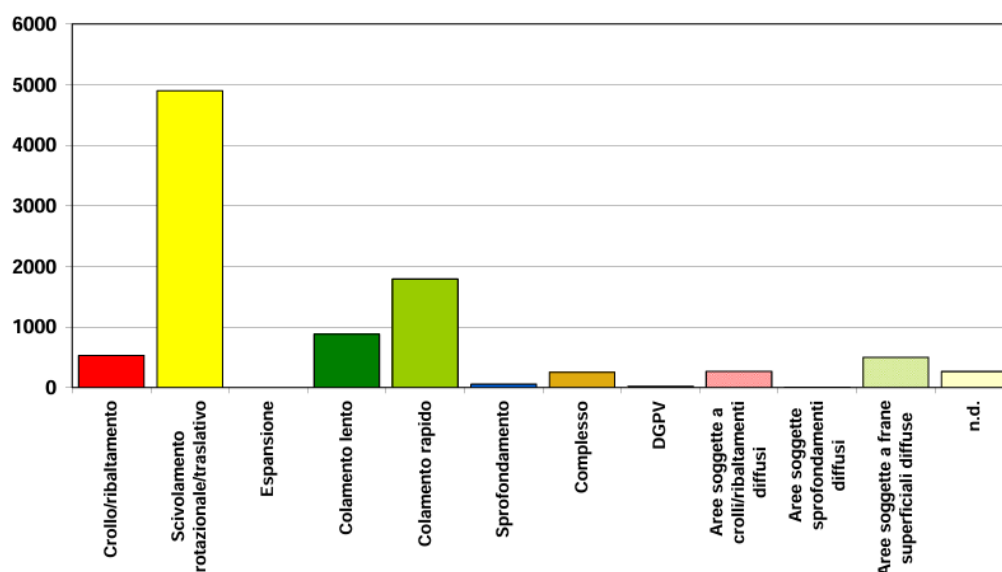


Figura 7 Numero di frane per tipologia di movimento (dati tratti dal Rapporto sulle frane in Italia redatto dall' ISPRA).

Si tratta di un fenomeno franoso caratterizzato dalla traslazione di una porzione di terreno in corrispondenza di superfici di taglio a forma planare o ondulata (Figura 8).

Translational landslide

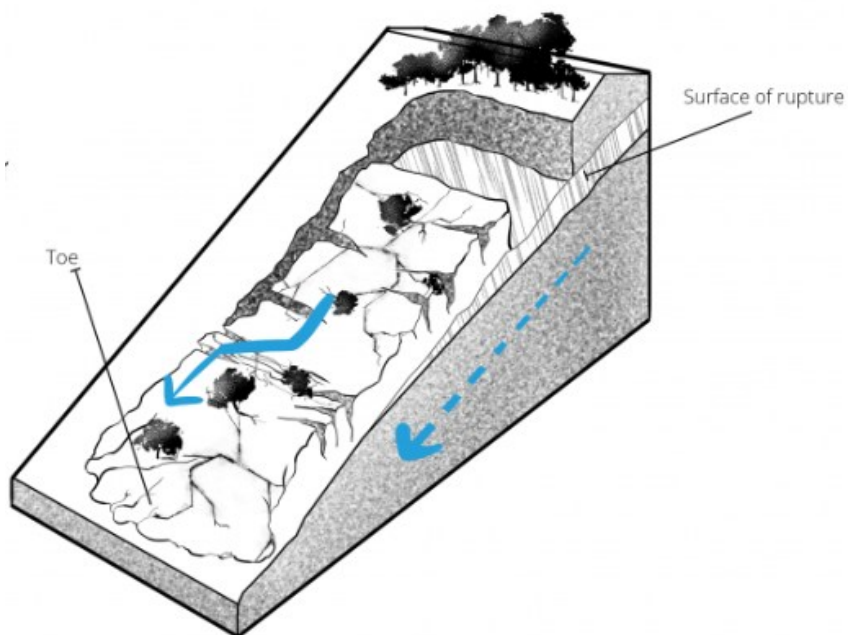


Figura 8 Rappresentazione grafica di uno scivolamento traslativo di terra. (Immagine estratta da: <https://blogs.ubc.ca/landslides/mass-movements-classification/>)

3. METODOLOGIE E DATI

3.1. Software

L'analisi del versante meridionale del Monte Grumo è stata realizzata tramite il software di calcolo geotecnico GEO5. Questo programma permette di utilizzare diverse metodologie di analisi per il calcolo della stabilità del pendio. In questo lavoro si è utilizzato il modello di analisi di Morgenstern-Price.

I calcoli numerici che vengono effettuati dal software hanno lo scopo di individuare le possibili superfici di scorrimento critiche all'interno del pendio, andando ad assegnare ad ognuna di queste un valore numerico adimensionale, corrispondente al fattore sicurezza (FS). Questo valore è definito come il rapporto tra la resistenza al taglio massima (τ_f), che si ottiene tramite il criterio di Mohr-Coulomb e le tensioni da taglio (τ).

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau}$$

In base alle diverse normative un pendio può essere considerato stabile a diversi valori di FS. In Italia un pendio è considerato stabile quando il fattore di sicurezza è superiore a 1,5. Per valori di FS uguali ad 1 il versante è considerato in equilibrio limite, cioè le forze che spingono il versante sono uguali a quelle che resistono. Per misure inferiori a 1, il pendio non è considerato stabile.

3.1.1. Metodo di analisi Morgenstern-Price

Il metodo Morgenstern-Price si basa sulla divisione della massa scivolante in strisce infinitesime, chiamate conci, sulle quali poi si vanno ad analizzare le varie forze che agiscono (Figura 9).

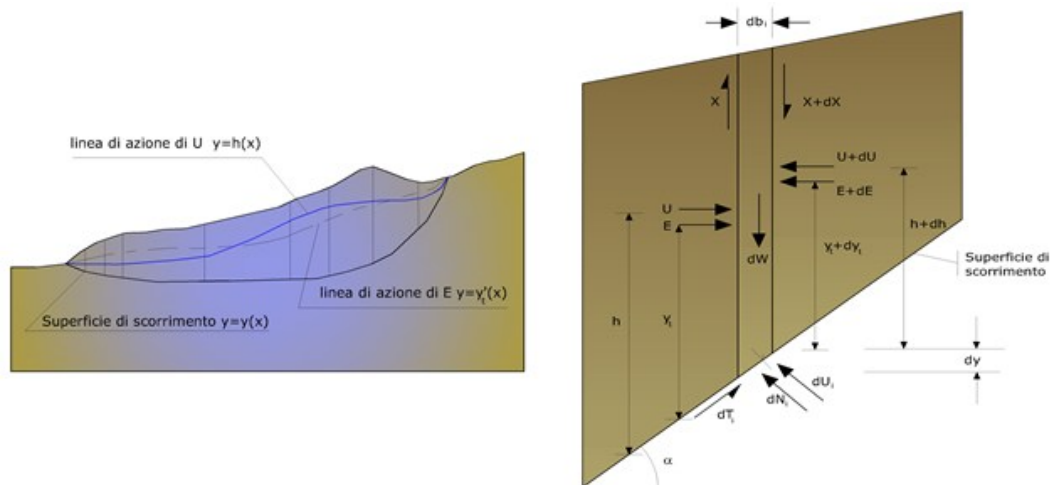


Figura 9 Azioni sul concio i-esimo secondo le ipotesi di Morgenstern e Price e rappresentazione d'insieme dell'ammasso (tratto dal sito dell'azienda Geostru, geostru.eu)

Oltre alle forze orizzontali tra i conci (E , $E + dE$), il metodo tiene in considerazione anche le forze di taglio interconco (X , $X + dX$), legate allo sfregamento verticale tra i conci. Nel caso in cui sia presente acqua il modello considera anche la spinta di questa tra i vari settori (U , $U + dU$). La possibilità di poter utilizzare questo modello con qualsiasi geometria di scorrimento ne garantisce una sua maggiore efficienza rispetto ad altri.

L'ipotesi alla base del modello di Morgenstern e Price è che lo sfregamento verticale (X) sia proporzionale alla spinta orizzontale (E) secondo la formula seguente:

$$X = \lambda f(x) E$$

Dove:

- λ : è un moltiplicatore che il software GEO5 aggiusta iterativamente nei cicli di calcolo fino ad arrivare allo stato di equilibrio delle forze e dei momenti;
- $f(x)$: funzione scelta dall'utente che indica come la forza risultante varia tra i conci lungo la frana.

Oltre alle forze viste in precedenza il modello tiene conto anche delle forze che agiscono verso il basso o sulla base del concio, in particolare:

- dW : peso del concio di terreno dipendente dallo spessore e dal tipo di materiale;
- dN_i : la forza normale efficace esercitata dal terreno sottostante sulla base del concio. In un sistema multifase, questa forza si distribuisce tra la fase solida, costituita dai granuli, e fase liquida, secondo il principio degli sforzi efficaci di Terzaghi. Quanto maggiore è il contatto tra i granuli, tanto più elevati risultano l'attrito e lo sforzo normale efficace; al contrario, la presenza di acqua tende ad allontanarli, riducendo l'attrito e, di conseguenza, la forza normale efficace;
- dU_i : è la spinta dal basso verso l'alto che l'acqua esercita sul fondo del concio;
- dT_i : rappresenta la forza di taglio resistente che si oppone allo scivolamento della massa.

3.2. Dati

Per procedere con l'analisi numerica tramite il software è necessario configurare una serie di informazioni che garantiscano al modello di funzionare in maniera corretta.

Nel caso specifico è necessario indicare: peso specifico (γ), coesione (c) e angolo di attrito interno (ϕ), dati che permettono la caratterizzazione stratigrafica del pendio. Dato che non è stato possibile effettuare prove geotecniche in campo ci si è riferiti ai dati riportati nello studio effettuato da Busnardo nel 2016 e riassunti nella tabella seguente (Tabella 3).

	Prof. (m)	γ' (KN/m ³)	γ (KN/m ³)	γ_w (KN/m ³)	γ_{sat} (KN/m ³)	c (Pa)	c (KPa)	ϕ (°)
A	0,0 – 3,5	15,1	18,2	9,81	24,9	1000	1	23
B	3,5 – 4,5	18,5	20,0	9,81	28,3	5000	5	15
C	> 4,5	24,5	24,5	9,81	34,3	62700000	62700	40

A= Limo sabbioso-argilloso, con spessore di circa 5 metri comprendente lo strato Abis;
B= Sabbia limosa, con spessore di circa 1,5 metri;
C=Roccia vulcanica alterata

Tabella 3 Dati di peso specifico, coesione e angolo di attrito interno recuperati dalla letteratura (Busnardo, 2016) e utilizzati in seguito per la caratterizzazione stratigrafica del versante meridionale di Monte Grumo.

3.2.1. Creazione del versante

Per la creazione del modello del versante meridionale del Monte Grumo per prima cosa si sono presi i dati DEM (modelli digitali di elevazione) dal sito del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. Si tratta di dati ottenuti con tecnica LIDAR, cioè misurazioni 3D ad elevata precisione ottenute tramite impulso laser. Successivamente queste informazioni riguardanti le altezze sono state caricate nell'applicativo QGIS, un sistema geografico open source con cui tramite il plugin *Profile Tool*, è stato possibile tracciare il profilo del pendio (Figura 10).

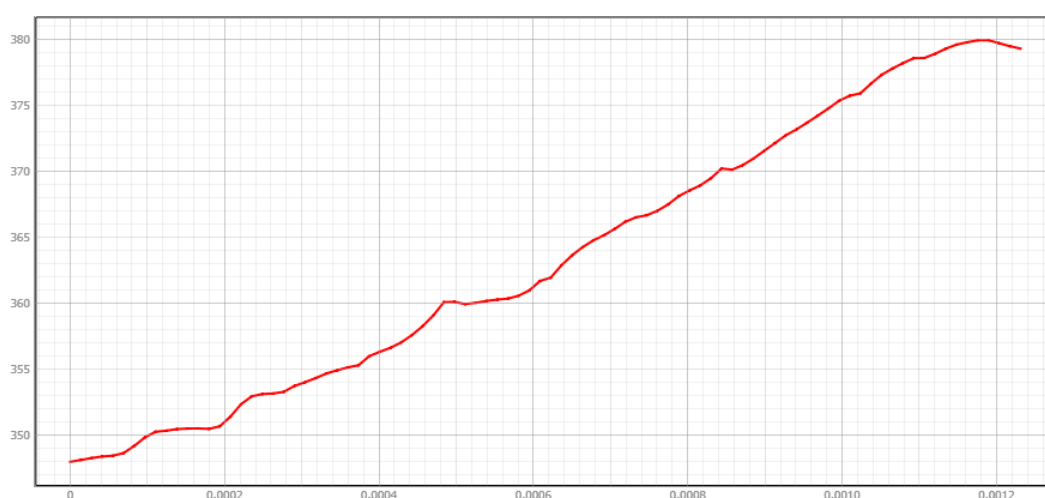


Figura 10 Profilo della porzione analizzata del versante meridionale di Monte Grumo

Successivamente i dati del profilo appena ottenuto sono stati importati nel software GEO5 con il quale si sono tracciati i profili stratigrafici (Figura 11). Non avendo informazioni sulla reale struttura interna del pendio si è supposto che il profilo degli strati sottostanti presenti lo stesso andamento del profilo superficiale.

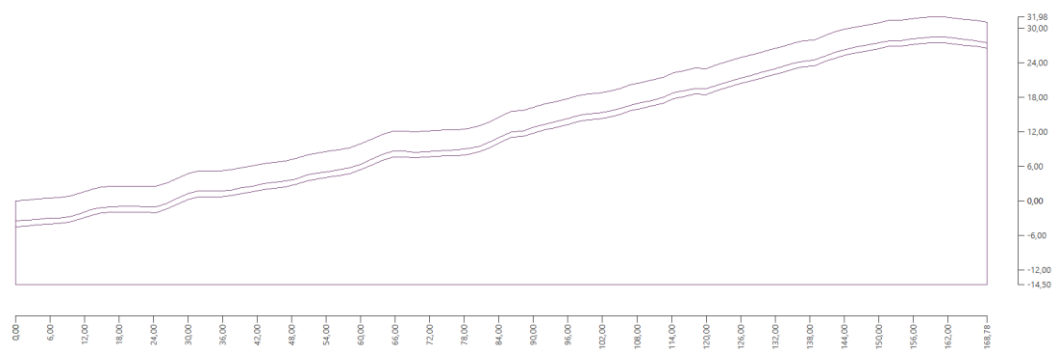


Figura 11 Raffigurazione interna del versante analizzato, assente della caratterizzazione geologica. L'unità di misura dei valori di entrambi gli assi è in metri.

Infine, si è provveduto ad assegnare agli strati corrispondenti le varie tipologie di terreno (A, B, C) per ottenere il profilo finale raffigurato in Figura 6.

4. ANALISI DI STABILITÀ

Per le analisi di stabilità del pendio si è considerato il suo comportamento in diverse situazioni:

1. Pendio senza la falda d'acqua;
2. Pendio con falda d'acqua posta tra lo strato vulcanico alterato e la sabbia limosa;
3. Pendio con la falda d'acqua posizionata tra lo strato di sabbia limosa e il limo sabbioso-argilloso;
4. Pendio con la falda d'acqua collocata sul piano campagna;
5. Sovrappressione nello strato superficiale.

4.1. Assenza di falda

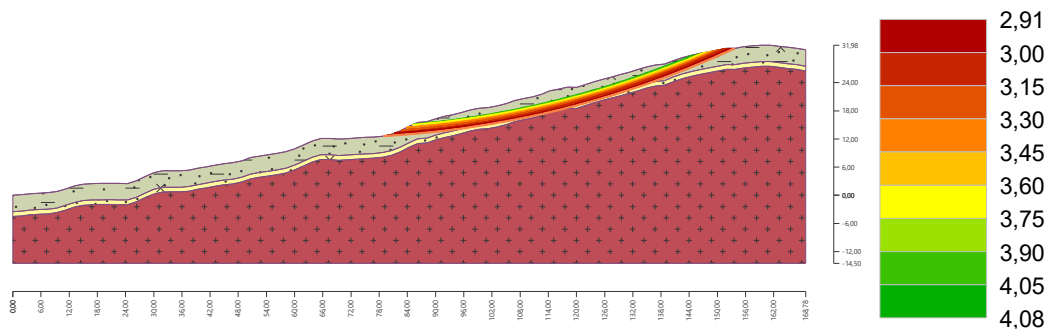


Figura 12 Analisi del versante meridionale del Monte Grumo in assenza di falda. Le linee colorate rappresentano le potenziali superfici di scorrimento. A destra sono riportati i valori del fattore di sicurezza (FS). L'unità di misura dei valori di entrambi gli assi è in metri.

La prima analisi ha voluto verificare la stabilità del pendio in assenza di falda. La scala cromatica posta a destra della Figura 12 riporta i valori del fattore di sicurezza (FS) ottenuti tramite metodologia Morgenstern-Price. I valori più vicini alla tonalità rossa sono i valori FS più bassi, mentre quelli più vicini alla tonalità verde sono i più alti.

In questo caso il dato più basso corrisponde a 2,91, ampiamente superiore al valore minimo di stabilità, ne consegue che il pendio può essere confermato stabile.

4.2. Falda posta tra il terzo e secondo strato

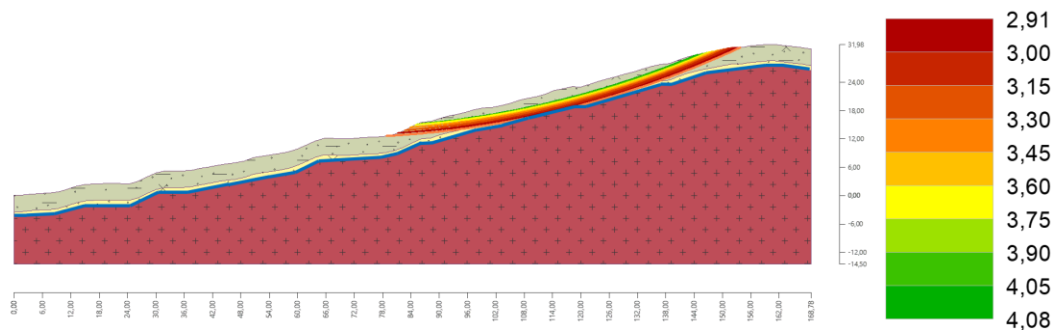


Figura 13 Analisi del versante meridionale del Monte Grumo con linea di falda posta tra il terzo e secondo strato. Le linee colorate rappresentano le potenziali superfici di scorrimento, mentre in blu è raffigurata la posizione della falda. A destra sono riportati i valori del fattore di sicurezza (FS). L'unità di misura dei valori di entrambi gli assi è in metri.

I risultati della seconda analisi (Figura 13) non mostrano sostanziale differenza rispetto alla precedente verifica. Il fattore di sicurezza più basso è anche in questo caso 2,91, confermando la stabilità del pendio anche in presenza della falda tra lo strato di vulcaniti alterate e quello di sabbia limosa.

4.3. Falda posta tra il secondo e primo strato

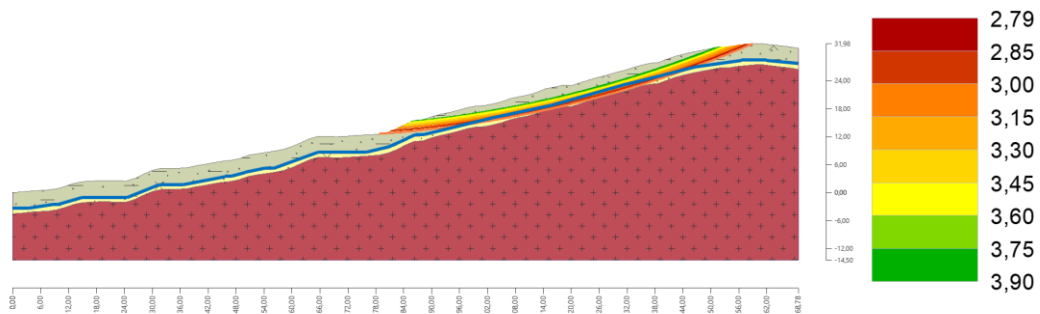


Figura 14 Analisi del versante meridionale del Monte Grumo con linea di falda posta tra il secondo e primo strato. Le linee colorate rappresentano le potenziali superfici di scorrimento, mentre in blu è raffigurata la posizione della falda. A destra sono riportati i valori del fattore di sicurezza (FS). L'unità di misura dei valori di entrambi gli assi è in metri.

Anche in questo caso (Figura 14), visto il valore minore di FS pari a 2,79 il pendio è considerato stabile. Rispetto all'analisi precedente, però si osserva una leggera diminuzione, pari a 0,20, del fattore di sicurezza, indicando una maggiore instabilità del versante in prossimità del limite tra la sabbia limosa ed il limo argilloso-sabbioso.

4.4. Falda posta sul piano campagna

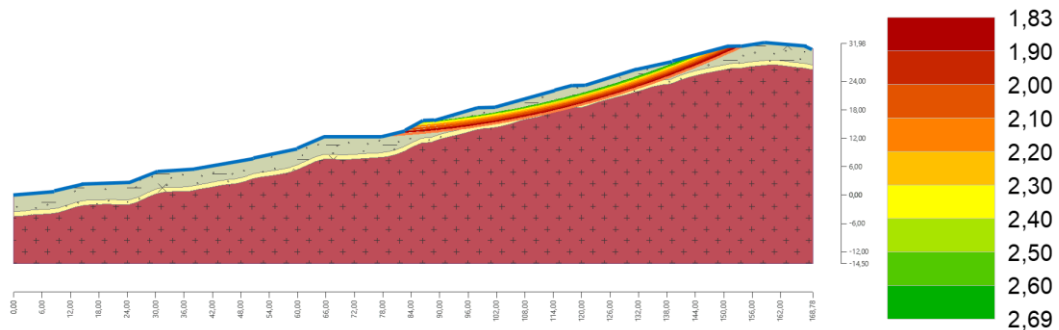


Figura 15 Analisi del versante meridionale del Monte Grumo con linea di falda posta sul piano campagna. Le linee colorate rappresentano le potenziali superfici di scorrimento, mentre in blu è raffigurata la posizione della falda. A destra sono riportati i valori del fattore di sicurezza (FS). L'unità di misura dei valori di entrambi gli assi è in metri.

Il versante rimane stabile, anche con la falda posta sul piano campagna (Figura 15). Si noti una variazione del fattore di sicurezza rispetto all'analisi precedente che raggiunge il valore di 1,83.

4.5. Sovrapressioni sul piano campagna

Come emerso dalle analisi precedenti, la sola presenza dell'acqua, anche con la linea di falda posta a quote diverse, non è sufficiente a destabilizzare il versante. È stato quindi ipotizzato che, per innescare condizioni di instabilità, sia necessario un evento meteorico intenso e prolungato, capace di favorire l'infiltrazione dell'acqua e la conseguente formazione di sovrappressioni neutre negli strati superficiali.

Per inserire le sovrappressioni nello strato più superficiale, nel software GEO5 si utilizza il parametro R_u , che indica il rapporto tra pressioni dell'acqua nei pori (u) e lo sforzo effettivo verticale (σ'_v).

$$R_u = \frac{u}{\sigma'_v}$$

Per:

- $R_u = 0$, si ha terreno asciutto
- $R_u = 0,4 - 0,5$, si ha terreno saturo, questo valore indica che il 50% della tensione verticale totale è in carico alle pressioni interstiziali.

- $R_u > 0,5$, si ha un terreno sovrassaturo e pressioni interstiziali elevate (caso di temporale forte).
- $R_u = 1$, indica condizioni di totale liquefazione del terreno.

Si è quindi proceduto ad effettuare l'analisi di stabilità del versante ponendo diversi valori di R_u sul piano campagna.

4.5.1. $R_u = 0,50$

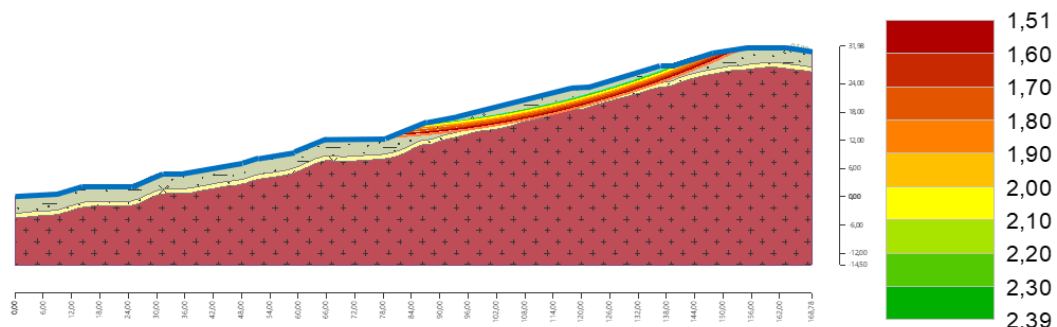


Figura 16 Analisi del versante meridionale del Monte Grumo con R_u sul piano campagna pari a 0,50. Le linee colorate rappresentano le potenziali superfici di scorrimento, mentre in blu è raffigurata la posizione della falda. A destra sono riportati i valori del fattore di sicurezza (FS). L'unità di misura dei valori di entrambi gli assi è in metri.

Nel caso di un terreno saturo in cui le sovrappressioni sostengono il 50% del carico totale verticale (Figura 16), si nota un'importante diminuzione del fattore di sicurezza rispetto alla precedente analisi in cui si considerava solamente la falda sul piano campagna (Figura 15).

4.5.2. $R_u = 0,60$

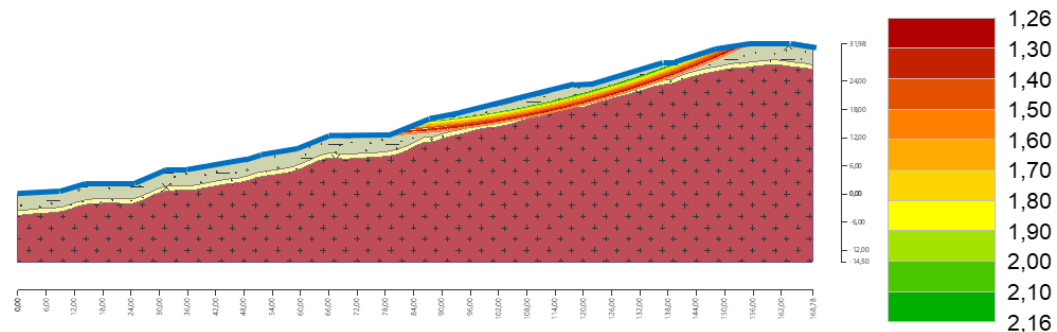


Figura 17 Analisi del versante meridionale del Monte Grumo con R_u sul piano campagna pari a 0,60. Le linee colorate rappresentano le potenziali superfici di scorrimento, mentre in blu è raffigurata la posizione della falda. A destra sono riportati i valori del fattore di sicurezza (FS). L'unità di misura dei valori di entrambi gli assi è in metri.

Nel caso di utilizzo di un R_u pario a 0,60 (Figura 17), il fattore di sicurezza diminuisce scendendo al di sotto di 1,50. Le sovrappressioni in questo caso iniziano ad essere molto elevate causando una diminuzione della resistenza al taglio e aumentando il rischio di scivolamento del versante.

4.5.3. $R_u = 0,70$

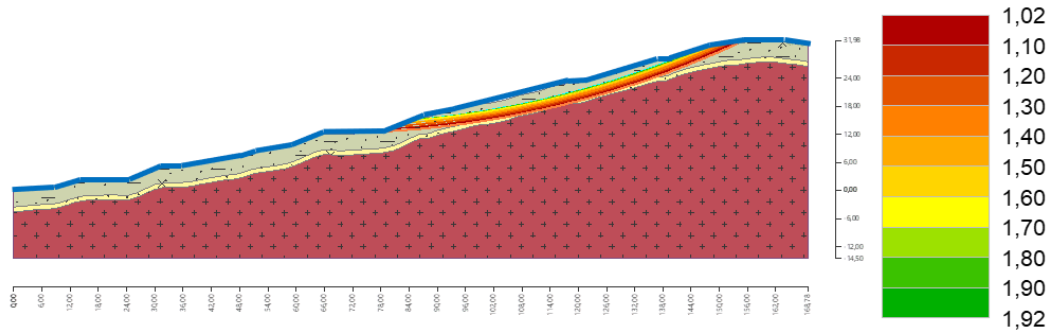


Figura 18 Analisi del versante meridionale del Monte Grumo con R_u sul piano campagna pari a 0,70. Le linee colorate rappresentano le potenziali superfici di scorrimento, mentre in blu è raffigurata la posizione della falda. A destra sono riportati i valori del fattore di sicurezza (FS). L'unità di misura dei valori di entrambi gli assi è in metri.

Ad un valore di R_u pari a 0,70 il pendio si trova vicino all'equilibrio limite ($FS \sim 1$), condizione sfavorevole per la stabilità del versante (Figura 18), in quanto come descritto in precedenza le forze che tendono a mobilitare il versante sono uguali a quelle che ne impediscono il movimento.

4.5.4. $R_u = 0,71$

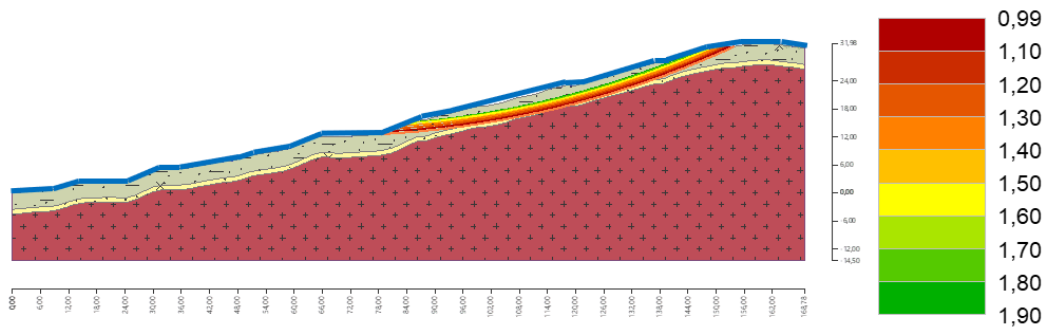


Figura 19 Analisi del versante meridionale del Monte Grumo con R_u sul piano campagna pari a 0,71. Le linee colorate rappresentano le potenziali superfici di scorrimento, mentre in blu è raffigurata la posizione della falda. A destra sono riportati i valori del fattore di sicurezza (FS). L'unità di misura dei valori di entrambi gli assi è in metri.

Dal punto di vista teorico, un Fattore di Sicurezza (FS) inferiore a 1 non rappresenta una condizione stabile in natura: il pendio perderebbe l'equilibrio statico e verrebbe mobilitato. In questo modello, quindi, l'aumento di R_u fino a 0,71 determinerebbe l'innescò di uno scivolamento traslativo di terra (Figura 8).

Le superfici di rottura, nonché quelle con un fattore di sicurezza inferiore a 1, individuano un distaccamento di una porzione di terreno compresa tra i 78 e i 156 metri di lunghezza. Questi tipi di movimenti interessano particolarmente la zona di contatto tra gli strati a minor coesione, cioè lo strato di limo argilloso-sabbioso (Strato A) e quello di sabbia limosa (Strato B) (Figura 19).

Di seguito vengono riportati i dati dei valori massimi e minori dei fattori di sicurezza ottenuti durante le varie analisi per facilitarne il confronto (Tabella 4).

Fattore di Sicurezza (FS)	Assenza di falda	Falda posta tra il terzo e secondo strato	Falda posta tra il secondo e primo strato	Falda posta sul piano campagna	$R_u=0,50$	$R_u=0,60$	$R_u=0,70$	$R_u=0,71$
Minimo	2,91	2,91	2,79	1,83	1,51	1,26	1,02	0,99
Massimo	4,08	4,08	3,90	2,69	2,39	2,16	1,92	1,90

Tabella 4 Valori minimi e massimi dei Fattori di Sicurezza (FS) ottenuti durante le differenti analisi di stabilità del pendio.

5. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Le analisi presentate nel capitolo precedente evidenziano che lo scivolamento del pendio tende a svilupparsi lungo la superficie di contatto tra lo strato A e lo strato B. Tale meccanismo risulta principalmente influenzato dalla formazione di sovrappressioni neutre, mentre la posizione della falda assume un ruolo secondario nel controllo della stabilità complessiva del versante.

In condizioni stazionarie, la pressione esercitata dalla falda (u_0) è data dal peso specifico del liquido (γ_w) e dall'altezza della tavola d'acqua (z_w).

$$u_0 = \gamma_w z_w$$

In tutti gli scenari analizzati, ad eccezione del caso in cui la falda è collocata sul piano campagna, i grani posti sopra la linea di falda mantengono una coesione sufficiente a garantire condizioni di stabilità. Questo è confermato dai valori del Fattore di Sicurezza (FS), che risultano ampiamente superiori a 1,50, come dimostrato nei capitoli 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4..

Poiché le analisi condotte considerando esclusivamente la presenza della falda non hanno evidenziato condizioni di destabilizzazione del pendio, sono state eseguite ulteriori verifiche introducendo uno scenario specifico: la formazione di sovrappressioni neutre al di sotto del piano campagna, in seguito a un evento temporalesco di elevata intensità. Tali fenomeni, negli ultimi anni, stanno interessando con frequenza crescente il Veneto e, in particolare, questa porzione di territorio.

L'acqua derivante dall'evento meteorico penetra negli strati più superficiali del terreno e ne incrementa il peso verticale, poiché satura i pori che in precedenza erano occupati dall'aria. Il nuovo carico si trasferisce quindi in misura maggiore agli strati sottostanti, rappresentati in questo caso da terreni limosi-argillosi.

La bassissima permeabilità delle argille limita il rapido drenaggio dell'acqua verso l'esterno; di conseguenza, l'incremento del carico verticale viene in parte

sostenuto dal fluido stesso. Questo processo determina un aumento della pressione della falda stazionaria (u_0), generando una sovrappressione neutra (Δu). Nel software GEO5, tali sovrappressioni vengono simulate attraverso l'impiego del coefficiente R_u .

Il processo può essere rappresentato mediante la seguente relazione:

$$u = u_0 + \Delta u$$

Dove:

- u : rappresenta la pressione neutra totale, o pressione interstiziale complessiva;
- u_0 : indica la pressione neutra in condizioni stazionarie;
- Δu : corrisponde alla sovrappressione neutra che si genera a seguito dell'aumento del carico.

L'aumento di u , per il principio degli sforzi efficaci di Terzaghi ($\sigma' = \sigma - u$), comporta una riduzione dello sforzo efficace (σ') e, di conseguenza, una diminuzione della resistenza di taglio (τ). Infatti, mentre la pressione litostatica agisce comprimendo i granuli del terreno, la pressione idrostatica totale (u) esercita un'azione opposta, contrastando le forze trasmesse dallo scheletro solido. Ne deriva che, all'aumentare della pressione dell'acqua, diminuisce l'efficacia delle forze litostatiche, aumenta la distanza tra i grani e si riduce la forza d'attrito. Questo comportamento è descritto dal criterio di rottura di Mohr-Coulomb-Terzaghi, riportato di seguito:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \varphi'$$

Dove:

- τ : rappresenta la resistenza al taglio;
- c' : indica la coesione efficace tra i grani;
- σ' : è lo sforzo efficace descritto da Terzaghi, espresso come $\sigma' = \sigma - u$;
- $\tan \varphi'$: rappresenta la tangente dell'angolo di attrito interno efficace del materiale.

Le analisi effettuate mediante il fattore R_u hanno quindi lo scopo di rappresentare i meccanismi appena descritti. Come evidenziato nella Tabella 4, l'aumento della sovrappressione neutra, espresso proprio attraverso il coefficiente R_u , risulta inversamente proporzionale al Fattore di Sicurezza.

In presenza di precipitazioni abbondanti, superiori alla capacità drenante del terreno, come può avvenire negli strati argilloso-limosi, secondo la legge di Horton può instaurarsi deflusso superficiale o *run-off* (Figura 20). Se tale fenomeno persiste per un periodo prolungato, può determinare processi di erosione del pendio, in particolare lungo il piede del versante, cioè la porzione che svolge una funzione di supporto meccanico per il mantenimento dell'equilibrio dell'intera scarpata.

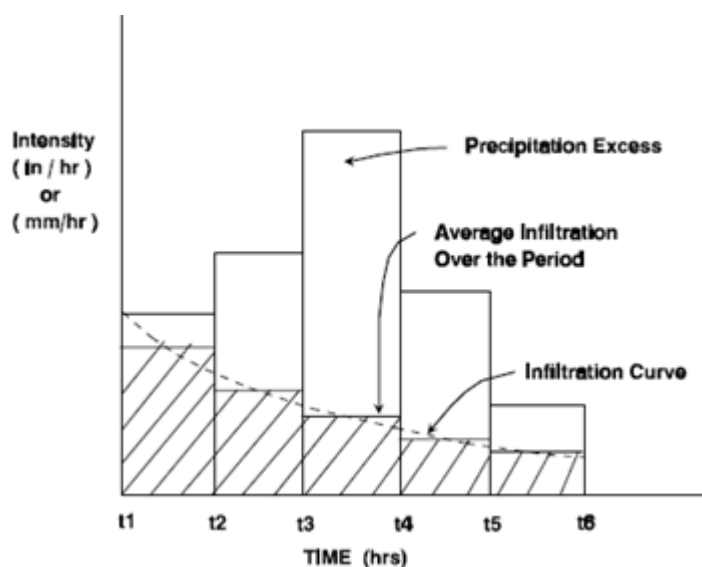


Figura 20 Raffigurazione grafica della legge di Horton. Col tempo l'aumento delle precipitazioni comporta una maggiore saturazione del terreno diminuendo la capacità di infiltrazione (f_p) e aumentando il deflusso superficiale (o *run-off*). (Immagine tratta dall' USACE HEC-HMS: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsguides/applying-loss-methods-in-hec-hms/introduction-to-the-loss-rate-tutorials>).

Sebbene le precipitazioni rappresentino il principale fattore predisponente all'innescio del distacco lungo i versanti, anche l'assenza di vegetazione dotata di apparato ipogeo profondo contribuisce in modo significativo alla riduzione della coesione del terreno, e di conseguenza, della sua stabilità.

Come discusso in precedenza, la mancanza in quest'area di colture o coperture vegetali con apparati radicali profondi impedisce la formazione di una fitta rete di "sostegni" naturali, capaci di mantenere coeso il terreno (Figura 21) e di limitare il *run-off* superficiale (Schwarz et al., 2010), riducendo così, anche l'erosione idrica.

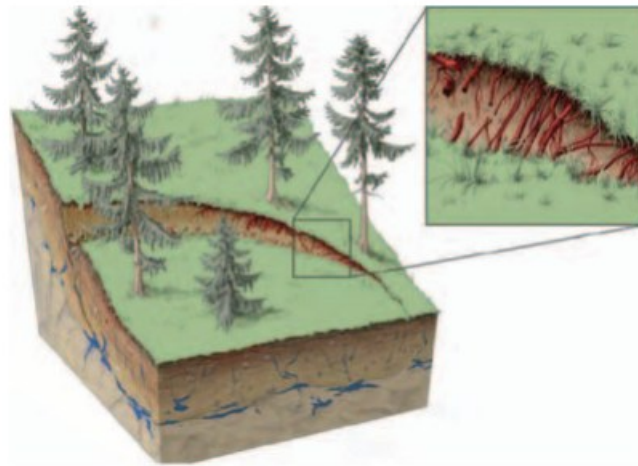


Figura 21 Illustrazione dell'attivazione del rinforzo radicale durante la formazione di una fessura di trazione in una frana superficiale. (Immagine tratta da Schwarz et al., 2010; recuperabile presso l'indirizzo online: www.interscience.wiley.com/journal/espl).

6. CONCLUSIONI

Sulla base delle analisi condotte, il versante meridionale del Monte Grumo mostra condizioni di potenziale instabilità, riconducibili alla presenza di livelli argilloso-limosi sovrapposti alla roccia vulcanica alterata, la quale presenta invece caratteristiche di maggiore stabilità e resistenza.

Come discusso nel Capitolo 5, l'eventuale sviluppo di un fenomeno gravitativo risulta legato soprattutto al verificarsi di eventi meteorici intensi e alla conseguente generazione di sovrappressioni neutre all'interno del terreno.

Per ridurre il rischio potrebbe essere utile una valutazione più approfondita dell'impatto che il disboscamento per la creazione di zone di coltura ha avuto sull'area ed in particolare sul pendio. Il rimboschimento di alberi ad alto fusto lungo i versanti più instabili come quello analizzato potrebbe essere una soluzione relativamente poco costosa ed efficace per ristabilizzare il pendio, oltre che per il ripristino dell'ecosistema forestale.

Alla luce dei risultati ottenuti, resta comunque da sottolineare come la possibilità che nell'area del Marosticano si verifichino eventi meteorici intensi e prolungati rappresenta un fattore di rischio non trascurabile. In presenza di terreni con le proprietà oggetto di studio, tali eventi, come descritto, potrebbero determinare una nuova mobilitazione del versante.

Bibliografia

ARPAV. (2023). *Carta dei suoli in scala 1:50.000* [Mappa interattiva]. Consultato il 17 luglio 2026, da <https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/suolo/geoportale/carta-dei-suoli-interattiva>

Beccaluva, L., Bianchini, G., Bonadiman, C., Coltorti, M., Milani, L., Salvini, L., Siena, F., & Tassinari, R. (2007). Intraplate lithospheric and sublithospheric components in the Adriatic domain: Nephelinite to tholeiite magma generation in the Paleogene Veneto volcanic province, southern Alps. In L. Beccaluva, G. Bianchini, & M. Wilson (Eds.), *Cenozoic volcanism in the Mediterranean area* (pp.145–168). Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2007.2418\(07\)](https://doi.org/10.1130/2007.2418(07))

Bellieni, G., Fioretti, A. M., Marzoli, A., & Visonà, D. (2010). Permo-Paleogene magmatism in the Eastern Alps. *Rendiconti Lincei*, 21 (Suppl 1), 51–71.

Bosellini, A. (1989). Dynamics of Tethyan carbonate platforms. In P. Crevello, J. L. Wilson, J. F. Sarg, & J. F. Read (Eds.), *Controls on carbonate platform and basin development* (SEPM Special Publication, Vol. 44, pp. 3–13). SEPM.

Bosellini, A. (2004). The Western passive margin of Adria and its carbonate Platform. *Special Volume of the Italian Geological Society for the 32nd International Geological Congress*, 79-92.

Busnardo, E. (2016). *Studio dei fattori geotecnici e mineralogici che inducono fenomeni di instabilità nelle coltri di alterazione dei depositi vulcanici terziari nel settore pre-alpino della Provincia di Vicenza* [Tesi di dottorato, Università degli Studi di Padova]. Padua Research Archive. <https://hdl.handle.net/11577/3424347>

Dalla Costa, L. (2014). *Caratterizzazione geotecnica e mineralogica dei terreni coinvolti in frane superficiali della provincia di Vicenza* [Tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Padova].

Di Francesco, R. (2019). *Teoria e pratica della consolidazione dei terreni*. Dario Flaccovio Editore. https://www.google.it/books/edition/Teoria_e_pratica_della_consolidazione_de/XVMAEAAAQBAJ?hl=it&gbpv=1&dq=idrolisi+dei+basalti&pg=PA46&printsec=frontcover

Fine Software. (2024). *GEO5: Stabilità dei pendii* (Versione 2026) [Software informatico]. <https://www.finesoftware.it/>

ISPRA. (2008). *Capitolo 10: Veneto*. In *Rapporto sulle frane in Italia* (pp. 433–462). Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. Consultato il 5 luglio 2026, da <https://www.isprambiente.gov.it/contentfiles/00003200/3228-capitolo-10-veneto.pdf>

ISPRA. (s.d.). *IdroGEO: la piattaforma italiana sul rischio idrogeologico* [Banca dati interattiva]. Consultato il 14 luglio 2026, da <https://idrogeo.isprambiente.gov.it/app/>

MASE. (s.d.). *Sistema Informativo MASE - Viewer geografico* [Mappa interattiva]. Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. Consultato il 2 luglio 2026, da <https://sim.mase.gov.it/portalediaccesso/mappe/#/viewer/new>

Museo Naturalistico delle Bregonze. (s.d.). *Il contesto: Le Bregonze*. Consultato il 30 luglio 2026, da <https://anthracotherium.wixsite.com/museodellebregonze/le-bregonze>

Piccoli, G. (1967). *Carta geologica del Marosticano occidentale fra Thiene e la valle del torrente Laverda nel Vicentino* (Scala 1:20.000) [Carta geografica]. Litografia Artistica Cartografica. Digitalizzato dalla Biblioteca di Geoscienze - Università di Padova su PHAIDRA. Consultato il 18 luglio 2026, da <https://phaidra.unipd.it/detail/o:453837?mode=full>

Provincia di Vicenza. (s.d.). *Geoportale della Provincia di Vicenza* [Mappa interattiva]. Consultato il 7 luglio 2026, da <https://geoportale.provincia.vicenza.it/home.asp?sezione=2>

Rossato, S., Monegato, G., Mozzi, P., Cucato, M., Gaudioso, B., & Miola, A. (2013). Late Quaternary glaciations and connections to the piedmont plain in the prealpine environment: The middle and lower Astico Valley (NE Italy). *Quaternary International*, 288, 8–24. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.03.005>

Schwarz, M., Lehmann, P., & Or, D. (2010). Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes from a bundle of roots to tree stands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(3), 354–367. <https://doi.org/10.1002/esp.1927>

Trevisani, E. (1994). Evoluzione paleogeografica e stratigrafia sequenziale del margine orientale del Lessini Shelf durante l'Eocene inferiore-medio (Marosticano - Bassanese, Prealpi Venete). *Memorie di Scienze Geologiche*, 46, 1–15.

Zampieri D. (1995) Tertiary extension in the southern Trento Platform, Southern Alps, Italy. *Tectonics*, 14(3), 645–657. <https://doi.org/10.1029/94TC03093>