



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

SCUOLA DI SCIENZE

Dipartimento di Geoscienze

Direttrice Prof.ssa Cristina Stefani

*TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN GEOLOGIA E GEOLOGIA
TECNICA*

***IL SISTEMA DI MONITORAGGIO DELLA
FRANA DI SANT'ANDREA, PERAROLO DI
CADORE (BL)***

Relatore: Prof. Antonio Galgaro

Correlatori: Dott. Lorenzo Cadrobbi

Dott. Giordano Teza

Laureando: Federico Bridi

ANNO ACCADEMICO 2017 / 2018

A Silvana

ABSTRACT

This work about the monitoring of S. Andrea's landslide, in the Province of Belluno (Northern Italy), contains a resume of the actual knowledge about the moving slope. A detailed monitoring through different techniques brings to the definition of a complex geological-hydrogeological conceptual model. Because of the particular geological characteristics of the slope interested by landslide, this thesis could represent a case of study that increases the poor bibliography about landslides in gypsum or in gypsum-rich materials.

To this purpose, the evolution during the years of the phenomenon and the actual state of S. Andrea's landslide monitoring system are described. A critical interpretation of data processing recorded by monitoring equipment let the improvement of landslide's strain and kinematics knowledge. Data acquired with different monitoring techniques (especially with the topographic total station monitoring system and with the photogrammetric surveys) are compared to recognize capabilities and limitations of each one. These useful observations, previously done by University of Padua, have been taken into account for designing improvements of the monitoring system.

In the end, monitoring data take part in a focused planning of modern structures, designed to the containment/conditioning of the upper part of S. Andrea's landslide.

Il presente lavoro inerente il monitoraggio della frana di Sant'Andrea, nel Cadore Bellunese (Italia nord-orientale), presenta un riassunto sullo stato attuale delle conoscenze del versante in movimento, che confluiscono nella definizione di un modello geologico-idrogeologico concettuale complesso, determinato grazie ad un monitoraggio di dettaglio della frana attraverso tecniche e strumentazioni diverse. Date le peculiari (e per molti aspetti complicate) caratteristiche geologiche del versante sui cui la frana è impostata, la seguente tesi può rappresentare un caso di studio che viene ad ampliare la bibliografia piuttosto limitata in merito ai fenomeni franosi in materiali gessosi.

A tal fine, si riporta l'evoluzione nel corso degli anni del fenomeno ed una fotografia dello stato attuale del sistema di monitoraggio della frana di Sant'Andrea. Un'interpretazione critica delle elaborazioni dei dati provenienti dalle diverse strumentazioni che monitorano il versante in movimento consente l'affinamento delle conoscenze sul fenomeno stesso in termini cinematici e deformativi. La disponibilità di dati ottenuti attraverso diverse tecniche di monitoraggio (ad esempio con il sistema basato su stazione topografica totale e con i rilievi fotogrammetrici) ne permette il confronto, determinando le potenzialità ed i limiti di ciascuna tecnica, e, quindi, la progettazione di possibili integrazioni del sistema attualmente funzionante, come già fatto dall'Università degli Studi di Padova.

Infine, i dati di monitoraggio confluiscono nella progettazione mirata di opere per la mitigazione della pericolosità della frana di Sant'Andrea, concepite secondo approcci moderni di contenimento/condizionamento del fenomeno deformativo.

INDICE

| | |
|--|----|
| INTRODUZIONE | 9 |
| CAPITOLO 1: Inquadramento dell'area di studio | 11 |
| 1.1 Inquadramento geografico | 11 |
| 1.2 Inquadramento geologico-strutturale | 14 |
| 1.2.1 Introduzione | 14 |
| 1.2.2 Successione litologica | 16 |
| 1.2.3 Tettonica..... | 25 |
| 1.3 Inquadramento geomorfologico..... | 30 |
| 1.3.1 Introduzione | 30 |
| 1.3.2 Gli agenti morfogenetici e le relative forme e depositi..... | 31 |
| 1.3.3 Evoluzione morfogenetica del rilievo | 32 |
| 1.3.4 Principali elementi naturali ed antropici dell'area in esame | 33 |
| 1.4 Inquadramento climatico-idrologico | 42 |
| 1.4.1 Introduzione | 42 |
| 1.4.2 Inquadramento climatico..... | 42 |
| 1.4.3 Inquadramento idrologico | 53 |
| 1.5 Inquadramento idrogeologico | 56 |
| CAPITOLO 2: Fenomeni di dissesto idrogeologico in aree a substrato gessoso.. | 59 |
| 2.1 Gesso e anidrite: strutture mineralogiche e ambienti di formazione | 59 |
| 2.2 I fenomeni che coinvolgono il gesso | 60 |
| 2.2.1 I cambiamenti di fase: idratazione dell'anidrite e deidratazione del gesso | 60 |
| 2.2.2 La dissoluzione nell'acqua..... | 62 |
| 2.2.3 Gli effetti dei fenomeni di idratazione/deidratazione e di dissoluzione sulle proprietà geotecniche dei terreni contenenti gesso e/o anidrite..... | 63 |
| 2.3 Il processo di dissoluzione del gesso | 65 |
| 2.4 Il carsismo su substrato gessoso | 69 |
| 2.5 Il rischio nelle aree carsiche | 71 |
| 2.6 Le caratteristiche delle frane su substrato gessoso | 73 |
| 2.6.1 Gli effetti del carsismo sui pendii | 73 |
| 2.6.2 Il ruolo del carsismo nei fattori preparatori, predisponenti e innescanti i fenomeni franosi..... | 73 |

| | |
|---|-----|
| 2.6.3 L'influenza del carsismo sulle diverse tipologie di frane | 77 |
| 2.7 Esempi di fenomeni franosi impostati su substrato gessoso..... | 78 |
| 2.7.1 Le scarpate in gesso e le valli fluviali asimmetriche del bacino del fiume Ebro (Spagna Nord-orientale)..... | 78 |
| 2.7.2 Il fenomeno di dissoluzione profonda nelle Alpi Occidentali | 80 |
| 2.7.3 L'influenza della presenza di gesso nel bacino di Schlucher, Liechtenstein | 83 |
| 2.7.4 Caratterizzazione della superficie di rottura di una massa in movimento in materiale gessoso (Alpi occidentali, Svizzera) | 87 |
| 2.7.5 Gli strati gessosi come vie preferenziali dei flussi idrici sotterranei | 90 |
| 2.7.6 Il rischio idrogeologico in un area carsica (Verduno, Piemonte, Italia) | 92 |
| 2.8 La stabilizzazione di terreni gessosi | 94 |
| 2.9 Considerazioni riassuntive..... | 95 |
| CAPITOLO 3: La frana di Sant'Andrea | 97 |
| 3.1 Introduzione | 97 |
| 3.1.1 Dimensioni del fenomeno | 97 |
| 3.1.2 Principali aspetti rilevati sul terreno | 102 |
| 3.2 Cenni storici sull'evoluzione del fenomeno e del versante in cui è impostato | 107 |
| 3.2.1 Evoluzione del fenomeno prima dell'evento del 2000 | 107 |
| 3.2.2 Evento franoso del 18 novembre 2000 | 110 |
| 3.2.3 Evoluzione del fenomeno negli anni 2000..... | 114 |
| 3.2.4 Interventi realizzati e strumenti installati negli anni 2000..... | 115 |
| 3.3 Valutazione del rischio per l'abitato di Perarolo | 118 |
| CAPITOLO 4: Indagini geofisiche e sondaggi geognostici..... | 124 |
| 4.1 Introduzione..... | 124 |
| 4.2 Indagini geofisiche..... | 125 |
| 4.2.1 Indagini sismiche a rifrazione | 126 |
| 4.2.2 Indagini geoelettriche..... | 135 |
| 4.3 Sondaggi geognostici..... | 149 |
| 4.3.1 Sondaggi datati dicembre 1966..... | 149 |
| 4.3.2 Sondaggi datati agosto 1986 | 152 |
| 4.3.3 Sondaggi datati settembre-ottobre 2003 | 156 |

| | | |
|---|--|-----|
| 4.3.4 | Considerazioni riassuntive | 162 |
| 4.4 | Altre indagini | 163 |
| 4.4.1 | Sonde inclinometriche..... | 163 |
| 4.4.2 | Piezometri | 172 |
| CAPITOLO 5: Modello geologico ed idrogeologico concettuale..... | | 176 |
| 5.1 | Introduzione | 176 |
| 5.2 | Modello geologico concettuale del versante su cui è impostata la frana di Sant'Andrea | 176 |
| 5.2.1 | Definizione delle unità geologiche..... | 177 |
| 5.2.2 | Sezioni geologiche riassuntive..... | 180 |
| 5.2.3 | Considerazioni riassuntive | 192 |
| 5.3 | Modello idrogeologico del versante | 192 |
| 5.3.1 | Permeabilità delle unità del modello geologico concettuale..... | 193 |
| 5.3.2 | Bacino idrografico e bacino idrogeologico | 196 |
| 5.3.3 | Domini idrogeologici di filtrazione/scorrimento idrico sotterraneo ... | 197 |
| 5.3.4 | Considerazioni riassuntive | 203 |
| CAPITOLO 6: Il monitoraggio della frana di Sant'Andrea..... | | 206 |
| 6.1 | Introduzione | 206 |
| 6.2 | Evoluzione del sistema di monitoraggio..... | 207 |
| 6.3 | Interpretazione dei dati di monitoraggio..... | 212 |
| 6.4 | Riassunto ultimi dati di monitoraggio dell'Università | 213 |
| 6.4.1 | Prima fase della Convenzione di ricerca..... | 213 |
| 6.4.2 | Seconda fase della Convenzione di ricerca..... | 218 |
| CAPITOLO 7: Elaborazione dei dati di monitoraggio..... | | 236 |
| 7.1 | Introduzione | 236 |
| 7.2 | Elaborazione dei dati della stazione topografica totale robotizzata..... | 237 |
| 7.2.1 | Introduzione | 237 |
| 7.2.2 | Rilevamento della posizione delle mire ottiche | 241 |
| 7.2.3 | Calcolo dei campi di spostamento negli intervalli di tempo intercorsi fra l'aggiunta di nuove mire | 243 |
| 7.2.4 | Calcolo dei campi di spostamento nei bimestri dell'ultimo anno dal 12/06/2017 al 07/06/2018 | 260 |

| | | |
|--|---|-----|
| 7.2.5 | Calcolo del rapporto tra la componente orizzontale e verticale dei vettori spostamento alle diverse mire..... | 276 |
| 7.2.6 | Calcolo del campo di deformazione a partire dai dati di spostamento delle mire della stazione topografica totale di Perarolo di Cadore (BL) | 279 |
| 7.2.7 | Cross-correlazione della cumulata pluviometrica giornaliera con la velocità di spostamento medie delle mire nell'ultimo anno | 289 |
| 7.2.8 | Evento del 12 dicembre 2017..... | 305 |
| 7.3 | Elaborazione dei dati ottenuti attraverso il rilievo fotogrammetrico da drone | 312 |
| 7.3.1 | Introduzione | 312 |
| 7.3.2 | Rilevamento della posizione dei 'ground control point' (10/05/2018)..... | 314 |
| 7.3.3 | Elaborazione dei dati ottenuti dalla fotogrammetria delle immagini rilevate il 10/05/2018 | 315 |
| 7.3.4 | DEM Of Difference ('DOD'): calcolo degli spostamenti verticali..... | 316 |
| 7.3.5 | Considerazioni riassuntive | 322 |
| 7.4 | Considerazioni riassuntive..... | 322 |
| CAPITOLO 8: Integrazioni del sistema di monitoraggio | | 324 |
| 8.1 | Introduzione..... | 324 |
| 8.2 | Integrazioni del sistema di monitoraggio topografico con stazione topografica totale robotizzata | 325 |
| 8.3 | Integrazione del sistema di monitoraggio con stazioni GPS/GNSS | 328 |
| 8.4 | Integrazione dei sistemi estensimetrici e fessurimetrici | 329 |
| 8.5 | Installazione del sistema di monitoraggio mediante webcam fotogrammetriche..... | 331 |
| 8.6 | Integrazione dei dati provenienti dalle diverse strumentazioni | 333 |
| CAPITOLO 9: Progettazione geologica delle opere e dei sistemi finalizzati alla mitigazione della pericolosità della frana di Sant'Andrea | | 335 |
| 9.1 | Introduzione..... | 335 |
| 9.2 | Opera di contenimento a valle del vecchio tracciato ferroviario | 338 |
| 9.3 | Sistema di captazione delle acque di filtrazione/scorrimento "poco profondo"..... | 344 |
| 9.4 | Monitoraggio | 346 |
| 9.5 | Indagini in corso d'opera | 347 |
| 9.6 | Interventi di impermeabilizzazione eseguiti nell'estate 2018 | 347 |

| | |
|--|-----|
| CONCLUSIONI..... | 349 |
| RINGRAZIAMENTI | 352 |
| RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI | 354 |
| ALLEGATI | 365 |
| Carta geomorfologica della frana di Sant’Andrea (Perarolo di Cadore, BL) e dell’area a monte..... | 367 |
| Andamento delle variabili meteorologiche ‘altezza di precipitazione’, ‘giorni piovosi’ e ‘temperatura media a 2 m dal suolo’ annuali e medie mensili alla stazione meteorologica ARPAV di Valle di Cadore (794 m s.l.m.)..... | 369 |
| Andamento delle variabili meteorologiche ‘altezza di precipitazione’, ‘giorni piovosi’ e ‘temperatura media a 2 m dal suolo’ annuali e medie mensili alla stazione meteorologica ARPAV di Domegge di Cadore (822 m s.l.m.)..... | 377 |
| Interpretazione sondaggi geognostici (S1, S2, S3) riportati nella relazione “Indagini geognostiche, geotecniche e geofisiche propedeutiche al progetto di consolidamento di versanti in frana, interventi in alveo e ripristino viabilità. Indagine geognostica. Prove di laboratorio”, Geosondaggi S.p.a. (2003) [21]. | 385 |
| Interpretazione dei sondaggi geognostici riportati in allegato alla “Relazione geologica su n. 4 sondaggi eseguiti in località Busa del Cristo nel comune di Perarolo (Provincia di Belluno)”, geol. V. Fenti (1987) [16]...... | 389 |
| Campi degli spostamenti della frana di Sant’Andrea, ottenuti dall’interpolazione dei dati registrati dalla stazione topografica totale robotizzata di Perarolo di Cadore (BL). Gli spostamenti sono calcolati sugli intervalli di tempo intercorsi tra l’aggiunta di nuove mire..... | 395 |
| Campi degli spostamenti della frana di Sant’Andrea, ottenuti dall’interpolazione dei dati registrati dalla stazione topografica totale robotizzata di Perarolo di Cadore (BL). Gli spostamenti sono calcolati sui 6 bimestri dell’ultimo anno (ultimi 360 giorni)..... | 401 |

INTRODUZIONE

La frana di Sant'Andrea (chiamata anche “frana della Busa del Cristo”), collocata nei territori comunali di Perarolo di Cadore e di Valle di Cadore, in provincia di Belluno nell'Italia Nord-Orientale, rappresenta una fonte di elevato rischio idrogeologico per il centro storico dell'abitato di Perarolo. La sua attività nel corso degli ultimi anni ha mostrato alternanza di fasi caratterizzate da movimenti lenti e di periodi di crisi con un incremento generalizzato delle velocità di spostamento del versante, in alcuni casi evoluti in eventi parossistici che hanno coinvolto importanti volumi di materiale e determinato l'ostruzione dell'alveo del torrente Boite sottostante.

Il rischio che la frana di Sant'Andrea costituisce per le abitazioni del paese di Perarolo e gli effetti indotti dai movimenti del fenomeno franoso sul tracciato ferroviario (ormai dismesso) collocato sul versante hanno indotto la Regione del Veneto (dagli anni 2000 anche tramite la stipulazione di convenzioni di ricerca con l'Università degli Studi di Padova) e Rete Ferroviaria Italiana a condurre nel corso degli anni una serie di indagini di varia natura: dall'installazione di sonde inclinometriche e piezometri, all'esecuzione di indagini geofisiche, a misure topografiche di dettaglio ed, infine, alle tecniche più moderne di ‘remote sensing’.

Inoltre, alcuni interventi di stabilizzazione del versante sono stati eseguiti a partire dagli anni '90 del 1900 con scarsi risultati anche a causa della complessità geologica ed idrogeologica dell'area.

Questo lavoro di tesi si inserisce, dunque, all'interno del contesto di monitoraggio della frana di Sant'Andrea, analizzando in particolare i dati delle strumentazioni collocate in sito e delle indagini eseguite nel corso dell'ultimo anno, in cui il fenomeno si è mostrato particolarmente attivo. Il monitoraggio è indirizzato per scopi sia di protezione civile che conoscitivi. In quest'ultimo caso, i risultati del lavoro concorrono alla definizione di interventi di sistemazione mirati ed efficaci.

A tal proposito, si farà riferimento alla progettazione geologica della nuova opera di contenimento/condizionamento di parte del fenomeno deformativo, che sarà realizzata a valle del vecchio tracciato ferroviario ed i cui studi geologici sono stati eseguiti da *Geologia Applicata Studio Associato* di Mezzocorona (TN), presso il quale lo scrivente nel corso dei mesi da marzo ad agosto 2018 ha svolto un tirocinio curriculare, che ha consentito di seguire alcune fasi preliminari del progetto stesso.

CAPITOLO 1: Inquadramento dell'area di studio

1.1 Inquadramento geografico

La zona di studio è localizzata a cavallo delle aree di competenza comunale dei municipi di Perarolo di Cadore e Valle di Cadore in provincia di Belluno, nell'Italia Nord-orientale (Figura 1 in alto). Il contesto geografico è quello delle Alpi Meridionali Orientali.

Il versante in frana è situato sulla sinistra idrografica del torrente Boite e a Nord dell'abitato di Perarolo di Cadore, località ubicata in prossimità del nodo idraulico di confluenza tra il torrente Boite ed il fiume Piave. Entrambi i corsi d'acqua a monte del paese incidono le rispettive valli a controllo strutturale-litologico. Il pendio oggetto di studio si estende dalla quota di 630 m s.l.m. del tracciato della vecchia linea ferroviaria Treviso-Calalzo ai 530 m s.l.m. del torrente Boite. Inoltre, anche la porzione del versante a monte della ex ferrovia e che raggiunge la località di Damos a quota 775 m s.l.m. circa è caratterizzata localmente da fenomeni di instabilità di versante, sebbene di minor entità, rispetto all'area di dissesto di Sant'Andrea.

La topografia dell'area è contraddistinta, oltre che dalla presenza del nodo idraulico, dei due corsi d'acqua principali e delle incisioni fluviali, dalla cima del Monte Zucco e dal dosso di Damos rispettivamente a N-NW e a N-NE di Perarolo (Figura 1 in basso).

Le opere antropiche principali presenti sono:

- l'abitato di Perarolo;
- la salita della Cavallera, la quale, dopo il ponte sul torrente Boite, da Perarolo sale sul versante in destra orografica del fiume Piave, raggiungendo le località di Costa, San Rocco e Sant'Andrea. Il secondo tornante di tale strada è stato spostato

verso est a seguito dei danni subiti a causa dei movimenti della frana di Sant'Andrea;

- la strada comunale di Perarolo di Cadore con il ponte sul fiume Piave e che collega, in sinistra Piave, Perarolo con l'abitato di Caralte;
- l'ex tracciato ferroviario che taglia il versante alla sinistra orografica del torrente Boite e che in direzione del paese di Perarolo di Cadore entra in galleria;
- la cava di gessi di Damos.

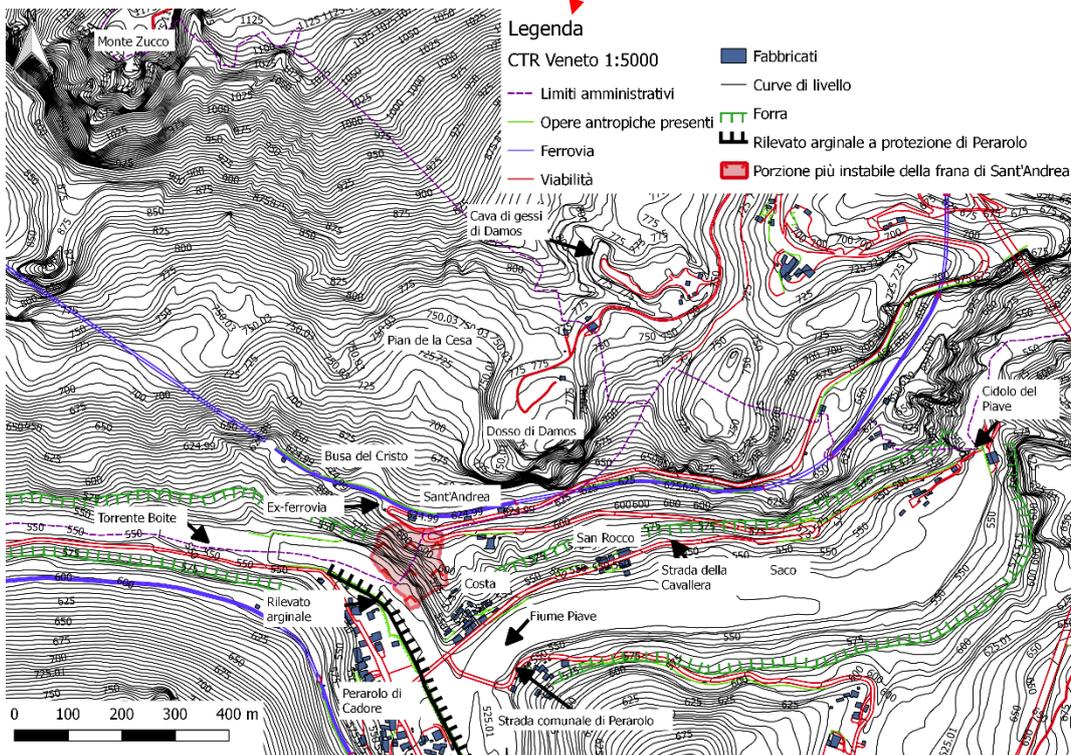
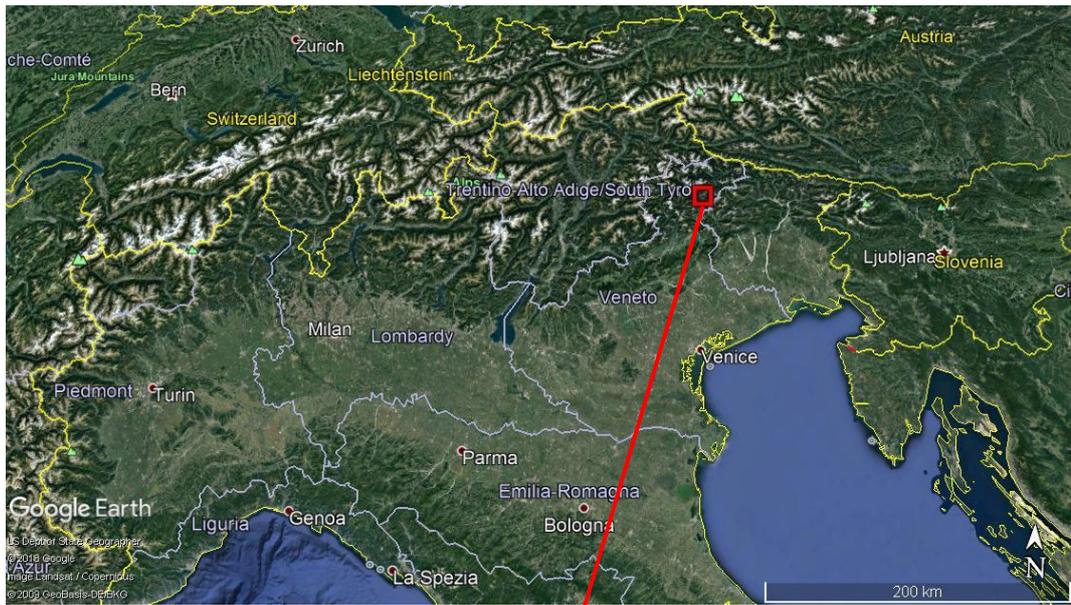


Figura 1 In alto localizzazione dell'area di studio nell'Italia Settentrionale (immagine estratta da Google Earth [23]). In basso carta con i principali elementi topografici che caratterizzano l'area a Nord di Perarolo di Cadore (BL). La base topografica è il 'shapefile' scaricabile sul sito dell'Infrastruttura dei Dati Territoriali della Regione Veneto, in particolare la CTR a scala 1:5000 [42]. Elaborazione dello scrivente.

1.2 Inquadramento geologico-strutturale

1.2.1 Introduzione

Per quanto riguarda l'inquadramento geologico e strutturale dall'area in esame si fa riferimento a:

- la *“Relazione geologica applicata” nell’ambito dello “Studio geologico applicato delle pendici montane sovrastanti Perarolo (Belluno), nel quadro della protezione idro-geologica del centro abitato” dei geologi Cargnel G., Pellegrini G.B. e Valdinucci A., datata 1978; [38]*
- la *“Relazione geologico-tecnica” nell’ambito dello “Studio sui fenomeni franosi generalizzati del Monte Zucco e di aree ad esso prossime nei comuni di Perarolo di Cadore e Valle di Cadore (BL)” redatta nell’ambito della convenzione tra Regione Veneto (Direzione Difesa del Suolo e Protezione Civile) e l’Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geologia, Paleontologia e Geofisica), resp. Prof. R. Genevois, datata 2003; [53]*
- la *“Relazione geologica” nell’ambito della “Linea Treviso-Calalzo. Variante di tracciato della galleria di M. Zucco tra il km 121+0.38 e il km 124+850 circa” per le Ferrovie dello Stato sotto il responsabile ing. Mele R.; [17]*
- la *“Relazione Tecnico Illustrativa” nell’ambito dello “Studio di prefattibilità relativo ai possibili interventi di mitigazione per gli scenari di rischio geologico, idraulico e di consolidamento dell’abitato di Perarolo di Cadore (BL)” redatta dalla società SGI Studio Galli Ingegneria S.p.A. e datata 2012. [45]*

Ciascuna di queste fonti richiama diversi Autori, i quali nei loro studi hanno trattato della geologia della zona in esame o delle aree limitrofe, anche se la zona non risulta essere stata oggetto di specifici rilevamenti geologici di dettaglio [53].

L'area, inserita all'interno delle Alpi Meridionali Orientali e, più precisamente, delle Dolomiti Orientali, presenta successioni stratigrafiche tipiche della regione Dolomitica. Le sequenze sedimentarie permo-triassiche si rinvengono al di sopra del basamento cristallino che affiora più a est e sono interessate da strutture legate

alle paleo-geografie triassiche e giurassiche. In tali successioni si riconoscono, inoltre, le deformazioni legate ad un'intensa attività tettonica terziaria distinta in almeno due fasi con geometrie circa perpendicolari tra loro (una prima fase con compressione orientata NE-SW o E-W e una seconda fase con compressione orientata N-S). Questo carattere risulta evidente nell'area del Monte Zucco, dove gli assi di deformazione tettonica si allineano con quelli principali della regione Carnica. Quindi, tale zona viene a rappresentare un punto di transizione (la cosiddetta "Giunzione Cadorina", *Leonardi 1968* citata nella relazione dell'*Università degli Studi di Padova del 2003* [53], Figura 2) tra:

- 1) i regimi deformativi assimilabili a quelli delle Prealpi Venete orientali con strutture orientate E-W o NE-SW ('stile cadorino' [17]) e asse di compressione N-S;
- 2) e i regimi deformativi, tipici dell'area Carnica, con strutture orientate N-S e asse di compressione E-W.

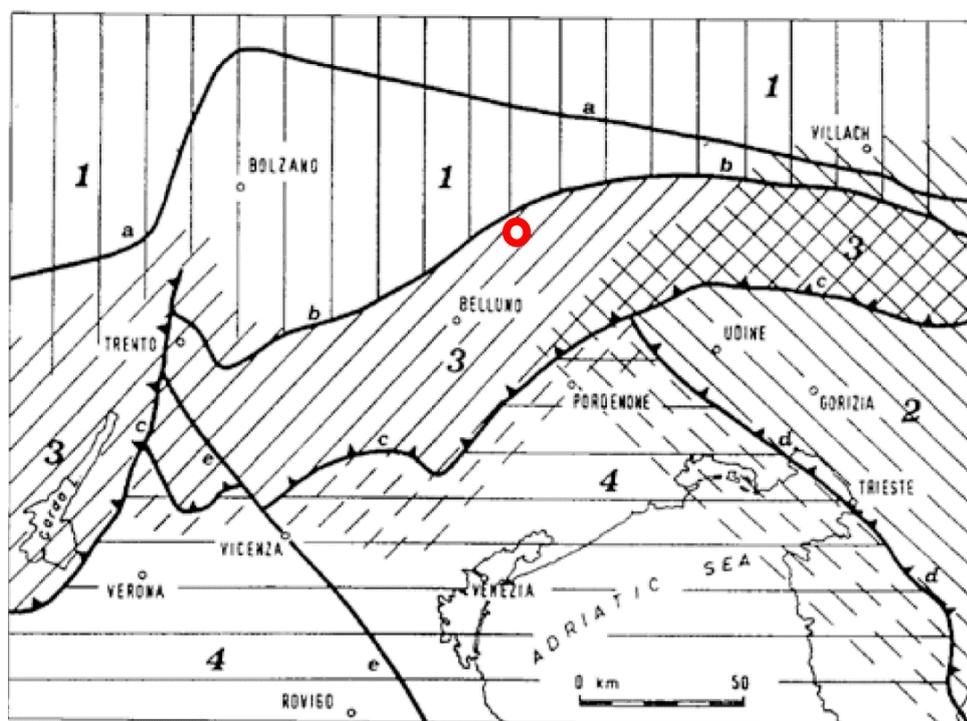


Figura 2 Schema tettonico delle Alpi Orientali (Slejko,1987). Immagine riportata nella relazione dello Studio Galli "Interventi di mitigazione per gli scenari di rischio geologico, idraulico e di consolidamento dell'abitato di Perarolo di Cadore (BL). STUDIO DI PREFATTIBILITÀ", (2012) [45]. Con il cerchio rosso viene riportata la posizione dell'area di studio.

La peculiarità di zona di transizione tra due domini differenti non è limitata al solo aspetto strutturale, anche dal punto di vista paleo-geografico si nota, infatti, un'affinità orientale [53]. La differenziazione in termini paleo-geografici tra il dominio occidentale e quello orientale si esplica nel corso del Giurassico (*corso di 'Geologia stratigrafica e regionale', dispense ed appunti*, [11]) ed è legata ad una morfologia ad 'horst' e 'graben', sviluppatasi con asse di estensione orientato approssimativamente in direzione Est-Ovest e che ha determinato una sedimentazione di tipo bacinale nei 'graben' del Bacino Lombardo e del Bacino Bellunese, mentre la formazione di sequenze sedimentarie tipiche di piattaforma sugli 'horst', costituiti dalla Piattaforma Trentina e dalla Piattaforma Friulana [11]. Il carattere di transizione del bacino Bellunese, in cui l'area di Perarolo è inserita dal punto di vista paleo-geografico, è tanto più marcato in quanto la sua particolare ubicazione inter-piattaforma (tra la Piattaforma Trentina a Ovest e quella Friulana ad Est) gli consente di ricevere apporti sedimentari da entrambi i domini paleo-geografici confinanti [11].

1.2.2 Successione litologica

Come già accennato, la successione sedimentaria dell'area è quella permotriassica tipica della zona Dolomitica. In particolare, per quanto concerne le formazioni del Triassico medio, esse mostrano un carattere bacinale, piuttosto che di piattaforma. Inoltre, il fenomeno franoso di Sant'Andrea interessa quasi esclusivamente la 'Formazione del Raibl' (o 'Formazione di Travenanzes'). Il dosso di Damos, invece, è costituito nella sua porzione inferiore dalla 'Dolomia Cassiana' e nella parte sommitale dalla 'Formazione di Heiligkreuz'. La cima del Monte Zucco è, invece, in Dolomia Principale. La presenza di un'attività estrattiva di gesso a nord del dosso di Damos evidenzia come la 'Formazione del Raibl' riaffiori in tale area: a suggerire una duplicazione della successione stratigrafica dovuta alle deformazioni tettoniche.

Di seguito si descrivono brevemente le formazioni, dalla più antica alla più recente, costituenti la sequenza stratigrafica della zona, concentrandosi soprattutto su quelle di maggior interesse nel caso di studio. Si specifica nuovamente che le formazioni più antiche (ovvero del Permiano Superiore e del Triassico inferiore) sono affioranti solamente al Cidolo del Fiume Piave (situato a monte di Perarolo risalendo il fiume) e costituiscono il nucleo di una piega anticlinale, chiamata ‘anticlinale del Cidolo’ ([17], [38], [53]).

- Formazione di Werfen (affiora al Cidolo del F. Piave): arenarie e siltiti dai colori rossastri-violacei (Membro di San Lucano, di età Anisico inf.-medio/sup. [17]) che insieme alla Dolomia del Serla Inferiore costituiscono il nucleo dell’anticlinale del Cidolo [17]. Dal punto di vista geomeccanico sono rocce poco resistenti e predisponenti ad instabilità; ma sono qui rappresentate con limitata estensione di affioramento ed interessate da modesti fenomeni franosi e di erosione di sponda [38];
- Dolomia del Serla Inferiore (affiora al Cidolo del F. Piave): banco di dolomia stratificati, massiccio e compatto con stratificazione che gradualmente aumenta di spaziatura verso l’alto [17]. A volte si presenta cariata e gessosa [53]. La formazione, di età Anisico inf.-medio/sup. [17], si qualifica come resistente all’erosione [38];
- Formazione di Dont, di età Anisico sup.-inf.? [17], affiora al Cidolo del F. Piave ed è costituita da siltiti, argilliti e marne grigie (giallastre in alterazione) con componente carbonatica variabile [53];
- Formazione di Bivera, di età Anisico sup.-inf.? [17], affiora al Cidolo del F. Piave ed è costituita da un’alternanza di calcari e marne varicolori, spesso bituminosi, con spessori centimetrici e giunti da piani a nodulari [53];
- Formazione dell’Ambata, di età Anisico sup.-inf.? [17], affiora al Cidolo del F. Piave ed è rappresentata da calcari debolmente marnosi e bituminosi con strati centimetrici alternati a marne siltose più fittamente stratificate. Verso l’alto stratigrafico predomina la componente carbonatica a stratificazione massiccia [17];

- Formazione di Livinallongo, di età Ladinico inf.-sup.? [17], affiora al Cidolo del F. Piave ed è costituita: in basso alternanza di calcari bituminosi e silicei con livelli tuffitici più o meno massicci, verso l'alto predomina la componente tuffica con siltiti e lutiti fittamente laminate e tuffiti arenacee di colore verde ('Pietra Verde') [17]. Secondo le informazioni bibliografiche disponibili [38], essa non presenta fenomeni erosivi né dà luogo a particolari problemi di stabilità dei versanti;
- Arenarie di Zoppé, di età Ladinico sup. [53], affiora al Cidolo del F. Piave ed è costituita da successioni di siltiti e arenarie di colore chiaro, gradate e laminate in successione torbiditica. Il limite inferiore con la Formazione di Livinallongo è poco visibile perché tettonizzato;
- Formazione di Acquatona, di età Ladinico medio-sup. [53], affiora al Cidolo del F. Piave ed è rappresentata da un'alternanza di calcilutiti, siltiti, peliti e arenarie fini di colore nero, in livelli millimetrico-centimetrici, laminati e a giunti piano paralleli, che per alterazione si sfaldano in lastre sottilissime e in piccole scaglie. I limiti superiore ed inferiore sono netti, spesso accorpate con le Arenarie di Zoppé per lo spessore esiguo [53]. La formazione per la sua eterogeneità è soggetta a fenomeni di erosione selettiva [38];
- Formazione di Fernazza, di età Ladinico sup. [53], affiora al Cidolo del F. Piave ed è costituita da arenarie vulcanoclastiche in strati metrici amalgamati [53]. I limiti superiore ed inferiore sono obliterati dalla tettonica [53];
- Formazione di La Valle, di età Ladinico sup. [53], affiora al Cidolo del F. Piave ed è rappresentata da un'alternanza di rocce carbonatiche, quali le marne, e terrigene, quali arenarie grigie (giallastre in alterazione) e siltiti [53]. La componente terrigena è frutto della deposizione nei bacini inter-scogliere dei materiali erosi dalle formazioni vulcaniche, mentre quella carbonatica dei materiali erosi dalle scogliere stesse occasionalmente in emersione per le oscillazioni del livello eustatico [17]. Il limite con la soprastante Formazione di San Cassiano, dove visibile è fatto coincidere con la comparsa del primo bancone calcarenitico [53];

- Dolomia dello Sciliar, di età Anisico sup.- Ladinico inf. (da *corso di 'Geologia stratigrafica e regionale', dispense ed appunti*, [11]), affiora in sinistra Piave ed è costituita da dolomie chiare, massicce e a grana zuccherina. L'identificazione di tale formazione nella zona è incerta e ipotizzata in base a considerazioni geometriche e tettoniche [53];
- Formazione di San Cassiano, di età Carnico inf., affiora sotto la spalla destra del Ponte Cadore, al primo tornante tra San Rocco e Sant'Andrea ed è rappresentata da un'alternanza di calcareniti e marne di colore grigio e giallo in alterazione [53]. La formazione mostra il carattere di pseudo-flysch [17];

- Dolomia Cassiana, di età Carnico sup. [53], affiora lungo la salita della Cavallera -Figura 3 - e nella porzione inferiore del dosso di Damos): dolomie cristalline massicce o poco stratificate, in genere di colore chiaro con sfumature violacee [53]. Il limite inferiore con la Formazione di San Cassiano può essere posto in corrispondenza dei primi banconi calcarenitici di spessori decimetrici,



Figura 3 Dolomia Cassiana affiorante dopo il secondo tornante della salita della Cavallera ai piedi del dosso di Damos. Foto dello scrivente del 06/04/2018.

- mentre quello superiore con la Formazione di Duerrenstein è posizionato poco sotto la cengia che si nota sul dosso di Damos [53]. La compattezza della formazione le conferisce un certo grado di stabilità, anche se localmente minata dal distacco di blocchi litici di ridotta pezzatura per l'effetto di alterazione anche crioclastica che si produce all'interno delle numerose fratture che la caratterizzano [38];
- Formazione di Heiligkreuz o di Duerrenstein, di età Carnico sup. [53], affiora nella porzione sommitale del dosso di Damos, nella porzione a meridione del M. Zucco (ovvero quella esaminata) la formazione è costituita da dolomie stromatolitiche a pisoliti vadose, a cui si intercalano calcari micritici scuri, e calcari marnosi e marne scure in strati centimetrico-decimetrici [53]. Gli strati calcarei mostrano piccole intercalazioni argillitiche, mentre quelli dolomitici

risultano spesso amalgamati [53]. Il rilevamento di cavità di essiccamento all'interno della porzione dolomitica indica un processo di dolomitizzazione precoce contemporaneo o immediatamente successivo alla deposizione [17];

- Formazione di Travenanzes o di Raibl (affiora in tutto il versante a sinistra del torrente Boite, in località Sant'Andrea - Figura 4 - e nella cava di gessi di Damos): formazione estremamente eterogenea che dal basso verso l'alto mostra una graduale diminuzione della componente carbonatica e un aumento di quella terrigena con intercalazioni



Figura 4 Facies gessosa della Formazione di Travenanzes intensamente ripiegata ed affiorante in sinistra Boite a valle di Sant'Andrea. Foto dello scrivente del 24/05/2018.

gessose –anidritiche che spesso dominano lungo alcuni orizzonti [17]. Nell'area in esame, in particolare, si notano siltiti ed arenarie quarzose di colore rossastro, le quali sono seguite verso l'alto stratigrafico da una successione di gessi ed anidriti [53]. Alcuni Autori [38] riportano come la marcata erodibilità, sommata alla solubilità, di tale formazione sia dimostrata a livello geomorfologico dall'erosione delle principali aste vallive in corrispondenza degli affioramenti delle arenarie e dei gessi, dalle brusche variazioni di pendenza dei versanti in prossimità degli stessi litotipi e dalla formazione di doline e depressioni carsiche. Ciò si esplica anche nell'innescare dei più importanti movimenti di versante, nelle porzioni di questi caratterizzate da un substrato interessato da tali litologie [38]. Infine, gli stessi Autori [38] osservano come la reologia plastica di tali materiali sia rilevabile nelle strutture di molti affioramenti in zona. I limiti stratigrafici tra questa formazione e quelle soprastanti e sottostanti non sono rilevabili nell'area di studio: i contatti si desume abbiano un carattere tettonico [53]. Nel lavoro dello *Studio Galli (2012)* [45] si classificano i campioni di roccia, prelevanti in prossimità del corpo della frana di Sant'Andrea e verosimilmente appartenenti alla formazione in questione, come: “Roccia evaporitica solfatica con dolomite (e vene

di calcite)”, secondo la nomenclatura di *Murray R. C. (1964) e Ciarapica G., Passeri L., Schreiber B.C. (1985)* citata nella relazione dello *Studio Galli (2012)* [45]. L’età attribuita a tale formazione è il Carnico sup. [53];

- Dolomia Principale (affiora sul versante Meridionale del M. Zucco, di cui ne costituisce anche la cima - Figura 5 - e la cresta che arriva fino a Sottocastello): la formazione è costituita da due facies: quella superiore, rappresentata da dolomie chiare cicliche e stromatolitiche

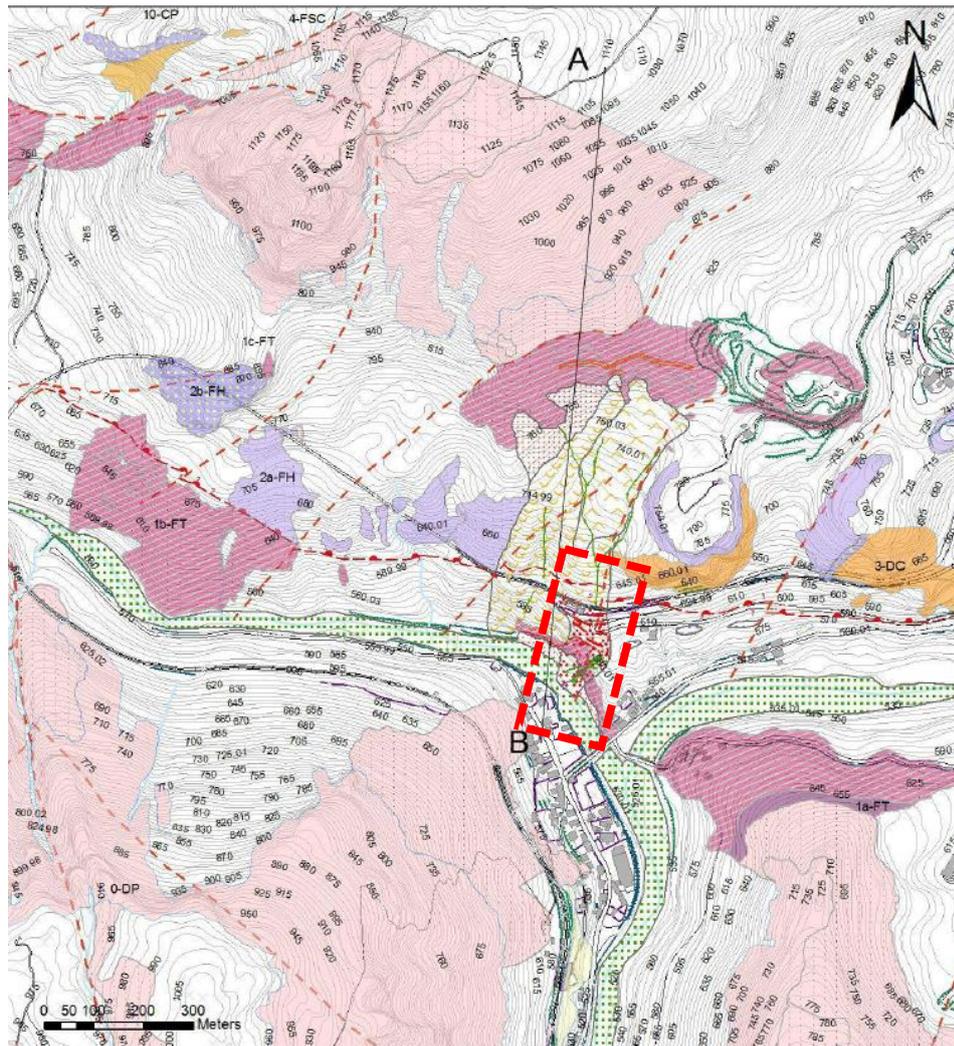


Figura 5 Dolomia Principale affiorante sul versante meridionale e sulla cima del Monte Zucco. Foto dello scrivente del 10/05/2018.

alternate a dolomie più massicce con spessori decimetrici, e quella inferiore, costituita da calcari micritici grigiastri o nocciola, talvolta dolomitizzati [53]. La dolomitizzazione della facies superiore è attribuita a processi metasomatici avvenuti immediatamente dopo la sedimentazione ed in parte anche a processi diagenetici tardivi, nelle porzioni più granulari e porose [17]. Tra i banconi dolomitici si possono individuare più intercalazioni di livelli più plastici [38]. L’età attribuita alla formazione è il Carnico sup.-Retico inf. [53].

A conclusione dell’elenco delle formazioni geologiche affioranti e costituenti il substrato dell’area di interesse si riporta la carta geologica (Figura 6) proposta nella *relazione dell’Università degli Studi di Padova del 2003 nell’ambito della Convenzione con la Regione del Veneto e con responsabile scientifico il prof. R. Genevois* [53]. Si riporta anche una colonna stratigrafica che sintetizza i caratteri litologici della successione sedimentaria descritta in questo paragrafo e nella quale viene evidenziata la duplicazione di parte della sequenza stratigrafica, legata all’evoluzione tettonica dell’area (Figura 7). In particolare, si rappresenta il sovrascorrimento, riconosciuto nella carta geologica di Figura 6 [53], che taglia l’intero versante meridionale del Monte Zucco, venendo ad interessare anche la zona della frana di Sant’Andrea, e che coinvolge soprattutto la Dolomia Cassiana,

la Formazione di Heiligkreuz e la Formazione di Travenanzes, determinando l'affioramento di quest'ultima sia sul fondovalle che in prossimità della cava di gessi di Damos (Figura 6).



| Legenda | |
|---------------------------------------|---|
| Elementi areali geologici | |
| | 0-DP, Dolomia Principale |
| | 0-DP, Dolomia Principale subaffiorante |
| | 10-CP, conglomerato di Perarolo |
| | 1a-FT, Formazione di Travenazes (dolomitico) subaffiorante |
| | 1b-FT, Formazione di Travenazes (anidriti) |
| | 1b-FT, Formazione di Travenazes (anidriti) subaffioranti |
| | 1c-FT, Formazione di Travenazes (terrigeno) |
| | 2a-FH, Formazione di Heiligkreuz (dolomitico) |
| | 2a-FH, Formazione di Heiligkreuz (dolomitico) subaffiorante |
| | 2b-FH, Formazione di Heiligkreuz (carbonatico) |
| | 3-DC, Dolomia Cassiana |
| | 4-FSC, Formazione di San Cassiano |
| Elementi areali geomorfologici | |
| | corpo di frana di scorrimento attiva |
| | ghiaie e sabbie |
| | corpo di frana complesso attiva |
| | corpo di frana di colamento non attiva |
| | corpo di frana di scorrimento non attiva |
| | deposito glaciale |
| | falda di detrito attiva |
| Elementi lineari | |
| | frattura longitudinale |
| | frattura trasversale |
| | nicchia di frana non attiva |
| | orlo di scarpata |
| | solco da ruscellamento |
| | Faglia |
| | Sovrascorrimento |

Figura 6 Carta geologica tratta dalla “Relazione geologico-tecnica” sullo “Studio sui fenomeni franosi generalizzati del Monte Zucco e di aree ad esso prossime nei comuni di Perarolo di Cadore e Valle di Cadore (BL)”, con responsabile scientifico Prof. R. Genevois e datata 2003, nell’ambito della Convenzione tra Regione Veneto (Direzione Difesa del Suolo e Protezione Civile) e l’Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geologia, Paleontologia e Geofisica) [53]. Nel rettangolo perimetrato con il tratteggio rosso è evidenziata l’area della frana di Sant’Andrea.

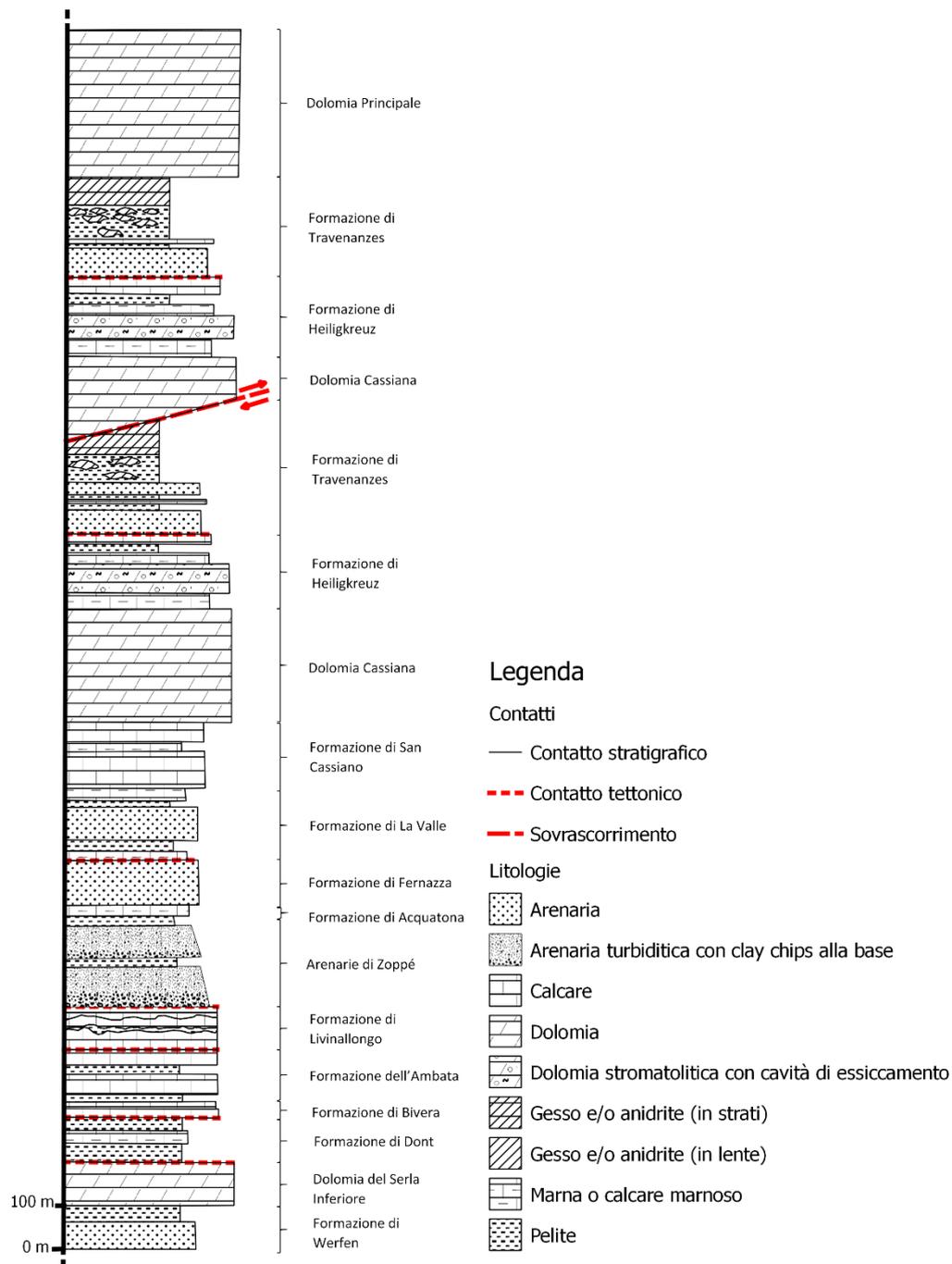


Figura 7 Colonna stratigrafica che rappresenta sinteticamente la successione stratigrafica della area limitrofa a quella di studio e delle zone limitrofe. Elaborazione dello scrivente sulla base delle descrizioni riportate nella “Relazione geologico-tecnica” sullo “Studio sui fenomeni franosi generalizzati del Monte Zucco e di aree ad esso prossime nei comuni di Perarolo di Cadore e Valle di Cadore (BL)”, con responsabile scientifico Prof. R. Genevois e datata 2003, nell’ambito della Convenzione tra Regione Veneto (Direzione Difesa del Suolo e Protezione Civile) e l’Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geologia, Paleontologia e Geofisica) [53].

1.2.3 Tettonica

Come già accennato nell'introduzione al paragrafo, le deformazioni tettoniche a cui è stata soggetta l'area sono legate per lo più ad un'intensa attività terziaria che si può suddividere in due fasi. Il susseguirsi e la sovrapposizione dei due eventi deformativi in questa zona è dovuto al peculiare carattere di transizione che questa riveste e che si può ritenere duplice dal punto di vista tettonico (Figura 2). Infatti, la regione è situata al passaggio tra il dominio Carnico e quello delle Prealpi Venete, ma anche, come ricordato nella relazione dello *Studio Galli (2012)* [45], al passaggio tra due importanti lineamenti tettonici come la Linea Insubrica (a in Figura 2) e la Linea della Valsugana (b in Figura 2). Gli stress tettonici, inoltre, applicati ad una successione stratigrafica così eterogenea e, quindi, caratterizzata da importanti anisotropie in termini di proprietà reologiche dei materiali (i banconi calcareo-dolomitici più rigidi e fragili, mentre le siltiti ed i gessi più duttili e plastici), hanno prodotto un ampio spettro di strutture (faglie, pieghe-faglie e sovrascorrimenti suborizzontali). Il tutto concorre alla definizione di una struttura del substrato roccioso complessa, articolata e con grandi variazioni in intervalli spaziali anche molto limitati.

Le due principali fasi deformative che hanno caratterizzato l'area possono essere così riassunte:

- 1) una prima fase, secondo *Dogliani (1989)*, citato nella relazione dell'*Università degli Studi di Padova del 2003* [53], interpretata come il fronte di avanzamento della Catena Dinarica [53], è caratterizzata da una direzione di compressione E-W e genera sovrascorrimenti W-vergenti, faglie trascorrenti coniugate e pieghe ad asse N-S. Tale deformazione interessa solamente la copertura sedimentaria permo-mesozoica, utilizzando come piani di scollamento gli orizzonti più plastici (siltiti e gessi fungono da 'lubrificanti') e come superfici di taglio discontinuità preesistenti (margini di piattaforma e faglie triassiche-giurassiche). Secondo alcuni riferimenti bibliografici [53], attribuibili a questa fase

sono: i sovrascorrimenti che moltiplicano la successione Formazione di San Cassiano-Formazione di Dürrenstein-Formazione di Travenanzes sui versanti sud-occidentali e meridionali del M. Zucco; il sovrascorrimento (*) che porta la successione triassico media-inferiore sopra le dolomie noriche e carniche al Cidolo del fiume Piave; la presenza a scala metrica di pieghe con asse N-S che interessano la successione marnoso-calcareo in prossimità del Cidolo del fiume Piave. Tali strutture sono, però, in gran parte tagliate e sovrainposte da quelle legate alla fase successiva;

- 2) la seconda fase deformativa, di età neogenica, si esplica attraverso sovrascorrimenti e pieghe S-vergenti, coinvolgendo nell'intera regione dolomitica il Basamento Cristallino lungo la Linea della Valsugana, il cui ramo in questa zona è costituito dalla Linea di Pieve di Cadore, situata lungo la valle dove si trova l'omonimo centro abitato a nord del M. Zucco [53]. Tale linea delimita a nord una fascia di sovrascorrimenti ad alto angolo che terminano a meridione in corrispondenza della Faglia della Crepa Rossa (*Leonardi, 1968*, citato nella relazione dell'*Università degli Studi di Padova del 2003* [53]), che interessa il versante settentrionale del M. Zucco [53]. Tale faglia ha andamento E-W circa che devia nei suoi settori più orientali, così come per la Linea di Pieve di Cadore (la quale si suddivide nella Linea di Domegge e di Val Talagna). I sovrascorrimenti sud-vergenti che interessano il versante meridionale del M. Zucco sono interpretati come vicarianti della Linea della Crepa Rossa nella relazione dell'*Università degli Studi di Padova del 2003* [53]. Sempre secondo quanto riportato nello stesso documento [53], alcune strutture della fase precedente possono essere riattivate in questo secondo evento, determinando forme complesse soprattutto in corrispondenza alla cima di M. Zucco, alla Salita della Cavallera e al Cidolo del Piave. Infine, a tale fase appartengono le faglie trascorrenti ad alto angolo a componente transpressiva e transtensiva che tagliano le strutture precedenti [53].

Le principali linee e forme strutturali dell'area sono (Figura 9):

- la già citata Linea di Pieve di Cadore, orientata SW-NE con vergenza SSE e che si suddivide ad Oriente nella linea di Domegge e della Val Talagna [17];
- la già citata Linea della Crepa Rossa (Linea del Piave e M. Vedorcia in [17]), con direzione media SW-NE e vergenza SSE e che presenta una struttura a 'gomito' (dovuta all'interferenza delle due fasi tettoniche) in corrispondenza del M. Vedorcia [17];
- la Faglia della Val Carisè, ad andamento più o meno N-S, localizzata in prossimità della Piana Dubiea e che taglia la sinclinale del M. Zucco e ne verticalizza gli strati dolomitici. Tale faglia sembra passare ad una struttura piega-faglia man mano che da Dubiea si procede in direzione del M. Zucco, spiegando così il trascinarsi verso Nord delle arenarie raibliane all'intersezione tra tale piega-faglia e la Linea della Crepa Rossa [38]. Tale lineamento, nominato anche Linea della Piana Dubiea [17], farebbe accavallare la Formazione di Raibl sulla Dolomia Principale;
- la sinclinale del M. Zucco, con direzione NE-SW e con nucleo nelle dolomie noriche [17];
- l'anticlinale del Cidolo di Perarolo con direzione E-W e che dal M. Vedorcia si segue fino al Cidolo di Perarolo [17]. Il nucleo è costituito dagli strati delle formazioni del Triassico medio inferiore, raddrizzati fino alla verticale su entrambi i fianchi [17]. In corrispondenza del Cidolo del torrente Boite il nucleo della piega è costituito dalla Formazione del Raibl ed è troncato dalla Faglia del Rio Carisé che lo porta a contatto con la Dolomia Principale [17]. Secondo quanto riportato nella relazione dell'*Università degli Studi di Padova del 2003* [53], la struttura sarebbe più legata ad un sovrascorrimento che ad una vera e propria piega anticlinale (*).

L'ubicazione di tali strutture è riportata in Figura 9 che costituisce uno stralcio del Foglio n. 12 "Cortina d'Ampezzo" della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100'000, visualizzabile sul sito dell'*ISPRA* [27]. Alcune strutture, come la Linea

di Pieve di Cadore e quella della Crepa Rossa, sono già rappresentate in carta, mentre la Faglia della Val di Carisé, la Sinclinale del M. Zucco e l'Anticlinale del Cidolo di Perarolo sono state raffigurate dallo scrivente sulla base dei riferimenti bibliografici [17] e delle giaciture degli strati riportate in carta.

In alcuni documenti [17] si riporta, inoltre, la presenza di elementi tettonici distensivi che dislocano in direzione verticale l'ammasso del M. Zucco ed interessano soprattutto la Formazione di Raibl e la Formazione di Duerrenstein nel versante meridionale del rilievo. A tali strutture appartengono la Faglia di Damos e la Faglia di San Rocco.

A conclusione del paragrafo si riportano due dati giaciturelle raccolti in sito nel corso dei rilevamenti condotti per il lavoro di tesi, in corrispondenza dello specchio di faglia affiorante poco dopo il secondo tornante della strada della Cavallera alle pendici del dosso di Damos, salendo da Perarolo. La giacitura presa per il piano di faglia è $005^{\circ}\text{N}/55^{\circ}$, mentre si rileva un altro piano ben visibile in loco con una giacitura di $295^{\circ}\text{N}/65^{\circ}$ (Figura 8). I piani misurati suggeriscono ancora una volta come la zona sia caratterizzata dall'incrocio di strutture con orientazioni diverse e, quindi, come sia stata soggetta ad una storia deformativa complessa, caratterizzata da stress tettonici con diversa direzione.



Figura 8 Specchio di faglia e altri piani di discontinuità affioranti nella Dolomia Cassiana ai piedi del dosso di Damos. Foto del scrivente del 06/04/2018.

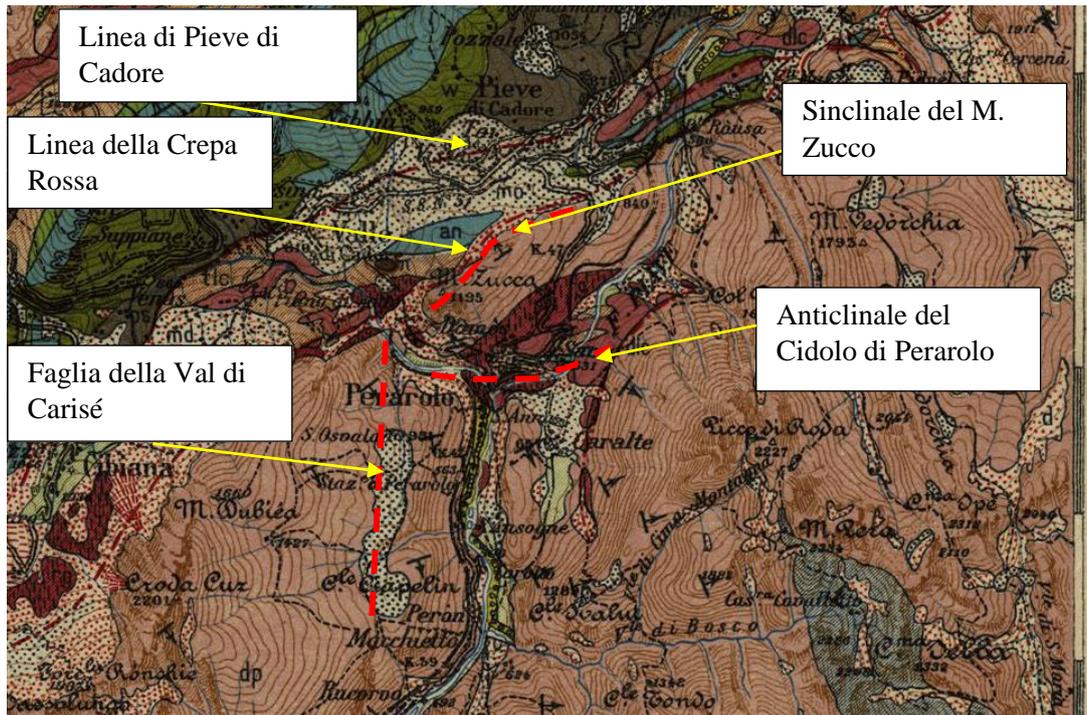


Figura 9 Stralcio del Foglio n. 12 'Cortina d'Ampezzo' della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000, con relativa legenda [27]. Inoltre, sono evidenziate le principali strutture elencate nel testo: alcune delle quali già presenti in carta, altre raffigurate dallo scrivente sulla base di riferimenti bibliografici [17] e dei rapporti giacitureali.

1.3 Inquadramento geomorfologico

1.3.1 Introduzione

Per quanto riguarda la documentazione esaminata per stilare questo paragrafo si rimanda a quella del paragrafo precedente con aggiunta delle informazioni ricavabili dalla Carta delle Fragilità del PAT del *comune di Valle di Cadore* [9].

L'attuale morfologia del rilievo dell'area di studio e delle zone limitrofe è legata al particolare assetto litologico e strutturale precedentemente esposto ed all'attività erosiva esercitata dagli agenti esogeni (acqua in primis e ghiacciai per quanto riguarda la morfogenesi più antica) [17]. In particolare, le valli principali del Boite e del Piave sono impostate lungo importanti linee di dislocazione tettonica che hanno favorito la concentrazione e la maggior efficacia dell'attività erosiva lungo questi allineamenti [17]. Anche nella relazione di *Cargnel et al. (1978) per la Regione del Veneto* [38] si evidenzia come le aree più suscettibili all'instabilità coincidano con le principali fasce di disturbo tettonico. L'eterogeneità litologica, inoltre, determina la formazione di profili dei versanti diversificati: più acclivi in corrispondenza delle litologie più compatte e meno erodibili (calcari e dolomie), mentre più dolci laddove il substrato è costituito da materiali più teneri e facilmente soggetti all'erosione [17]. Si ribadisce, infine, che il carattere selettivo dell'attività erosiva è accentuato dal assetto strutturale dell'ammasso roccioso, favorendo l'evoluzione dei fenomeni di instabilità nei punti in cui il substrato si presenta maggiormente fratturato e disarticolato dagli elementi strutturali (come ad esempio, può valere per il versante meridionale del M. Zucco, dove l'intensa fratturazione tettonica ha determinato movimenti gravitativi di immensi blocchi nel periodo post-glaciale, con conseguenze in termini di obliterazione dei rapporti giaciturari originari) [17].

1.3.2 Gli agenti morfogenetici e le relative forme e depositi

I principali agenti esogeni, che hanno modellato il rilievo, sono:

- 1) i ghiacciai pleistocenici, i quali hanno avuto un ruolo predominante nella morfogenesi più antica, agendo in maniera quasi ubiquitaria su tutta l'estensione dell'area di studio e delle limitrofe. La loro attività sia erosiva che deposizionale è testimoniata dalla presenza di numerose morene, rilevabili a più livelli altimetrici; ([17], [53])
- 2) l'acqua, la cui azione si esplica in maniera molteplice attraverso:
 - a. il ruscellamento diffuso lungo i versanti, che determina il rimaneggiamento ed il trasporto del detrito di copertura dei versanti. Le forme erosive sono riscontrabili nelle scarpate e creste di degradazione, ma anche in forme legate ad un ruscellamento più concentrato come valli a 'V' e calanchi. Mentre i depositi e i conii colluviali ai piedi dei versanti suggeriscono il carattere anche deposizionale di questo processo; ([17], [53])
 - b. il flusso concentrato in corsi d'acqua, con conseguente deposizione dei materiali presi in carico con il ruscellamento diffuso in forme tipiche, quali terrazzi e conoidi. L'azione dei corsi d'acqua non è limitata all'aspetto deposizionale, bensì nei periodi di portata intensa essi possono erodere e scalzare i piedi dei versanti, innescando fenomeni di instabilità sugli stessi; ([17], [53])
 - c. il carsismo delle rocce solubili, ovvero calcari/dolomie da un lato e gessi/anidriti dall'altro. Il fenomeno dissolutivo si manifesta con la formazione di cavità imbutiformi o doline, le quali costituiscono vie preferenziali di infiltrazione delle acque in profondità. Nel sottosuolo si possono creare veri e propri reticoli di cavità, in cui l'acqua può scorrere con facilità e rapidità. In più rispetto alle rocce carbonatiche, il carsismo in gessi/anidriti determina variazioni delle proprietà meccaniche dell'ammasso stesso (aumenti di volume e di

pressione, ... vedi paragrafo sulle frane in substrato gessoso); ([17], [53])

- 3) la gravità, la quale agisce sui versanti in rilassamento una volta venuta meno la copertura glaciale. La sua attività si esplica attraverso fenomeni di instabilità dei versanti come frane (di vario tipo: crolli e ribaltamenti –in corrispondenza delle pareti carbonatiche e dolomitiche-, scivolamenti rotazionali e traslazionali –in corrispondenza dei litotipi teneri o con alternanze litologiche es. Dürrestein terrigeno, Formazione di S. Cassiano, Formazione di Raibl-, colate in cui anche l'acqua gioca un ruolo fondamentale –in corrispondenza di litologie con alta percentuale di frazione fine es. depositi glaciali, Dürrestein terrigeno e soprattutto la frazione pelitica della Formazione di Raibl-) e Deformazioni Gravitative Profonde di Versante (DGPV). Le forme erosive legate a questi processi sono nicchie di frana, scarpate e creste di degradazione, canaloni in roccia; mentre i principali depositi sono gli accumuli o corpi di frana ed i detriti di versante (generici o falde detritiche o con detritici); [53]

Tali agenti si influenzano l'uno con l'altro, agendo simultaneamente od in sequenza sia temporale che spaziale. Il susseguirsi di questi diversi processi determina l'evoluzione del rilievo e genera forme complesse e dalla genesi di difficile interpretazione.

1.3.3 Evoluzione morfogenetica del rilievo

L'evoluzione morfogenetica dell'area può essere suddivisa in 3 fasi, in modo del tutto simile con quanto riportato nell'articolo di *Seijmonsbergen e de Graaf (2006)* [44] nel relativo caso di studio in Liechtenstein:

- 1) fase glaciale, in cui i ghiacciai würmiani sono i principali agenti morfogenetici approfondendo le valli e depositando il till nelle morene;
- 2) fase tardo-glaciale, in cui inizia il ritiro dei ghiacciai, favorendo l'azione della gravità e dell'acqua sui versanti lasciati liberi. In particolare, nelle

fasi di stasi del ritiro la superficie glaciale costituisce il livello base erosivo, determinando la deposizione dei materiali erosi dagli altri agenti in prossimità del ghiacciaio stesso. Per il caso dell'area di studio le evidenze geomorfologiche di depositi di versante parzialmente cementati e corpi di paleo-frana e paleo-colata a quote piuttosto elevate suggeriscono un periodo di stasi della superficie glaciale a circa 750-780 m s.l.m., che funge da livello base temporaneo [53];

- 3) fase post-glaciale, in cui gravità ed acqua modellano il rilievo, compresi quei depositi abbandonati dai ghiacciai nel corso del loro ritiro.

1.3.4 Principali elementi naturali ed antropici dell'area in esame

All'interno del lavoro di tesi si sono eseguite attività di fotointerpretazione (delle immagini Lidar e delle ortofoto disponibili come servizi WMS sul *Geoportale Nazionale* [31]) e di rilevamento in campagna, il cui risultato è la 'Carta geomorfologica della frana di Sant'Andrea (Perarolo di Cadore, BL) e dell'area a monte' (riportata nell'allegato in formato A1 ed in Inserto 1, la cui base topografica è la CTR a scala 1:10000, scaricabile sul sito dell'Infrastruttura dei Dati Territoriali della *Regione Veneto* [42]). Inoltre, le fessure nel terreno e le opere antropiche, riportate sul corpo e sul coronamento della frana di Sant'Andrea, sono state rilevate attraverso il GPS in data 27 marzo 2018 in un apposito lavoro condotto dall'Università degli Studi di Padova.

Sulla carta, procedendo da monte verso valle ovvero da Damos all'abitato di Perarolo si osservano le seguenti forme e depositi, per una più facile localizzazione dei quali si riportano anche le opere antropiche presenti (in Inserto 1 sono evidenziati gli elementi geomorfologici con la medesima numerazione con cui sono presentati nel seguente elenco. Sono rappresentati, inoltre, i limiti del bacino idrografico ed idrogeologico secondo quanto riportato nella "*Relazione geologica e idrogeologica sulle indagini, caratterizzazione e modellazione geologica del sito*" a supporto della "*Progettazione geologica, geotecnica,*

*geoidrologica, e strutturale delle opere in terra e roccia e dei sistemi complessivamente finalizzati alla messa in sicurezza della frana denominata “Busa del Cristo” sita nel Comune di Valle di Cadore e di Perarolo (Belluno), nell'ambito della proprietà ferroviaria” di Geologia Applicata Studio Associato, firmata dal geol. L. Cadrobbi e datata 2018, per conto di RFI S.p.A. [20]. Il lumeggiamento, ottenuto da rilievi Lidar con risoluzione di 1 m e posto in alto a destra, è disponibile come servizio WMS sul *Geoportale Nazionale* [31]):*

- 1) La nicchia di frana sul versante a W di Damos, il cui accumulo, costituito da più blocchi di Dolomia Principale [53], si trova ai piedi del versante su cui è impostata ovvero in quella porzione del rilievo con una leggera diminuzione di pendenza chiamata ‘Pian de la Cesa’. Queste forme e depositi (questi ultimi di difficile identificazione per sovrimposizione di altri eventi) sono attribuiti ad un evento franoso risalente a quella fase che precedentemente è stata definita come ‘tardo-glaciale’. Infatti, il corpo della paleo-frana si trova a quote comprese tra i 720 e gli 800 m s.l.m., ad indicare un livello base più alto dell’attuale, imputabile al stazionamento della lingua glaciale a quelle quote. Una volta ritirato del tutto il ghiacciaio, in fase post- glaciale, sono iniziati i fenomeni di erosione ai piedi del corpo di frana tuttora visibili ed in atto. Nella relazione dell’*Università degli Studi di Padova del 2003* [53] si classifica questa paleo-frana come una frana di crollo o ribaltamento; [53]
- 2) I depositi di versante ai piedi del versante meridionale del M. Zucco su cui si imposta la nicchia della paleo-frana. Tali depositi, dalla campagna di rilevamento eseguita per la relazione dell’*Università degli Studi di Padova (2003)* [53], mostrano tessitura aperta e sono costituiti da ghiaie e blocchi a spigoli vivi, con una cementazione non pervasiva che unisce i clasti solo nei punti di contatto, si intuisce anche una stratificazione con circa 25° di inclinazione. Queste caratteristiche, considerando anche la quota di 760 m s.l.m. circa in cui sono stati rilevati i depositi di frana (coerente con le quote riportate nel punto precedente), suggeriscono come la formazione di questa falda detritica stratificata sia risalente ad un periodo in cui l’area era

più ricca d'acqua e il livello base a quote più elevate dell'attuale a causa dello stazionamento della lingua glaciale. Verosimilmente, dunque, anche questi depositi sono attribuibili alla fase tardo-glaciale; [53]

- 3) La nicchia di distacco in parte attiva come scarpata di degradazione (nel settore più occidentale ed esposto ad ESE), situata lungo la cresta che dal M. Zucco raggiunge Damos e rivolta a SSW. Tale nicchia potrebbe stare ad indicare una riattivazione della grande paleo-frana precedentemente citata, la cui porzione più a valle è oggi attiva: infatti, la propaggine più meridionale ospita il fenomeno franoso di Sant'Andrea, oggetto di questo lavoro. Secondo quanto riportato nella relazione dell'*Università degli Studi di Padova del 2003* [53], il corpo di tale frana risulta costituito oltre che da blocchi di dolomia anche da gessi; [53]
- 4) Il corpo di paleo-colata, costituito dalle argille rosse del Raibl e posizionato al di sopra o in riattivazione del corpo della grande paleo-frana di 'Pian de la Cesa'. I depositi di questo evento rappresentano dal punto di vista idrogeologico un'entità impermeabile che convoglia l'acqua piovana proprio verso la porzione del versante più instabile a valle. La morfologia superficiale del corpo della paleo-colata è caratterizzata da lobi, accumuli d'acqua temporanei, creste, vallette e solchi di ruscellamento ad indicare l'importanza del ruolo giocato dall'acqua. La frana non mostra segni di riattivazione. Dall'attività di fotointerpretazione, in particolar modo del Lidar del Geoportale Nazionale, si riconoscono più eventi di colata, avvenuti nel passato: un evento più antico (evento 1) testimoniato dal corpo posto più a occidente e uno più recente (evento 2) situato più ad oriente, la cui nicchia di distacco taglia il corpo attribuito all'evento 1; [53]
- 5) In alcuni riferimenti bibliografici [53] si segnala anche la presenza di cordoni morenici di 'Pian de la Cesa', di modeste dimensioni e riconosciute dalla presenza di ciottoli arrotondati. Tali elementi non sono stati evidenziati dalla campagna fotointerpretativa e dal rilevamento in campagna effettuate, non si sono osservati, probabilmente a causa della

sovrimposizione di altri fenomeni, legati soprattutto alla successiva degradazione di tali depositi ed alla presenza di copertura vegetale; [53]

- 6) La depressione e area umida ai piedi della chiesetta di Damos, la quale può costituire, anche secondo informazioni bibliografiche [45], punto preferenziale di accumulo e/o infiltrazione delle acque superficiali; [45]
- 7) Il versante è caratterizzato da movimenti diffusi a valle di Pian de la Cesa e da un aumento della pendenza. Probabilmente esso costituisce la porzione attiva del grande corpo di paleo-frana riattivato di Pian de la Cesa e che ha la sua maggior espressione nella frana di Sant'Andrea in senso stretto [53]. L'attività di movimento del versante è testimoniata da morfologie (osservate in campagna nel corso dei rilievi per il lavoro in oggetto) come contropendenze, piccole depressioni, sdoppiamenti di cresta e orli di scarpate di degradazione, ma anche dagli effetti deformativi riscontrati, ad esempio, nella vegetazione in seguito allo spostamento del terreno come gli alberi con i tronchi 'a manico d'ombrello' (reptazione). Lungo il versante sono presenti anche solchi di ruscellamento più o meno attivi, mentre nella porzione di monte in prossimità della transizione con il corpo della paleo-colata è presente una piccola depressione che assume i caratteri di area umida;
- 8) La canaletta drenante che taglia il corpo di colata, passa al di sotto della seconda area umida a metà pendio e attraversa tutta la porzione di versante soggetta a movimento diffuso, per poi raggiungere, a tergo del muro in calcestruzzo e in parte tirantato, una serie di dreni sotterranei e un



Figura 10 Nodo in cemento di congiunzione delle canalette drenanti superficiali con rilevamento di emergenze di acqua dal terreno al di sotto di queste – cerchio rosso-. Foto dello scrivente del 06/04/2018.

cunicolo drenate con lo scopo di convogliare l'acqua al di fuori del settore di valle e più instabile del versante (frana di Sant'Andrea in senso stretto). Nel corso dei rilievi eseguiti si nota come l'efficacia drenante della canaletta superficiale in lamiera sia alquanto limitata, data la scarsa portata dei tratti più a monte, che diminuisce gradualmente verso valle fino al nodo in calcestruzzo tra due rami della canaletta stessa, in cui l'acqua fuoriesce per lo più dalla porzione di terreno compresa tra il fondo del dreno e il basamento in cemento (Figura 10);

- 9) Il muro posto a tergo della vecchia linea ferroviaria, che in alcuni punti si presenta tirantato, si mostra a tratti molto fratturato e le sue deformazioni sono monitorate attraverso fessurimetri. Le fratture sono rilevate principalmente nella porzione occidentale dell'opera stessa in direzione di Valle di Cadore e fino in prossimità dell'ultima valletta che taglia il versante prima dell'imbocco della galleria;
- 10) Il fenomeno franoso di Sant'Andrea nella sua porzione più instabile coinvolge l'area compresa tra la vecchia linea ferroviaria e l'alveo del Boite. La morfologia di tale zona è costituita da gradonate di origine antropica, su cui si rilevano fratture per lo più trasversali al versante, una delle quali presenta una certa continuità e mostra anche tratti orientati longitudinalmente. Tale discontinuità può essere interpretata come la nicchia di distacco e, quindi, l'emersione di una superficie di taglio. Si nota, inoltre, l'orlo di scarpata di degradazione attiva che separa due diversi domini cinematici, in accordo con la suddivisione proposta dall'*Università di Padova nella Relazione tecnica inerente alla Seconda Fase della Convenzione con la Regione Veneto intitolata "Definizione delle soglie di allertamento del fenomeno franoso della Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL)"* [56]. La porzione a valle dell'orlo di scarpata (Area 3 in [56]) mostra trend evolutivi più rapidi rispetto a quella di monte, la quale può essere suddivisa a sua volta in due aree a diverso comportamento cinematico (Area 2, ovvero la zona compresa fra la nicchia di frana e l'orlo di scarpata, e Area 1, ovvero la zona a monte della

nicchia di frana definita come coronamento della fenomeno franoso stesso). In termini litologici il corpo di frana è impostato sui gessi e sulle anidriti raibliane, al di sopra dei quali si rinvencono depositi eterogenei che nella relazione dell'*Università degli Studi di Padova del 2003 [53]* sono definiti come 'un till di fondo poco consolidato formato da un diamicton massivo a supporto di matrice' di una trentina di metri circa di spessore. Secondo il medesimo documento [53] il volume in movimento è di circa 4-500.000 metri cubi;

- 11) A valle della scarpata di degradazione si nota un'area attiva soggetta a ruscellamento concentrato e creste, con una morfologia che ricorda quella dei calanchi. Tale porzione (che rientra nell'Area 3 [56]) è soggetta all'azione erosiva dell'acqua e della gravità. Localmente, nel corso di eventi meteorologici piuttosto intensi e/o duraturi, si possono intravedere venute d'acqua da cavità del substrato o dei depositi più profondi che vengono a giorno a causa dell'erosione (Figura 11). Questa caratteristica, riscontrata anche nella relazione dello *Studio Galli (2012) [45]*, è indice dell'importanza rivestita dal carsismo sulla circolazione delle acque sotterranee (sia di falda che di percolazione) e, quindi, sulla stabilità del fenomeno franoso stesso;

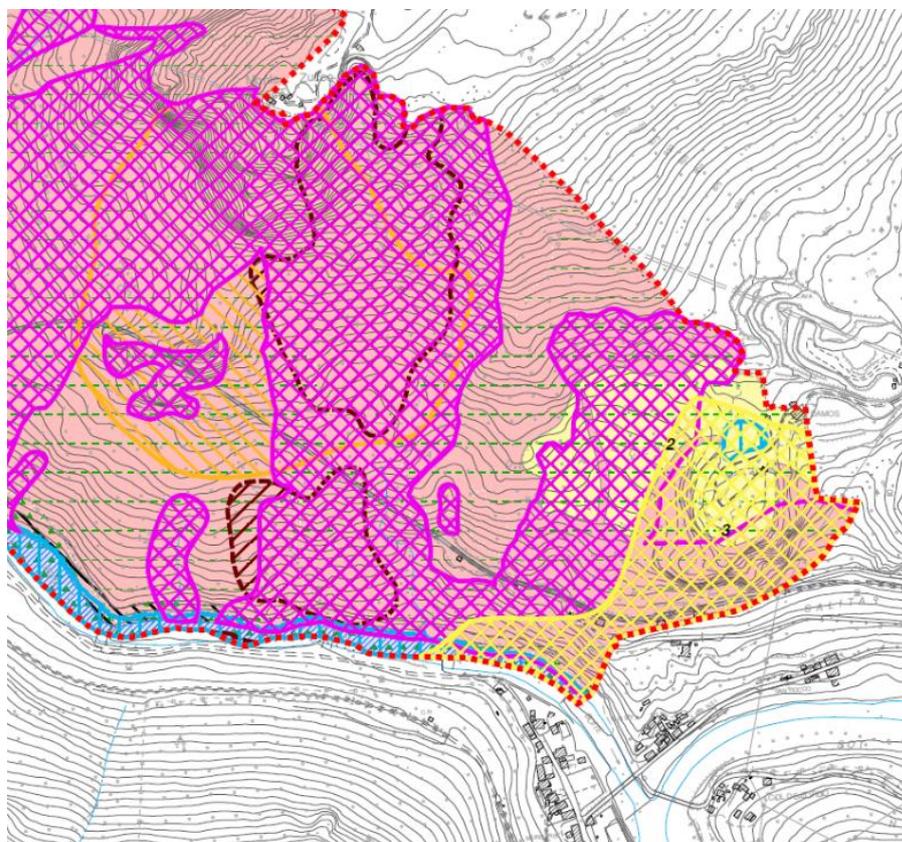


Figura 11 Orlo di scarpata di degradazione ed area a calanchi nel settore più a valle della frana di Sant'Andrea, con evidenze di punti di fuoriuscita dell'acqua dai depositi/substrato affiorante – cerchi rossi-. Foto dello scrivente del 10/05/2018 (a sinistra) e del 24/05/2018 (a destra).

- 12) La porzione a valle dell'area a calanchi è caratterizzata dalla presenza di coni colluviali attivi, i quali terminano all'interno dell'alveo del torrente Boite e sono alimentati dal continuo apporto dalla scarpata di degradazione soprastante [53];
- 13) La porzione di dominio del torrente Boite è caratterizzata dall'azione del corso d'acqua la quale da un lato si mostra come erosiva, ovvero ai piedi della frana di Sant'Andrea, in corrispondenza dei coni colluviali, e dall'altro come deposizionale, ovvero nei settori in cui la corrente rallenta, ad esempio a monte delle briglie. L'alveo del Boite è costituito dai sedimenti delle alluvioni attuali con clasti arrotondati di granulometria variabile (dalle sabbie ai massi), a tessitura aperta e con strutture sedimentarie (embriciature); [53]
- 14) L'abitato di Perarolo sorge su un terrazzo fluviale, originato da eventi alluvionali recenti, caratterizzato da una scarpata il cui dislivello viene incrementato da un argine artificiale la cui altezza diminuisce risalendo il torrente dal ponte sul Boite. I depositi del terrazzo di Perarolo sono per lo più simili a quelli delle alluvioni attuali, ovvero clasti a granulometria variabile in funzione delle condizioni dinamiche del corso d'acqua, a tessitura aperta e con strutture sedimentarie [53]. Si nota come i modesti dislivelli tra i depositi di alluvioni recenti ed attuali non consentano un'importante mobilitazione dei primi verso i secondi, ma è possibile altresì il fenomeno inverso favorito anche dalla presenza del nodo idraulico (rigurgito del Boite da parte del Piave) e dal fenomeno franoso di Sant'Andrea (un eventuale collasso ostruirebbe il corso del Boite, creando uno sbarramento temporaneo e facilitando l'ingresso dell'acqua del torrente in paese nel punto in cui l'argine artificiale riduce la propria altezza a monte) [53].

A conclusione del paragrafo vale la pena ricordare:

- la segnalazione di deformazioni plastiche che raggiungono anche livelli di media profondità dell'ammasso roccioso con conseguenti cedimenti provocati da lenti movimenti gravitativi nella porzione di versante di sinistra Boite di fronte all'abitato di Perarolo e di destra Piave tra Costa e Saco [17]. Tale zona è segnalata anche nella Carta delle Fragilità del PAT del *Comune di Valle di Cadore* (Figura 12) come 'Area soggetta a sprofondamento carsico' [9], a convalidare l'osservazione delle venute d'acqua di probabile origine carsica, fatta in corrispondenza della scarpata di degradazione ai piedi del corpo di frana di Sant'Andrea. I fenomeni di idratazione e dissolutivo delle rocce solfatiche sembrano, dunque, rivestire dei ruoli fondamentali nella stabilità del versante oggetto di studio;
- la presenza di terrazzi fluviali più antichi di dubbia età pre-glaciale [53] o post-glaciale ([17], [38]), testimoniati da depositi a quote più elevate dell'attuale alveo (ad esempio 570 m s.l.m. in corrispondenza del cimitero di Perarolo) con clasti di varie granulometrie, sia arrotondati che spigolosi, localmente mal classati e spesso ben cementati [53];
- la presenza di una cava di coltivazione dei gessi raibliani in località Damos [53].



LEGENDA

 Confini comunali

PENALITA' AI FINI EDIFICATORI

 Terreno idoneo (art.11)

 Terreno idoneo a condizione (art.11)

 Aree a morfologia mediamente acclive o acclive e/o con caratteristiche litologiche mediocri o scadenti

 Aree poste in vicinanza ad orli morfologici

 Terreno non idoneo (art.12)

AREE SOGGETTE A DISSESTO IDROGEOLOGICO (art.11- art.12 -art.13)

 Aree di frana

 Aree esondabili o a ristagno idrico

 Aree soggette a valanghe

 Aree soggette a caduta massi

 Aree soggette a debris-flow

 Aree soggette a sprofondamento carsico

 Aree soggette ad erosione

Figura 12 Estratto della Carta delle Fragilità del PAT del comune di Valle di Cadore [9].

1.4 Inquadramento climatico-idrologico

1.4.1 Introduzione

Come si è evidenziato nel paragrafo precedente, l'acqua copre tuttora, a differenza dei ghiacciai, un ruolo fondamentale nell'evoluzione geomorfologica del rilievo sia in termini di:

- erosione da parte del ruscellamento superficiale e dei corsi d'acqua;
- che di pressioni esercitate sulla struttura dei terreni in cui essa è contenuta come falda o acqua di percolazione;
- ma anche, dato il particolare assetto litologico strutturale dell'area, di dissoluzione carsica del substrato roccioso o degli elementi più solubili dei terreni (cfr. al paragrafo sui fenomeni di dissesto idrogeologico in aree a substrato gessoso).

Vale la pena, dunque, analizzare le principali caratteristiche climatiche ed idrologiche della regione in cui l'area di studio è inserita, mentre successivamente si riporteranno alcune considerazioni idrogeologiche generali.

1.4.2 Inquadramento climatico

Per quanto riguarda l'analisi climatica, si considerano come variabili principali le 'precipitazioni', i 'giorni piovosi' e le 'temperature medie dell'aria misurate a 2 m dal suolo' presso la stazione meteorologica di Perarolo di Cadore. I dati della stazione sono reperibili sul sito *dell'Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (ARPAV)* [3], dove si trovano i dati delle diverse variabili meteorologiche misurate presso tutte le stazioni collocate sul territorio regionale. In particolare, oltre alla stazione di Perarolo di Cadore si sono analizzati anche i dati delle stazioni di Valle di Cadore (BL) e di Domegge di

Cadore (BL), le più prossime a quella di interesse e rispettivamente nei bacini idrografici del Boite e del Piave a monte di Perarolo (Figura 13).

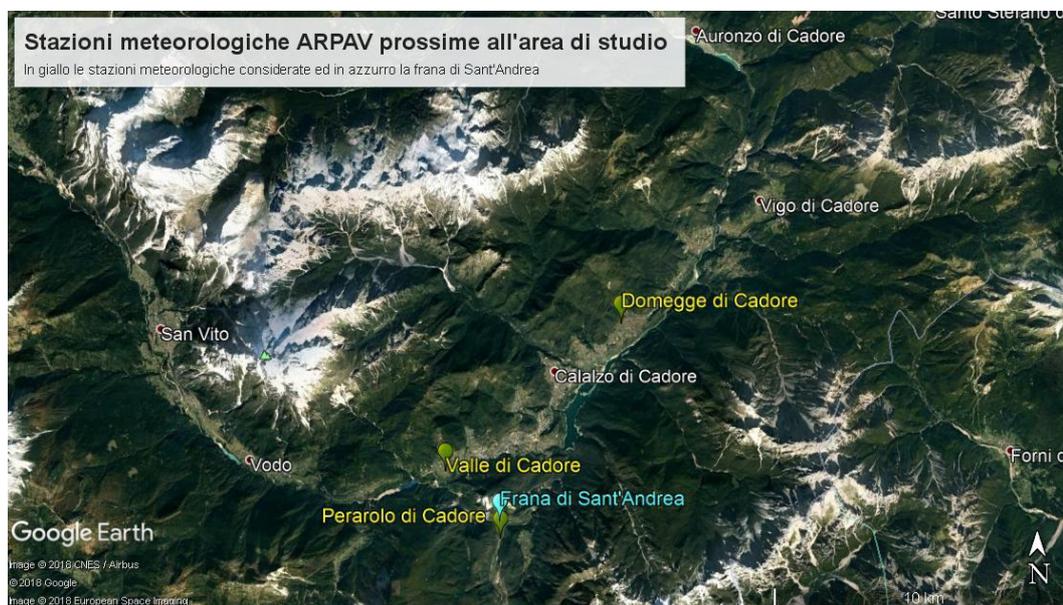


Figura 13 Stazioni meteorologiche ARPAV [3] (in rosso) considerate perché prossime all'area di studio. La base satellitare è tratta da Google Earth [23].

La stazione di Perarolo di Cadore è collocata a quota 525 m s.l.m.. Tale stazione non è posta sul versante in frana, dove ve ne è un'altra presente, ma i suoi dati vengono considerati egualmente rappresentativi per lo scopo di inquadramento climatico dell'area.

I primi dati disponibili per la stazione in esame sono datati dicembre 2002 e, pertanto, per le scale temporali di interesse (mensili ed annuali) si predilige considerare come dato iniziale quello inerente al gennaio 2003.

Le variabili 'precipitazione' (unità di misura 'mm') e 'giorni piovosi' (unità di misura 'gg') vengono considerate nei loro andamenti in termine di cumulata annuale e media di cumulata mensile.

Analizzando l'andamento della variabile 'precipitazione' (Figura 14 in alto) negli anni si nota che a Perarolo la media della cumulata di precipitazione annuale è di 1197.8 mm, con un picco di 1812.6 mm registrato nel 2014. Nel 2016 la precipitazione caduta è stata di 1105.6 mm, mentre nel 2017 di 1260.4 mm: appena al di sopra della media.

In termini di 'giorni piovosi' (Figura 14 in basso), invece, la media annuale è di 103.8 gg, con un picco di 141 gg nel 2014. I giorni piovosi nel 2016 sono stati 110 e 103 nel 2017.

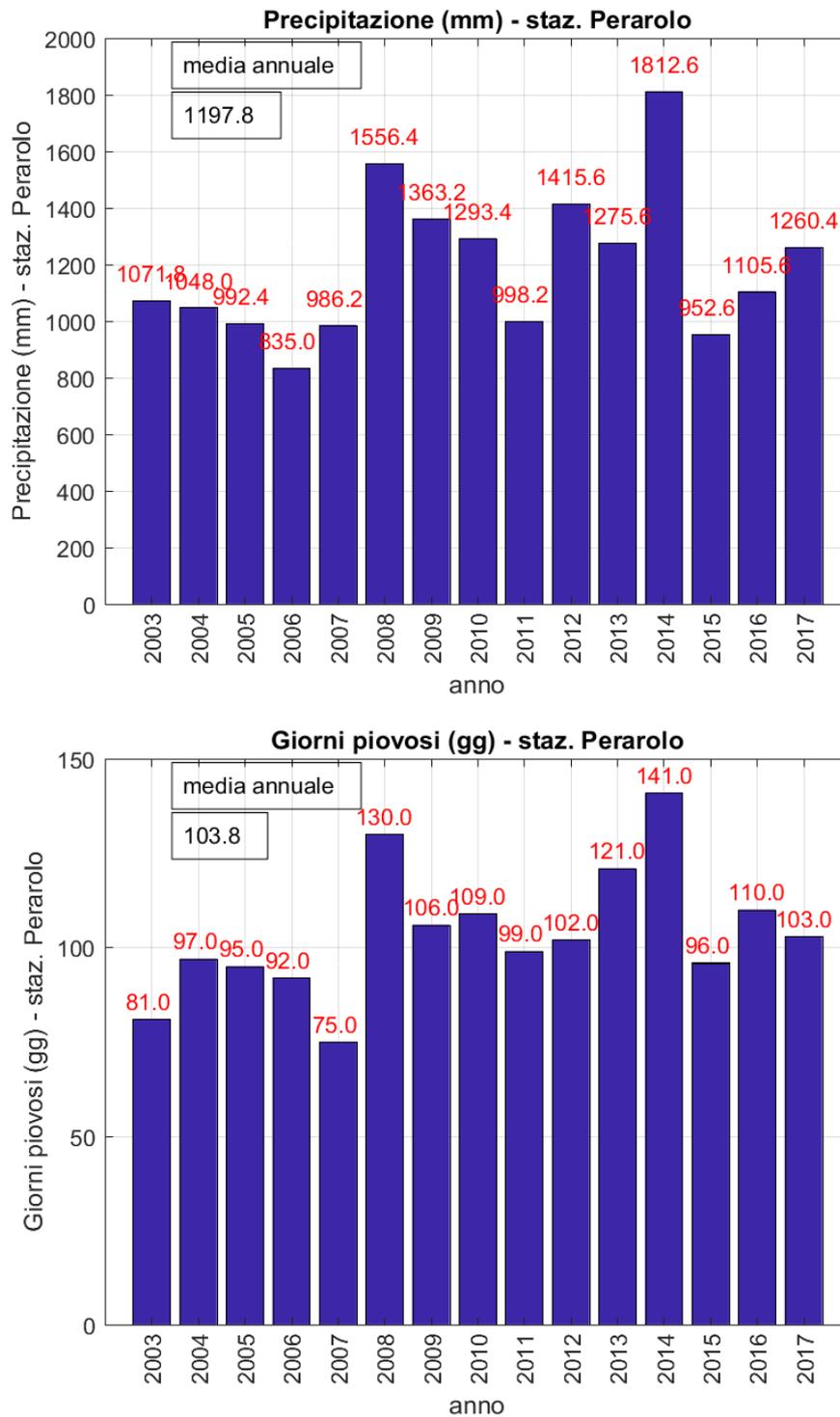


Figura 14 Andamento della variabile 'altezza di precipitazione annuale' dal 2003 al 2017 nella stazione pluviometrica di Perarolo di Cadore (elaborazione dati ARPAV [3] da parte dello scrivente) in alto. Andamento della variabile 'giorni piovosi annuali' dal 2003 al 2017 nella stazione pluviometrica di Perarolo di Cadore (elaborazione dati ARPAV [3] da parte dello scrivente) in basso.

Analizzando l'andamento medio nell'arco di un anno, si nota come nei primi mesi dell'anno, soprattutto gennaio e febbraio, la cumulata media mensile di precipitazioni (Figura 15 in alto) mostri valori minimi che si attestano intorno ai 62 mm. Successivamente si imposta un trend di crescita della variabile con un importante salto nel mese di maggio in cui i valori superano i 100 mm, soglia al di sopra della quale si mantengono fino a dicembre escluso (con 85.9 mm medi). Tra maggio e ottobre la variabile oscilla tra i valori di 107.6 mm di giugno e 125.9 mm di agosto. Infine, il mese di novembre si dimostra essere il più piovoso con una cumulata pluviometrica mensile media di 141.9 mm, ovvero più del doppio dei mesi di gennaio e febbraio.

Un'analisi analoga per la variabile 'giorni piovosi' (Figura 15 in basso) riporta:

- un minimo a gennaio di 4.3 giorni piovosi medi, a cui si avvicina il valore di 5.5 gg di dicembre;
- un andamento crescente da gennaio a maggio;
- un stazionamento su 11-12 giorni piovosi medi da maggio ad agosto;
- e un andamento decrescente da agosto a dicembre.

Si nota, infine, come il mese di novembre, sebbene il più piovoso, sia caratterizzato da 8.2 giorni piovosi medi, che si aggirano intorno alla media considerando tutti i mesi.

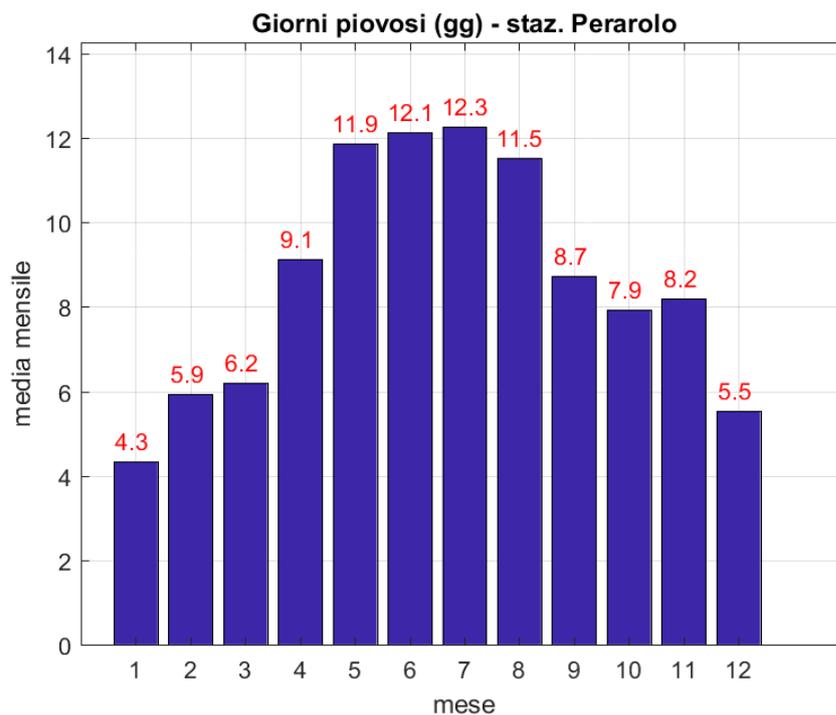
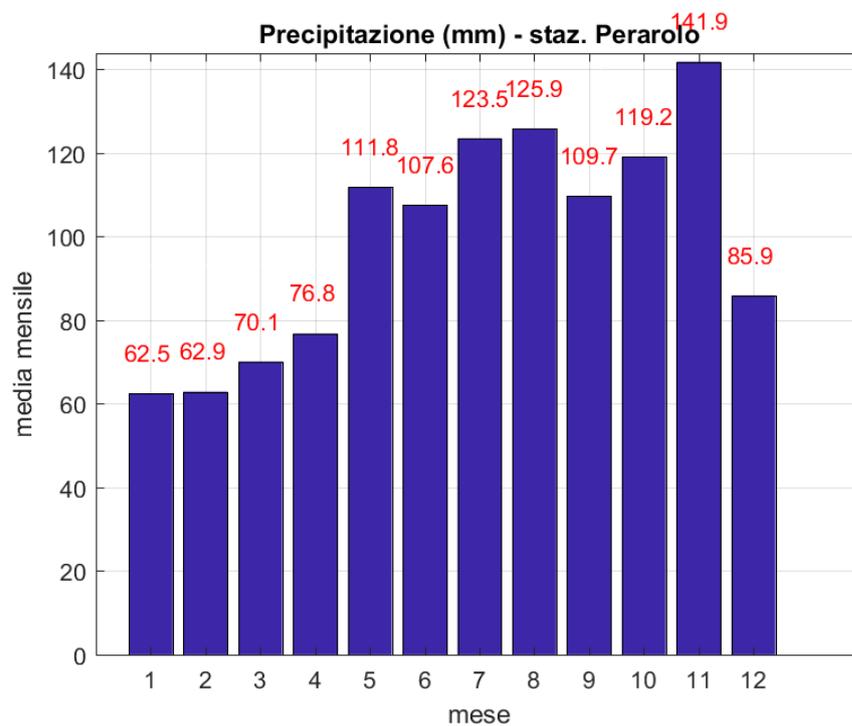


Figura 15 Andamento della variabile 'altezza di precipitazione mensile media (dal 2003 al 2017)' nel corso dell'anno nella stazione pluviometrica di Perarolo di Cadore (elaborazione dati ARPAV [3] da parte dello scrivente) in alto. Andamento della variabile 'giorni piovosi mensili medi (dal 2003 al 2017)' nel corso dell'anno nella stazione pluviometrica di Perarolo di Cadore (elaborazione dati ARPAV [3] da parte dello scrivente) in basso.

La variabile termica considerata è la ‘temperatura media dell’aria a 2m dal suolo’ (unità di misura ‘°C’) e per ogni intervallo temporale ne viene preso in considerazione il valor medio registrato.

L’andamento della media annuale di tale variabile (Figura 16 in alto) mostra un picco nel 2014 con 10.2°C, mentre si attesta su valori di 9.2 °C nel 2017 a fronte di una media su tutti gli anni considerati di 9.3 °C.

La media mensile della temperatura media dell’aria (Figura 16 in basso) ha un andamento sinusoidale tipico per questo tipo di variabili. Così, i valori minimi vengono raggiunti nei mesi di gennaio (-1.1°C) e di dicembre (-0.7°C), che sono anche gli unici ad essere caratterizzati da medie termiche inferiori ai 0°C. I mesi più caldi sono, invece, quelli estivi con temperature medie al di sopra dei 10 °C nei mesi di maggio, giugno, luglio, agosto e settembre. La temperatura media mensile massima si raggiunge nel mese di luglio con 19.3°C.

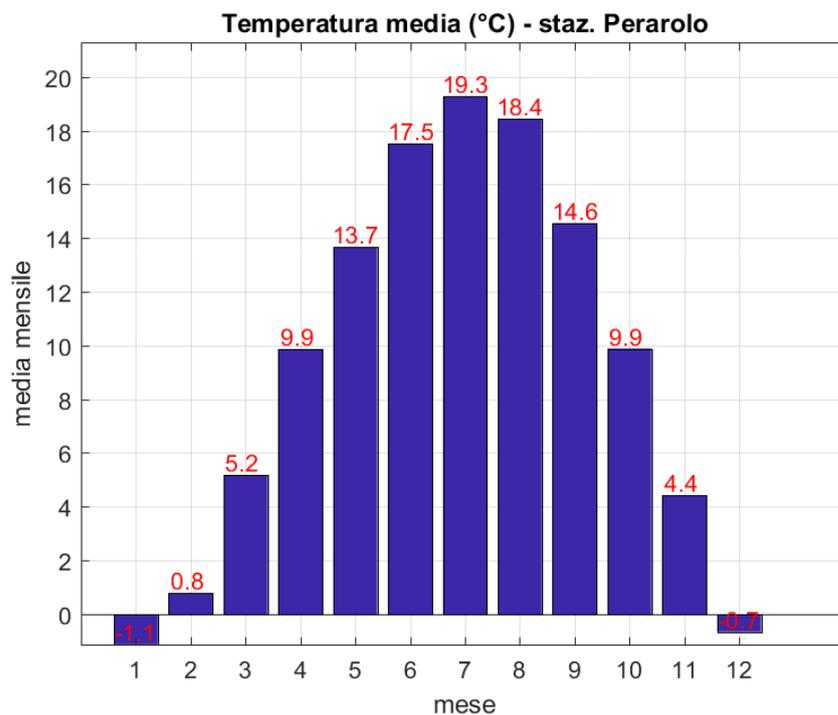
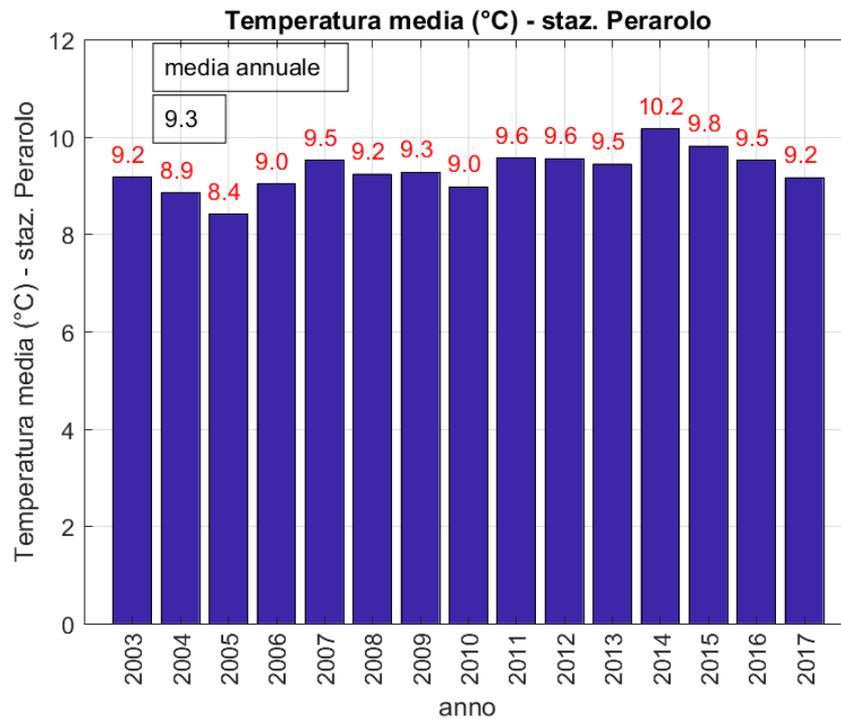


Figura 16 Andamento della variabile 'temperatura media a 2 m dal suolo' dal 2003 al 2017 nella stazione pluviometrica di Perarolo di Cadore (elaborazione dati ARPAV [3] da parte dello scrivente) in alto. Andamento della variabile 'temperatura media a 2 m dal suolo mensile (dal 2003 al 2017)' nel corso dell'anno nella stazione pluviometrica di Perarolo di Cadore (elaborazione dati ARPAV [3] da parte dello scrivente) in basso.

Osservazioni analoghe possono essere fatte per quanto riguarda i dati climatici registrati presso le stazioni di Valle di Cadore (con dati utili per l'analisi a partire dal 1997) e di Domegge di Cadore (con dati utili per l'analisi a partire dal 1994), riportati in allegato.

La prima, posta a quota 794 m s.l.m., mostra valori di precipitazioni annuali medie di 1265.4 mm con massimo mensile a novembre e minimo a febbraio. Mentre riporta valori di 107 giorni piovosi medi annuali, con massimi mensili di 13 gg a giugno e luglio e minimi di 5 gg a gennaio-febbraio. La temperatura media annuale è di 8.7 °C con massimo mensile di 18.2°C nel mese di luglio e minimo di -0.9°C a gennaio.

Per quanto riguarda la stazione di Domegge (quota 822 ms.l.m.), le precipitazioni medie annuali sono di 1144.8 mm con massimo mensile nel mese di agosto (132.9 mm) ma con ulteriore picco positivo a novembre (130.4 mm), mentre il minimo si registra a febbraio (43.4 mm). I giorni piovosi medi annuali sono di 106.3 gg, mentre quelli mensili sono caratterizzati da un picco positivo di 15 gg a maggio. I mesi invernali sono, invece, quelli che mostrano i minimi di tale variabile. La temperatura media annuale è di 8.5 °C con un massimo di 18°C a luglio e un minimo di -1.2°C a gennaio.

I trend che seguono le variabili analizzate in entrambi i casi sono analoghi a quelli osservati a Perarolo.

Possono essere riportate, infine, alcune considerazioni riassuntive sul clima che caratterizza l'area (sebbene i dati utili coprano un arco temporale abbastanza esiguo):

- 1) i valori medi annuali delle precipitazioni si aggirano intorno ai 1100-1200 mm;
- 2) il periodo mediamente più piovoso nell'arco di un anno va generalmente da maggio a novembre, in particolare quest'ultimo mese mostra il picco annuale di cumulata mensile media a scapito però di un numero di giorni piovosi, che si attesta sui valori medi;

- 3) la temperatura media dell'aria a 2 m dal suolo ha un andamento medio sinusoidale nel corso dell'anno con solo due mesi al di sotto dei 0°C ed i mesi estivi tutti al di sopra dei 10 °C.

Per quanto riguarda la distribuzione delle precipitazioni nell'arco dell'anno, ad avvalorare le considerazioni riassuntive esposte (punto 2 dell'elenco soprastante) si riporta il grafico dell'andamento della cumulata pluviometrica giornaliera alla stazione meteorologica ARPAV di Perarolo di Cadore (BL) nel corso dell'ultimo anno ovvero da giugno 2017 a giugno 2018 (Figura 17), elaborato in MATLAB a partire dai dati orari di precipitazione forniti dall'Università degli Studi di Padova. Si propone per completezza anche il grafico con l'andamento delle cumulate a 3 (CP3), 8 (CP8) e 15 (CP15) giorni (Figura 18).

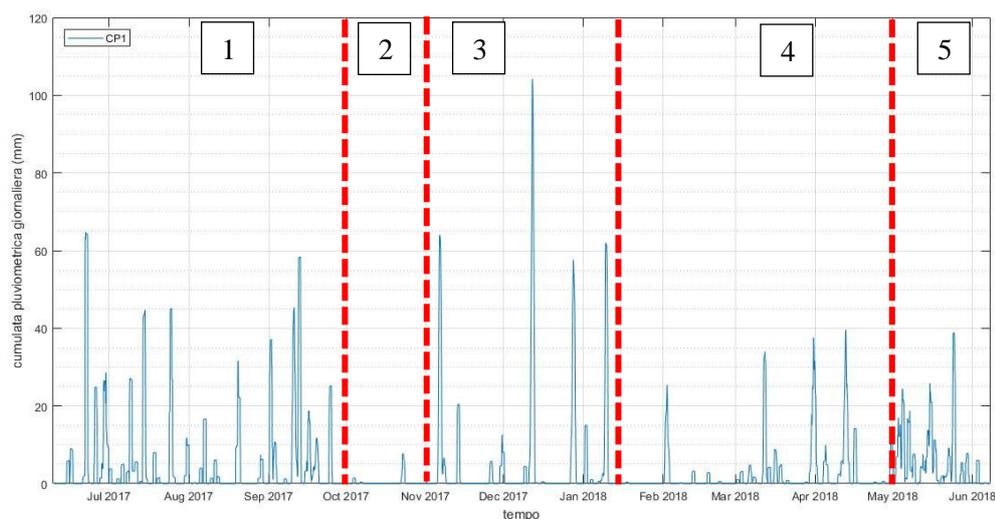


Figura 17 Andamento della cumulata pluviometrica giornaliera nell'ultimo anno ovvero da giugno 2017 a giugno 2018 per la stazione meteorologica di Perarolo di Cadore (BL). I dati orari sono stati forniti dall'Università degli Studi di Padova ed elaborati in MATLAB.

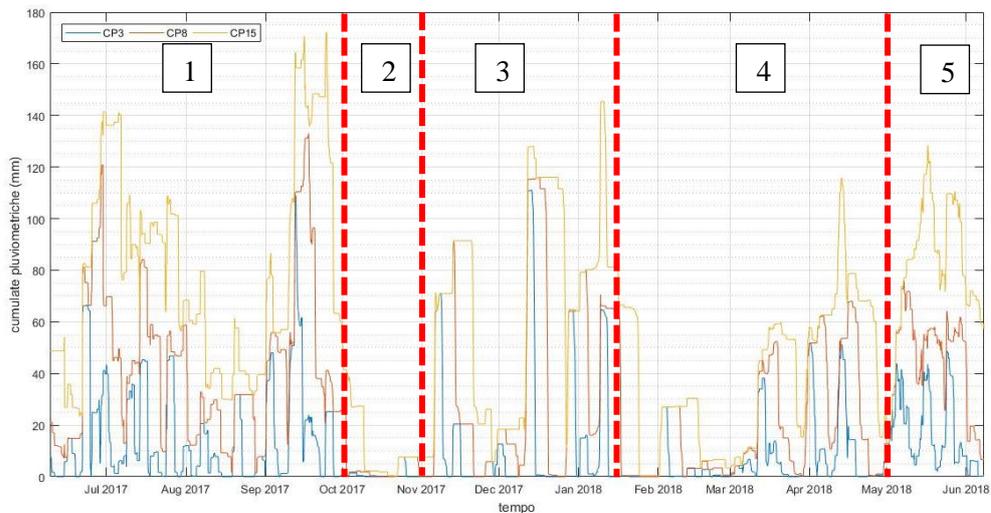


Figura 18 Andamento della cumulata pluviometrica a 3 (CP3), 8 (CP8) e 15 (CP15) giorni nell'ultimo anno ovvero da giugno 2017 a giugno 2018 per la stazione meteorologica di Perarolo di Cadore (BL). I dati orari sono stati forniti dall'Università degli Studi di Padova ed elaborati in MATLAB.

Anche nell'ultimo anno si nota come i mesi estivi siano quelli caratterizzati da una maggior piovosità con le maggiori cumulate pluviometriche a 15 giorni (Figura 17 e Figura 18 -1), seguiti da un periodo di inizio autunno relativamente secco (Figura 17 e Figura 18-2). L'intervallo di tempo che va da novembre 2017 alla prima metà di gennaio 2018 è caratterizzato da eventi con le maggiori cumulate pluviometriche giornaliere ma, a differenza del periodo estivo, con numero di giorni piovosi non è elevato, come testimoniato dalle 'inferiori' cumulate pluviometriche a 15 giorni (Figura 17 e Figura 18-3). In tale intervallo è collocato l'evento del 12 dicembre 2017 che sarà descritto in seguito e la cui cumulata pluviometrica giornaliera è di circa 104.2 mm, mentre quella a 15 giorni supera di poco i 125 mm. Tra la seconda metà di gennaio 2018 e gli inizi di maggio 2018 le precipitazioni sono scarse ed aumentano gradualmente di numero ed in termini di cumulate pluviometriche nel corso del periodo (Figura 17 e Figura 18-4). Infine, il mese di maggio ed i primi giorni di giugno si mostrano molto piovosi (Figura 17 e Figura 18-5): infatti, si rientra nel periodo estivo caratterizzato da precipitazioni

con cumulate pluviometriche giornaliere abbastanza elevate e da un buon numero di giorni piovosi.

1.4.3 Inquadramento idrologico

L'area in esame ricade all'interno del bacino idrografico del torrente Boite. In particolare, Perarolo è situato in prossimità della sezione di chiusura del bacino nel punto in cui il corso d'acqua confluisce nel Piave. Il bacino del Boite è, dunque, gerarchicamente inferiore rispetto a quello più ampio del Piave.

Per quanto riguarda l'aspetto idrologico in senso stretto si fa riferimento all'analisi riportata nella relazione dello *Studio Galli (2012)* [45]. Il lavoro prende in considerazione i dati pluviometrici disponibili per l'abitato di Perarolo di Cadore e ne calcola le curve di possibilità pluviometrica. In particolare, l'elaborazione viene eseguita, seguendo procedure di regionalizzazione attraverso apposite formule di calcolo e parametri, come indicato dall'Autorità di Bacino [45].

La tabella riportata mostra le diverse altezze di precipitazioni attese al variare della durata dell'evento stesso e del tempo di ritorno (Figura 19):

| Durata | Tr | | | | | |
|------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| | 2 h(x)(mm) | 5 h(x)(mm) | 10 h(x)(mm) | 20 h(x)(mm) | 50 h(x)(mm) | 100 h(x)(mm) |
| 60 min | 22.6 | 30.5 | 35.8 | 40.8 | 47.3 | 52.2 |
| 3 ore | 35.4 | 47.9 | 56.1 | 64.0 | 74.2 | 81.9 |
| 6 ore | 47.0 | 63.6 | 74.5 | 85.0 | 98.6 | 108.8 |
| 12 ore | 62.5 | 84.5 | 99.0 | 113.0 | 131.1 | 144.6 |
| 1 giorno | 83.0 | 112.2 | 131.6 | 150.1 | 174.1 | 192.1 |
| 3 giorni | 130.3 | 176.1 | 206.4 | 235.5 | 273.2 | 301.4 |
| 5 giorni | 160.7 | 217.1 | 254.5 | 290.4 | 336.9 | 371.7 |
| 6 giorni | 173.1 | 234.0 | 274.3 | 313.0 | 363.0 | 400.5 |
| 7 giorni | 184.4 | 249.3 | 292.2 | 333.4 | 386.7 | 426.6 |
| 30 giorni | 334.9 | 452.7 | 530.7 | 605.4 | 702.3 | 774.8 |

Figura 19 Tabella con le altezze di precipitazioni calcolate per le diverse durate dell'evento e per i diversi tempi di ritorno attraverso le procedure di regionalizzazione proposta dall'Autorità di Bacino. Immagine riportata nella relazione dello *Studio Galli "Interventi di mitigazione per gli scenari di rischio geologico, idraulico e di consolidamento dell'abitato di Perarolo di Cadore (BL). STUDIO DI PREFATTIBILITÀ"*, (2012) [45].

Per quanto riguarda le portate di piena lo *Studio Galli (2012) [45]* ha preso in considerazione i valori del colmo di piena di progetto per una durata di precipitazione di 12 ore al variare dei tempi di ritorno, come riportati nel P.A.I. (Figura 20).

| Sezione | S (km ²) | Q (m ³ /s) T=5 | Q (m ³ /s) T=10 | Q (m ³ /s) T=20 | Q (m ³ /s) T=50 | Q (m ³ /s) T=100 | Q (m ³ /s) T=200 |
|---|----------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Boite alla confluenza | 405 | 190 | 273 | 350 | 451 | 527 | 602 |
| Piave a monte della confluenza del Boite | 842 | 387 | 553 | 712 | 917 | 1071 | 1225 |

Figura 20 Tabella con le portate di progetto per Perarolo di Cadore al variare dei diversi tempi di ritorno per un evento pluviometrico della durata di 12 ore, come riportate nel P.A.I. Immagine riportata nella relazione dello Studio Galli "Interventi di mitigazione per gli scenari di rischio geologico, idraulico e di consolidamento dell'abitato di Perarolo di Cadore (BL). STUDIO DI PREFATTIBILITÀ", (2012) [45].

Si ricorda che le portate dei due corsi d'acqua principali in corrispondenza di Perarolo sono regolate da due serbatoi artificiali: il Lago di Valle di Cadore sul Boite e il Lago di Cadore sul Piave.

Il lavoro [45] è comprensivo anche di una correlazione fra gli eventi meteorologici (intesi come sequenze continue di giorni piovosi intervallati al massimo da un giorno senza pioggia) e le principali attivazioni della frana di Sant'Andrea. In particolare sono state analizzate le precipitazioni giornaliere del giorno stesso in cui si è verificato l'evento franoso e le cumulate su diversi intervalli temporali dei giorni precedenti. Inoltre, si sono determinate la durata e l'altezza di precipitazione totale che hanno caratterizzato l'evento meteorologico innescante, in modo tale da calcolarne il tempo di ritorno. Gli eventi franosi considerati si sono verificati negli anni: 1925,1926,1965,1966,1996,1997 e 2000.

Viene, di seguito, riportata la tabella in cui, per ogni riattivazione della frana di Sant'Andrea, vengono analizzate le cumulate pluviometriche su diversi intervalli di tempo antecedenti l'evento stesso (dato 1,5,7,15,30,60,90 g), la cumulata pluviometrica dell'evento meteorologico innescante (Pe) con la relativa durata (Durata evento) e il tempo di ritorno (Tr), la cumulata dell'evento meteorologico

normalizzata sulla pioggia totale media annua del pluviometro considerato (Npe%), la cumulata dei 30 gg antecedenti l'evento a cui è sottratta la cumulata dell'evento meteorologico innescante (Pa) e la stessa variabile normalizzata sulla pioggia totale media annua del pluviometro considerato (Npa 30%) (Figura 21):

| Evento | dato 1g | dato 5g | dato 7g | dato 15g | dato 30g | dato 60g | dato 90g | Durata evento | Tr | Pe | Npe% | Pa (30gg) | Npa 30% |
|--------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|---------------|-----|-------|------|-----------|---------|
| 1925 | 0 | 220.7 | 242.8 | 242.8 | 247.8 | 250.6 | 345.2 | 7 | 5 | 242.8 | 7.7 | 5 | 0.4 |
| 1926 | 41.8 | 172.8 | 173 | 249.8 | 658.4 | 730.9 | 783.9 | 6 | 2 | 173 | 12.6 | 485.4 | 35.5 |
| 1965 | 137 | 158.4 | 159.2 | 238.6 | 269.1 | 408.5 | 485.4 | 6 | <2 | 159.2 | 11.6 | 109.9 | 8.0 |
| 1966 | 7 | 19.4 | 19.4 | 30.6 | 374.8 | 554.2 | 595.8 | 3 | <2 | 19.4 | 1.4 | 355.4 | 26.0 |
| 1996 | 0.8 | 1.2 | 9.7 | 40.8 | 79.1 | 106 | 106.1 | 16 | <2 | 41.2 | 3.0 | 37.9 | 2.8 |
| 1997 | 0.4 | 11.7 | 42.8 | 59 | 98.7 | 368.9 | 562.4 | 11 | <2 | 59 | 4.3 | 39.7 | 2.9 |
| 2000 | 24.6 | 171.4 | 192.6 | 304.4 | 428.8 | 842.4 | 886.8 | 6 | 2/5 | 192.6 | 4.1 | 236.2 | 17.3 |

Figura 21 Tabella in cui, per ogni riattivazione della frana di Sant'Andrea, vengono riportate le cumulate pluviometriche su diversi intervalli di tempo antecedenti l'evento stesso (dato 1,5,7,15,30,60,90 g), la cumulata pluviometrica dell'evento meteorologico innescante (Pe) con la relativa durata (durata evento) e il tempo di ritorno (Tr), la cumulata dell'evento meteorologico normalizzata sulla pioggia totale media annua del pluviometro considerato (Npe%), la cumulata dei 30 gg antecedenti l'evento a cui è sottratta la cumulata dell'evento meteorologico innescante (Pa) e la stessa variabile normalizzata sulla pioggia totale media annua del pluviometro considerato (Npa 30%). Immagine riportata nella relazione dello Studio Galli "Interventi di mitigazione per gli scenari di rischio geologico, idraulico e di consolidamento dell'abitato di Perarolo di Cadore (BL). STUDIO DI PREFATTIBILITÀ", (2012) [45].

Si riportano le principali osservazioni di carattere idro-meteorologico e cinematico, competenti alla dinamica del fenomeno in studio:

- l'86% delle attivazioni della frana si verifica dopo una pioggia continua che dura da 6-10 giorni;
- il 71% dei movimenti significativi del corpo di frana si sono verificati a seguito di eventi di pioggia con tempo di ritorno inferiore o uguale ai 2 anni ('eventi di piena ordinaria'), solo il 29% dei casi avviene con un evento di pioggia avente tempo di ritorno tra i 2 e i 5 anni ('eventi di piena straordinaria', come quello del 2000);
- quindi, non è esclusa la possibilità dell'innescamento del fenomeno franoso anche in concomitanza di eventi di piena ordinaria.

1.5 Inquadramento idrogeologico

L'assetto litologico e strutturale dell'area controlla la circolazione delle acque sotterranee. In particolare dalla relazione delle *Ferrovie dello Stato* [17] si riconoscono diversi tipi di permeabilità in funzione delle diverse litologie presenti:

- 1) la permeabilità primaria (di 1° tipo), legata alla porosità del materiale, è dominante nei depositi quaternari che ricoprono il substrato roccioso. Inoltre, eterogeneità nel contenuto di particelle fini determina diversi comportamenti idrodinamici degli stessi, ad esempio *Genevois et al. nella relazione dell'Università degli Studi di Padova del 2003* [53] sottolineano il ruolo giocato dal grande corpo di paleo-colata di Pian de la Cesa sull'idrogeologia dell'area e soprattutto del versante in frana, poiché, essendo costituita prevalentemente di materiale argilloso, risulta essere molto impermeabile, convogliando le precipitazioni che insistono su essa proprio a monte del corpo di frana di Sant'Andrea, come testimoniato dagli innumerevoli solchi di ruscellamento che attraversano la paleo-colata stessa (cfr. alla carta geomorfologica in allegato). Le anidriti non soggette a fenomeni di dissoluzione, inoltre, presentano una bassissima permeabilità primaria; [17]
- 2) la permeabilità secondaria (di 2° tipo), legata alla fratturazione, è tipica del substrato roccioso ed è controllata soprattutto dalla tettonica. Infatti, lungo gli allineamenti tettonici i materiali sono più fratturati e posseggono, dunque, una maggiore permeabilità, costituendo le vie principali di percolazione delle acque sotterranee. Tale tipo di permeabilità è quello dominante per i litotipi silteosi ed arenacei; [17]
- 3) la permeabilità terziaria (di 3° tipo), legata all'allargamento delle fratture ed alla formazione di cavità e condotti per dissoluzione carsica, è tipica delle rocce solubili, ovvero dolomie, calcari ma soprattutto gessi e anidriti. Il carsismo incrementa notevolmente la trasmissività di questi litotipi, soprattutto in corrispondenza di discontinuità tettoniche e

stratigrafiche, dove il fenomeno dissolutivo si concentra. All'interno del reticolo carsico l'acqua scorre a grandi velocità e con portate ingenti in concomitanza di eventi meteorici intensi; [17]

- 4) la permeabilità di 4° tipo, legata alla fessurazione del terreno ed alla presenza di opere antropiche: queste ultime determinano, infatti, l'instaurarsi di importanti anisotropie sia in termini meccanici-geotecnici che idrogeologici all'interno dell'ammasso detritico. Se tali opere vengono disposte lungo dei piani che si sviluppano in profondità al di sotto del piano campagna come nel caso in esame (cfr. al capitolo sulla frana di Sant'Andrea), si generano delle superfici di discontinuità, le quali possono evolvere in piani di scivolamento, provocando un'intensa fessurazione del terreno anche in superficie. Le fessure determinano elevate permeabilità dei materiali coinvolti e fungono, quindi, da vie preferenziali di infiltrazione dell'acqua meteorica. Inoltre, l'acqua pellicolare, scorrendo lungo gli elementi delle strutture antropiche, raggiunge facilmente grandi profondità e costituisce un'altra fonte di ricarica per la circolazione idrica sotterranea.

La Formazione di Travenanzes, essendo eterogenea, mostra comportamenti idrodinamici complessi in funzione della prevalenza delle diverse componenti: gli orizzonti argillosi-marnosi sono più impermeabili, le arenarie e le siltiti mostrano una permeabilità secondaria, mentre nei calcari, nelle dolomie, nei gessi e nelle anidriti (come nella Dolomia Principale e nelle altre formazioni calcareo-dolomitiche) il reticolo carsico guida e controlla la circolazione delle acque sotterranee. La dissoluzione dei gessi e delle anidriti da parte dell'acqua è testimoniata, inoltre, dall'alta percentuale di ione solfato (fra 18.6 e 1563 mg/l) rilevata in corrispondenza di alcune emergenze superficiali delle acque sotterranee [17].

Un altro elemento idrogeologico fondamentale per l'area è la presenza di alcune depressioni ed aree umide lungo il versante (come ad esempio quella ai piedi della

chiesetta di Damos), le quali potrebbero costituire vie preferenziali di accumulo e/o infiltrazione delle acque superficiali [45].

In sintesi, la circolazione delle acque sotterranee si sviluppa all'interno dei litotipi più trasmissivi dal punto di vista idrogeologico e soggetti al carsismo, ovvero i livelli calcarei e quelli gessoso-anidritici della Formazione di Travenanzes [17]. Una corretta definizione dell'assetto litologico-strutturale è, dunque, di primaria importanza nell'individuazione delle vie di scorrimento preferenziali delle acque [17].

CAPITOLO 2: Fenomeni di dissesto idrogeologico in aree a substrato gessoso

Le peculiari caratteristiche geologico-strutturali dei materiali che costituiscono il substrato della frana di Sant'Andrea, ovvero la loro natura gessosa e l'intensa deformazione tettonica subita, rendono opportuno un approfondimento sulle proprietà geotecniche e sui fenomeni geomorfologici che interessano le litologie evaporitiche.

2.1 Gesso e anidrite: strutture mineralogiche e ambienti di formazione

Il gesso è il minerale del solfato biidrato di calcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e presenta struttura monoclinica costituita da strati paralleli di anioni $(\text{SO}_4)^{2-}$ saldamente legati ai cationi $(\text{Ca})^{2+}$ a loro volta separati da strati costituiti da molecole di (H_2O) , le quali, data la loro polarità, formano legami deboli con gli ioni vicini [28]. Mentre l'anidrite, minerale del solfato di calcio anidro (CaSO_4), ha struttura ortorombica in cui il catione $(\text{Ca})^{2+}$ è circondato da otto anioni $(\text{SO}_4)^{2-}$ [1]. La transizione tra le due fasi (idrata e anidra) del solfato di calcio è funzione dei parametri chimico-fisici dell'ambiente in cui la sostanza si trova, ad esempio della temperatura, della pressione e del quantità d'acqua disponibile nel sistema (l'anidrite è stabile sopra i 58°C e ad una pressione di 100 kPa, mentre solo il gesso è stabile sotto i 38°C [58]).

L'anidrite precipita come minerale primario in ambienti altamente alcalini e da soluzioni con concentrazioni cinque volte maggiori di quella dell'acqua marina [1]. Il gesso, invece, precipita come minerale primario in bacini evaporitici poco profondi con una concentrazione della soluzione pari a tre volte quella marina [1]. Il gesso è, tra i solfati, il minerale più abbondante e si forma sotto condizioni di sedimentazioni 'normali', mentre l'anidrite è rara come minerale primario e si

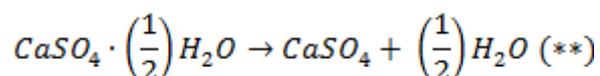
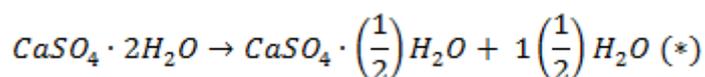
trova in quanto tale solo in particolari condizioni di ambiente arido sopratidale [1]. Il gesso è, quindi, stabile alle condizioni superficiali, dove, invece, l'anidrite si trova solo come minerale metastabile nella maggior parte dei casi e stabile solamente negli ambienti di precipitazione primaria [1]. L'anidrite viene a formarsi, dunque, principalmente in un contesto diagenetico, genesi spesso indicata dall'associazione con la dolomite [1].

2.2 I fenomeni che coinvolgono il gesso

Il gesso è molto suscettibile alla circolazione attiva dell'acqua e alle variazioni di temperatura. La variabilità, strettamente legata alle diverse condizioni ambientali, dei processi che lo coinvolgono (idratazione-deidratazione e dissoluzione) gli conferiscono un comportamento imprevedibile [28] e tanto più complesso quanto più eterogenee sono le caratteristiche dell'entità geologica in cui si trova.

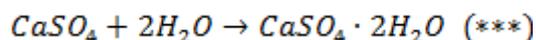
2.2.1 I cambiamenti di fase: idratazione dell'anidrite e deidratazione del gesso

In condizioni superficiali è sufficiente la presenza di acqua (di infiltrazione o di flusso sotterraneo) per indurre il processo di trasformazione per idratazione dell'anidrite metastabile in gesso. Viceversa, è possibile che in particolari condizioni di temperatura e pressione il gesso si disidrata in anidrite. Le reazioni di deidratazione del gesso, che prevedono una fase intermedia con la perdita di 1.5 H₂O, chiamata 'bassanite' [28], sono le seguenti:



La reazione (*) avviene intorno ai 65°C, mentre la completa perdita delle molecole d'acqua dalla struttura del minerale (**) ha luogo a 95°C circa.

La reazione di idratazione dell'anidrite in gesso, invece, può essere espressa come segue [28]:



Come l'anidrite anche la bassanite ($\text{CaSO}_4 \cdot (1/2)\text{H}_2\text{O}$) in presenza di acqua si reidrata rapidamente in gesso.

Le diverse fasi del solfato di calcio presentano diversi valori di volume specifico e, pertanto, alle transizioni di fase sono legate variazioni volumetriche del materiale solido che costituisce il terreno/la roccia. In particolare, all'idratazione dell'anidrite è associato un aumento di volume tra il 30% e il 58%, che esercita pressioni stimate tra i 2 e 70 MPa [58]. Tale processo, che spesso avviene in maniera rapida, comporta il riassetto della struttura del terreno o della roccia in cui l'anidrite si trova. Se il materiale circostante è poco confinato e superficiale, l'aumento di volume viene compensato da un altro fenomeno importante che interessa il solfato di calcio ovvero dalla dissoluzione del gesso. Mentre, se il materiale in cui si trova l'anidrite soggetta a trasformazione ed espansione si trova confinato in profondità, allora il graduale aumento di pressione determinerà una liberazione finale ed in maniera esplosiva dello stress accumulato. *Ylmaz (2001)* [58] riporta sia esempi di eventi esplosivi di questo genere, come quelli avvenuti in Texas (citando *Brune - 1965*) lungo corsi d'acqua su substrato evaporitico, che esempi di sollevamento graduale di infrastrutture con relativo danneggiamento delle stesse per aumento di volume del materiale su cui queste sono impostate, come quello della galleria di Vorbano in Italia (citando *Redfield - 1963*).

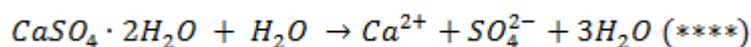
La deidratazione del gesso, invece, determina in un sistema aperto la diminuzione del volume del materiale solido, che può raggiungere valori di -38% [58]. Questo fenomeno determina la formazione di porosità e vuoti, così come una rapida

idratazione può creare una grande quantità di vuoti e fratture [28]. In generale, i cambiamenti di volume sono controllati, dunque, dalla porosità precedente e successiva al passaggio del fluido idratante o all'uscita del fluido dal materiale gessoso [58].

Per concludere, il processo di idratazione, che consiste nella dissoluzione di una fase con la contemporanea nucleazione dell'altra [28], è controllato da diversi fattori come la quantità di superficie di materiale solido esposta al fluido idratante, la densità e il volume dei vuoti della risultante struttura idratata [28].

2.2.2 La dissoluzione nell'acqua

Il gesso è il solfato più diffuso allo stato solido sulla superficie terrestre, in quanto il meno solubile in acqua (2.6 g/L) [28]. La solubilità del gesso è controllata da vari fattori, quali: temperatura, composizione chimica dell'acqua, pH, dimensioni delle particelle di gesso, morfologia della superficie del materiale gessoso esposta al solvente (convessa, concava, piana) e pressione [28]. La massima solubilità del gesso si ha a 40°C e decresce, poi, all'aumentare della temperatura [28]. Il tasso di dissoluzione è maggiore in un sistema aperto rispetto ad uno chiuso [28]. La reazione della dissoluzione del gesso può essere espressa come segue [58]:



In una roccia gessosa la dissoluzione avviene anche a grandi profondità e lungo discontinuità preesistenti, formando cavità e reti complesse di canali sotterranei a controllo strutturale [58]. Questi elementi morfologici giocano un ruolo primario nella circolazione delle acque sotterranee e determinano spesso effetti in superficie attraverso deformazioni graduali in direzione verticale del piano campagna e/o collassi improvvisi [58], che rientrano entrambi all'interno del fenomeno chiamato 'subsidenza'. La subsidenza può avvenire su scale spazio-temporali molto varie in funzione della conformazione geologico-strutturale del substrato roccioso e dei terreni di copertura [58]. I danni causati alle opere

antropiche da tale fenomeno, se non viene tenuto in considerazione in fase di progetto possono essere rilevanti, come nei casi delle dighe di St.Francis a Los Angeles (*Ransome - 1929*) e di McMillan in New Mexico (*Brune - 1965*) citati da *Ylmaz (2001)* [58].

2.2.3 Gli effetti dei fenomeni di idratazione/deidratazione e di dissoluzione sulle proprietà geotecniche dei terreni contenenti gesso e/o anidrite

Come soprariportato, variazioni di volume legate a transizioni di fase o a idratazione/deidratazione e creazioni di vuoti legati alla dissoluzione minano la stabilità della struttura di un terreno, costituito nei suoi granuli o nel cemento di materiale gessoso o anidritico.

Idratazione e deidratazione dell'anidrite e del gesso modificano lo stato di stress del terreno a causa delle variazioni volumetriche indotte dalle reazioni in esame. Inoltre, tali processi comportano variazioni del contenuto d'acqua e quindi della pressione interstiziale, impattando ancora una volta sugli sforzi efficaci agenti sulla struttura del terreno stesso [58].

Il fenomeno della dissoluzione del gesso è fondamentale nei terreni in cui questo minerale si trova come cementante o non. In questi casi, la dissoluzione avviene quando 1) la struttura del terreno si rompe separando il cemento dai granuli o 2) c'è consolidazione o 3) vi è un flusso continuo di acqua nella massa solida del terreno [28]. L'effetto è la disintegrazione della struttura del terreno con il relativo collasso, la lisciviazione della porzione fine e lo sviluppo di condotti nel suolo ('piping') [58]. Gli effetti sono tanto più rapidi e catastrofici quando il materiale cementante è l'anidrite [58].

La presenza insieme al gesso nel terreno di minerali argillosi, come la montmorillonite (e argille del gruppo delle smectiti in generale), l'illite e la corsesenite, i quali tendono a rigonfiarsi, assorbendo molecole d'acqua all'interno del loro reticolo cristallino (in piani la cui distanza interplanare varia al variare

dello stress applicato e del contenuto d'acqua [1]), intensifica gli effetti del gesso visti sopra ([1], [58]). Essi assorbono l'acqua liberata dal gesso, nel caso in cui questo si disidrati a causa di variazioni dei parametri fisici ambientali, e aumentano molto il loro volume [58]. Se associati ad anidriti, questi minerali determinano un notevole rigonfiamento del terreno in cui si trovano. Il rigonfiamento è sempre preceduto o simultaneo ad un rilascio di stress e di energia (che come già visto può avvenire in maniera esplosiva).

Una volta stabilito che il terreno è di natura gessosa o contiene elementi gessosi/anidritici (secondo i metodi riportati nell'articolo di *Jha e Sivapullaiah (2017)* [28]), vengono ad essere importanti da valutare i seguenti parametri geotecnici [1]:

- a) il contenuto d'acqua, la quale gioca un ruolo fondamentale in termini di rigonfiamento e dissoluzione;
- b) il peso specifico, il quale aumenta all'aumentare del contenuto di solfato di calcio e al diminuire del contenuto d'acqua;
- c) i limiti di Atterberg e l'indice di plasticità (PI), poiché i terreni con alto PI e/o con alto limite liquido (un terreno anidritico può avere un limite liquido di 65%) sono considerati in grado di mostrare grandi capacità 'rigonfianti';
- d) la pressione di rigonfiamento, espressa come pressione necessaria a conservare l'altezza di un campione cilindrico di materiale idratato (nel caso di studio di *Abu Seif (2014)* [1] delle evaporiti dell'Miocene Medio del Mar Rosso egiziano, mostrano per i campioni di gesso - i quali, però, si constata che contiene cristalli anidrite- valori medi di 1.45 kg/cm², per l'anidrite di 2.69 kg/cm² e per le argille (smectiti) di 4.9 kg/cm², a dimostrazione dell'aumento dell'effetto rigonfiante in presenza di argille);
- e) la percentuale di rigonfiamento, espresso come percentuale di incremento di altezza di un campione cilindrico di materiale idratato (nel caso delle evaporiti egiziane del Miocene Medio [1] il valore medio per il gesso è del 12.5%, per l'argilla 32% e per l'anidrite 61.7%);

- f) il valore di rigonfiamento libero, espresso come percentuale di aumento di volume di 10 cm³ di polvere del materiale (nel caso delle evaporiti egiziane del Miocene Medio [1] il valore medio per il gesso è del 110%, per l'argilla 158% e per l'anidrite 140%).

Dagli ultimi parametri risulta come il potenziale di rigonfiamento è maggiore quanto più il contenuto di anidrite e minerali delle argille nel terreno è elevato.

Gli effetti del gesso sulle proprietà dei suoli possono, però, essere sia positivi che negativi dal punto di vista fisico-ingegneristico [28]. Ciò dipende da vari fattori come: il tipo di terreno, le fasi mineralogiche presenti, le condizioni idrogeologiche della falda, le dimensioni e le forme dei cristalli di gesso e le condizioni ambientali [28]. *Jha e Sivapullaiah (2017)* [28] nel loro lavoro riportano una tabella in cui sono elencati e sintetizzati alcuni casi di letteratura scientifica in cui si è studiato l'effetto del gesso in termini di variazioni dei parametri geotecnici di un particolare tipo di terreno ed in determinate condizioni.

Per riassumere, i fenomeni che caratterizzano i terreni gessosi sono:

- 1) la subsidenza per dissoluzione del gesso e/o per transizione di fase;
- 2) il rigonfiamento per idratazione dell'anidrite.

2.3 Il processo di dissoluzione del gesso

In una regione e/o in un'area localizzata dominata dalla presenza di evaporiti, il fenomeno del carsismo (ovvero la dissoluzione dei minerali che costituiscono le rocce in soluzioni acquose che scorrono sul terreno o filtrano nel sottosuolo) è senz'altro il più efficiente e determinante nel modellare la topografia e nel accentuare le eterogeneità in termini di proprietà geotecnico-idrogeologiche dei materiali presenti. Infatti, riprendendo quanto scritto da *Gutiérrez Elorza e Gutiérrez Santolalla (1998)* [25], la morfologia del terreno in un contesto evaporitico è controllata soprattutto dai fenomeni di dissoluzione superficiale e sub-superficiale che agiscono su queste rocce molto solubili. In particolare,

Gutiérrez Elorza e Gutiérrez Santolalla (1998) [25] nel loro articolo concentrano l'attenzione sul carsismo che interessa litologie gessose, le quali costituiscono il substrato della depressione del fiume Ebro (Spagna settentrionale). Essi [25] riportano un'esauritiva analisi in merito al processo di dissoluzione del gesso ed individuano diversi fattori che ne influenzano la solubilità. Tali fattori possono essere riassunti nei seguenti punti:

- 1) composizione delle soluzioni acquose solventi;
- 2) temperatura delle soluzioni acquose solventi;
- 3) pressioni delle soluzioni acquose solventi;
- 4) salinità delle soluzioni acquose solventi (un'alta concentrazione ionica determina un aumento della solubilità del gesso).

Richiamando gli studi di altri autori, *Gutiérrez Elorza e Gutiérrez Santolalla (1998) [25]* riportano che la solubilità del gesso nell'acqua a 25°C e 1 atmosfera di pressione è pari a 2.4 g/l (*Ford and Williams, 1989*) e che nell'acqua distillata e a 20°C il gesso è 183 volte più solubile della calcite (*Jackus, 1977*).

Assieme alla solubilità del gesso un altro parametro importante che concorre alla definizione delle modalità evolutive spazio-temporali di un substrato gessoso è il tasso di dissoluzione. *Gutiérrez Elorza e Gutiérrez Santolalla (1998) [25]* a tal proposito condividono la visione di *White (1984)*, il quale distingue due fattori che controllano il tasso di dissoluzione:

- 1) la componente chimica, con cui ci si riferisce all'equilibrio chimico degli elementi tra le diverse fasi e alla cinetica della reazione di dissoluzione. Tale componente, infatti, può essere espressa attraverso una reazione cinetica di primo ordine che tiene in considerazione:
 - a) il grado di saturazione della soluzione acquosa;
 - b) la superficie della fase solida esposta alla fase acquosa;
 - c) lo spessore dello strato di diffusione ;
 - d) il coefficiente di diffusione del minerale;

Si nota l'importanza del grado di saturazione e della superficie della fase solida esposta, che dal punto di vista geologico-idrogeologico può essere rappresentata dalla granulometrica del materiale se incoerente o dal grado di fratturazione se il materiale è roccioso;

- 2) la componente idrodinamica, con cui ci si riferisce al movimento della soluzione acquosa solvente al di sopra o all'interno del materiale costituito in tutto o in parte dal minerale soggetto a dissoluzione. Tale componente ha un ruolo importante sui processi che entrano in gioco nel fenomeno di dissoluzione stesso: in particolare, se la soluzione acquosa è statica, allora il processo diffusivo è l'unico attivo; mentre, se il mezzo acquoso è in movimento, alla diffusione si associa anche il trasferimento di materia legato al movimento della soluzione stessa e quindi incrementa il tasso di dissoluzione. Quindi, il tasso di dissoluzione dipende esclusivamente dalla reazione di dissoluzione se il mezzo acquoso è fermo, mentre è funzione della velocità e del regime del flusso se il mezzo è in movimento [25]. La transizione da regime di flusso laminare a turbolento determina un rapido aumento del tasso di dissoluzione.

Gli autori *Gutiérrez Elorza e Gutiérrez Santolalla (1998)* [25] (ma anche *Gutiérrez et al. (2014)* [26]) riportano, infine, la distinzione introdotta da *Berner (1978)* di due tipologie estreme di sistemi di dissoluzione: un sistema controllato da reazioni di superficie (che si applica ai composti con bassa solubilità, es. calcite, in cui il tasso di dissoluzione è essenzialmente controllato dalla reazione chimica di dissoluzione, ovvero dalla componente chimica) e un sistema controllato dal trasporto (che si applica ai minerali con alta solubilità, es. halite, in cui il tasso di dissoluzione dipende in gran parte dalla velocità e dal regime del flusso, ovvero dalla componente idrodinamica). Il gesso mostra un comportamento misto tra i due sistemi, che consentono all'acqua di penetrare più in profondità, favorendo, così, lo sviluppo rapido di condotti nelle rocce gessose [25].

Quest'ultimo aspetto è importante e spiega come un substrato gessoso sia favorevole allo sviluppo di condotti e/o cavità in cui l'acqua può scorrere più rapidamente e con maggior facilità.

I fattori sopraelencati sono di natura chimico-fisica e legati alle caratteristiche geologiche delle rocce solubili e alle condizioni climatiche dell'ambiente in cui queste si trovano (da entrambe, poi, dipende anche il tipo di suolo e la vegetazione presenti, i quali giocano anch'essi un ruolo rilevante). Inoltre, va ricordato come le opere e le attività antropiche determinino variazioni importanti e repentine dei parametri fondamentali che controllano il fenomeno della dissoluzione, i cui effetti sono tutt'altro che trascurabili.

Per quanto riguarda l'aspetto geologico, i fattori principali possono essere così raggruppati [25]:

- 1) litologici: tessitura, dimensione e geometria dei cristalli e/o dei grani di terreno, struttura interna, porosità, presenza di sostanze non solubili;
- 2) stratigrafici: spessore delle formazioni gessose, intercalazioni con corpi non solubili, presenza di lenti di halite, presenza di acquiferi;
- 3) strutturali: struttura delle formazioni gessose, presenza di piani di discontinuità (che guidano la dissoluzione [26]) e loro geometrie, neotettonica;
- 4) geomorfologici: configurazione del rilievo e tempo di sviluppo dello stesso;
- 5) idrogeologici: tipo di flusso (in fratture o in porosità), velocità del flusso, regime del flusso, tempo di residenza dell'acqua nel sistema carsico, composizione chimica dell'acqua, fluttuazioni della tavola d'acqua.

Gli aspetti climatici sono legati soprattutto al regime pluviometrico e termico della regione. Gli autori *Guerrero e Gutiérrez (2017)* [24] riportano come esempio il loro caso di studio in un ambiente semiarido com'è il bacino del fiume Ebro in Spagna settentrionale, in cui la scarsità di precipitazioni e vegetazione rende più

efficace l'erosione meccanica da parte della caduta della pioggia e dello scorrimento superficiale dell'acqua rispetto alla dissoluzione del gesso che costituisce in gran parte il substrato roccioso dell'area. In regioni caratterizzate da questo tipo di clima, dunque, le litologie soggette a carsismo hanno un maggior potenziale di preservazione rispetto a quelle facilmente soggette all'erosione meccanica dell'acqua. Viceversa, nelle zone umide la presenza di vegetazione rigogliosa attenua l'azione erosiva dell'acqua, la quale piuttosto si infiltra, dissolvendo con maggior facilità le rocce carsificabili [24].

2.4 Il carsismo su substrato gessoso

Il fenomeno del carsismo in materiale gessoso è legato, dunque, a parametri geologici e climatici e genera forme del tutto analoghe a quelle riscontrabili in aree carsiche a substrato carbonatico. Si rilevano, perciò, karren, doline, depressioni ospitanti specchi d'acqua, cavità e condotti sotterranei (Figura 22). Il tutto concorre alla definizione dell'area carsica come di una regione in cui [26]:

- 1) il reticolo di drenaggio è poco sviluppato;
- 2) la superficie del terreno è caratterizzata dalla presenza di depressioni chiuse;
- 3) l'infiltrazione dell'acqua è favorita e prevale un drenaggio sotterraneo;
- 4) la circolazione delle acque sotterranee è rapida ed avviene attraverso reti di condotti verso sorgenti o aree in cui l'acqua fuoriesce dal sottosuolo in modo diffuso;
- 5) il substrato roccioso è caratterizzato da una morfologia irregolare, dalla presenza di vuoti e di zone in cui la dissoluzione è attiva e determina fenomeni di subsidenza e di instabilità.

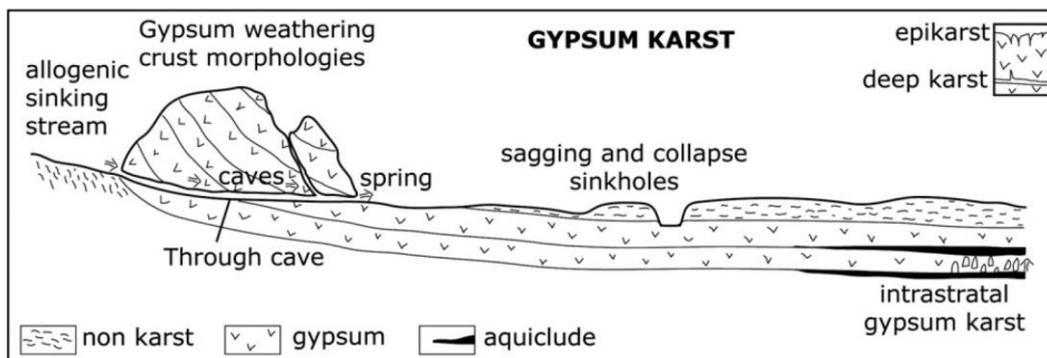


Figura 22 Schema semplificato del carsismo su substrato gessoso, tratto da GUTIÉRREZ, F., PARISE, M., DE WAELE, J., JOURDE, H. (2014) 'A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst', *Earth-Science Reviews* [26].

Queste caratteristiche sono legate al fenomeno del carsismo stesso, indipendentemente su che tipo di substrato solubile esso si sviluppi (carbonati o evaporitici). Il ruolo del tipo di substrato solubile è, però, fondamentale nella definizione nel tasso di evoluzione del rilievo. Infatti, essendo il gesso circa 100 volte più solubile dei carbonati [26], ne consegue che l'evoluzione del rilievo su un substrato gessoso sia molto più rapida di quella di un rilievo impostato su un substrato carbonatico (tale affermazione è tanto più vera quando il substrato è costituito da halite). Quindi, le aree carsiche con substrato evaporitico (principalmente gesso, anidrite, halite) per le sue singolari proprietà dissolventi presentano caratteristiche peculiari e a cui l'attività antropica deve porre maggior attenzione. Tali caratteristiche possono essere, così, riassunte:

- 1) la maggior solubilità delle evaporiti rispetto ai carbonati determina la creazione di vuoti importanti, e quindi variazioni in permeabilità (porosità terziaria) del materiale, e la riduzione della resistenza meccanica delle rocce su scale temporali paragonabili a quelle umane;
- 2) la subsidenza indotta dalla dissoluzione in rocce evaporitiche può mostrare alti tassi e frequenze, così come un più ampio spettro di meccanismi con cui avviene, date le basse proprietà meccaniche e la reologia più duttile delle evaporiti (che conferiscono una minor potenzialità di sviluppare un buon effetto arco e facilitano i collassi [58]) ;

- 3) la dissoluzione profonda di evaporiti (soprattutto i sali) può interessare aree molto vaste e creare zone con grandi depressioni subsidenti e una grande varietà di forme deformative della superficie.

A conclusione del paragrafo si specifica che lo sviluppo del carsismo nelle rocce gessose è funzione anche della forma cristallina del minerale costitutivo. *Torri et al. (2013)* [49] notano come il carsismo mostri diversi trend evolutivi nel caso di substrato con gesso selenitico e con gesso microcristallino. Nel primo caso, l'azione dissolutiva tende a distruggere la struttura cristallina della roccia, mentre nel secondo caso genera un carsismo più continuo con la formazione in un primo momento di una morfologia epi-carsica e solo successivamente di condotti e doline.

2.5 Il rischio nelle aree carsiche

I rischi più comuni associati alle aree carsiche in generale, e tanto più per quelle con substrato evaporitico (per la rapida tendenza evolutiva già esposta), includono, come riportato in *Gutiérrez et al. (2014)* [26]:

- doline ('sinkholes'), che in aree con substrato gessoso mostrano, oltre alla tempistica evolutiva a scala umana, anche meccanismi di subsidenza peculiari (ad esempio, il 'sagging' -Figura 23), dovuti alla reologia duttile e alla bassa resistenza meccanica del materiale;
- alluvioni ('floods'), che sono legate soprattutto alle differenze di comportamento idrodinamico delle diverse componenti degli acquiferi (matrice, fratture e condotti; epicarsismo e endocarsismo) e che si esplicano con il rapido innalzamento della tavola d'acqua o il rapido apporto di acqua ai fiumi da parte degli acquiferi stessi;
- frane ('slope movements'), nello studio delle quali difficilmente si pone attenzione al ruolo del carsismo, il quale risulta, però, determinante nella

generazione di vuoti e nel determinare le proprietà meccaniche dei materiali costituenti i versanti. I vuoti costituiscono, infatti, vie preferenziali di scorrimento dell'acqua.

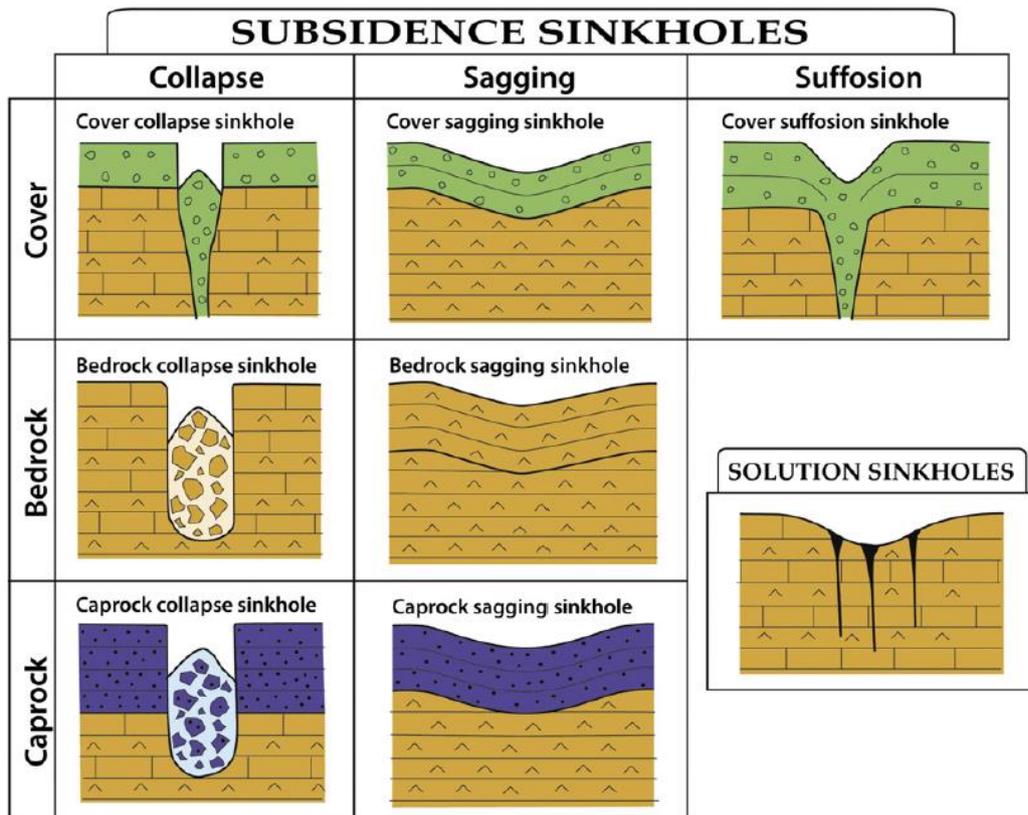


Figura 23 Classificazione genetica delle doline o 'sinkhole' riportata (già modificata) in GUTIÉRREZ, F., PARISE, M., DE WAELE, J., JOURDE, H. (2014) 'A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst', *Earth-Science Reviews* [26]. La campitura del substrato indica le possibili litologie coinvolte in ciascun processo genetico: si osserva come il 'sagging' sia esclusivo delle evaporiti, mentre gli altri processi interessano sia le evaporiti che i carbonati.

2.6 Le caratteristiche delle frane su substrato gessoso

2.6.1 Gli effetti del carsismo sui pendii

Il carsismo in gesso è stato descritto in molte regioni e in un ampio spettro di condizioni climatiche diverse [26].

Le principali modalità con cui il carsismo concorre all'instabilità dei pendii sono:

- l'ampliamento e l'evoluzione delle diverse famiglie di discontinuità che caratterizzano l'ammasso roccioso (soprattutto nella porzione più superficiale) e ne minano la stabilità (più evidente per i crolli ed i ribaltamenti);
- l'ampliamento dei vuoti presenti, causando la mancanza del supporto basale ai materiali soprastanti e, quindi, l'instabilità del terreno;
- la stessa circolazione delle acque nel reticolo carsico che, se in alta pressione, può:
 - 1) indurre alla riduzione dello sforzo efficace e della resistenza al taglio sui piani di scivolamento delle frane [26];
 - 2) rendere il comportamento dell'ammasso simile a quello di un fluido viscoso [25];
 - 3) erodere del materiale che costituisce il riempimento delle fratture o di copertura del substrato [25].

Il carsismo viene, dunque, ad essere a tutti gli effetti un fattore che deve essere tenuto in considerazione per quei fenomeni di instabilità su substrato solubile.

2.6.2 Il ruolo del carsismo nei fattori preparatori, predisponenti e innescanti i fenomeni franosi

Nel loro articolo *Guerrero e Gutiérrez (2017)* [24], richiamando la distinzione proposta da *Crozier (1986)*, distinguono i fattori predisponenti ('conditioning

factors’) da quelli preparatori-innescanti (‘triggering factors’) il fenomeno franoso. La loro attenzione è rivolta in particolare alle frane che interessano il bacino del fiume Ebro (Spagna settentrionale), la cui geologia è caratterizzata dalla presenza di rocce evaporitiche e pelitiche. Tra i fattori predisponenti essi identificano: le litologie che costituiscono i versanti, le strutture geologiche presenti (discontinuità, faglie, joints, ...) e la morfometria del versante (soprattutto la pendenza di quest’ultimo). D’altro canto, per la particolarità del territorio da loro studiato il fenomeno del carsismo assume una notevole importanza e viene da loro inserito all’interno dei fattori preparatori-innescanti, assieme all’erosione ai piedi dei versanti da parte dei fiumi, le precipitazioni e le attività antropiche.

Sebbene gli autori *Guerrero e Gutiérrez (2017)* [24] abbiano inserito il carsismo in quest’ultima categoria di fattori, riconoscono come l’importanza del fenomeno si spinga al di là di questa semplice classificazione e come questo giochi un ruolo all’interno degli stessi fattori predisponenti.

2.6.2.1 Fattori predisponenti

Litologia

La litologia gioca un ruolo fondamentale nel condizionare l’evoluzione spaziale dei fenomeni franosi, in particolare la presenza noduli di gesso all’interno di materiale pelitico rende ancora più scadenti le caratteristiche geotecniche dell’argilla stessa. Infatti, oltre alla bassa permeabilità con conseguente alta pressione interstiziale, alla grande alterabilità con successiva diminuzione di resistenza al taglio e aumento del contenuto d’acqua assieme ai limiti di Atterberg delle argille, al rigonfiamento dei minerali argillosi, la dissoluzione del gesso determina la disintegrazione della struttura della roccia o del terreno stesso con conseguente perdita di coesione e diminuzione dell’angolo di attrito. Il fenomeno del rigonfiamento dei materiali argillosi è cruciale nell’innescare di frane: i

cambiamenti di volume alterano, infatti, in modo negativo le proprietà meccaniche delle rocce specialmente lungo i piani di discontinuità.

Struttura dell'ammasso roccioso

Il carsismo agisce in modo efficace lungo i piani di discontinuità:

- 1) riducendone la scabrezza attraverso la dissoluzione e/o il riempimento di queste con materiale residuale spesso dalle caratteristiche geotecniche piuttosto scadenti;
- 2) allargandone l'apertura.

Conformazione del versante

Il ruolo del carsismo su questo fattore sembra meno evidente. Si sottolinea, piuttosto, come le rocce evaporitiche determinino versanti instabili molto acclivi e con movimenti di tipo di crollo e ribaltamento. Mentre i pendii con materiale argilloso alla base presentano fenomeni franosi qualsiasi sia la loro pendenza e di tipo per lo più rotazionale e di espansione laterale.

2.6.2.2 Fattori preparatori-innescanti

Escavazione al piede dei versanti

Anche in tal caso il carsismo è fondamentale, in quanto alla base di quei versanti costituiti per lo più da materiale evaporitico i fiumi asportano il materiale con estrema facilità dato l'intervento sia dell'erosione meccanica che della dissoluzione chimica. Ciò consente al versante di mantenere un profilo pressoché verticale e di determinare la rapida retrogressione delle scarpate.

Carsismo

Il carsismo è, quindi, inserito a pieno titolo all'interno dei fattori preparatori-innescanti ed è probabilmente uno dei più significativi, apportando un notevole contributo alla riduzione della resistenza meccanica delle rocce stesse. Lo sviluppo di doline e depressioni costituiscono vie preferenziali di infiltrazione dell'acqua all'interno dell'ammasso roccioso. La formazione di vuoti nel substrato alla base dei versanti determina la riduzione del supporto basale al materiale soprastante, il quale se è di tipo evaporitico anch'esso può deformarsi in maniera plastica grazie alla reologia tipica di tali materiali, che avviene anche per la riorganizzazione dei cristalli ed le variazioni della componente argillosa interstrato. Questo tipo di comportamento induce alla formazione di strutture sinformi al fine di accomodare la mancanza di supporto basale. Il materiale si mostra altresì fragile, originando fratture subverticali nel corso del ripiegamento, i quali possono fungere da potenziali piani di scivolamento. Tale dualismo reologico di duttilità e fragilità è fondamentale nello studio di fenomeni franosi su substrato gessoso. L'evidenza di condotti freatici, depressioni e danneggiamenti di edifici per fenomeni di subsidenza alla base e nei dintorni delle scarpate di frana sono indizi del ruolo giocato dal carsismo sulla preparazione e l'innescamento del fenomeno.

Precipitazioni

Le precipitazioni sono tra i più comuni fattori innescanti delle frane. L'acqua è responsabile della riduzione delle resistenze meccaniche dell'ammasso roccioso attraverso: la riduzione dello sforzo efficace, l'aumento della pressione interstiziale, l'aumento del carico sul versante, il carsismo delle rocce solubili e i fenomeni di rigonfiamento e 'piping' nei materiali che vi sono soggetti.

Precipitazioni e carsismo sono fra loro strettamente correlati e agiscono in continuità: una volta che inizia il movimento di una frana, la massa evaporitica si frattura, creando nuove vie di percolazione dell'acqua verso il piano di

scivolamento dove aumenta la pressione interstiziale. L'acqua percolando tra le fratture ne determina la dissoluzione delle pareti e quindi un allargamento, che le permette di raggiungere più velocemente profondità maggiori. Ciò consente un'estensione sulla verticale della zona epicarsica, poiché la velocità con cui l'acqua si muove le consente di raggiungere il punto di saturazione a profondità maggiori. Qualora il carsismo interessi il piano di scivolamento principale, ne riduce la scabrezza e ne aumenta l'apertura con una risultante drastica riduzione dell'attrito che favorisce il scivolamento in un meccanismo di 'feedback' positivo.

Attività antropiche

Le attività antropiche sui versanti o alla loro base possono costituire un fattore determinante nell'innescare e/o nella riattivazione di frane. In particolare, sovraccarichi, escavazioni ai piedi dei pendii o intensificazione dell'infiltrazione sono sfavorevoli alla stabilità. Inoltre, l'attività antropica può influenzare lo sviluppo del fenomeno del carsismo stesso ad esempio: abbassando il livello della tavola d'acqua, emungendo acqua dagli acquiferi carsici, favorendo l'infiltrazione, scavando tunnel o gallerie, sovraccaricando il pendio (sia staticamente che dinamicamente), rimuovendo la vegetazione e anche determinando lo scioglimento del permafrost.

2.6.3 L'influenza del carsismo sulle diverse tipologie di frane

Tutte le tipologie di frane proposte nella classificazione di *Cruden e Varnes (1996)* possono interessare ammassi rocciosi carsificati [26]. Gli autori *Guerrero e Gutiérrez (2017)* [24] distinguono influenze differenti del fenomeno dissolutivo sulle diverse tipologie di frane in funzione del ruolo strutturale che ricopre il materiale solubile, in questo caso il gesso, all'interno dell'ammasso roccioso o del materiale incoerente in cui la frana si imposta. In particolare, per quegli ammassi rocciosi compatti, costituiti per la quasi totalità da rocce evaporitiche e

caratterizzati dalla presenza di varie famiglie di discontinuità, il carsismo, come già accennato, allarga le discontinuità stesse, ne riduce la scabrezza e ne ricopre le pareti con materiale residuale. Il tutto riduce fortemente la resistenza al taglio e l'angolo di attrito delle discontinuità stesse, favorendo tipologie di movimenti franosi come crolli e ribaltamenti [24]. Laddove il materiale gessoso svolge invece un ruolo strutturale di coesione del terreno o della roccia di un versante in frana, la dissoluzione del cemento gessoso mina la struttura del materiale stesso riducendone coesione e angolo di attrito. I fenomeni franosi che si riscontrano in questo tipo di materiale sono per lo più scorrimenti traslazionali, scorrimenti rotazionali (spesso con superfici di scivolamento multiple), espandimenti laterali e movimenti complessi, quando ci si trova in presenza anche di rocce compatte e di litologia omogenea [24]. Dal punto di vista geomorfologico, si sottolinea come la reologia duttile-fragile delle evaporiti determini in corrispondenza di superfici di scivolamento complesse delle morfologie a pieghe del materiale in movimento.

Autori, tra cui *Alberto et al. (2008)* [4], notano, a seguito di studi eseguiti in alcuni orogeni alpini, come il fenomeno dissolutivo che interessa grandi porzioni dell'ammasso roccioso in profondità possa produrre effetti alla scala di interi versanti ('deep dissolution phenomena', 'deep-seated landslides') [26]. Tale influenza, secondo *Gutiérrez et al. (2014)* [26], sembra esplicarsi, in termini di movimenti superficiali, con la predominanza della componente verticale, legata alla subsidenza, su quella di spostamento verso valle tipica dei fenomeni franosi.

2.7 Esempi di fenomeni franosi impostati su substrato gessoso

2.7.1 Le scarpate in gesso e le valli fluviali asimmetriche del bacino del fiume Ebro (Spagna Nord-orientale)

Nel corso dei paragrafi precedenti si sono già richiamati gli studi di *Gutiérrez Elorza e Gutiérrez Santolalla (1998)* [25] e di *Guerrero e Gutiérrez (2017)* [24]

inerenti ai fenomeni di instabilità che si sviluppano nelle evaporiti e nelle peliti terziarie del bacino del fiume Ebro, nella Spagna nord-orientale. Il fenomeno della dissoluzione in questa regione è causa della formazione di depressioni e doline nei fondovalle, mentre di instabilità gravitative sui versanti. Altri agenti di modellamento della superficie topografica sono i corsi d'acqua che con la loro azione erosiva scalzano i piedi dei pendii e ne determinano il collasso. L'insieme dei fenomeni geomorfologici in atto oggi e nel passato recente hanno determinato la formazione di scarpate verticali in gesso e di terrazzi fluviali e conoidi alluvionali di spessore variabile. Le prime originano dalla diversa erodibilità meccanica delle rocce che costituiscono i versanti stessi, in particolare le peliti alla base dei pendii vengono asportate facilmente dai corsi d'acqua, mentre le soprastanti formazioni evaporitiche sono soggette a crolli e ribaltamenti che consentono alla scarpata di mantenere la forma verticale nel tempo. Il carsismo del gesso, in questo caso, indebolisce la struttura delle peliti (le quali in alcuni settori sono cementate dal solfato di calcio), allarga le fratture dell'ammasso evaporitico (riducendone l'angolo di attrito) e consente all'acqua di penetrare velocemente in profondità (aumentando la pressione interstiziale). La presenza di scarpate su entrambi i fianchi delle valli principali suggerisce come l'origine delle stesse sia legata, piuttosto che alla tettonica o ai fenomeni di subsidenza, alla avulsione casuale dei meandri dei fiumi che scorrono nel fondovalle ed erodono i piedi delle scarpate. I terrazzi fluviali ed i conoidi alluvionali con spessori variabili originano, invece, dal fenomeno di subsidenza nel fondovalle, il quale genera delle aree a maggior depressione, che catturano gli apporti fluviali determinandone l'aggradazione del sistema fluviale all'interno di questi piccoli bacini. Spesso l'acqua interstiziale contenuta all'interno del detrito alluvionale dei terrazzi determina la dissoluzione del substrato evaporitico sottostante, causando la formazione di improvvisi fenomeni di crollo ('sinkholes').

2.7.2 Il fenomeno di dissoluzione profonda nelle Alpi Occidentali

Alberto et al. (2008) [4] nel loro studio analizzano gli effetti provocati in superficie ed i conseguenti fenomeni di instabilità dei versanti, indotti dal fenomeno di dissoluzione profonda che può avvenire in aree anche a paesaggio non tipicamente carsico come le valli delle Alpi Occidentali (Piemonte e Valle d'Aosta, Italia). In queste zone carbonati e solfati non costituiscono le principali litologie affioranti; soprattutto gessi ed anidriti si trovano localizzati in lenti lungo le faglie e le zone di shear principali (es. Figura 24). I fattori che guidano il fenomeno di dissoluzione profonda sono gli stessi che controllano il carsismo più superficiale ovvero la geologia (litologia, stratigrafia, struttura dell'ammasso roccioso, idrogeologia), la geomorfologia e il clima. In questo caso, va tenuto conto di una circolazione più profonda e, plausibilmente, più lunga in termini temporali delle acque sotterranee. La combinazione positiva dei fattori sopraelencati fa sì che il fenomeno di dissoluzione profonda si concentri solamente in determinati settori delle Alpi Occidentali. In aree montuose, in cui le forme del terreno cambiano rapidamente, variazioni del grado di dissoluzione dà luogo a morfologie diverse. Infatti, il carsismo viene ad interagire con altri fenomeni morfogenetici, quali quelli gravitativi, fluviali e glaciali. In particolare, data l'alta energia del rilievo, comuni sono grandi frane e 'deep-seated-gravitational slope deformations' (DSGSD), per le quali la dissoluzione può essere considerata sia come causa primaria che amplificatrice dei movimenti dei pendii (es. Figura 24). Così, gli effetti in superficie della dissoluzione profonda possono essere direttamente correlati al fenomeno del carsismo o indirettamente per altri processi da questo indotto o che questo ha favorito.

Tra gli effetti diretti in superficie legati al fenomeno in esame si annoverano, quindi: depressioni chiuse o zone di collasso ('closed depressions - collapse zones'), doline ('sinkholes') e, letteralmente, 'versanti collassati' o 'collapsed slopes', che in letteratura sono chiamati DSGSD o 'grandi frane'. Queste espressioni superficiali della dissoluzione profonda mostrano un chiaro controllo

strutturale, identificando nelle discontinuità e nelle forme dell'ammasso roccioso le vie e i percorsi principali della circolazione delle acque sotterranee.

Per quanto riguarda le DSGSD, esse mostrano un profilo longitudinale (es. Figura 24) e trasversale modellati da altri agenti, ad esempio i ghiacciai, sovrainposti però da morfologie più recenti legate a fenomeni di instabilità gravitativa e di dissoluzione. Tali versanti in movimento si trovano spesso in concomitanza di importanti contatti tettonici all'interno dei quali sono racchiuse lenti di solfati (gessi e anidriti) oppure spesso si osserva la presenza di queste rocce alla base dei pendii stessi. Gli autori *Alberto et al. (2008)* [4] notano, inoltre, come sia difficile determinare le dimensioni delle cavità sotterranee, ma sia più facile riscontrare un graduale collasso delle rocce al di sopra di questi vuoti, che risulta più evidente quanto più le rocce sono fratturate per motivi tettonici.

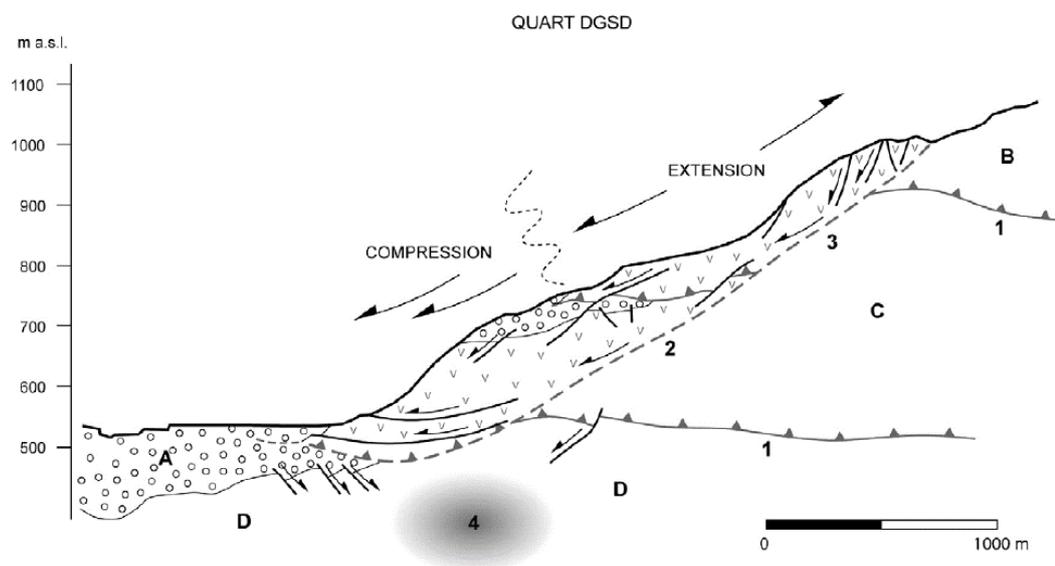


Figura 24 Profilo longitudinale della DSGSD di Quart in Val d'Aosta, tratto (già modificato) da ALBERTO, W., GIARDINO, M., MARTINOTTI, G., TIRANTI, D. (2008) 'Geomorphological hazards related to deep dissolution phenomena in the Western Italian Alps: Distribution, assessment and interaction with human activities', *Engineering Geology* [4]. 1) Zone di shear planari pre-esistenti, 2) piano di scivolamento gravitativo di eventi multipli, 3) piano di scivolamento gravitativo di evento singolo, 4) zona di riduzione di volume per dissoluzione profonda, A) depositi quaternari, B), C) e D) unità tettoniche differenti.

Nelle Alpi Occidentali i settori con la maggior presenza di rocce solfatiche sono l'alta Val di Susa, la media e l'alta Val d'Aosta. Queste rocce solfatiche sono costituite essenzialmente da gesso e anidrite, risalenti al Triassico medio. Lo studio, in queste aree, dei fenomeni a scala di interi versanti consente di osservare come:

- 1) la localizzazione sul versante delle zone maggiormente soggette a dissoluzione è funzione della quota del fondovalle, ovvero del livello base (con un innalzamento dell'orogene alpino e quindi un aumento dell'incisione dei fiumi, il livello base si abbassa, determinando un progressivo abbassamento di quota della maggior intensità del carsismo);
- 2) la sovrapposizione di movimenti verso valle tipici delle frane e di spostamenti sulla verticale legati alla subsidenza determinano movimenti complessivamente più ampi e che raggiungono zone oltre quelle caratterizzate dalla presenza di solfati;
- 3) lo studio delle caratteristiche chimico-fisiche delle acque delle sorgenti ai piedi delle frane consente di stimare la quantità di materiale asportato e l'entità della subsidenza. Inoltre, studi isotopici mostrano una chiara origine meteorica delle acque responsabili della dissoluzione, mentre l'alto contenuto di ione solfato ne suggerisce un lungo periodo di permanenza nel sottosuolo.

Gli effetti superficiali della dissoluzione profonda possono variare sulla base dei seguenti fattori:

- a) il volume originario della roccia solubile;
- b) l'intensità e l'estensione della dissoluzione;
- c) la profondità alla quale la dissoluzione ha luogo;
- d) la litologia e le condizioni geomeccaniche della massa rocciosa compresa tra la roccia solubile e la superficie;
- e) la morfologia del versante.

Tutto ciò dà luogo a diverse morfologie, le quali vengono classificate in funzione del tasso di dissoluzione che le ha generate e del loro stato evolutivo, ai fini della definizione del rischio associato. Sinteticamente si riconoscono due meccanismi: uno in cui l'effetto della subsidenza è evidente, che si manifesta attraverso collassi improvvisi e con bassa frequenza, mentre l'altro in cui la subsidenza ha un'influenza meno chiara, determina spostamenti gradualmente (per i fenomeni di maggiori dimensioni è difficile distinguere i collassi per dissoluzione dalle pure instabilità di versante), ma si mostra con alta frequenza di accadimento. D'altro canto è possibile che l'effetto cumulato di movimenti gradualmente possa dar luogo ad un evento parossistico.

In conclusione, il fenomeno della dissoluzione delle rocce in profondità (anche centinaia di metri) è responsabile di effetti diversi (in funzione della combinazione di vari fattori) in superficie e che, proprio per la profondità dell'ubicazione del fenomeno stesso, coinvolge un'ampia area e le opere antropiche sopra di essa situate.

2.7.3 L'influenza della presenza di gesso nel bacino di Schlucher, Liechtenstein

Seijmonsbergen e de Graaf (2006) [44] all'interno del loro lavoro finalizzato alla realizzazione della carta del rischio idrogeologico del bacino di Schlucher in Liechtenstein, in prossimità dell'abitato di Malbun, riportano il caso di studio di una frana su substrato gessoso e situata in una posizione centrale del bacino stesso. La loro analisi prende spunto dalle caratteristiche geologiche e geomorfologiche che interessano l'intero bacino. Dal punto di vista geologico l'unità tettonica che caratterizza questa porzione delle Alpi orientali e parte del dominio Austroalpino, più precisamente delle Alpi calcaree settentrionali, è la 'Lechtal nappe', costituita da tre settori, tra i quali è esposta in maniera discontinua l'unità Penninica della 'Arosa-Zone'. Per quanto riguarda la 'Lechtal

nappe', essa è costituita da formazioni sedimentarie (per molti aspetti simili a quelle presenti nella zona di Perarolo di Cadore), che dalla più antica alla più recente (in ogni caso triassiche) possono essere così riassunte: 'Muschelkalk' (calcare - Anisico), 'Partnach Schichten' e 'Arlberg Schichten' (calcarei con intercalazioni marnose - Ladinico), 'Railber Formation' (anidriti, gessi, breccie, marne, arenarie, peliti - Carnico) e 'Hauptdolomit Formation' (dolomia - Norico). L'unità Penninica è, invece, rappresentata dalla 'Arosa-Zone', un mélange con vari tipi di rocce tra cui quelle provenienti dalla 'Railber Formation'.

I processi geomorfologici che hanno modellato il bacino si distinguono in quelli prettamente glaciali da quelli tardo glaciali ai postglaciali. Quindi, in seguito all'azione intensa dei ghiacciai, è seguita l'evoluzione del rilievo attraverso frane di vario tipo (crolli nelle porzioni più elevate, debris flows sui conoidi detritici alla base delle pareti rocciose e scivolamenti roto-traslazionali in quella porzione di passaggio tra il versante con pendenze elevate ed il fondovalle) e dimensione (dalle piccole frane ai fenomeni di dissesto profondi). Si sottolinea, però, come la transizione da un regime geomorfologico all'altro non sia stata netta, ma piuttosto graduale. Cosicché nei periodi di stasi del ritiro dei ghiacciai, la superficie di questi fungeva da livello base, determinando l'arresto dei corpi di frana (o debris flow) in prossimità degli stessi. Tali copri di frana antichi, secondo gli autori *Seijmonsbergen e de Graaf (2006)* [44], sono attualmente stabili ed inattivi.

La presenza di gesso nel substrato del bacino favorisce lo sviluppo di collassi, doline e altre morfologie tipiche del carsismo. La disposizione planimetrica di questi caratteri indica il chiaro controllo strutturale sul fenomeno carsico. Il carsismo del gesso può accelerare localmente l'attività delle frane, mentre, dall'altra parte, diminuisce l'impatto dei debris flows, poiché le doline e le depressioni che si vengono a creare fungono da trappole sedimentarie per i materiali che costituiscono le colate.

In particolare, in una posizione centrale del bacino è presente un fenomeno franoso, il cui corpo poggia su un substrato gessoso. Esso si sviluppa tra le quote 1850/1900 e 1700 m s.l.m. ed i movimenti più rapidi avvengono nelle porzioni più

pendenti dei versanti che ne costituiscono la scarpata principale ed i fianchi e che espongono gesso ed anidrite molto tettonizzati. I crolli di roccia e detriti grossolani dalle scarpate e dai fianchi producono gran quantità di materiale ai loro piedi, costituendo aree sorgenti per debris flows.

Gli spostamenti della frana sono monitorati dal 1985 da 26 capisaldi posizionati sul corpo centrale e nelle porzioni limitrofe al settore più basso della frana stessa. I dati del monitoraggio dei capisaldi mostrano come i maggiori spostamenti avvengano nel settore frontale della frana. Alcuni capisaldi mostrano spostamenti verticali maggiori di 3 m nell'arco di circa 15 anni. Gli autori *Seijmonsbergen e de Graaf (2006)* [44] imputano ciò a locali gradienti molto elevati, che favoriscono lo sviluppo di fratture distensive e scivolamenti. Questa distribuzione degli spostamenti sulla porzione frontale del corpo di frana viene attribuita alla frammentazione della stessa in fenomeni di minori dimensioni, le quali non costituirebbero fonti di serio pericolo per l'abitato di Malbun. Infine, alcuni capisaldi mostrano spostamenti importanti e rapidi a causa del collasso del supporto su cui poggiano (ad esempio un masso che si muove improvvisamente verso valle).

Pe il lavoro in esame sono state eseguite due indagini geoelettriche lungo profili longitudinali del corpo di frana (di cui uno riportato in Figura 25 in alto). I profili di resistività consentono di individuare tre entità geologiche con diverse resistività:

- 1) una più profonda caratterizzata da alti valori di resistività e considerata il substrato gessoso compatto;
- 2) una intermedia caratterizzata da bassi valori di resistività e considerata il corpo di frana, costituito da materiali disgregati della 'Railber Formation' e della 'Arosa-Zone';
- 3) una superficiale caratterizzata da alti valori di resistività e coincidente con un corpo di debris flow, costituito da frammenti grossolani di dolomite.

La superficie di transizione tra il corpo di frana ed il substrato appare ondulata e può essere giustificata come opera del carsismo, date anche le evidenze superficiali nelle aree limitrofe dell'efficacia del fenomeno dissolutivo (Figura 25 in basso).

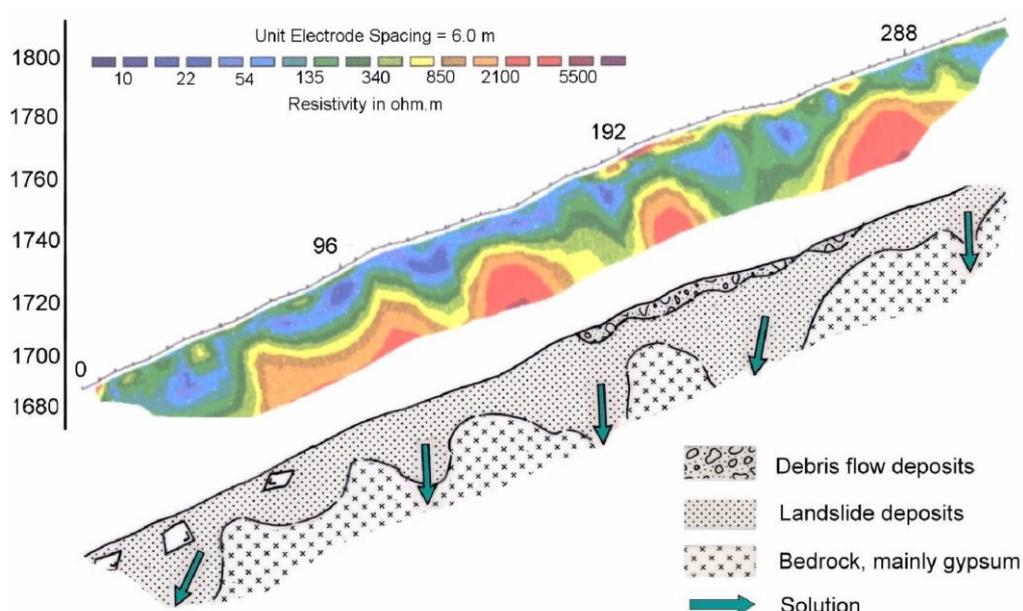


Figura 25 Sopra: profilo longitudinale di resistività della frana del bacino di Schlucher, sotto: relativa interpretazione geologica. Immagini tratte da SEIJMONSBERGEN, A. C., DE GRAAFF, L.W.S. (2006) 'Geomorphological mapping and geophysical profiling for the evaluation of natural hazards in an alpine catchment', *Natural Hazards And Earth System Sciences* [44].

In conclusione, nel bacino di Schlucher il carsismo è un processo attivo che può favorire localmente instabilità dei versanti, mentre il collasso di doline può ridurre l'impatto dei debris flow, fungendo da trappole sedimentarie. Gli autori *Seijmonsbergen e de Graaf* (2006) [44], inoltre, precisano come nel calcolo del rischio e della suscettibilità alle frane le relazioni fra le diverse unità geologiche e soprattutto geomorfologiche che costituiscono il rilievo spesso sono ignorate, inducendo a sovra- o sottostimare il reale rischio o pericolo. Questo risulta particolarmente vero per quelle aree, in cui le condizioni al contorno, come quelle geologico e strutturali, sono molto complesse e la scala di studio dev'essere di grande dettaglio.

2.7.4 Caratterizzazione della superficie di rottura di una massa in movimento in materiale gessoso (Alpi occidentali, Svizzera)

Travelletti et al. (2010) [50] presentano lo studio della grande frana, nominata ‘Bois de la Glaive’ ed impostata prevalentemente su materiale gessoso nelle Alpi Svizzere. La frana è localizzata su un rilievo isolato con la cima piuttosto piatta, la cui morfologia è legata alla forte solubilità delle rocce che lo costituiscono. Infatti, la geologia dell’area è caratterizzata da rocce eterogenee ‘flyschoidi’ ed evaporiti, appartenenti a diverse unità tettoniche; e così il promontorio su cui si imposta la frana ha substrato per lo più gessoso, che nella parte sommitale presenta una sottile copertura morenica. Quest’ultimo carattere è indice dei processi morfogenetici che hanno concorso al modellamento della topografia fino al raggiungimento dello stato attuale. L’azione dei ghiacciai è stata senz’altro rilevante, conferendo la classica forma ad U alle valli principali, le quali al loro ritiro sono state riempite da materiale proveniente dai versanti resi instabili per l’improvvisa mancanza di supporto laterale. Tra i processi erosivi che hanno caratterizzato la fase post-glaciale si riscontrano, quindi, i collassi e le frane. In questa fase rientra a pieno titolo la frana ‘Bois de la Glaive’, classificata come frana impostata in profondità (‘deep-seated’) e la cui nicchia è ben evidente sul versante. Molti debris flows originano dall’area in frana (700x400 m con pendenza media di 40 °) cosicché l’area di accumulo si ispessisce progressivamente. Al piede della frana, inoltre, si riscontrano fratture di distensione, legate agli scavi antropici apportati a valle. All’interno di queste fratture si nota la presenza di una coltre detritica in gesso al di sopra di un altro strato in gesso dislocato nell’area in frana. L’assenza di disturbo da parte della frana dei sedimenti quaternari viene a sostegno dell’ipotesi di una progressiva destabilizzazione del versante dopo il ritiro dei ghiacciai. Il piede della frana è, dunque, sepolto al di sotto dei sedimenti Quaternari. Rilievi di campagna e studi di foto aeree non mostrano segni di attività della frana tra il 1930 e il 2006; il fenomeno può essere, pertanto, classificato come stabilizzato o quiescente. Il versante su cui si trova il dissesto in esame sembra avere un microclima

particolare rispetto alle zone limitrofe: la temperatura media è di 10.5°C (elevata rispetto ad altre aree svizzere), lunghi periodi di insolazione, solamente 60 giorni di temperature sottozero e scarse precipitazioni (1000 mm/anno).

Studi pregressi ipotizzano la presenza di due superfici di scivolamento. Al fine di determinare il volume della frana e stimare la magnitudo e l'intensità dell'evento che l'ha generata, *Travelletti et al. (2010)* [50] si pongono di identificare e caratterizzare queste superfici nel loro sviluppo tridimensionale attraverso la calibrazione di analisi numeriche dei modelli digitali del terreno (SLBL, 'Sloping Local Base Level') con evidenze geomorfologiche (limiti dell'area in frana e forma della scarpata principale) e indagini geofisiche (profili sismici a rifrazione e a riflessione). Il risultato del lavoro è un modello geologico (Figura 26) che prevede la presenza di quattro strati sul versante in frana molto pendente (media di 40°). Il primo strato con velocità sismiche tra i 400 e o 1000 m/s è interpretato come costituito da gesso alterato e carsificato che può essere localmente ricoperto da sottili depositi morenici. Il secondo strato con velocità sismiche di 1500 m/s rappresenta quello strato più profondo di gesso fratturato rilevato al piede del corpo di frana, soprattutto a causa delle velocità troppo basse per essere considerato gesso intatto. Questo secondo strato non appare nelle indagini eseguite precedentemente sulla sommità del rilievo e, perciò, viene indicato come la principale massa di roccia coinvolta nel movimento, insieme allo strato soprastante. La base della porzione del versante caratterizzata da gesso fratturato viene identificata come la superficie di scivolamento più superficiale. Il terzo strato è, poi, caratterizzato da velocità intorno ai 3000 m/s ed è incerta l'interpretazione geologica dello stesso. Questo valore di velocità viene a coincidere con il limite superiore dei valori misurati in gesso (Kearey and Brooks, 1991) e non può trattarsi, quindi, di gesso dislocato. Questo strato si inspessisce verso valle nella zona di accumulo della frana. Gli autori *Travelletti et al. (2010)* [50] spiegano queste alte velocità con la presenza di residui di dissoluzione nelle fratture e negli interstizi del strato gessoso. Il quarto strato, il cui tetto si trova a 50 m di profondità, ha velocità uguali o maggiori di 4000 m/s ed è interpretato come roccia anidritica. Nell'interfaccia tra il terzo ed il quarto

strato si identifica la superficie di scivolamento più profonda nel gesso. Nella sismica a riflessione non si riesce ad individuare il corrispettivo riflettore, ma appare chiara la presenza di riflettori più profondi che possono consistere in superfici di scivolamento più profonde in anidriti oppure in altre strutture geologiche. Riassumendo i risultati dei lavori, la superficie di scivolamento più superficiale si trova a 30 m di profondità e sottende un volume di 3.1×10^6 m³, mentre quella più profonda è situata a 59 m per un volume di 7.5×10^6 m³.

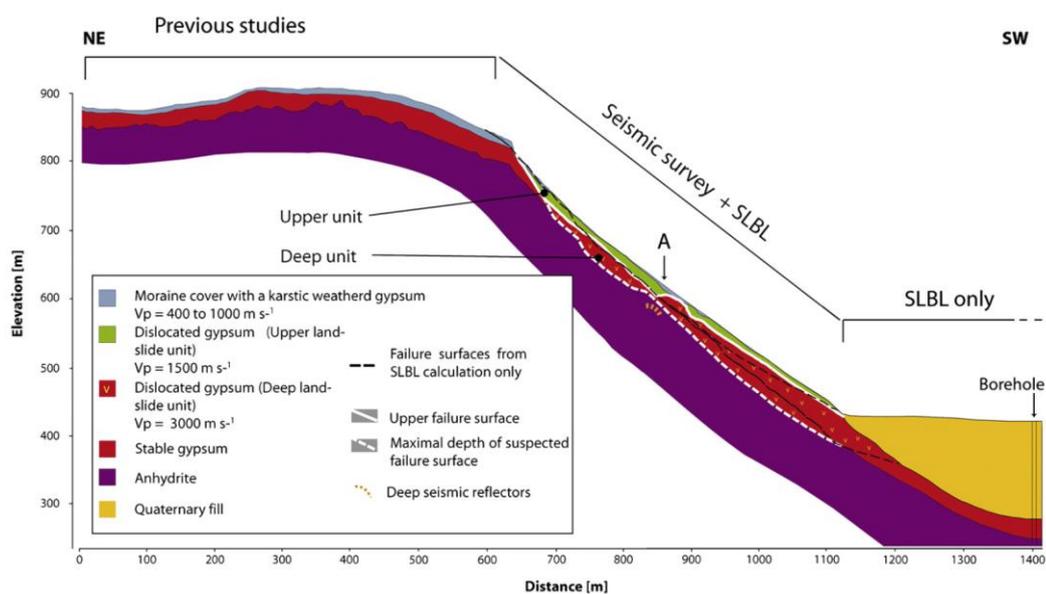


Figura 26 Sezione geologica longitudinale interpretativa dei risultati delle indagini sismiche e di quelli ottenuti con il metodo SLBL della frana di Bois de la Glaive, tratta da TRAVELLETTI, J., DEMAND, J., JABOYEDOFF, M., MARILLIER, F. (2010), 'Mass movement characterization using a reflexion and refraction seismic survey with the sloping local base level concept', *Geomorphology* [50]. A) intersezione con il profilo sismico a riflessione.

2.7.5 Gli strati gessosi come vie preferenziali dei flussi idrici sotterranei

Nello studio di *Gattinoni (2009)* [19] si evidenzia l'importanza che le condizioni idrogeologiche dell'area in esame assumono in riferimento alla suscettibilità ed al pericolo di frana. Infatti, fattori come contrasti di permeabilità fra le varie entità idro-geologiche del sottosuolo e dei terreni di copertura, ricarica sotterranea da monte e dall'alto per infiltrazione, ... giocano un ruolo fondamentale sulle forze che vengono a sollecitare la superficie di rottura di una frana e, quindi, sul suo innesco. Studi dei parametri idrogeologici su vaste aree consentono, quindi, di stendere carte di suscettibilità a frana, tenendo conto dell'influenza che la circolazione idrica ha sul fenomeno gravitativo stesso. Un'analisi idrogeologica di dettaglio a scala di versante consente di definire, invece, soglie di allerta per alcuni parametri idrogeologici facilmente misurabili (come il livello piezometrico della falda, la portata delle sorgenti, ... le quali possono essere altresì relazionate ai dati pluviometrici) attraverso metodi deterministici o statistici che consentono di correlare i valori che tali parametri assumono con l'innesco del fenomeno franoso ovvero con il fattore di sicurezza del pendio in frana. In questo caso si relazionano fattori predisponenti come i contrasti di permeabilità con i fattori innescanti come le precipitazioni o la salita del livello piezometrico.

Per quanto riguarda il gesso, *Gattinoni (2009)* [19] mostra come la sua presenza sia fondamentale all'interno del substrato roccioso al fine di definire quei contrasti di permeabilità che guidano la circolazione idrica sotterranea e quindi influenzano i movimenti del versante all'interno del quale il materiale gessoso si trova. Ciò è dimostrato dallo studio della frana di Cavallerizzo, in Calabria (Italia) [19], in cui la presenza di uno strato di gesso tra gli scisti e al di sotto del conglomerato posto nella porzione di valle del versante in frana determina l'instaurarsi di una via preferenziale della circolazione idrica, alimentando una sorgente nelle vicinanze dell'unghia della superficie di frana (Figura 27). In particolare, si nota come nel 2005 prima dell'evento franoso che ha caratterizzato parte del corpo della frana di Cavallerizzo, la quale ha le proporzioni di un movimento alla scala dell'intero

versante, non solo il livello piezometrico sia aumentato significativamente, ma anche le portate delle sorgenti nell'area, tra cui quella alimentata dalla circolazione nello strato gessoso, hanno mostrato notevoli incrementi. Si specifica, inoltre, che nel caso in esame la ricarica idrica del versante non è solo frutto dell'infiltrazione delle precipitazioni che interessano il pendio considerato, ma è dimostrato che essa è dovuta in parte anche all'alimentazione di un flusso a scala più grande che coinvolge tutta la Catena Costiera Calabra. Quest'ultimo tipo di alimentazione viene considerata alla base dei movimenti profondi dei versanti che caratterizzano l'area [19]. La simulazione della circolazione idrica nel versante ha riportato come risultato anche la presenza di sorgenti proprio nei punti in cui queste si rilevano in campagna: ovvero in corrispondenza dell'intersezione con la superficie topografica del livello di gesso e di una faglia con la sua fascia cataclastica (che anch'essa origina un importante contrasto di permeabilità, Figura 27).

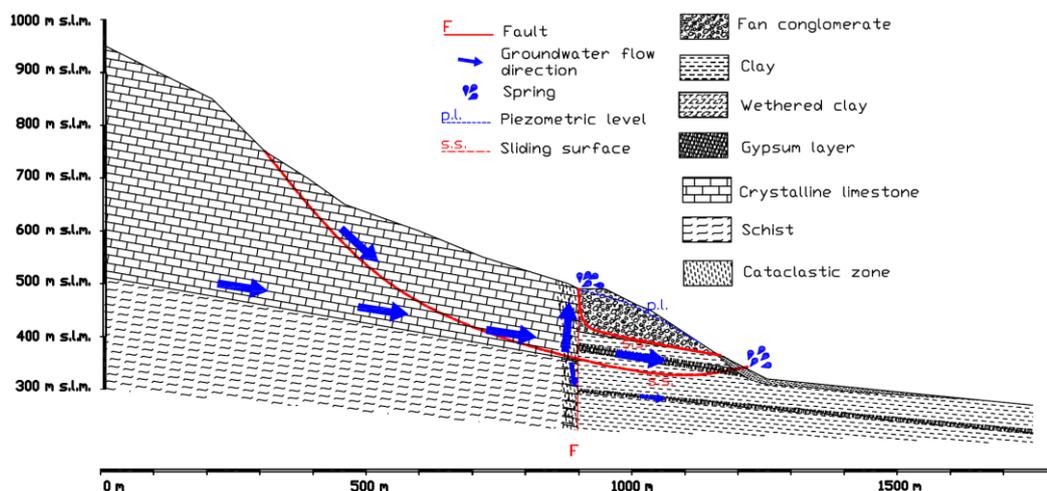


Figura 27 Modello idrogeologico concettuale della frana di Cavallerizzo, tratto da GATTINONI, P. (2009), 'Parametrical landslide modeling for hydrogeological susceptibility assessment: from the Crati Valley to the Cavallerizzo landslide (Southern Italy)', Nat Hazards [19].

2.7.6 Il rischio idrogeologico in un'area carsica (Verduno, Piemonte, Italia)

Torri et al. (2013) [49] riportano il caso di studio dell'area comunale di Verduno, in provincia di Cuneo (Piemonte, Italia). Il loro lavoro consiste nell'identificazione e classificazione degli elementi geologici e geomorfologici del territorio di competenza comunale, anche al fine della definizione di una carta di pericolosità. L'area in esame corrisponde al versante compreso tra l'abitato di Verduno e la valle di Tanaro. Il settore è caratterizzato dalla presenza di frane superficiali e profonde, legate all'intenso carsismo a cui è sottoposto il substrato gessoso del versante stesso e che esercita un ruolo fondamentale sulla circolazione idrica sotterranea e superficiale. Dal punto di vista paleogeografico il settore ricade all'interno del Bacino Piemontese Terizario ('Tertiary Piedmont Basin (BTP)'), di età compresa tra l'Eocene Medio/Superiore e il Messiniano) ed in particolare nel suo settore chiamato 'bacino delle Langhe'. La sequenza geologica dell'area è caratterizzata, per lo più, dai depositi legati alla Crisi di Salinità del Messiniano ('Messinian Salinity Crisis (MSC)'), rappresentati in larga parte da carbonati e gessi (sia microcristallini che selenitici). La morfologia delle valli nel settore delle Langhe è solitamente asimmetrica a 'cuestas' con un versante più acclive ('versante corto') dell'altro ('versante lungo') a causa del controllo strutturale che la giacitura degli strati esercita sui processi erosivi.

Il versante in esame appartiene alla categoria dei 'versanti lunghi', è costituito da un'alternanza di strati argillosi e gessosi raramente affioranti ed è profondamente modellato dal carsismo del gesso, oltre che dall'attività agricola. Doline e depressioni sono le morfologie carsiche dominanti, mentre fratture della roccia rappresentano un carsismo che agisce anche a scala più piccola. Tutte queste forme concorrono alla disintegrazione della struttura originaria della roccia e alla diminuzione delle relative proprietà di resistenza geomeccanica.

Il carsismo se sommato al particolare assetto litostratigrafico di alternanza di strati a diversa coesione e consistenza determina una generale instabilità del versante che porta all'innescarsi di fenomeni franosi. I fenomeni di instabilità sono

sostanzialmente di due tipi: 1) frane e liquefazione dei suoli saturi ('soil slip') e 2) scorrimenti planari e traslazionali che interessano le porzioni più profonde del versante e sono legati alla particolare disposizione del versante parallela rispetto alla giacitura degli strati e all'alternanza stessa di litologie diverse. L'assenza di vegetazione e di un efficace sistema di drenaggio delle acque superficiali facilita l'innescò di fenomeni franosi, i quali hanno spesso le caratteristiche cinematiche dei debris flows. Il carsismo, infatti, gioca un duplice ruolo sulla predisposizione e sull'innescò delle frane e, quindi, sui rischi idrogeologici. Il primo risiede nell'intensa deformazione della morfologia del versante attraverso la formazione di doline e depressioni che minano la stabilità del materiale soprastante le cavità carsiche. Ciò si conclude spesso in collassi improvvisi, le cui pareti possono evolvere nel tempo con successivi fenomeni di crolli e/o ribaltamenti. Per quanto riguarda questo aspetto, gli autori *Torri et al. (2013)* [49] hanno eseguito un catasto ed una classificazione delle depressioni e delle doline (dalla forma spesso ellittica con asse maggiore parallelo alla massima pendenza del versante e con fianco di valle più ripido di quello di monte, il tutto ad indicare il ruolo giocato dalla circolazione idrica sotterranea sulla loro formazione), in funzione della morfometria e dello stato di attività, al fine di attribuire un livello di rischio a ciascuna. L'aspetto dei collassi, dei movimenti e delle deformazioni del terreno è il primo aspetto legato al rischio in un territorio carsico com'è quello in esame. Il secondo ruolo giocato dal processo dissolutivo è sempre legato alle morfologie che esso genera in superficie e che causano variazioni della circolazione idrica superficiale che hanno risvolti anche su quella sotterranea. Doline e depressioni fungono spesso da collettori delle acque superficiali, le quali si infiltrano e circolano, poi, nel sottosuolo attraverso condotti controllati dalle strutture geologiche presenti. Le variazioni della circolazione idrica, legati all'azione antropica o non, portano spesso ad alluvionamenti del fondovalle e al conseguente innescò di debris flows e frane.

Riassumendo, si ribadisce come in aree carsiche i rischi naturali sono principalmente di due tipi: 1) legato alla stabilità del terreno per collasso (rischio frane e 'sinkholes') e 2) legato alla modificazione della circolazione idrica

sotterranea e superficiale (rischio idraulico). Opere di regimazione delle acque superficiali, monitoraggio delle forme carsiche superficiali, pianificazioni territoriali coscienti e informazione della popolazione sono solo alcuni dei possibili approcci volti alla riduzione di tali rischi.

2.8 La stabilizzazione di terreni gessosi

A conclusione di questo capitolo sui fenomeni di dissesto in terreni e/o rocce gessose si riportano alcuni metodi che possono essere utilizzati per stabilizzare i terreni gessosi.

Jha e Sivapullaiah (2017) [28] riportano come tecnica quella del ‘grouting’, la quale dev’essere però eseguita con materiali e liquidi particolari, in modo che non reagiscano chimicamente con il substrato gessoso. Ad esempio l’utilizzo di acqua potrebbe favorire il processo dissolutivo e, quindi, la subsidenza. Altre tecniche sono legate all’utilizzo di materiali geosintetici come geogriglie e geotessuti [28].

Anche *Gutiérrez et al. (2014)* [26] riportano alcune tecniche e misure da seguire per mitigare il rischio di collasso nei substrati gessosi come:

- compattazione del terreno di superficie;
- regimazione delle acque superficiali;
- controllo delle variazioni dei livelli piezometrici indotti dall’azione antropica (pozzi);
- controllo dell’irrigazione;
- corretta progettazione dei pozzi al fine di evitare dispersione di acqua in entità idrogeologiche soggette a dissoluzione;
- impermeabilizzazione dei canali superficiali;
- utilizzo di tubazioni flessibili;
- riduzione dell’infiltrazione ricoprendo il terreno con appositi materiali geosintetici;

- riempimento delle fratture del terreno (o subsuperficiali previa escavazione) con apposite schiume e/o cementi;
- riempimento delle depressioni con argille e materiale granulare in strati in modo tale da generare una sequenza ‘fining-upward’, invertendo il concetto di filtro e prevenire, quindi, l’infiltrazione. Inoltre, spesso al materiale di riempimento viene conferita una geometria convessa, al fine di allontanare ancor più efficacemente le acque.

Jha e Sivapullaiah (2017) [28], nel loro articolo pubblicato nel 2017, specificano come le tecniche di stabilizzazione e/o di miglioramento delle proprietà geotecniche dei terreni gessosi non siano definite in maniera rigorosa, come spesso richiedano un incremento dei costi del progetto e come siano necessari progetti di ricerca volti all’identificazione di metodi idonei ed economici. Tale campo è, perciò, ancora sperimentale ed oggetto di studi.

2.9 Considerazioni riassuntive

I principali fenomeni che coinvolgono i materiali gessosi e/o anidritici appaiono, dunque, strettamente legati alla presenza dell’acqua nel sistema. Essi consistono nelle transizioni di fase per idratazione/deidratazione (con le conseguenti variazioni delle proprietà geotecniche/geomeccaniche) e nella dissoluzione. Quest’ultimo processo, in particolare, è fondamentale nella morfogenesi del rilievo su substrato gessoso, che in maniera analoga a quanto avviene per le litologie carbonatiche determina lo sviluppo di morfologie tipicamente carsiche. I fattori che controllano lo sviluppo del carsismo su substrato gessoso sono di tipo geologico (litologici, stratigrafici, strutturali, geomorfologici e idrogeologici) e climatico: ribadendo, ancora una volta, come l’acqua svolga un ruolo di primaria importanza sull’evoluzione spazio-temporale dei fenomeni carsici. Il carsismo sui solfati si differenzia da quello sui carbonati, soprattutto in termini del tasso di dissoluzione (legato alla maggior solubilità dei primi rispetto agli ultimi) e della

reologia dei materiali coinvolti (le evaporiti in generale mostrano un comportamento duttile, mentre le rocce carbonatiche solitamente sono più fragili). Tali peculiarità si proiettano anche sui rischi idrogeologici tipici delle aree carsiche che consistono in doline, alluvioni e frane e ne determinano evoluzioni più rapide e varie. Per quanto riguarda i fenomeni franosi, il ruolo della dissoluzione del materiale gessoso non è stato ancora oggetto di studi sistematici e rimane, pertanto, di difficile identificazione, sebbene si siano riconosciuti suoi contributi per ciascuno dei fattori predisponenti ed innescanti (all'interno dei quali anche il carsismo è stato inserito) delle frane stesse. Alcuni casi di studio rivelano come il carsismo del materiale gessoso possa influenzare e/o guidare lo sviluppo di fenomeni gravitativi, sia indebolendo la struttura dei terreni o delle rocce e minando la stabilità di porzioni più o meno vaste dei versanti (*Gutiérrez Elorza e Gutiérrez Santolalla (1998) [25]*, *Guerrero e Gutiérrez (2017) [24]*, *Alberto et al. (2008) [4]*, *Torri et al. (2013) [49]*) che guidando la circolazione idrica all'interno di orizzonti resi particolarmente permeabili dalla dissoluzione e, quindi, determinano l'aumento delle pressioni interstiziali su eventuali superfici di scivolamento e lo sviluppo di nuove forze all'interno dei versanti stessi (*Gattinoni (2009) [19]*). Altri esempi riportano i risultati delle indagini geofisiche condotte su frane che coinvolgono materiali gessosi (*Seijmonsbergen e de Graaf (2006) [44]*, *Travelletti et al. (2010) [50]*).

Questo lavoro sulla frana di Sant'Andrea di Perarolo di Cadore (BL), impostata su un versante dal punto di vista litologico e geotecnico molto differenziato ma che presenta importanti quantità di rocce solfatiche, si presenta come un ulteriore caso di studio di fenomeni franosi in materiali gessosi e viene ad ampliare la bibliografia piuttosto limitata in merito a tale argomento.

CAPITOLO 3: La frana di Sant'Andrea

3.1 Introduzione

3.1.1 Dimensioni del fenomeno

Il fenomeno franoso di Sant'Andrea interessa il versante a Sud di Pian de la Cesa, più o meno in corrispondenza del cambio morfologico di pendenza. Il movimento della porzione di pendio in esame è testimoniata da alcune evidenze geomorfologiche, già richiamate nel paragrafo di inquadramento e riportate nella carta del rilevamento di campagna eseguito per il seguente lavoro di tesi (in allegato): "... L'attività di movimento del versante è testimoniata da morfologie (osservate in campagna nel corso dei rilievi per il lavoro in oggetto) come contropendenze, piccole depressioni, sdoppiamenti di cresta e orli di scarpate di degradazione, ma anche dagli effetti deformativi riscontrati, ad esempio, nella vegetazione in seguito allo spostamento del terreno come gli alberi con i tronchi 'a manico d'ombrello' (reptazione). Lungo il versante sono presenti anche solchi di ruscellamento più o meno attivi, ... (pag. 36)".

Anche nel Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico del bacino idrografico del fiume Piave (Figura 29) [5] viene segnalato come caratterizzato da un grado di pericolosità geologica da elevata a molto elevata l'intero versante a nord del nodo idraulico di Perarolo, che si estende dal fianco orientale della prima incisione dopo lo sbocco della galleria di Monte Zucco alla località di Saco. Per quanto riguarda, la porzione di sinistra Boite di tale pendio si estende per circa 270 m in larghezza dall'incisione citata al secondo tornante della strada della Cavallera (Figura 28). Mentre la lunghezza massima ovvero il massimo sviluppo longitudinale al versante del fenomeno di dissesto in esame va dall'unghia del conoide colluviale nell'alveo del torrente Boite alla scarpata di degradazione osservata a monte della ferrovia e riportata nella carta geomorfologica (in allegato). Tale scarpata si trova circa 110 m a monte del vecchio tracciato

ferroviario, per un estensione longitudinale complessiva di circa 240 m (Figura 28). In senso verticale, invece, l'intervallo di quote in cui si colloca il dissesto va dai 530 m s.l.m. circa dell'alveo del Boite ai 680 m s.l.m. circa dell'orlo della scarpata a tergo dell'ex ferrovia.

Si osserva, infine, come la porzione di versante a monte di quella descritta sia classificata come a "Pericolosità geologica media" (Figura 29). Tale porzione di versante coincidente in gran parte con Pian de la Cesa è costituita dai depositi della paleo-frana del Monte Zucco e dei due eventi di paleo-colata (cfr. all'inquadramento geomorfologico).

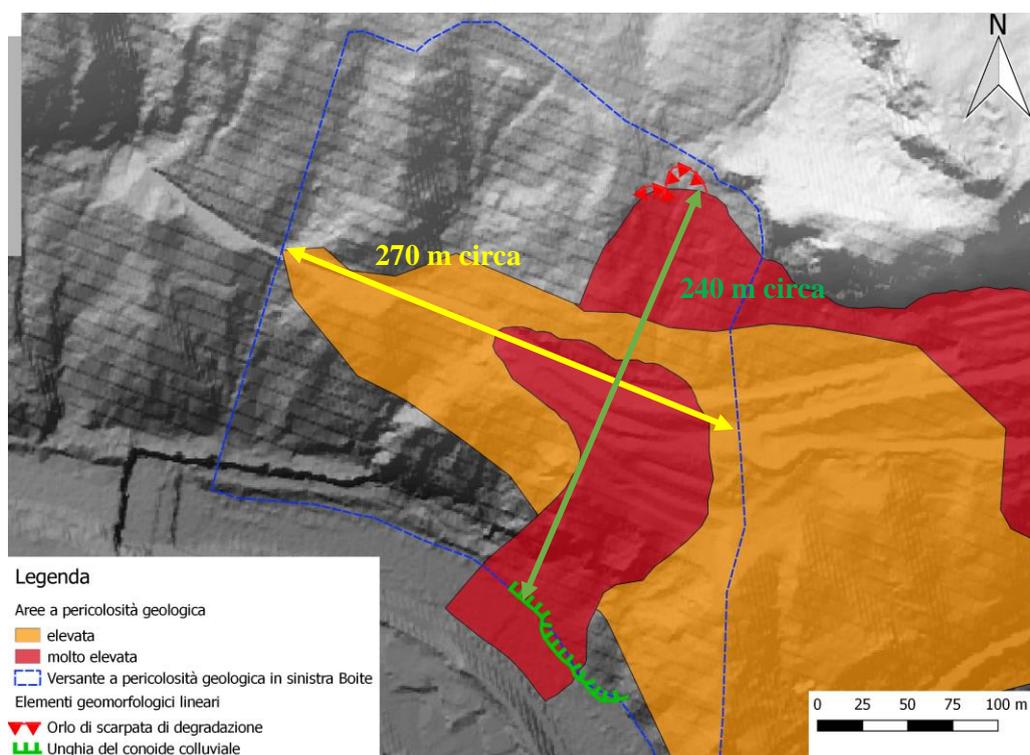


Figura 28 Estensione delle aree a pericolo geologico elevato-molto elevato sul versante in sinistra Boite evidenziate nel PAI del bacino idrografico del fiume Piave [5]. Le forme poligonali delle aree a pericolosità geologica sono estratte dal rispettivo servizio WMS del Geoportale Nazionale, così come il rilievo Lidar di sfondo [31].

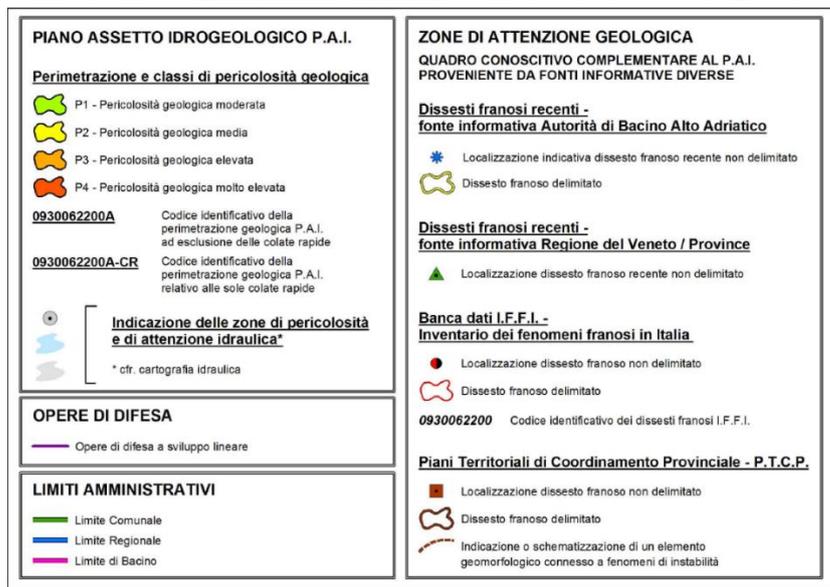
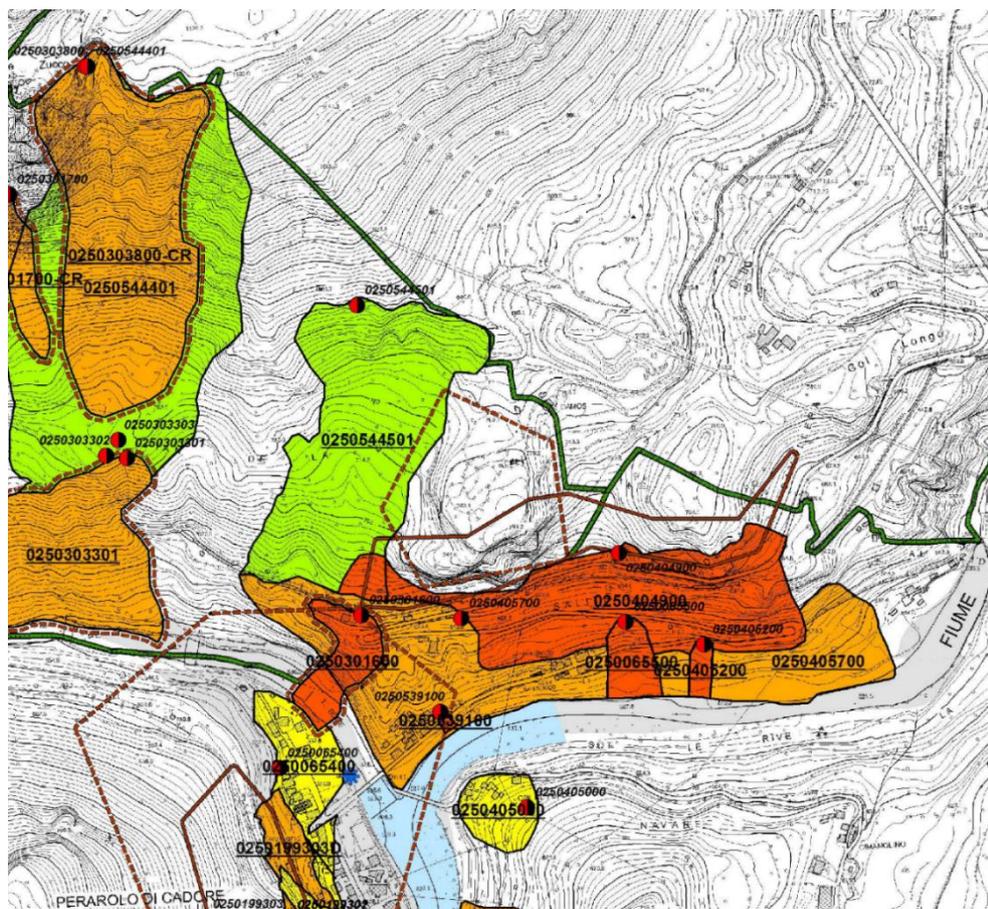


Figura 29 Estratti della tavola 1 di 3 del Piano stralcio di Assetto idrogeologico del bacino del fiume Piave per quanto riguarda l'area di interesse del comune di Perarolo di Cadore. Il materiale è stato scaricato dall'apposito portale online delle Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione [5].

Il versante sopradescritto è soggetto a movimenti di vario tipo che si esprimono con cinematiche diverse: dai movimenti lenti e profondi a quelli rapidi e superficiali. In particolare, si individua una porzione attualmente più instabile, posizionata nel settore orientale a valle del tornante della strada della Cavallera. Tale fenomeno rappresenta la frana di Sant'Andrea. Essa è ben evidenziata morfologicamente da una netta frattura collocata appena a valle di una berlinese tirantata costruita a protezione della linea ferroviaria (Figura 30).

Le dimensioni geometriche del corpo di tale frana sono: 150 m di estensione trasversale al versante, 130 m di estensione longitudinale e 90 m di sviluppo verticale (dalla quota 530 m s.l.m. dell'alveo del Boite ai 620 m s.l.m. circa della berlinese).

In Figura 30 è riportata la perimetrazione della frana di Sant'Andrea con le relative dimensioni planimetriche. Sullo sfondo si mostra il modello digitale del terreno (DTM) ottenuto dai rilievi Lidar della primavera 2018 commissionati dall'Università degli Studi di Padova. Gli elementi lineari rappresentati, ovvero le fessure nel terreno e i manufatti presenti sono frutto anch'essi di un rilievo GPS, realizzato dall'Università di Padova il 27 marzo 2018. Si può notare come la frattura immediatamente a valle della berlinese delimiti a monte la porzione più instabile della frana e, quindi, può essere considerata come l'emersione di una delle superfici di scivolamento della frana stessa (Figura 31).

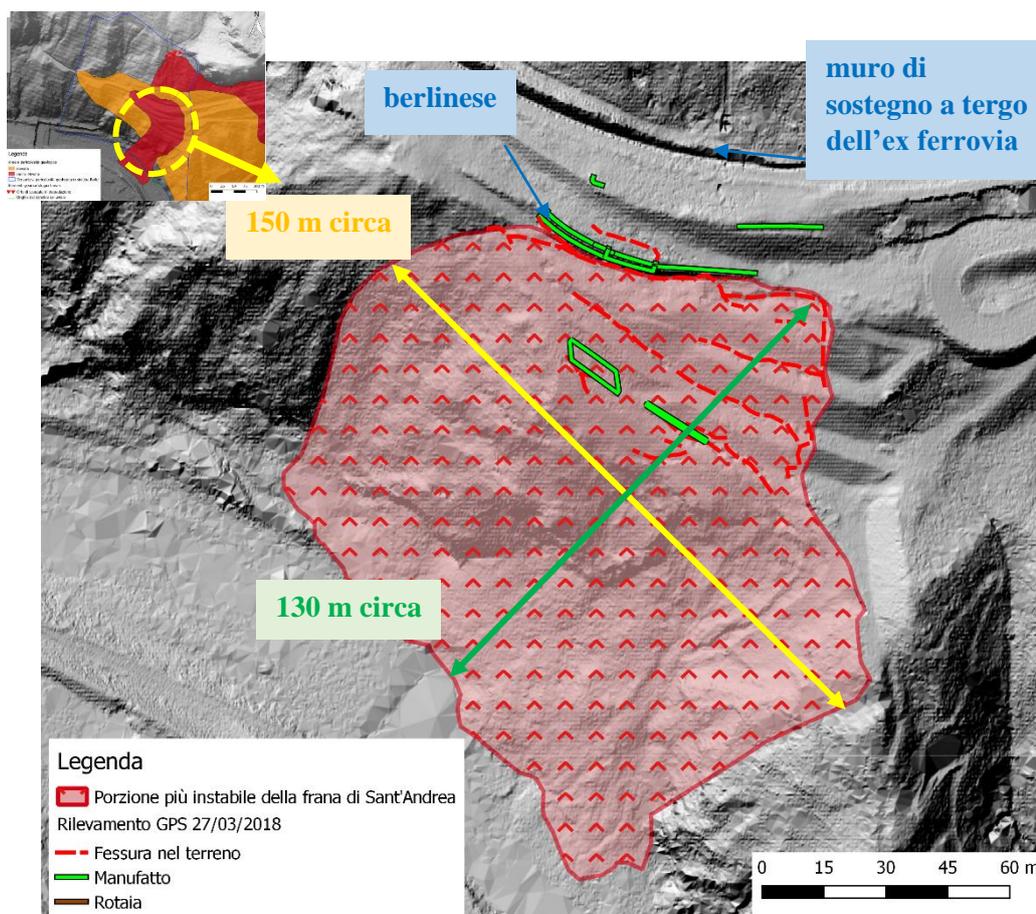


Figura 30 Perimetrazione della frana di Sant'Andrea con il DTM e i risultati del rilievo GPS, realizzati nella primavera del 2018 dall'Università degli Studi di Padova.



Figura 31 Panoramica della frana di Sant'Andrea dal versante opposto in destra Boite con evidenziata la frattura che dovrebbe corrispondere con l'emersione di un piano di scivolamento. Foto dello scrivente datata 29/05/2018.

3.1.2 Principali aspetti rilevati sul terreno

La porzione del versante a nord di Perarolo soggetta a movimenti più intensi è, dunque, quella perimetrata in Figura 30 come evidenziato dall'intenso grado di fratturazione del terreno. Tali fratture avvengono spesso in corrispondenza dei punti in cui sono stati eseguiti degli interventi nel passato di consolidamento del versante. Ad esempio si notano come le fessure siano disposte in prossimità della berlinese, già citata, e dei cordoli rettangolare e a parallelogramma disposti a valle della berlinese stessa. Si riporta all'attenzione anche il ruolo rivestito dai numerosi micropali posizionati negli anni passati nel terreno: essi fungono da importanti discontinuità all'interno dell'ammasso granulare sia in termini di resistenza meccanica che di permeabilità. Infatti, il bulbo di terreno (Figura 32) generato dall'iniezione della miscela cementizia per la realizzazione dei pali possiede caratteristiche geotecniche ed idrogeologiche diverse dal materiale in cui si trova. Alla fratturazione in corrispondenza dei pali sono associate spesso contropendenze legate alla maggior compattezza del bulbo stesso (Figura 32 e Figura 33).



Figura 32 Esempio di bulbo di influenza generato nel terreno dalla realizzazione dei pali, in particolare modo attraverso l'iniezione di miscela cementizia. Foto dello scrivente del 10/05/2018.

Quando i pali (siano essi pali valvolati, micropali o pali jet) sono disposti lungo filari, si vengono a creare importanti superfici di anisotropia all'interno dell'ammasso del terreno stesso, le quali possono costituire piani di frattura e/o di scivolamento. Nel caso in esame sono presenti alcune file di pali disposte trasversalmente al versante, come riportato nella Figura 33 estratta dalla relazione dello *Studio Galli (2012)* [45].

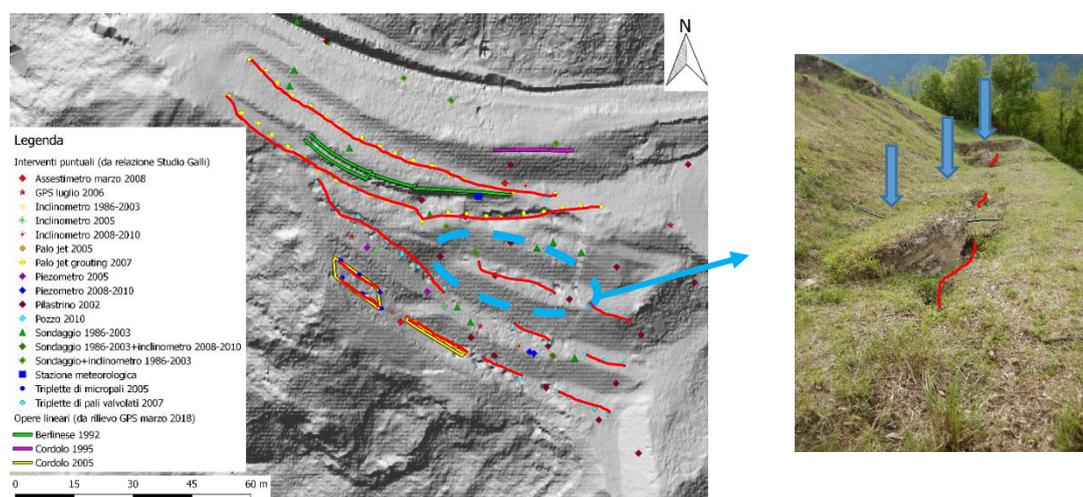


Figura 33 Ubicazione delle opere puntuali presenti sul versante all'anno 2012 con evidenziate in rosso le file di pali (siano essi valvolati, micropali o pali jet), estratta in QGIS dalla planimetria riportata nella relazione dello Studio Galli "Interventi di mitigazione per gli scenari di rischio geologico, idraulico e di consolidamento dell'abitato di Perarolo di Cadore (BL). STUDIO DI PREFATTIBILITÀ", (2012) [45]. In planimetria sono rappresentate anche le opere lineari, frutto del rilievo GPS del 27/03/2018 condotto dall'Università degli Studi di Padova. Inoltre, è riportata una foto relativa alla fratturazione generata in corrispondenza di una fila di pali -cerchiati in figura, mentre le contropendenze sono segnate con la freccia in foto e le fratture sono evidenziate con linea rossa-. Foto dello scrivente del 10/05/2018.

La fratturazione (Figura 34), generata dal movimento del fenomeno franoso in corrispondenza delle opere realizzate, costituisce una via preferenziale di infiltrazione dell'acqua nel sottosuolo. I pali in tal senso agiscono in modo favorevole all'infiltrazione consentendo all'acqua pellicolare che li ricopre di raggiungere importanti profondità.



Figura 34 Fratturazione e sviluppo di contropendenze in prossimità del cordolo rettangolare in calcestruzzo, a monte della scarpata di degradazione principale. Foto dello scrivente del 10/05/2018.

Per quanto riguarda le opere presenti nell'area, esse non sembrano mostrare intensa fessurazione, ma piuttosto una venuta a giorno delle fondamenta (Figura 35).



Figura 35 Esempi di venuta a giorno delle fondamenta. Foto dello scrivente, datate 10/05/2018 quella di sinistra e 29/05/2018 quella di destra.

Il settore di monte, invece, comprendente il vecchio tracciato ferroviario e la zona a tergo del muro di sostegno dello stesso, è sottoposto a movimenti minori, tant'è che le fratture sono rilevabili piuttosto che nel terreno sui manufatti (Figura 36).

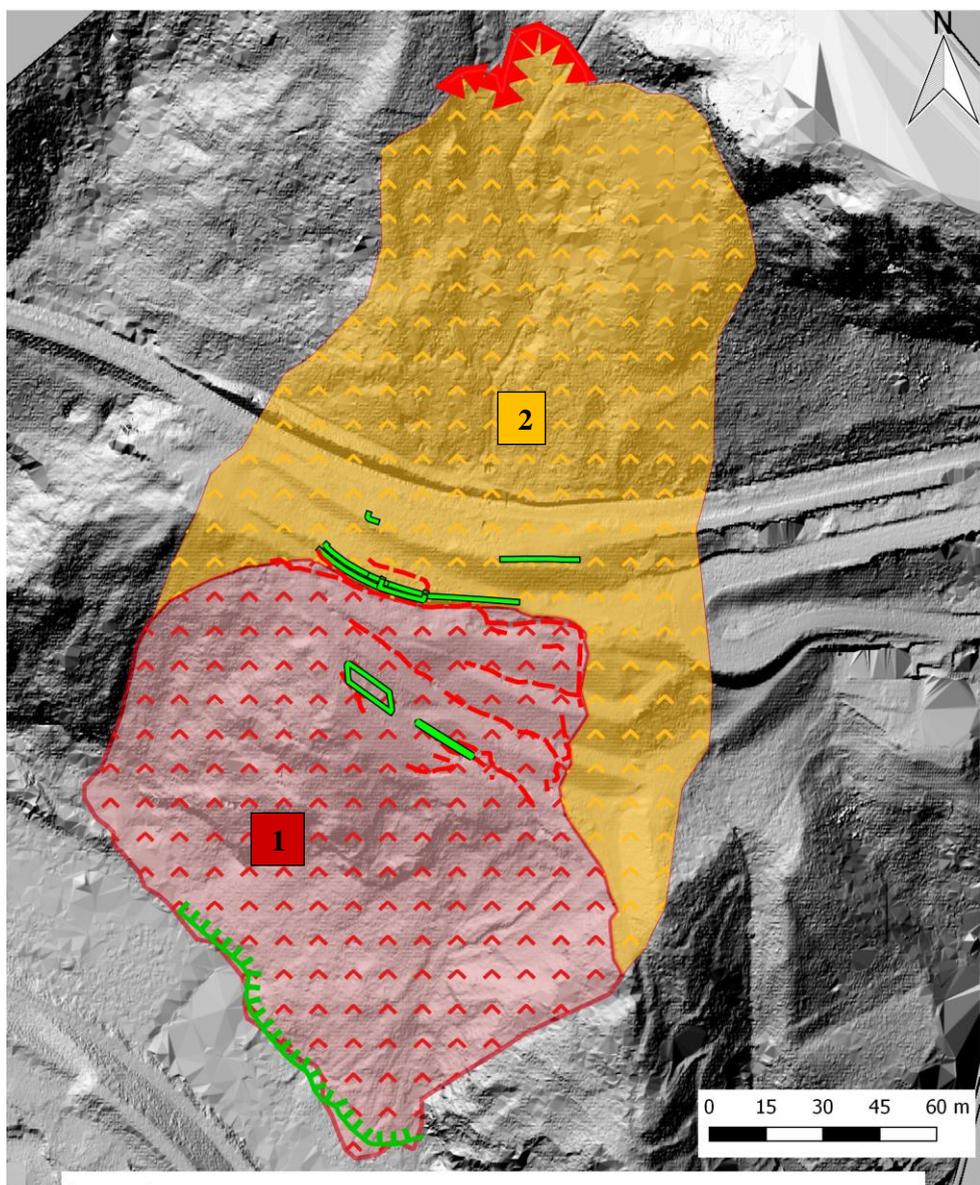


Figura 36 Particolare di una frattura sul muro di sostegno a tergo del vecchio tracciato ferroviario. Foto dello scrivente datata 06/04/2018.

Si distinguono, perciò, almeno due zone a comportamento deformativo differente (Figura 37):

- 1) la zona più instabile, soggetta a movimenti di entità maggiori, i cui effetti si riscontrano non solamente sulle opere presenti (ad esempio, la venuta a giorno delle fondamenta -Figura 35-, secondo quanto scritto nella relazione dell'*Università degli Studi di Padova del 2011* [54] la reazione dei terreni interessati dal movimento indica un comportamento deformativo degli stessi di tipo visco-plastico), ma anche sulle morfologie del terreno (es. fessurazioni e contropendenze -Figura 34-);

- 2) la zona a monte e che costituisce il coronamento della frana di Sant'Andrea in senso stretto, soggetta a movimenti di minor entità, i cui effetti si riscontrano maggiormente sulle opere presenti (es. fessurazioni).



Legenda

Rilevamento GPS 27/03/2018

--- Fessura nel terreno

— Manufatto

— Rotaia

■ Porzione più instabile della frana di Sant'Andrea

■ Area soggetta a movimenti più lenti

— Elementi geomorfologici lineari

▼ Orlo di scarpata di degradazione

■ Unghia del conoide colluviale

Figura 37 Distinzione nelle due aree a diverso comportamento deformativo, riscontrabile dai rilievi di campagna, con il DTM e i risultati del rilievo GPS, realizzati nella primavera del 2018 dall'Università degli Studi di Padova.

3.2 Cenni storici sull'evoluzione del fenomeno e del versante in cui è impostato

3.2.1 Evoluzione del fenomeno prima dell'evento del 2000

Nel corso degli ultimi secoli alcuni importanti eventi franosi hanno interessato l'abitato di Perarolo. Una delle prime informazioni disponibili in merito a tali fenomeni risale al 1823, quando, in occasione di una piena del Boite, a monte di Perarolo una frana ostruì il corso d'acqua ed, a seguito dello sfondamento dello sbarramento, un'ondata d'acqua e detriti causò la distruzione del paese[41].

Un'altra frana di grandi dimensioni si verificò a monte di Perarolo, lungo il versante meridionale del Monte Zucco, nel 1942. Anche in questo caso il corpo della frana determinò la formazione di un lago di sbarramento, senza, però, dirette conseguenze per l'abitato di Perarolo [41]. Tale accumulo venne, però, rimobilizzato dalla piena del 1966 [41].

Gli eventi sopradescritti non riguardano direttamente la frana di Sant'Andrea. Il versante su cui è impostata è caratterizzato "sin da che se ne ha memoria" da cedimenti, in particolare lungo il tratto dallo sbocco della galleria di Monte Zucco all'incisione di Busa del Cristo [41]. Tale settore è stato oggetto di interventi di sistemazione nel corso del 1966-1967, descritti nell'articolo di G. Cargnel, datato 1971 e intitolato "Opere di sostegno e di consolidamento e sistemi di allarme in aree franose lungo la linea ferroviaria Treviso-Calalzo", *Atti del 2° Convegno Nazionale di studi sui problemi di Geologia Applicata* [7]. Cargnel G. (1971) [7] rileva come cause dei dissesti rilevati lungo la linea ferroviaria l'appesantimento del versante e la riduzione degli sforzi efficaci da parte dell'acqua percolante nel terreno, così come l'erosione sottoscarpa da parte del torrente nel fondovalle [7]. Gli interventi eseguiti in questa occasione consistono in: tirantatura dei muri di sottoscarpa e del ponticello della linea ferroviaria, disposizione di dreni superficiali e profondi, realizzazione di gabbionate e muri tirantati nelle incisioni della Busa del Cristo e semina di graminacee. Inoltre, nello stesso periodo il Genio Civile di Belluno provvide alla realizzazione di briglie e pennelli lungo

l'alveo del torrente Boite insieme ad un'arginatura che si estende per tutto il tratto dissestato e sistemato a monte (dalla galleria del Monte Zucco alla Busa del Cristo, ovvero per tutta quella porzione del versante ricoperto da materiale detritico) [41].

Tutte queste opere di sistemazione sembrano aver sortito l'effetto di progetto: infatti, nella porzione di versante interessata i movimenti si sono arrestati o, comunque, notevolmente ridotti ([7], [41]).

Successivamente, però, i movimenti si sono manifestati in maniera più intensa nel settore più orientale del versante ovvero lungo il tratto ferroviario immediatamente successivo in direzione Calalzo rispetto a quello soggetto agli interventi degli anni 1966-1967 e dov'è tuttora attivo (frana di Sant'Andrea) [41]. In particolare, in corrispondenza del nuovo casello ferroviario e del secondo tornante della salita della "Cavallera", soggetto ad abbassamenti dell'asfalto e dislocazioni dei muri di sostegno [41].

Per contrastare questi fenomeni sono state realizzate opere di drenaggio superficiali e profonde con allontanamento delle acque sino al fiume Piave [41]. Inoltre, negli anni '90 è stato realizzato un cordolo tirantato fondato su micropali di circa 40 m di profondità a valle della sede ferroviaria, successivamente prolungato in direzione di Pieve di Cadore e rafforzato con nuovi tiranti [41]. Nella *relazione geologica della Regione Veneto con oggetto: "Comune di Perarolo di Cadore. Situazione di instabilità di alcuni tratti della S.S. 51 di Alemagna. Relazione."*, firmata dal Dirigente del Servizio Geotecnico G.P. Bozzo e datato 1995 [39], si riporta che un primo intervento, eseguito nel 1992, consiste nel cordolo tirantato a ovest del tornante di Sant'Andrea e a valle del tracciato ferroviario, mentre un secondo intervento è rappresentato da un secondo cordolo, realizzato nel 1995 più ad est e a quota leggermente maggiore rispetto al primo (Figura 38). Nello stesso documento [39] si osserva come, già nel 1993, ovvero un anno dopo la sua realizzazione, il cordolo tirantato posto più a valle mostri abbassamenti del terreno e fessurazioni ad esso parallele, che sono andate progressivamente ad aumentare negli anni (Figura 39) ([39], [41]).

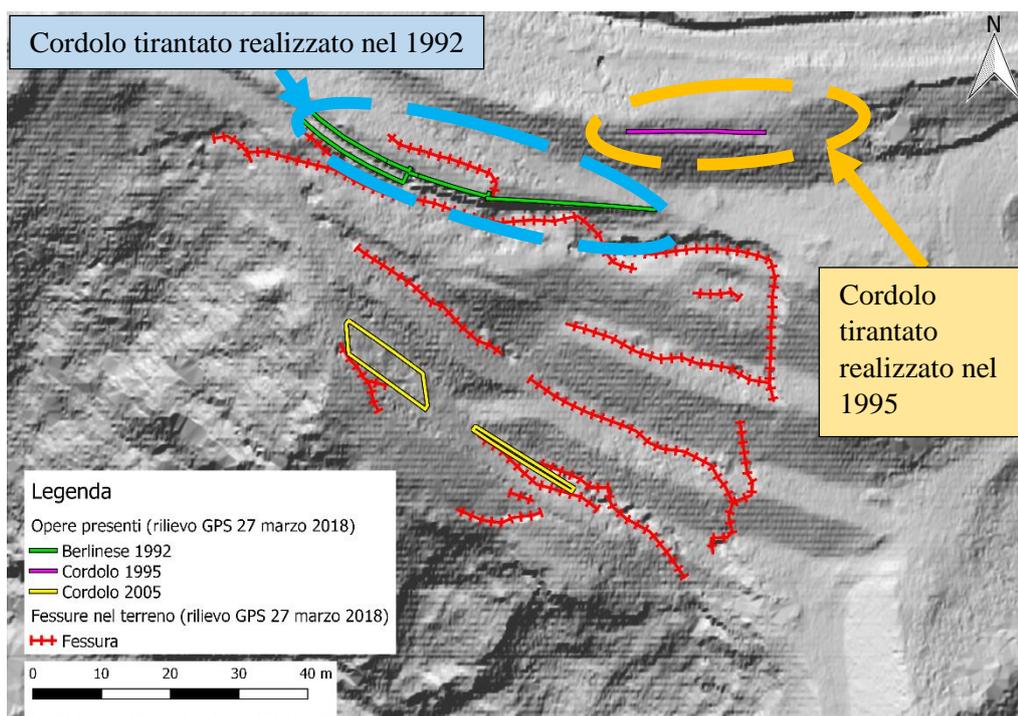


Figura 38 Posizionamento delle opere antropiche principali sul versante in esame, con evidenziazione delle opere realizzate nel 1992 e nel 1995. Sono riportati il DTM e i risultati del rilievo GPS (tra cui sono state rilevate le opere precitate), realizzati nella primavera del 2018 dall'Università degli Studi di Padova.



Figura 39 Fessurazione parallela al cordolo tirantato realizzato nel 1992. Foto risalente all'agosto 2000 e riportata nel "Rapporto geologico preliminare sulla frana che ha interessato il centro storico di Perarolo (BL) il giorno 18.11.2000" della Regione del Veneto, Direzione geologia e ciclo dell'acqua (firmata dal Responsabile dell'Ufficio Geotecnico dr. geol. A.Baglioni e dal Dirigente del Servizio Geologia dr. geol. F. Toffoletto), datata 08/01/2001 [41].

Nel 1996 un crollo di qualche centinaio di metri cubi di materiale detritico e roccia gessosa si stacca dal versante sottostante il tornante. L'accumulo di tale fenomeno giunge appena ad interessare l'alveo del Boite [41].

3.2.2 Evento franoso del 18 novembre 2000

Una delle maggiori espressioni dell'instabilità a cui è soggetto il versante in esame è l'evento franoso del 18 novembre 2000. Una descrizione dettagliata dell'evento è riportata nel *“Rapporto geologico preliminare sulla frana che ha interessato il centro storico di Perarolo (BL) il giorno 18.11.2000” della Regione del Veneto, Direzione geologia e ciclo dell'acqua (firmata dal Responsabile dell'Ufficio Geotecnico dr. geol. A.Baglioni e dal Dirigente del Servizio Geologia dr. geol. F. Toffoletto), datata 08/01/2001* [41]. A seguito di un periodo, a partire dal mese di ottobre del 2000, di intense precipitazioni, avente tempo di ritorno tra i 2 e i 5 anni e classificato come 'evento di piena straordinaria' secondo quanto riportato nella relazione dello *Studio Galli (2012)* [45], si verificano due scorrimenti rotazionali a livello del ciglio detritico e un crollo di modesta volumetria di roccia gessosa (Figura 40- 1, A e B) [41]. Gli inclinometri disposti sul versante segnano incrementi degli spostamenti, in particolare nel settore a valle del cordolo [41]. Tali incrementi hanno culmine nel fenomeno franoso avvenuto il 18.11.2000 (Figura 40- 3), costituito da un volume di roccia e detrito di circa 3000 m³, staccatosi dal versante sotto il secondo tornante della strada della Cavallera. Il deposito di frana si accumula nell'alveo del Boite, ostruendone la sezione e causando un'ondata di detriti che risale la sponda opposta e provoca danni sino in prossimità delle abitazioni [41]. Successivamente si forma un lago di sbarramento ed inizia la tracimazione in sponda destra, di breve durata, grazie alla rapida erosione da parte delle acque del torrente della temporanea diga naturale costituita dal corpo di frana [41]. A seguito di ciò, viene decretata l'evacuazione del centro storico di Perarolo e la chiusura precauzionale della ferrovia sita sul versante instabile a monte dell'area interessata dalla frana [41].

La causa scatenante del fenomeno è individuata nelle infiltrazioni idriche all'interno della copertura detritica, che, come riportato nel rapporto geologico preliminare della *Regione del Veneto* [41], sono testimoniate da abbondanti fuoriuscite d'acqua al contatto con la formazione rocciosa e proseguite anche nei giorni successivi all'evento [41].

Il fenomeno del 18 novembre 2000 è l'espressione massima di un evento durato più giorni e costituito da una serie di frane di modeste dimensioni di tipo scivolamento rotazionale (Figura 40 - 1, A e B) e crollo (Figura 40 - 1, C), ma che possono evolvere anche in colate se in presenza di importanti apporti idrici e di materiale limoso-argilloso (Figura 40 - 2, B) [41]. Si nota altresì come la porzione che vede l'evoluzione della frana in colata corrisponda con quella soggetta a maggior dilavamento da parte delle acque sotterranee, evidenziata nel profilo ERT delle indagini geoelettriche svolte da *Adastra s.r.l. nel 2008* [2] (cfr. al paragrafo indagini geoelettriche).

Infine, il 18 novembre 2000 (Figura 40 - 3) si è verificato il collasso della porzione di substrato cerchiata in rosso nella Figura 40 -2 e che fungeva da sostegno per un'ampia porzione di copertura detritica, collassata anch'essa [41]. La volumetria mobilizzata dal fenomeno è di circa 3000 m³ [41].

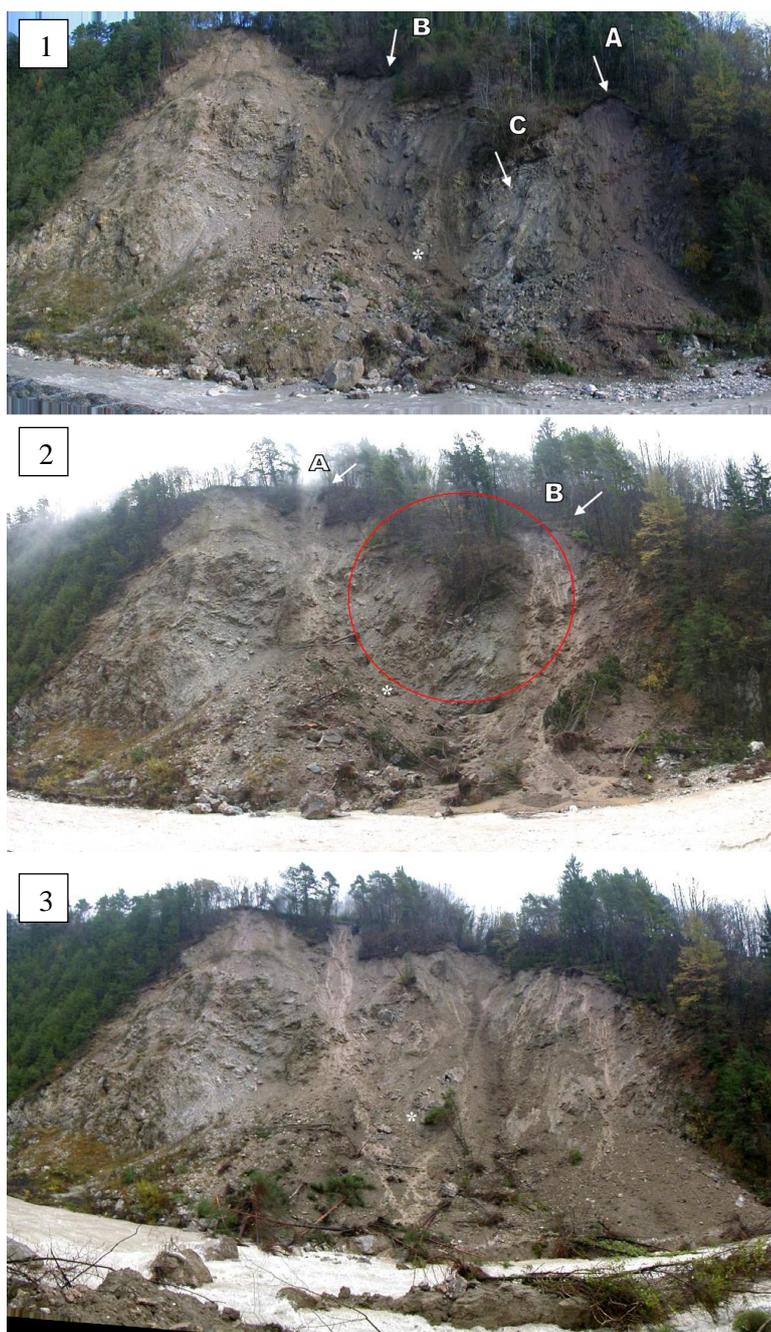


Figura 40 1) Situazione del 9 novembre 2000, in cui si notano due frane rotazionali (A e B) ed un fenomeno di crollo (C). 2) Situazione al 17 novembre 2000, in cui si nota come la frana di scivolamento rotazionale in B evolve in una colata detritica per l'ingente apporto idrico e per la presenza di materiale limoso-argilloso. Mentre la porzione di substrato all'interno del cerchio rosso svolge ancora la funzione di sostegno, ma sarà coinvolta nel fenomeno parossistico del giorno successivo. 3) Situazione del 18 novembre 2000 ovvero dopo l'avvenimento del fenomeno franoso principale. Foto riportate nel "Rapporto geologico preliminare sulla frana che ha interessato il centro storico di Perarolo (BL) il giorno 18.11.2000" della Regione del Veneto, Direzione geologia e ciclo dell'acqua (firmata dal Responsabile dell'Ufficio Geotecnico dr. geol. A.Bagliani e dal Dirigente del Servizio Geologia dr. geol. F. Toffoletto), datata 08/01/2001 [41].

Movimenti del versante superiori alla media (punte di oltre 10 volte la velocità “normale” [41]) si sono registrati per circa due mesi dopo l’evento principale attraverso misure di punti di riferimento sul cordolo e pozzi inclinometrici (cfr. al paragrafo sulle indagini geognostiche, in particolare in merito alle sonde inclinometriche) [41]. Si nota, altresì, come, se da un lato la porzione a monte del cordolo tirantato del 1992 sia ritornata su valori di velocità di spostamento medi, dall’altro la porzione di valle alla data della stesura della

relazione preliminare in questione [41] mostra movimenti che si attestano su valori ancora due/tre volte superiori alla media. Ciò consente di sottolineare ancora una volta la distinzione delle due aree a diverso comportamento cinematico e che il cordolo in cemento realizzato nel 1992 sembra aver intensificato (Figura 41). Infine, si nota un progressivo ed irreversibile

peggioramento delle condizioni di stabilità della porzione di versante a valle del cordolo stesso, la quale, un volta subita un’accelerazione degli spostamenti a causa di eventi meteorici intensi, difficilmente rientra sui valori di spostamenti medi registrati in precedenza. Tale fenomeno di isteresi è rilevato anche nella “Relazione tecnica inerente alla Seconda Fase della Convenzione. Definizione delle soglie di allertamento del fenomeno franoso della Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL)” nell’ambito della Convenzione di ricerca fra la

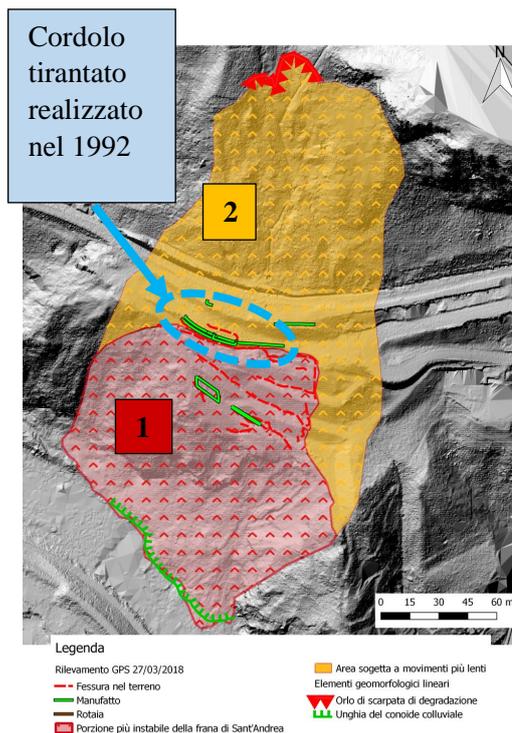


Figura 41 Distinzione nelle due aree a diverso comportamento deformativo, riscontrabile dai rilievi di campagna e con le osservazioni riportate dopo l’evento del 2000 nel “Rapporto geologico preliminare sulla frana che ha interessato il centro storico di Perarolo (BL) il giorno 18.11.2000” della Regione del Veneto, Direzione geologia e ciclo dell’acqua (firmata dal Responsabile dell’Ufficio Geotecnico dr. geol. A.Baglioni e dal Dirigente del Servizio Geologia dr. geol. F. Toffoletto), datata 08/01/2001 [41], con il DTM e i risultati del rilievo GPS, realizzati nella primavera del 2018 per conto dell’Università degli Studi di Padova. In carta è evidenziato il cordolo realizzato nel 1992, il quale separa le due aree a cinematica differente.

Regione del Veneto (Dipartimento Difesa del Suolo e Foreste, Sezione Difesa del Suolo) e l'Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geoscienze), datata 2015 e stilata dall'Università degli Studi di Padova, (Dipartimento di Geoscienze, Responsabile Scientifico: dott. A. Galgaro) [56], riguardo analisi negli anni successivi e per fenomeni pluviometrici e cinematici di minor entità rispetto a quello del 2000 (Figura 42).

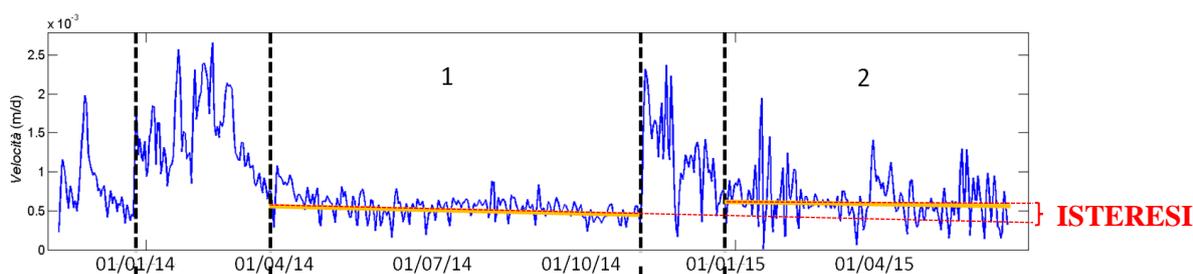


Figura 42 Andamento della velocità complessiva del riflettore P19 della stazione topografica totale che mostra il fenomeno di isteresi accennato nel testo: ovvero a seguito di un evento con velocità di spostamento superiori alla media (settoe compreso tra 1 e 2) segue un periodo di lieve rilassamento (2) come quello precedente all'evento intenso (1) in cui le velocità si mostrano più o meno costanti ma mediamente superiori all'periodo di rilassamento precedente ($v_{media\ 2} > v_{media\ 1}$). Grafico riportato nella "Relazione tecnica inerente alla Seconda Fase della Convenzione. Definizione delle soglie di allertamento del fenomeno franoso della Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL)" nell'ambito della Convenzione di ricerca fra la Regione del Veneto (Dipartimento Difesa del Suolo e Foreste, Sezione Difesa del Suolo) e l'Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geoscienze), datata 2015 e stilata dall'Università degli Studi di Padova, (Dipartimento di Geoscienze, Responsabile Scientifico: dott. A. Galgaro) [56].

3.2.3 Evoluzione del fenomeno negli anni 2000

A seguito dell'evento del 2000 il fenomeno non ha più mostrato fasi evolutive rapide e parossistiche in grado di coinvolgere grandi volumi di materiale sia esso roccioso che detritico. Infatti, negli ultimi anni si sono registrati piuttosto attraverso la strumentazione di monitoraggio presente sul versante spostamenti di minor entità ma costanti con incrementi improvvisi in corrispondenza di eventi meteorici intensi (Figura 42 - in genere le velocità di spostamento misurate in queste occasioni sono maggiori di due volte la velocità media dei periodi in cui si hanno movimenti lenti e costanti [56]). Anche i volumi di materiale mobilizzati

sono ridotti e limitati alla scarpata di degradazione principale e al conoide colluviale ai piedi della stessa.

In particolare, il 12 dicembre 2017 il sistema di monitoraggio attivo sul versante instabile ha registrato importanti incrementi dei movimenti, al di sopra delle soglie di pre-allarme e di allarme previste. Il centro storico del paese è stato, pertanto, evacuato e nei mesi successivi la frana di Sant'Andrea è stata monitorata con maggior attenzione.

3.2.4 Interventi realizzati e strumenti installati negli anni 2000

Dopo l'evento del 2000 il versante su cui è impostata la frana di Sant'Andrea è stato oggetto di numerosi interventi volti alla sistemazione del pendio stesso ed alla prevenzione di nuovi importanti collassi. Essi sono ben elencati e rappresentati in planimetria (Figura 43) nella relazione dello *Studio Galli (2012)* [45]. I principali interventi consistono in file di pali (valvolati o jet) disposte trasversalmente al versante (come già accennato in precedenza) e sono stati realizzati negli anni 2005 e 2007. Alcune di esse (quelle del 2005) sono collegate in testa attraverso cordoli di cemento (uno a forma di parallelogramma in pianta, mentre l'altro lineare e rettangolare) e sono, quindi, ben visibili in planimetria, da foto aerea e nei rilievi Lidar (Figura 44). Questi interventi sono quelli a cui è stato fatto riferimento in precedenza, che hanno determinato la formazione di anisotropie e discontinuità geotecniche-idrogeologiche e che fungono da vie preferenziali di infiltrazione dell'acqua in profondità.

Il cordolo di cemento realizzato nel 1992 a protezione della ferrovia è stato consolidato mediante l'installazione di nuovi tiranti (nel 2007, secondo quanto riportato nella relazione dello *Studio Galli (2012)* [45]).

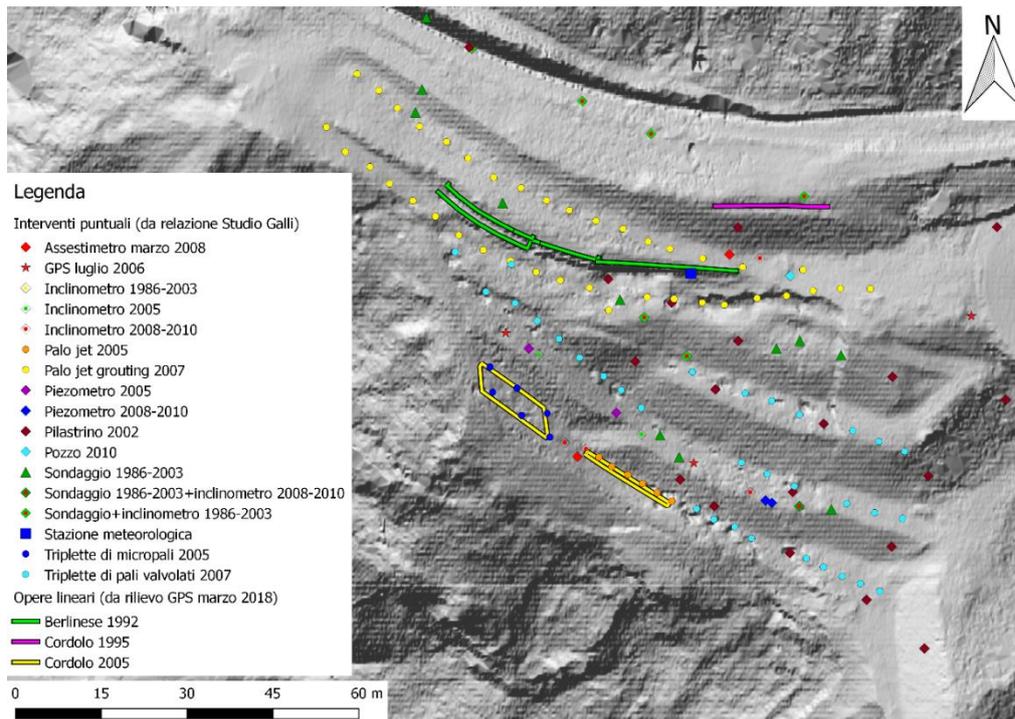


Figura 43 Planimetria degli interventi puntuali realizzati e degli strumenti installati sul versante all'anno 2012, estratta in QGIS dallo scrivente dalla planimetria riportata nella relazione dello Studio Galli "Interventi di mitigazione per gli scenari di rischio geologico, idraulico e di consolidamento dell'abitato di Perarolo di Cadore (BL). STUDIO DI PREFATTIBILITÀ", (2012) [45]. Sono riportate anche le opere lineari presenti, frutto del rilievo GPS del 27/03/2018 condotto dall'Università degli Studi di Padova.

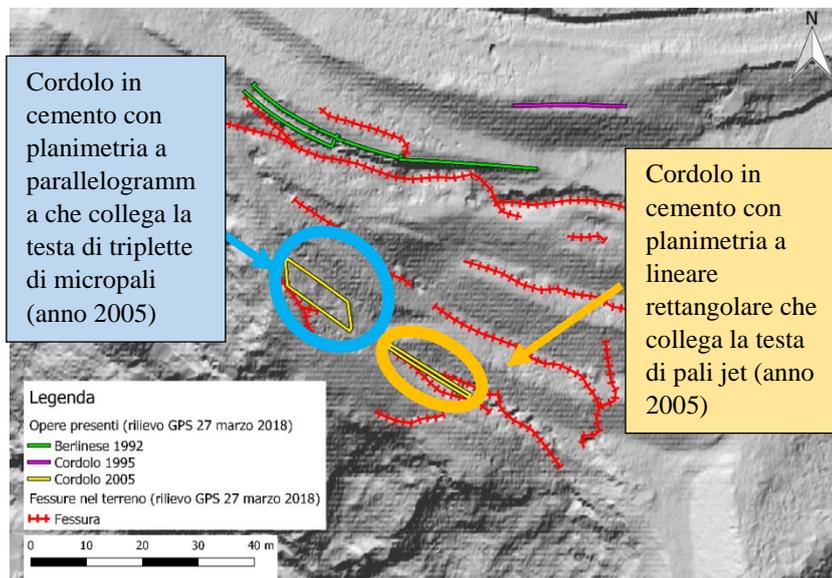


Figura 44 Posizionamento delle opere antropiche principali sul versante in esame, con messa in evidenza dei cordoli in cemento realizzati nel 2005. Sono riportati il lumeggiamento del DTM, ottenuto dai rilievi fotogrammetrici, ed i risultati del rilievo GPS (tra cui sono state rilevate le opere citate), realizzati nella primavera del 2018 dall'Università degli Studi di Padova.

Inoltre, nel corso degli anni sono stati installati numerosi strumenti per il monitoraggio del corpo di frana, tra cui piezometri, inclinometri, pozzi, assestimetri e stazioni GPS



Figura 45 A sinistra base della stazione topografica totale robotizzata che monitora la frana di Sant'Andrea. Essa è posizionata sul tetto della caserma dei Vigili del Fuoco di Perarolo di Cadore (BL). Foto dello scrivente del 10/05/2018. A destra esempio di mira ottica.

-2006- (come riportato sempre nella relazione dello Studio Galli (2012) [45]). Infine, dal novembre 2013 sono disponibili i dati della stazione topografica totale robotizzata la cui base è installata sul tetto della centrale dei Vigili del Fuoco di Perarolo di Cadore (Figura 45 a sinistra), mentre sul versante si sono materializzati alcuni punti di riferimento (a giugno 2018 sono 36) attraverso mire ottiche (Figura 45 a destra), la cui posizione viene rilevata dalla base robotizzata.

Recentemente, nel corso del 2018, sono stati installati nuovi estensimetri e fessurimetri, questi ultimi per monitorare le fratture che interessano le opere antropiche (Figura 46). Sono state aggiunte, inoltre, nuove mire (Figura 47).

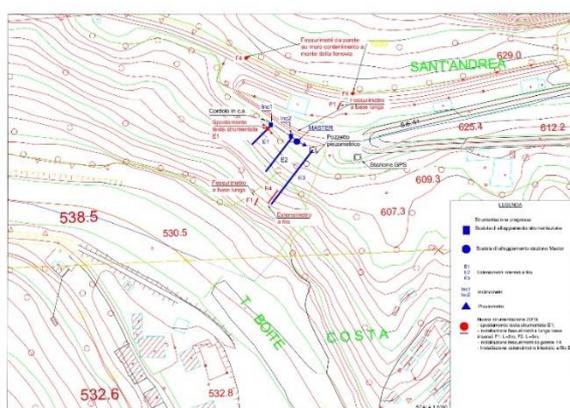


Figura 46 A sinistra disposizione planimetrica dei nuovi estensimetri e fessurimetri installati sul corpo di frana e/o sulle opere antropiche presenti (CLIOS s.r.l. [8]). A destra esempio di fessurimetro a filo installato sul cordolo in cemento del 1992. Foto dello scrivente del 29/05/2018.

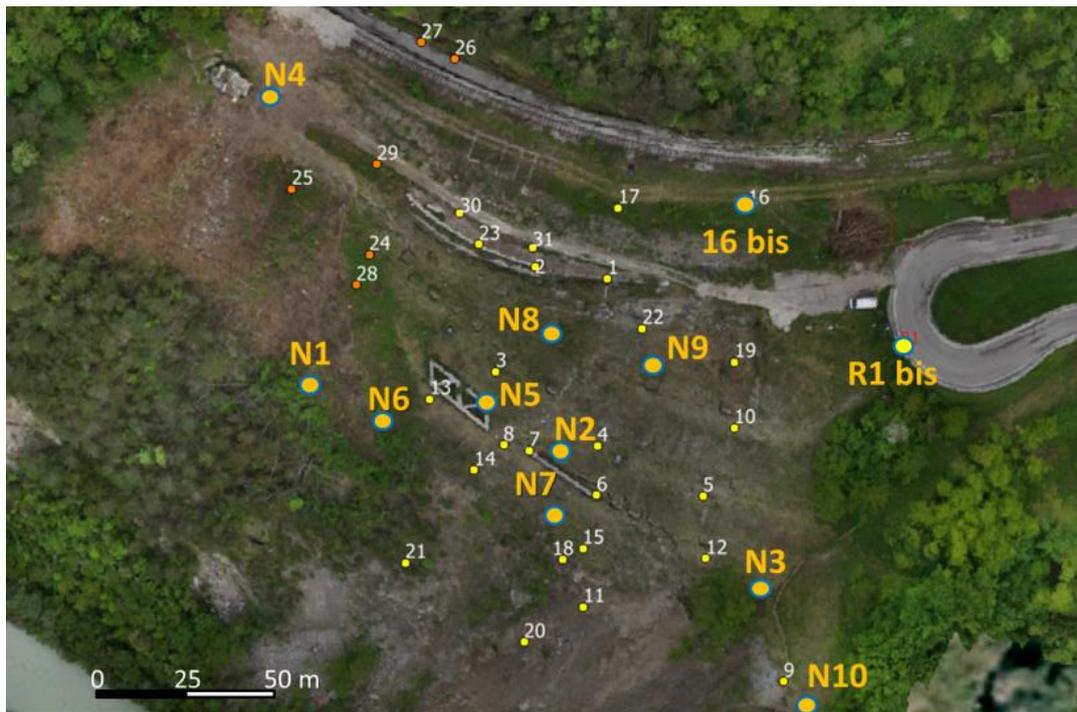
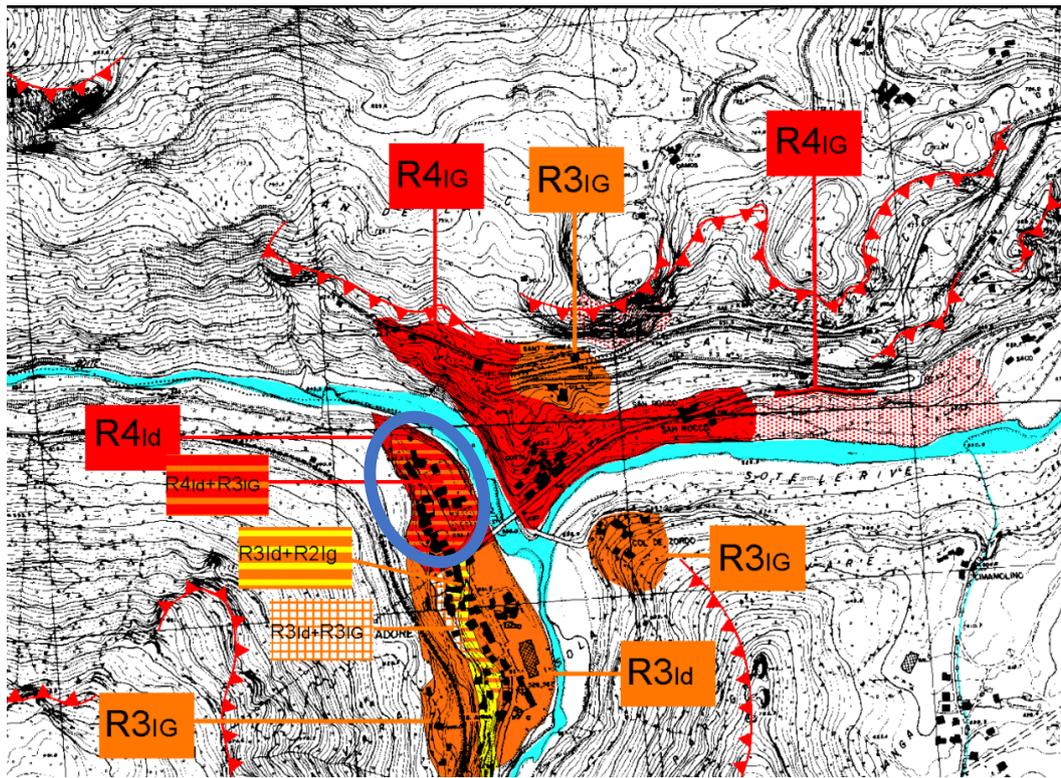


Figura 47 Ubicazione sul corpo di frana delle mire ottiche della stazione topografica totale robotizzata. In grassetto quelle installate a luglio 2018. Immagine dalla relazione finale della Convenzione intitolata “Interventi per la mitigazione della pericolosità della frana di Sant’Andrea, Perarolo di Cadore (BL)”, Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova, 2018 [57].

3.3 Valutazione del rischio per l’abitato di Perarolo

Nel documento “Dissesti idrogeologici nel Comune di Perarolo di Cadore. Perimetrazione delle Aree a Rischio. Allegato B5” redatto dalla Regione del Veneto, Giunta Regionale, Segreteria Regionale ai Lavori Pubblici, Direzione Difesa del Suolo e datata 1 ottobre 1999 [40] si riconosce come il centro storico di Perarolo sia soggetto a due tipologie di rischio ambientale: sia idrogeologico che idraulico (Figura 48 –ellisse blu -).



2 Definizione delle classi di rischio

| LEGENDA | | Definizione delle classi di rischio | LEGENDA (continua dalla pagina precedente) |
|-------------|--|--|---|
| R4IG | Rischio 4 (molto elevato) idrogeologico | Sono possibili la perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale, la distruzione di attività socio-economiche. | R4Id+R3IG |
| R4Id | Rischio 4 (molto elevato) idraulico | | Rischio 4 idraulico + Rischio 3 idrogeologico |
| R3IG | Rischio 3 (elevato) idrogeologico | Sono possibili problemi per l'incolumità alle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilità degli stessi, la interruzione di funzionalità delle attività socio-economiche e danni rilevanti al patrimonio ambientale. | R3Id+R3IG |
| R3Id | Rischio 3 (elevato) idraulico | | Rischio 3 idraulico + Rischio 3 idrogeologico |
| R2IG | Rischio 2 (medio) idrogeologico | Sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale che non pregiudicano l'incolumità delle persone, l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività economiche. | R3Id+R2IG |
| R2Id | Rischio 2 (medio) idraulico | | Rischio 3 idraulico + Rischio 2 idrogeologico |
| R1IG | Rischio 1 (moderato) idrogeologico | I danni sociali, economici e al patrimonio ambientale sono marginali. | |
| R1Id | Rischio 1 (moderato) idraulico | | |
| | Aree soggette ad allagamento | | |
| | Aree di localizzazione dei principali dissesti idrogeologici | | |
| | Limite dell'area di possibile influenza del fenomeno | | |
| | Orli di scarpate rocciose soggette a frane di crollo | | |

Figura 48 Perimetrazione delle aree soggette a rischio geologico e/o idraulico nel comune di Perarolo di Cadore, riportata nel documento "Dissesti idrogeologici nel Comune di Perarolo di Cadore. Perimetrazione delle Aree a Rischio. Allegato B5" redatto dalla Regione del Veneto, Giunta Regionale, Segreteria Regionale ai Lavori Pubblici, Direzione Difesa del Suolo (1999) [40]. Si evidenzia, in particolare, il rischio definito per il centro storico di Perarolo (ellisse blu).

Per quanto riguarda il rischio idraulico, la presenza del nodo tra il Boite ed il Piave può determinare in occasione di sfasamenti delle piene dei corsi d'acqua un profilo di rigurgito ed un conseguente rallentamento della corrente del torrente Boite, il quale, nonostante la presenza a monte del serbatoio di Valle di Cadore, trasporta ingenti quantità di materiale solido derivante dai numerosi fenomeni di dissesto dei versanti in atto nel tratto tra il Lago di Valle di Cadore e Perarolo [40]. Tali rallentamenti della corrente causano una deposizione del materiale trasportato e la riduzione della luce della sezione del corso d'acqua stesso con difficoltà nel transito delle portate liquide, creando situazioni pericolose per l'abitato di Perarolo [40]. Inoltre, gli interventi di sistemazione dell'alveo della seconda metà degli anni '60, ad esempio le briglie, hanno determinato un innalzamento della quota dell'alveo e favorito in destra idrografica l'aggiramento da parte della corrente delle opere stesse, mettendo l'abitato di Perarolo in una situazione di pericolo [40]. Si ricorda, infine, come l'abitato di Perarolo sia stato soggetto ad eventi alluvionali nel corso degli ultimi secoli (1708, 1823, 1882, 1903 e 1966) [40].



Figura 49 Chiesa parrocchiale di Perarolo di Cadore, inagibile a causa del fenomeno della subsidenza dovuto alla dissoluzione dei gessi raibliani di substrato. Foto dello scrivente del 10/05/2018.

Il rischio idrogeologico è, invece, legato ad una serie di fenomeni attivi nell'area comunale ed, in particolare, nel centro storico. Qui, infatti, nella porzione più occidentale ai piedi del versante vi è il pericolo generato dai crolli, mentre il fenomeno della subsidenza, legato alla dissoluzione dei gessi raibliani del substrato, si esplica con cedimenti differenziali del terreno di copertura che provoca danni strutturali agli edifici soprastanti (caso emblematico è quello della chiesa parrocchiale -Figura 49-, posizionata su materiali dalla bassa capacità portante) [40].

Quindi, l'area del centro storico di Perarolo, posizionato sulla sponda opposta del Boite ed a quota inferiore rispetto alla frana di Sant'Andrea, è classificata come area ad elevato rischio idrogeologico e rischio idraulico molto elevato (Figura 48 [40]). A tale definizione concorre anche la presenza del fenomeno franoso oggetto del lavoro di tesi, sebbene l'area abitata non sia collocata direttamente sul pendio in movimento.

Nel lavoro intitolato “*Studio della frana di Perarolo di Cadore (BL)*” realizzato nell'ambito della *Convenzione fra la Regione del Veneto (Direzione Difesa del suolo) e l'Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geologia)*, firmato dal Responsabile prof. R. Genevois e datato luglio 2011 [54], si analizza il ruolo che la frana di Sant'Andrea gioca nella definizione del rischio per l'abitato di Perarolo.

Dopo aver osservato l'evoluzione degli eventi di spostamenti più intensi a cui è stata soggetta la frana di Sant'Andrea (in particolare quello del novembre 2000), si riconosce come il rischio dell'abitato di Perarolo debba essere valutato sia considerando un diretto impatto del corpo di frana su almeno una parte del paese (rischio diretto = rischio da espansione del corpo di frana), sia in relazione alla possibile ostruzione del torrente Boite da parte del corpo di frana stesso (rischio indiretto = rischio di alluvionamento dell'area) [54]. Infatti, nel secondo caso si verrebbe a creare una diga naturale, che, a seguito ad un'eventuale rottura improvvisa o alla sua tracimazione, si verrebbe a formare un'onda d'acqua (mista a detriti) molto pericolosa per le abitazioni presenti [54]. Lo studio dell'*Università degli Studi di Padova del 2011* [54], identifica tre possibili scenari di rischio in funzione di tre possibili volumetrie del materiale potenzialmente collassabile: 8000, 38000 e 72000 m³. A questi tre possibili volumi coinvolti si associano tre altezze massime dei corpi di frana in corrispondenza dell'alveo del torrente Boite, rispettivamente di: 7.5, 12.0 e 12.5 m [54]. Si osserva come per volumi superiori a 38000 m³ le altezze massime del corpo di frana restano praticamente invariate (12.0-12.5 m) ad indicare che parte del materiale si propaga al di là dell'argine in sponda destra del Boite, coinvolgendo, dunque, nel fenomeno parte delle

abitazioni del paese [54]. Ulteriori analisi mostrano come per volumi del corpo di frana superiori agli 8000 m³ parte del materiale non venga trattenuto dall'argine stesso [54].

In merito al rischio indiretto di alluvionamento, esso è causato dall'ostruzione da parte del corpo di frana della sezione del corso d'acqua con la formazione di un lago di sbarramento [54]. L'altezza massima del volume d'acqua trattenuto non può superare i 6.5 m per la presenza dell'argine in sponda destra [54]. Qualora il quantitativo d'acqua accumulato determini un superamento dell'altezza limite, parte del volume tracimerebbe in destra idrografica, determinando l'alluvionamento dell'abitato [54]. Un'eventuale collasso della diga naturale formatasi e costituita dal corpo di frana provocherebbe un'ondata di piena – circa 430 m³/s- (con elevata portata solida), in grado di danneggiare le abitazioni poste a valle [54]. Inoltre la lunghezza limitata dell'argine, che arriva sino a circa il termine degli edifici dell'abitato, non sarebbe sufficiente a contenere l'acqua invasata dalla diga naturale, che si potrebbe venir a formare, determinandone il riversamento del volume d'acqua dal lato destro nel paese [54].

Nello studio dell'*Università degli Studi di Padova del 2011* [54] vengono anche analizzati diversi possibili scenari di intervento volti alla mitigazione del rischio per l'abitato di Perarolo, come opere strutturali di sistemazione del versante in frana (le quali, però, sembrano essere difficoltose nell'esecuzione per l'instabilità del terreno su cui si andrebbe a lavorare e necessitano di un'attenta progettazione), opere di prolungamento e di innalzamento del rilevato arginale esistente (non realisticamente attuabili) e opere di prolungamento e innalzamento del rilevato arginale accompagnate da opere idrauliche (come ad esempio scarichi di fondo nella possibile zona di accumulo del materiale, i quali si mostrano, però, di difficile realizzazione) [54]. Date le difficoltà riscontrate in termini esecutivi e progettuali delle opere di protezione dell'abitato di Perarolo, nel lavoro citato [54] si suggerisce la predisposizione di un piano di protezione civile, consistente in:

- 1) preparazione della popolazione locale all'emergenza;

2) progettazione ed installazione di un sistema di allarme efficace ed efficiente che avverta in tempo utile del possibile collasso e misuri gli spostamenti e le velocità di spostamento del versante instabile. Nel periodo in cui il documento [54] viene stilato, ovvero nel luglio 2011, la stazione topografica totale robotizzata non è ancora installata, pertanto vengono proposte due alternative in merito al possibile sistema di monitoraggio realizzabile: la stazione topografica totale stessa oppure un sistema basato sull'interferometria SAR terrestre, che registra di continuo gli spostamenti della superficie topografica. Ciascuno dei due sistemi ha i propri vantaggi e svantaggi: un sistema di monitoraggio costituito dalla stazione topografica totale è semplice nell'utilizzo e nella realizzazione, ma misura un numero limitato di punti corrispondenti alle mire, delle quali non ne è assicurata la stabilità, mentre un sistema basato sull'interferometria SAR – InSAR- terrestre misura gli spostamenti, lungo la sola linea di vista dello strumento, dei singoli elementi areali (di dimensioni in genere metriche [46]) in cui viene suddivisa l'intera superficie instabile; inoltre, è caratterizzato da costi elevati e necessita di personale specificamente addestrato all'interpretazione dei dati [54]. Infine, il monitoraggio attraverso tecnica InSAR di una frana come quella di Sant'Andrea può essere affetto da possibili problemi legati all'assenza di 'permanent scatterer', secondo quanto esposto nell'articolo di *Teza et al. (2008)* [46] (cfr. al capitolo sul monitoraggio della frana di Sant'Andrea).

Tali misure sono adottate in un'ottica di prevenzione, poiché, sebbene il comportamento di tipo visco-plastico dei terreni in movimento difficilmente porti a pensare ad un collasso istantaneo della massa instabile, l'eventualità di uno sviluppo simile del fenomeno non può essere totalmente esclusa (anche alla luce dell'evento del novembre 2000) [54].

CAPITOLO 4: Indagini geofisiche e sondaggi geognostici

4.1 Introduzione

Dato l'elevato rischio idrogeologico che la frana di Sant'Andrea rappresenta per il centro storico di Perarolo di Cadore, il fenomeno è stato molto studiato a partire dagli anni '60 del secolo scorso. In particolare, sono state eseguite serie di sondaggi geognostici e di indagini di tipo geofisico con lo scopo di identificare i principali depositi e/o litologie che costituiscono il corpo della frana ed il bedrock, di definirne le proprietà geotecniche/geomeccaniche e di ricostruirne le geometrie sotterranee. Tali indagini sono volte alla conoscenza del fenomeno stesso ed alla ricerca delle tecniche più adeguate al fine di mitigarne il rischio associato.

Nella relazione dello *Studio Galli (2012)* [45] viene dedicato un paragrafo all'elenco delle indagini e dei sondaggi eseguiti insieme alle opere realizzate sul corpo di frana a partire dal 1967 al 2011 (la relazione è datata gennaio 2012). Pertanto, riferendosi a tale elenco e sulla base delle relazioni tecniche disponibili, nei prossimi paragrafi, si riassumono i principali risultati delle indagini geofisiche e dei sondaggi geognostici.

Inoltre, si farà riferimento anche alle indagini geoelettriche condotte in data 25 gennaio 2018 da parte di *GG Service s.a.s. per conto di Geologia Applicata Studio Associato* e disponibili in allegato alla relazione dello stesso Studio [20].

Per quanto riguarda questo lavoro di tesi, i risultati delle indagini, esposti di seguito, saranno utili nella definizione del modello geologico concettuale del fenomeno franoso di Sant'Andrea.

4.2 Indagini geofisiche

Le indagini geofisiche realizzate sul corpo di frana e nell'area a monte dello stesso sono essenzialmente di due tipologie: sismica a rifrazione e geoelettrica. In ordine cronologico, le indagini analizzate sono:

- 1) indagine sismica a rifrazione in prossimità e a monte dell'ex tracciato ferroviario, eseguita nel 1991 da *Progeo s.r.l.* per conto della Direzione Centrale Opere Civili (Ufficio 1°-Geologia) dell'Ente Ferrovie dello Stato [33];
- 2) indagine sismica a rifrazione con tecnica "sismica tomografica" e prospezione sismica in foro di sondaggio con tecnica "down hole" sul corpo di frana, eseguite nel 2003 da *Progeo s.r.l.* e riportate nella relazione di *Geosondaggi s.p.a.* [22];
- 3) indagine geofisica ad alta risoluzione con la tecnica di tomografia elettrica in corrente continua sul corpo di frana, eseguita nel 2008 da *Adastra s.r.l.* [2];
- 4) indagine geoelettrica con la tecnica dell'imaging elettrico o tomografia elettrica in corrente alternata a tergo del muro di sostegno del tracciato ferroviario, eseguita nel 2018 da *GG Service s.a.s* (in allegato alla relazione di *Geologia Applicata Studio Associato* [20]).

Tali indagini hanno avuto due scopi principali: la definizione delle geometrie dei materiali che costituiscono il corpo di frana e la stima delle proprietà meccaniche e del grado di consolidamento/fratturazione degli stessi.

Si procede nell'analisi dei risultati per ciascuna delle due tecniche (sismica a rifrazione e geoelettrica) rispettivamente sul corpo di frana e nell'area a monte.

4.2.1 Indagini sismiche a rifrazione

4.2.1.1 Sul corpo di frana

L'indagine di sismica a rifrazione con tecnica "sismica tomografica", a cui si fa riferimento (*Progeo s.r.l.* su incarico di *Geosondaggi s.p.a.*, 2003, [22]), si è sviluppata lungo 4 allineamenti sismici in parte trasversali ed in parte longitudinali al versante. In tale indagine oltre ai valori del parametro "velocità delle onde P (di compressione e dilatazione)" (V_p), con unità di misura 'km/s', vengono valutati anche altri due parametri quali:

- 1) l'attenuazione $\alpha(f)$, funzione della frequenza (f) e misurata in 'decibel/m', la quale può dare indicazioni sintetiche sulle caratteristiche fisiche e sullo stato dei materiali. Essa si esprime attraverso le seguenti formule [22]:

$$\delta(f) = 20 * \log\left[\frac{A_0(X_1, f)}{A_1(X_2, f)}\right]$$

$$\alpha(f) = \frac{\delta(f)}{(X_2 - X_1)}$$

con $\delta(f)$ = decremento logaritmico del segnale sismico, X_1 e X_2 = distanze misurate lungo i tragitti sismici in metri, $A_1(X_2, f)$ = ampiezza dell'onda alla distanza X_2 per la frequenza f , $A_0(X_1, f)$ = ampiezza dell'onda alla distanza X_1 per la frequenza f e $\alpha(f)$ attenuazione dell'onda per la frequenza f in decibel/m. Si precisa che, per il range di valori di α analizzati (tra 0.1 e 1 decibel/m), si utilizza il reciproco $1/\alpha$ (in m/decibel), al fine di ottenere una rappresentazione in sezione di più facile ed immediata lettura [22];

- 2) il fattore di qualità Q , anch'esso funzione della frequenza f e dimensionalmente $(L/T)^{1.21}$, dove L =lunghezza e T =tempo. Esso è indice delle caratteristiche fisiche e dello stato dei materiali ed è sintesi dei

parametri di attenuazione e velocità delle onde di compressione. La formula che lo esprime è:

$$Q = \left[\frac{f * V_p}{\pi * \frac{1}{\alpha}} \right]^{1.21}$$

dove f= frequenza di analisi del segnale sismico in ‘Hz’, V_p= velocità sismica delle onde P in km/s e α= attenuazione in decibel/m.

Tali parametri sono legati oltre che alla frequenza f (nel campo di frequenze limitato tra 10-100 Hz, tipico delle indagini sismiche), alla fratturazione (nelle zone più fratturate l’attenuazione raggiunge valori massimi e, quindi, il fattore di qualità valori minimi) e alla saturazione (l’attenuazione in materiali sciolti completamente o parzialmente anidri è più elevata rispetto a quella in materiali interessati da presenza di acqua interstiziale) [22].

Nella descrizione delle sezioni ottenute [22] (non essendo stato possibile recuperare le relative sezioni) si individuano quattro strati caratterizzati da valori di V_p relativamente omogenei ed attribuiti a tipologie di materiali fra loro differenti:

- 1° strato= con V_p < 1 km/s, costituito da materiale sub-superficiale relativamente poco addensato (anche se i valori di attenuazione non sono molto bassi ad indicare comunque un certo grado di addensamento del materiale). Dalla sezione longitudinale al versante tali materiali sembrano assumere una geometria “a cucchiaio”;
- 2° strato= con V_p≈1.52 km/s, costituito da materiale detritico più consolidato rispetto al sovrastante;
- 3° strato= con V_p= 2.5-2.75 km/s, costituito da materiale detritico sovra-consolidato e molto compatto. I valori del reciproco dell’attenuazione (1/α) sono minori di 2.25 m/decibel ad indicare un elevato grado di

addensamento oppure una granulometria più grossolana. Tale strato si pone a drappoggio della formazione lapidea di substrato o costituisce i depositi colluviali più profondi di una paleo-frana [22];

- 4° strato= con $V_p = 3.75$ km/s, rappresentante la formazione calcareo-dolomitico-gessosa più sana, compatta e continua di substrato. Il tetto di tale strato (quindi, l'orizzonte sismico) mostra una morfologia caratterizzata da una paleo-forma concava, probabilmente rappresentativa di una superficie di scivolamento gravitativo della coltre detritica [22]. I valori di attenuazione di tale strato non sono molto elevati ($1/\alpha = 4-7$ m/decibel) ad indicare un importante grado di fratturazione del substrato roccioso, non localizzato solamente nella porzione più superficiale. Inoltre, l'analisi dell'andamento del parametro di attenuazione nelle sezioni consente di individuare una fascia cataclastica che non si rileva dall'andamento del parametro V_p . Ciò potrebbe suggerire come i giunti del materiale brecciato siano prevalentemente serrati con contatto fra i singoli clasti, a cui il parametro V_p non risponde, se non in misura limitata, mentre $1/\alpha$ mostra variazioni più importanti, essendo sensibile anche alla presenza di microfratture [22].

Inserendo in un apposito diagramma i valori di V_p e i rispettivi valori di $1/\alpha$ per ogni elemento delle sezioni sismiche realizzate si sono stimati per i materiali detritici i valori di NSPT e per i materiali lapidei il fattore di qualità Q . Nel caso in esame, per i materiali lapidei si nota come, a fronte di una limitata distribuzione di V_p , venga coperto un ampio spettro di valori di attenuazione ad indicare la presenza di una fascia di alterazione e di maggior fratturazione nel complesso lapideo. Analizzando le sezioni si rileva come tale fenomeno sia legato alla presenza di un 'cappellaccio' più alterato e fratturato [22].

Nel corso di tale campagna di indagini sono stati realizzati 3 sondaggi in cui si sono eseguite prospezioni sismiche con tecnica "down hole" con punti di misura ogni 2 m di profondità. I risultati sono plottati lungo la verticale e mediati per spessori di materiale più o meno omogeneo. Essi rivelano come dal piano

campagna verso il basso vi sia un generale incremento dei parametri sismici (V_p e V_s =velocità delle onde S di taglio) e delle proprietà meccaniche stimate (attraverso apposite formule a partire dai valori assunti dai parametri sismici) [22]. Si riscontrano, però, alcune eccezioni al generale trend positivo verso il basso dei parametri in esame. In particolare, nel sondaggio S3 l'andamento del parametro V_p subisce maggiori oscillazioni verso il basso in corrispondenza di alcuni livelli di materiale a granulometria più grossolana. Per quanto riguarda, infine, il rapporto di Poisson, esso mostra nei tre sondaggi variazioni negative in corrispondenza di livelli sabbiosi debolmente limosi e limoso-sabbiosi [22].

4.2.1.2 Lungo il vecchio tracciato ferroviario e a monte dello stesso

L'indagine sismica a rifrazione, in prossimità dell'ex tracciato ferroviario e a monte dello stesso (*Progeo s.r.l., 1991, [33]*), è stata effettuata per 4300 metri lineari, suddivisi in 10 sezioni sia longitudinali e trasversali al versante. Essa ha consentito di rilevare 3 “orizzonti notevoli” separati da due superfici di discontinuità fisica ben distinte. Tali orizzonti non coincidono necessariamente con entità geologiche di una litologia univoca, ma piuttosto con entità dalle proprietà geofisiche omogenee, consentendo di individuare spessori di diversa compattezza e, quindi, risposta geosismica in seno allo stesso litotipo. Tali orizzonti, distinti in base ai valori di velocità delle onde di compressione (V_p , in km/s) e delle onde di taglio (V_s , in km/s) possono essere così riassunti [33]:

- 1° orizzonte= con $V_p=0.21-0.54$ km/s e V_s = non rilevata, rappresentativo di uno strato di alterazione superficiale del deposito detritico di copertura;
- 2° orizzonte= con $V_p= 0.47-1.90$ km/s e $V_s= 0.11-0.60$ km/s, rappresentativo di uno strato da poco addensato a costipato del deposito detritico misto di copertura;

- 3° orizzonte= con $V_p= 2.10-4.46$ km/s e $V_s= 0.64-1.82$ km/s, rappresentativo della formazione geologica di base gessosa e/o dolomitica da degradata a poco fratturata.

Per quanto riguarda i materiali detritici si nota come fattori quali il costipamento, la ricementazione e la presenza della falda acquifera possano aumentare i valori delle velocità rilevate. La formazione geologica di base, riconosciuta nel terzo orizzonte, si mostra più varia in termini di intervallo di velocità coperto; infatti:

- 1) si riscontrano valori relativamente bassi a causa del notevole grado di fratturazione e per la decompressione subita dalla roccia. Valori di $V_p= 2.10-3.00$ km/s e $V_s=0.64-1.10$ km/s che tendono ad avvicinarsi al limite superiore dei depositi sovrastanti si osservano proprio nella porzione più a contatto con il materiale detritico di copertura, in particolar modo dove il substrato roccioso disgregato diventa subaffiorante (Figura 50). Nelle porzioni caratterizzate da questi valori di velocità, ad esempio nella porzione più occidentale dell'area esaminata, la distinzione fra detrito cementato o roccia gessosa completamente disgregata è difficile e, così, anche dai sondaggi l'identificazione della natura del materiale è complessa (dato anche il comportamento geotecnico/geomeccanico simile);



Figura 50 Fronte della frana di Sant'Andrea, dove affiora nel settore più occidentale (grossomodo all'interno dell'ellisse rossa) il substrato roccioso da parzialmente a completamente disgregato. Foto dello scrivente datata 10/05/2018.

- 2) si rilevano valori più elevati fino a $V_p=4.46$ km/s, dove il substrato risulterebbe meno fratturato e dotato di una certa compattezza, in particolare verso l'estremità orientale del profilo, dove si nota il passaggio ad una litologia dolomitica.

La descrizione delle sezioni trasversali e delle sezioni longitudinali (non essendo stato possibile recuperare le relative sezioni), riportata nella relazione di *Progeo s.r.l. (1991)* [33], consente di apportare alcune considerazioni in merito alle geometrie delle diverse entità geofisiche rilevate ed alle variazioni spaziali in seno ad una medesima entità dei parametri esaminati.

Nell'analisi delle sezioni trasversali al pendio si riscontra [33]:

- un andamento ondulato del tetto del substrato in corrispondenza di zone fagliate o settori cataclastici;

- una morfologia del versante ad avvallamenti in corrispondenza di incisioni idriche, in cui il materiale detritico di copertura mostra spessori maggiori (10-20 m) nelle aree più depresse, mentre raggiunge pochi metri di spessore sui dossi spartiacque;
- un accumulo preferenziale dei materiali detritici in corrispondenza dei settori in cui il substrato è molto fratturato e fagliato, il quale viene a confondersi con il materiale di copertura;
- un basso rapporto di Poisson del substrato (0.37-0.44), indice dello stato di degradazione dello stesso (con le proprietà meccaniche come quelle di un materiale detritico poco addensato);
- uno spessore massimo dei depositi di copertura a monte della ferrovia di 20-30 m, che raggiungono però i 10 m ai piedi della parete dolomitica a Est.

Si può interpretare dall'analisi delle sezioni sismiche la presenza di avvallamenti, probabilmente in corrispondenza di fasce più fratturate e cataclastiche del possibile substrato roccioso, su cui si imposterebbe il materiale detritico, ricolmandole.

Nelle sezioni longitudinali è stato osservato [33]:

- un aumento di spessore del materiale detritico di copertura in corrispondenza del brusco cambio morfologico di pendenza a nord del vecchio tracciato ferroviario (in prossimità della scarpata di degradazione rilevata nel corso dei lavori di tesi, rappresentata nella carta geomorfologica in allegato e menzionata nel capitolo precedente). A monte di tale limite gli spessori della coltre detritica oscillano fra i 12 e i 25 m, mentre a valle raggiungono valori di 40 m, a cui però localmente possono concorrere anche i livelli rocciosi più superficiali degradati e cataclasiati;

- un aumento del grado di fratturazione e degradazione della formazione gessosa più a valle;
- una grande variabilità dei valori di V_p , V_s e del rapporto di Poisson sia nel materiale detritico di copertura che nel substrato roccioso, in funzione del diverso grado di costipamento, di degradazione e fratturazione.

Si evidenzia, a conclusione, l'aumento di spessore rilevato progredendo da monte verso valle della copertura detritica, il quale si esplica a partire dal cambio morfologico di pendenza a monte della vecchia ferrovia.

Per completare l'analisi, si evidenzia come, nella relazione di *Progeo s.r.l. (1991)* [33], si riconoscano dei settori a maggior fratturazione e cataclastici con due orientazioni prevalenti NE-SW e NW-SE (quest'ultimo sembra essere il più recente). Tali fasce suddividono l'ammasso roccioso in blocchi con maggior intensità nella porzione più meridionale [33]. I depositi di copertura mostrano, dunque, maggiori spessori lungo direzioni con orientazioni NE-SW che sembrano allargarsi a forma di ventaglio verso valle [33].

Nel corso della stessa campagna di indagini sono stati eseguiti dei sondaggi sismostratigrafici di taratura in 7 perforazioni (5 già presenti e 2 realizzate per l'occasione) con interdistanza dei sensori di 1 m. Nella descrizione dei risultati ottenuti [33] si rileva una grande variabilità in termini delle proprietà geofisiche, ma in generale si nota un incremento di V_p verso il basso. Alcune variazioni del trend si osservano in corrispondenza delle profondità di -10/-15 m con un accelerazione del tasso di incremento e a -25/-30 m e -40/-50 m con valori di V_p inferiori rispetto a quelli registrati a profondità limitrofe.

4.2.1.3 Considerazioni riassuntive

Data la disponibilità delle sole relazioni tecniche senza i rispettivi allegati contenenti le sezioni sismiche ottenute, ci si è limitati alla descrizione generale dei risultati delle indagini sismiche dell'area in esame, cercando di rilevare le

principali geometrie e proprietà geofisiche/meccaniche che qualificano i materiali del sottosuolo. Tali caratteristiche possono essere riassunte per punti:

- 1) nell'area si distinguono una serie di orizzonti sismici (da 3 a 5) che rappresentano materiali con diverse proprietà geofisiche, in particolare materiali con diverse velocità di propagazione delle onde di compressione e delle onde di taglio. I valori assunti da tali variabili seguono un trend di generale incremento con la profondità, sebbene si rilevino importanti variazioni vertico-laterali in funzione del diverso grado di compattazione, degradazione e fratturazione del materiale stesso. Gli orizzonti più superficiali sono rappresentativi di una coltre detritica di copertura del substrato roccioso sottostante, identificato negli orizzonti più profondi;
- 2) si rileva, inoltre, l'elevato grado di fratturazione e degradazione del substrato roccioso, il quale nella sua porzione più superficiale mostra valori delle proprietà meccaniche e geofisiche confrontabili con quelle del materiale detritico di copertura consolidato soprastante. L'individuazione del passaggio fra il substrato roccioso e la copertura detritica è, perciò, incerta;
- 3) il substrato si mostra fratturato e cataclasato lungo fasce che seguono due orientazioni preferenziali: NE-SW e NW-SE. Tali direttrici sono coerenti con quanto espresso nel paragrafo di inquadramento geologico e strutturale dell'area in merito alla sovrapposizione di diverse fasi di deformazione tettonica;
- 4) le sezioni sismiche trasversali al versante rivelano una morfologia del substrato roccioso ad avvallamenti, coincidenti più o meno con le incisioni idriche superficiali e innestati lungo le fasce più fratturate dell'ammasso. In tali depressioni i depositi di copertura mostrano spessori maggiori rispetto ai dossi spartiacque. Esse, nel corso dell'evoluzione geomorfologica del versante, avrebbero convogliato (attraverso gli agenti già citati quali acqua e gravità) il materiale detritico verso valle, dove

sarebbe stato depositato a forma di conoide (nella porzione più meridionale del versante);

- 5) le sezioni sismiche longitudinali al pendio mostrano un aumento di spessore del materiale detritico di copertura verso valle in corrispondenza del cambio morfologico di pendenza a monte del vecchio tracciato ferroviario. Si nota, infine, come l'aumento di spessore possa essere attribuito anche ad una maggior degradazione del substrato roccioso nella porzione di valle e, quindi, all'attribuzione dell'alterazione di questo ai depositi più superficiali.

4.2.2 Indagini geoelettriche

4.2.2.1 Sul corpo di frana

L'indagine geoelettrica sul corpo di frana, a cui si fa riferimento (di *Adastra s.r.l.*, 2008, [2]), è stata realizzata con la tecnica di tomografia elettrica a corrente continua (ERT). Lo scopo di tale indagine è la valutazione dell'efficacia dell'intervento di consolidamento del versante in frana realizzato mediante impiego di pali jet e triplette di micropali valvolati nell'anno precedente 2007 (dalla relazione dello *Studio Galli (2012)* [45], pag. 116, Figura 43). La profondità di investigazione raggiunta è di circa 30-35 m, con valori di resistività rilevati che variano da 1-2 Ohm*m a più di 400 Ohm*m. L'indagine si è sviluppata su 3 stendimenti elettrici posizionati presso le aree interessate dagli interventi e si dispongono trasversalmente al versante come riportato in Figura 51 (linee azzurre):

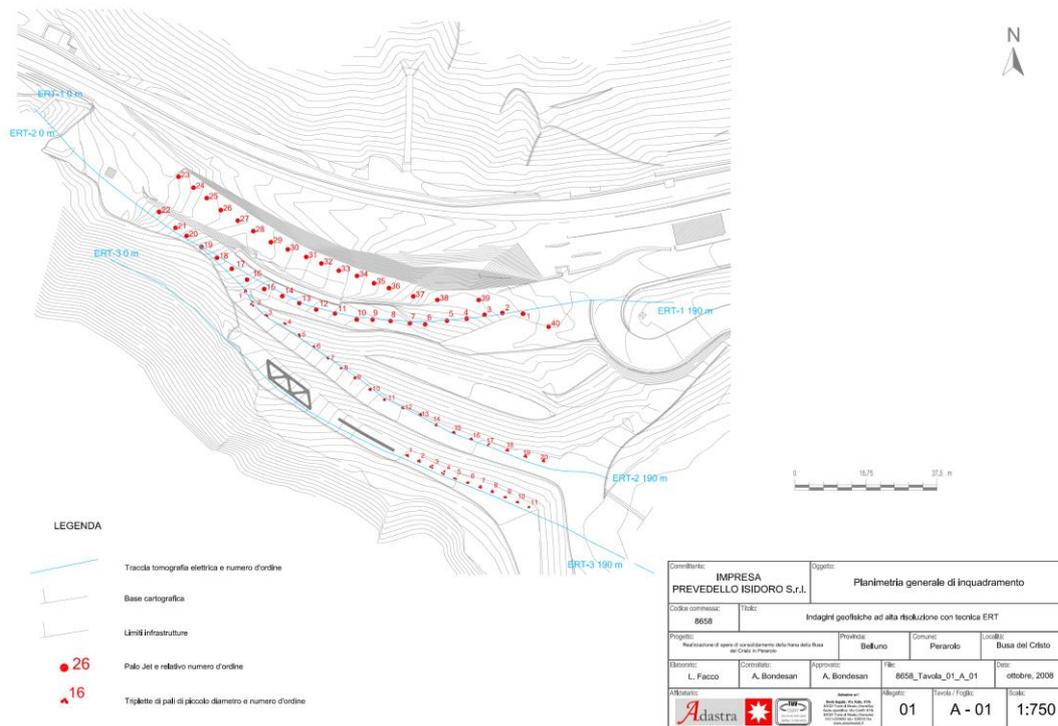


Figura 51 Disposizione planimetrica degli stendimenti elettrici dei profili ERT, secondo quanto riportato nel rapporto tecnico "Realizzazione di opere di consolidamento della frana della "Busa del Cristo" in comune di Perarolo. Indagini geofisiche ad alta risoluzione con tecnica ERT", Adastr s.r.l., 2008 [2].

Si nota come la presenza dei pali in materiale metallico non consenta alla tecnica elettrica di indagare le geometrie e le proprietà elettriche delle entità geologiche presenti nel sottosuolo. Infatti, la bassa resistività degli elementi strutturali per gli interventi di consolidazione del versante predomina su quella dei corpi geologici, impedendone o complicandone il rilevamento. D'altro canto, lo scopo originario dell'indagine è quello di verificare l'efficacia dell'intervento di consolidazione stesso e, quindi, prescinde in parte da una definizione di dettaglio delle geometrie e proprietà geoelettriche del sottosuolo.

L'analisi della bontà dell'intervento di consolidamento viene eseguita osservando i valori di resistività in prossimità dei pali (1.5 -2 Ohm*m), la loro risoluzione in profondità (8-10 m per il profilo ERT1 che investiga le opere in pali jet, mentre la profondità dell'intervento è apparente per i profili ERT2 e ERT3, in cui le opere

sono costituite da triplette di pali di cui due inclinati verso valle e uno verso monte), la geometria e l'omogeneità elettrica della zona strettamente interessata dall'intervento (in genere regolare e rettangolare con una resistività elettrica media di 15-20 Ohm*m, ad eccezione del profilo ERT3 in cui la presenza di opere realizzate in tempi diversi induce risposte elettriche meno omogenee rispetto che negli altri profili).

Nonostante la presenza dei pali metallici e, quindi, la difficoltà di portare considerazioni in termini strettamente geologici, si possono osservare alcuni importanti elementi che si rilevano nelle sezioni:

- 1) nel profilo ERT1 si può riconoscere un aumento della resistività ed interpretare con il passaggio ad un possibile substrato, testimoniato da un innalzamento della resistività di circa 70-100 Ohm*m rispetto alla zona interessata dall'intervento. Tale zona di passaggio si trova ad una profondità di circa 30 m dalla superficie topografica;
- 2) sempre nel profilo ERT1 la resistività raggiunge valori di oltre 400 Ohm*m, che possono essere attribuiti alla presenza di un bedrock roccioso;
- 3) infine, nel profilo ERT3 si nota in corrispondenza dell'estremità sud-orientale del filare di triplette di pali un 'plume' di abbassamento di resistività apparente. Tale geometria potrebbe essere legata ad un parziale dilavamento della zona di iniezione per la presenza di un'abbondante circolazione di fluidi, che sembra iniziare dalla profondità di circa 10 m dalla superficie topografica. Nel relativo rapporto tecnico [2] si riporta la conferma di questa ipotesi da parte dei tecnici dell'impresa: essi hanno osservato un elevato consumo di cemento proprio in questa porzione della zona soggetta all'intervento da cui si può dedurre la presenza di orizzonti gessiferi probabilmente carsificati ed interessati da un'importante circolazione idrica sotterranea (Figura 52).

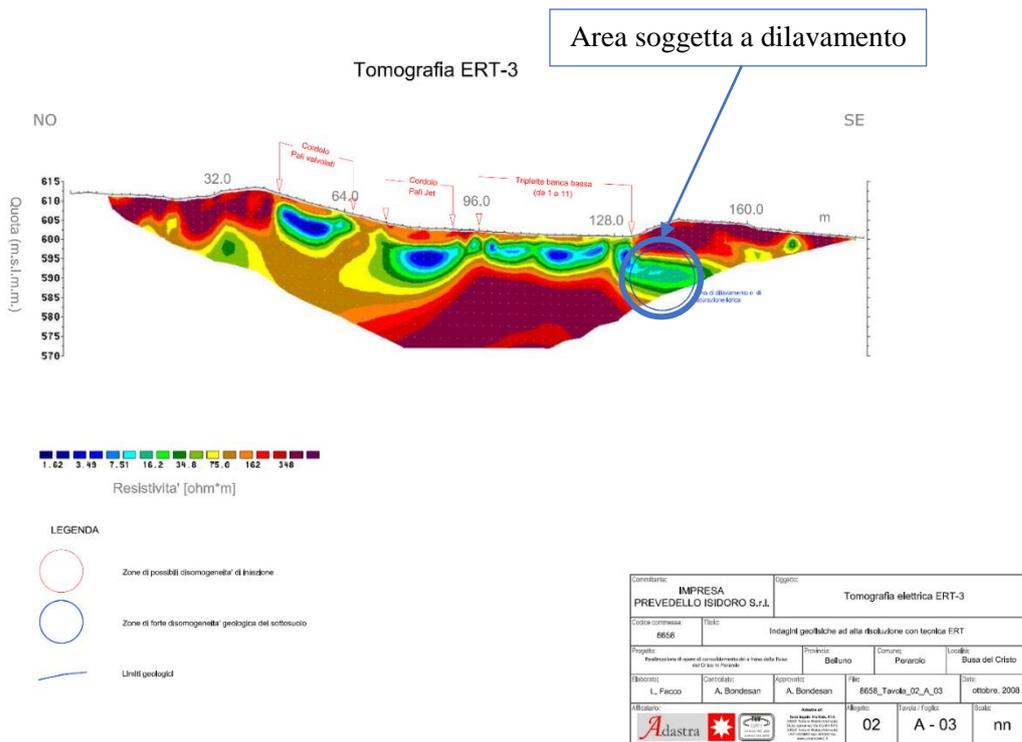


Figura 52 Profilo elettrico ERT3, con evidenziazione dell'area soggetta a dilavamento, secondo quanto riportato nel rapporto tecnico "Realizzazione di opere di consolidamento della frana della "Busa del Cristo" in comune di Perarolo. Indagini geofisiche ad alta risoluzione con tecnica ERT", Adastra s.r.l., 2008 [2].

Quest'ultimo punto è di fondamentale importanza, in quanto ribadisce il ruolo centrale rivestito dalla circolazione idrica sotterranea all'interno del volume di materiale soggetto a franamento. Perciò, si ritiene opportuno riproporre sulla planimetria degli stendimenti elettrici l'ubicazione della zona soggetta al dilavamento (Figura 53).

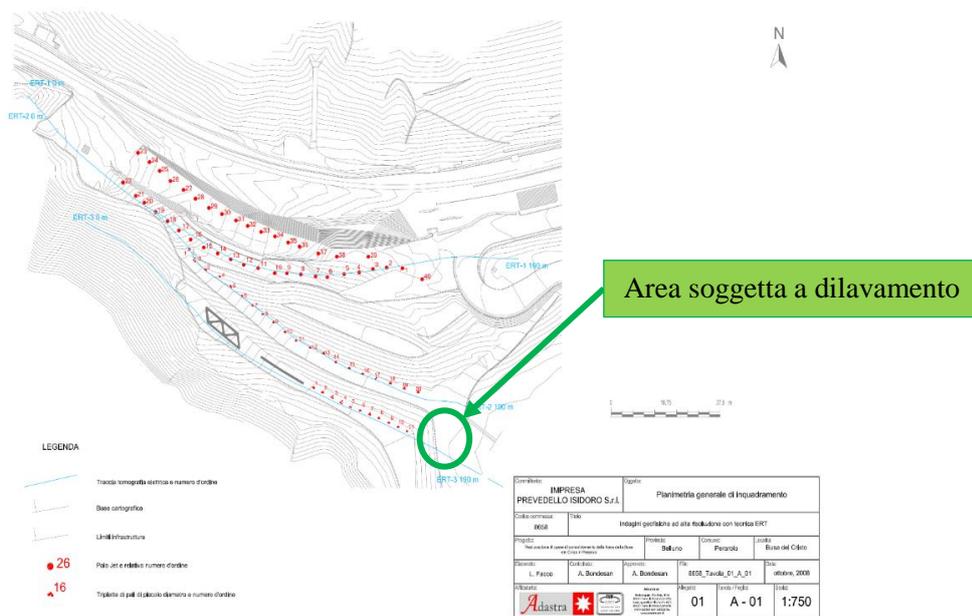


Figura 53 Disposizione planimetrica degli stendimenti elettrici dei profili ERT con evidenziazione dell'area soggetta a dilavamento, secondo quanto riportato nel rapporto tecnico "Realizzazione di opere di consolidamento della frana della "Busa del Cristo" in comune di Perarolo. Indagini geofisiche ad alta risoluzione con tecnica ERT", Aadastra s.r.l., 2008 [2].

Più a valle, lungo la linea di massima pendenza del versante passante per tale zona soggetta a maggior dilavamento, la scarpata di degradazione mette in luce un materiale detritico a granulometria fine e di color rossastro (Figura 54).



Figura 54 Corpo di frana e porzione sommitale della scarpata di degradazione, vista da WSW, con riportata l'ubicazione dell'area soggetta a dilavamento rilevata da profilo elettrico ERT3 nel rapporto tecnico "Realizzazione di opere di consolidamento della frana della "Busa del Cristo" in comune di Perarolo. Indagini geofisiche ad alta risoluzione con tecnica ERT", Aadastra s.r.l., 2008 [2]. Foto dello scrivente del 29/05/2018.

Nella zona limitrofa sono state posizionate recentemente delle reti con lo scopo di prevenire l'erosione del materiale stesso da parte dell'acqua piovana: infatti, a valle lungo la scarpata ed in allineamento con la zona di dilavamento citata, si rileva un solco di ruscellamento attivo (rappresentato con la freccia rossa in Figura 55).



Figura 55 Solco di ruscellamento attivo a valle della scarpata e della zona di dilavamento rilevata nel profilo ERT3 nel rapporto tecnico "Realizzazione di opere di consolidamento della frana della "Busa del Cristo" in comune di Perarolo. Indagini geofisiche ad alta risoluzione con tecnica ERT", Adastra s.r.l., 2008 [2]. Foto dello scrivente del 10/05/2018.

4.2.2.2 Area a monte del vecchio tracciato ferroviario

L'indagine geoelettrica di riferimento per questa zona (*GG Service s.a.s., 2018*, allegata alla relazione di *Geologia Applicata Studio Associato, 2018* [20]) è stata eseguita con la tecnica di tomografia elettrica su due stendimenti tra loro paralleli. Al fine di evitare l'influenza esercitata dagli elementi strutturali dei molteplici interventi di sistemazione della zona dell'ex ferrovia (in particolare dai pali e dai tiranti del muro di sostegno del tracciato ferroviario stesso), gli stendimenti si sono posizionati ad una distanza di 'guardia' dal muro a tergo della ferrovia (distanza che è stata calcolata di circa 20 m).

Contemporaneamente alla misura di resistività, si sono effettuate misurazioni di polarizzazione indotta, offrendo come risultato sezioni di polarizzabilità e la determinazione della caricabilità dei terreni e dei corpi sepolti ([20], allegato 1).

Con tale tecnica si osserva la curva di decadimento del potenziale al termine dell'immissione di corrente. *“In un terreno omogeneo il tempo di decadimento è funzione della resistività del terreno stesso e non cambia al variare delle coppie di punti in cui si misura ([20], allegato 1)”*. La presenza di oggetti metallici sepolti e/o circolazione preferenziale di fluidi causano anomalie nel decadimento ([20], allegato 1). L'unità di misura della polarizzazione indotta, espressa come angoli di fase, è il 'mrad' (milli-radiani) ([20], allegato 1).

Si sono utilizzate due configurazioni geometriche del dispositivo di acquisizione dei dati: la configurazione Polo-Dipolo Equatoriale e la configurazione Wenner ottimizzata per la polarizzazione indotta. Gli elettrodi attivi sono 64 (nello stendimento GG-E2) e 69 (nello stendimento GG-E1), in entrambi i casi distanziati di 3 m l'uno dall'altro. In Figura 56 sono riportate le posizioni degli stendimenti.

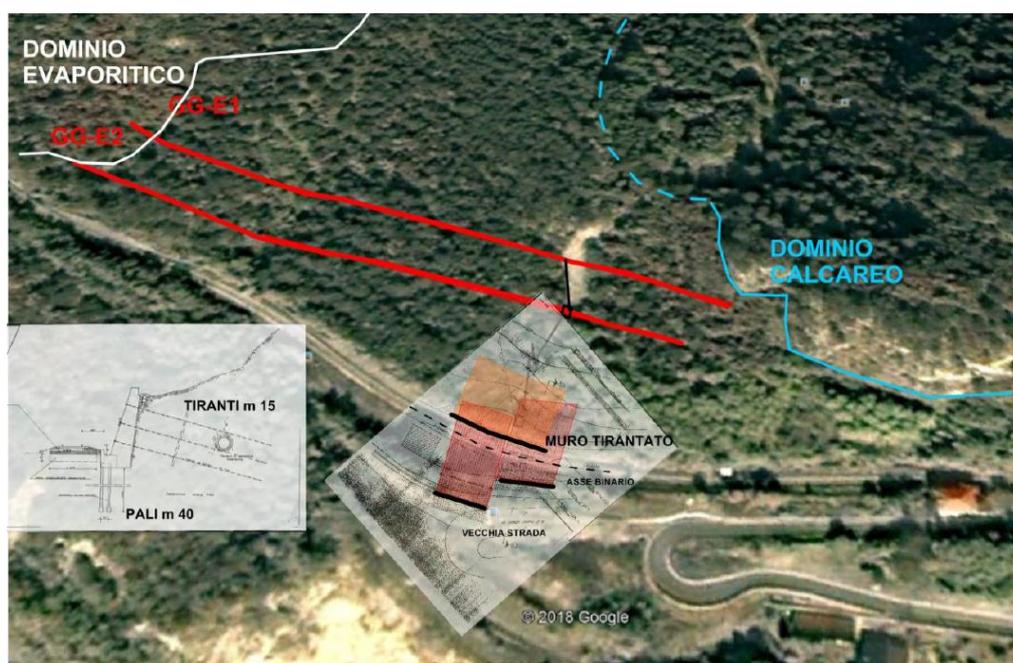


Figura 56 Posizione degli stendimenti geoelettrici GG-E1 e GG-E2 realizzati da GG Service s.a.s., da Allegato 1 *“Indagini geoelettriche per lo studio della frana di Perarolo nell’area immediatamente a monte dell’ex ferrovia”*, GG Service s.a.s., alla *“Relazione geologica e idrogeologica sulle indagini, caratterizzazione e modellazione geologica del sito”* a supporto della *“Progettazione geologica, geotecnica, geoidrologica, e strutturale delle opere in terra e roccia e dei sistemi complessivamente finalizzati alla messa in sicurezza della frana denominata “Busa del Cristo” sita nel Comune di Valle di Cadore e di Perarolo (Belluno), nell’ambito della proprietà ferroviaria RFI S.p.A.”*, Geologia Applicata Studio Associato (2018) [20].

I risultati delle indagini nelle sezioni di tomografia elettrica ottenute mostrano risultati simili fra le due configurazioni utilizzate, in particolare la configurazione Polo-Dipolo consente una maggior profondità di indagine permettendo di studiare i contatti vertico-laterali delle diverse entità geologiche. Si nota in particolare ([20], allegato 1):

- 1) dalla configurazione Wenner che all'estremità orientale di ciascuna sezione al di sotto del deposito superficiale di versante è presente un corpo con valori di resistività tra i 600 e i 4000 Ohm*m, probabilmente rappresentativo della Dolomia Cassiana che affiora nella porzione inferiore del vicino dosso di Damos (cfr. al paragrafo di inquadramento litologico). Mentre ad ovest si rileva un'entità con valori tra i 100 e i 500 Ohm*m, riconosciuta come Formazione di Travenanzes (poco alterata e relativamente anidra), che affiora nelle vicinanze;
- 2) dalla configurazione Polo-Dipolo equatoriale si osservano i contatti di queste due entità i materiali sovrastanti. Il contatto con la dolomia appare pressoché verticale (Figura 57), mentre per quanto riguarda il corpo occidentale (medio-resistivo) il limite si approfondisce gradualmente verso est con un'interruzione mediana o forse un salto di pendenza (struttura a "gradone", Figura 57). Si rileva, infine, un avanzamento verso Est della struttura a "gradone", abbassandosi di circa 10 m di quota e passando dallo stendimento GG-E1 al GG-E2;

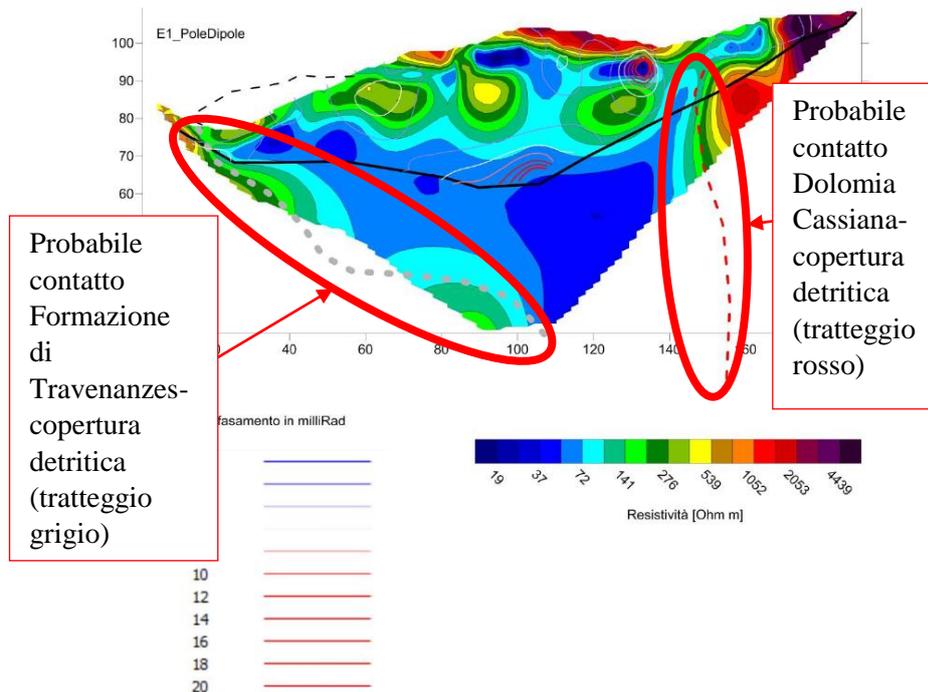


Figura 57 Profilo di tomografia elettrica GG-EI acquisito con dispositivo a configurazione Polo-Dipolo equatoriale in cui sono evidenziati gli andamenti dei contatti tra il substrato roccioso e la copertura detritica, da Allegato 1 “Indagini geoelettriche per lo studio della frana di Perarolo nell’area immediatamente a monte dell’ex ferrovia”, GG Service s.a.s., alla “Relazione geologica e idrogeologica sulle indagini, caratterizzazione e modellazione geologica del sito” a supporto della “Progettazione geologica, geotecnica, geoidrologica, e strutturale delle opere in terra e roccia e dei sistemi complessivamente finalizzati alla messa in sicurezza della frana denominata “Busa del Cristo” sita nel Comune di Valle di Cadore e di Perarolo (Belluno), nell’ambito della proprietà ferroviaria RFI S.p.A.”, Geologia Applicata Studio Associato (2018) [20].

- 3) per quanto riguarda i materiali più superficiali (ovvero quelli di copertura delle formazioni rocciose di base) e direttamente coinvolti nel fenomeno franoso si osservano a partire dal piano campagna: un orizzonte resistivo, uno conduttivo, uno resistivo ed uno conduttivo di base (Figura 58). Il primo orizzonte resistivo è interpretato come costituito da depositi grossolani e/o aerati ed ha uno spessore di 4-5 m, mentre il secondo resistivo, di cui sembra affiorare solamente un lembo nel settore occidentale, misura 10-15 m di spessore ed ha geometrie suborizzontali con un approfondimento centrale a forma di valle. Quest’ultimo corpo resistivo, secondo quanto scritto nella relazione relativa all’indagine esaminata ([20], allegato 1), dovrebbe essere caratterizzato da una maggior

porosità efficace rispetto agli altri corpi rilevati e, quindi, potrebbe fungere da serbatoio idrico. Il conduttivo di base, invece, la cui identificazione nel settore occidentale potrebbe essere con la Formazione di Travenanzes in posto, si comporta idrogeologicamente da livello impermeabile, sostenendo la circolazione idrica che si può sviluppare all'interno del corpo di frana;

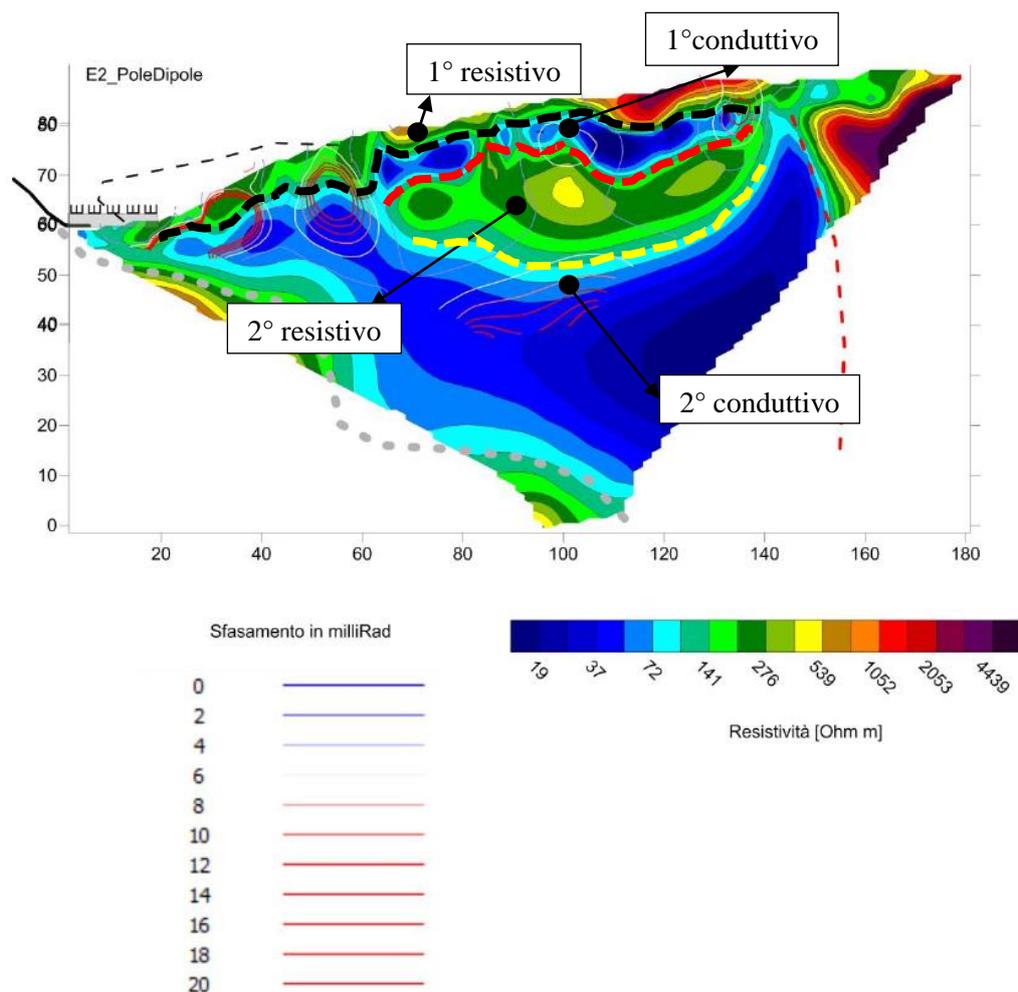


Figura 58 Profilo di tomografia elettrica GG-E2 acquisito con dispositivo a configurazione Polo-Dipolo equatoriale in cui sono evidenziati gli orizzonti identificati a diversa resistività, da Allegato 1 “Indagini geoelettriche per lo studio della frana di Perarolo nell’area immediatamente a monte dell’ex ferrovia”, GG Service s.a.s., alla “Relazione geologica e idrogeologica sulle indagini, caratterizzazione e modellazione geologica del sito” a supporto della “Progettazione geologica, geotecnica, geoidrologica, e strutturale delle opere in terra e roccia e dei sistemi complessivamente finalizzati alla messa in sicurezza della frana denominata “Busa del Cristo” sita nel Comune di Valle di Cadore e di Perarolo (Belluno), nell’ambito della proprietà ferroviaria RFI S.p.A.”, Geologia Applicata Studio Associato (2018) [20].

4) infine, attraverso la tecnica di polarizzazione indotta, grazie alle proprietà dielettriche dell'acqua, è possibile identificare vie preferenziali di circolazione di fluidi sotterranei nelle zone a maggior sfasamento tra l'onda emessa al suolo e quella registrata. Tale correlazione è tanto più diretta quanto più omogeneo dal punto di vista delle proprietà elettriche è il terreno in cui la circolazione sviluppa. Nel caso in esame l'eterogeneità in termini di resistività delle diverse entità che costituiscono il terreno, non consente una correlazione diretta tra anomalie di sfasamento e circolazione idrica. D'altro canto, considerando la disponibilità di due sezioni, una a monte e una a valle, e il controllo che la struttura del terreno esercita sulla circolazione idrica, è possibile accoppiare le informazioni ricavate dai due stendimenti per definire possibili flussi idrici. Tale operazione consente di rilevare un'anomalia (Figura 59, cerchio rosso) concentrata nel primo orizzonte resistivo, che viene attribuita alla presenza di flussi idrici sub-superficiali e i cui apporti confluiscono nelle emergenze d'acqua poco più a valle e nella galleria drenante a tergo della ferrovia. Si nota anche un secondo nucleo di sfasamento a circa 30-35 m di profondità, al contatto tra il secondo resistivo (serbatoio idrico) ed il conduttivo di base/orizzonte impermeabile (Figura 59, cerchio giallo).

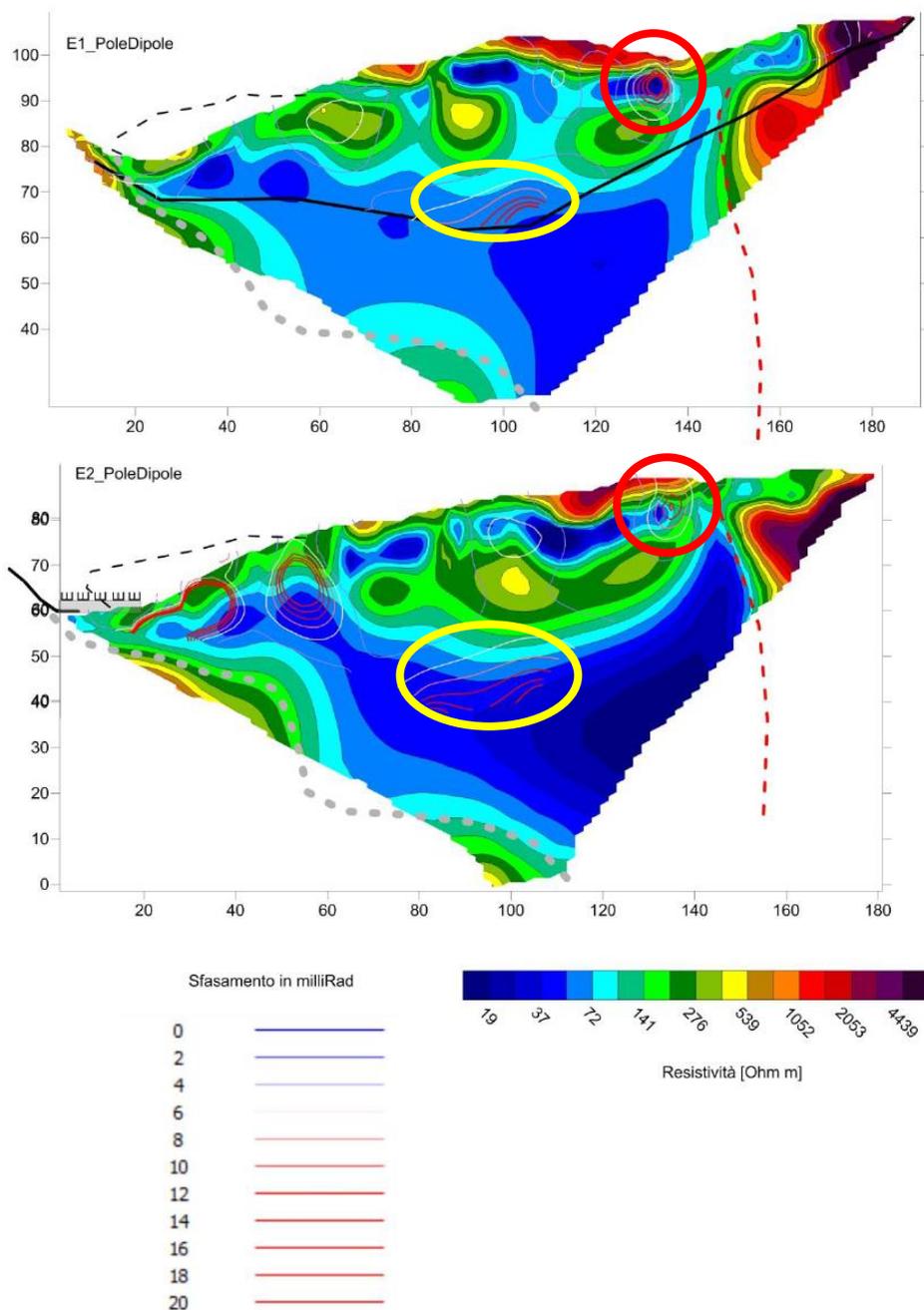


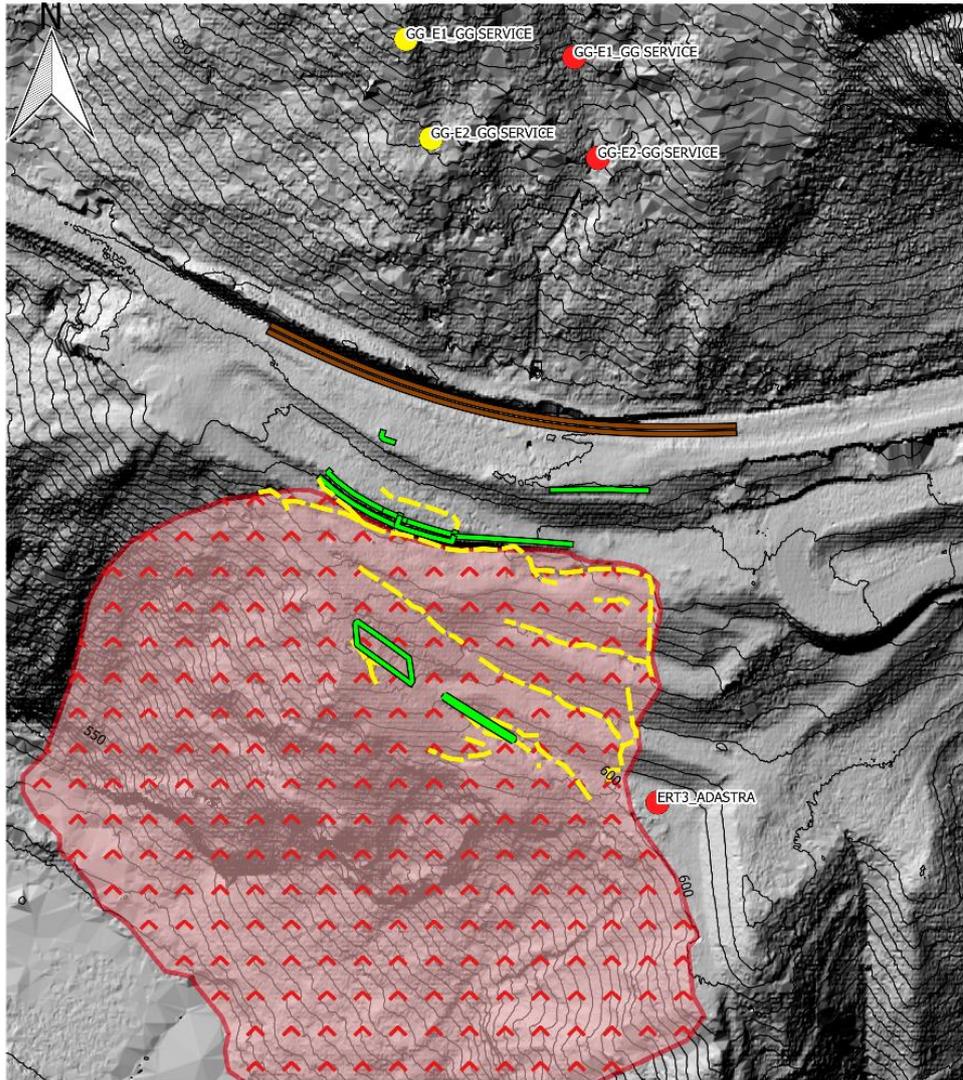
Figura 59 Profili di tomografia elettrica GG-E1 e GG-E2 acquisiti con dispositivo a configurazione Polo-Dipolo equatoriale in cui sono evidenziati i nuclei ad elevato sfasamento che si riconoscono su entrambe le sezioni (cerchio rosso =nucleo più superficiale, cerchio giallo = nucleo più profondo), da Allegato I “Indagini geoelettriche per lo studio della frana di Perarolo nell’area immediatamente a monte dell’ex ferrovia”, GG Service s.a.s., alla “Relazione geologica e idrogeologica sulle indagini, caratterizzazione e modellazione geologica del sito” a supporto della “Progettazione geologica, geotecnica, geoidrologica, e strutturale delle opere in terra e roccia e dei sistemi complessivamente finalizzati alla messa in sicurezza della frana denominata “Busa del Cristo” sita nel Comune di Valle di Cadore e di Perarolo (Belluno), nell’ambito della proprietà ferroviaria RFI S.p.A.”, Geologia Applicata Studio Associato (2018) [20].

4.2.2.3 Considerazioni riassuntive

Le indagini geoelettriche hanno, dunque, confermato ciò che è stato rilevato in quelle sismiche a rifrazione; in particolare:

- 1) si evidenzia la presenza di materiale di copertura con spessori variabili incrementati verso valle sulla base della risposte ottenute alla stimolazione sismica ed elettrica del sottosuolo, e quindi plausibilmente della struttura e della composizione delle diverse entità geologiche costituenti il terreno stesso;
- 2) la morfologia profonda del tetto del substrato roccioso a valle, la quale influisce sulla variabilità laterale dei depositi detritici di riempimento.

Inoltre, le indagini elettriche hanno consentito di individuare possibili vie preferenziali di scorrimento dell'acqua all'interno del materiale che costituisce il versante (Figura 60) e di ribadire, dunque, l'importanza che l'acqua stessa riveste sulle dinamiche del fenomeno franoso.



Legenda

Vie preferenziali di scorrimento delle acque sotterranee (profondità- m-)

- ≤10
- >10

Rilievo GPS del 27 marzo 2018

- Fessura nel terreno
- Opera antropica presente
- Rotaia
- Porzione più instabile della frana



Figura 60 Posizionamento planimetrico indicativo delle possibili vie preferenziali di scorrimento dell'acqua all'interno del versante, individuate attraverso le indagini geoelettriche (di Adastrà s.r.l. [2] e di GG Service s.a.s. ([20], allegato 1)). L'etichetta a fianco di ciascun punto riporta l'indagine di riferimento, mentre il colore del punto è funzione della profondità a cui la via preferenziale di scorrimento è collocata. La base topografica è l'hillshade con le relative curve di livello del DTM, ottenuto dal rilievo Lidar del 2018 per conto dell'Università degli Studi di Padova. Inoltre, sono rappresentati i risultati dei rilievi GPS condotti il 27 marzo 2018 dall'Università stessa.

4.3 Sondaggi geognostici

Nel corso degli anni il sito d'interesse e le immediate vicinanze sono stati oggetto di campagne di indagini geognostiche, i cui fini erano la determinazione delle tipologie litologiche e deposizionali presenti, il riconoscimento delle variazioni spaziali in termini di spessori delle stesse e l'estrazione di campioni delle diverse entità geologiche che costituiscono il sottosuolo dell'area in frana per la quantificazione delle loro proprietà geotecniche e/o geomeccaniche attraverso prove di laboratorio. Inoltre, nel corso delle perforazioni sono state eseguite delle prove in sito per la definizione di altri parametri quali la permeabilità e la resistenza a penetrazione (NSPT).

Infine, alcuni fori di sondaggio sono stati predisposti come inclinometri o come piezometri al fine di monitorare con i primi le deformazioni del sottosuolo e con i secondi l'andamento di eventuali livelli di falda.

Si riportano di seguito i risultati delle indagini geognostiche disponibili in ordine cronologico dalle più antiche alle più recenti.

4.3.1 Sondaggi datati dicembre 1966

I risultati dei sondaggi, eseguiti dall'Impresa Bardin, sono riportati nella relazione intitolata *“Sondaggi geognostici di accertamento e progetto di consolidamento lungo la tratta galleria Monte Zucco-Busa del Cristo sulla linea Treviso-Calalzo” firmata dal geol. G. Cargnel e redatta per conto del Ministero dei Trasporti e Aviazione Civile, Azienda Autonoma delle Ferrovie dello Stato, Compartimento di Venezia, Direzione Lavori [6].* I lavori si inseriscono all'interno degli studi effettuati dallo stesso geol. G. Cargnel per la definizione e la realizzazione del sistema di allarme e delle opere di sistemazione del versante a sinistra Boite in località Busa del Cristo nel 1966-1967 (*G. Cargnel, 1971, [7]*).

I 9 sondaggi geognostici, descritti nella suddetta relazione [6], sono stati realizzati in prossimità del vecchio tracciato ferroviario in prossimità della Busa del Cristo e più ad Ovest verso la galleria. Essi sono variamente inclinati ortogonalmente al versante e compiuti a rotazione con campionatori di diametro 65 mm.

In genere, tutti i sondaggi mostrano una stratigrafia comune e presentano solamente locali variazioni in termini di potenza dei depositi. La stratigrafia può essere così riassunta dall'alto verso il basso [6]:

1° strato = materiale di riporto o humus ossidato caratterizzato da spessori fino a qualche decina di centimetri;

2° strato = detrito di falda, di modesta granulometria tra sabbia grossolana e limo/argilla, con alto contenuto di acqua e di colorazione bruno-rossiccia per ossidazione. Gli spessori di tale deposito variano tra i 4 ed i 7.6 m. Localmente si rinvencono blocchi calcarei più grossolani;

3° strato = deposito a grana grossa, costituito da sabbia e blocchi dilavati della componente fine, per opera della falda percolante lungo il profilo del versante. Lo spessore varia tra 1 e 4 m;

4° strato = cappellaccio di alterazione del substrato roccioso, eterogeneo in termini di composizione (da roccia fratturata e ridotta in breccia ad argilla di alterazione, come rilevato nel sondaggio n° 2, [6]) e di spessori (in genere nell'ordine della decina di centimetri);

5° strato = substrato roccioso costituito dai calcari gessiferi del Carnico Superiore (Formazione di Travenanzes, cfr. al paragrafo di inquadramento geologico-strutturale). Esso si trova in genere tra i 7 ed i 14 m dal piano campagna.

Nell'articolo di *Cargnel (1971)* [7] è riportata una sezione geologica tipica della zona studiata con la raffigurazione delle orientazioni dei sondaggi geognostici discussi (Figura 61).

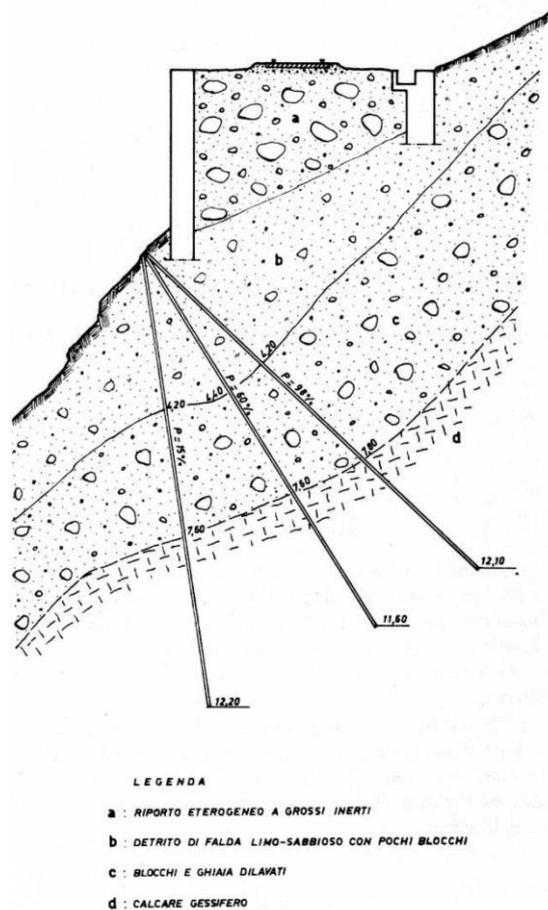


Figura 61 Sezione geologica tipica dell'area oggetto delle indagini geognostiche riportate nell'articolo di G. Cargnel, "Opere di sostegno e di consolidamento e sistemi di allarme in aree franose lungo la linea ferroviaria Treviso-Calalzo", Atti del 2° Convegno Nazionale di studi sui problemi di Geologia Applicata (1971) [7].

La pendenza rilevata del substrato è mediamente intorno ai 30° con massimi di 46°-48° nel settore più orientale dell'area oggetto delle indagini [7]. Viene, così, messa in luce la morfolgia stretta e profonda di una valle, ingentilita, poi, dal materiale di riempimento [7].

Secondo Cargnel (1966-1967) [6], il materiale in movimento è quello corrispondente al 2° (e di conseguenza anche al 1°) strato, ovvero il detrito di falda, in cui la percolazione della falda, come dimostrato dall'alto grado di ossidazione dello stesso, gioca un ruolo fondamentale sulla sua stabilità. Tutto ciò rientra nell'ottica dell'azione dell'acqua di infiltrazione delle piogge torrenziali

(che appesantisce il versante e riduce le tensioni efficaci interni materiale) come fattore innescante, insieme all'erosione al piede da parte del corso d'acqua sottostante [6].

Inoltre, sono state eseguite prove di taglio con diversi contenuti d'acqua su campioni medi della matrice fine del detrito, qualificata come limo dalle analisi granulometriche e dai limiti di Atterberg [7]. I valori di coesione ricavati dalle prove mostrano, in generale, un incremento al crescere del contenuto d'acqua, mentre l'angolo di attrito decresce [7].

Infine, si riporta l'osservazione di *Cargnel (1966-1967)* [6] in merito all'importante ruolo ricoperto dalla componente pelitica contenuta nel detrito di falda sui meccanismi e sulle evidenze del movimento del terreno. In particolare, la frazione limo-argillosa determina una locale espressione cinematica del materiale detritico in cui è contenuta che si deforma come un fluido viscoso. Tali movimenti di fluidificazione possono ridurre notevolmente le condizioni di stabilità delle strutture antropiche presenti con la possibilità di portarne a giorno le fondazioni [6].

4.3.2 Sondaggi datati agosto 1986

I sondaggi realizzati dall'Impresa Romolo Bardin S.p.a. per conto dell'Ente Ferrovie dello Stato, Compartimento di Venezia, Linea Treviso-Calalzo sono riportati nella relazione di *Fenti (1987)* [16].

La campagna geognostica in oggetto è costituita da 4 sondaggi ubicati nell'area di interesse del seguente lavoro di tesi in prossimità del vecchio tracciato ferroviario in località Sant'Andrea (quindi, a monte della nicchia morfologica della porzione soggetta a spostamenti maggiori del fenomeno franoso di Sant'Andrea). La localizzazione dei sondaggi, tutti attrezzati ad inclinometro, è riportata nella planimetria di Figura 62.

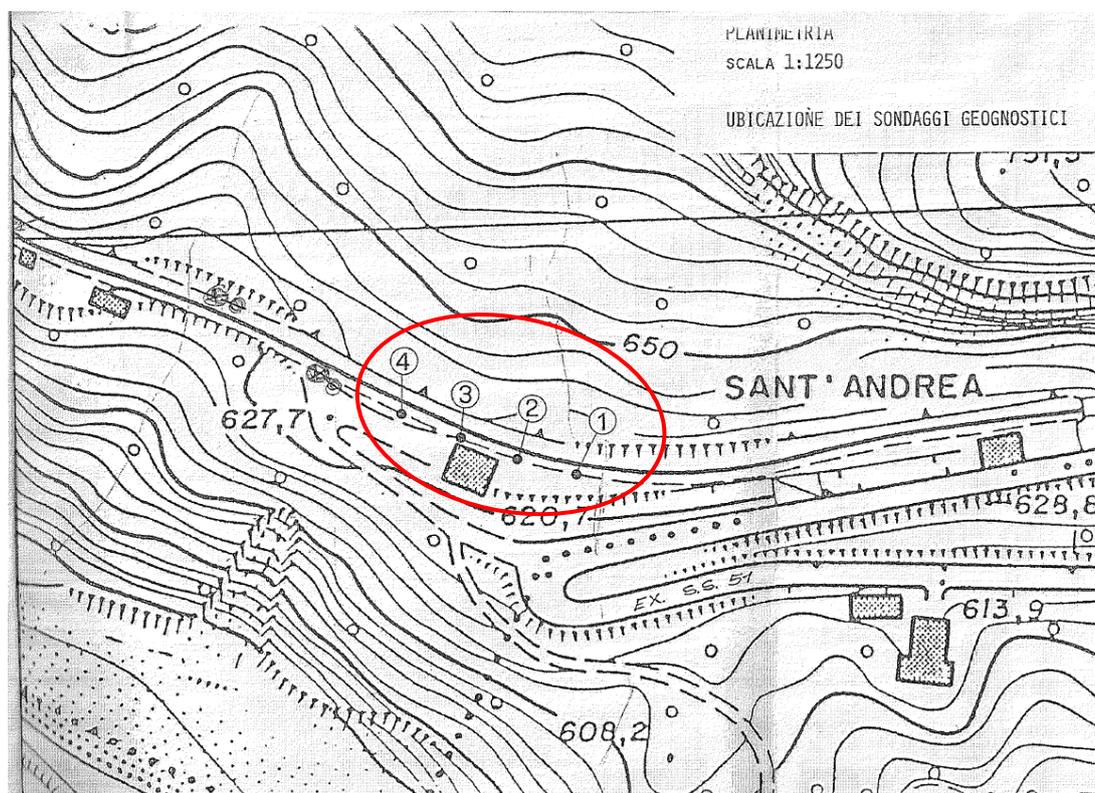


Figura 62 Planimetria dei sondaggi geognostici eseguiti nell'agosto 1986 dall'Impresa Romolo Bardin S.p.a., riportata nella "Relazione geologica su n. 4 sondaggi eseguiti in località Busa del Cristo nel comune di Perarolo (Provincia di Belluno)", geol. V. Fenti (1987) [16].

I campioni estratti sembrano distinguere tre tipi di depositi ed il substrato roccioso, secondo il seguente ordine a partire dal piano campagna:

1° strato= detriti grossolani spigolosi a granulometria eterogenea con rari trovanti metrici;

2° strato= detrito caratterizzato da intercalazioni di argille varicolori o rossicce con elementi di ghiaia a spigolo vivo o arrotondati (secondo Fenti (1987) [16], depositi di paleo-frana frammisti a detriti morenici). Lo spessore di tale strato è variabile dagli 11 m del sondaggio 4 ai 34 m del sondaggio 1;

3° strato= detrito grossolano calcareo marnoso più o meno gessifero, dovuto alla presenza di masse rocciose disarticolate. Lo spessore di tale strato varia tra i 2 e gli 8 m con aumento dal sondaggio 4 al sondaggio 1;

4° strato= rocce del substrato attribuite alla Formazione del Raibl o di Travenanzes, con prevalenza di gessi grigio biancastri, laminati, con livelli marnosi grigio-nerastri, intercalati o in eteropia con calcari marnosi grigio scuri di aspetto brecciato e cariato. Si rinveno talvolta anche brecce calcareo marnose gessifere. Il grado di fratturazione dell'ammasso roccioso è elevato nella porzione più superficiale e diminuisce gradualmente in profondità.

Si notano, infine, nel corso delle perforazioni:

- un vuoto ad una profondità di circa 16-18.5 m all'interno della copertura detritica, causato dal cedimento della copertura richiamata verso il basso da un probabile collasso profondo nel substrato gessifero incarsito;
- delle cavità carsiche nel substrato roccioso di apertura intorno ai 0.5 m connesse alla dissoluzione dei gessi e riempite da depositi limosi di provenienza superficiale [16].

Queste evidenze rivelano come il carsismo agisca attivamente sul substrato roccioso, determinando la possibile ricorrenza periodica di cedimenti [16]. *Fenti nella relazione del 1987* [16] osserva indizi di tale fenomeno anche nel versante su cui è situato l'abitato di Costa, la cui morfologia ad avvallamenti sembra connessa sia ad antiche frane che a cedimenti verticali della copertura al di sopra di un substrato gessoso incarsito. Gli effetti dei fenomeni attivi in tale area sono riscontrabili anche nelle lesioni sugli edifici della frazione stessa, riportati nella *"Relazione geologica. Dissesti in località Costa nel comune di Perarolo di Cadore"* dei geologi G.P. Bozzo e A. Baglioni dell'Ufficio Geotecnico della Regione Veneto (1985) [51]. I cedimenti plastici del terreno di copertura sono, inoltre, favoriti dalla presenza delle intercalazioni argillose all'interno del secondo strato detritico [16].

Si riporta la sezione interpretativa trasversale al versante e proposta nella relazione di *Fenti (1987)* [16], la quale interpola i dati dei sondaggi richiamati sopra (Figura 63).

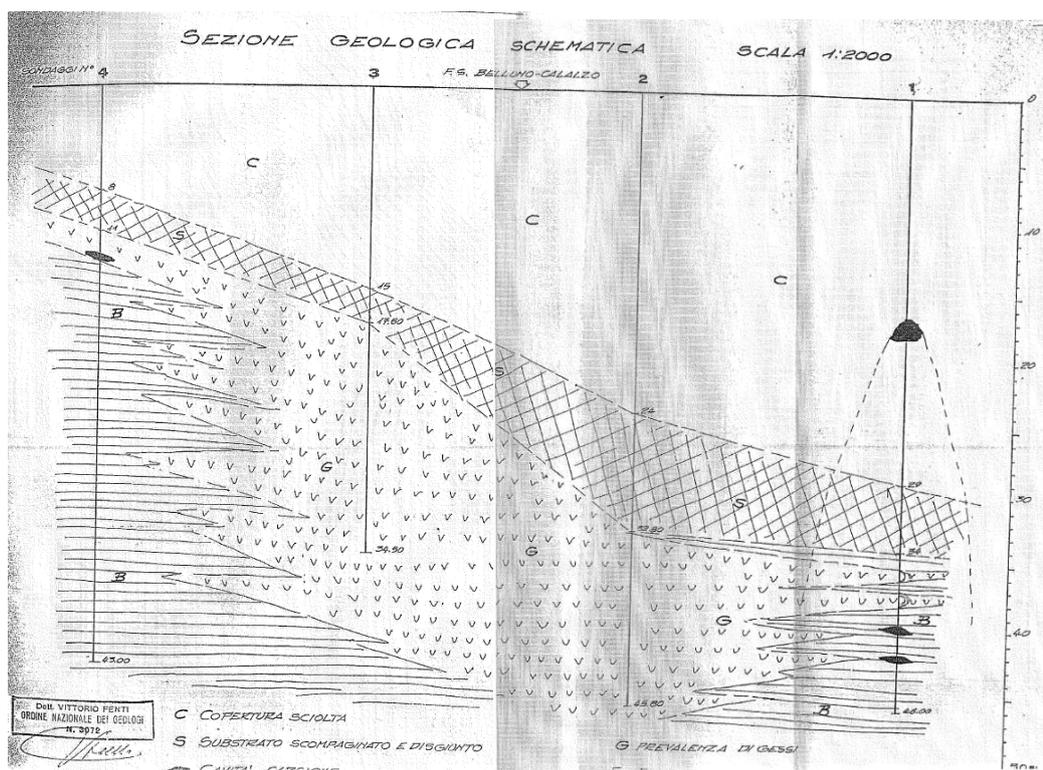


Figura 63 Sezione geologica interpretativa dei sondaggi geognostici realizzati nell'agosto 1986 e orientata trasversalmente al versante in frana (legenda: C= copertura sciolta, S=substrato scompaginato e disgiunto, G= substrato prevalentemente gessoso, B=substrato prevalentemente calcareo marnoso, forme nere= cavità carsiche substrato- o di cedimento -coperture-), riportata nella "Relazione geologica su n. 4 sondaggi eseguiti in località Busa del Cristo nel comune di Perarolo (Provincia di Belluno)", geol. V. Fenti (1987) [16].

Lo strato etichettato in sezione con la lettera 'C' (copertura sciolta) ingloba al suo interno gli strati 1° e 2°, elencati sopra. La lettera 'S' (substrato scompaginato e disgiunto), invece, corrisponde con il 3° strato e la 'G' (substrato prevalentemente gessoso) e la 'B' (substrato prevalentemente calcareo marnoso) con il 4°.

Si pone in evidenza la morfologia del substrato che, tenendo in considerazione la disposizione trasversale al pendio della sezione e le informazioni ricavate dalle indagini geofisiche, ben si raccorda con quella di un fianco vallivo.

A conclusione si riporta che sia nella relazione di Fenti (1987) [16] che di Bozzo e Baglioni per l'Ufficio Tecnico della Regione del Veneto (1985) [51] si ipotizza una costituzione litologica del substrato verosimilmente uniforme fino alla profondità di circa 100 m ovvero fino a livello del torrente Boite e del fiume

Piave. Si attribuisce ([16] e [51]), inoltre, alla presenza di lenti di materiale gessoso nel substrato e di depositi limosi-argillosi nel detrito di copertura la causa dei lenti processi di cedimento gravitativi (“creeping” profondo) del versante, i quali sembrano essere inarrestabili.

4.3.3 Sondaggi datati settembre-ottobre 2003

Le stratigrafie dei sondaggi eseguiti da *Geosondaggi S.p.a.* su incarico della Regione Veneto-Ufficio del Genio Civile di Belluno sono riportate in allegato alla relazione “*Indagini geognostiche, geotecniche e geofisiche propedeutiche al progetto di consolidamento di versanti in frana, interventi in alveo e ripristino viabilità. Indagine geognostica. Prove di laboratorio*” [21].

Nell’ambito della campagna di indagini (di cui fanno parte anche le indagini sismiche a rifrazione e prove sismiche in foro con tecnica Down Hole eseguite da *Progeo s.r.l.* per conto di *Geosondaggi s.p.a.* [22]) si sono realizzati 6 sondaggi a carotaggio continuo a profondità variabili tra i 23 e i 45 m dal piano campagna, con carotiere semplice o doppio di diametro 101 mm in base alle caratteristiche del terreno sondato. Si sono effettuate, inoltre, prove SPT e di permeabilità in sito e prove di laboratorio con i campioni prelevati dalle carote (analisi granulometriche, limiti di Atterberg, prove edometriche, prove di compressione monoassiale e prove di taglio diretto).

L’ubicazione dei sondaggi è riportata in planimetria (Figura 64).

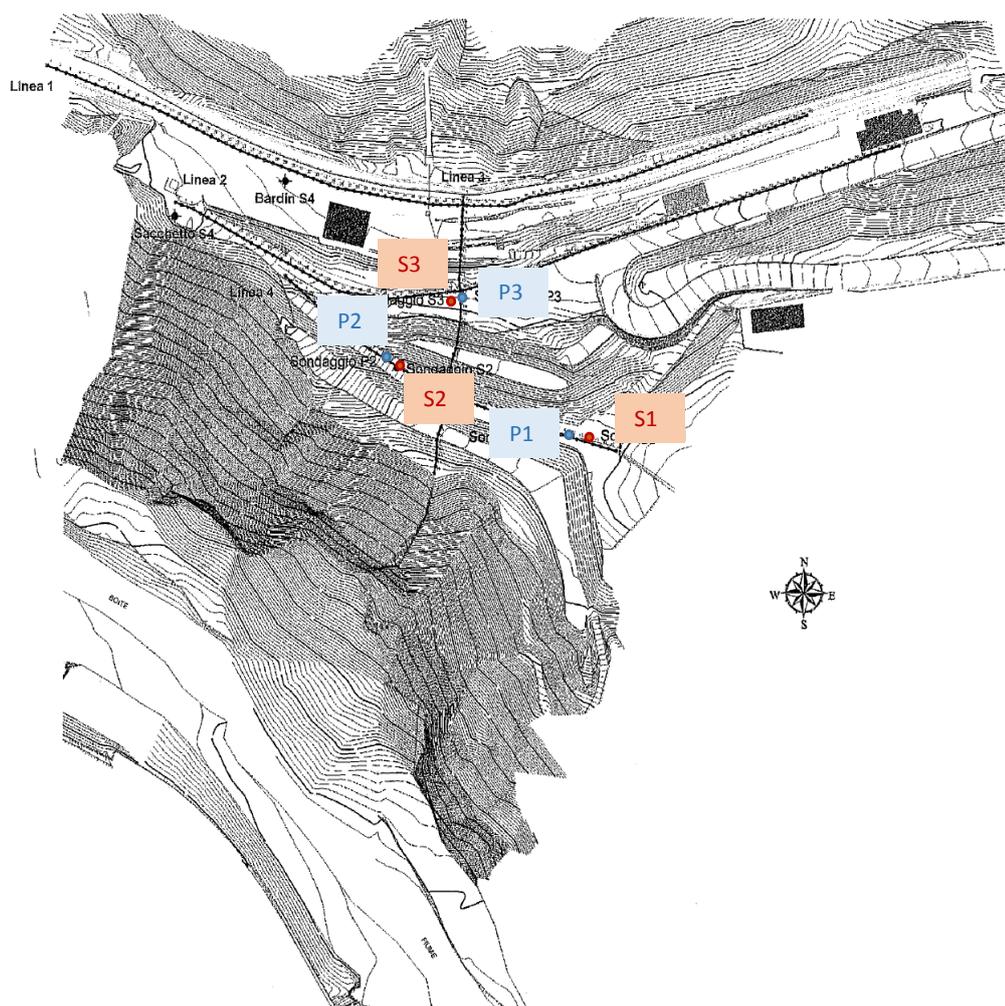


Figura 64 Planimetria dei sondaggi geognostici di settembre-ottobre 2003 eseguiti da Geosondaggi S.p.a., riportata nella relazione “Indagini geognostiche, geotecniche e geofisiche propedeutiche al progetto di consolidamento di versanti in frana, interventi in alveo e ripristino viabilità. Indagine geognostica. Prove di laboratorio”, Geosondaggi S.p.a. (2003) [21].

In termini di litologie e depositi rilevati si riscontrano somiglianze con quelli sopracitati e più antichi, ovvero si rinviene a partire dal piano campagna (Figura 65):

- 1) una porzione superficiale del detrito sciolto costituita da materiale eterogeneo a granulometria grossolana con poca frazione fine;
- 2) un livello di materiale detritico in cui la componente fine argillosa ma soprattutto limosa diventa importante;

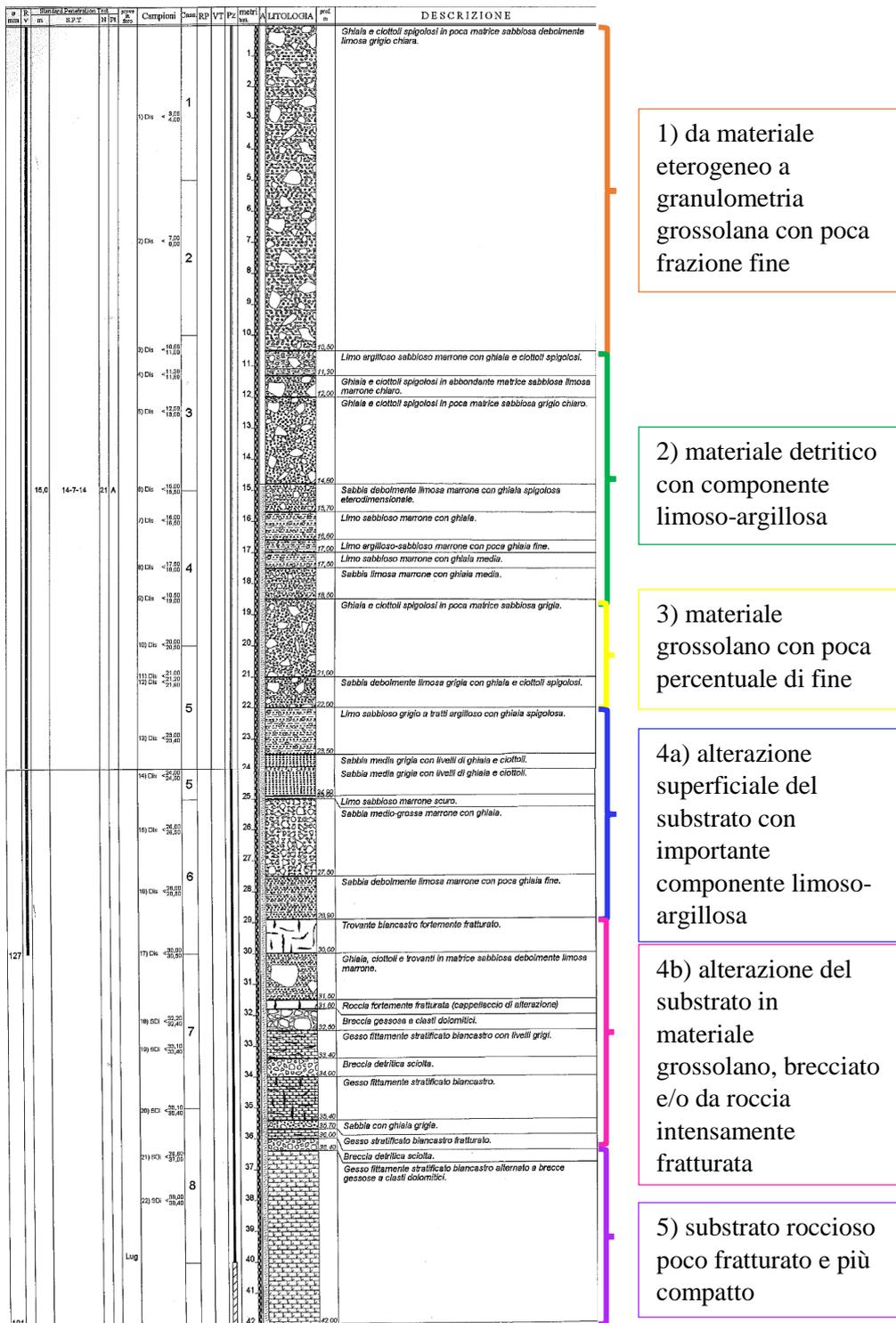
- 3) un secondo livello di materiale grossolano con poca percentuale di granulometria fine;
- 4) la porzione più superficiale ed alterata del substrato roccioso, la quale è costituita da diverse facies che possono coesistere all'interno di uno stesso sondaggio. Per facilità tali facies sono state raggruppate in due classi in funzione della percentuale di componente fine presente e, quindi, del ruolo svolto in termini idrogeologici. L'alterazione più superficiale e impermeabile del substrato roccioso è rappresentata da un materiale argilloso-limoso (4a), spesso di colore rossastro, mentre quella più profonda e più permeabile è costituita da materiale grossolano, brecciato e/o da roccia intensamente fratturata (4b);
- 5) il substrato roccioso poco fratturato e più compatto (sebbene nei sondaggi riportati difficilmente si riconosca).

Per quanto riguarda le prove in sito, i valori delle 6 prove eseguite nei fori di sondaggio riportano valori di NSPT compresi fra 10 e 30 ad indicare uno stato mediamente addensato (come riportato nella relazione geologico – tecnica dell'*Università degli Studi di Padova*, datata 2003 [52] e che richiama tali risultati). Così, le prove di permeabilità a carico variabile hanno consentito di determinare una permeabilità orizzontale tipica dei terreni sabbiosi fini (sabbie limose o sabbie limoso-argillose), con capacità di drenaggio da buone a mediocri [52].

Le prove in laboratorio rivelano, invece, come la granulometria dei materiali detritici sia prevalentemente grossolana, ma con comportamento sempre coesivo anche per i terreni a grana grossa, a causa di una “pseudo-coesione” legata alla struttura ed alla tessitura dell'aggregato di particelle [52].

Si riportano in Tabella 1 alcuni parametri geotecnici ritenuti indicativi e ricavati dalle prove di laboratorio [21]. Si osserva come il D50 (ovvero il diametro corrispondente al passante il 50% del materiale analizzato) sia quasi sempre nell'intervallo granulometrico corrispondente alle sabbie, eccetto alcuni casi

evidenziati in rosso e che rientrano nelle ghiaie. La percentuale di materiale fine passante il setaccio 200 (0.074 mm) si aggira intorno a valori di 10-20%, con alcune rare eccezioni sia positive (percentuali maggiori del 20%) che negative (percentuali minori del 10%) evidenziate in blu. L'angolo di attrito si attesta su valori compresi fra i 24° e i 30° (eccezioni in verde), mentre la coesione fra 0.2-0.3 kg/cm² (eccezioni in arancio). Per quanto riguarda il grado di saturazione (inteso come il rapporto fra il volume d'acqua contenuto nel terreno ed il volume dei vuoti) esso si rivela molto variabile con valori minimi del 7% e massimi del 100%. Si evidenziano in viola i valori del grado di saturazione sopra il 70%. Inoltre, i valori di porosità si aggirano fra il 20 ed il 30 %. Infine, l'indice di plasticità mostra valori piuttosto bassi ed in genere compresi fra l'1 e il 5 % ad indicare terreni per lo più non plastici, ma altresì a sottolineare come piccole differenze in termini di contenuto d'acqua determinino importanti variazioni nel comportamento deformativo della frazione fine dei depositi indagati (come ad esempio negli intervalli di profondità evidenziati in rosso in Tabella 1). Solamente in alcuni casi evidenziati in azzurro mostrano come la frazione fine contenuta nei campioni analizzati si comporti in maniera da poco plastica (indice di plasticità fra 5-15%) a plastica (indice di plasticità fra 15-40%) [14]. Per quanto riguarda il materiale del substrato roccioso, esso è classificato come roccia debole secondo le norme ISRM (1982) data la resistenza a compressione uniassiale tra 5 e 25 MPa [52].



1) da materiale eterogeneo a granulometria grossolana con poca frazione fine

2) materiale detritico con componente limoso-argilloso

3) materiale grossolano con poca percentuale di fine

4a) alterazione superficiale del substrato con importante componente limoso-argilloso

4b) alterazione del substrato in materiale grossolano, brecciato e/o da roccia intensamente fratturata

5) substrato roccioso poco fratturato e più compatto

Figura 65 Stratigrafia del sondaggio S3 del settembre-ottobre 2003 e suddiviso in entità geologiche relativamente omogenee in base a quanto espresso nelle analisi dei sondaggi più antichi (i numeri si riferiscono all'elenco riportato nel testo a cui la figura fa riferimento). Sondaggio riportato nella relazione "Indagini geognostiche, geotecniche e geofisiche propedeutiche al progetto di consolidamento di versanti in frana, interventi in alveo e ripristino viabilità. Indagine geognostica. Prove di laboratorio", Geosondaggi S.p.a. (2003) [21].

| | profondità (m) | D50 (mm) | passante setaccio 200 (%) | angolo di attrito (°) | coesione (kg/cm ²) | grado di saturazione (%) | porosità (%) | indice di plasticità (%) |
|----|----------------|----------|---------------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------|--------------------------|
| S1 | 5.5-5.8 | 0.7 | 11.5 | - | - | 29.6 | 21.9 | 1.3 |
| | 10.5-10.7 | 1.07 | 11.7 | 29.2 | 0.23 | 7.9 | 24.7 | 8.9 |
| | 14.0-14.4 | 1.37 | 10.4 | - | - | 7 | 29.7 | 5.4 |
| | 21.3-21.6 | 0.42 | 15.4 | - | - | 92.7 | 22.9 | 2.6 |
| | 25.5-26.0 | 0.46 | 19.8 | - | - | 69 | 36.2 | 4 |
| | 25.7-25.9 | - | - | 25.7 | 0.31 | - | - | - |
| | 29.1-29.4 | 0.25 | 21.4 | 24.3 | 0.26 | 84.9 | 28.5 | 6 |
| S2 | 5.5-6.0 | 0.71 | 14.4 | - | - | 16.1 | 24.0 | 5.9 |
| | 7.0-7.5 | 0.22 | 24.8 | - | - | 100 | 28.0 | 3.4 |
| | 12.4-12.8 | 0.39 | 20.3 | - | - | 64.5 | 29.4 | 4.1 |
| | 17.3-17.6 | 0.65 | 13.7 | 31.4 | 0.25 | 81.9 | 30.4 | 3.5 |
| | 18.4-18.6 | - | - | 26.6 | 0.19 | - | - | - |
| | 19.5-20.0 | 0.23 | 25.7 | - | - | 83.3 | 24.0 | 0.7 |
| | 23.5-24.0 | 0.31 | 21.7 | - | - | 40.3 | 25.1 | 1.4 |
| S3 | 7.0-8.0 | 2.06 | 11.9 | - | - | 12.1 | 29.7 | 4.2 |
| | 10.5-11.0 | 1.1 | 11.9 | - | - | 22.3 | 25.3 | 15.4 |
| | 16.0-16.5 | 1.04 | 20.8 | - | - | 9.7 | 29.3 | 1 |
| | 18.5-19.0 | 5.57 | 3.7 | - | - | - | - | - |
| | 23.0-23.4 | 0.29 | 34.8 | - | - | 63.5 | 26.9 | 5 |
| | 24.0-24.5 | 2.3 | 10.4 | 34.3 | 0.06 | 49.8 | 33.0 | 5 |
| | 28.0-28.5 | - | - | 30.3 | 0.2 | - | - | - |

Tabella 1 Tabella riassuntiva di alcuni parametri geotecnici ritenuti indicativi dei campioni prelevati dalle carote dei sondaggi realizzati a settembre-ottobre 2003, con evidenziati in rosso gli intervalli di profondità per cui i campioni mostrano per piccole differenze in termini di contenuto d'acqua importanti variazioni nel comportamento deformativo della frazione fine rispetto ai materiali sovra- e sottostanti. Le stratigrafie dei sondaggi ed i risultati delle prove di laboratorio sono riportati nella relazione "Indagini geognostiche, geotecniche e geofisiche propedeutiche al progetto di consolidamento di versanti in frana, interventi in alveo e ripristino viabilità. Indagine geognostica. Prove di laboratorio", Geosondaggi S.p.a. (2003) [21].

4.3.4 Considerazioni riassuntive

I sondaggi geognostici analizzati consentono, dunque, di individuare:

- 1) una copertura detritica superficiale costituita da:
 - a. un primo orizzonte in detrito a grana grossa più superficiale;
 - b. un secondo orizzonte in cui la frazione fine diventa importante;
 - c. un terzo orizzonte nuovamente in detrito a grana grossa;
- 2) un substrato roccioso alterato nella sua porzione più superficiale individuabile in due facies:
 - a. una facies più argillosa;
 - b. una facies più grossolana, brecciata e/o costituita da roccia intensamente fratturata;
- 3) infine, il substrato roccioso poco fratturato e più compatto, che spesso non si rinviene nei sondaggi.

Inoltre, un'interpolazione dei sondaggi dell'agosto 1986 [16] presso la linea ferroviaria rivelano la presenza di una paleo-forma valliva del substrato roccioso, sepolta al di sotto dei depositi di copertura, in accordo con i risultati delle indagini geofisiche.

Infine, le prove in laboratorio riportano bassi valori di resistenza della roccia del substrato, mentre si osservano bassi valori dell'indice di plasticità della frazione fine della copertura detritica, i quali si esprimono in una grande variabilità nel comportamento deformativo dei depositi per limitate variazioni del contenuto d'acqua dei materiali che li costituiscono.

4.4 Altre indagini

4.4.1 Sonde inclinometriche

Come accennato nel paragrafo precedente, alcuni fori di sondaggio sono stati adibiti a inclinometri o piezometri. I primi in particolare forniscono importanti informazioni in merito alle deformazioni che avvengono in profondità. Inoltre, gli inclinometri sono stati utilizzati per anni (sin dagli interventi degli anni'70 seguiti dal geol. G. Cargnel, ubicati poco più a ovest sullo stesso versante lungo il tracciato ferroviario tra l'incisione di Busa del Cristo e la galleria del Monte Zucco e descritti nell'articolo di *Cargnel, 1971* [7]) come principali strumenti di monitoraggio degli spostamenti profondi del corpo di frana e, quindi, come parti fondamentali del sistema di allerta.

In generale, come osservato nella relazione dello *Studio Galli (2012)* [45], i dati degli inclinometri rivelano come gli spostamenti all'interno del corpo in frana siano presenti sino ad una profondità di 30 m circa dal piano campagna con due netti incrementi a 12 e 23 m sempre dal piano campagna.

Le deformate registrate dai due strumenti, installati nel 2005 e profondi 40 m dal piano campagna, sono state analizzate nella *relazione illustrativa intitolata "Perarolo di Cadore-Frana di Sant'Andrea. Campagna di test in sito sull'effettuazione di 'pali-jet'"* firmata dall'ing. P. Peretti e datata 27 febbraio 2006 [32]. L'ubicazione degli inclinometri, nominati TIV1 e TIV2, è riportata in planimetria (Figura 66).

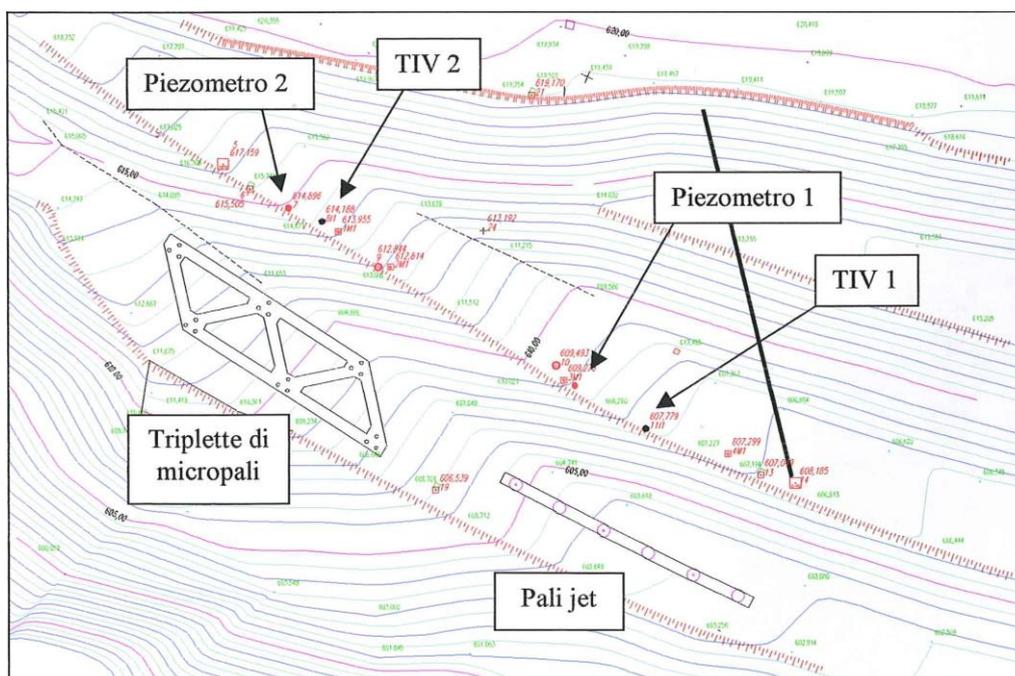


Figura 66 Planimetria con l'ubicazione degli inclinometri e dei piezometri realizzati nel 2005, riportata nella relazione illustrativa "Perarolo di Cadore-Frana di Sant'Andrea. Campagna di test in sito sull'effettuazione di 'pali-jet'", P. Peretti (2006) [32].

L'inclinometro TIV1, posizionato nel settore mediano del corpo di frana, mostra una superficie di scivolamento netta a 19 m dal piano campagna con una velocità media sia superficiale che sul piano di scivolamento intorno ai 1.3 cm/mese ad indicare uno spostamento quasi-rigido del corpo di frana (Figura 67) [32]. Si nota, altresì, un importante incremento degli spostamenti ad una profondità di 10 m dal piano campagna, probabilmente legato a problemi strumentali (Figura 67 –freccia blu-) [32]. La direzione di spostamento sino alla profondità del piano di scivolamento si aggira su azimut di 220°N-240°N, ovvero lungo la direzione di massima pendenza del versante (Figura 68) [32].

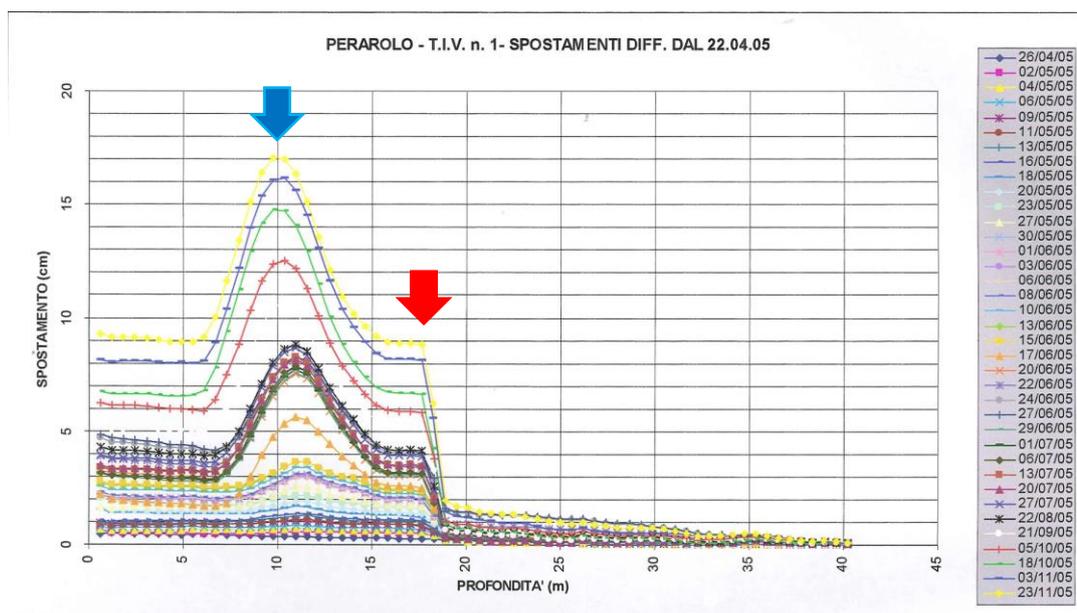


Figura 67 Spostamenti differenziali dal 22.04.2005 varianti con la profondità registrati all'inclinometro TIV1 con evidenziate le principali discontinuità negli andamenti commentate nel testo. Grafico riportato nella relazione illustrativa "Perarolo di Cadore-Frana di Sant'Andrea. Campagna di test in sito sull'effettuazione di 'pali-jet'", P. Peretti (2006) [32].

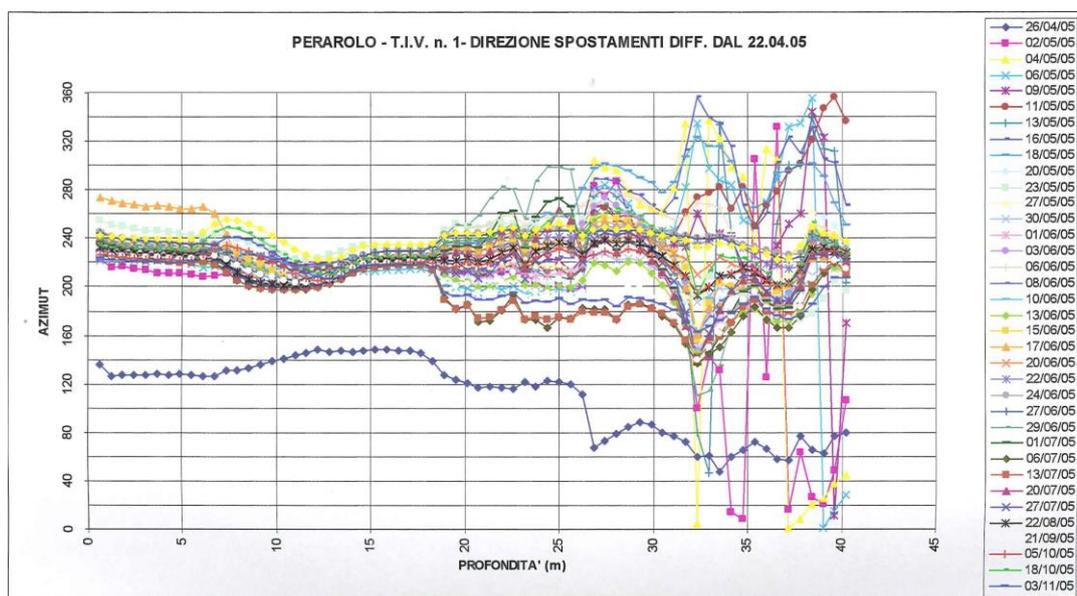


Figura 68 Direzione degli spostamenti differenziali dal 22.04.2005 varianti con la profondità registrati all'inclinometro TIV1. Grafico riportato nella relazione illustrativa "Perarolo di Cadore-Frana di Sant'Andrea. Campagna di test in sito sull'effettuazione di 'pali-jet'", P. Peretti (2006) [32].

Dalle deformate dell'inclinometro TIV2 (Figura 69), localizzato sul fianco destro della frana, non si rileva una superficie di scivolamento netta come nel caso dell'inclinometro TIV1 [32]. Tali grafici mostrano incrementi delle deformazioni di taglio dai 31 ai 25 m circa di profondità, per poi comportarsi in modo più o meno rigido sino alla superficie (con accenni di piccole variazioni per spostamenti differenziali elevati –frecche blu- in prossimità dei 21-22 m e 12-13 m dal piano campagna, probabilmente legati a problemi strumentali) [32]. La direzione degli spostamenti (Figura 70) è orientata verso valle e si aggira tra i 180°N e i 220°N [32].

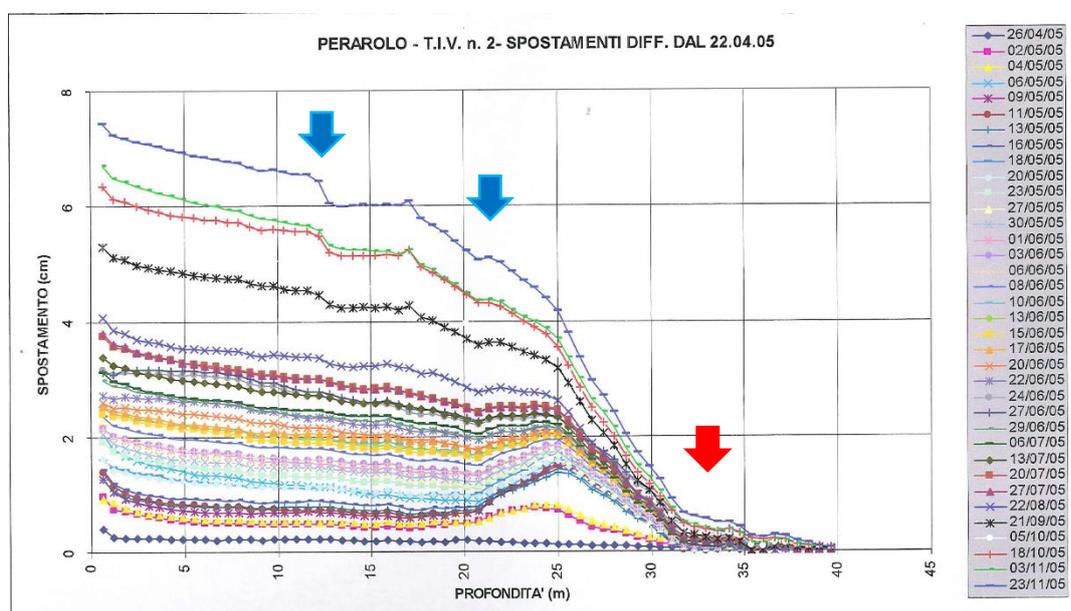


Figura 69 Spostamenti differenziali dal 22.04.2005 varianti con la profondità registrati all'inclinometro TIV2 con evidenziate le principali discontinuità negli andamenti commentate nel testo. Grafico riportato nella relazione illustrativa "Perarolo di Cadore-Frana di Sant'Andrea. Campagna di test in sito sull'effettuazione di 'pali-jet'", P. Peretti (2006) [32].

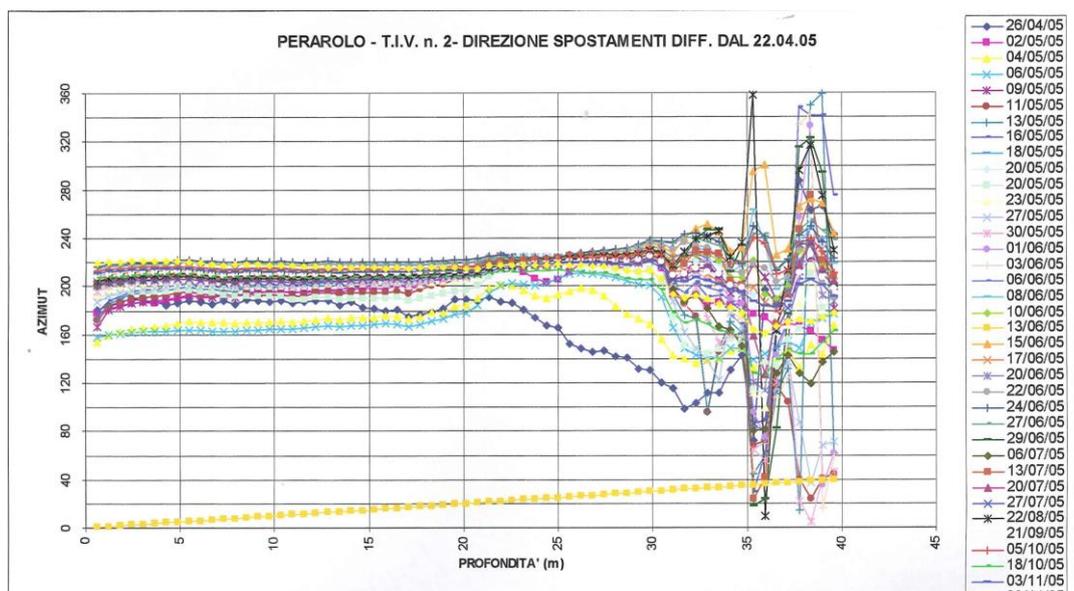


Figura 70 Direzione degli spostamenti differenziali dal 22.04.2005 varianti con la profondità registrati all'inclinometro TIV2. Grafico riportato nella relazione illustrativa "Perarolo di Cadore-Frana di Sant'Andrea. Campagna di test in sito sull'effettuazione di 'pali-jet'", P. Peretti (2006) [32].

Nella relazione illustrativa citata [32] si afferma come, data la direzione degli spostamenti registrati ai due inclinometri, il corpo di frana sembra subire una deformazione laterale verso il fianco destro. Nella stessa relazione [32] si imputa tale fenomeno alla morfologia profonda della superficie di scivolamento (cfr. alla paleo-forma valliva rilevata dalle indagini geofisiche e geognostiche). Inoltre, si nota come alla deformazione laterale sia associata una riduzione della rigidità del materiale in scivolamento, evidenziata dal confronto fra gli spostamenti registrati in superficie e quelli misurati in profondità lungo lo sviluppo dell'inclinometro (Figura 71) [32]. Si osserva, infatti, come per l'inclinometro TIV1 i dati profondi e di superficie siano quasi coincidenti, mentre le curve relative all'inclinometro TIV2 mostrano differenze crescenti all'aumentare degli spostamenti, indici di una maggior deformabilità della massa instabile (cfr. al calcolo delle deformate volumetriche mensili medie dell'ultimo anno) [32].

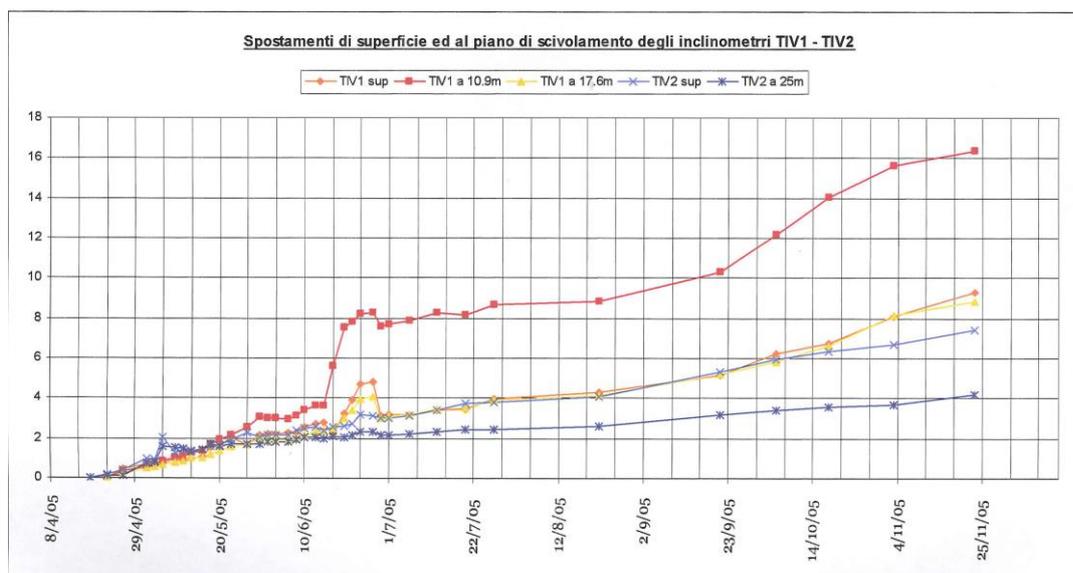


Figura 71 Confronto degli spostamenti registrati in superficie e sulla superficie di scivolamento per gli inclinometri TIV1 e TIV2. Grafico riportato nella relazione illustrativa “Perarolo di Cadore-Frana di Sant’Andrea. Campagna di test in sito sull’effettuazione di ‘pali-jet’”, P. Peretti (2006) [32].

Nella relazione dello *Studio Galli (2012)* [45] si riportano i dati acquisiti nel sondaggio attrezzato ad inclinometro, eseguito su incarico della Regione Veneto nel 2000. La descrizione della stratigrafia comprende: 12 m di copertura ghiaioso-sabbiosa, 10 m di roccia gessosa mediamente consistente con livelli di limo, 11 m di deposito limo-argilloso con elementi di dolomie e gessi e dai 32,6 m di profondità si rinviene roccia molto fratturata costituita da dolomie e gessi. I dati inclinometrici mostrano un movimento della porzione di materiale soprastante i 32.6 m, con un incremento delle deformazioni verso l’alto fra i 19 e i 22 m. Al di sopra dei 19 m il terreno viene trasportato passivamente con una velocità media intorno al 1 cm/mese. Si nota, inoltre, come il substrato sia oggetto a lentissime deformazioni gravitative profonde.

Altri dati inclinometrici sono riportati nel “Rapporto geologico preliminare sulla frana che ha interessato il centro storico di Perarolo (BL) il giorno 18.11.2000” della Regione del Veneto, Direzione geologia e ciclo dell’acqua (firmata dal Responsabile dell’Ufficio Geotecnico dr. geol. A.Baglioni e dal Dirigente del Servizio Geologia dr. geol. F. Toffoletto), datata 08/01/2001 [41]. Essi si

risultano dagli spostamenti registrati nei giorni successivi all'evento franoso del 18 novembre 2000 presso il pozzo inclinometrico P9bis, realizzato il 29 novembre 2000 dal Genio Civile Regionale e localizzato come riportato in Figura 72 [41].

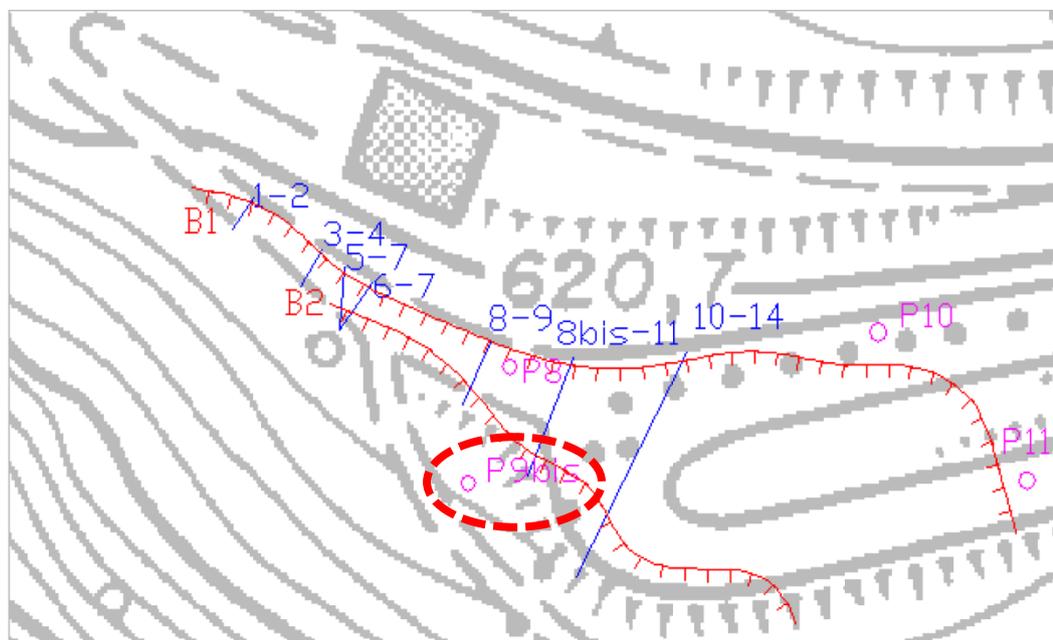


Figura 72 Planimetria della disposizione dei punti di monitoraggio in occasione dell'evento franoso del 18 novembre 2000, riportata nel "Rapporto geologico preliminare sulla frana che ha interessato il centro storico di Perarolo (BL) il giorno 18.11.2000" della Regione del Veneto, Direzione geologia e ciclo dell'acqua (firmata dal Responsabile dell'Ufficio Geotecnico dr. geol. A. Baglioni e dal Dirigente del Servizio Geologia dr. geol. F. Toffoletto), datata 08/01/2001 [41]. Nel cerchio rosso viene evidenziata la posizione del pozzo inclinometrico P9bis.

Le misure inclinometriche manuali registrate nel pozzo P9bis sono riportate in Figura 73 e mostrano un graduale incremento degli spostamenti verso il piano campagna tra i 30 e i 25 m circa di profondità (freccia blu) e un aumento netto della deformazione in prossimità dei 17-18 m di profondità (freccia rossa).

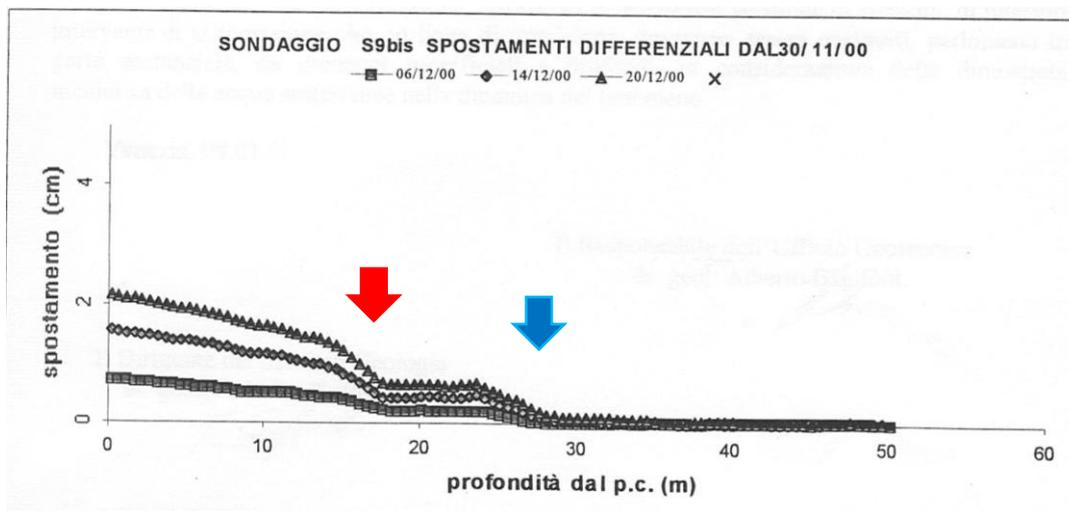


Figura 73 Deformate inclinometriche registrate manualmente presso il pozzo inclinometrico P9bis, a seguito dell'evento franoso del 18 novembre 2000. Il grafico è riportato nel "Rapporto geologico preliminare sulla frana che ha interessato il centro storico di Perarolo (BL) il giorno 18.11.2000" della Regione del Veneto, Direzione geologia e ciclo dell'acqua (firmata dal Responsabile dell'Ufficio Geotecnico dr. geol. A.Baglioni e dal Dirigente del Servizio Geologia dr. geol. F. Toffoletto), datata 08/01/2001 [41].

A conclusione di questo paragrafo, si osserva, secondo quanto riportato nella relazione dello *Studio Galli (2012)* [45], come le misure inclinometriche consentano di riconoscere superfici che delimitano zone a comportamento cinematico diverso da ricondursi alla presenza di un fenomeno franoso complesso [45]. Questo appare caratterizzato da superfici di scivolamento multiple, di cui se ne riconoscono principalmente tre e che, integrando e confrontando i risultati delle indagini geofisiche con le deformate inclinometriche, si attestano a profondità di circa 10-12 m, 20-23 m e 30 m, per un volume di frana complessivo stimabile intorno ai 118.000 m³ [45].

Si ricorda, infine, il diverso comportamento riscontrato nei due inclinometri esaminati in termini di andamento delle deformate e di differenze tra le deformazioni superficiali e profonde:

- 1) all'inclinometro TIV1 si osserva una deformata con una netta superficie di scivolamento al di sopra della quale il materiale rigido si muove

passivamente, evidenziato dall'uniformità degli spostamenti superficiali e profondi (Figura 67);

- 2) all'inclinometro TIV2 la deformata, invece, non presenta una superficie di taglio netta ma piuttosto una fascia in cui gli spostamenti aumentano progressivamente verso la superficie (Figura 69). Al di sopra di tale fascia il materiale sembra comportarsi in maniera parzialmente rigida, anche se, confronti fra gli spostamenti in superficie ed in profondità (Figura 71), consentono di notare una riduzione di rigidità e maggior deformabilità della massa instabile in questo punto piuttosto che all'inclinometro TIV1. Inoltre, le direzioni degli spostamenti registrate all'inclinometro TIV2 sono leggermente diverse da quelle osservate all'inclinometro TIV1.

Si evidenziano, pertanto, due aree a comportamento deformativo differente (Figura 74): una più rigida in prossimità dell'inclinometro TIV1 (cerchio blu tratteggiato) ed una maggiormente deformabile limitrofa all'inclinometro TIV2 (cerchio rosso tratteggiato).

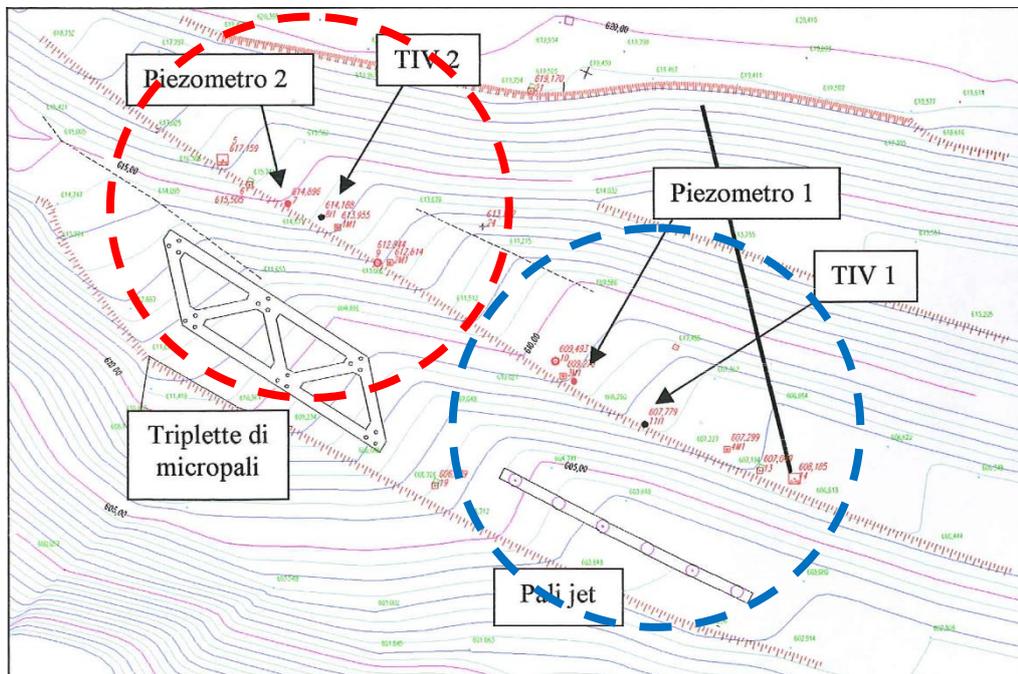


Figura 74 Evidenziazione delle aree limitrofe ai due inclinometri riportati nel testo e caratterizzate da comportamenti deformativi differenti. Planimetria di base riportata nella relazione illustrativa "Perarolo di Cadore-Frana di Sant'Andrea. Campagna di test in sito sull'effettuazione di 'pali-jet'", P. Peretti (2006) [32].

4.4.2 Piezometri

Per quanto riguarda i piezometri di tipo Casagrande a canna piccola installati a profondità di 40 m nel corso della, già citata, campagna geognostica del 2005, i cui risultati sono descritti nella *relazione illustrativa intitolata "Perarolo di Cadore-Frana di Sant'Andrea. Campagna di test in sito sull'effettuazione di 'pali-jet'" firmata dall'ing. P. Peretti e datata 27 febbraio 2006* [32], la loro ubicazione è riportata in Figura 66 (Piezometro 1 in prossimità dell'inclinometro TIV1 e il Piezometro 2 dell'inclinometro TIV2). Nello stesso periodo sono stati realizzati due pozzi per la dispersione delle acque della falda freatica superficiale in quella profonda [32].

Gli andamenti delle altezze piezometriche misurati nei due piezometri (Figura 75) consentono di riportare alcune considerazioni:

- 1) la misurazione costante dell'altezza piezometrica del Piezometro 2 sembra essere causata da un malfunzionamento dello stesso [32];
- 2) l'andamento dell'altezza piezometrica misurato al Piezometro 1 è irregolare con oscillazioni di 2 m [32]. I livelli si attestano su valori più elevati a fine primavera-inizio estate (coincidenti con l'apporto dello scioglimento nivale), mentre raggiungono i minimi (sull'intervallo di tempo di dati disponibili) da piena estate fino a inizio autunno. Si nota, inoltre, come il livello piezometrico tenda a risalire in autunno;
- 3) data la quota del Piezometro 1 che si attesta sui 609 m s.l.m. circa (ricavata da Figura 66), la soggiacenza minima si aggira sui 30 m. Tale valore del parametro idrogeologico fa sì che le oscillazioni del livello piezometrico interessino solo per qualche metro le superfici di scivolamento riconosciute e, quindi, il corpo di frana;
- 4) si riscontra, infine, una bassa correlazione fra le variazioni del livello piezometrico e le precipitazioni ad indicare come il bacino di alimentazione della probabile falda sia maggiore di quello corrispondente al versante in esame (cfr. alla definizione bacino idrogeologico) [32].

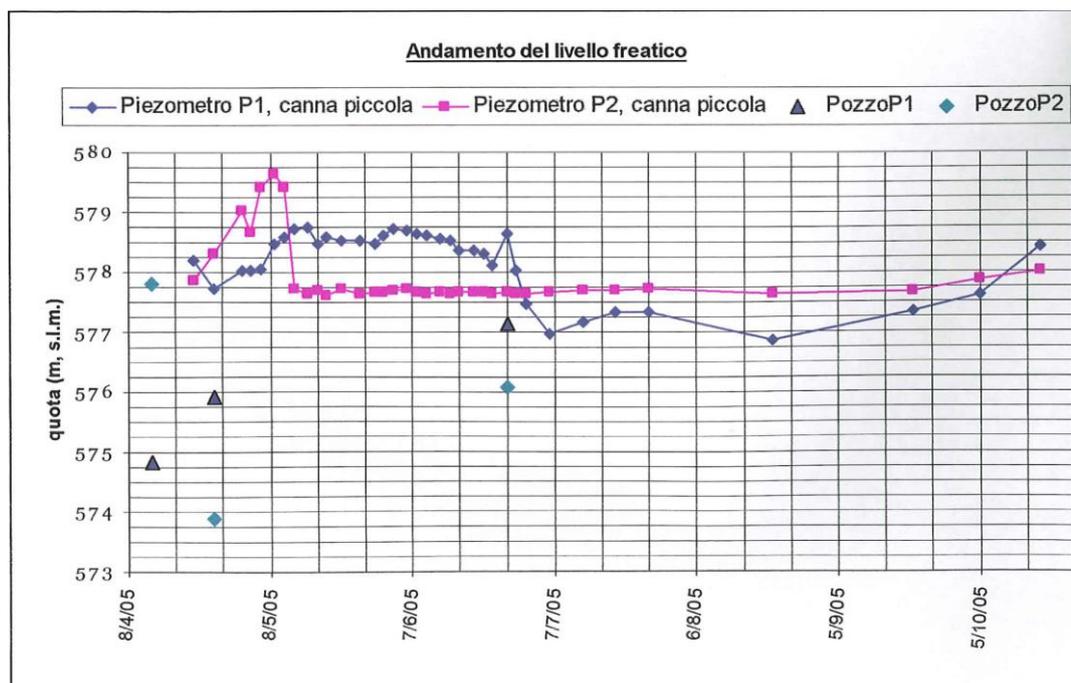


Figura 75 Andamento del livello piezometrico misurato nei due piezometri di Casagrande installati e nei due pozzi a dispersione, nel corso della campagna geognostica del 2005. Grafico riportato nella relazione illustrativa “Perarolo di Cadore-Frana di Sant’Andrea. Campagna di test in sito sull’effettuazione di ‘pali-jet’”, P. Peretti (2006) [32].

Per concludere, una possibile spiegazione dei dati registrati ai piezometri (e, quindi, un’iniziale definizione del modello idrogeologico del versante) può risiedere nella differenza di permeabilità degli orizzonti all’interno dei depositi e del substrato roccioso, i quali determinano, dato il contesto di versante vallivo, piuttosto che la presenza di una falda, di domini idrogeologici pensili di filtrazione/scorrimento idrico sotterraneo, secondo quanto riportato nella *relazione di Geologia Applicata Studio Associato (2018)* [20]. Tale ipotesi è confermata dal funzionamento quasi costante nel corso dell’anno di una galleria drenante posta a tergo del muro di sostegno della ferrovia (che ricade all’interno delle opere di drenaggio profonde realizzate per stabilizzare il versante, cfr. al paragrafo cenni storici sulla fenomeno franoso di Sant’Andrea): la sua collocazione a basse profondità dal piano campagna non le consentirebbe, infatti, di drenare costantemente acqua da una falda posta a circa 30 m dalla superficie topografica (Figura 76). Anche le fuoriuscite d’acqua localizzate in punti ben precisi ed attive

in corrispondenza degli eventi metereologici più intensi (cfr. al capitolo di inquadramento geomorfologico) avvalorano l'ipotesi della circolazione idrica sotterranea concentrata lungo definite superfici di discontinuità, favorita dal carsismo del materiale gessoso rilevabile nel substrato e anche nei depositi di copertura.



Figura 76 Immagine della galleria drenante a tergo del muro di sostegno del vecchio tracciato ferroviario, situate a quota 628 m s.l.m.. Foto riportata nella relazione dello Studio Galli “Interventi di mitigazione per gli scenari di rischio geologico, idraulico e di consolidamento dell’abitato di Perarolo di Cadore (BL). STUDIO DI PREFATTIBILITÀ”, (2012) [45].

La presenza di queste superfici lungo cui avviene la filtrazione e/o lo scorrimento dell'acqua all'interno del sottosuolo, ma anche della superficie di ruscellamento superficiale, può influenzare le misure piezometriche attraverso un “effetto bicchiere”: se la porzione fenestrata del piezometro è localizzata in un corpo geologico impermeabile l'acqua di ruscellamento superficiale s'infiltra nel tubo piezometrico riempiendolo fino ad una certa quota che si mantiene tale data la scarsa permeabilità del materiale in cui la parte terminale del piezometro è collocata. Tale effetto è maggiore nel caso in cui l'intero tubo piezometrico è fenestrato (Figura 77): esso, infatti, intercetta più superfici di filtrazione/scorrimento presenti nel sottosuolo oltre a quella superficiale, determinando una “quota piezometrica” che origina dall'equilibrio tra il flusso in

uscita a valle lungo gli orizzonti più permeabili e il flusso di filtrazione/scorrimento in entrata da monte lungo discontinuità legate a contrasti di permeabilità. In quest'ultimo caso, l'acqua entra nel piezometro da monte ed esce a valle attraverso i depositi più permeabili che si trovano a quote inferiori rispetto al livello raggiunto dall'acqua nel tubo. Quindi, il probabile "effetto bicchiere", che si sviluppa a causa della particolare stratigrafia del versante con alternanza di materiali a diversa permeabilità, può determinare misure piezometriche che non corrispondono ad effettivi livelli freatici, ma piuttosto alle quote di riempimento del tubo piezometrico stesso per scorrimento dell'acqua lungo diverse superfici di discontinuità idrogeologica.

L' "effetto bicchiere" non è, però, in contrasto con la presenza di un serbatoio d'acqua più in profondità nel substrato che risponde alle sollecitazioni climatiche stagionali, secondo quanto esposto precedentemente (infatti, i piezometri di cui si sono analizzati i dati raggiungono profondità di 40 m dal piano campagna e, quindi, le loro estremità dovrebbero essere collocate all'interno del substrato roccioso). Tale serbatoio, però, non verrebbe ad interessare se non marginalmente il corpo di frana, a differenza dei domini idrogeologici pensili di circolazione idrica sotterranea, i quali si sviluppano interamente all'interno del materiale in movimento e ne minano la stabilità.

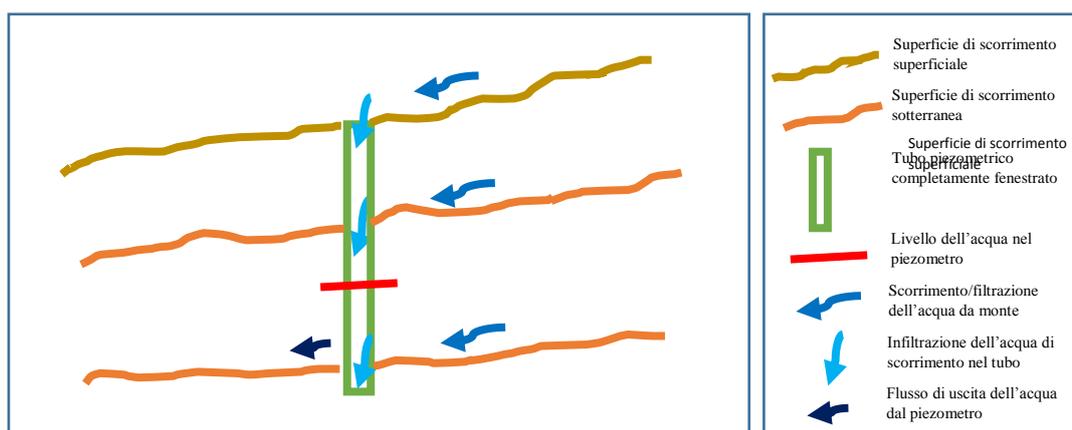


Figura 77 Schema dell' "effetto bicchiere" ovvero del ruolo svolto dai diversi domini di circolazione idrica sotterranea e superficiale sul livello dell'acqua misurato al piezometro (immagine realizzata dallo scrivente). Il modello idrogeologico del versante prevede, dunque, una serie di domini idrogeologici pensili e collocati a diverse quote in funzione del contrasto di permeabilità dei materiali che costituiscono il versante stesso.

CAPITOLO 5: Modello geologico ed idrogeologico concettuale.

5.1 Introduzione

L'analisi dei risultati delle indagini geofisiche e geognostiche, così come dei dati inclinometrici e piezometrici, consente di definire un modello geologico concettuale del versante in esame. Inoltre, dato il ruolo rivestito dall'acqua sull'innescò del fenomeno, è altresì necessaria la definizione della componente idrogeologica da integrare nel modello del versante al fine di rappresentare gli effetti delle acque sotterranee nell'assetto complessivo del pendio stesso.

5.2 Modello geologico concettuale del versante su cui è impostata la frana di Sant'Andrea

Dai risultati soprattutto delle indagini geognostiche (ma anche di quelle geofisiche) si riconoscono due entità geologiche principali a loro volta suddivise in unità, caratterizzate da una grande variabilità laterale tale da rendere localmente difficile il loro riconoscimento, poiché spesso vengono a mescolarsi fra loro [20].

Le due entità geologiche principali individuate sono:

- 1) la copertura detritica, la quale dai risultati delle indagini geofisiche (sismica a rifrazione e geoelettrica –a monte ed a valle del vecchio tracciato ferroviario-) e dai sondaggi geognostici eseguiti sembra riempire una paleo-valle orientata con asse più o meno nord-sud e che potrebbe essere controllata strutturalmente da una faglia con medesima orientazione;

- 2) il substrato roccioso, il quale dai risultati delle indagini geofisiche, in particolare dalle variazioni delle velocità sismiche [22], mostra una porzione superficiale più alterata, mentre più in profondità il suo grado di alterazione e fratturazione diminuisce progressivamente. Si nota, inoltre, una paleo-forma valliva, evidente in superficie, che sembra riconducibile ad un controllo strutturale lungo una fascia cataclastica con andamento nord-sud.

Le stratigrafie dei sondaggi geognostici disponibili consentono di riconoscere le diverse unità litologico-deposizionali che costituiscono le due entità sopra-elencate. Le informazioni lito-stratigrafiche sono state correlate per tentare di riconoscere eventuali continuità e relazioni fra orizzonti omogenei, come riportato nel paragrafo sulle indagini geognostiche e in particolare sulla suddivisione della stratigrafia del sondaggio S3 di *Geosondaggi S.p.a. del 2003* [21]. Si elencano di seguito le unità individuate, ma come già accennato in precedenza non tutte sono presenti in maniera ubiquitaria nell'area di studio a causa della variabilità laterale che caratterizza i depositi stessi e i loro processi genetici.

5.2.1 Definizione delle unità geologiche

Unità della copertura detritica:

1° unità o ORIZZONTE A (arancio puntinato grosso in sezione, Figura 82 e Figura 86)= detrito prevalentemente a grana grossa, per lo più ghiaioso, che verso il basso può mostrare localmente intercalazioni di livelli più limosi. Lo spessore di tale unità è variabile tra i 2 e i 10 m, in genere aumenta da monte verso valle e da ovest verso est. L'unità corrisponde al livello A, individuato nella relazione di *Geologia Applicata Studio Associato (2018)* [20];

2° unità o ORIZZONTE B (verde lineato in sezione, Figura 82 e Figura 86)= detrito con importante componente a grana fine, in cui si osserva la predominanza della componente limosa (i depositi sono classificati come: limi sabbiosi, sabbie

limose, ma anche ghiaie con matrice argillosa). Lo spessore di tale unità è variabile tra i 4 e i 7 m, con generale incremento verso est. L'unità corrisponde al livello B, individuato nella relazione di *Geologia Applicata Studio Associato (2018)* [20];

3° unità o ORIZZONTE C (giallo puntinato grossolano in sezione, Figura 82 e Figura 86)= detrito a prevalente grana grossa (ghiaie e sabbie). Lo spessore di tale unità è variabile fra i 3 e i 5 m ed in alcuni sondaggi non è stato riconosciuto, poiché si può facilmente confondere con la sottostante fascia di alterazione del substrato gessoso. Si rileva nella porzione più orientale (e nei sondaggi più a valle). L'unità corrisponde al livello C, individuato nella relazione di *Geologia Applicata Studio Associato (2018)* [20];

Unità del substrato roccioso:

4° unità o SUBSTRATO ALTERATO (FACIES LIMOSO-ARGILLOSA) (rosa lineato in sezione, Figura 82 e Figura 86)= si è riconosciuta una porzione più superficiale del substrato alterato caratterizzato da materiale fine come limi, argille e sabbie limoso-argillose, che possono ospitare localmente granuli più grossolani. Lo spessore di tale unità è variabile tra i 5 e i 16 m, aumentando progressivamente da ovest verso est in prossimità della fascia cataclastica che interessa il substrato;

5° unità o SUBSTRATO ALTERATO (FACIES GROSSOLANA E/O FRATTURATA) (rosa puntinato grossolano in sezione, Figura 82 e Figura 86)= porzione di substrato alterato caratterizzato da materiale grossolano (brecce) e/o rocce intensamente fratturate. Lo spessore è variabile: spesso dai sondaggi non si osserva un vero e proprio substrato intonso, nei sondaggi in cui si rileva qualcosa di simile alla roccia madre parzialmente intatta gli spessori di questa unità variano tra 8 e 20 m. La differenza tra questo orizzonte ed il substrato talvolta risiede nel grado di fratturazione stesso. Non esiste, pertanto, un limite netto e definito, ma piuttosto una fascia di graduale transizione. L'unità corrisponde alla porzione più

grossolana e fratturata del livello D, individuato nella relazione di *Geologia Applicata Studio Associato (2018)* [20];

6° unità o SUBSTRATO CON IMPORTANTE COMPONENTE EVAPORITICA (viola con campitura stratificata in sezione, Figura 82 e Figura 86)= per quanto riguarda il settore che comprende il vecchio tracciato ferroviario e la porzione di valle ovvero dove sono stati fatti i sondaggi, è difficile rilevare, come già accennato, un vero e proprio substrato, ma si può intuirne la natura. Dai sondaggi del 1986 riportati nella relazione di *Fenti (1987)* [16] il substrato appare costituito da rocce che presentano sia una componente carbonatica che evaporitica (come evidenziato anche dalle classificazioni riportate nella relazione dello *Studio Galli (2012)* [45], cfr. al capitolo di inquadramento geologico-strutturale), ma anche buone percentuali di materiale pelitico: nel settore più occidentale dell'area studiata prevale la componente evaporitica (si osservano gessi e gessi calcarei marnosi), mentre in quello orientale quella carbonatica e pelitica (sono presenti calcari marnoso gessiferi e calcari marnosi). L'importante presenza dei minerali solfatici (sia gesso che anidrite), la quale non esclude la possibilità di rilevare nelle stesse rocce anche quelli carbonatici (come riportato nell'articolo di *Abu Seif (2014)* [1]), suggerisce di attribuire tali litologie alla Formazione di Travenanzes. L'unità corrisponde al livello E, individuato nella relazione di *Geologia Applicata Studio Associato (2018)* [20];

7° unità o SUBSTRATO CARBONATICO (azzurro con campitura stratificata in sezione, Figura 82 e Figura 86)= tale tipologia di substrato non è stata rilevata attraverso i sondaggi, ma viene identificata ed attribuita in base alla letteratura ed al contesto geologico strutturale alla Dolomia Cassiana o alla Formazione di Heiligkreuz. Infatti, secondo quanto riportato nella carta geologica riportata nella relazione dell'*Università degli Studi di Padova del 2003* (Figura 6) [53] e dalle evidenze riscontrate sul Dosso di Damos, dove la Dolomia Cassiana e la Formazione di Heiligkreuz più antiche sono strutturalmente superiori alla Formazione di Travenanzes più recente, è presente un sovrascorrimento che taglia

il versante poco a monte dell'ex ferrovia e porta le formazioni calcareo-dolomitiche al di sopra delle rocce raibliane.

5.2.2 Sezioni geologiche riassuntive

Al fine di riassumere ciò che è stato esposto precedentemente in termini di entità ed unità geologiche presenti e delle loro geometrie, sono state realizzate due sezioni: una longitudinale al versante ed una trasversale come riportato nella planimetria di Figura 78. Esse hanno lo scopo di rappresentare graficamente il modello geologico concettuale del versante in studio, ottenuto dall'integrazione dei risultati delle indagini geofisiche e dei sondaggi geognostici (le interpretazioni di questi ultimi sono riportate in allegato).

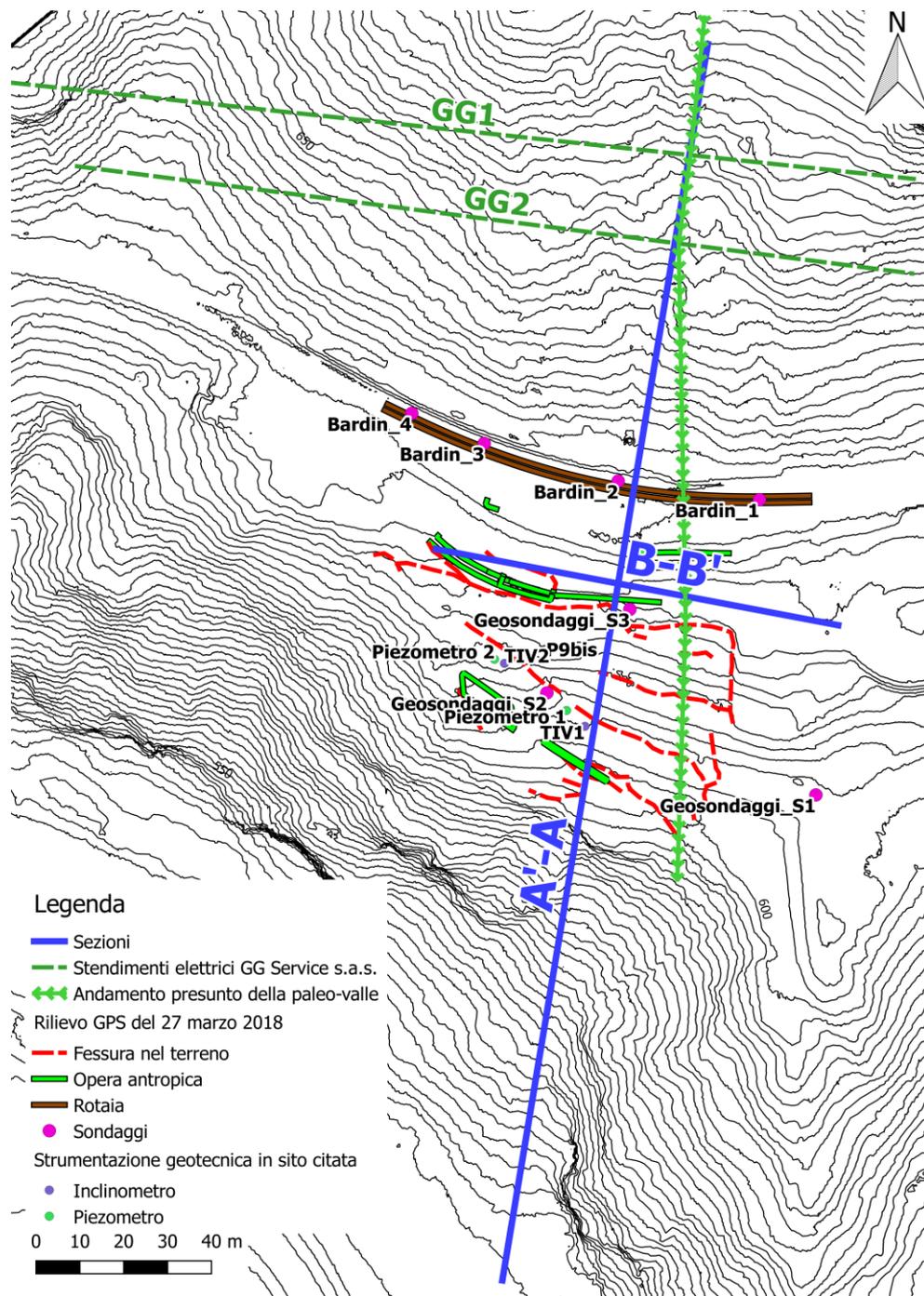


Figura 78 Disposizione planimetrica delle sezioni geologiche A-A' e B-B', realizzate al fine di rappresentare il modello geologico concettuale del versante in studio. Viene riportato anche l'andamento presunto della paleo valle, l'ubicazione di alcuni sondaggi realizzati nel corso degli anni, della strumentazione geotecnica in sito (riportata nella relazione illustrativa di Peretti [32]) e degli stendimenti elettrici di GG Service s.a.s. del 2018. Le curve di livello sono ottenute dal DTM, prodotto dal rilievo Lidar eseguito nel 2018 per conto dell'Università di Padova. Inoltre, sono riportati anche i prodotti del rilievo GPS del 27 marzo 2018, commissionato dalla stessa Università.

La sezione longitudinale al versante A-A' è stata realizzata tenendo particolarmente in considerazione i risultati del sondaggio S3 di *Geosondaggi S.p.a. del 2003* [22] e del sondaggio 2 dell'*Impresa Romolo Bardin S.p.a. del 1986*, descritto da *Fenti (1987)* [16], poiché prossimi alla sezione (come riportato in Figura 78). Inoltre, sono tenuti in considerazione i risultati delle indagini geoelettriche eseguite nel 2018 da *GG Service s.a.s.* ([20], allegato 1) che intersecano la sezione in esame (Figura 78). Lungo la sezione sono riportate, dunque, le intersezioni con gli stendimenti geoelettrici e le proiezioni dei sondaggi geognostici considerati, i quali, essendo molto vicini alla sezione in esame, sono considerati come indicativi della stratigrafia nel punto di proiezione sulla sezione (Figura 82). Per quanto riguarda i sondaggi geognostici, la suddivisione del sondaggio S3 di *Geosondaggi S.p.a. del 2003* [21] (chiamato "Geosondaggi S3" in sezione Figura 82 ed in planimetria Figura 78) è già stata riportata nel capitolo riassuntivo delle indagini eseguite nel corso degli anni sul versante, di seguito si richiama detta suddivisione (Figura 79) e si riporta quella relativa al sondaggio 2 dell'*Impresa Romolo Bardin S.p.a. del 1986* allegata alla relazione di *Fenti (1987)* [16] (in Figura 80, chiamato "Bardin 2" in sezione Figura 82 ed in planimetria Figura 78). Invece, in merito ai risultati delle indagini geoelettriche citate in precedenza sono state utilizzate le sezioni geologiche interpretative riportate in allegato alla relazione di *Geologia Applicata Studio Associato (2018)* [20]. Tali profili geologici sono riportati in Figura 81, in cui vengono riconosciute le unità sopra-descritte e viene tracciata l'intersezione con la sezione A-A' in esame (traccia rossa). La sezione n°8 rappresenta l'interpretazione geologica della sezione di resistività GG1 (più a monte), mentre nella sezione n°4 è rappresentata la sezione geoelettrica GG2 di valle.

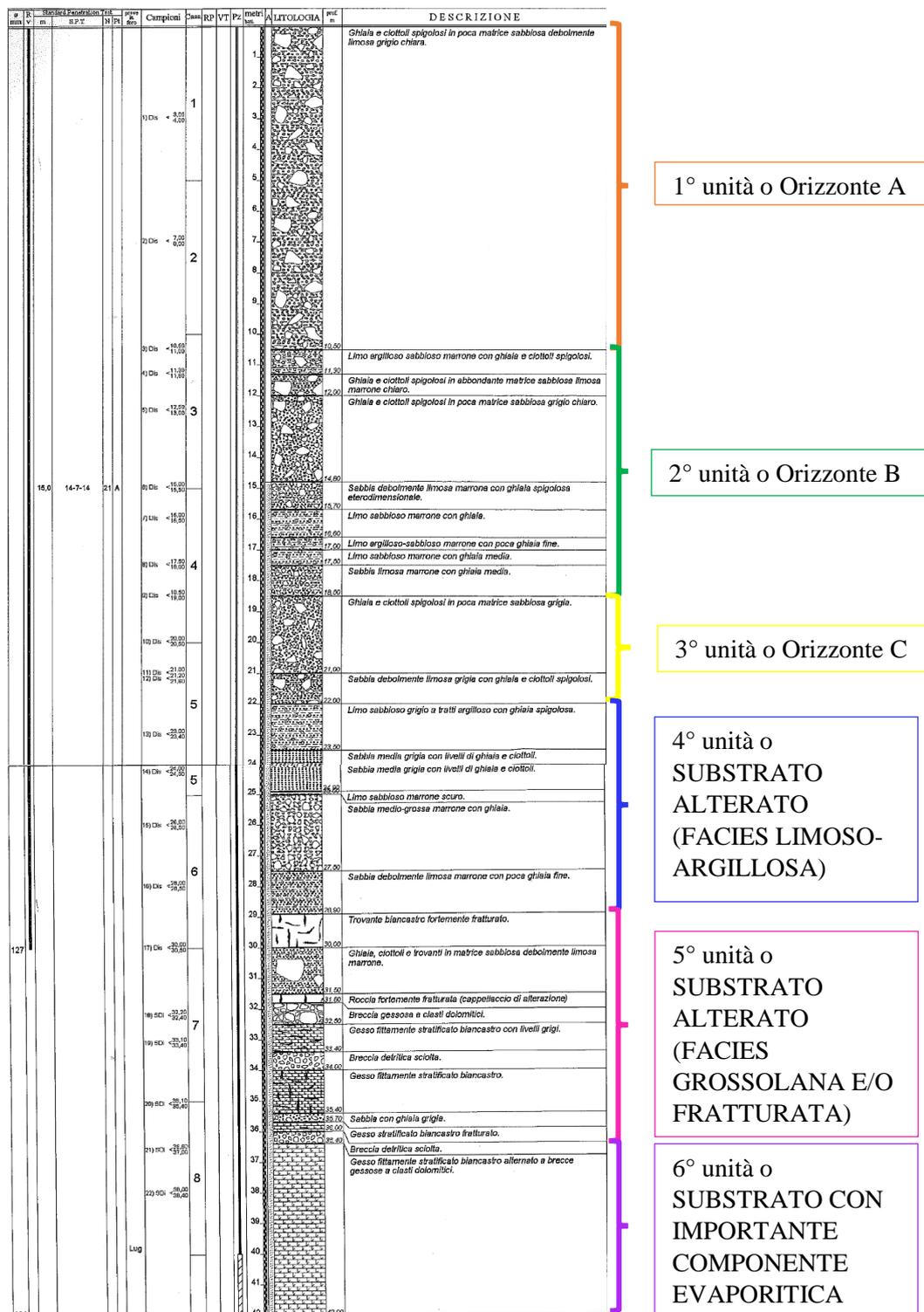


Figura 79 Stratigrafia del sondaggio S3 del settembre-ottobre 2003, realizzato da Geosondaggi S.p.a., e suddiviso in unità geologiche relativamente omogenee descritte nel testo. Sondaggio riportato nella relazione "Indagini geognostiche, geotecniche e geofisiche propedeutiche al progetto di consolidamento di versanti in frana, interventi in alveo e ripristino viabilità. Indagine geognostica. Prove di laboratorio", Geosondaggi S.p.a. (2003) [21].

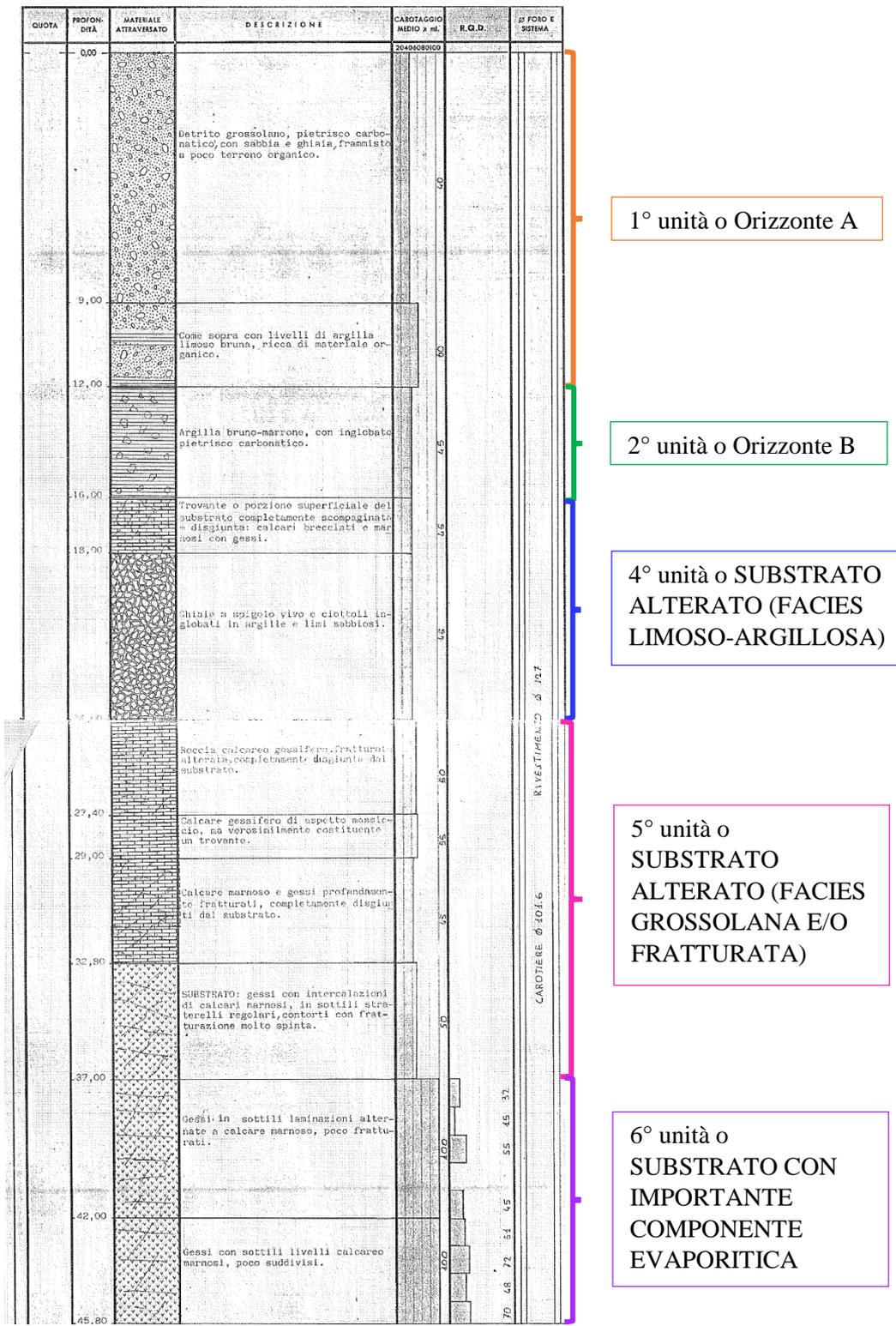


Figura 80 Stratigrafia del sondaggio 2 dell'agosto 1986, realizzato dall'Impresa Romolo Bardin S.p.a., e suddiviso in unità geologiche relativamente omogenee descritte nel testo. Sondaggio riportato come allegato alla "Relazione geologica su n. 4 sondaggi eseguiti in località Busa del Cristo nel comune di Perarolo (Provincia di Belluno)", geol. V. Fenti (1987) [16].

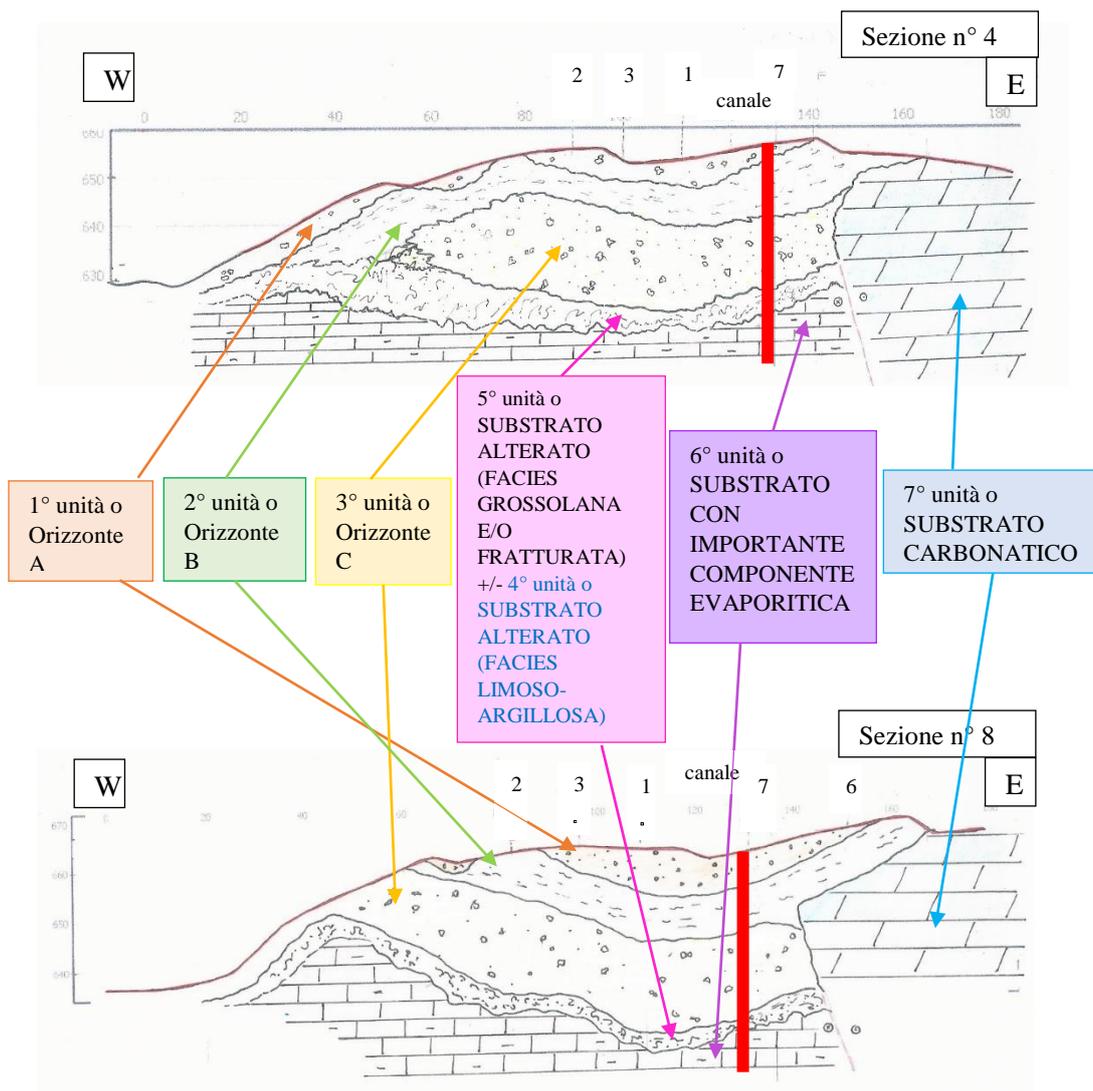


Figura 81 Sezioni geologiche interpretative delle indagini geoelettriche di GG Service s.a.s. del 2018 ([20], allegato 1), le sezioni sono riportate in allegato alla “Relazione geologica e idrogeologica sulle indagini, caratterizzazione e modellazione geologica del sito” a supporto della “Progettazione geologica, geotecnica, geoidrologica, e strutturale delle opere in terra e roccia e dei sistemi complessivamente finalizzati alla messa in sicurezza della frana denominata “Busa del Cristo” sita nel Comune di Valle di Cadore e di Perarolo (Belluno), nell’ambito della proprietà ferroviaria RFI S.p.A.”, Geologia Applicata Studio Associato (2018) [20]. I numeri riportati lungo il profilo indicano i punti di intersezione con altre sezioni dello stesso lavoro, mentre sono evidenziate le unità descritte nel testo e riconosciute in sezione. L’intersezione con la sezione A-A’ in esame è rappresentata dalla linea rossa. La sezione geologica n°4 corrisponde all’interpretazione della sezione geoelettrica di resistività GG-E2, mentre la sezione n°8 è l’interpretazione geologica delle misure di resistività dello stendimento GG-E1.

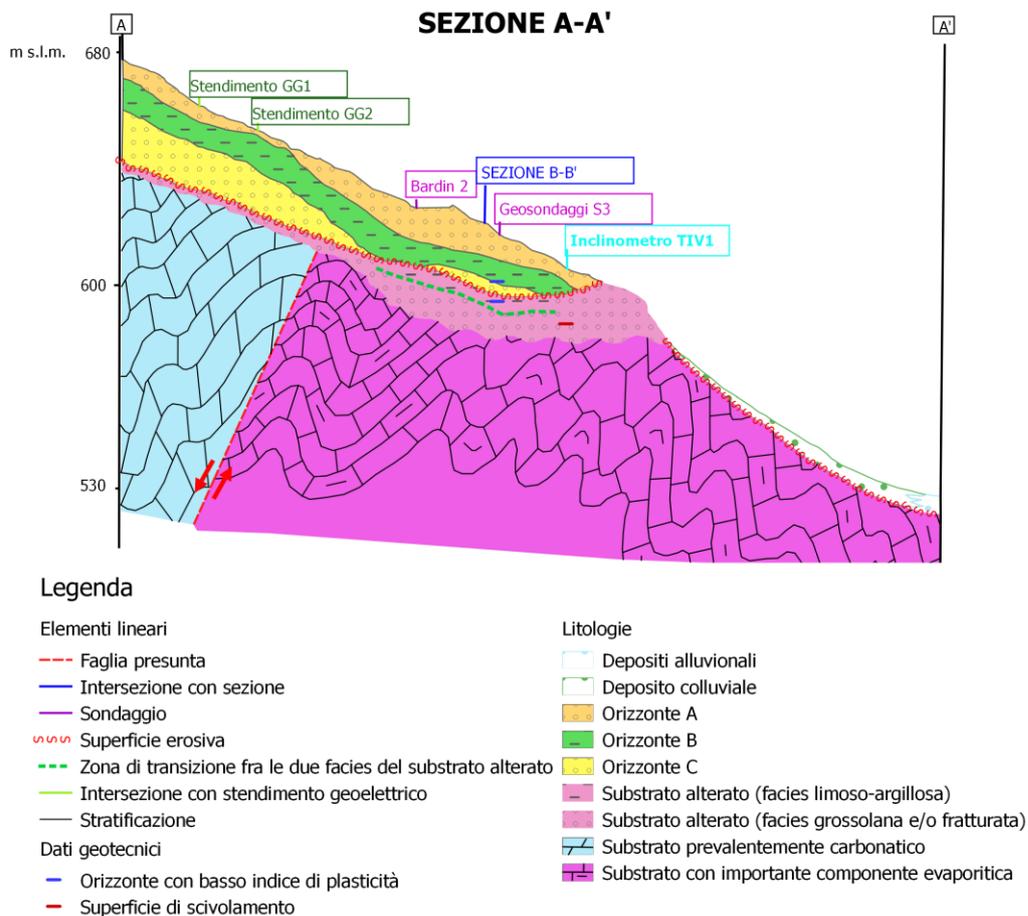


Figura 82 Sezione longitudinale al versante in studio A-A', realizzata dallo scrivente tenendo conto dei risultati dei sondaggi geognostici e degli stendimenti geoelettrici richiamati.

I dati ricavati dalle diverse indagini prese in considerazione vengono accorpati e riassunti in Figura 82, dove si possono notare alcune caratteristiche significative, quali:

- 1) la presenza della copertura detritica caratterizzata da spessori delle diverse unità che variano da monte a valle e che sembrano costituire il materiale di riempimento di una paleo-valle. Come si intuisce dalla planimetria in Figura 78, la sezione inizialmente segue con andamento parallelo la paleo-incisione; successivamente l'andamento della paleo-valle si discosta dalla sezione stessa come testimoniato anche dalla riduzione dello spessore della

copertura detritica di riempimento e dalla locale scomparsa di alcune unità (come nel caso del sondaggio 2 dell'Impresa Romolo Bardin S.p.a. allegato alla relazione di Fenti (1987) [16] e riportato in Figura 80,



dove non si riscontra la 3° unità ovvero l'Orizzonte C). Il limite fra la copertura detritica e la porzione

Figura 83 Porzione alterata del substrato gessoso affiorante all'interno delle fessure sul corpo di frana a quota 600 m s.l.m. circa. Foto dello scrivente del 24/05/2018.

del substrato alterato viene posta intorno a quota 602 m s.l.m., a causa del leggero cambio morfologico di pendenza, ma soprattutto per il rilevamento di materiale gessoso alterato all'interno delle fratture intorno alla quota 600 m s.l.m. (Figura 83);

- 2) la porzione di substrato alterato (4° e 5° unità) aumenta progressivamente di spessore da monte verso valle e viene rilevata a monte dell'orlo di scarpata di degradazione, come affermato nel punto precedente e mostrato in Figura 83. La facies di alterazione limoso-argillosa (4° unità) è stata riconosciuta sia nel sondaggio S3 di *Geosondaggi S.p.a.* (2003, Figura 79, [21]), che nel sondaggio 2 dell'Impresa Romolo Bardin S.p.a. (1986, Figura 80, Fenti (1987), [16]);

- 3) il substrato della porzione di valle è costituito da rocce con importante componente evaporitica e che possono essere, quindi, attribuite alla Formazione di Travenanzes (6° unità). Tali litologie, essendo molto duttili e facilmente deformabili, sono state rappresentate con



Figura 84 Affioramento del substrato roccioso con importante componente evaporitica (6° unità, ovvero Formazione di Travenanzes) a valle e ad occidente della scarpata di degradazione di Sant'Andrea. Foto dello scrivente del 24/05/2018.

una struttura anticlinale, per la presenza nella zona dell'Anticlinale del Cidolo (cfr. al capitolo di inquadramento geologico-strutturale, [17]). La deformazione diffusa ed intensa avviene altresì a scale più piccole, come testimoniato dall'affioramento a valle e a occidente della scarpata di degradazione di Sant'Andrea (Figura 84), così vengono raffigurate una serie di pieghe parassite impostate sull'Anticlinale del Cidolo, la quale si sviluppa a scala più grande. Infine, nella porzione di monte si localizza il presunto sovrascorrimento già menzionato, per evidenziare il ruolo del quale si sono rappresentate le formazioni carbonatiche e dolomitiche più antiche (7° unità) sopra i gessi e i calcari gessiferi raibliani (6° unità). Tale scelta è anche avvalorata dalla presenza di una disposizione strutturale simile nella porzione più integra del versante corrispondente al Dosso di Damos [53] e distante poche decine di metri dalla sezione in esame.

Nella sezione A-A' (Figura 82) vengono inoltre riportate le profondità in cui vengono rilevati gli orizzonti con basso indice di plasticità ottenuti dalle prove di laboratorio sui campioni prelevati dal sondaggio S3 di *Geosondaggi S.p.a (2003)* [21] e identificate nel capitolo sulle indagini geofisiche e geognostiche (Tabella 1 riassuntiva parametri geotecnici). Inoltre, si rappresenta anche la profondità della netta superficie di scivolamento mostrata evidenziata nelle deformate dell'inclinometro TIV1, richiamate nel capitolo già menzionato e riportate nella relazione illustrativa di *Peretti (2006)* [32].

La sezione trasversale al versante B-B' è posizionata poco a monte del cordolo di cemento tirantato del 1992 ed è prossima solamente al sondaggio S3 di *Geosondaggi S.p.a. (2003)* [21] (Figura 79). Essa però si dispone a valle e quasi parallelamente alla linea su cui si sono distribuiti i sondaggi del 1986 [16] permettendo, dunque, di ricavare importanti informazioni geometriche dagli

stessi. Viene, dunque, riproposta la sezione realizzata da *Fenti (1987)* [16] che interpola i dati delle rispettive quattro stratigrafie (Figura 85).

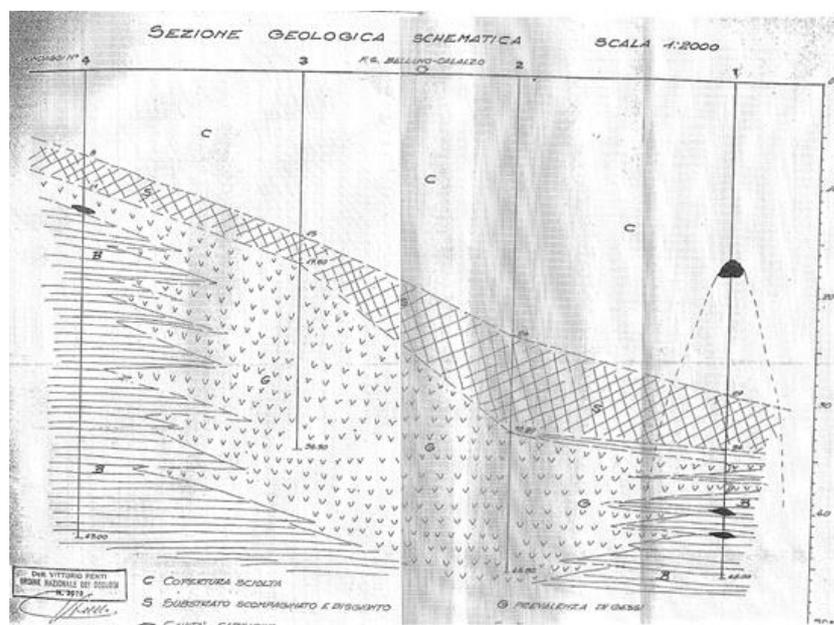


Figura 85 Sezione geologica interpretativa dei sondaggi geognostici realizzati nell'agosto 1986 e orientata trasversalmente al versante in frana (legenda: C= copertura sciolta, S=substrato scompaginato e disgiunto, G= substrato prevalentemente gessoso, B=substrato prevalentemente calcareo marnoso, forme nere= cavità carsiche substrato- o di cedimento -coperture-), riportata nella "Relazione geologica su n. 4 sondaggi eseguiti in località Busa del Cristo nel comune di Perarolo (Provincia di Belluno)", geol. V. Fenti (1987)[16].

Si propone, infine, la sezione B-B' in Figura 86.

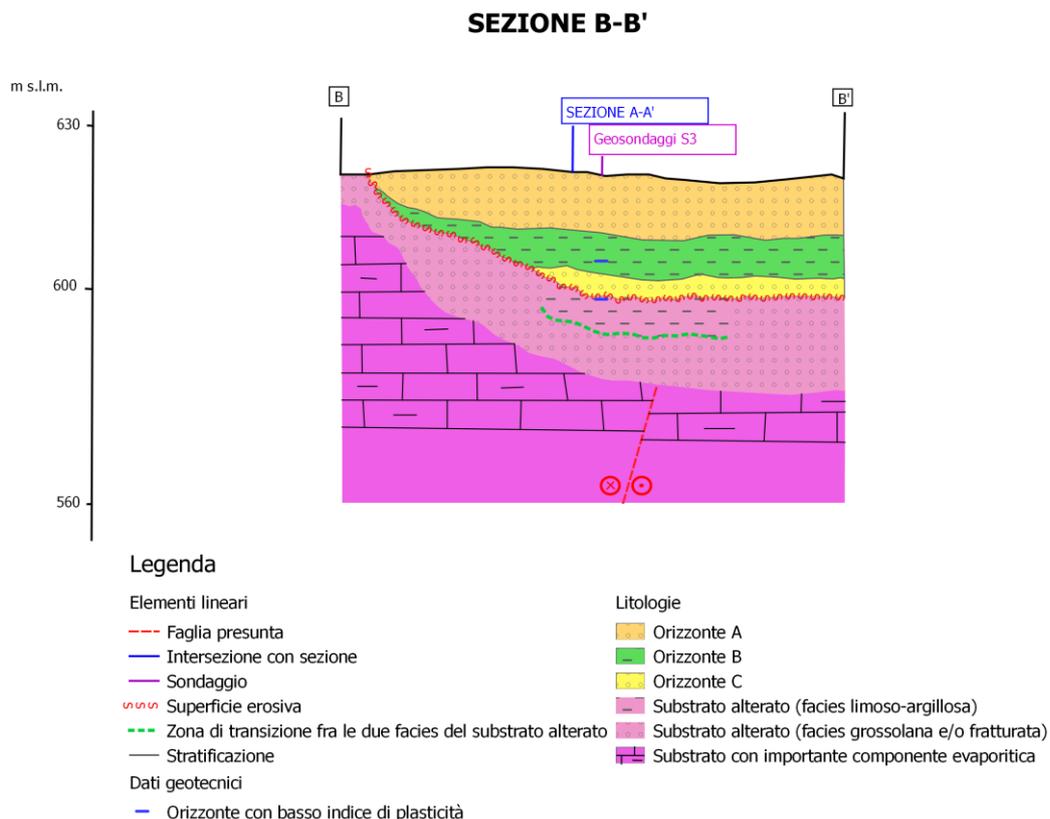


Figura 86 Sezione trasversale al versante in studio B-B', realizzata dallo scrivente tenendo conto dei risultati dei sondaggi geognostici e dei dati disponibili dalle indagini eseguite nell'area.

Si osserva:

- 1) la presenza della copertura detritica di riempimento della paleo-valle, in cui si riconoscono le diverse unità (1°, 2° e 3°) i cui spessori aumentano progressivamente da ovest verso est (come evidenziato in Figura 85 e dalle indagini sismiche, cfr. al capitolo sulle indagini geofisiche e geognostiche). Nella porzione più occidentale della sezione si presume che la copertura detritica sia sostituita dalla porzione superficiale alterata del substrato;
- 2) il substrato alterato (4° e 5° unità) si rappresenta lungo tutta la sezione con un incremento di spessore da ovest verso est (come evidenziato in Figura 85 e dalle indagini sismiche, cfr. al capitolo sulle indagini geofisiche e

geognostiche). Inoltre, la facies limoso-argillosa (4° unità) viene limitata all'intorno del sondaggio S3 di *Geosondaggi S.p.a. (2003)* [21], dove si è effettivamente rilevata (Figura 79);

- 3) data l'ubicazione della sezione a valle rispetto al presunto sovrascorrimento [53], il substrato roccioso è rappresentato esclusivamente dalla 6° unità, i cui strati appaiono orizzontali, poiché la sezione si pone quasi parallela all'asse dell'Anticlinale del Cidolo (Figura 9) [17]. In più, è rappresentata una presunta faglia trascorrente destra la quale in pianta ha orientazione N-S e che sembra controllare strutturalmente la paleo-valle (secondo quanto esposto nel paragrafo sui risultati delle indagini sismiche, la presenza di fasce cataclastiche concentrerebbe il processo erosivo dell'acqua e, quindi, l'incisione dei versanti, cfr. al paragrafo sulle indagini sismiche). Si specifica come a oriente di tale faglia ovvero dove non si hanno direttamente sondaggi disponibili si attribuiscono le rocce che costituiscono il substrato egualmente alla 6° unità per tre motivi: a) il sondaggio più orientale disponibile (ovvero S1 di *Geosondaggi S.p.a. del 2003*, in allegato [21]) non rileva il substrato roccioso ma permette egualmente di riconoscere una porzione di alterazione costituita anche da materiale gessoso, b) in Figura 85, sebbene nel settore più orientale sia rappresentato un substrato prevalentemente calcareo marnoso, esso è raffigurato come eteropico alla porzione più gessosa, essendo, infatti, riscontrabili nel medesimo ambiente deposizionale (come già affermato); c) in alcuni documenti tecnici ([39], [51]) si riconosce come la responsabilità dei dissesti e dell'instabilità che coinvolge l'abitato di Costa sia in parte dovuta alla dissoluzione di lenti o orizzonti di gesso che caratterizzano il substrato del versante, ad indicare come la dorsale che separa l'abitato di Costa dal corpo di frana di Sant'Andrea sia costituita da litologie tipiche della Formazione di Travenanzes.

Si rappresentano anche nella sezione B-B' (Figura 86) le profondità in cui vengono rilevati gli orizzonti con basso indice di plasticità ottenuti dalle prove di laboratorio sui campioni prelevati dal sondaggio S3 di *Geosondaggi S.p.a. (2003)*

[21] e identificate nel capitolo sulle indagini geofisiche e geognostiche (Tabella 1).

5.2.3 Considerazioni riassuntive

Per concludere si può descrivere il modello geologico concettuale del versante studiato come quello di una paleo-valle con asse N-S riempita da depositi con composizioni e geometrie estremamente variabili. Il substrato nell'area in frana è costituito dalle rocce della Formazione di Travenanzes e mostra due facies di alterazione (limoso-argillosa e grossolana e/o fratturata) in funzione dell'intensità con cui il processo chimico-fisico ha agito.

Dai dati inclinometrici, che mostrano deformazioni importanti a profondità minori di 30 m dal piano campagna (cfr. al capitolo sulle indagini geofisiche e geognostiche, paragrafo sulle sonde inclinometriche), si individua un corpo di frana costituito dalle prime cinque unità sopraelencate ed, in particolare, come specificato nella relazione di *Geologia Applicata Studio Associato (2018)* [20], le zone di alterazione del substrato possono essere considerate quelle su cui si innesta il movimento [20]. Infine, si riconosce il controllo strutturale esercitato da alcune faglie presunte sulla morfologia del substrato, in particolare sulla paleo-forma valliva.

5.3 Modello idrogeologico del versante

Una volta definito il modello geologico concettuale del versante è possibile individuare alcune caratteristiche idrogeologiche dello stesso al fine di evidenziare il ruolo che l'acqua svolge sull'instabilità della frana di Sant'Andrea.

5.3.1 Permeabilità delle unità del modello geologico concettuale

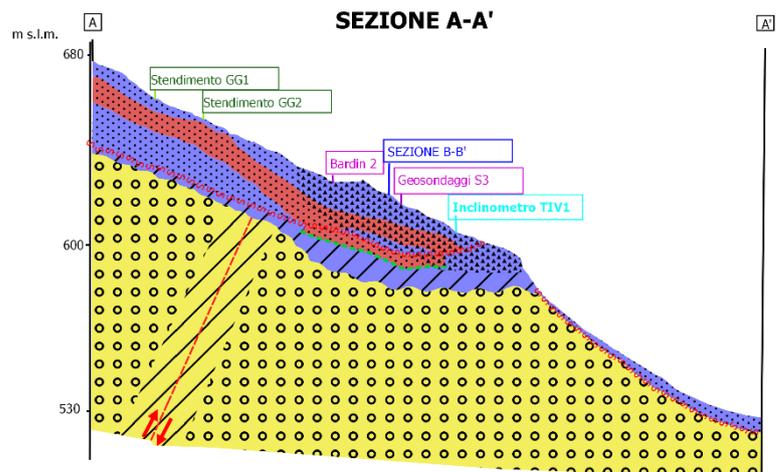
Dalle caratteristiche composizionali delle diverse unità geologiche sopradescritte, è possibile ricavare indicativamente le principali proprietà idrogeologiche delle stesse, in particolare, in termini di permeabilità. L'analisi qui riportata non prevede la definizione del valore numerico del parametro "permeabilità" per ciascuna unità, ma piuttosto il riconoscimento di contrasti di permeabilità fra i diversi orizzonti. Si indicano come "permeabili" quelle unità la cui composizione suggerisce un comportamento idrodinamico più permeabile rispetto alle unità circostanti, mentre si chiamano "poco permeabili" quegli orizzonti che mostrano caratteri meno permeabili rispetto a quelli limitrofi. Si definiscono, perciò, le seguenti caratteristiche idrogeologiche delle diverse unità:

- 1° unità o Orizzonte A= 'permeabile' (permeabilità di 1°);
- 2° unità o Orizzonte B= 'poco permeabile' (permeabilità di 1° tipo);
- 3° unità o Orizzonte C= 'permeabile' (permeabilità di 1° tipo);
- 4° unità o SUBSTRATO ALTERATO (FACIES LIMOSO-ARGILLOSA)= 'poco permeabile' (permeabilità di 1° tipo);
- 5° unità o SUBSTRATO ALTERATO (FACIES GROSSOLANA E/O FRATTURATA)= 'permeabile' (permeabilità di 1° o 2° tipo);
- 6° unità o SUBSTRATO CON IMPORTANTE COMPONENTE EVAPORITICA= 'permeabilità variabile' in funzione del grado di fratturazione (permeabilità di 2° tipo) e di dissoluzione dei solfati (permeabilità di 3° tipo), in genere diminuisce con la profondità;
- 7° unità o SUBSTRATO CARBONATICO= 'permeabilità variabile' in funzione del grado di fratturazione (permeabilità di 2° tipo) e di dissoluzione dei carbonati (permeabilità di 3° tipo), in genere diminuisce con la profondità.

Va precisato che le unità più superficiali possono essere localmente caratterizzate anche da una permeabilità di 4° tipo (cfr. al paragrafo di inquadramento

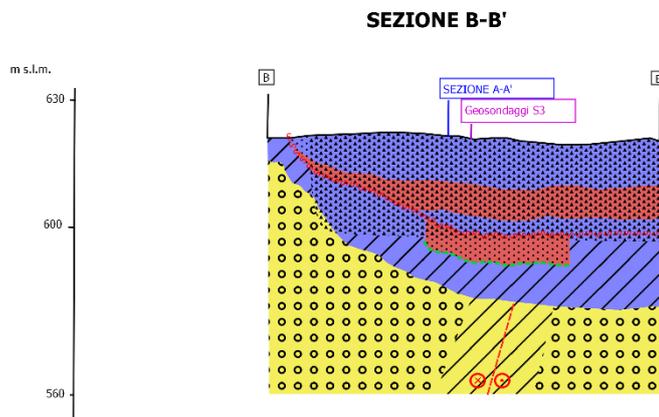
idrogeologico ed al capitolo sulla frana di Sant'Andrea) in corrispondenza delle zone soggette agli interventi antropici dei primi anni 2000.

Si rappresentano le sezioni geologiche riassuntive, descritte nei paragrafi precedenti, in cui al posto delle caratteristiche composizionali di ciascuna unità ne viene rappresentato il comportamento idrodinamico relativo alle unità limitrofe ('permeabile', 'poco permeabile' e 'permeabilità variabile') ed il tipo di permeabilità naturale dominante (1°, 2° o 3°), definito nell'elenco sopra (Figura 87). Per quanto riguarda la permeabilità "artificiale" di 4° tipo, essa si sovrappone a quella naturale in quella porzione più superficiale del versante compresa all'incirca fra il muro di contenimento a tergo del vecchio tracciato ferroviario e la scarpata di degradazione.



Legenda

| Elementi lineari | Comportamento idrodinamico | Tipo di permeabilità |
|--|----------------------------|----------------------|
| --- Faglia presunta | ■ poco permeabile | □ 1° |
| — Intersezione con sezione | ■ permeabile | □ 2° |
| — Sondaggio | ■ permeabilità variabile | □ 3° |
| ~ Superficie erosiva | | □ 4° |
| - - - Zona di transizione fra le due facies del substrato alterato | | |
| — Intersezione con stendimento geoelettrico | | |



Legenda

| Elementi lineari | Comportamento idrodinamico | Tipo di permeabilità |
|--|----------------------------|----------------------|
| --- Faglia presunta | ■ poco permeabile | □ 1° |
| — Intersezione con sezione | ■ permeabile | □ 2° |
| — Sondaggio | ■ permeabilità variabile | □ 3° |
| ~ Superficie erosiva | | □ 4° |
| - - - Zona di transizione fra le due facies del substrato alterato | | |

Figura 87 Sezioni di permeabilità A-A'(in alto) e B-B' (in basso). Esse replicano le sezioni litologico-deposizionali A-A' e B-B' precedentemente analizzate, in cui al posto delle litologie/depositi delle diverse unità geologiche è rappresentato il parametro "contrasto di permeabilità" e viene effettuata una distinzione in termini della tipologia di permeabilità dominante come descritto nel testo.

5.3.2 Bacino idrografico e bacino idrogeologico

Nella relazione di *Geologia Applicata Studio Associato (2018)* [20] viene riscontrata una differenza fra l'estensione areale del bacino idrografico e quella del bacino idrogeologico (Figura 88). Quest'ultimo è stato riconosciuto anche grazie ai risultati delle indagini geoelettriche commissionate dallo Studio stesso [20] (Figura 89). Si nota, infatti, come la presenza di orizzonti meno permeabili di quelli circostanti induce l'acqua a scorrere sul tetto di questi (come è il caso dell'Orizzonte B più impermeabile del soprastante Orizzonte A), la cui disposizione areale determina la differenza fra il bacino idrogeologico e quello idrografico (Figura 89).

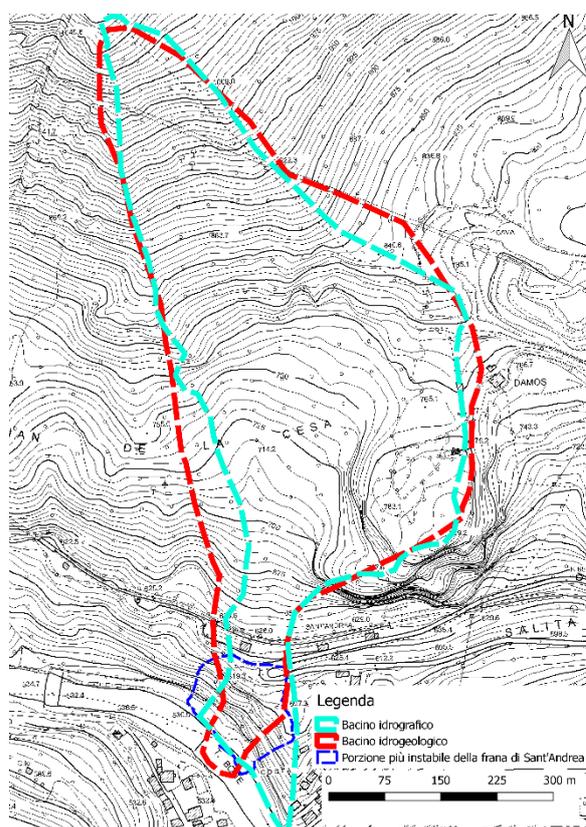


Figura 88 Differenza fra bacino idrografico (perimetro azzurro) e bacino idrogeologico (perimetro rosso). Perimetrazione estratta dall'immagine riportata nella "Relazione geologica e idrogeologica sulle indagini, caratterizzazione e modellazione geologica del sito" a supporto della "Progettazione geologica, geotecnica, geoidrologica, e strutturale delle opere in terra e roccia e dei sistemi complessivamente finalizzati alla messa in sicurezza della frana denominata "Busa del Cristo" sita nel Comune di Valle di Cadore e di Perarolo (Belluno), nell'ambito della proprietà ferroviaria RFI S.p.A.", *Geologia Applicata Studio Associato (2018)* [20].

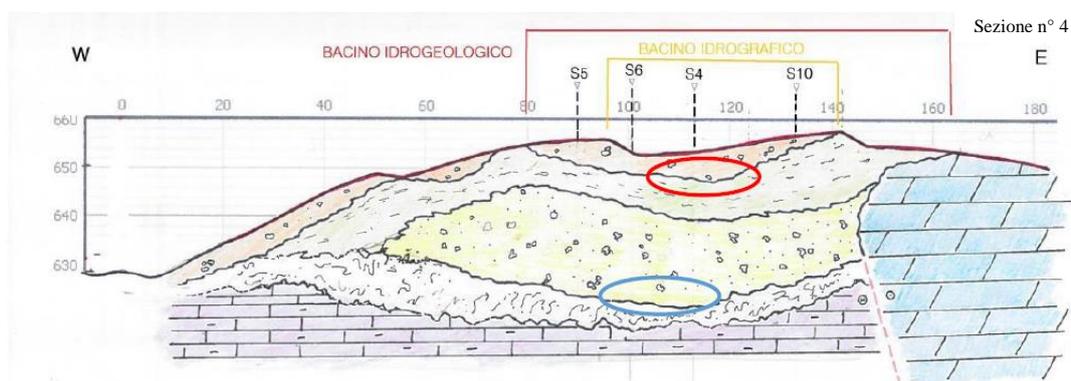


Figura 89 Sezione geologica (modificata) interpretativa delle indagini geoelettriche GG-E2 di GG Service s.a.s. del 2018, riportata “Relazione geologica e idrogeologica sulle indagini, caratterizzazione e modellazione geologica del sito” a supporto della “Progettazione geologica, geotecnica, geoidrologica, e strutturale delle opere in terra e roccia e dei sistemi complessivamente finalizzati alla messa in sicurezza della frana denominata “Busa del Cristo” sita nel Comune di Valle di Cadore e di Perarolo (Belluno), nell’ambito della proprietà ferroviaria RFI S.p.A.”, Geologia Applicata Studio Associato (2018) [20]. Sono evidenziate le posizioni dei punti di massima depressione della paleo-forma valliva all’interfaccia tra gli orizzonti più permeabili e quelli meno permeabili, ovvero dove dovrebbe concentrarsi lo scorrimento idrico (cerchi rosso e azzurro). Si riconosce, inoltre, la differenza fra il bacino idrografico superficiale (giallo) ed il bacino idrogeologico più profondo (rosso).

L’acqua che scorre superficialmente segue, dunque, percorsi diversi da quella che si infila nel sottosuolo [20]. In conclusione, la principale differenza fra i due bacini si esplica con un apporto maggiore di acqua alle spalle del corpo di frana, rispetto a quella che si sarebbe stimata, basandosi solamente sull’osservazione topografica (parte dell’acqua sotterranea è deviata verso la zona in frana attiva dagli orizzonti più impermeabili ed in particolare delle fasce cataclastiche che fungono da vettore di drenaggio delle acque di infiltrazione) [20].

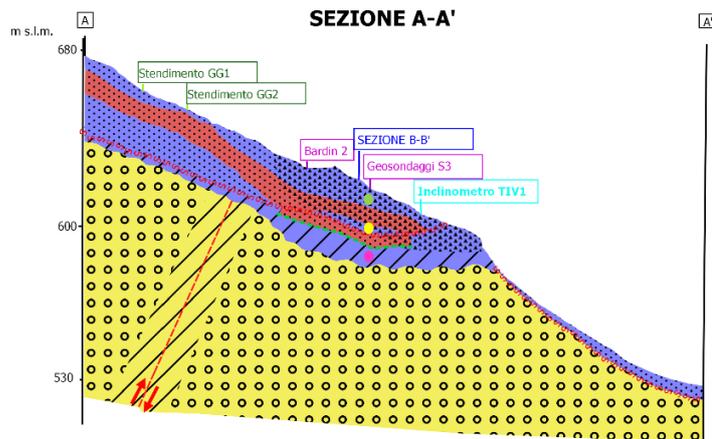
5.3.3 Domini idrogeologici di filtrazione/scorrimento idrico sotterraneo

5.3.3.1 All’interno della copertura detritica

Come affermato nel paragrafo in merito alla discussione dei dati di due piezometri disposti sul corpo di frana, si ipotizza la presenza, piuttosto che di una vera e propria falda acquifera, di domini idrogeologici pensili di filtrazione/scorrimento

idrico sotterraneo all'interno delle diverse unità riconosciute nel modello geologico concettuale del versante (cfr. al capitolo sulle indagini geofisiche e geognostiche, paragrafo sui piezometri). La definizione del comportamento idrodinamico relativo di ciascuna unità geologica rispetto alle limitrofe (Figura 87 e Figura 90) avvalorata l'ipotesi della presenza di più domini di filtrazione/scorrimento, collocati a quote diverse. Tali domini si sviluppano, per lo più, all'interno della copertura detritica lungo interfacce tra orizzonti con marcati contrasti di permeabilità. In particolare, le unità meno permeabili e, quindi, che fungono da sostegno dei domini di circolazione idrica sotterranea, sono la 2° (Orizzonte B= limi sabbiosi, sabbie limose, ma anche ghiaie con matrice argillosa) e la 4° (SUBSTRATO ALTERATO (FACIES LIMOSO-ARGILLOSA)= limi, argille e sabbie limoso-argillose). Esse sono a contatto con i depositi a grana grossolana (ghiaie e sabbie) della 1° unità (Orizzonte A) e della 3° (Orizzonte C), che ospitano i due domini di filtrazione/scorrimento più superficiali evidenziati in Figura 90: il primo (cerchio verde in Figura 90) è collocato a quote più elevate, si sviluppa all'interno dell'Orizzonte A ed è legato al contrasto di permeabilità fra questo orizzonte e l'Orizzonte B sottostante, il secondo (cerchio giallo in Figura 90) è più profondo, si sviluppa all'interno dell'Orizzonte C ed è legato al contrasto di permeabilità con la sottostante facies limoso-argillosa del substrato alterato (4° unità).

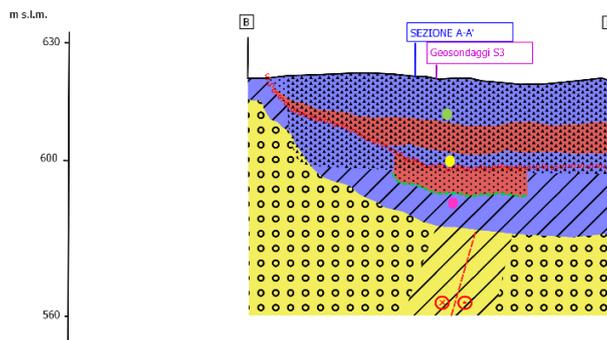
Anche nella relazione di *Geologia Applicata Studio Associato (2018)* [20] si riconosce la presenza di due domini idrogeologici sotterranei (uno poco profondo e l'altro più profondo) insieme a quello superficiale, dovuti alle anisotropie di permeabilità delle diverse unità che costituiscono il sottosuolo del versante.



Legenda

| | | |
|--|-----------------------------------|-----------------------------|
| Elementi lineari | Comportamento idrodinamico | Tipo di permeabilità |
| - - - - - Faglia presunta | ■ poco permeabile | □ 1° |
| — Intersezione con sezione | ■ permeabile | □ 2° |
| — Sondaggio | ■ permeabilità variabile | □ 3° |
| ~ ~ ~ Superficie erosiva | | □ 4° |
| - - - Zona di transizione fra le due facies del substrato alterato | | |
| — Intersezione con stendimento geoelettrico | | |

SEZIONE B-B'



Legenda

| | | |
|--|-----------------------------------|-----------------------------|
| Elementi lineari | Comportamento idrodinamico | Tipo di permeabilità |
| - - - - - Faglia presunta | ■ poco permeabile | □ 1° |
| — Intersezione con sezione | ■ permeabile | □ 2° |
| — Sondaggio | ■ permeabilità variabile | □ 3° |
| ~ ~ ~ Superficie erosiva | | □ 4° |
| - - - Zona di transizione fra le due facies del substrato alterato | | |

| | | |
|---|---|---|
| ● dominio idrogeologico 1 (nella copertura detritica= filtrazione + scorrimento in condotti) | ● dominio idrogeologico 2 (nella copertura detritica= filtrazione + scorrimento in condotti) | ● dominio idrogeologico 3 (nella porzione alterata del substrato= scorrimento in condotti) |
|---|---|---|

Figura 90 Sezioni di permeabilità A-A'(in alto) e B-B' (in basso). Esse replicano le sezioni litologico-deposizionali A-A' e B-B' precedentemente analizzate, in cui al posto delle litologie/depositi delle diverse unità geologiche è rappresentato il parametro "contrasto di permeabilità" e viene effettuata una distinzione in termini della tipologia di permeabilità dominante come descritto nel testo. Sono evidenziate con i cerchi verdi, gialli e fucsia le unità che possibilmente possono ospitare i domini idrogeologici di filtrazione/scorrimento idrico sotterraneo: le prime due relative alla copertura detritica (verde e giallo), mentre l'ultima alla porzione alterata del substrato (fucsia).

Tali domini idrogeologici si possono sviluppare attraverso semplici fenomeni di filtrazione all'interno della porosità del materiale che li ospita oppure attraverso veri e propri condotti, legati al fenomeno di 'piping' e del carsismo dei granuli a composizione gessosa (questi processi sono fra loro correlati come riportato nel capitolo sui fenomeni di dissesto idrogeologico in aree a substrato gessoso).

Quest'ultima tipologia di scorrimento delle acque sotterranee è testimoniata nel documento *"Dati storici e osservazioni del movimento franoso 'Busa del Cristo' a Perarolo di Cadore"* dell'Archivio di Rete Ferroviaria Italiana [43], in cui si riporta l'osservazione nella primavera del 1998 in corrispondenza di evidenti deformazioni del manto stradale del secondo tornante della strada della



Figura 91 Nodo in cemento di congiunzione delle canalette drenanti superficiali con rilevamento di emergenze di acqua dal terreno al di sotto di queste – cerchio rosso-. Foto dello scrivente del 06/04/2018.

Cavallera, in località Sant'Andrea, di una fitta rete di canali sotterranei sub-superficiali: l'acqua infiltratasi da monte asporta la porzione più fine (sabbia, limo e argilla) del materiale di detritico, determinando la formazione di condotti ('piping') il cui vuoto generato all'interno del terreno priva i depositi più superficiali del supporto alla base con conseguenti deformazioni del piano campagna. Espressioni di tale fenomeno ('piping') si sono rilevate anche in campagna, in corrispondenza delle canalette drenanti superficiali a tergo del muro di sostegno del vecchio tracciato ferroviario: i dreni mostrano flussi idrici esigui, mentre l'acqua fuoriesce abbondante da piccole cavità nel terreno poste appena al di sotto delle opere drenanti (Figura 91).

Si specifica, inoltre, come la grande variabilità laterale in termini compositivi e, soprattutto, geometrici possa determinare un'estrema articolazione sia sul piano orizzontale che verticale di questi domini di filtrazione/scorrimento idrico sotterraneo (basti notare la repentina variazione di spessore dell'Orizzonte C nella sezione A-A', Figura 82), rendendone difficile il processo di schematizzazione.

5.3.3.2 Il ruolo del carsismo

In più, a complicare la situazione concorre anche il fenomeno del carsismo, già menzionato, degli elementi gessosi dei depositi di copertura e del substrato roccioso, dove la litologia lo consente (cfr. al capitolo sui fenomeni di dissesto idrogeologico in aree a substrato gessoso). Vi sono evidenze dell'attività del carsismo nella porzione di versante esaminata, in particolare lungo la scarpata di degradazione principale, dove si notano cavità all'interno di quella che dal modello geologico concettuale è stata identificata come la 5° unità ovvero la porzione alterata del substrato roccioso costituita da materiale grossolano e/o fratturato (Figura 83). Tali cavità mostrano fuoriuscite d'acqua in occasione di precipitazioni intense (come rilevato dallo scrivente in campagna nel corso del sopralluogo del 24/05/2018 - Figura 92). Il fenomeno del carsismo coinvolge, dunque, sia la copertura detritica che le unità del substrato roccioso, determinando l'instaurarsi di altri domini di scorrimento idrico sotterraneo più profondi dei due descritti in precedenza (cerchio verde e giallo in Figura 90). In questo caso la circolazione si sviluppa soprattutto attraverso una rete di condotti e cavità.

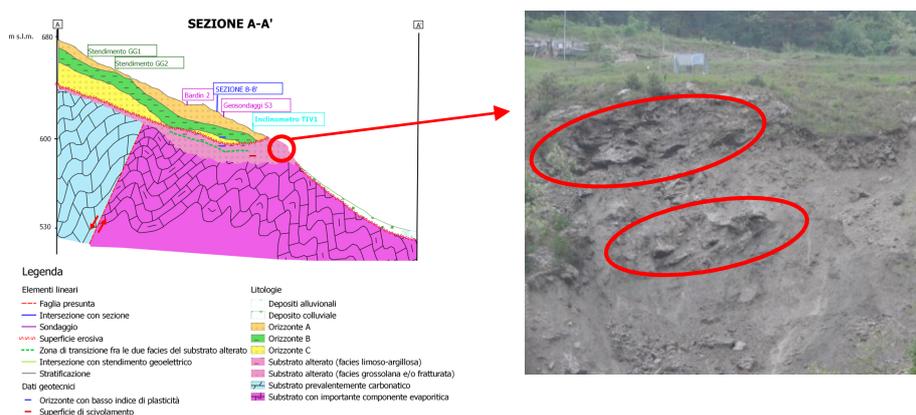


Figura 92 A sinistra identificazione sulla sezione geologica A-A' riassuntiva del modello geologico concettuale proposto delle fuoriuscite d'acqua da cavità rilevate sulla scarpata di degradazione principale. A destra foto dello scrivente del 24/05/2018.

5.3.3.3 Direzione prevalente del drenaggio sotterraneo

Si ripropone, dunque, la carta con il posizionamento planimetrico delle possibili vie preferenziali di filtrazione/scorrimento dell'acqua all'interno del versante individuate attraverso le indagini geoelettriche (cfr. al capitolo sulle indagini geofisiche e geognostiche, paragrafo sulle indagini geoelettriche), a cui sono stati aggiunti due elementi: l'ubicazione delle emergenze d'acqua dalle cavità carsiche di Figura 92 e l'asse della paleo-valle ottenuta dalle indagini geofisiche, dai rilievi in campagna e proposta nel modello geologico concettuale (Figura 93). Si osserva anche in questo caso come siano evidenziati due domini che si sviluppano a diverse profondità (Figura 93 cerchi rossi= profondità minori di 10 m dal piano campagna, cerchi gialli= profondità maggiori di 10 m dal piano campagna). Infine, i punti delle possibili vie di filtrazione/scorrimento ottenuti dalle indagini geofisiche e le fuoriuscite d'acqua sulla scarpata di degradazione sono allineati lungo una direzione circa nord-sud, che ben si raccorda con l'orientazione della paleo-valle. Quindi, si può

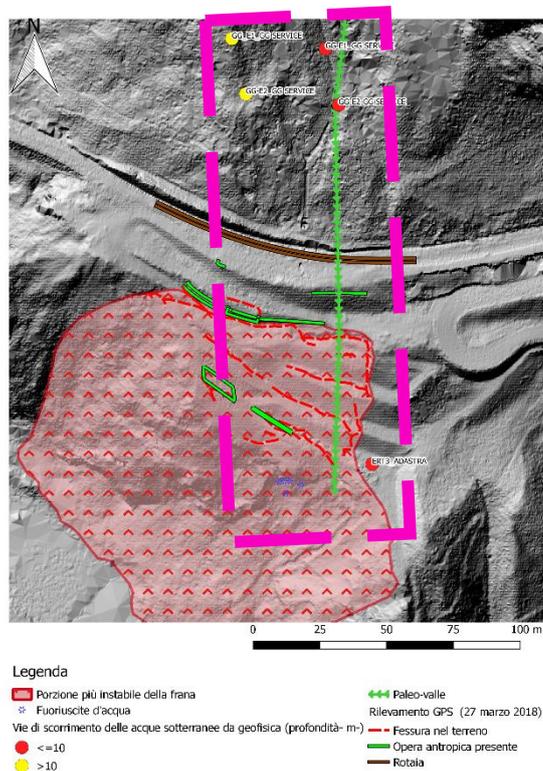


Figura 93 Posizionamento planimetrico indicativo delle possibili vie preferenziali di filtrazione/scorrimento dell'acqua all'interno del versante, individuate attraverso le indagini geoelettriche (di Adastrà s.r.l. [2] e di GG Service s.a.s. ([20], allegato 1). L'etichetta a fianco di ciascun punto riporta l'indagine di riferimento, mentre il colore del punto è funzione della profondità a cui la via preferenziale di filtrazione/scorrimento è collocata), delle emergenze d'acqua rilevate sulla scarpata di degradazione e dell'asse della paleo-valle osservata nelle indagini geofisiche. La base topografica è l'hillshade con le relative curve di livello del DTM, ottenuto dal rilievo Lidar del 2018 per conto dell'Università degli Studi di Padova. Inoltre, sono rappresentati i risultati dei rilievi GPS condotti il 27 marzo 2018, condotti dall'Università stessa.

riconoscere come i domini di circolazione delle acque sotterranee drenino il versante a diverse profondità lungo un asse orientato nord-sud (fascia fucsia in Figura 93).

5.3.4 Considerazioni riassuntive

L'assetto idrogeologico del versante appare, dunque, complesso a causa della grande variabilità laterale composizionale e geometrica dei depositi di copertura e del fenomeno del carsismo diffusamente presente negli orizzonti evaporitici, attivo anche nei materiali detritici oltretché nel substrato roccioso, laddove la litologia lo consente. Si possono, però, elencare alcune caratteristiche principali, che consentono di riassumere in maniera semplice l'idrogeologia del pendio in esame. Si riconoscono:

- 1) due domini di filtrazione/scorrimento idrico sotterraneo (Figura 90, cerchi verde e giallo), guidati da due unità geologiche meno permeabili del modello geologico concettuale (2° unità e 4° unità) e che si sviluppano all'interno dei soprastanti orizzonti più permeabili (1° unità e 3° unità). Tali domini possono avere origine in parte carsica laddove la composizione degli elementi dei depositi di copertura è gessosa. Anche il fenomeno di 'piping' (a volte conseguente al carsismo) può concorrere alla definizione di un reticolo di drenaggio sotterraneo, minando la stabilità meccanica del corpo in cui esso si sviluppa. Al moto di semplice filtrazione attraverso la porosità del materiale si aggiunge, quindi, il flusso dell'acqua lungo condotti;
- 2) si rileva anche all'interno delle porzioni gessifere del substrato (alterato e non: 5° e 6° unità) la possibilità di sviluppo di condotti carsici attraverso i quali può avvenire la circolazione idrica sotterranea (Figura 90, cerchio fucsia);
- 3) la direzione prevalente di drenaggio sotterraneo è orientato nord-sud con emersione in prossimità della scarpata di degradazione principale (come

testimoniato dalle cavità carsiche rilevate -Figura 92- e dai solchi di ruscellamento rilevati alla base della scarpata stessa –Allegato ‘Carta geomorfologica della frana di Sant’Andrea (Perarolo di Cadore, BL) e dell’area a monte’ e cfr. al capitolo indagini geofisiche e geognostiche, paragrafo indagini geoelettriche-). L’acqua, che confluisce lungo quest’asse e che viene convogliata proprio alle spalle della frana di Sant’Andrea [20], afferisce ad un bacino idrogeologico più esteso di quello idrografico (Figura 88).

Tale modello idrogeologico sembra essere avvalorato anche dall’attività della galleria drenante posta trasversalmente al versante e a tergo del muro di sostegno del vecchio tracciato ferroviario, la quale raccoglie acqua dal dominio di filtrazione/scorrimento più superficiale (Figura 94). In occasione di un sopralluogo, datato 6 settembre 2018 (dopo qualche giorno di assenza di precipitazioni importanti), la galleria si mostra secca nella sua porzione più orientale, mentre la portata d’acqua drenata aumenta progressivamente verso ovest, avvicinandosi cioè al punto di massima depressione della paleo-valle, in cui l’acqua sotterranea viene convogliata in maggior quantità. Certamente vanno verificate le pendenze della galleria stessa che potrebbero essersi modificate in relazione ai movimenti del versante, deviando il percorso di allontanamento delle acque di drenaggio (sebbene i fessurimetri posti all’interno del tratto più orientale della galleria mostrino in generale esigui movimenti di tipo distensivo, Figura 95).

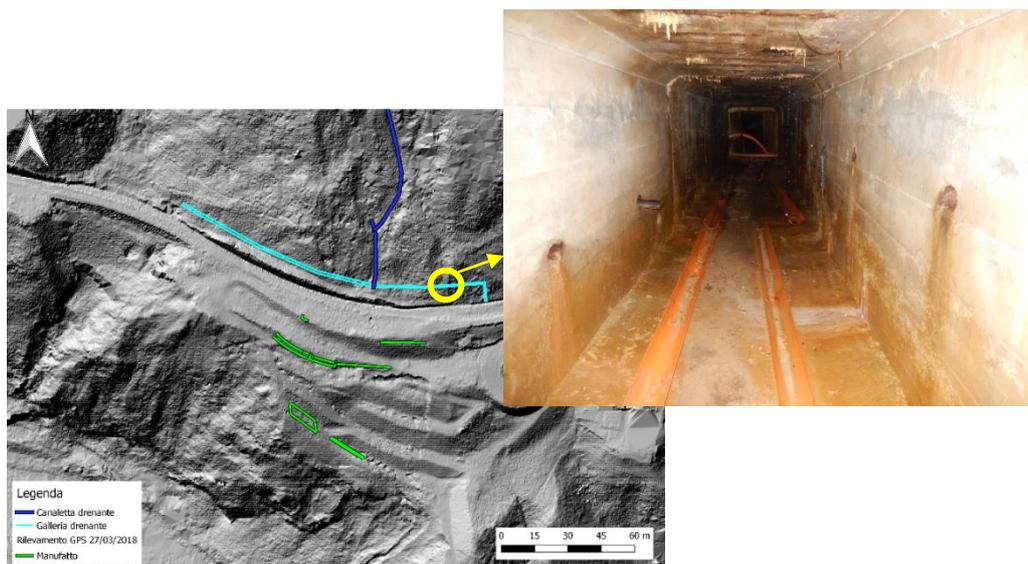


Figura 94 A sinistra estensione planimetrica della galleria drenante (in azzurro, secondo dati RFI [43]) e della canaletta drenante a monte della ferrovia (in blu, da fotointerpretazione). A destra interno della galleria drenante (foto dello scrivente del 06/09/2018).



Figura 95 Fessurimetro su una frattura all'interno della galleria drenante e che mostra solo un esiguo movimento di tipo distensivo. Foto dello scrivente datata 06/09/2018.

CAPITOLO 6: Il monitoraggio della frana di Sant'Andrea

6.1 Introduzione

Come richiamato nel capitolo sulla frana di Sant'Andrea ed in particolare nel paragrafo sulla valutazione del rischio per Perarolo, il fenomeno franoso studiato pone l'abitato, situato sulla sponda opposta del Boite, in una condizione di elevato rischio idrogeologico con risvolti anche su quello idraulico (classificato come 'molto elevato'). La riduzione di tale livello di rischio può essere perseguita attraverso interventi strutturali volti alla sistemazione del versante e quindi alla riduzione del pericolo correlato. Si è già evidenziato, però, come la progettazione di opere simili e la loro realizzazione siano complesse, data la natura del fenomeno ed il contesto di grande instabilità in cui si andrebbe a lavorare. Quindi, un'alternativa volta alla riduzione del rischio idrogeologico consiste nell'adottare misure preventive di monitoraggio ed allerta al fine di ridurre il valore esposto al pericolo e, quindi, diminuire il danno probabile. Nel corso degli anni si è, dunque, sviluppato un sistema di monitoraggio con lo scopo di controllare gli spostamenti del versante su cui si imposta la frana di Sant'Andrea ed, eventualmente, evacuare preventivamente la popolazione (come è successo il 12 dicembre 2017 dopo aver rilevato per ore intensi movimenti del versante).

Il monitoraggio della frana di Sant'Andrea ha, dunque, in primis uno scopo di protezione civile (monitoraggio per allertamento), mentre in secondo luogo è finalizzato al miglioramento delle conoscenze sul fenomeno (monitoraggio conoscitivo). Quest'ultimo tipo di monitoraggio è volto a definire l'evoluzione del fenomeno stesso, i meccanismi che lo innescano, la zonazione cinematica del corpo di frana ed alla progettazione di interventi strutturali adeguati e mirati. Invece, attraverso il monitoraggio per allertamento si ricavano informazioni utili

per la generazione delle soglie di allarme e pre-allarme, utilizzate nei Piani di Protezione Civile [12].

6.2 Evoluzione del sistema di monitoraggio

Il versante in esame è monitorato sin dagli anni 1966-1967 nel corso dei quali in occasione degli interventi di messa in sicurezza della settore compreso tra lo sbocco della galleria di Monte Zucco e Busa del Cristo sono state installate strumentazioni il cui funzionamento è simile a quello degli inclinometri moderni. Tale sistema di monitoraggio è stato descritto *nell'articolo di G. Cargnel, intitolato "Opere di sostegno e di consolidamento e sistemi di allarme in aree franose lungo la linea ferroviaria Treviso-Calalzo" (Atti del 2° Convegno Nazionale di studi sui problemi di Geologia Applicata) e datato 1971* [7]. La strumentazione consiste in un tubo cilindrico chiuso sul fondo, all'interno del quale viene infilato un pendolo, la cui massa è posta a capo di un circuito elettrico [7]. L'altro capo del circuito termina su un anello disposto all'interno del tubo all'altezza della massa del pendolo [7]. Una volta che il terreno in cui è posizionato lo strumento si muove, il tubo si deforma, portando l'anello a toccare la massa del pendolo, la quale rimane sulla verticale, e, quindi, a chiudere il circuito, facendo scattare un segnale di allarme visivo o sonoro [7]. *Cargnel (1971)* [7] osserva, inoltre, come tale strumentazione consenta di determinare la profondità della superficie di scorrimento: infatti, se la porzione sommitale del tubo si è spostata maggiormente rispetto a quella inferiore, allora la frana sarà superficiale, viceversa se la deformazione della sommità del tubo è minore di quella della porzione più profonda, il movimento sarà collocato in profondità. Nel 1966-1967 sono stati installati due di questi strumenti nelle vicinanze della linea ferroviaria e in un impluvio a valle della stessa [7]. Dato il contesto di traffico ferroviario in cui era inserita tale strumentazione si è posta sul fondo del tubo una certa quantità di olio viscoso in cui è stata immersa una parte del pendolo al fine di evitare oscillazioni dovute ai carichi dinamici dei treni in movimento [7].

Infine, gli strumenti erano collegati ad un duplice sistema di allarme: un sistema acustico nelle stazioni di Perarolo e Calalzo e un sistema visivo di tipo semaforico posizionato 100 metri a monte e a valle dei tubi [7]: in tal caso i convogli ferroviari sarebbero stati fermati preventivamente prima di raggiungere il tratto in dissesto. Nello stesso articolo [7] si accenna alla presenza di ‘spie’ poste sui muri, la cui risoluzione degli spostamenti a cui sono soggette è inferiore rispetto a quella della strumentazione sopra-descritta, che si è dimostrata essere efficace.

Nel corso degli anni successivi il sistema di monitoraggio attraverso tubi inclinometrici è stato implementato (il sistema esposto nell'*articolo di Cargnel del 1971* [7] era allora ancora sperimentale ed in via di sviluppo). Così, molti dei sondaggi eseguiti in sito sono stati attrezzati con tubi inclinometrici (come ad esempio quelli già citati ed analizzati nella *relazione di Fenti ed eseguiti dall'Impresa Romolo Bardin S.p.a. nel 1986* [16], poi altri inclinometri sono stati installati nel 1991, 1997, 2000, 2003, 2005 e nel 2008, secondo quanto riportato nella relazione dello *Studio Galli del 2012* [45]): l'ubicazione di alcuni di essi è riportata nella planimetria (Figura 96) già richiamata ed estratta da quella inserita nella relazione dello *Studio Galli (2012)* [45].

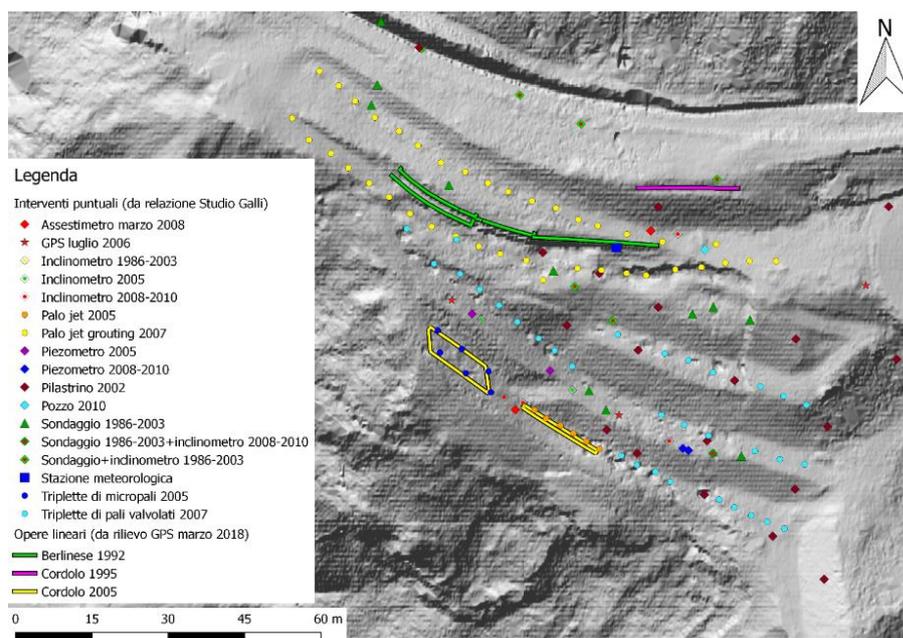


Figura 96 Planimetria degli interventi puntuali realizzati e degli strumenti installati sul versante all'anno 2012, estratta in QGIS dallo scrivente dalla planimetria riportata nella relazione dello Studio Galli "Interventi di mitigazione per gli scenari di rischio geologico, idraulico e di consolidamento dell'abitato di Perarolo di Cadore (BL). STUDIO DI PREFATTIBILITÀ", (2012) [45]. Sono riportate anche le opere lineari presenti, frutto del rilievo GPS del 27/03/2018 condotto dall'Università degli Studi di Padova.

Il monitoraggio eseguito attraverso gli inclinometri negli anni '90 del secolo scorso, riportato nel documento "Istruzioni per l'interpretazione dei dati provenienti dall'impianto di rilevamento della frana in località "Busa del Cristo". Linea Treviso-Calalzo." di FS S.p.a. (Servizio di Potenziamento e Sviluppo Venezia (Geologia) dell'Area Rete Zona Territoriale Nord-Est) e datato 1996 [18], ha rilevato due tipi di evoluzione della frana, a cui sono associati due diverse tipologie di allarme:

- 1) un'evoluzione normale o lenta= costituita da piccoli movimenti dell'ordine del millimetro ma costanti, che si ripetono ogniqualvolta vi sia la giusta combinazione dei fattori scatenanti (acque di infiltrazione per piogge forti e prolungate o per scioglimento delle nevi). Tali spostamenti possono raggiungere valori cumulati annuali dell'ordine di qualche centimetro e, quindi, causare cedimenti parziali e differenziali in superficie o instaurare

tensioni pericolose sulle strutture con pericolo di cedimenti improvvisi ma non necessariamente nell'istante temporale in cui il movimento viene registrato. La situazione in cui la strumentazione registra tali tipologie di spostamenti è definita di “allarme lento” [18];

- 2) un'evoluzione rapida o collasso= costituita da movimenti improvvisi e compresi fra il decimetro e qualche metro, che avvengono quando i fattori scatenanti sono particolarmente intensi (ad esempio nel caso di alluvione). Gli effetti di tali spostamenti sono immediatamente riscontrabili nel terreno e sulle strutture presenti. Tale situazione è, pertanto, la più pericolosa ed è definita come “allarme frana” [18].

Nei primi anni 2000 con lo sviluppo di nuove tecnologie, si sono introdotte nuove tecniche nel monitoraggio dei movimenti della frana: ad esempio, si sono eseguiti una serie di rilievi laser scanner della superficie del versante in movimento al fine di determinare lo spostamento avvenuto tra una campagna di rilevamento e l'altra. Alcune campagne di rilevamento con laser scanner costituiscono diverse fasi di un'attività sperimentale con tecnica TLS - laser scanner terrestre – dell'Università degli Studi di Padova svoltasi nel periodo 2002-2008, secondo quanto riportato nella relazione dello *Studio Galli (2012)* [45], ma che sono proseguite anche negli anni successivi come testimoniato nelle relazioni dell'*Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geoscienze) intitolate “Relazione tecnica inerente alla Prima Fase della Convenzione. Definizione delle soglie di allertamento del fenomeno franoso della Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL)”* [55] e *“Relazione tecnica inerente alla Seconda Fase della Convenzione. Definizione delle soglie di allertamento del fenomeno franoso della Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL)”* [56] nell'ambito della *Convenzione di ricerca fra la Regione del Veneto (Dipartimento Difesa del Suolo e Foreste, Sezione Difesa del Suolo) e l'Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geoscienze), entrambe datate 2015*. Spesso nel corso di tali campagne si sono eseguiti anche dei rilievi fotogrammetrici ([55], [56]).

A tal proposito vale, dunque, la pena ricordare i quattro rilievi con laser scanner terrestre (TLS) eseguiti tra dicembre 2002 e luglio 2005 e le due campagne InSAR terrestre della durata di una settimana ciascuna nell'ottobre 2004 e nel luglio 2005, inseriti nell'ambito di un Progetto di Rilevante Interesse Nazionale (PRIN03 2006) che ha visto la collaborazione delle Università di Padova, Ferrara e Firenze [46]. I risultati di queste indagini sono riportati nell'articolo di *Teza et al. (2008)* [46], nel quale vengono messe a confronto le due tecniche: mentre la tecnica TLS è predisposta per osservazioni multi-temporali (a causa delle elaborazioni necessarie per determinare i movimenti intercorsi tra due acquisizioni successive) e per una modellazione ad alta risoluzione (centimetrica) della superficie indagata, l'interferometria SAR lavora sia in monitoraggio continuo che multi-temporale, cosicché può essere utilizzata per una valutazione in tempo reale dell'evoluzione cinematica della frana [46]. L'interferometria SAR rispetto al laser scanner può rilevare la superficie d'interesse da distanze più elevate (fino a qualche chilometro), ma presenta una risoluzione spaziale minore (in genere dell'ordine dei metri); inoltre, gli spostamenti determinati attraverso la tecnica InSAR sono relativi alla sola componente parallela alla linea di vista dello strumento ('Line Of Sight') [46]. Per il caso particolare della frana di Sant'Andrea di Perarolo di Cadore, la superficie indagata, costituita da materiale incoerente e facilmente erodibile da parte degli agenti atmosferici, rende impossibile il riconoscimento di 'permanent scatterers', ovvero di punti con elevata e costante coerenza nel tempo, i quali consentono di eseguire analisi multi-temporali attraverso l'Interferometria SAR [46]. Alla luce di tale evidenza la tecnica InSAR si mostra nel contesto di Perarolo di Cadore difficilmente utilizzabile per indagini multi-temporali, per le quali la tecnica TLS si rivela più adeguata [46]. Infine, riguardo il monitoraggio continuo attraverso Interferometria SAR, sebbene questo non dovrebbe risentire dell'assenza dei 'permanent scatterers', variazioni temporanee della posizione della strumentazione, come ad esempio uno spostamento per monitorare componenti diverse della stessa frana (determinato del limite del rilevamento della sola componente lungo la 'Line Of Sight'), potrebbero dar luogo ad importanti problemi nel rilevamento del dato.

Nel 2011, secondo quanto riportato nella relazione dello *Studio Galli (2012)* [45], è stata effettuata un'altra campagna di monitoraggio degli spostamenti del versante in frana con la tecnica di Interferometria SAR terrestre, su incarico del Dipartimento di Geoscienze dell'Università degli Studi di Padova.

Dal novembre 2013 è operante la stazione topografica totale robotizzata di cui è stato accennato nel capitolo sulla frana di Sant'Andrea ([55], [56]).

Infine, sono presenti estensimetri disposti longitudinalmente al versante, mentre sulle opere antropiche sono collocati fessurimetri a filo a monitoraggio delle fratture (cfr. al capitolo sulla frana di Sant'Andrea) e celle di carico per determinare le spinte a cui le strutture stesse sono soggette.

6.3 Interpretazione dei dati di monitoraggio

Prima di procedere all'interpretazione dei dati del monitoraggio è necessario seguire alcuni criteri al fine di riconoscere l'attendibilità dei segnali registrati dagli strumenti [18]. Tali criteri possono essere così riassunti [18]:

- 1) **CONGRUITÀ**= lo spostamento deve essere in sintonia con il tipo di movimento, soprattutto per quanto riguarda la direzione dello spostamento;
- 2) **STABILITÀ**= il movimento reale deve essere stabile nel tempo, ovvero non può retrocedere segnalando momentanei ritorni alla situazione preesistente. Si nota, però, come un guasto della strumentazione si possa esprimere sia con un andamento sinusoidale di andata e ritorno del segnale registrato che con uno spostamento continuo nella stessa direzione. In questo caso il guasto si rileva o dalla mancanza di congruità della direzione dello spostamento e/o dal rilevamento di tale segnale in un solo sensore e/o dalla continuità e regolarità stessa del segnale (il movimento naturale avviene, infatti, a episodi discontinui al manifestarsi dei fattori scatenanti);

- 3) QUANTITÀ= l'entità dello spostamento determina diversi effetti in superficie (come già accennato nelle definizioni di “evoluzione normale” ed “evoluzione rapida”). Un sopralluogo consente di definire, dunque, l'attendibilità del dato misurato in base al riscontro o meno sul campo di tali evidenze.

Si ricorda, infine, che è bene conoscere le modalità di installazione, di funzionamento e di acquisizione dei dati della strumentazione di monitoraggio per poter interpretare con senso critico i segnali che questa registra, tenendo presente la loro origine.

6.4 Riassunto ultimi dati di monitoraggio dell'Università

I dati relativi al monitoraggio degli ultimi anni sono stati raccolti ed interpretati nelle due relazioni, già citate, stese dal *Dipartimento di Geoscienze dell'Università degli Studi di Padova relative alla Prima [55] ed alla Seconda [56] Fase della Convenzione di ricerca con la Regione del Veneto (Dipartimento Difesa del Suolo e Foreste, Sezione Difesa del Suolo)*. Le relazioni sono datate marzo e settembre 2015 e, perciò, descrivono i risultati del monitoraggio fino a quell'anno (a partire dal novembre 2013, in cui entra in funzione la stazione topografica totale robotizzata [55], e dal 2006 per le stazioni GPS).

6.4.1 Prima fase della Convenzione di ricerca

6.4.1.1 Sistemi di monitoraggio a confronto: stazioni GPS e stazione topografica totale robotizzata

Nella relazione relativa alla prima fase della Convenzione di ricerca [55] si analizzano i dati di monitoraggio ottenuti dalle stazioni GPS poste sul versante e dalla stazione topografica totale robotizzata. Inoltre, si accenna che il 16 febbraio 2015 si sono svolti un rilievo fotogrammetrico (da terra, con diverse postazioni

site sulla destra topografica del Boite) ed un rilievo laser scanner terrestre (posizionato su un pilastro topografico nei pressi del Municipio di Perarolo di Cadore).

Per quanto riguarda le stazioni GPS, quelle presenti sul versante sono tre, denominate “Rover 1”, “Rover 2” e “Base” (sebbene effettuino tutte misure statiche differenziali). La loro ubicazione è riportata in Figura 97 (a sinistra).

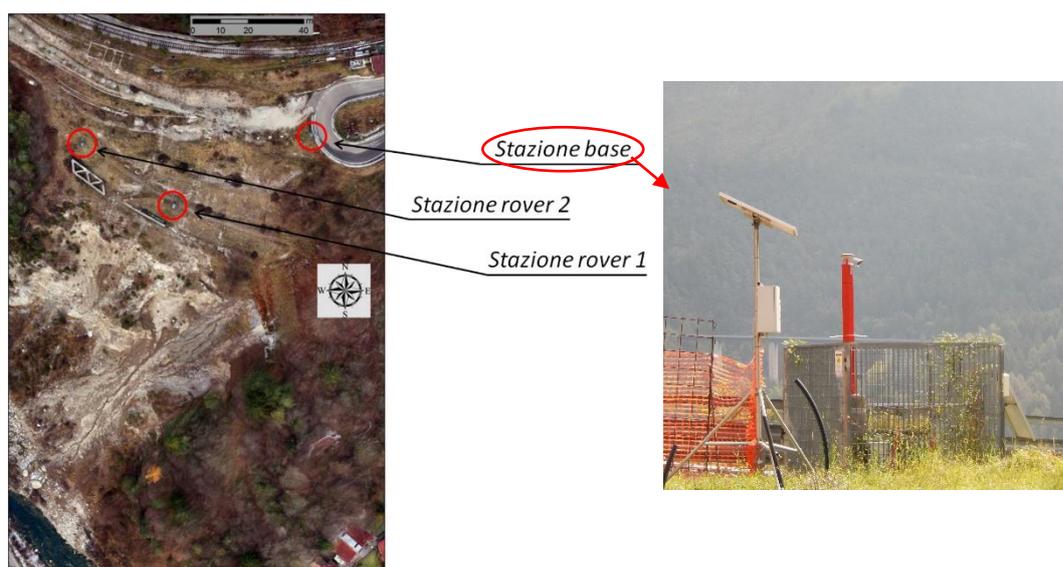


Figura 97 Ubicazione delle stazioni GPS sul versante in frana in sovrapposizione ad un modello fotogrammetrico aereo, riportata nella “Relazione tecnica inerente alla Prima Fase della Convenzione. Definizione delle soglie di allertamento del fenomeno franoso della Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL)” redatta dal Dipartimento di Geoscienze dell’Università degli Studi di Padova nell’ambito della Convenzione di ricerca fra la Regione del Veneto (Dipartimento Difesa del Suolo e Foreste, Sezione Difesa del Suolo) e l’Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geoscienze), datata 11/03/2015 [55].

Analizzando i dati relativi di tali stazioni, si osserva che [55]:

- 1) la stazione “Base” è interessata da movimento, ma in misura sensibilmente minore rispetto alle altre due stazioni;
- 2) l’andamento di variazione della posizione delle stazioni “Rover 1” e “Rover 2” mostra segmenti temporali (di durata anche biennale) caratterizzati da velocità pressoché costante, a cui seguono brevi fasi di accelerazione e, poi, altri segmenti di evoluzione su valori cinematici più

elevati rispetto a quelli del periodo precedente la perturbazione. Tale successione si ripete nel tempo. Gli spostamenti avvengono in entrambi i casi lungo la linea di massima pendenza. Inoltre, le variazioni delle posizioni delle due stazioni sono analoghe e le fasi di variazione delle velocità sono sincrone;

- 3) le variabili cinematiche “velocità” ed “accelerazione” degli spostamenti delle stazioni GPS si mostrano più adatte allo studio dell’evoluzione del fenomeno franoso rispetto alla semplice variabile “posizione” delle stazioni stesse;
- 4) si riscontrano periodicità nel segnale di variazione delle velocità delle stazioni GPS, le quali non variano nel tempo quanto a frequenza e importanza relativa, ma quanto a potenza (ad indicare la stagionalità a cui sono legate tali variazioni). Le periodicità evidenziate nelle due stazioni “Rover 1” e “Rover 2” sono le stesse: di particolare interesse sono quelle di 12 e 6 giorni;
- 5) oscillazioni significative di velocità si rilevano quando vengono raggiunte o superate soglie pluviometriche significative di 40-50 mm/giorno, in dipendenza dalla pioggia caduta in precedenza;
- 6) nel caso del “Rover 1” un’analisi di cross-correlazione fra le serie temporali delle cumulate giornaliere delle piogge e le componenti di velocità riporta come risultato un ritardo di 6 giorni per tutte le componenti del vettore velocità (Nord, Est e verticale), mentre per il “Rover 2” il ritardo si attesta sui 3-5 giorni per la sola componente Nord (le altre componenti non raggiungono la soglia di significatività statistica posta di 3 sigma, ovvero oltre l’intervallo di confidenza del 99%). Si nota come tale ritardo sia confrontabile con la periodicità di 6 giorni rilevata dall’analisi spettrometrica (cfr. punto 4 del seguente elenco).

Osservazioni analoghe sono apportate per i dati di monitoraggio provenienti dalla stazione topografica totale robotizzata (Leica Geosystems, modello TM30), che opera a partire dal novembre 2013 [55]. La stazione acquisisce con cadenza di 6 ore generalmente le posizioni dei riflettori posti sulla porzione instabile del versante e di altri collocati al di fuori di questa che fungono da riferimento. Nel 2015 i riflettori erano 28 di cui 23 (P1-P23) sul corpo di frana in movimento e 5 (R1-R5) di riferimento [55]. L'analisi di cross-correlazione con le cumulate giornaliere delle precipitazioni consente di definire una prima zonazione del versante in frana in termini di ritardo nella risposta alla sollecitazione pluviometrica (Figura 98), considerando però che le mire posizionate sul corpo avanzato, ovvero sul settore più a valle, (P9, P20 e P21 – gialle in Figura 98) sono

caratterizzate da una rilevante dispersione del ritardo. Tale comportamento può essere legato a variazioni di risposta della frana alle sollecitazioni pluviometriche in quei punti e/o a movimenti legati all'instabilità dei supporti su cui sono installate le mire (tale porzione del corpo di frana è, infatti, più



Figura 98 Suddivisione preliminare del corpo di frana in base al ritardo ottenuto dall'analisi di cross-correlazione tra le cumulate pluviometriche giornaliere e le velocità dei riflettori. In giallo sono evidenziati i riflettori che mostrano dispersione. Immagine riportata nella "Relazione tecnica inerente alla Prima Fase della Convenzione. Definizione delle soglie di allertamento del fenomeno franoso della Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL)" redatta dal Dipartimento di Geoscienze dell'Università degli Studi di Padova nell'ambito della Convenzione di ricerca fra la Regione del Veneto (Dipartimento Difesa del Suolo e Foreste, Sezione Difesa del Suolo) e l'Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geoscienze), datata 11/03/2015 [55].

frammentata delle altre e soggetta a movimenti rapidi ed intensi, come testimoniato dall'evento del novembre 2000, cfr. al capitolo sulla frana di Sant'Andrea) [55].

Si riassumono, dunque, le principali considerazioni apportate nella relazione dell'*Università degli Studi di Padova relativa alla Prima Fase della Convenzione di ricerca (2015)* [55]:

- 1) l'utilizzo delle serie temporali delle velocità di spostamento sembra più idoneo per studi quantitativi approfonditi rispetto alle serie temporali degli spostamenti stessi;
- 2) i dati acquisiti con le stazioni GPS e la stazione topografica totale sono fra loro coerenti con valori di velocità che si riscontrano in entrambi i casi pari a 0.2-0.4 mm/giorno;
- 3) il movimento generale della superficie in frana mostra fasi di avanzamento a velocità 'costante' (a meno di fluttuazioni temporanee), seguite da aumenti della velocità media e di ampiezza delle oscillazioni in concomitanza con eventi meteorologici significativi. La successiva stabilizzazione della velocità si attesta su valori non minori di quelli precedenti alla perturbazione. Si osserva, dunque, come eventi meteorologici importanti possono dar luogo a variazioni persistenti della cinematica della frana;
- 4) gli eventi meteorologici significativi, a cui è stato fatto riferimento nel punto precedente, vengono identificati con cumulate pluviometriche giornaliere superiori ai 40-50 mm;
- 5) l'analisi di cross-correlazione fra la serie temporale delle cumulate pluviometriche giornaliere e le velocità dei punti di riferimento sul corpo di frana (siano essi stazioni GPS o mire ottiche) consente, infine, di proporre una prima zonazione della superficie instabile sulla base del ritardo della risposta cinematica del corpo di frana alla sollecitazione pluviometrica (Figura 98).

6.4.2 Seconda fase della Convenzione di ricerca

6.4.2.1 Sistemi di monitoraggio a confronto: stazione topografica totale robotizzata e rilievi fotogrammetrici e/o laser scanner

Nella *relazione relativa alla Seconda Fase della Convenzione di ricerca* [56] si pone particolare attenzione sul confronto dei dati di monitoraggio relativi alla stazione topografica totale robotizzata con quelli ottenuti attraverso rilievi fotogrammetrici e laser scanner. Per quanto riguarda questi ultimi, si è osservato come la particolare conformazione del copro di frana e della valle stessa del Boite non consenta a strumentazione di rilevamento posta a terra di indagare a fondo ogni porzione della superficie instabile, in particolare vengono a mancare informazioni sul settore di coronamento (per il rilievo laser scanner terrestre, inoltre, la presenza delle mire ottiche della stazione topografica totale provoca saturazione del segnale laser, influenzando negativamente sul parametro di intensità del raggio di ritorno –nuvola di punti scura e di difficile interpretazione– e determinando aloni e errate misure delle distanze dei punti vicini ai riflettori) [56]. Si deduce, quindi, come per l’osservazione della frana di Sant’Andrea sia necessaria una visione dall’alto e, quindi, rilievi fotogrammetrici o laser scanner aerei [56]. Un rilievo fotogrammetrico con drone è stato eseguito il 10 aprile 2015 [56]. I risultati di tale rilievo consentono di effettuare un’analisi topografica di dettaglio (lavorando sui DEM con celle centimetriche ottenuti) sia in termini di cambiamenti morfologici che di spostamenti avvenuti nell’intervallo di tempo che intercorre fra due rilievi fotogrammetrici della stessa zona [56].

Il confronto geomorfologico (Figura 99) fra i rilievi del dicembre 2013 e del maggio 2015 consente l’individuazione di vecchie (in nero) e nuove (in rosso) fratture, di solchi di ruscellamento (in blu, e che secondo quanto scritto nella relazione in questione [56] si sono mantenuti stabili nell’intervallo temporale che intercorre tra i due rilievi) e di orli di scarpate di degradazione, nicchie di frana e creste/spigoli degli strati di roccia (in nero e giallo). Lo studio delle variazioni morfologiche permette di definire, inoltre, il trend evolutivo del fenomeno che

sembra regredire in direzione Nord come testimoniato anche dalle fratture rilevate nel 2015 [56].

L'analisi dei DEM derivanti dai rilievi fotogrammetrici attraverso tecniche come la 'Digital Image Correlation' (DIC) e il 'DEM of difference' (DoD) consente di stimare le entità degli spostamenti rispettivamente sul piano orizzontale e sulla verticale che si sono verificati nell'intervallo temporale intercorso tra l'acquisizione dei DEM raffrontati. I risultati di tali elaborazione sono i campi di spostamento nelle diverse direzioni (orizzontali, verticali e totali) avvenuti nel periodo di tempo indagato, come nell'esempio riportato in Figura 100.



Figura 99 Confronto geomorfologico fra i rilievi fotogrammetrici del dicembre 2013 e del maggio 2015 con l'individuazione di vecchie (in nero) e nuove (in rosso) fratture, di solchi di ruscellamento (in blu) e di orli di scarpate di degradazione, nicchie di frana e creste/spigoli degli strati di roccia (in nero e giallo). Immagine riportata nella "Relazione tecnica inerente alla Seconda Fase della Convenzione. Definizione delle soglie di allertamento del fenomeno franoso della Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL)" nell'ambito della Convenzione di ricerca fra la Regione del Veneto (Dipartimento Difesa del Suolo e Foreste, Sezione Difesa del Suolo) e l'Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geoscienze), datata 2015 e stilata dall'Università degli Studi di Padova, (Dipartimento di Geoscienze, Responsabile Scientifico: dott. A. Galgaro) [56].

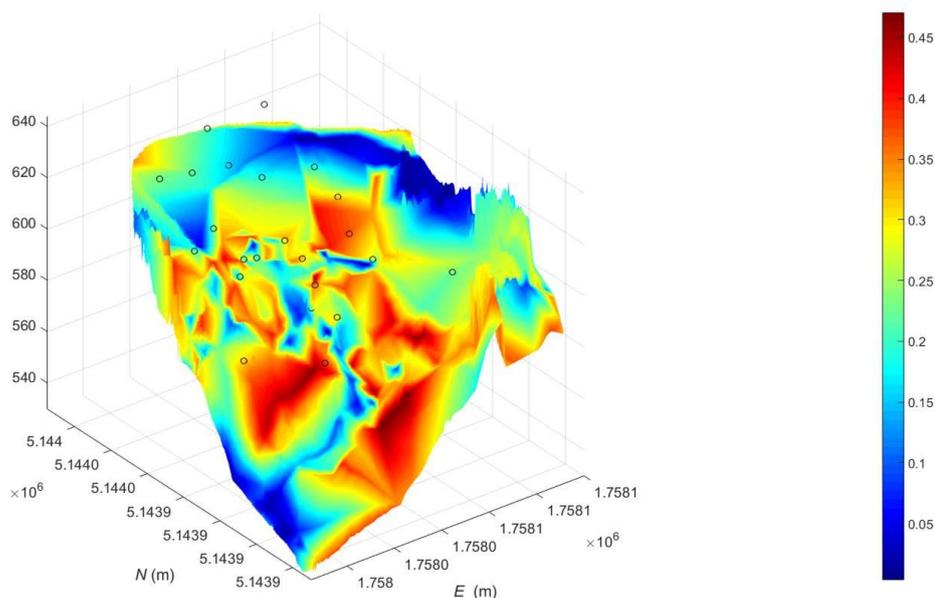


Figura 100 Campo degli spostamenti ottenuto mediante confronto dei DEM. Immagine riportata nella “Relazione tecnica inerente alla Seconda Fase della Convenzione. Definizione delle soglie di allertamento del fenomeno franoso della Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL)” nell’ambito della Convenzione di ricerca fra la Regione del Veneto (Dipartimento Difesa del Suolo e Foreste, Sezione Difesa del Suolo) e l’Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geoscienze), datata 2015 e stilata dall’Università degli Studi di Padova, (Dipartimento di Geoscienze, Responsabile Scientifico: dott. A. Galgaro) [56].

Anche l’elaborazione dei dati di monitoraggio della stazione topografica totale può produrre dei campi di spostamento della superficie in frana lungo le diverse direzioni. L’interpolazione degli spostamenti registrati presso ciascuna mira ottica consente, infatti, di estendere arealmente la valutazione di queste variabili. I risultati dei dati di monitoraggio della stazione topografica totale mostrano come la direzione degli spostamenti si mantenga inalterata nel corso di tutto il periodo verso la direzione di valle, mentre le intensità di tali vettori cambiano da zona a zona e nel tempo, riconoscendo diverse aree a comportamento cinematico omogeneo di cui alcune più instabili con spostamenti che raggiungono anche i 72 cm in 18 mesi ed i 45 cm medi annui (con spostamenti verticali vicini ai 30 cm) ad indicare un peggioramento delle condizioni di stabilità del versante (nel 2002-2003 non si erano superati mai i 25 cm annui) [56].

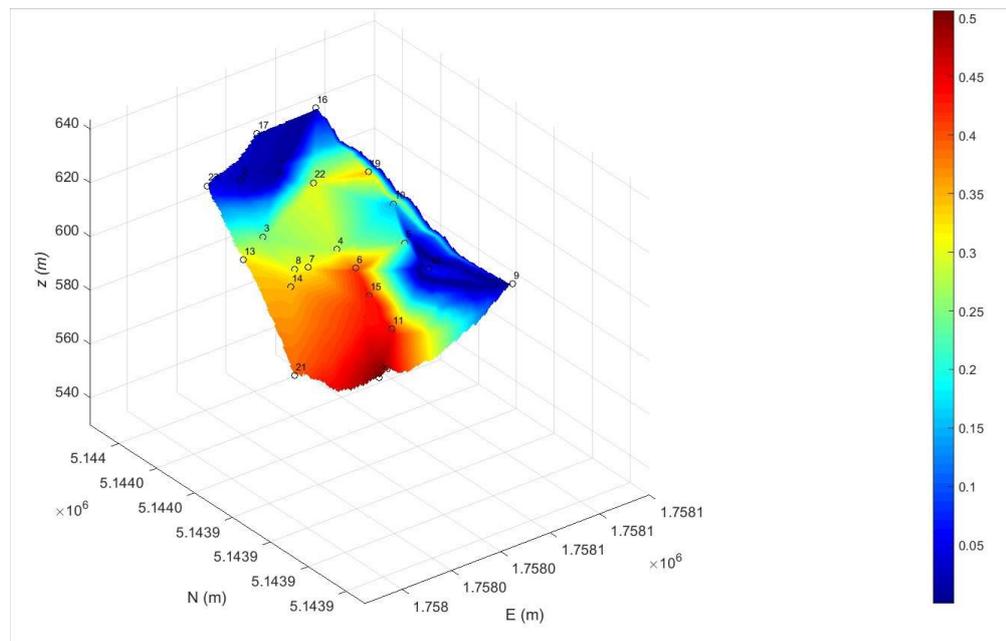


Figura 101 Campo degli spostamenti complessivi ottenuto mediante interpolazione dei dati della stazione topografica totale robotizzata. Immagine riportata nella “Relazione tecnica inerente alla Seconda Fase della Convenzione. Definizione delle soglie di allertamento del fenomeno franoso della Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL)” nell’ambito della Convenzione di ricerca fra la Regione del Veneto (Dipartimento Difesa del Suolo e Foreste, Sezione Difesa del Suolo) e l’Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geoscienze), datata 2015 e stilata dall’Università degli Studi di Padova, (Dipartimento di Geoscienze, Responsabile Scientifico: dott. A. Galgaro) [56].

Si nota come il campo di spostamento ottenuto tramite elaborazione dei DEM da rilievo fotogrammetrico (Figura 100), sebbene mostri forti fluttuazioni locali probabilmente non dovute a spostamenti reali [56], sia coerente con quello ricavato dall’interpolazione dei dati della stazione topografica totale (Figura 101). Si osserva, infatti, che la parte alta della frana è quasi in equilibrio (Figura 102 – cerchio verde solo nel campo degli spostamenti della stazione topografica totale, ovvero in quello di destra, per limiti di estensione del rilievo fotogrammetrico), che la dorsale ad Est tra Costa e Sant’Andrea (Figura 102 - cerchio viola) è più stabile del settore ad Ovest e che la porzione più a valle del corpo di frana è animata da movimenti molto ampi (Figura 102- cerchio rosso) [56].

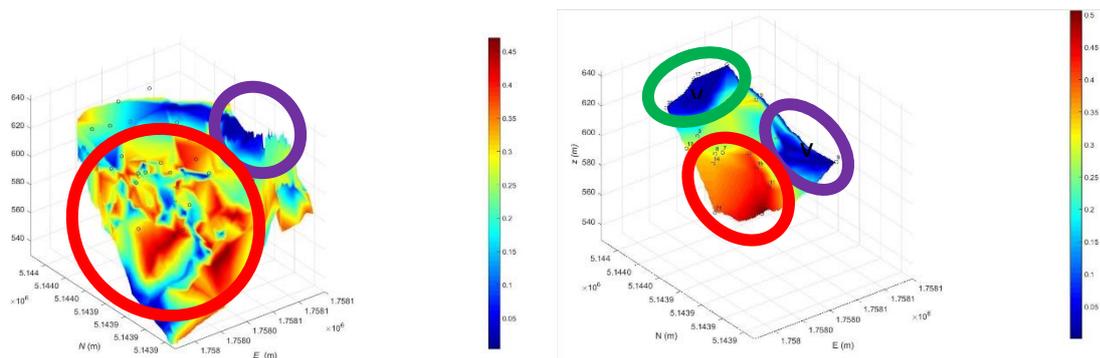


Figura 102 A destra campo degli spostamenti ottenuto mediante elaborazione dei DEM dai rilievi fotogrammetrici e a sinistra campo degli spostamenti ottenuto mediante interpolazione dei dati della stazione topografica totale. Nel cerchio viola è mostrata la porzione più stabile e confrontabile tra i due campi, mentre nel cerchio rosso quella più instabile. Il cerchio verde mette in evidenza la porzione di monte quasi in equilibrio, riscontrabile solo nel campo degli spostamenti della stazione topografica totale per limiti di estensione del rilievo fotogrammetrico. Immagine riportata nella “Relazione tecnica inerente alla Seconda Fase della Convenzione. Definizione delle soglie di allertamento del fenomeno franoso della Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL)” nell’ambito della Convenzione di ricerca fra la Regione del Veneto (Dipartimento Difesa del Suolo e Foreste, Sezione Difesa del Suolo) e l’Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geoscienze), datata 2015 e stilata dall’Università degli Studi di Padova, (Dipartimento di Geoscienze, Responsabile Scientifico: dott. A. Galgaro) [56].

Il confronto dei campi di spostamento ottenuti con le due tecniche (rilievo fotogrammetrico -Figura 100- e stazione topografica totale robotizzata -Figura 101-) offre lo spunto per analizzarne le potenzialità ed i limiti in termini di monitoraggio della superficie in frana [56]:

1) STAZIONE TOPOGRAFICA TOTALE ROBOTIZZATA

- VANTAGGI:

- i. buona risoluzione temporale= le misure vengono eseguite normalmente ogni 6 ore ed ogni ora nei periodi critici in cui si registrano incrementi degli spostamenti (o solo per determinate mire);
- ii. elevata precisione della misure= che è limitata alla precisione del sistema laser. In occasione della stesura delle relazioni nell’ambito della Convenzione di ricerca ([55], [56]) sono state realizzate misure di georeferenziazione di alcuni punti di riferimento e delle mire ottiche attraverso

l'utilizzo di basi GPS con misure di tipo rapido-statico e le misure di un'altra stazione topografica totale posta nelle vicinanze di quella già presente. Gli errori di georeferenziazione attraverso le misure GPS si aggirano intorno ai 6-9 mm a cui vanno aggiunti gli errori legati al sistema laser (che variano in funzione del tempo di misura di un singolo punto e vanno dai 0.6mm+1ppm per tempi di misura di 7 secondi ai 3 mm+1ppm per tempi di misura inferiori ai 0.15 secondi, dal documento "*Leica TM 30. Dati tecnici*" di *Leica Geosystems AG, 2009* [29]);

- iii. la possibilità di avere riscontro diretto in caso di non validità di qualche misura= essendo esiguo il numero di punti rilevati;
- iv. la scarsa dipendenza della misura dalle condizioni stagionali= i riflettori sono posizionati su supporti che non subiscono variazioni stagionali in termini di posizione legati a movimenti esterni a quello franoso (ad esempio, per la crescita della vegetazione)

- **SVANTAGGI**

- i. il numero limitato di punti rilevati= che è legato all'inevitabile limitatezza del numero di mire ottiche (nell'estate 2018 si sono, infatti, aggiunte nove mire per una migliore definizione del campo di spostamento);
- ii. la scarsa risoluzione spaziale= la distanza tra i riflettori varia tra i 5 e i 25 m;

2) ELABORAZIONE DEI MODELLI DIGITALI DI ELEVAZIONE (DEM) DAI VOLI CON DRONE

- **VANTAGGI**

- i. la buona copertura (continuità) areale= tale tecnica consente, infatti, di rilevare una nuvola di punti che copre l'intera superficie in frana;

- ii. l'elevata risoluzione spaziale= che è funzione della quota di volo, del grado di sovrapposizione delle immagini e dei criteri scelti per la generazione della nuvola di punti e del DEM. In ogni caso si può attestare sull'ordine dei centimetri;
 - iii. la disposizione di immagini= le quali sono utili per altre analisi, quali la fotointerpretazione ed il confronto fra l'analisi geomorfologica e cinematica;
- SVANTAGGI
 - i. la scarsa risoluzione temporale= legata all'intervallo di tempo intercorso fra due acquisizioni di immagini e/o nuvole di punti;
 - ii. l'errore di georeferenziazione= almeno un ordine di grandezza superiore rispetto a quello commesso nell'identificazione della posizione dei punti della stazione topografica totale.

Si osserva, infine, come le informazioni ricavate dal monitoraggio con la stazione topografica totale e con fotogrammetria da drone siano fra loro diverse, cosicché uno non può sostituire l'altro, ma piuttosto si completano a vicenda. I due sistemi di monitoraggio, perciò, vanno integrati fra loro al fine di ottenere una rappresentazione la più realistica possibile della cinematica del fenomeno franoso in esame.

6.4.2.2 Zonazione cinematico-deformativa del corpo di frana

Dai dati cinematici ottenuti dall'elaborazione delle misure eseguite dalla stazione topografica totale è possibile calcolare il campo di 'strain' ovvero il campo deformativo che insiste sul corpo di frana. La rappresentazione dei risultati di tali calcoli consiste nella variazione della deformazione volumetrica del materiale in

movimento sulla superficie esposta del fenomeno franoso e ricoperta dalle mire ottiche (Figura 103). Si nota come vi siano aree relativamente omogenee soggette a deformazioni volumetriche di tipo estensivo (colori ‘caldi’ in Figura 103) e altre sottoposte a contrazione (colori ‘freddi’ in Figura 103).

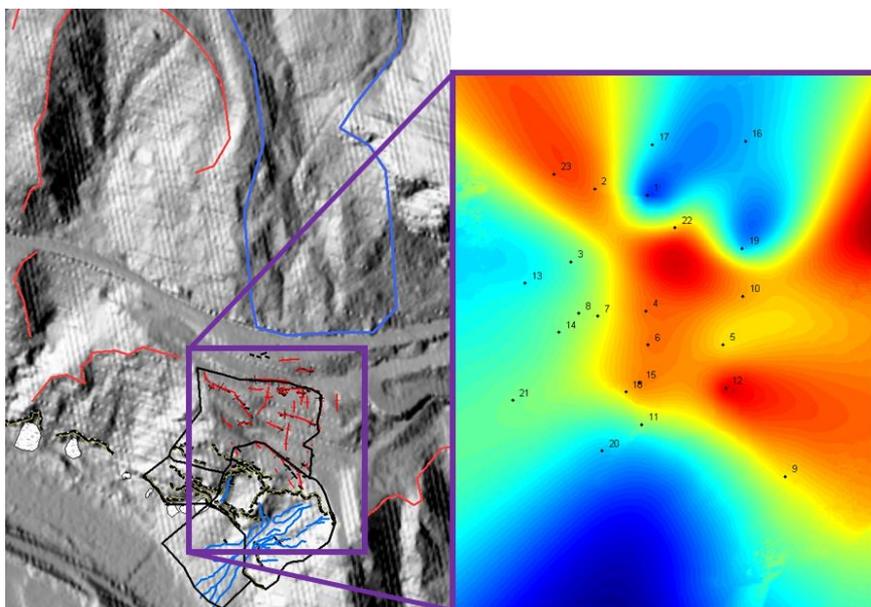


Figura 103 A destra mappa della deformazione volumetrica calcolata a partire dai dati della stazione topografica totale, mentre a sinistra l’hillshade del DEM del 2015 con alcuni elementi geomorfologici (descritti in precedenza) e l’identificazione dell’area in cui è stato calcolato il campo deformativo. Nella mappa della deformazione volumetrica i colori ‘caldi’ indicano estensione, mentre quelli ‘freddi’ contrazione. Immagine riportata nella “Relazione tecnica inerente alla Seconda Fase della Convenzione. Definizione delle soglie di allertamento del fenomeno franoso della Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL)” nell’ambito della Convenzione di ricerca fra la Regione del Veneto (Dipartimento Difesa del Suolo e Foreste, Sezione Difesa del Suolo) e l’Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geoscienze), datata 2015 e stilata dall’Università degli Studi di Padova, (Dipartimento di Geoscienze, Responsabile Scientifico: dott. A. Galgaro) [56].

Il riconoscimento di queste zone a comportamento deformativo e cinematico omogeneo è di fondamentale importanza per la definizione dell’evoluzione e dei meccanismi che sottendono il fenomeno franoso stesso.

Dall’integrazione dei risultati ottenuti nelle elaborazioni dei dati della stazione topografica totale e dalle analisi geomorfologiche descritte nella *relazione relativa alla Seconda Fase della Convenzione di ricerca* [56] si individuano 3 aree a comportamento cinematico-deformativo omogeneo (Figura 104):

- Area 1, o upstream (o settentrionale) = mostra movimenti di lieve entità (spostamento medio annuo ~16 mm/anno in direzione orizzontale, ~17 mm/anno in direzione verticale, ~17 mm/anno totale) ed è monitorata dalle mire ottiche P1, P2, P16, P17, P23 e R1 (nel coronamento e nella parte più alta del settore mediano) e P9 (sul fianco est del settore mediano della frana);
- Area 2, o centrale= mostra movimenti di media entità rispetto al resto del versante instabile (spostamento medio annuo ~26 cm/anno in direzione orizzontale, ~19 cm/anno in direzione verticale e ~31 cm/anno totale) ed è monitorata dalle mire ottiche P3, P4, P5, P7, P8, P10, P12, P13, P14, P19, P22 (nel settore mediano della frana) e P21 (nel corpo avanzato). La componente verticale della mira P22 è insolitamente elevata e determina un incremento dell'intero vettore spostamento rispetto a quelli registrati nelle mire della stessa area;
- Area 3, o avanzata (o meridionale)= mostra movimenti di rilevante entità (spostamento medio annuo ~37 cm/anno in direzione orizzontale, ~31 cm/anno in direzione verticale e ~44 cm/anno totale) ed è monitorata dalle mire P6 (nel settore mediano) e P11, P15, P18 e P20 (nel corpo avanzato della frana).

L'Area 1 si muove mediamente con vettori spostamento uno-due ordini di grandezza inferiori rispetto a quelli delle altre aree, mentre i movimenti dell'Area 2 sono mediamente minori del 30% di quelli dell'Area 3 [56]. Le cinematiche delle Aree 2 e 3, seppur qualitativamente simili, sono quantitativamente diverse: ciò rende probabile che, in assenza di scenari ad elevata criticità (quindi, non in condizioni di pre-allarme ed allarme), l'Area 3 sia caratterizzata da un comportamento cinematico significativo ed isolato dal contesto generale del fenomeno di instabilità oggetto di studio [56].

La frana di Sant'Andrea, essendo, quindi, in continuo movimento (come evidenziato dalla cinematica, la quale indica l'instabilità del pendio), è un sistema dinamico, il cui comportamento è strettamente dipendente dalle condizioni

iniziali, le quali non sono facilmente individuabili in assenza di una corretta ed affidabile definizione di una superficie di discontinuità [56]. Un ipotetico fattore di sicurezza (complesso da calcolare anche a causa del comportamento deformativo del materiale instabile) non avrebbe, dunque, lo scopo di fornire indicazioni sulle condizioni statiche dell'ammasso studiato (basandosi esclusivamente su semplici criteri di rottura), ma piuttosto di valutare le condizioni in cui i movimenti già attivi lungo li pendio diventano generalizzati, incrementando notevolmente la loro intensità e coinvolgendo più settori del corpo di frana [56].



Figura 104 Suddivisione del corpo di frana in aree dal punto di vista cinematico e deformativo omogenee, proposta nella “Relazione tecnica inerente alla Seconda Fase della Convenzione. Definizione delle soglie di allertamento del fenomeno franoso della Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL)” nell’ambito della Convenzione di ricerca fra la Regione del Veneto (Dipartimento Difesa del Suolo e Foreste, Sezione Difesa del Suolo) e l’Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geoscienze), datata 2015 e stilata dall’Università degli Studi di Padova, (Dipartimento di Geoscienze, Responsabile Scientifico: dott. A. Galgaro) [56].

6.4.2.3 Risposte alle sollecitazioni pluviometriche

Alcune importanti considerazioni possono essere riportate da un confronto fra l'andamento delle velocità di spostamento delle mire e le cumulate pluviometriche a 1,3,8 e 15 giorni (Figura 105) [56]:

- 1) non vi sono mai stati episodi di variazioni della cinematica in assenza di precipitazioni significative, a suggerire l'importanza dei valori meteorologici pregressi nella definizione delle soglie di attenzione e di allarme;
- 2) l'andamento delle velocità mostra periodi a relativa velocità costante o con un lieve trend di diminuzione, caratterizzati da un certo valore medio 'v' e su cui si impostano leggere fluttuazioni. Tali intervalli sono interrotti in corrispondenza degli eventi meteorologici più importanti da istanti temporali di rapido aumento delle velocità (in cui si raggiungono velocità pari anche a 2 volte il valore di 'v'), a cui segue un nuovo periodo di stabilizzazione delle velocità con lieve trend in rilassamento. In quest'ultimo periodo, però, il valore medio su cui si attestano le velocità registrate è superiore a 'v' (con aumenti del 10-15%), indice del fenomeno di isteresi già menzionato (Figura 105, cfr. al capitolo sulla frana di Sant'Andrea);
- 3) l'inizio delle fasi con rapido aumento della velocità di spostamento coincide con periodi di pioggia intensa con una pluviometrica giornaliera superiore ai 50 mm;
- 4) la cumulata pluviometrica ai 15 giorni mostra un andamento simile agli episodi di forte oscillazione delle velocità di spostamento delle mire. Tali periodi di grandi fluttuazioni delle velocità non si concludono prima che tale cumulativa sia scesa al di sotto dei 50 mm. Quindi, servono almeno 8-10 giorni di assenza di pioggia per avere la cessazione di un episodio di oscillazioni significative;
- 5) i riflettori soggetti a velocità maggiori, una volta sottoposti a periodi di pioggia intensa, si mostrano poi 'sensibili' ad eventi meteorologici che in

precedenza non avevano grandi effetti in termini di fluttuazioni delle velocità.

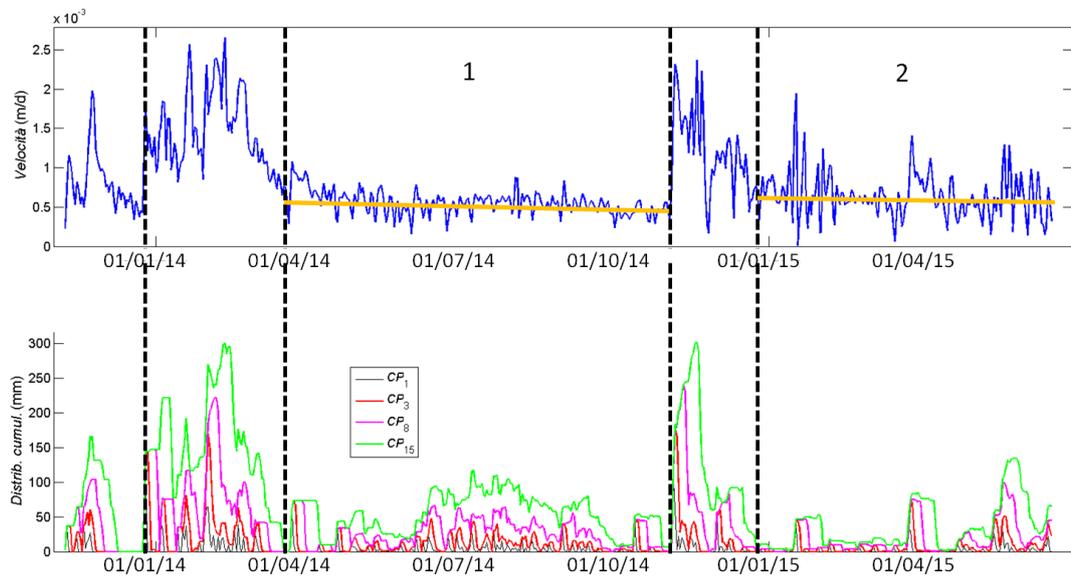


Figura 105 In alto andamento della velocità complessiva del riflettore P19 considerato paradigmatico per tutti i riflettori indipendentemente dall'area cinematica di appartenenza [7]. Questo viene correlato con gli andamenti delle cumulate pluviometriche a 1 (CP1), 3 (CP3), 8 (CP8) e 15 (CP15) giorni, raffigurati in basso. Sono identificati, inoltre, i periodi di intensa sollecitazione pluviometrica e di forti fluttuazioni delle velocità: tali intervalli temporali coincidono. Immagine riportata nella “Relazione tecnica inerente alla Seconda Fase della Convenzione. Definizione delle soglie di allertamento del fenomeno franoso della Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL)” nell’ambito della Convenzione di ricerca fra la Regione del Veneto (Dipartimento Difesa del Suolo e Foreste, Sezione Difesa del Suolo) e l’Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geoscienze), datata 2015 e stilata dall’Università degli Studi di Padova, (Dipartimento di Geoscienze, Responsabile Scientifico: dott. A. Galgano) [56].

Le variazioni della cinematica al termine dei periodi di intensa sollecitazione pluviometrica suggeriscono un comportamento deformativo del corpo di frana di tipo viscoplastico: eventi pluviometrici prolungati o in rapida successione a relativamente bassa intensità, ma pressoché continui, sembrano dar luogo ad un effetto di “sensibilizzazione” del versante instabile, da cui una maggior velocità dopo un evento importante e una maggior tendenza a rispondere con ampie oscillazioni anche ad eventi di pioggia di non grande durata e media intensità [56].

Secondo quanto riportato nell'analisi idrologica dello *Studio Galli (2012)* [45], cumulate pluviometriche giornaliere di 80 mm sono attese con tempo di ritorno di 2 anni, di 130 mm con tempo di ritorno di 10 anni e dell'ordine dei 150 mm con tempo di ritorno di 20 anni [56]. Le cumulative settimanali, invece, di 180, 250 e 290 mm sono associate ai tempi di ritorno di 2, 5 e 10 anni [56].

L'analisi di cross-correlazione tra l'andamento della cumulata pluviometrica giornaliera e delle velocità registrate alle diverse mire ha come risultato la seguente mappa di ritardo nella risposta alla sollecitazione pluviometrica (Figura 106):

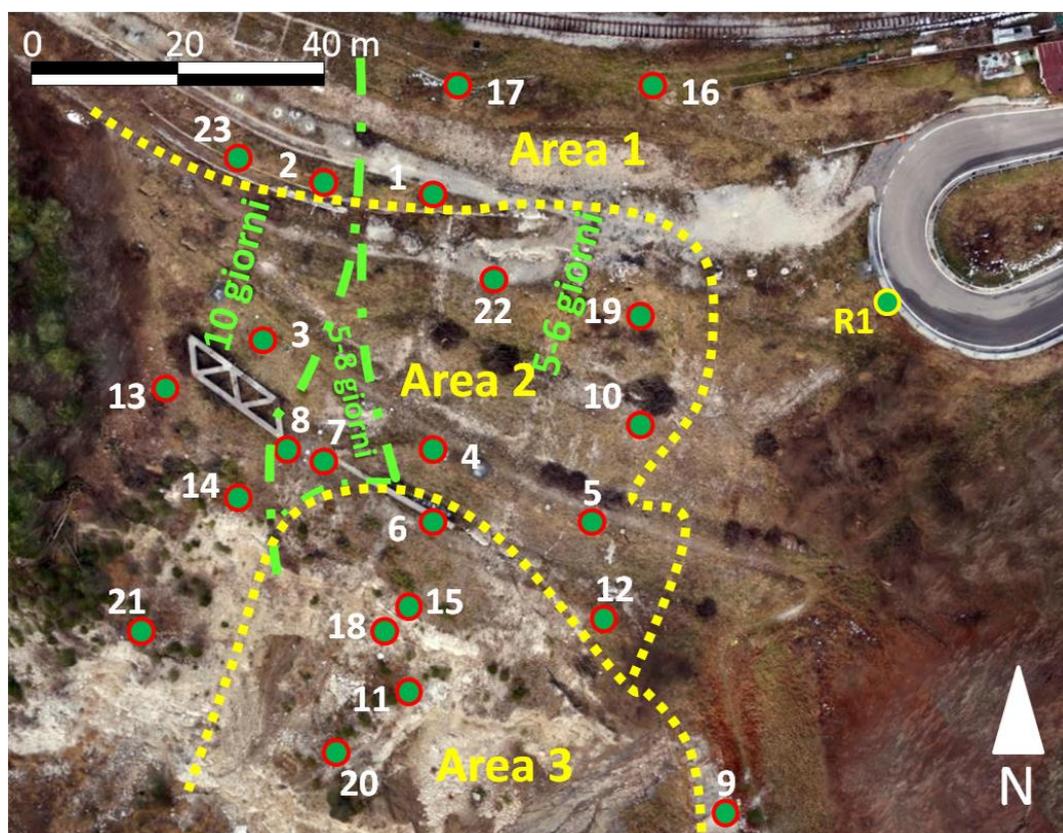


Figura 106 Zonazione di ritardo nella risposta alla sollecitazione pluviometrica del corpo di frana, sovrapposta alla zonazione cinematica. Immagine riportata nella “Relazione tecnica inerente alla Seconda Fase della Convenzione. Definizione delle soglie di allertamento del fenomeno franoso della Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL)” nell’ambito della Convenzione di ricerca fra la Regione del Veneto (Dipartimento Difesa del Suolo e Foreste, Sezione Difesa del Suolo) e l’Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geoscienze), datata 2015 e stilata dall’Università degli Studi di Padova, (Dipartimento di Geoscienze, Responsabile Scientifico: dott. A. Galgaro) [56].

6.4.2.4 Definizione delle soglie di pre-allarme e allarme

I risultati degli studi pluviometrici e cinematici confluiscono nella definizione delle soglie di pre-allarme (Figura 107) e di allarme (Figura 108), riportate nella *relazione relativa alla Seconda Fase della Convenzione di ricerca* [56]. Si ricorda che $\langle V_{AREAn} \rangle$ consiste nella media spaziale (media giornaliera) della velocità nell'Area n (n= 1,2,3) [56].

Per quanto riguarda le soglie di pre-allarme si distingue un pre-allarme di 1° livello, che consiste in una condizione di suscettibilità a sviluppare eventi più gravi di quelli relativi alla situazione di pre-allarme di 2° livello [56]. Le soglie di pre-allarme, così come quelle di allarme, sono formulate secondo una logica di tipo cautelativo ed è sufficiente il superamento di una sola delle soglie per trovarsi nella corrispondente condizione di pre-allarme (Figura 107) [56].

| Elemento da considerare | | Soglia di preallarme di secondo livello | Soglia di preallarme di primo livello |
|-------------------------|---|---|---------------------------------------|
| (a) | Superamento della soglia di precipitazioni giornaliere pari a: | 40 mm | 80 mm |
| (b) | Superamento della soglia di precipitazioni cumulative a 15 giorni pari a: | 150 mm | 200 mm |
| (c) | La velocità media giornaliera di due o più riflettori nell'area 2 e/o 3 tende a superare di un fattore f_1 quella tipica dell'area di appartenenza | $f_1 \geq 2$ | $f_1 \geq 3$ |
| (d) | Mancato rilassamento cinematico al termine di un periodo di forti precipitazioni, ossia la velocità media non tende a diminuire all'azzerarsi della cumulativa pluviometrica 15 giorni per un periodo pari a f_2 giorni | $f_2 \geq 30$ giorni | $f_2 \geq 60$ giorni |
| (e) | In assenza di precipitazioni oltre le soglie di preallarme, ossia nell'ipotesi che non si verifichi nessuna delle condizioni (a) e (b), le velocità medie dei riflettori dell'area 2 tendono ad uniformarsi a quelle dell'area 3, con $\langle v_{AREA 2} \rangle = f_3 \langle v_{AREA 3} \rangle$ | $f_3 \geq 0.85$ | $f_3 \geq 0.9$ |

Figura 107 Soglie di pre-allarme di primo e secondo livello per la frana di Sant'Andrea, in comune di Perarolo di Cadore (BL), riportate nella "Relazione tecnica inerente alla Seconda Fase della Convenzione. Definizione delle soglie di allertamento del fenomeno franoso della Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL)" nell'ambito della Convenzione di ricerca fra la Regione del Veneto (Dipartimento Difesa del Suolo e Foreste, Sezione Difesa del Suolo) e l'Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geoscienze), datata 2015 e stilata dall'Università degli Studi di Padova, (Dipartimento di Geoscienze, Responsabile Scientifico: dott. A. Galgaro) [56].

| Elemento da considerare | | Soglia di allarme |
|-------------------------|--|-------------------------|
| (a) | Superamento della soglia di precipitazioni giornaliere pari a: | 120 mm |
| (b) | Superamento della soglia di precipitazioni cumulative a 15 giorni pari al valore indicato e le velocità dei riflettori presentano fluttuazioni significative | 400 mm |
| (c) | La velocità media giornaliera di due o più riflettori nell'area 2 e/o 3 tende a superare di un fattore f_{A1} quella tipica dell'area di appartenenza | $f_{A1} \geq 5$ |
| (d) | Mancato rilassamento cinematico al termine di un periodo di forti precipitazioni, ossia la velocità media non tende a diminuire all'azzerarsi della cumulativa pluviometrica 15 giorni per un periodo pari a f_{A2} giorni | $f_{A2} \geq 90$ giorni |
| (e) | In presenza di precipitazioni oltre una delle soglie di attenzione o di allarme, le velocità medie dell'area 2 tendono ad uniformarsi a quelle dell'area 3, con $\langle v_{AREA2} \rangle \approx f_{A3} \langle v_{AREA3} \rangle$ | $f_{A3} \geq 0.85$ |
| (f) | Le velocità medie dell'area 1 tendono a raggiungere valori fuori dei trend caratteristici per l'area, ossia $\langle v_{AREA1} \rangle \approx f_{A4} \langle v_{AREA3} \rangle$ | $f_{A4} \geq 0.5$ |

Figura 108 Soglie di allarme per la frana di Sant'Andrea, in comune di Perarolo di Cadore (BL), riportate nella "Relazione tecnica inerente alla Seconda Fase della Convenzione. Definizione delle soglie di allertamento del fenomeno franoso della Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL)" nell'ambito della Convenzione di ricerca fra la Regione del Veneto (Dipartimento Difesa del Suolo e Foreste, Sezione Difesa del Suolo) e l'Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geoscienze), datata 2015 e stilata dall'Università degli Studi di Padova, (Dipartimento di Geoscienze, Responsabile Scientifico: dott. A. Galgaro) [56].

Le soglie riportate al punto e) di pre-allarme (Figura 107) e di allarme (Figura 108) e la soglia al punto f) di allarme (Figura 108) sono introdotte perché consentono di determinare il grado di evoluzione del fenomeno sul corpo di frana, ovvero i volumi coinvolti da movimenti maggiori e, quindi, potenzialmente collassabili (il volume instabile dell'Area 1 è stimato di 90.000 m³, dell'Area 2 di 100.000 m³, dell'Area 3 di 50.000 m³ [56]). Nel caso di superamento della soglia e) i volumi coinvolti sarebbero quelli rispettivi delle aree 2 e 3 (circa 150.000 m³), mentre nel caso di superamento della soglia f) il volume collassabile corrisponderebbe alla somma di quelli attribuiti a tutte e tre le aree [56]. Va tenuto presente che il solo collasso dell'intera Area 3 con un volume di circa 50.000 m³ determinerebbe l'ostruzione del Boite e il coinvolgimento di parte dell'abitato di Perarolo nel movimento del materiale, secondo quanto riportato nel paragrafo sulla valutazione del rischio per Perarolo e nello *“Studio della frana di Perarolo di Cadore (BL)” del 2011 dell'Università degli Studi di Padova* [54].

Secondo le curve di possibilità pluviometrica calcolate nella relazione dello *Studio Galli (2012)* [45], le soglie pluviometriche di pre-allarme di secondo livello potrebbero essere superate una o due volte all'anno, mentre quelle di allarme hanno tempi di ritorno decennali [56]. Tali osservazioni devono essere, però, tenute in considerazione con una certa cautela dati i cambiamenti climatici in atto [56].

Alcune azioni raccomandate nel caso di superamento delle soglie di preallarme potrebbero essere (in maniera compatibile con le procedure di rito e di normativa specifica ed in funzione del livello di preallarme):

“ ...

- I) *Avviso immediato degli organi competenti, in particolare delle Autorità pubbliche e della Protezione civile, di presenza di condizioni innescanti rappresentate da una variazione potenzialmente critica del comportamento del corpo in dissesto;*

- II) Riprogrammazione immediata (preferibilmente automatizzata, e comunque già nel caso del superamento di una delle soglie di preallarme di 2° livello) degli intervalli di acquisizione della stazione totale robotizzata, con passaggio da 6 ore (4 acquisizioni giornaliere) ad un'ora (24 acquisizioni giornaliere), in modo da migliorare la risoluzione temporale del campo di spostamenti;*
- III) Verifica continua dell'evoluzione prevista delle condizioni meteorologiche, considerato che le alterazioni della cinematica della frana sono indotte dalle precipitazioni e che comunque si osserva un ritardo nella risposta, in genere pari a 5/6 giorni per gli eventi verificatisi per periodo analizzato, a repentine variazioni del regime pluviometrico giornaliero ...” (dalla relazione dell'Università degli Studi di Padova relativa alla Seconda Fase della Convenzione di ricerca, 2015 [56]).*

CAPITOLO 7: Elaborazione dei dati di monitoraggio

7.1 Introduzione

Nel corso dei mesi da marzo a luglio 2018, si sono elaborati i dati di monitoraggio della frana di Sant'Andrea relativi alla stazione topografica totale robotizzata, sita sul tetto della caserma dei Vigili del Fuoco di Perarolo, e ai rilievi fotogrammetrici con drone del versante in frana, eseguiti in data 10/05/2018 ed in parte seguiti dallo scrivente. Nel corso della primavera 2018, inoltre, è stato effettuato un rilievo Lidar (di un'area comprensiva del versante in frana e di parte del versante opposto in destra Boite) ed il già citato rilievo GPS delle fessure del terreno sul corpo di frana e delle opere antropiche presenti, datato 27 marzo 2018.

La campagna di rilievi menzionata è stata commissionata dall'*Università degli Studi di Padova* e così pure i dati relativi sono stati forniti dalla stessa. Infine, si ricorda che le misure della stazione topografica totale robotizzata sono raccolte nella centrale di Mestre (VE) della *Protezione Civile della Regione del Veneto*, mentre i dati climatici (precipitazioni e temperature) registrati dalla stazione meteorologica di Perarolo di Cadore (BL), richiamata in occasione dell'inquadramento climatico-idrologico dell'area, sono gestiti dall'*ARPAV* (Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto).

Si riportano e commentano, di seguito, i risultati delle elaborazione dei dati, eseguite attraverso l'utilizzo di alcuni software tra cui:

- *QGIS* (versione 2.18.11)= software open source;
- *MATLAB* (versione R2017a) di *MathWorks, Inc.*= software proprietario con licenza 'academic use', disponibile per gli studenti dell'*Università degli Studi di Padova*;

- *MICROSOFT EXCEL 2013* di *Microsoft Corporation*= software proprietario con licenza ‘academic use’, disponibile per gli studenti dell’Università degli Studi di Padova.

7.2 Elaborazione dei dati della stazione topografica totale robotizzata

7.2.1 Introduzione

Come già menzionato nei capitoli precedenti, dal novembre 2013 [55] il monitoraggio della frana di Sant’Andrea avviene attraverso il rilievo da parte della stazione topografica totale robotizzata della posizione di alcune mire ottiche disposte sul corpo di frana (attualmente 46, con le 10 aggiunte nel luglio 2018 e le 5 mire di riferimento ‘stabili’ poste al di fuori dell’area in frana ad eccezione della mira R1bis, che ha sostituito la R1 e che si trova in prossimità del tornante della salita della Cavallera). La stazione è localizzata sul tetto della caserma dei Vigili del Fuoco di Perarolo all’interno di un’apposita costruzione, che la ripara dalle intemperie (Figura 109).

Lo strumento (Figura 110) consiste in un dispositivo laser posto su una piattaforma rotante, prodotto da *Leica Geosystems AG* (modello TM30). Le misurazioni prevedono il rilevamento della distanza di ciascuna mira ottica dalla stazione topografica totale e della relativa posizione nello spazio. La stazione invia impulsi laser nella direzione di ciascuna



Figura 109 Caserma dei Vigili del Fuoco di Perarolo, sul tetto della quale si trova la costruzione (nel cerchio rosso) che ospita la stazione topografica totale robotizzata. Foto dello scrivente del 29/05/2018.



Figura 110 Stazione topografica totale robotizzata attiva a Perarolo (modello TM30, prodotto da *Leica Geosystems AG*). Foto dello scrivente 29/05/2018.

mira ottica, la cui posizione del rilievo precedente è contenuto come informazione in una memoria interna al dispositivo, riorientandosi nello spazio attraverso il sistema di rotazione, qualora non riscontrasse la presenza della mira, finché non viene registrato un ritorno del segnale inviato (indice di identificazione della posizione della mira in esame). La distanza di ciascuna mira dalla stazione topografica totale viene determinata attraverso il tempo intercorso fra l'invio dell'impulso laser ed il suo ritorno alla stazione stessa, mentre la sua ubicazione nello spazio viene identificata attraverso gli angoli di rotazione che la stazione ha eseguito per rilevare la mira stessa. Il sistema di riferimento sul quale vengono eseguite le misure è un sistema locale centrato sulla stazione topografica totale con l'asse x orientato all'incirca lungo la direzione di massima pendenza del versante in frana (intorno ai 232°N) con porzione negativa dalla stazione verso Sant'Andrea, l'asse y a 90° dall'asse x (secondo la regola della mano destra) e l'asse z in direzione verticale positiva verso l'alto (Figura 111).

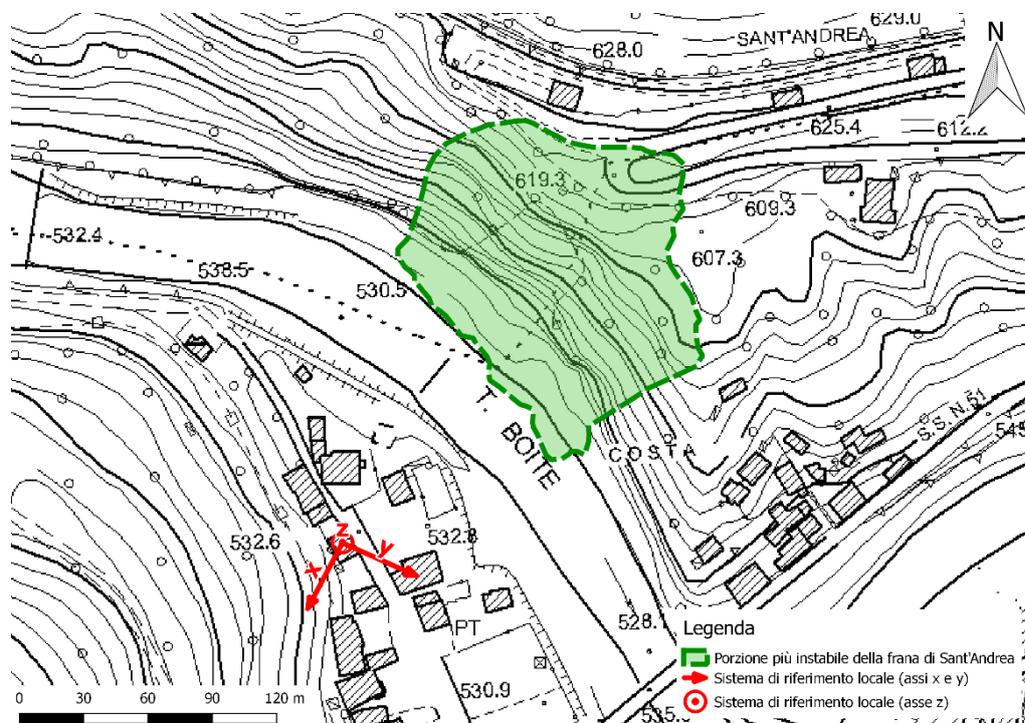


Figura 111 Sistema di riferimento locale sul quale la stazione topografica totale esegue le misure.

La stazione topografica totale esegue le misure ogni ora solamente per alcune mire, mentre per altre ogni 6 ore (l'intervallo temporale di campionamento dei dati può essere, però, modificato in funzione dell'attività del fenomeno franoso e dal livello di allerta). Ogni ciclo di misurazione (si parla di "ciclo di misurazione", poiché si intende che vengono misurate le posizioni di più mire) inizia con il rilevare le posizioni delle mire di riferimento e ritenute 'stabili' (ovvero delle mire R1, R2, R3, R4 e R5), utili a posizionare la stazione topografica nello spazio rispetto a questi riferimenti. Le determinazioni successive delle posizioni degli altri riflettori sono riferite alle misure condotte nei primi istanti del ciclo di misurazione. Per affinare i risultati, la localizzazione delle mire 'stabili' viene eseguita anche alla fine di ogni ciclo.

Per ogni ciclo di misurazione e per ogni mira si registrano, dunque, i seguenti dati: l'istante temporale di rilevamento del dato, le 3 coordinate sferiche (ovvero gli angoli di rotazione attorno agli assi del sistema di riferimento locale seguiti dalla stazione per rilevare la posizione della mira) e le 3 coordinate metriche (x, y, z nel sistema di riferimento locale, che rappresentano il vettore 'distanza' tra la mira e la stazione topografica totale).

La disposizione planimetrica delle mire della stazione topografica totale a giugno 2018 è riportata in Figura 112. Si ricorda come non tutte le mire sono presenti dal novembre 2013 ovvero dalla data di inizio dell'attività della stazione topografica totale: le mire dalla P24 alla P29 sono state aggiunte nel maggio 2016, mentre la P30 e la P31 nel maggio 2017.

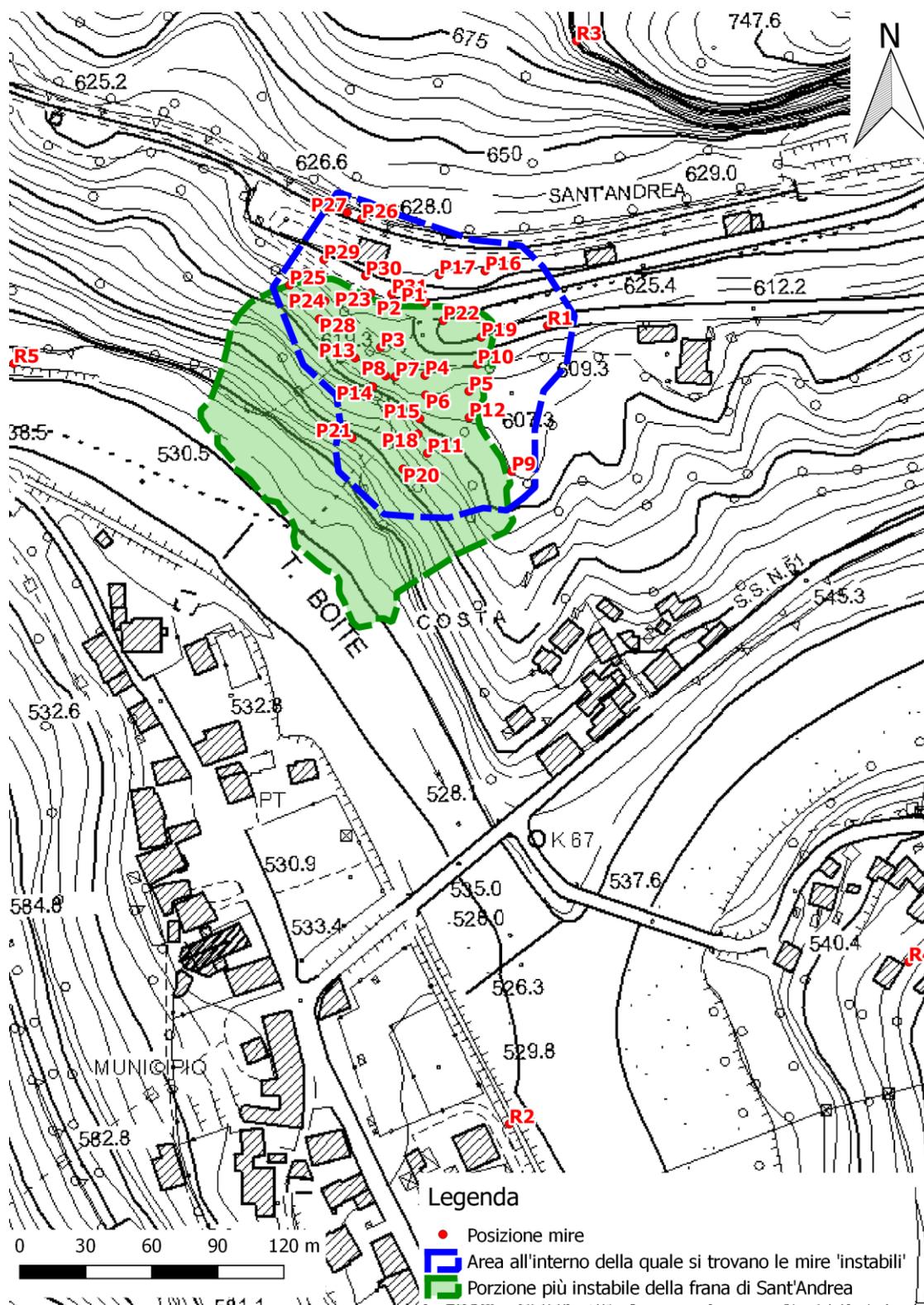


Figura 112 Ubicazione delle mire ottiche della stazione topografica totale robotizzata a giugno 2018.

7.2.2 Rilevamento della posizione delle mire ottiche

Il 24 maggio 2018 è stato effettuato il catasto delle mire ottiche disposte sul versante in frana (esempio di mira ottica in Figura 113) e ne è stata rilevata la posizione attraverso l'utilizzo di una corda metrica e di una bussola. L'ubicazione dei riflettori è stata riferita a dei punti facilmente identificabili in carta ed in ortofoto, quali gli spigoli dei cordoli di cemento o le teste dei



Figura 113 Foto dello scrivente per l'attività di catasto delle mire ottiche della stazione topografica totale robotizzata di Perarolo, datata 24/05/2018.

pozzetti presenti. Il risultato del lavoro, confrontato poi con i dati dei rilievi GPS del 27 marzo 2018, è riportato in Figura 114. Per le mire assenti, perché asportate da terzi oppure cadute (P11, P16, P18, P20 e P29), e per la mira P21 situata in una zona di difficile accesso, la posizione attribuita in Figura 114 è quella iniziale, fornita dall'Università degli Studi di Padova.

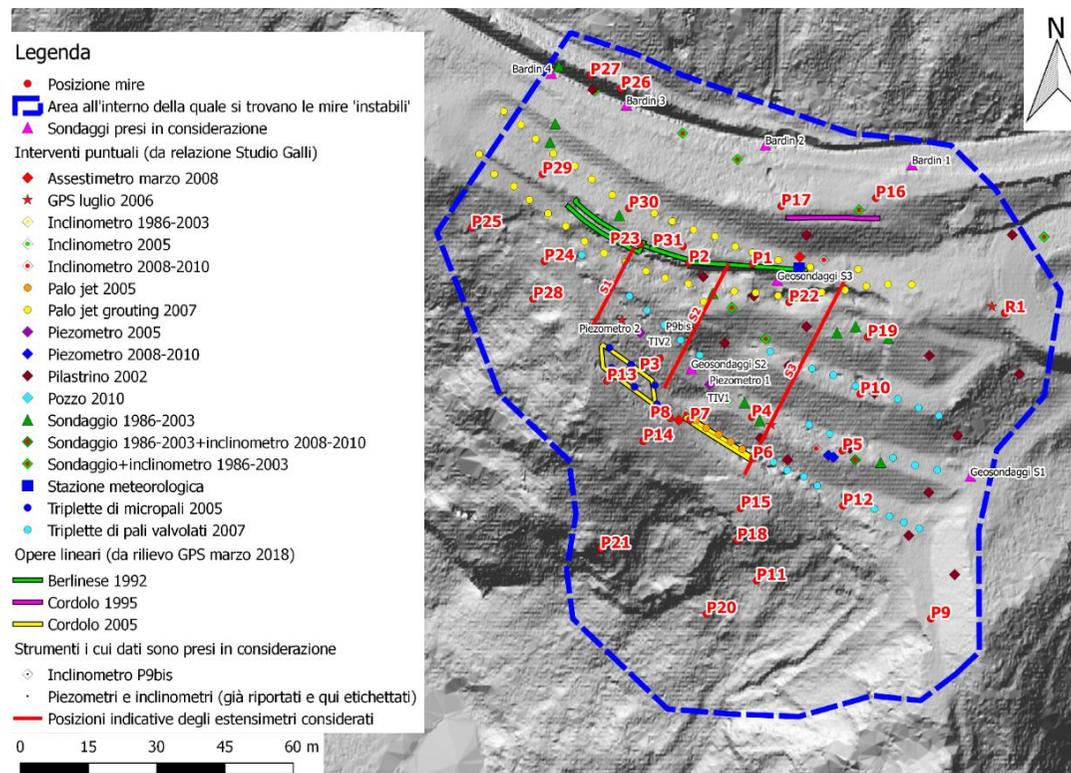


Figura 114 Disposizione planimetrica delle mire ottiche della stazione topografica robotizzata di Perarolo di Cadore (perimetrata con la linea blu tratteggiata), ubicate sul od in prossimità del corpo di frana di Sant'Andrea, e degli interventi realizzati sul versante (quelli puntuali sono frutto dell'estrapolazione in QGIS da parte dello scrivente delle informazioni reperibili dalla planimetria riportata nella relazione dello Studio Galli [45], mentre quelle lineari derivano dal rilievo GPS del 27/03/2018 condotto dall'Università degli Studi di Padova). Si rappresentano, inoltre, i punti in cui sono stati eseguiti i sondaggi presi in considerazione per la stesura del modello geologico concettuale (triangoli fucsia) e le posizioni indicative degli estensimetri considerati nei paragrafi successivi, secondo la planimetria di CLIOS s.r.l. [8]. La localizzazione dei riflettori è frutto del confronto fra il rilievo con cordella metrica e bussola del 24/05/2018 (eseguito dallo scrivente) e il rilievo con GPS del 27/03/2018 (condotto dall'Università degli Studi di Padova). Sullo sfondo è riproposto l'hillshade del DEM ottenuto dai rilievi Lidar della primavera 2018, commissionati dall'Università degli Studi di Padova.

7.2.3 Calcolo dei campi di spostamento negli intervalli di tempo intercorsi fra l'aggiunta di nuove mire

7.2.3.1 Analisi ed interpretazione dei risultati

Una prima elaborazione dei dati della stazione topografica totale di Perarolo di Cadore è stata eseguita in *MATLAB* e consiste nella definizione degli spostamenti avvenuti negli intervalli di tempo intercorsi tra l'aggiunta di nuove mire. I risultati sono rappresentati in *QGIS*, interpolando (con l'algoritmo *'Multilevel b-spline interpolation'* di *SAGA 2.3.2*) e facendone, poi, il contour (con l'algoritmo *'Contour'* di *GDAL/OGR*) degli spostamenti registrati alle mire. Si sono, poi, raffigurati i vettori spostamento per ciascuna mira, la cui lunghezza è proporzionale alla componente sul piano orizzontale del vettore stesso, chiamata *'dxy'*; l'etichetta a fianco di ogni vettore ne riporta il modulo complessivo, ovvero lo spostamento totale *'dxyz'*. L'unità di misura dello spostamento è in *'cm'*.

Per semplicità nel descrivere i risultati ottenuti (sia in questo paragrafo che nei successivi) si riportano nelle diverse mappe dei campi di spostamento calcolati le posizioni di alcuni elementi di riferimento (Figura 115): i cordoli di cemento (sia quello del 1992, che quelli più a valle del 2005 –rispettivamente linea verde e linee gialle in Figura 115 a sinistra-) ed alcuni elementi geomorfologici lineari, quali la nicchia della porzione più instabile della frana rilevabile lungo il cordolo del 1992 e sul fianco sinistro (linea rossa in Figura 115 a sinistra) e l'orlo di scarpata di degradazione a valle dei cordoli del 2005 (linea azzurra in Figura 115 a sinistra). Si rappresenta, inoltre, il perimetro dell'area all'interno della quale si trovano le mire e per cui il risultato dell'interpolazione degli spostamenti può essere considerato significativo (Figura 115 a destra, linea blu tratteggiata). L'estensione di tale area varia nel tempo in funzione delle numero di mire disponibili per il calcolo del campo di spostamento. Infine, la base topografica della rappresentazione degli elaborati riportati nei prossimi paragrafi è l'hillshade del DEM ottenuto dai rilievi Lidar della primavera 2018, commissionati

dall'Università degli Studi di Padova (con le relative curve di livello in qualche caso).

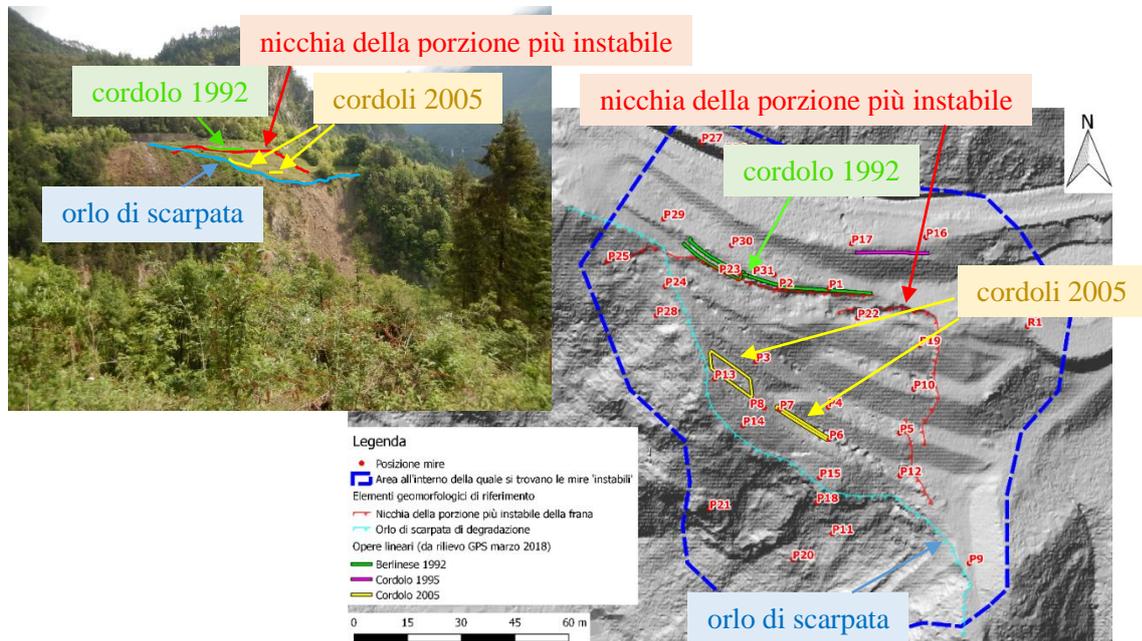


Figura 115 A destra planimetria con gli elementi di riferimento per la descrizione dei campi di spostamento ottenuti dalle elaborazioni. A sinistra relativa identificazione degli elementi suddetti in campagna (foto dello scrivente del 29/05/2018).

Gli intervalli temporali in cui è stata suddivisa la serie temporale dei dati disponibili a partire dal novembre 2013 al giugno 2018 in funzione dell'aggiunta di nuove mire ottiche sono i seguenti:

- 1) 30/11/2013-26/05/2016 (Figura 116 ed in allegato, mire presenti dalla P1 alla P23) = in tale intervallo temporale gli spostamenti maggiori sono localizzati nella porzione a valle ed a monte del cordolo lineare (ovvero in corrispondenza della porzione più attiva della scarpata di degradazione), disponendosi in una fascia orientata Nord-Sud (rettangolo rosso in Figura 116);

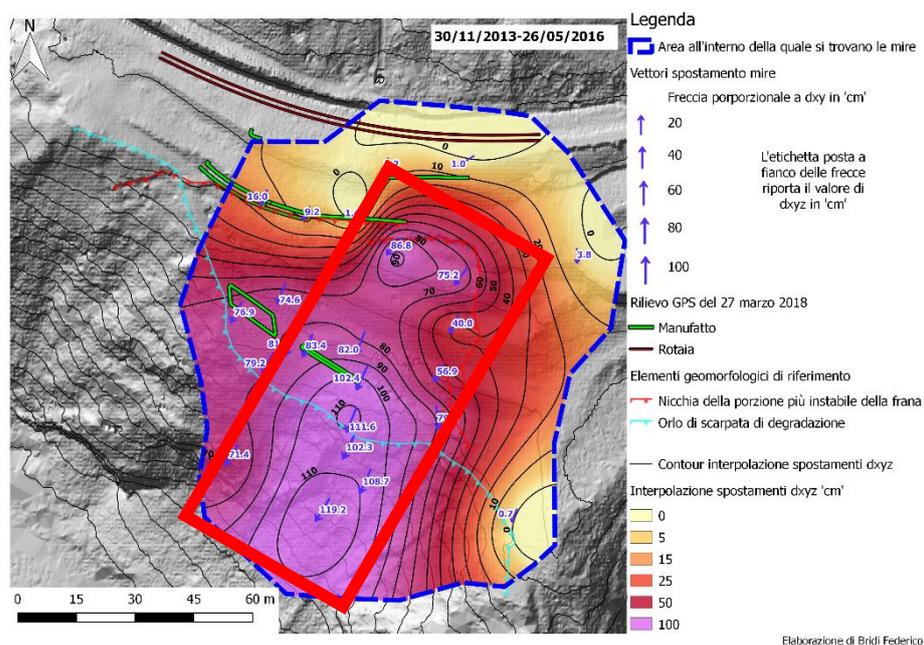


Figura 116 Campo degli spostamenti tra novembre 2013 e maggio 2016 della frana di Sant'Andrea. Viene evidenziata la fascia ad elevati spostamenti orientata N-S (rettangolo rosso).

- 2) 26/05/2016-09/05/2017 (Figura 117 ed in allegato, aggiunte mire dalla P24 alla P29) = la zona a spostamenti maggiori resta posizionata a valle della scarpata di degradazione (cerchio rosso in Figura 117). Si nota altresì una forma ad 'M' di una fascia caratterizzata da spostamenti intermedi (linea gialla in Figura 117), probabilmente legata al processo di interpolazione (l'aggiunta delle nuove mire nel settore più occidentale consente di definire meglio il campo di spostamento in quella zona);

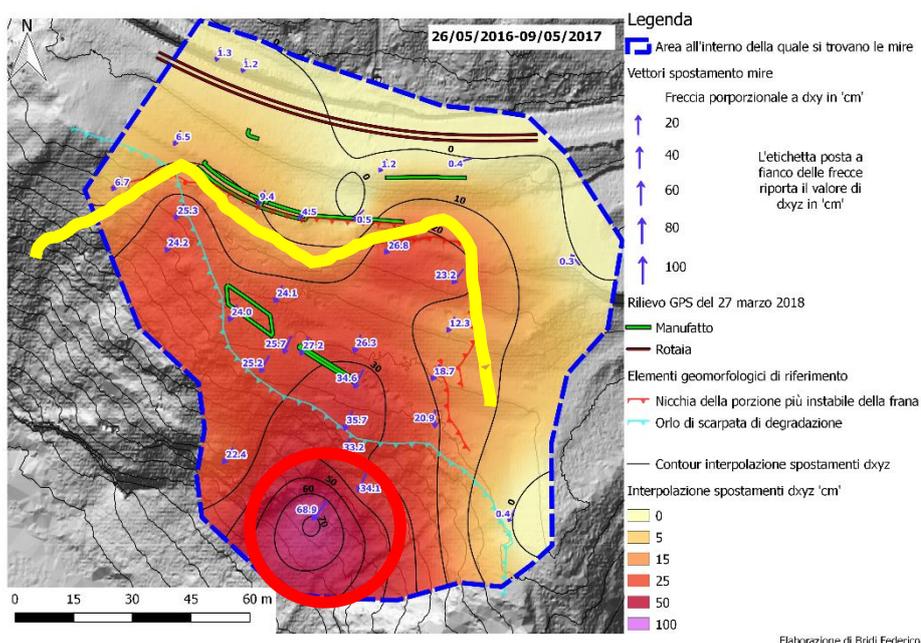


Figura 117 Campo degli spostamenti tra maggio 2016 e maggio 2017 della frana di Sant'Andrea. Viene evidenziata la forma a 'M' della fascia a spostamenti intermedi (linea gialla) e la zona a maggior spostamento a valle del cordolo lineare (cerchio rosso).

- 3) 09/05/2017-07/06/2018 (Figura 118 ed in allegato, aggiunta mire P30 e P31)= si osserva in questo periodo nuovamente la forma ad 'M' della fascia mediana del campo di spostamenti (linea gialla in Figura 118), la quale, però, a differenza dell'intervallo di tempo precedente è caratterizzata da spostamenti elevati in prossimità del cordolo tirantato e fondato su micropali (o berlinese) del 1992 (cerchio azzurro in Figura 118). L'incremento degli spostamenti in tale zona può essere correlato con l'evento del 12 dicembre 2017, in cui probabilmente alcuni tiranti del cordolo sono saltati (Figura 119). Persistono, infine, gli elevati movimenti nella zona del cordolo lineare (cerchio rosso in Figura 118).

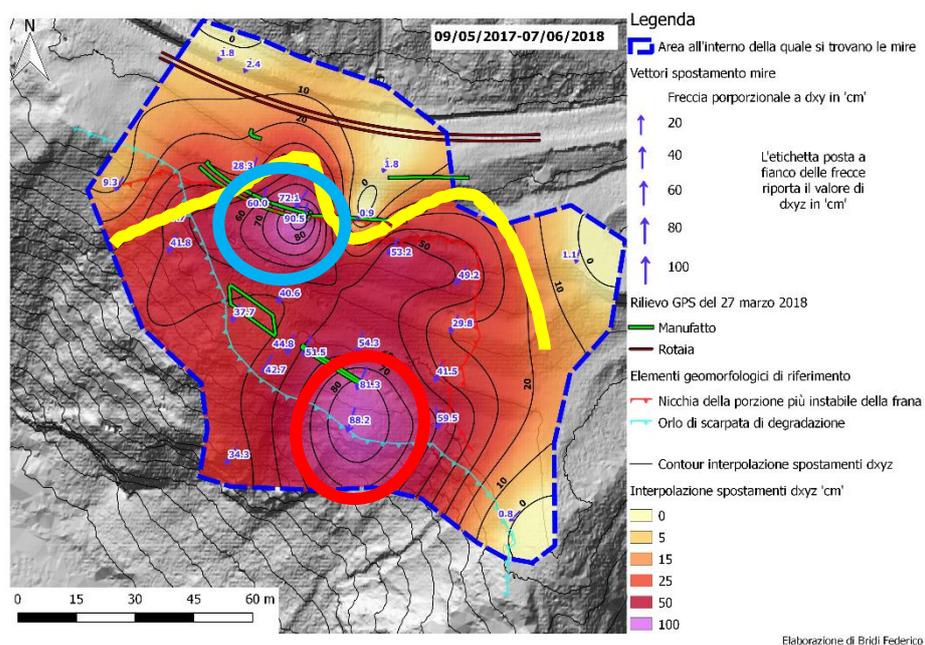


Figura 118 Campo degli spostamenti tra maggio 2017 e giugno 2018 della frana di Sant'Andrea. Viene evidenziata la forma a 'M' della fascia a spostamenti intermedi (linea gialla) con il settore a spostamenti più intensi in corrispondenza della berlinese (cerchio azzurro) e la zona a maggior spostamento a valle del cordolo lineare (cerchio rosso).



Figura 119 Tirante estremamente deformato e tranciato a tergo del cordolo di cemento del 1992, il quale si è svincolato dalla struttura retrostante probabilmente in occasione dell'evento del 12 dicembre 2017. Foto dello scrivente 29/05/2018.

I campi di spostamento rappresentati in Figura 116, Figura 117 e Figura 118 sono calcolati su intervalli temporali fra loro diversi e, quindi, sono difficilmente confrontabili. Normalizzando i valori degli spostamenti ottenuti sull'intervallo di tempo in cui si sono sviluppati, è possibile raffrontare i campi nei tre periodi considerati al fine di riscontrare eventuali cambiamenti. In questo caso, però, i parametri analizzati non hanno più le dimensioni di una lunghezza come gli spostamenti, ma sono degli spostamenti mediati su un intervallo temporale e, quindi, dimensionalmente delle velocità, le quali vengono espresse in 'cm/bimestre' ovvero 'cm/(60 giorni)'. Tale unità di misura è stata scelta per favorire la comparazione con le elaborazioni successive.

In Inserto 2 sono, dunque, riportati i campi di spostamento mediati ciascuno sugli intervalli di tempo specificati nella porzione inferiore della mappa. I periodi temporali considerati sono i medesimi analizzati in precedenza. I campi di spostamento mediati hanno caratteristiche in termini delle variazioni spaziali della variabile considerata simili a quelli dei campi di spostamento semplici riportati in Figura 116, Figura 117 e Figura 118. La differenza sta nei valori assunti dalla variabile 'spostamento mediato' (o 'velocità media' o 'trend medio di spostamento') e nella possibilità di comparare i risultati delle elaborazioni per i tre diversi intervalli di tempo.

Si paragonano, di seguito, i campi di spostamento mediati (Inserto 2), che permettono di riportare alcune considerazioni sui trend di variazioni degli spostamenti nei vari periodi ovvero sull'evoluzione dei movimenti del versante in frana:

- 1) dal periodo 30/11/2013-26/05/2016 al 26/05/2016-09/05/2017 gli 'spostamenti mediati' mostrano una generale diminuzione, eccetto che per le mire P2, P9, P16, P20 e P23. La differenza per gran parte delle mire è dell'ordine dei 'mm/bimestre' o anche inferiore: solo le mire P11, P12 (mira che ha diminuito maggiormente la 'velocità media'), P15, P18 e P22 mostrano diminuzioni degli 'spostamenti mediati' che si aggirano su 1 cm/bimestre, mentre per la P20 si rileva un aumento di 4 cm/bimestre

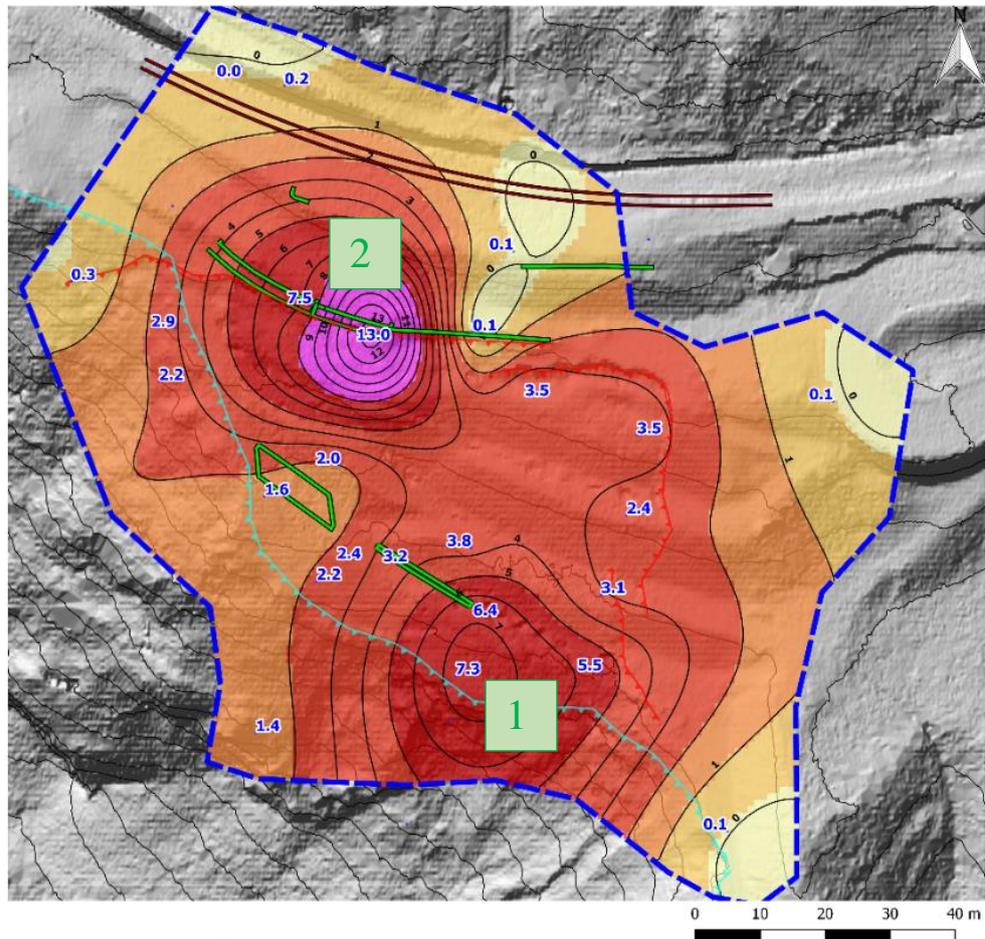
(mira che aumenta maggiormente la ‘velocità media’). Le ‘velocità media’ nell’intervallo 2013-2016 sono comprese fra i minimi di 0.0 cm/bimestre della mira P9 (ovvero uno spostamento bimestrale medio inferiore dell’errore strumentale, cfr. al capitolo sul monitoraggio della frana di Sant’Andrea) e i 7.9 cm/bimestre della P20 e con una media su tutte le mire (escluse le mire di riferimento R2, R3, R4 e R5) di 4 cm/bimestre, mentre nel periodo 2016-2017 i valori della variabile in esame si attestano fra i 0.1 cm/bimestre delle mire P1, P9 e R1 e gli 11.9 cm/bimestre della P20, con valor medio su tutte le mire (escluse le mire di riferimento R2, R3, R4 e R5) di 3.2 cm/bimestre;

- 2) nel periodo 09/05/2017-07/06/2018 i valori degli ‘spostamenti mediati’ si aggirano fra i 0.1 cm/bimestre della mira P9 ai 13.8 cm/bimestre della P2 con una media su tutte le mire (escluse le mire di riferimento R2, R3, R4 e R5) di 6 cm/bimestre circa . Si specifica che in tale intervallo di tempo i dati delle mire P11, P16, P18, P20 e P29 mancano a causa della perdita di tali riflettori per rimozione da parte di terzi o per caduta di quelle poste sulla od in prossimità della scarpata di degradazione. Se confrontati i dati del periodo 09/05/2017-07/06/2018 con quelli del periodo 26/05/2016-09/05/2017 si osserva come gli ‘spostamenti mediati’ e, quindi, il trend evolutivo dei movimenti del versante mostrino un *incremento* per tutte le mire (eccetto per le mire P1 e P9). Le mire P17, P25, P26, P27 e R1 aumentano gli ‘spostamenti mediati’ di qualche mm/bimestre, la P21 e la P13 subiscono incrementi tra 1-2 cm/bimestre, le P3, P8, P10, P14, P24 e P28 tra 2-3 cm/bimestre, le P4, P5, P7, P19 e P22 tra 3-4 cm/bimestre, la P12 di circa 5 cm/bimestre, la P6 di circa cm/bimestre, le P15 e P23 fra 7-8 cm/bimestre ed, infine, la P2 mostra l’aumento maggiore pari a circa 13 cm/bimestre. Le mire P30 e P31, aggiunte nell’ultimo periodo considerato si sono spostate con ‘velocità medie’ rispettivamente di 4.3 cm/bimestre e 11 cm/bimestre;
- 3) dal confronto tra gli ‘spostamenti mediati’ dei periodi 30/11/2013-26/05/2016 e 09/05/2017-07/06/2018 si nota come essi siano *in generale*

aumentati, con le sole mire P17 e R1 che mostrano valori simili. Anche in questo caso la mira P2 è quella in cui si rileva un maggior incremento intorno ai 13.2 cm/bimestre.

Per riassumere si può osservare come dal periodo 2013-2016 al periodo 2016-2017 vi sia una generale diminuzione dei movimenti del versante in frana ad eccezione delle due mire poste sulla berlinese del 1992 (P2 e P23), le quali mostrano incrementi di qualche mm/bimestre (pari al 33-36%) della 'velocità media', e della mira P20, situata nella porzione più a valle ed instabile della scarpata di degradazione, con un incremento di 4 cm/bimestre (circa del 51%). Successivamente nel periodo 2017-2018 si riscontra un importante e generale incremento dei movimenti, registrati dalle mire della stazione topografica totale di Perarolo. Gli incrementi del 'trend medio di spostamento' rispetto all'intervallo temporale precedente del 2016-2017 variano dai mm/bimestre alla decina di cm/bimestre come riportato in Figura 120.

VARIAZIONE DEL TREND MEDIO DI SPOSTAMENTO (ESPRESSO IN 'CM/BIMESTRE') TRA I DUE INTERVALLI DI TEMPO CORRISPONDENTI A 09/05/2017-07/06/2018 E 26/05/2016-09/05/2017



Legenda

- ▬ Area all'interno della quale si trovano le mire
- Posizione delle mire con etichetta la variazione del trend medio di spostamento in 'cm/bimonth'
- Rilievo GPS del 27 marzo 2018
- ▬ Manufatto
- ▬ Rotaia
- Elementi geomorfologici di riferimento
- ▬ Nicchia della porzione più instabile della frana
- ▬ Orlo di scarpata di degradazione
- ▬ Contour dell'interpolazione della variazione del trend medio di spostamento in 'cm/bimonth'
- Interpolazione della variazione del trend medio di spostamento in 'cm/bimonth'
- <= 0.1
- 0.1 - 1
- 1 - 2
- 2 - 5
- 5 - 8
- > 8

Elaborazione di Bridi Federico

Figura 120 Variazione del 'trend medio di spostamento' ovvero dello 'spostamento mediato' tra il periodo 26/05/2016-09/05/2017 e il periodo 09/05/2017-07/06/2018. Valori di variazioni positivi indicano un incremento del trend di spostamento medio osservato all'intervallo temporale più recente, valori negativi suggeriscono, invece, una diminuzione interpolazione dei valori di variazione percentuale del trend medio di spostamento.

In Figura 120 si osserva come le variazioni del trend di spostamento medio siano tutte positive ad indicare un aumento dei movimenti del versante instabile dal 2016-2017 al 2017-2018. Le zone che hanno subito incrementi di maggior entità sono quelle individuate dal colore rosso scuro e fucsia in Figura 120: esse coincidono con la porzione in prossimità dell'orlo centro-orientale della scarpata di degradazione (segnata con il numero 1 in Figura 120) e con il settore occupato dal cordolo tirantato del 1992 (segnato con il numero 2 in Figura 120). Quest'ultima area è caratterizzata anche dagli incrementi maggiori, evidenziati dal color fucsia e che raggiungono i 13 cm/bimestre.

Come esposto nei capitoli precedenti, però, la cinematica della frana di Sant'Andrea non è omogenea ed uniforme, ma si riscontrano porzioni caratterizzate da movimenti di entità differenti [56]. Pertanto, si esprimono gli aumenti del trend di spostamento medio, riscontrati in Figura 120 e riportati con unità di misura cm/bimestre, in termini percentuali (Figura 123). Il risultato è analogo e si riscontrano le due zone caratterizzate da un maggior incremento come osservato in precedenza. La media degli aumenti registrati alle diverse mire si aggira intorno al 156%. Osservando la distribuzione dei valori percentuali di variazione del trend medio di spostamento, si riconoscono alcune zone, evidenziate in Figura 123, quali:

- 1) l'area (Figura 123 – area A) in prossimità del cordolo tirantato del 1992 (mire P1, P2 e P23), caratterizzata dagli incrementi percentuali più elevati oltre il 300% fino a raggiungere il 1669% alla mira P2. Si nota con interesse come la mira P1, situata nel settore lungo circa 20 m posto più a est (Figura 122), non mostri incrementi importanti come quelli registrati dalle altre mire disposte sulla stessa opera. Tale evidenza, confermata anche sul campo dal rilievo sullo



Figura 121 Micropalo del deformato del cordolo tirantato del 1992. Foto dello scrivente del 29/05/2018.

- stato dei tiranti eseguito dallo scrivente il 24/05/2018 e il cui risultato è riportato in Figura 122, suggerisce come il settore occidentale e più vecchio di tale opera abbia ormai concluso la sua funzione di confinamento del terreno di monte e come gli elevati movimenti registrati nell'ultimo anno (compreso, come si vedrà in seguito, l'evento del 12 dicembre 2017) siano legati alla rottura di alcuni tiranti (Figura 119). Anche i micropali di fondazione stanno gradualmente esaurendo il loro lavoro (Figura 121). L'opera si trova, dunque, in equilibrio precario, ormai svincolata dal versante e soggetta ad un movimento indipendente. L'imprevedibilità dello sviluppo degli spostamenti del cordolo, la cui tendenza è quella del collasso, è legata alla resistenza degli ultimi tiranti e micropali;
- 2) l'area (Figura 123 – area B) già menzionata in prossimità dell'orlo centro-orientale della scarpata di degradazione (mire P6, P12 e P15), la quale mostra incrementi tra il 100 e il 151%. Sui valori di tale area si assesta anche l'incremento rilevato alla mira P10;

- 3) l'area (Figura 123– area C), in cui si trovano le mire immediatamente a valle della nicchia di frana (P19, P22 e P24) e a monte della porzione più attiva della scarpata di degradazione (P4, P5 e P7), è caratterizzata da incrementi percentuali fra il 60 ed il 100% con valori progressivamente maggiori più ci si avvicina alla scarpata di degradazione. Mentre le mire vicino poste a valle della berlinese del 1992 non mostrano incrementi al pari di quelli registrati sull'opera stessa, ad indicare ancora una volta il completo svincolo di questa rispetto al movimento generale del versante. Sui valori di tale area si assesta anche l'incremento rilevato alla mira P9;
- 4) l'area (Figura 123 – area D) in cui si trovano le mire P3, P8, P13, P14, P21, P25 e P28 che mostra valori di incremento inferiori al 60% e coincidente in gran parte la porzione di versante a valle o poco a monte dell'orlo occidentale della scarpata di degradazione in cui affiora la formazione rocciosa di base (i gessi ripiegati della Formazione di Travenanzes - Figura 4);
- 5) l'area (Figura 123 - area E) a tergo della berlinese del 1992, ovvero l'area di coronamento della porzione più instabile della frana mostra valori di incremento percentuale del trend medio di spostamento che variano tra il 20% e l'80% circa, in particolare la mira P26 registra aumenti del 78%, mentre la vicina mira P27 'solamente' del 21%;
- 6) l'area (Figura 123 – area F) prossima alla mira R1 registra un notevole incremento del trend di spostamento medio oltre il 200%, sebbene si tratti di un dato isolato e molto probabilmente legato a problemi locali della mira stessa.

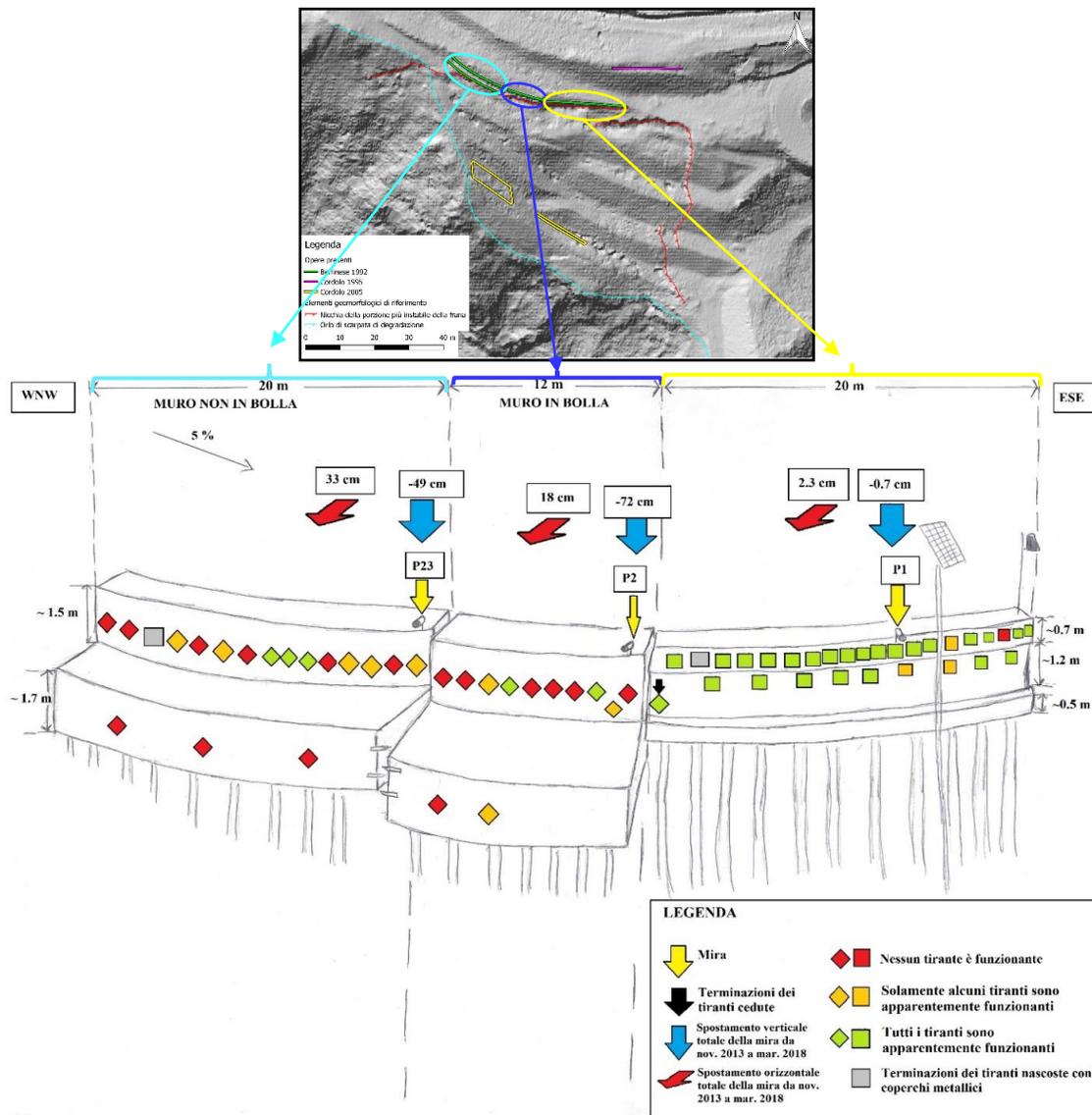
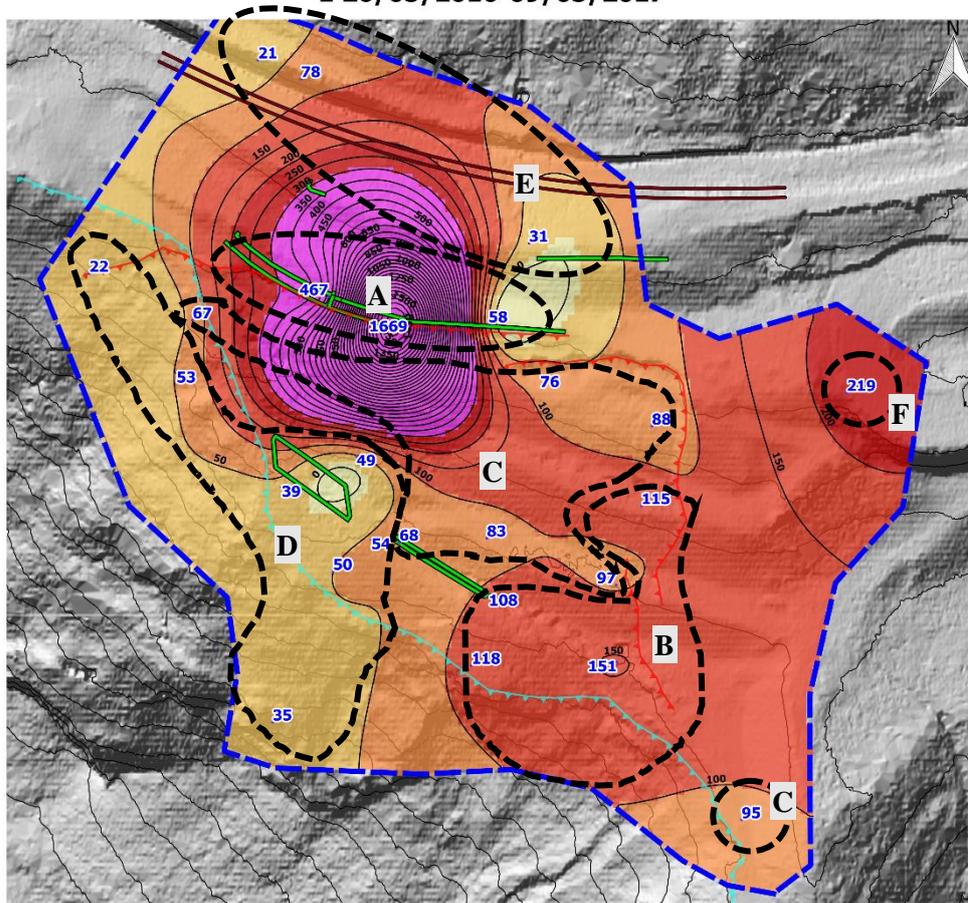


Figura 122 Rappresentazione grafica dei risultati del catasto dei tiranti apparentemente funzionanti e non del cordolo tirantato e su micropali del 1992, con identificazione in planimetria dei diversi settori (mappa sopra). La porzione lunga circa 20 m e posta più a Est sembra avere ancora un buon numero di tiranti funzionanti rispetto al settore occidentale. Lavoro di catasto dello scrivente eseguito il 24/05/2018.

VARIAZIONE PERCENTUALE DEL TREND MEDIO DI SPOSTAMENTO TRA I DUE INTERVALLI DI TEMPO CORRISPONDENTI A 09/05/2017-07/06/2018 E 26/05/2016-09/05/2017



Legenda

- Area all'interno della quale si trovano le mire
- Posizione delle mire con riportata la variazione percentuale del trend medio di spostamento in etichetta
- Rilievo GPS del 27 marzo 2018
- Manufatto
- Rotaia
- Elementi geomorfologici di riferimento
- Nicchia della porzione più instabile della frana
- Orlo di scarpata di degradazione
- Contour dell'interpolazione dei valori di variazione percentuale del trend medio di spostamento
- Interpolazione dei valori di variazione percentuale del trend medio di spostamento
- <= 10
- 10 - 50
- 50 - 100
- 100 - 200
- 200 - 300
- > 300

Elaborazione di Briedi Federico

Figura 123 Variazione del 'trend medio di spostamento' ovvero dello 'spostamento mediato' in termini percentuali tra il periodo 26/05/2016-09/05/2017 e il periodo 09/05/2017-07/06/2018. Valori di variazioni positivi indicano un incremento del trend di spostamento medio osservato all'intervallo temporale più recente, valori negativi suggeriscono, invece, una diminuzione interpolazione dei valori di variazione percentuale del trend medio di spostamento.

Un'analoga elaborazione delle variazioni percentuali del trend medio di spostamento fra il periodo 2013-2016 e il periodo 2017-2018 consente di rilevare egualmente un incremento degli 'spostamenti mediati' per le mire disponibili in entrambi gli intervalli di tempo (Figura 124). Tali incrementi sono, però, in genere più moderati rispetto a quelli riscontrati tra i periodi 2016-2017 e 2017-2018, poiché, come già menzionato, dall'intervallo 2013-2016 all'intervallo 2016-2017 vi è stato un

leggero

decremento del trend medio di spostamento

(sebbene il valor medio che si aggira intorno al 188%, valore

influenzato

dall'ingente

incremento

rilevato presso le mire P2 e P23, descritto in

seguito). Ciò non è

vero per le mire P2 e P23 sul cordolo tirantato del 1992

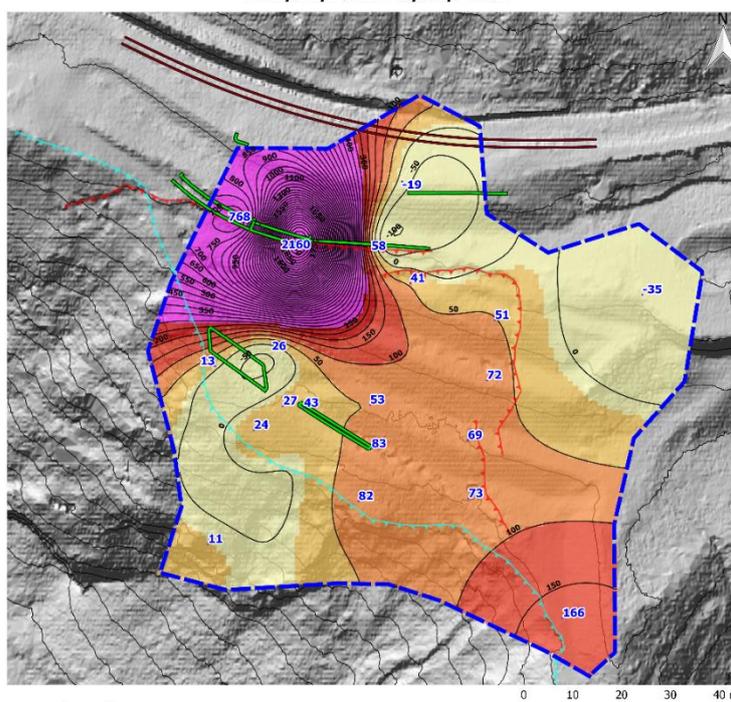
e per la mira P9.

Per quanto

riguarda le prime due mire,

l'evidenza del grande

VARIAZIONE PERCENTUALE DEL TREND MEDIO DI SPOSTAMENTO TRA I DUE INTERVALLI DI TEMPO CORRISPONDENTI A 09/05/2017-07/06/2018 E 30/11/2013-26/05/2016



- Legenda
- Area all'interno della quale si trovano le mire
 - Posizione delle mire con riportata la variazione percentuale del trend medio di spostamento in etichetta
 - Rilievo GPS del 27 marzo 2018
 - Manufatto
 - Rotaia
 - Elementi geomorfologici di riferimento
 - Nicchia della porzione più instabile della frana
 - Orlo di scarpata di degradazione
 - Contour dell'interpolazione dei valori di variazione percentuale del trend medio di spostamento
 - Interpolazione dei valori di variazione percentuale del trend medio di spostamento
 - <= 10
 - 10 - 50
 - 50 - 100
 - 100 - 200
 - 200 - 300
 - > 300

Elaborazione di Bridi Federico

Figura 124 Variazione del 'trend medio di spostamento' ovvero dello 'spostamento mediato' in termini percentuali tra il periodo 30/11/2013-26/05/2016 e il periodo 09/05/2017-07/06/2018. Valori di variazioni positivi indicano un incremento del trend di spostamento medio osservato all'intervallo temporale più recente, valori negativi suggeriscono, invece, una diminuzione interpolazione dei valori di variazione percentuale del trend medio di spostamento.

incremento dei movimenti rispetto anche all'intervallo di tempo 2013-2016 ribadisce la precarietà della struttura. Il comportamento registrato alla mira P9 (osservato in evoluzione in Insetto 2), invece, può essere legato alla graduale retrogressione della scarpata di degradazione che potrebbe coinvolgere la zona in cui si trova il riflettore, i cui movimenti sono ancora esigui, attestandosi su 1 mm/bimestre.

Si specifica come l'incremento percentuale in prossimità dell'orlo centro-orientale della scarpata di degradazione non superi in questo caso il 90%.

Si osserva, infine, la variazione negativa dello 'spostamento mediato' alle mire P17 e R1, discussa in precedenza e che sembra legata al più importante decremento avvenuto tra i periodi 2013-2016 e 2016-2017 (come riscontrabile in Insetto 2).

7.2.3.2 Considerazioni riassuntive

A fronte di un leggero decremento dei movimenti passando dal periodo 2013-2016 al periodo 2016-2017, nel successivo intervallo temporale, corrispondente all'ultimo anno ovvero tra maggio 2017 e giugno 2018, il versante ha mostrato un importante incremento generalizzato nel trend medio degli spostamenti rispetto all'anno precedente. Tale incremento, seppur minore, ma comunque importante in termini percentuali (valor medio 188%), si riscontra anche tra gli intervalli di tempo 2013-2016 e 2017-2018.

Dai risultati delle elaborazioni si riscontrano due zone particolarmente critiche:

- 1) la zona, caratterizzata da un aumento maggiore del trend medio di spostamento, è costituita dal cordolo tirantato del 1992, che un rilievo di campagna mostra ormai quasi completamente svincolato dal versante e, quindi, probabilmente soggetto ad un movimento a sé stante;
- 2) una seconda zona, i cui movimenti appaiono in rapida evoluzione, è quella situata in prossimità del settore centro-orientale dell'orlo della scarpata di

degradazione. Gli spostamenti che avvengono in tale porzione del corpo di frana sembrano aver influenza anche a monte, come dimostrato dai valori gradualmente minori in termini sia di 'spostamento', di 'spostamento mediato' che di variazione del trend medio di spostamento lungo direzioni orientate a N, NW e WN.

Si nota che tra le mire di riferimento 'stabili' nell'area di significatività dell'interpolazione viene racchiusa solamente la R1, perché si trova in prossimità del corpo di frana a differenza delle altre. Inoltre, le mire R3, R4 e R5 mostrano trend medi di spostamento inferiori al 1 mm/bimestre e, quindi, trascurabili. Il riflettore R2, invece, genera problemi di registrazione dei dati e pertanto sarà sostituito [57].

7.2.4 Calcolo dei campi di spostamento nei bimestri dell'ultimo anno dal 12/06/2017 al 07/06/2018

7.2.4.1 Analisi ed interpretazione dei risultati

Si concentra, dunque, l'attenzione sull'ultimo anno, in particolare sugli ultimi 360 giorni precedenti il 7 giugno 2018. Tale periodo di tempo viene suddiviso in 6 intervalli di 60 giorni l'uno, chiamati 'bimestri' (denominazione già utilizzata nel paragrafo precedente). La lunghezza bimestrale dell'intervallo temporale di riferimento è frutto del compromesso tra la necessità di analizzare spostamenti sviluppati omogeneamente nel corso dell'arco di tempo considerato (escludendo, dunque, finestre temporali troppo brevi) e quella di non perdere le informazioni evolutive della cinematica della frana durante l'anno (evitando finestre temporali troppo ampie).

Anche in questo caso i dati sono elaborati attraverso *MATLAB* e, poi, rappresentati in *QGIS*. Il risultato dell'elaborazione è raffigurato in sequenza in Inserto 3, dove sono riportati i campi di spostamento per ciascun bimestre dal 12/06/2017 al 07/06/2018, calcolati tramite l'interpolazione di tipo 'spline' (utilizzando l'algoritmo '*Multilevel b-spline interpolation*' di *SAGA 2.3.2*) dei valori di spostamento ottenuti per ciascuna mira.

In questo caso, la variabile studiata ovvero lo 'spostamento' è inteso come spostamento bimestrale.

Si analizzano, di seguito, i risultati per ciascun bimestre e raffigurati in sequenza in Inserto 3:

- 1) BIMESTRE 1 (12/06/2017-11/08/2017 - Figura 125 ed in allegato -) = si osserva la forma ad 'M', riscontrata anche nei risultati delle elaborazioni del paragrafo precedente, la quale molto probabilmente è legata al processo di interpolazione stesso, ma anche allo stato delle opere presenti a presidio della ferrovia. Si osserva, infatti, come in corrispondenza della porzione occidentale e più svincolata della berlinese del 1992 gli

spostamenti siano maggiori ed il loro trend regressivo sia più sviluppato rispetto alla porzione orientale e più integra (cfr. al paragrafo precedente Figura 122). Tale caratteristica si nota in tutti i bimestri più o meno accentuata in funzione dell'evoluzione del movimento complessivo del versante. Per quanto riguarda l'entità degli spostamenti bimestrali si osserva una zona corrispondente al coronamento ed al fianco sinistro della porzione più instabile della frana di Sant'Andrea (area A in Figura 125) con valori che si attestano su qualche mm/bimestre. Mentre la zona (area B in Figura 125) comprensiva del settore più occidentale ed instabile della berlinese e delle mire in prossimità della terminazione occidentale della nicchia di frana (P25 e P29) mostrano valori di spostamenti bimestrali compresi tra 1-3 cm/bimestre. Per quanto riguarda il corpo più instabile, invece, si riconosce un settore occidentale (area C1 in Figura 125) caratterizzato da valori di spostamento bimestrale tra i 4 e i 5 cm/bimestre, che gradualmente aumentano di intensità verso E e SE, dove si riconosce una fascia (area C2 in Figura 125) interessata da movimenti maggiori che si estende in direzione N-S circa e che presenta maggior instabilità nella porzione in prossimità ed a valle dell'orlo della scarpata di degradazione (con valori di spostamento di 6-8 cm/bimestre con un massimo di 10.6 cm/bimestre registrato alla mira P20). Il settore più instabile di tale fascia coincide con l'area che ha subito incrementi tra i più elevati del trend medio degli spostamenti nell'ultimo anno e situata più a valle (cfr. al paragrafo precedente, Figura 120 area numerata con '1'). La porzione di monte di tale fascia, invece, mostra spostamenti che si attestano sui 5-6 cm/bimestre. Infine, si riconosce una zona (area C3 in Figura 125) rappresentata dalle mire P5, P10 e P12 i cui spostamenti si attestano su valori tra i 3 e i 4 cm/bimestre e che si trova tra la fascia caratterizzata da maggior movimento e il fianco sinistro della porzione più instabile della frana. Gli azimut degli spostamenti sono tutti pressoché paralleli alla direzione di massima pendenza del versante (circa 232°N) con l'eccezione della mira P20 che si trova nella porzione di accumulo del conoide

colluviale ai piedi della scarpata di degradazione e mostra azimuth orientato verso NW. La media su tutte le mire, che si trovano nell'area di interesse (perimetrata con linea blu tratteggiata in Figura 125), dei trend di spostamento calcolato in tale bimestre è di circa 4 cm/bimestre (inferiore a quello medio dell'anno 2017-2018 pari a 6 cm/bimestre, ma superiore a quello del periodo 2016-2017 di 3.2 cm/bimestre –vedi paragrafo precedente-);

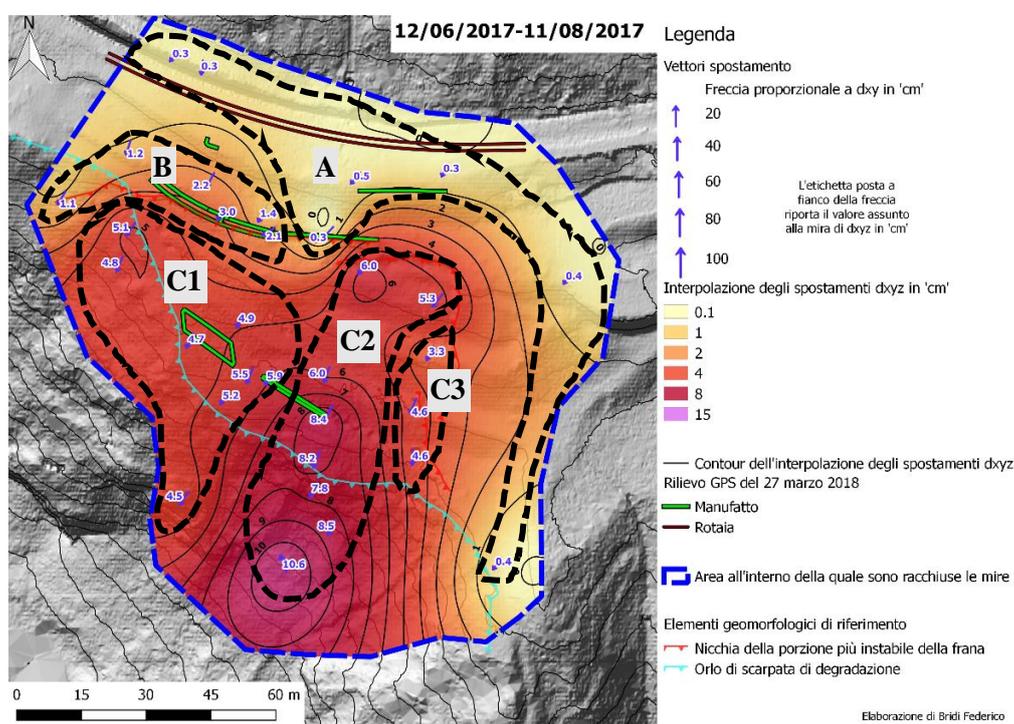


Figura 125 Campo degli spostamenti nel bimestre 12/06/2017-11/08/2017 con evidenziate le aree con caratteristiche cinematiche omogenee nei primi tre bimestri (in cui i movimenti della frana si mostrano meno intensi), analizzate nel testo.

2) BIMESTRE 2 (11/08/2017-10/10/2017 - Figura 126 ed in allegato -) = il campo degli spostamenti di questo bimestre è simile a quello del bimestre precedente. La suddivisione in zone a comportamento cinematico relativamente omogeneo viene mantenuta (Figura 126) e i valori degli spostamenti che caratterizzano ciascuna area restano all'incirca invariati. Si osserva solo un incremento de valore di spostamento bimestrale alla

mira P2 sulla berlinese (area B in Figura 126) che raggiunge valori di 4 cm/bimestre; la mira P6, posta sul cordolo lineare, e la mira P11, situate entrambe nell'area C2 in Figura 126, superano i 9 cm/bimestre. La media degli spostamenti nel bimestre su tutte le mire racchiuse nell'area di significatività (perimetrata con tratteggio blu in Figura 126) è in questo caso di 3.9 cm/bimestre: molto simile al bimestre precedente. La mira P20, infine, è caduta nel corso del bimestre;

- 3) BIMESTRE 3 (10/10/2017-09/12/2017 - Figura 127 ed in allegato -) = il campo di spostamenti nel bimestre in esame è analogo ai due bimestri precedenti: un incremento degli spostamenti intorno ai 4-4.4 cm/bimestre è registrato, però, alle mire P2 e P31 in corrispondenza della berlinese (area B in Figura 127), mentre la fascia a maggior instabilità del corpo di frana (area C2 in Figura 127) mostra una leggera diminuzione degli spostamenti (i valori sono inferiori, infatti, ai 8 cm/bimestre). Solamente la mira P16 mostra un azimut discordante rispetto alle altre orientato in direzione WNW. La media degli spostamenti registrati alle mire è leggermente diminuita rispetto ai bimestri precedenti e si attesta su valori di 3.7 cm/bimestre. Data la 'regolarità' della cinematica della frana di Sant'Andrea nel corso dei primi tre bimestri analizzati e, quindi, il probabile periodo di relativa ridotta attività rispetto alla fase evolutiva successiva, come evidenziato in Inserto 3 si propone il mantenimento della zonazione proposta in occasione dell'analisi del campo degli spostamenti calcolato per il bimestre 1 anche per i bimestri successivi al fine di evidenziare la variazione di comportamento di ciascuna zona (nonostante la perdita di alcune mire nel corso dei bimestri determini una riduzione dell'estensione areale della significatività dei campi degli spostamenti calcolati –perimetro blu tratteggiato nelle figure ritraenti i campi degli spostamenti-);

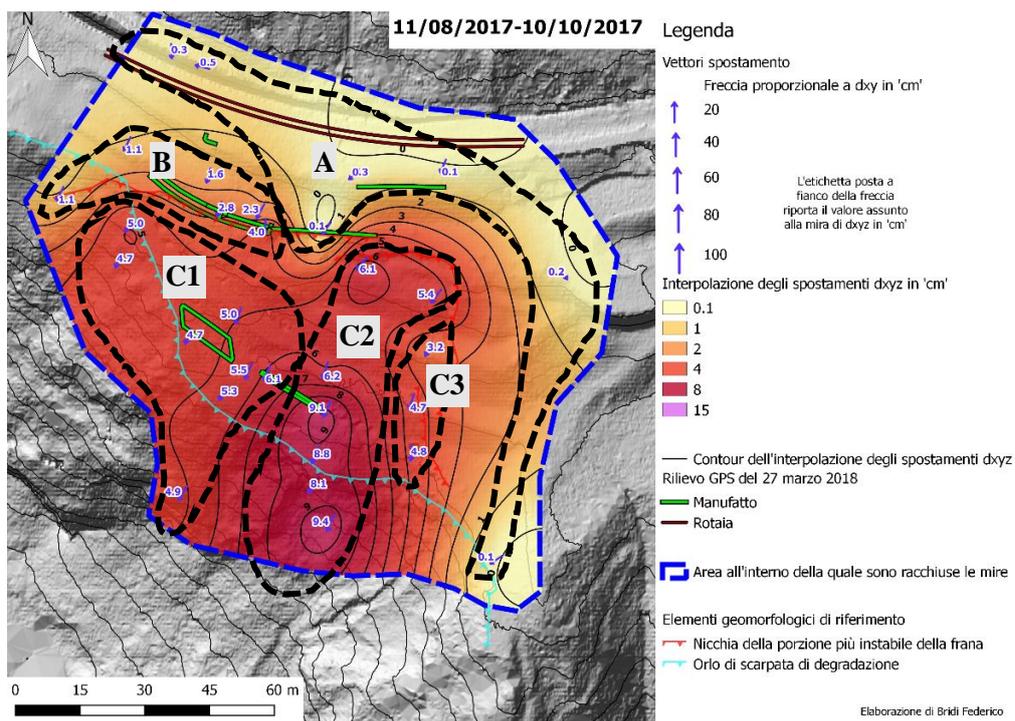


Figura 126 Campo degli spostamenti nel bimestre 11/08/2017-10/10/2017 con evidenziate le aree con caratteristiche cinematiche omogenee nei primi tre bimestri (in cui i movimenti della frana si mostrano meno intensi), analizzate nel testo.

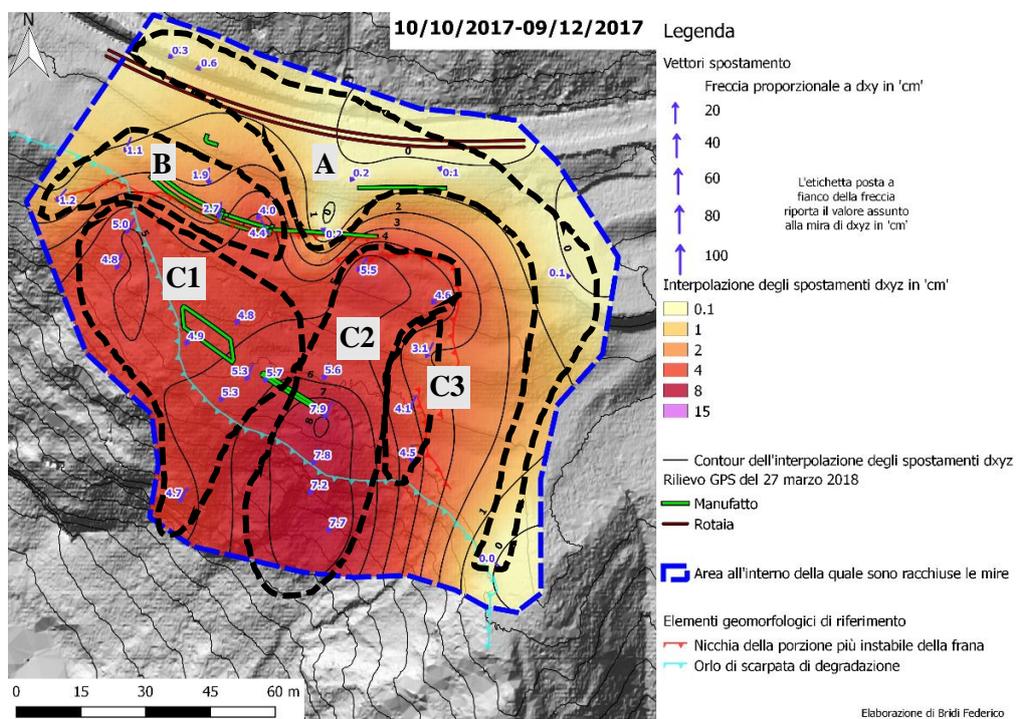


Figura 127 Campo degli spostamenti nel bimestre 10/10/2017-09/12/2017 con evidenziate le aree con caratteristiche cinematiche omogenee nei primi tre bimestri (in cui i movimenti della frana si mostrano meno intensi), analizzate nel testo.

4) BIMESTRE 4 (09/12/2017-07/02/2018 - Figura 128 ed in allegato -) = in questo intervallo di tempo ricade l'evento del 12 dicembre 2017, il quale è ben evidenziato dal campo di spostamento del bimestre in esame. La cinematica della frana di Sant'Andrea mostra un deciso e generale incremento dei movimenti. La zona di coronamento della porzione più instabile della frana (area A in Figura 128) presenta complessivamente valori simili ai bimestri precedenti con la sola eccezione della mira P26, la quale raggiunge il valore di 1.2 cm/bimestre. Tale comportamento è testimoniato anche in campagna dal rilievo delle diverse fratture che interessano il muro di sostegno a tergo del vecchio tracciato ferroviario (Figura 129). L'area della berlinese (area B in Figura 128) mostra notevoli incrementi degli spostamenti, in particolare si distinguono incrementi maggiori nella porzione direttamente interessata dalla presenza della berlinese e pari anche alle decine di cm/bimestre (la mira P2 raggiunge il valore massimo di 46.8 cm/bimestre), mentre le mire P25 e P29 in prossimità del settore più occidentale della nicchia della porzione più instabile subiscono aumenti minori e nel complesso gli spostamenti si attestano su valori di 1-2 cm/bimestre. L'area della berlinese è effettivamente quella che si muove di più nel corso del bimestre, poiché, sebbene la fascia orientale più instabile del corpo in frana (area C2 in Figura 128) mostri incrementi rilevanti ed omogeneamente distribuiti, le mire racchiuse al suo interno raggiungono valori massimi intorno ai 21 cm/bimestre in corrispondenza dell'orlo di scarpata di degradazione. La zona sul fianco sinistro del corpo maggiormente instabile (area C3 in Figura 128) registra spostamenti minori per quanto riguarda le due mire più a monte (P5 e P10), mentre la mira P12 si uniforma al movimento della porzione prossima all'orlo di scarpata di degradazione e meno stabile del versante in movimento. Infine, gli spostamenti del settore occidentale (area C1 in Figura 128) presentano grandi incrementi, sebbene non raggiungano i valori della fascia contigua posta più ad est ad eccezione della mira P24, i cui valori si attestano su quelli delle mire (P19 e P22) più

a monte della fascia citata. La media degli spostamenti registrati alle diverse mire è notevolmente aumentata rispetto ai bimestri precedenti, raggiungendo il valore di 11.7 cm/bimestre. Nel corso del bimestre la mira P16 viene persa;

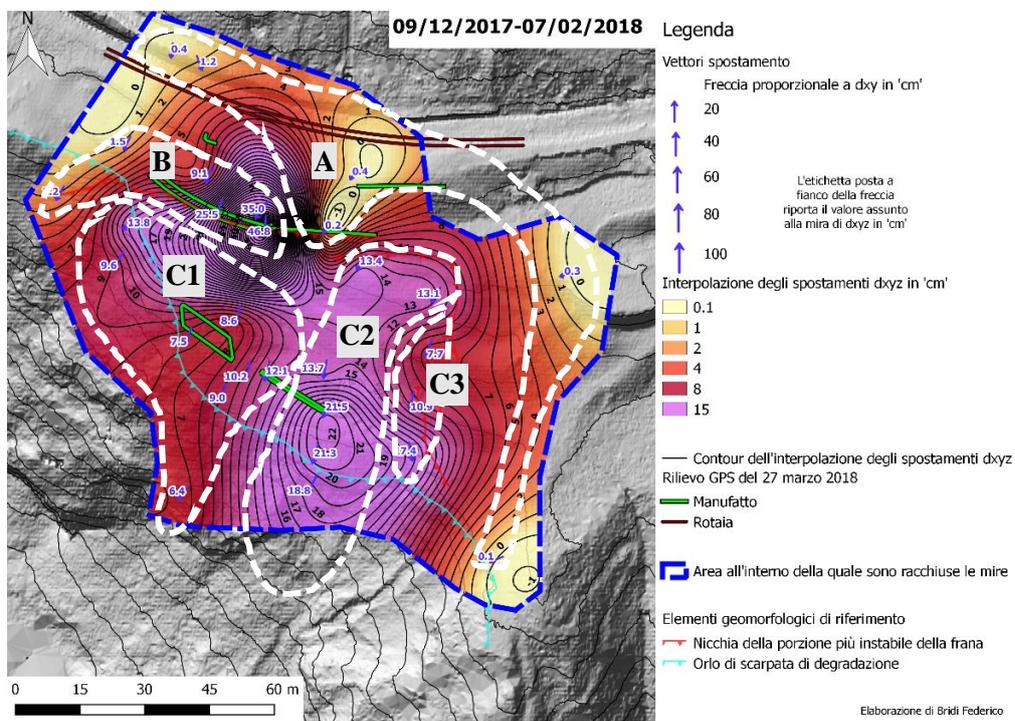


Figura 128 Campo degli spostamenti nel bimestre 09/12/2017-07/02/2018 con evidenziate le aree con caratteristiche cinematiche omogenee nei primi tre bimestri (in cui i movimenti della frana si mostrano meno intensi), analizzate nel testo.



Figura 129 Muro di sostegno a tergo del vecchio tracciato ferroviario intensamente fratturato. Foto dello scrivente del 06/04/2018.

5) BIMESTRE 5 (07/02/2018-08/04/2018 - Figura 130 ed in allegato -) = la cinematica di questo bimestre sembra indicare una fase di rilassamento, a seguito del brusco incremento subito nel periodo precedente. La zona di coronamento e il fianco sinistro della porzione più instabile del versante (area A in Figura 130) si riassessano sui valori di spostamento di qualche mm/bimestre, tipici dei primi tre bimestri analizzati. L'area della berlinese (area B in Figura 130) mostra valori minori rispetto al bimestre precedente, che si aggirano tra 5-8 cm/bimestre (comunque maggiori di quelli riscontrati nei primi tre bimestri). Sempre, in questo settore le mire poste ad occidente (P25 e P29), invece, ritornano a valori di spostamento simili, ma leggermente superiori, a quelli dei bimestri 1, 2 e 3. Per quanto riguarda il corpo maggiormente instabile (a valle della nicchia), esso presenta valori di spostamento minori rispetto al periodo precedente, ma comunque più elevati dei primi tre bimestri analizzati. Questo comportamento è indice del fenomeno di isteresi che caratterizza l'andamento delle velocità di spostamento della frana, una volta che questa ha subito un'importante accelerazione legata a particolari sollecitazioni pluviometriche [56]. Così, il settore occidentale (area C1 in Figura 130) mostra spostamenti fra i 6 e i 7.5 cm/bimestre, con un minimo di 5.4 cm/bimestri alla mira P21. La porzione di monte di questo settore ed immediatamente a valle della berlinese (mire P24 e P28) presenta valori di spostamenti bimestrali (fra 7 e 8 cm/bimestre) che si attestano su quelli rilevati alle mire P19 e P22 nella parte settentrionale della contigua fascia orientale a maggior instabilità (area C2 in Figura 130). Questa zona nella sua porzione di valle e generalmente in maggior movimento mostra valori di spostamenti bimestrali fra i 10.7 e i 12.5 cm/bimestre, minori rispetto al bimestre 4 ma maggiori dei bimestri 1, 2 e 3. Anche la mira P12, inserita all'interno della porzione più orientale del corpo di frana e delimitata dal fianco sinistro della stessa (area C3 in Figura 130), presenta valori uniformi con l'area prossima alla scarpata di degradazione e più instabile. La tendenza del riflettore citato ha iniziato ad esprimersi nel bimestre 4,

suggerisce come la scarpata di degradazione stia regredendo. Le altre mire (P5 e P10) all'interno dell'area C3 in Figura 130 mostrano valori di spostamenti bimestrali inferiori rispetto alla vicina fascia C2 e rispetto al bimestre precedente, sebbene i movimenti siano ancora maggiori dei primi tre bimestri analizzati. La media sulle diverse mire degli spostamenti registrati in questo bimestre è di 5.6 cm/bimestre: inferiore rispetto al precedente (indice di rilassamento), ma superiore rispetto ai primi periodi considerati (indice di isteresi).

Anche i rapporti n° 3 di marzo 2018 [34] e n°1 di aprile 2018 [35] della Protezione Civile della Regione Veneto stilati da Mariani R. rivelano che nel periodo fra marzo ed aprile 2018 l'area della berlinese è soggetta a spostamenti giornalieri mediamente inferiori rispetto a quelli registrati nella crisi del 12 dicembre 2017 (che sono stati dell'ordine dei centimetri medi giornalieri), ma comunque maggiori rispetto alla media del periodo precedente tale evento, con valori che raggiungono i 1.5 mm/giorno nella componente verticale nei giorni tra il 17 ed il 20 marzo e valori medi di 1.7 mm/giorno per la medesima componente nei giorni dal 28 marzo al 12 aprile. Le Aree 2 e 3, definite nella relazione dell'Università degli Studi di Padova relativa alla seconda fase della Convenzione di ricerca [56] e corrispondenti al corpo più instabile posto a valle della nicchia, secondo il rapporto n°3 di marzo 2018 (Protezione Civile della Regione Veneto) [34] dal 5 al 20 marzo hanno mostrato oscillazioni della componente verticale dei vettori spostamento, ma poi rientrata su valori medi (0.8 mm/giorno per l'Area 2 a monte della scarpata di degradazione e 1.2 mm/giorno per l'Area 3 coincidente all'incirca con la scarpata di degradazione), mentre la componente Est non ha mostrato incrementi ma i suoi valori sono risultati sempre al di sopra di quelli tipici. Dal 28 marzo al 12 aprile, secondo il rapporto n°1 di aprile 2018 (Protezione Civile della Regione Veneto) [35], l'Area 2 ha mostrato un raddoppio della componente verticale degli spostamenti rispetto al valor medio e così si è registrato anche un incremento per la componente est, mentre nell'Area 3 i valori degli

spostamenti verticali si attestano su quelli tipici e quelli in direzione Est mostrano un incremento dal 5 al 12 aprile. In conclusione si osserva, come, sebbene le precipitazioni nel periodo analizzato nel *rapporto di marzo 2018 (Protezione Civile della Regione Veneto)* [34] siano state esigue con una cumulata dal 3 marzo al 18 marzo di 59.4 mm, i movimenti del versante siano ancora generalmente superiori alla media, in coerenza con il comportamento di graduale rilassamento che la frana mostra dopo periodi di rapido incremento dei movimenti;

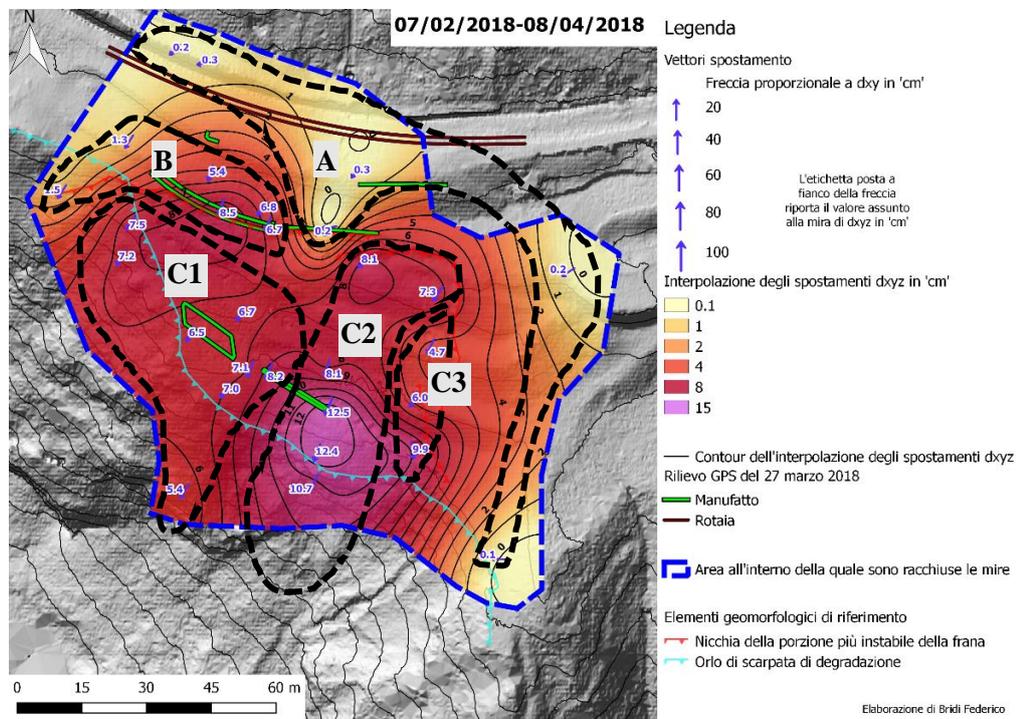


Figura 130 Campo degli spostamenti nel bimestre 07/02/2018-08/04/2018 con evidenziate le aree con caratteristiche cinematiche omogenee nei primi tre bimestri (in cui i movimenti della frana si mostrano meno intensi), analizzate nel testo.

- 6) BIMESTRE 6 (08/04/2018-07/06/2018 – Figura 132 ed in allegato -) = nel corso di questo bimestre si osserva un nuovo e generale incremento degli spostamenti. La zona più a monte (area A in Figura 132) presenta valori che si attestano su quelli del bimestre precedente con il locale aumento di qualche mm/bimestre. La zona instabile della berlinese (area B in Figura

132) si muove con valori dell'ordine delle decine di cm/bimestre (ad eccezione della mira P30 che registra uno spostamento di 6.8 cm/bimestre, comunque maggiore del periodo precedente), che raggiungono i 27.1 cm/bimestre alla mira P2. In tale zona la mira P25 posta più a ovest si muove di 1.5 cm/bimestre, ovvero qualche



Figura 131 Mira P15 (freccia rossa) sul blocco di materiale svincolato dal resto del versante (ellisse rossa) alla base del quale si rinvergono le cavità (freccie arancio) da cui si nota fuoriuscita d'acqua nel corso degli eventi meteorologici più intensi (già richiamate nei capitoli precedenti). Foto dello scrivente del 24/05/2018.

millimetro in più del bimestre precedente. Le mire della zona occidentale del corpo maggiormente instabile (area C1 in Figura 132) presentano incrementi degli spostamenti di circa 1 cm/bimestre rispetto all'bimestre 5 (quindi, con valori tra 6 e 8 cm/bimestre), ma tornano a differenziarsi nell'intensità dei movimenti dal settore settentrionale della contigua fascia più instabile posta ad Est (area C2 in Figura 132). Quest'ultima area presenta valori di spostamenti che nella porzione di monte si attestano sui 10.9 cm/bimestre, aumentando gradualmente verso valle fino a raggiungere i 25 cm/bimestre in corrispondenza della mira P15. Quest'ultimo riflettore, però, sembra essere impostato su un blocco di materiale più instabile e svincolato rispetto al resto del versante (Figura 131) e segue un movimento proprio, in risposta alle sollecitazioni pluviometriche. Per quanto riguarda la zona più orientale (area C3 in Figura 132), la mira P12 sembra ormai seguire il comportamento cinematico dell'area limitrofa (area C2 in Figura 132), mentre le altre due mire (P5 e P10) mostrano anch'esse incrementi negli spostamenti, che restano inferiori (tra i 6 e i 9 cm/bimestre) a quelli della vicina area già menzionata. Nel complesso la media degli spostamenti in questo bimestre sulle mire, contenute nell'area di significatività dell'interpolazione

(perimetrata con linea blu tratteggiata in Figura 132), è di 9.2 cm/bimestre, maggiore del periodo precedente e dei primi tre bimestri analizzati, ma inferiore rispetto al bimestre 4.

Nei rapporti n°2 di maggio 2018 [36] e n°1 di giugno 2018 [37] della Protezione Civile della Regione Veneto stilati da Mariani R. si ribadisce il movimento a sé stante che la berlinese sembra seguire, dopo il quasi completo svincolo dai tiranti e parziale dai pali di fondazione avvenuto probabilmente nella crisi del 12 dicembre 2017. Infatti, nel rapporto n°2 di maggio 2018 (Protezione Civile della Regione Veneto) [36] si osserva come, dopo un evento meteorologico, avvenuto tra il 14 ed il 15 maggio 2018, con un'altezza di precipitazione di 30 mm circa e che ha interrotto un periodo lungo 14 giorni di assenza di precipitazioni, la mira P23 e soprattutto la mira P2, situate sul settore occidentale e più instabile della berlinese, hanno registrato spostamenti importanti lungo la verticale (Figura 133). In particolare, il riflettore P2 mostra un abbassamento di 7 cm a partire dal 14 maggio 2018 ed in atto ancora al momento della scrittura del rapporto, ovvero il 16 maggio 2018. Le mire poste sul corpo più instabile della frana ed in particolare quelle nella porzione di monte della fascia orientale (area C2 in Figura 132), che si trovano appena al di sotto della nicchia morfologica, non hanno evidenziato, invece, movimenti del calibro di quelli avvenuti sulla berlinese. Il movimento della berlinese segue, dunque, una cinematica e risponde a fattori innescanti diversi rispetto al resto del versante. Anche nel rapporto n°1 di giugno 2018 (Protezione Civile della Regione Veneto) [37] si osserva che, dopo un evento meteorologico con cumulata pluviometrica giornaliera di circa 35 mm, seguito da un periodo con scarse precipitazioni (la cumulata ai 15 giorni l'8 giugno 2018 è di 66.4 mm), la mira P2 sulla berlinese mostra abbassamenti medi di 1 cm in 7 giorni, che si attestano su quelli tipici dell'Area 2 (definita nella relazione dell'Università degli Studi di Padova relativa alla seconda fase della Convenzione di ricerca, datata 2015 [56]), mentre i movimenti delle Aree 2 e 3 (definite nella stessa relazione

dell'Università degli Studi di Padova [56]) seguono un lento trend di rilassamento ma sono ancora maggiori di quelli tipici.

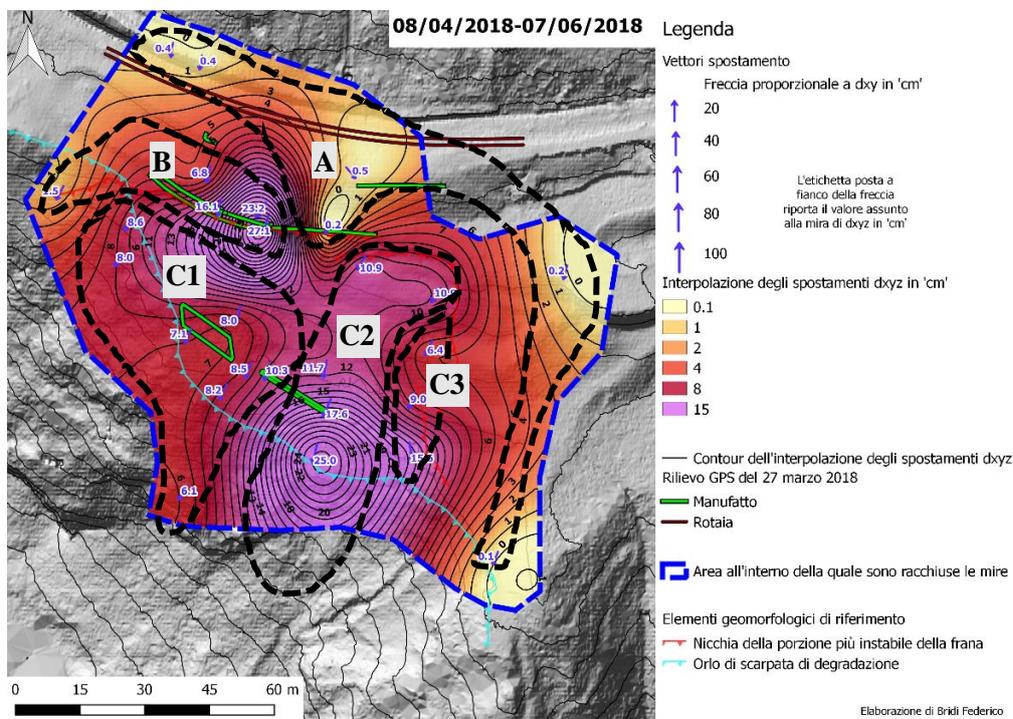


Figura 132 Campo degli spostamenti nel bimestre 08/04/2018-07/06/2018 con evidenziate le aree con caratteristiche cinematiche omogenee nei primi tre bimestri (in cui i movimenti della frana si mostrano meno intensi), analizzate nel testo.

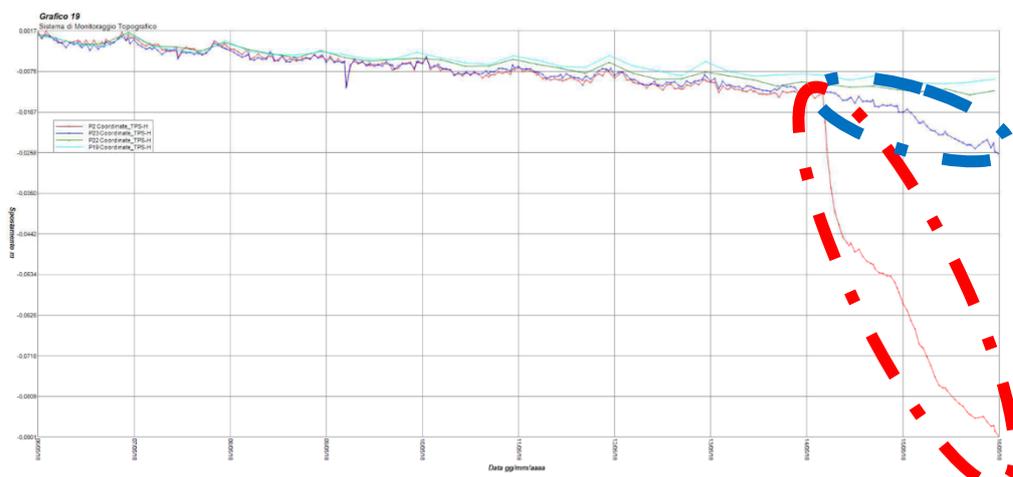


Figura 133 Spostamenti verticali delle mire P2, P19, P22 e P23 della stazione topografica totale di Perarolo di Cadore (BL) dal 06/05/2018 al 16/05/2018. Si evidenzia il rapido incremento dei movimenti della mira P2 (ellisse rossa tratteggiata) e quello di minor entità della mira P23 (ellisse blu tratteggiata) a partire dal 14/05/2018. Grafico riportato nel rapporto n° 2 di maggio 2018 della Protezione Civile della Regione Veneto stilati da Mariani R. [36].

7.2.4.2 Considerazioni riassuntive

Per riassumere, i campi di spostamento calcolati per i bimestri dell'ultimo anno consentono di seguire le ultime fasi dell'evoluzione cinematica del fenomeno franoso di Sant'Andrea. In particolare, si riescono ad individuare i periodi di maggior criticità dei movimenti del versante (ad esempio si riconosce l'effetto dell'evento del 12 dicembre 2017 sul campo di spostamento nel bimestre 4) e zone a comportamento cinematico relativamente omogeneo. Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, le aree identificate sono:

- A. la zona di coronamento e del fianco sinistro della porzione più instabile della frana di Sant'Andrea (area A in Figura 134- mire P1, P9, P16, P17, P26, P27 e R1) caratterizzata da valori di spostamenti relativamente bassi, ovvero dell'ordine dei mm/bimestre (con l'eccezione nel bimestre 4 in cui la sola mira P26 mostra spostamenti oltre 1 cm/bimestre, ma probabilmente legata allo svincolo della berlinese posta a valle della mira stessa e che fungeva da contenimento del terreno di monte);
- B. la zona della berlinese (area B in Figura 134 –mire P2, P23, P25, P29, P30 e P31), che risulta essere la più instabile e, come emerso dalle analisi precedenti, la berlinese sembra ormai quasi completamente svincolata dai tiranti e parzialmente dai pali di fondazione, seguendo una dinamica a sé stante rispetto al resto del versante. In tale zona ricadono anche le mire P25 e P29 meno mobili di quelle situate sulla berlinese, con valori di spostamento tra 1 e 2 cm/bimestre. Esse sono state inserite in quest'area, poiché esse mostrano un comportamento cinematico intermedio fra l'area di coronamento (area A) ed il corpo della porzione più instabile della frana (aree C1, C2 e C3), che era presentato anche dalle mire sulla berlinese stessa, prima che la sua situazione evolvesse drasticamente nel bimestre 4;
- C. il corpo più instabile della frana può essere suddiviso in tre settori:
 - 1. settore occidentale (area C1 in Figura 134 –mire P3, P8, P13, P14, P21, P24 e P28), caratterizzato da spostamenti intermedi, ovvero leggermente inferiori rispetto al settore contiguo, con valori tra 4-5

cm/bimestre in periodi di minor attività e tra 6-10 cm/bimestre nei periodi in cui il versante mostra movimenti intensi e diffusi. In questi ultimi casi è possibile che la porzione di monte (mira P24) si uniformi ai movimenti della zona accanto descritta in seguito. Secondo il modello geologico-concettuale proposto nel relativo capitolo, il substrato roccioso dovrebbe essere più elevato rispetto alla porzione più orientale;

2. fascia centro-orientale (area C2 in Figura 134 –mire P4, P6, P7, P11, P15, P18, P19, P20 e P22), caratterizzata dai movimenti più importanti (dopo la zona della berlinese) con un incremento degli spostamenti da monte verso valle con valori che vanno dai 5-7 cm/bimestre nei periodi di minor attività ai 13-21.5 cm/bimestre durante le fasi più critiche. Il blocco di materiale su cui è impostata la mira P15 nell'ultimo bimestre sembra svincolarsi dal resto del versante seguendo un'evoluzione cinematica propria (Figura 131). Si osserva come alla base di tale blocco siano situate le cavità da cui fuoriesce acqua in occasione degli eventi meteorologici più intensi (Figura 131);
3. settore orientale (area C3 in Figura 134 –mire P5, P10 e P12), caratterizzata da movimenti inferiori di qualche cm/bimestre al settore occidentale. Come testimoniato dalla mira P12, posta più a valle, che con l'evento del 12 dicembre 2017 ha seguito una cinematica simile alla fascia centro-orientale, è possibile che tale zona venga progressivamente inglobata (secondo un trend regressivo da valle verso monte) dalla fascia limitrofa più instabile.

Queste considerazioni sono prettamente descrittive della situazione evolutiva della frana nell'ultimo anno.

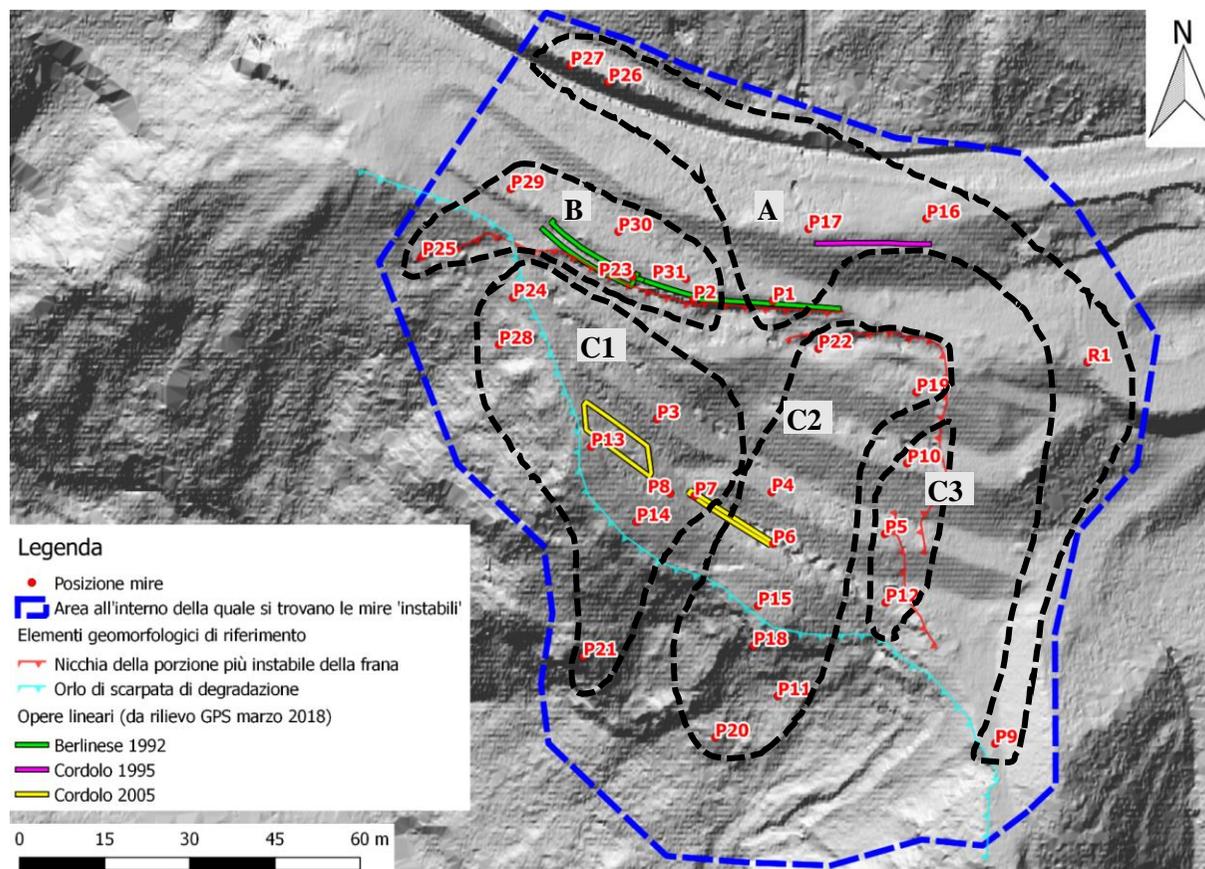


Figura 134 Zonazione cinematica della porzione di versante esaminata, in base a quanto descritto nel testo in merito all'evoluzione nei bimestri dell'ultimo anno del campo di spostamento, calcolato a partire dai dati della stazione topografica totale di Perarolo di Cadore (BL), le cui mire sono riportate in figura.

7.2.5 Calcolo del rapporto tra la componente orizzontale e verticale dei vettori spostamento alle diverse mire

Per studiare l'importanza che rivestono le due principali componenti del vettore spostamento, orizzontale ('dxy') e verticale ('dz') nelle diverse mire e nel tempo si calcola l'evoluzione nei bimestri dell'ultimo anno del rapporto ('dxy'/'dz'), poiché si sono riscontrati risultati paragonabili anche nei tre intervalli di tempo precedentemente considerati (ovvero 30/11/2013-26/05/2016, 26/05/2016-09/05/2017 e 09/05/2017-07/06/2018).

Anche in questo caso i dati sono stati elaborati in *MATLAB* e rappresentati in *QGIS*, analogamente al caso precedente. I risultati sono riportati in Inserto 4: per ogni bimestre è riportata la base topografica (hillshade del DEM della ottenuto dai rilievi Lidar della primavera 2018, commissionati dall'*Università degli Studi di Padova* e relative curve di livello), le opere antropiche presenti sul versante (dai rilievi GPS del 27 marzo 2018, condotti dall'*Università degli Studi di Padova*), gli elementi geomorfologici di riferimento descritti nei paragrafi precedenti (la nicchia della porzione più instabile della frana e l'orlo di scarpata di degradazione) e le posizioni di ciascuna mira, raffigurata con un pallino di colore rosso (se il rapporto 'dxy/dz' è maggiore di 1, cioè se prevale la componente orizzontale) o giallo (se il rapporto 'dxy/dz' è minore di 1, ovvero se prevale la componente verticale) o verde (se il rapporto 'dxy/dz' è uguale a 1, cioè se le due componenti si equivalgono).

Confrontando le diverse mappe bimestrali, si possono riportare alcune osservazioni:

- 1) le mire i cui spostamenti mostrano una predominanza della componente verticale sono disposte immediatamente a valle della nicchia morfologica (P22, P24 e P28) o sulla berlinese (P2, P23 e, dal bimestre 4, P31), a meno di qualche eccezione la quale, però, non si riscontra costantemente su una mira ma varia da riflettore a riflettore nel corso dei bimestri. La mira P19,

- a valle del tratto orientale della nicchia mostra variazioni del rapporto 'dxy/dz' che si aggirano intorno a 1 o valori poco superiori;
- 2) non si notano grandi variazioni del rapporto 'dxy/dz' correlabili con l'evento del 12 dicembre 2017;
 - 3) le mire P1 (posta sulla porzione più orientale della berlinese, i cui tiranti sembrano ancora apparentemente funzionanti -Figura 122-) e P17 mostrano valori del rapporto 'dxy/dz' piuttosto elevati;
 - 4) le mire nella porzione di valle del corpo più instabile della frana mostrano in genere valori del rapporto 'dxy/dz' compresi fra 1 e 2 ad eccezione delle mire P6, P15 e P21 con valori maggiori di 2.

Riassumendo le considerazioni riportate, si può affermare che la porzione immediatamente a valle della nicchia della porzione più instabile solitamente mostra prevalenza della componente verticale del vettore spostamento (Figura 135 a, perimetro giallo tratteggiato), mentre nella porzione più a valle domina la componente orizzontale (Figura 135 a, perimetro rosso tratteggiato). Ad avvalorare questo schema concorrono anche alcune evidenze riscontrate durante i rilievi di campagna. Nella porzione di monte del corpo più instabile ovvero dove predomina lo spostamento verticale del terreno, i micropali realizzati nel corso degli interventi di sistemazione dei primi anni 2000 si mostrano emergenti per più di un metro dal terreno e nella posizione con cui sono stati messi in opera (Figura 135 b): non sono, cioè, deformati dal movimento della frana, il quale sembra essere avvenuto prevalentemente in direzione verticale e con un comportamento deformativo simile a quello di un fluido viscoso (avendo quasi aggirato i pali presenti). La zona, in cui domina la componente verticale potrebbe estendersi fino al vertice più occidentale del cordolo a forma di parallelogramma situato a monte della scarpata di degradazione: solo in quel punto del cordolo, infatti, i pali di fondazione emergono dal piano campagna (Figura 135 c). Più a valle, invece, le file di micropali, come già osservato nei capitoli precedenti, hanno favorito la fessurazione del terreno ed in corrispondenza delle teste di ciascun micropalo la formazione di contropendenze (Figura 135 d): in questo caso la dislocazione delle fessure, la quale si mostra sviluppata soprattutto sul piano orizzontale, e la

formazione delle contropendenze può avvalorare la predominanza della componente orizzontale degli spostamenti.

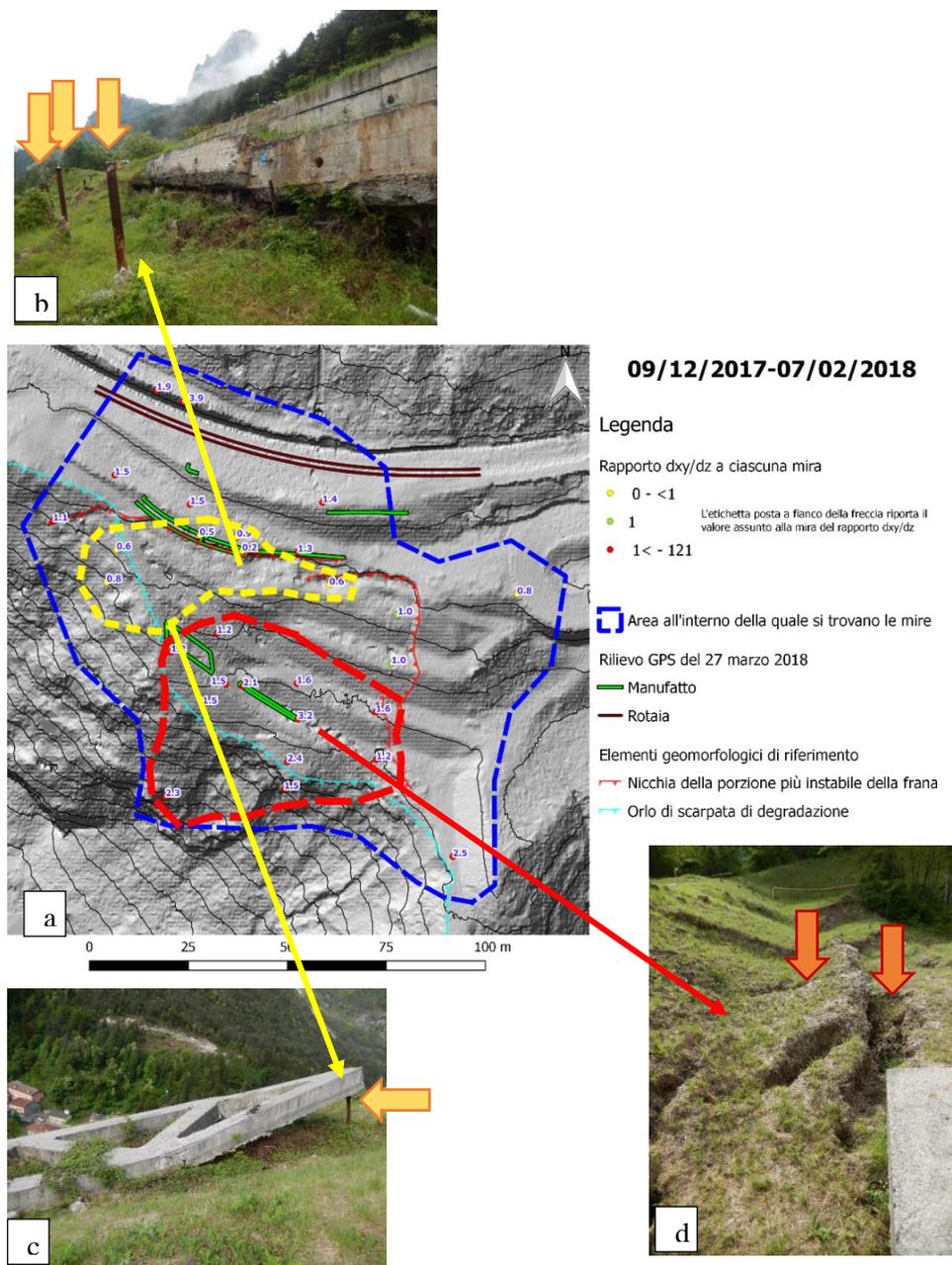


Figura 135 a) individuazione delle zone in cui predomina la componente verticale (perimetro tratteggiato giallo) o orizzontale (perimetro tratteggiato rosso) del vettore spostamento, si è riportato come base anche i risultati dell'elaborazione del calcolo del rapporto 'dxy/dz' per il bimestre 4, essendo simili per tutti i bimestri considerati. Con riproposizione di alcune evidenze di campagna: b) micropali emergenti a valle della berlinese (foto dello scrivente del 24/05/2018); c) palo di fondazione emergente del vertice occidentale del cordolo a parallelogramma di valle (foto dello scrivente 10/05/2018); d) contropendenze e fessure ad est del cordolo lineare di valle (foto dello scrivente del 10/05/2018)

7.2.6 Calcolo del campo di deformazione a partire dai dati di spostamento delle mire della stazione topografica totale di Perarolo di Cadore (BL)

7.2.6.1 Introduzione

Dopo aver analizzato gli spostamenti registrati dalle mire ottiche della stazione topografica totale di Perarolo di Cadore (BL), si procede con ulteriori elaborazioni dei dati forniti dallo stesso sistema di monitoraggio al fine di ricavare altre informazioni in merito alla frana di Sant'Andrea. In particolare, in questo paragrafo si analizzano i risultati ottenuti attraverso l'utilizzo dei toolbox *MATLAB* 'grid_strain' e 'grid_strain3', presentati nell'articolo 'Characterization of landslide ground surface kinematics from terrestrial laser scanner and strain field computation' di Teza et al. (2008) [47]. Anche in questo caso, perciò, le elaborazioni sono eseguite in *MATLAB*, mentre la rappresentazione grafica dei risultati ottenuti si è preferito riportarla in *QGIS* per motivi di semplicità di lettura.

I toolbox 'grid_strain' e 'grid_strain3' calcolano, a partire da valori di velocità di spostamento, le caratteristiche principali degli ellissoidi di strain per ogni nodo di una griglia definita, quindi il campo di deformazione dell'area su cui si estende la griglia. Il primo toolbox lavora in uno spazio 2D ovvero sul piano orizzontale e, pertanto, necessita per ogni mira del numero del riflettore, delle sue coordinate Est e Nord (espresse in metri) e delle 2 corrispettive componenti del vettore spostamento con i relativi errori o scarti quadratici medi (sia le componenti che gli errori vanno espressi in millimetri), secondo quanto scritto nel manuale del toolbox 'grid_strain grid_strain3. Release 1.5-July 2015. User's guide.' di Teza e Pesci (2015) [48]. Mentre il toolbox 'grid_strain3' calcola il campo di deformazione in uno spazio 3D ovvero necessita oltre che dei dati richiesti in 'grid_strain' della quota del riflettore e della componente verticale del vettore spostamento con il relativo errore (scarto quadratico medio) [48]. In questo caso, però, le componenti del vettore spostamento ed i relativi errori vanno espressi in metri [48]. Infine, nel caso dell'elaborazione 3D è indispensabile un modello digitale del terreno che rappresenta la griglia sui nodi della quale sono calcolati gli

ellissoidi di strain (nel caso del toolbox *'grid_strain'* la griglia, invece, è calcolata dal codice a partire dall'estensione areale della disposizione delle mire e delle dimensioni che scelte della cella base della griglia stessa) [48]. Il modello digitale del terreno utilizzato può essere quello della situazione precedente oppure successiva all'avvenimento degli spostamenti medi sulla base dei quali si svolge il calcolo.

L'elaborazione è stata effettuata sia nel caso 2D (*'grid_strain'*) che 3D (*'grid_strain3'*). Si sono predisposti in *MATLAB* i dati necessari al calcolo dei campi di deformazione medi mensili dell'ultimo anno (dal 08/06/2017 al 07/06/2018) attraverso i due toolbox. In entrambi i casi, gli spostamenti attribuiti alle diverse mire sono la media degli spostamenti misurati su tutti i possibili intervalli mensili contenuti nell'ultimo anno di monitoraggio della stazione topografica totale e, così, lo scarto quadratico medio di ogni componente del vettore spostamento è calcolato sugli stessi dati. Nel caso 3D, infine, il modello digitale del terreno utilizzato è quello ottenuto dal rilievo Lidar della primavera 2018, commissionato dall'Università degli Studi di Padova (e il cui *'hillshade'* viene riproposto come base topografica): quindi, si tratta del DEM *'finale'* rispetto agli spostamenti sulla base dei quali si svolge il calcolo. Il fattore di scala utilizzato [47] è di 22 m in entrambi i casi: tale scelta consente di coprire con il calcolo una buona parte dell'area d'interesse e, quindi, di avere un livello di significatività medio/alto per un buon numero di punti della griglia (ovvero molti nodi presentano all'interno della circonferenza centrata su di essi e con raggio pari al fattore di scala almeno due mire ottiche [47]). Si specifica, inoltre, che l'intervallo temporale mensile è stato selezionato a seguito di numerose prove con diverse estensioni dello stesso al fine di ottenere un risultato apprezzabile.

I campi di deformazione che risultano dall'elaborazione con i due toolbox contengono molte informazioni, tra le quali una utile è senz'altro la somma degli assi principali dell'ellissoide di *'strain'* per ogni punto e che rappresenta la deformazione areale ($e_{\max}+e_{\min}$) nel caso 2D e quella volumetrica ($e_{\max}+e_{\text{int}}+e_{\min}$) in 3 dimensioni. Sia la deformazione areale che volumetrica sono adimensionali.

Laddove il valore della deformazione areale o volumetrica è negativo si avrà contrazione, mentre dov'è positivo estensione.

Di seguito sono analizzati il campo di deformazione areale nel caso 2D e quello volumetrico nel caso 3D.

7.2.6.2 Campo di deformazione areale medio mensile nell'ultimo anno

In Figura 136 è riportato il campo di deformazione areale medio mensile dell'ultimo anno e l'area all'interno del quale esso ha significatività medio/alta (ovvero quei punti della griglia che sono circondati da almeno 2 mire per una distanza massima pari al fattore di scala utilizzato, in questo caso 22 m), calcolato con il toolbox *'grid_strain'* [48] in *MATLAB* e rappresentato in *QGIS* assieme ai risultati del rilievo GPS del 27 marzo 2018 (opere presenti e fessure nel terreno) e gli elementi geomorfologici di riferimento descritti nei paragrafi precedenti.

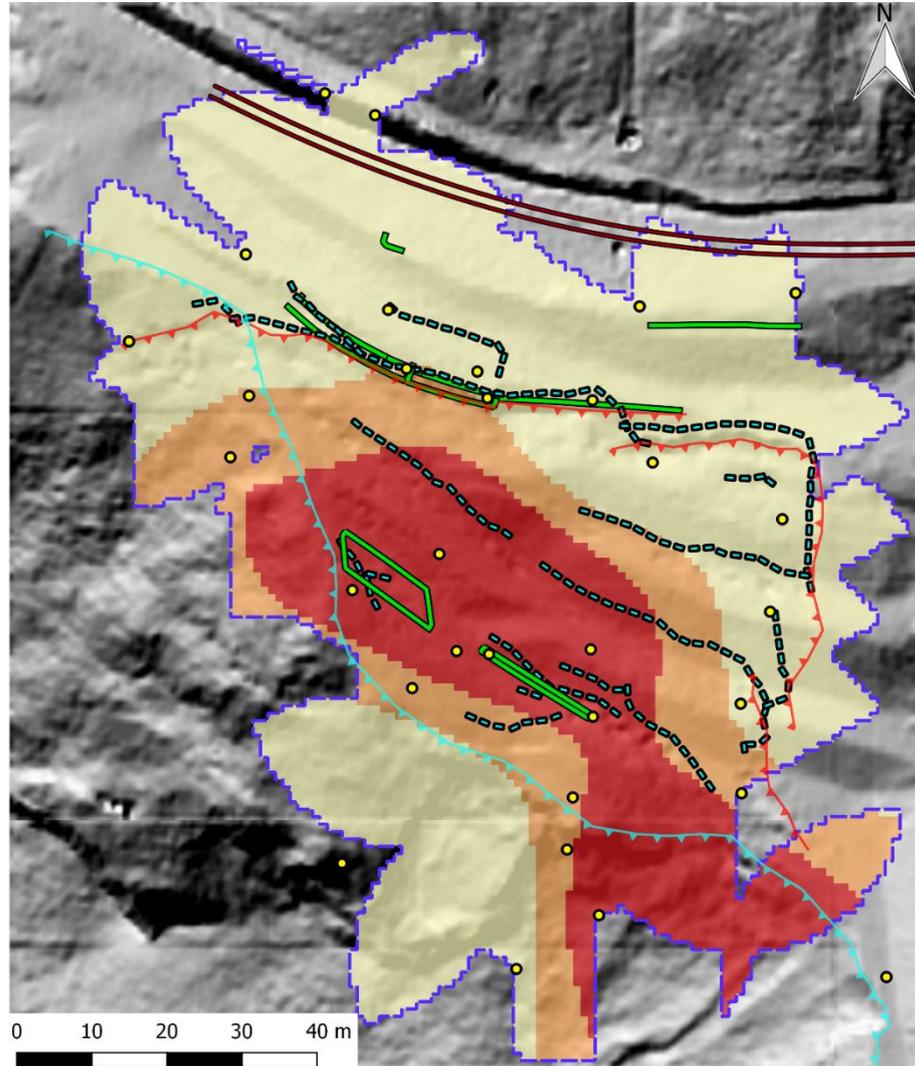
Nel caso della deformazione areale considero solo la componente orizzontale ('dxy') del vettore spostamento e, quindi, la deformazione che avviene sul piano orizzontale. Non si osservano valori negativi della deformazione areale e, dunque, il versante all'interno dell'area di significatività si deforma solo estendendosi. Tale estensione è maggiore nella zona a valle della berlinese (linea verde con bordo nero trasversale al versante appena a monte dell'area arancio-rossa in Figura 136), in particolare dove sono presenti i cordoli di cemento del 2005 (linee verdi con bordo nero a forma di parallelogramma e di rettangolo posti più a sud in Figura 136), ed in prossimità della porzione più instabile dell'orlo della scarpata di degradazione. Molte delle fratture rilevate nel marzo 2018 (linee azzurre con bordo nero tratteggiate in Figura 136) ricadono all'interno dell'area soggetta a maggiori deformazioni estensionali.

Quindi, se considerassi solo la componente orizzontale dei vettori spostamento, si avrebbe solamente estensione del pendio. Ciò non rappresenta bene la realtà la quale è molto più complessa, poiché la zona appena al di sotto della nicchia

morfologica mostra un'estensione ridotta rispetto ad altre porzioni del versante. Inoltre, osservando l'evoluzione degli spostamenti nei bimestri dell'ultimo anno si nota, in particolare a partire dal quarto bimestre, che le mire della berlinese del 1992 hanno subito spostamenti molto maggiori di quelle poste direttamente a valle in prossimità del cordolo a parallelogramma del 2005: in una tale condizione ci si aspetterebbe nell'area prossima al cordolo a parallelogramma una contrazione piuttosto che un'estensione. La contrazione di tale zona non si riscontra nella deformazione areale perché nelle mire poste sulla berlinese e, quindi, a monte predomina la componente verticale degli spostamenti sull'orizzontale, viceversa che nel settore di valle, come osservato nel paragrafo precedente.

La componente verticale nel calcolo del campo di deformazione della frana di Sant'Andrea non può essere, dunque, trascurata, sebbene si riconosca che le mire poste sulla berlinese registrano un movimento dell'opera che sembra ormai indipendente rispetto a quello del versante instabile.

CAMPO DI DEFORMAZIONE AREALE MEDIA MENSILE NELL'ULTIMO ANNO



Legenda

- | | |
|-------------------------------------|--|
| Area con significatività medio/alta | Rilievo GPS del 27 marzo 2018 |
| Posizione mire | Manufatto |
| Deformazione areale | Rotaia |
| ≤ 0 | Fessura nel terreno |
| $0 - 0.000309$ | Elementi geomorfologici di riferimento |
| $0.000309 - 0.000401$ | Nicchia della porzione più instabile della frana |
| > 0.000401 | Orlo di scarpata di degradazione |

Elaborazione di Bridi Federico

Figura 136 Campo di deformazione areale media mensile nell'ultimo anno, calcolato a partire dai dati della stazione topografica totale di Perarolo di Cadore ed attraverso il toolbox di MATLAB 'grid_strain', il cui manuale è rappresentato dal documento 'grid_strain grid_strain3. Release 1.5-July 2015. User's guide.' di Teza G. e Pesci A., 2015[48].

7.2.6.3 Campo di deformazione volumetrico medio mensile nell'ultimo anno

In Figura 139 è riportato il campo di deformazione volumetrico medio mensile dell'ultimo anno e l'area all'interno del quale esso ha significatività medio/alta (ovvero quei punti della griglia che sono circondati da almeno 2 mire per una distanza massima pari al fattore di scala utilizzato, in questo caso 22 m), calcolato con il toolbox 'grid_strain3' [48] in *MATLAB* e rappresentato in *QGIS* assieme ai risultati del rilievo GPS del 27 marzo 2018 (opere presenti e fessure nel terreno) e gli elementi geomorfologici di riferimento descritti nei paragrafi precedenti.

In questo caso si considera l'intero vettore spostamento ('dxyz') e, quindi, la deformazione volumetrica, ricordando che è relativa alla porzione più superficiale del versante in movimento: infatti, i dati di partenza da cui viene calcolato il campo di deformazione si riferiscono agli spostamenti registrati dalle mire ottiche della stazione topografica totale, le quali sono disposte su supporti che si estendono solo per qualche decina di centimetri in profondità nel terreno oppure sono ancorate alle opere presenti, delle quali rilevano i movimenti della porzione superficiale.

Dalla Figura 139 si rileva la presenza di due aree a diverso comportamento deformativo:

- un'area soggetta ad estensione, corrispondente alla porzione in giallo chiaro e arancio in Figura 139, ovvero con valori di deformazione volumetrica positivi. Questa zona mostra valori di estensione massima a valle del settore orientale della nicchia morfologica (area di colore arancio in Figura 139). Si osserva, inoltre, che a monte della berlinese, la quale nell'ultimo anno ha subito intensi movimenti, la deformazione volumetrica, sebbene mostri un carattere estensivo, sia minima. Ciò può essere legato alla mancanza di mire direttamente a monte di quelle prossime alla berlinese: infatti, l'area di significatività a tergo di suddetta opera è ristretta;

- un'area soggetta a contrazione (area di colore verde in Figura 139) con valori della deformazione volumetrica negativi e limitrofa al cordolo di cemento a parallelogramma del 2005 che, come citato nel paragrafo precedente, ha mostrato nell'ultimo anno

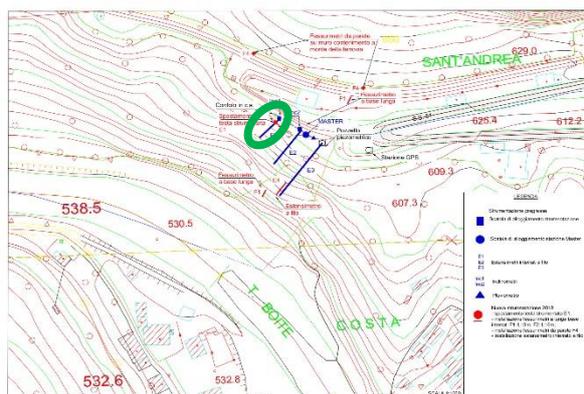


Figura 137 Disposizione planimetrica dei nuovi estensimetri e fessurimetri installati sul corpo di frana e/o sulle opere antropiche presenti (CLIOS s.r.l., [8]). Viene evidenziato con ellisse verde l'estensimetro di cui si parla nel testo.

spostamenti di entità minore rispetto alla berlinese di monte. Pertanto, il carattere deformativo di tipo contrazionale di tale zona è coerente con gli spostamenti osservati ed analizzati nei paragrafi precedenti. Inoltre, l'estensimetro, che fino a qualche mese fa era intestato sulla berlinese e raggiungeva questa zona (nominato E1 ed evidenziato dal cerchio verde in Figura 137 e chiamato S1 in Figura 114) rileva a partire dall'ottobre del 2017 una deformazione in accorciamento (rettangolo rosso in Figura 138) piuttosto che in allungamento, come aveva fatto in precedenza (Figura 138). Ancora una volta, si evidenzia, dunque, il comportamento cinematico ormai svincolato dal resto del versante della berlinese, il quale potrebbe essere il responsabile del risultato di quest'area di deformazione volumetrica negativa che si differenzia dal resto del pendio in estensione (l'aggiunta di nuove mire immediatamente a valle della berlinese potrebbe risolvere il quesito). Si richiama, infine, il comportamento deformativo particolare registrato all'inclinometro TIV2, nella relazione di Peretti (2006) [32] e commentato in precedenza nel capitolo inerente le indagini geofisiche ed i sondaggi geognostici. Come riportato in tale capitolo (Figura 69), l'inclinometro TIV2 si trova direttamente a monte del cordolo a parallelogramma del 2005 e le deformate, che registra, sembrano suggerire una maggiore deformabilità e minor rigidità del materiale che

costituisce tale porzione del versante rispetto a quello del settore contiguo più orientale (dove si trova l'inclinometro TIV1).

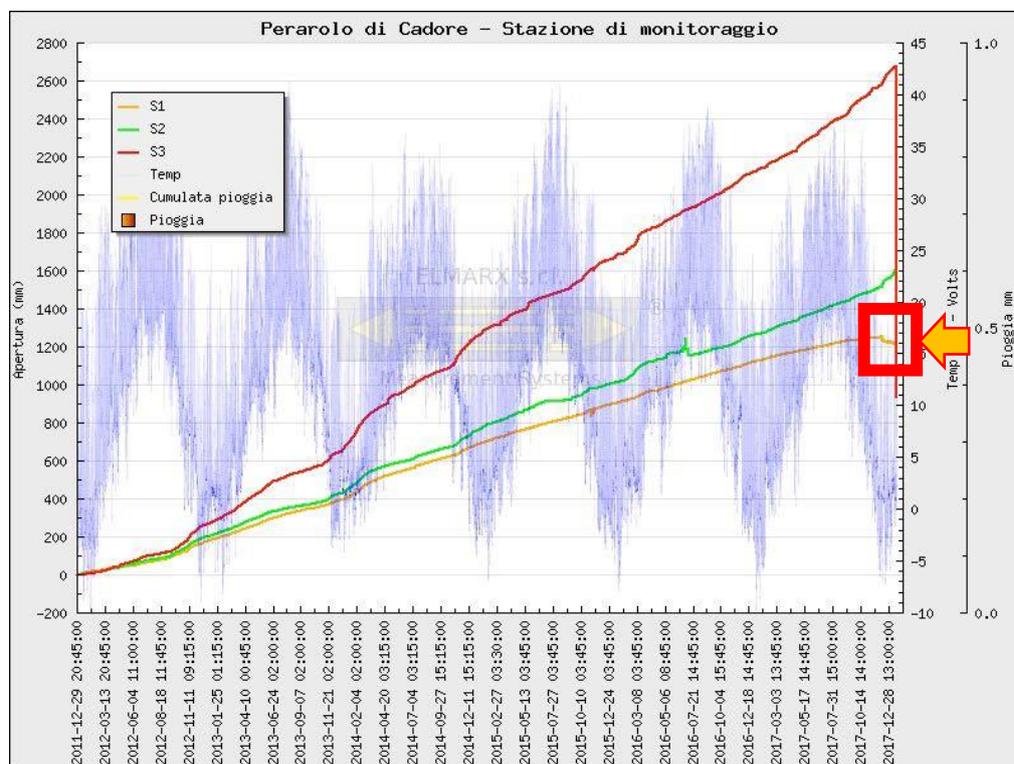


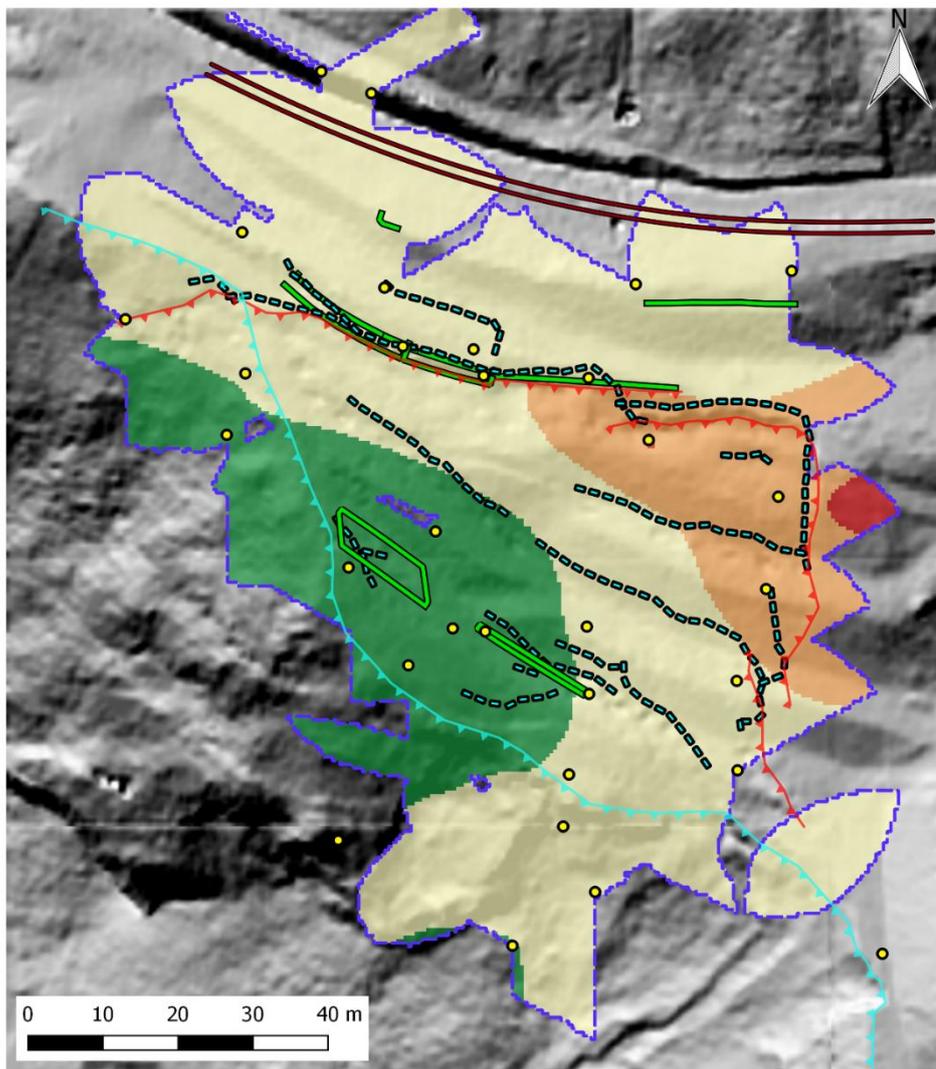
Figura 138 Deformate degli estensimetri posizionati sul corpo di frana di Sant'Andrea fino al termine della fine dell'anno 2011 al termine del 2017. S1, S2 ed S3 corrispondono rispettivamente a E1, E2 e E3 in Figura 137. Si evidenzia (nel rettangolo rosso) l'andamento della deformata dell'estensimetro S1 posto nella porzione più occidentale del corpo di frana che mostra a partire dall'ottobre 2017 un raccorciamento che si discosta dal precedente trend di estensione (CLIOS s.r.l., [8]).

Per concludere, la coesistenza (riscontrata nel calcolo della deformazione volumetrica a partire dai dati della stazione topografica totale e nelle deformate registrate dagli estensimetri) di zone a prevalente contrazione volumetrica con zone che mostrano una prevalente estensione è indice dell'eterogeneità in termini cinematici e, quindi, deformativi della frana di Sant'Andrea. La frana può essere definita, dunque, 'complessa' (secondo quanto già riportato nella relazione dello Studio Galli, datata 2012 [45]), caratterizzata dalla compresenza di movimenti

rotazionali e traslazionali (ma anche di un flusso pseudo-viscoso, come visto nei capitoli precedenti).

L'aggiunta di nuove mire porterebbe ad un'estensione dell'area di significatività medio/alta ed al riconoscimento della dipendenza o meno dallo svincolo della berlinese rispetto al resto del versante dell'area soggetta a contrazione volumetrica, emersa dal calcolo del campo di deformazione medio mensile dell'ultimo anno con il toolbox '*grid_strain3*' (Figura 139) e dai dati estensimetrici (Figura 138).

CAMPO DI DEFORMAZIONE VOLUMETRICA MEDIA MENSILE NELL'ULTIMO ANNO



Legenda

Area con significatività medio/alta

Posizione mire

Deformazione volumetrica

≤ 0

$0 - 0.000897$

$0.000897 - 0.00144$

> 0.00144

Elaborazione di Bridi Federico

Rilievo GPS del 27 marzo 2018

Manufatto

Rotaia

Fessura nel terreno

Elementi geomorfologici di riferimento

Nicchia della porzione più instabile della frana

Orlo di scarpata di degradazione

Figura 139 Campo di deformazione volumetrica media mensile nell'ultimo anno, calcolato a partire dai dati della stazione topografica totale di Perarolo di Cadore ed attraverso il toolbox di MATLAB 'grid_strain3', il cui manuale è rappresentato dal documento 'grid_strain_grid_strain3. Release 1.5-July 2015. User's guide.' di Teza G. e Pesci A., 2015 [48].

7.2.7 Cross-correlazione della cumulata pluviometrica giornaliera con la velocità di spostamento medie delle mire nell'ultimo anno

7.2.7.1 Introduzione

L'ultima elaborazione nella quale sono stati utilizzati i dati della stazione topografica totale di Perarolo di Cadore (BL) consiste nella cross-correlazione della cumulata giornaliera della variabile 'altezza pluviometrica', registrata alla stazione ARPAV di Perarolo (cfr. al paragrafo di inquadramento climatico-idrologico) con la variabile 'velocità di spostamento media giornaliera' dell'ultimo anno (dal 09/06/2017 al 08/06/2018). Lo scopo di tale analisi è lo studio del ritardo della risposta cinematica del versante in frana alla sollecitazione pluviometrica, dato l'evidente rapporto tra le precipitazioni e l'innescò di movimenti più intensi della frana di Sant'Andrea, come osservato nei capitoli precedenti. Per l'elaborazione i dati sono stati trattati in *MATLAB*, mentre i risultati sono stati riportati in tabelle *EXCEL*. Al fine di avere una rappresentazione di facile ed immediata lettura dei risultati e di proporre una loro possibile interpretazione, questi sono esaminati ed analizzati in *QGIS*.

I dati di partenza e forniti dall'*Università degli Studi di Padova* sono:

- 1) quelli relativi alla posizione delle mire ottiche della stazione topografica totale, costituiti da una matrice di dimensioni 40033x7x36, dove la prima dimensione indica il numero di intervalli temporali ai quali vengono effettuate le misure della stazione topografica dal novembre 2013 al giugno 2018, la seconda dimensione indica il numero di variabili delle quali vengono registrati i relativi valori ad ogni misura (ovvero l'istante temporale, le tre coordinate sferiche e le tre coordinate metriche sul sistema di riferimento locale), mentre la terza corrisponde al numero di mire delle quali viene rilevata la posizione;
- 2) quelli relativi all'altezza pluviometrica, registrata su scala oraria dalla stazione meteorologica di Perarolo di Cadore (BL), gestita da *ARPAV*.

Questi dati vengono trattati in *MATLAB*, prima di procedere al calcolo della funzione cross-correlazione.

I dati della stazione topografica totale vengono estratti per ogni mira sull'intervallo di tempo di interesse (dal 09/06/2017 al 08/06/2018) e vengono eliminati gli istanti temporali a cui non corrisponde alcuna registrazione oppure viene rilevato il solo valore nullo. Successivamente, viene calcolato lo 'spostamento' avvenuto tra ciascun istante temporale, ovvero viene calcolata la derivata della variabile campionata 'posizione'. Tale derivata ha le dimensioni di una lunghezza, in particolare è espressa in 'm'. Per esprimere la derivata come una velocità e, quindi, con le dimensioni di una lunghezza su un tempo, viene calcolata la lunghezza di ciascun istante temporale su cui avviene il relativo spostamento e, quindi, viene rapportata a denominatore con il relativo spostamento. La nuova variabile ottenuta è la 'velocità di spostamento' o 'velocità', espressa in 'm/giorno'. La derivazione numerica di questa variabile genera, però, del rumore, come ricordato nella *relazione dell'Università degli Studi di Padova relativa alla prima fase della Convenzione di ricerca (2015)* [55]. Per ovviare al problema del rumore, viene applicata una media mobile con finestra direzionata 'backward' di lunghezza 6 punti campionati, che permette di calcolare la velocità media sull'intero giorno precedente ciascun istante temporale nel caso di intervallo di campionamento della posizione della mira sia pari a 6 ore o sulle 6 ore precedenti ciascun istante temporale nel caso di intervallo di campionamento sia pari ad 1 ora. La scelta di analizzare solamente i dati precedenti a ciascun istante di tempo ha lo scopo di simulare la condizione di monitoraggio in tempo reale, nella quale si conoscono solamente i dati registrati in precedenza ma non quelli futuri. Infine, vengono eliminati i valori di velocità superiori a 20 volte la velocità media calcolata sull'intero periodo analizzato (giugno 2017-giugno 2018), ottenendo la variabile 'velocità media' utilizzata in seguito.

Per quanto riguarda i dati di altezza pluviometrica oraria, da essi viene calcolata la cumulata pluviometrica giornaliera attraverso una funzione somma che agisce su una finestra mobile 'backward' lunga 24 punti di campionamento (corrispondenti

ad un giorno). Infine, ne vengono estratti i valori sugli stessi istanti temporali in cui sono presenti valori della ‘velocità media’, ottenendo, così, la variabile ‘cumulata pluviometrica giornaliera’.

Le due variabili, ‘velocità media’ e ‘cumulata pluviometrica giornaliera’, sono correlate fra loro attraverso la funzione ‘crosscorr’, presente nell’ *‘Econometrics Toolbox’ di MATLAB* [30], la quale è adatta per cross-correlare variabili campionate. Il risultato della funzione ‘crosscorr’ è il grafico della funzione cross-correlazione campionata o ‘sample cross-correlation’ (Figura 140) in cui sull’asse delle ascisse è riportato il numero di lag, che rappresenta il numero di punti di campionamento del quale viene spostata la variabile da correlare (se positivo la variabile viene spostata in avanti nel tempo, se negativo essa viene spostata indietro nel tempo) , e sull’asse delle ordinate il valore assunto dalla funzione cross-correlazione, la quale rappresenta il valore dell’area sottesa ed in comune tra gli andamenti delle due variabili correlate [10]. Siccome l’estensione dell’intervallo di campionamento della stazione topografica totale è variabile nel tempo e da mira a mira, viene riproposto nel grafico della funzione cross-correlazione campionata (‘sample cross-correlation’) in un rettangolo in alto a sinistra il valore medio dell’intervallo temporale di campionamento e, quindi, il valore medio di un ‘lag’ in giorni (Figura 140). Si specifica, inoltre, che quando la funzione cross-correlazione campionata è positiva significa che le due variabili hanno segni concordi, viceversa quand’è negativa i segni delle variabili sono discordi. Essendo la variabile ‘cumulata pluviometrica giornaliera’ sempre positiva per natura della stessa, il segno della funzione cross-correlazione campionata riflette quello della variabile ‘velocità media’. Infine, sono rappresentate le rette (rette blu in Figura 140) corrispondenti ai valori negativi e positivi del doppio della deviazione standard della funzione cross-correlazione campionata (soglie di significatività a 2 deviazioni standard) e oltre le quali la correlazione tra la ‘cumulata pluviometrica giornaliera’ e la ‘velocità media’ può essere considerata significativa al 95% (in analogia con quanto riportato nella *relazione dell’Università degli Studi di Padova inerente la prima fase della*

Convenzione di ricerca (2015) [55], dove la soglia di significatività è di 3 deviazioni standard -99%-).

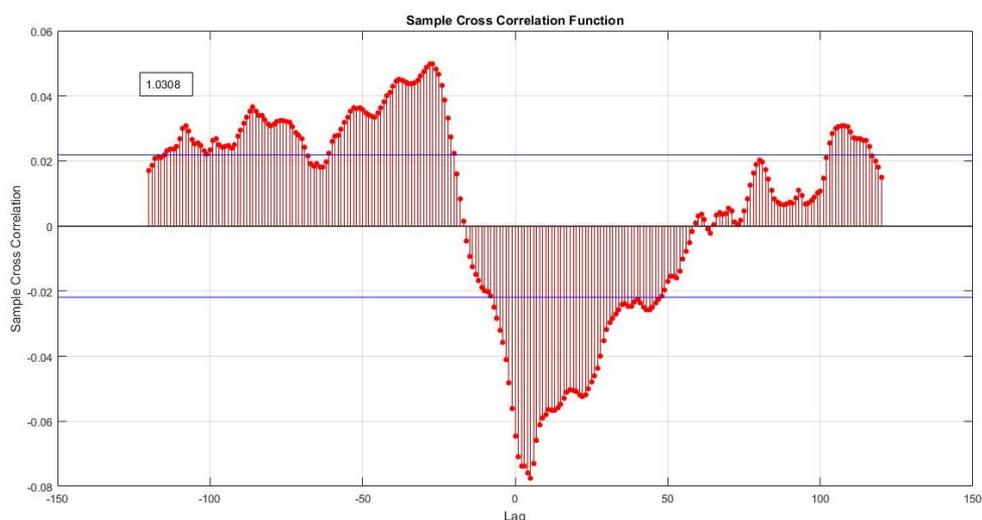


Figura 140 Esempio di funzione cross-correlazione campionata ('sample cross-correlation') ottenuta in MATLAB attraverso la funzione 'crosscorr' di 'Econometrics Toolbox'[30]. In alto a sinistra è riportato il valore medio in giorni di un 'lag'. Le rette blu rappresentano le soglie di significatività a 2 deviazioni standard (95%). Il grafico di esempio è quello ottenuto dalla cross-correlazione tra la 'cumulata pluviometrica giornaliera' e la 'velocità media' della componente verticale di spostamento della mira P31 della stazione topografica totale di Perarolo di Cadore.

7.2.7.2 Crosscorrelazione con la velocità media verticale

Inizialmente si è proceduto con l'elaborazione dei dati ed il calcolo della cross-correlazione della cumulata pluviometrica giornaliera con la 'velocità media' verticale, ovvero calcolata a partire dalla coordinata z delle mire nel sistema di riferimento locale ai vari istanti temporali di acquisizione dei dati.

Dai grafici risultanti per le diverse mire (del tipo riportato in Figura 140) viene estratto il ritardo ('Ritardo') corrispondente al primo picco oltre le soglie di significatività di 2 deviazioni standard della funzione cross-correlazione campionata per 'lags' maggiori o uguali a zero (poiché la risposta cinematica del versante in frana non può che avvenire in istanti temporali successivi alla

sollecitazione pluviometrica e, quindi, come detto precedentemente, si considera solo il caso in cui la variabile da correlare ovvero la ‘cumulata pluviometrica giornaliera’ viene spostata in avanti lungo l’asse ‘tempo’). Inoltre, vengono rilevati:

- il segno del picco, che indica cioè se la funzione cross-correlazione è positiva (+) o negativa (-);
- la qualità della correlazione, che descrive la presenza o meno della correlazione e l’andamento della funzione cross-correlazione campionata = (1) assenza di correlazione o dispersione della funzione cross-correlazione campionata e, quindi, impossibilità di rilevare un ritardo, (2) correlazione presente e funzione cross-correlazione campionata con andamento che varia su alte frequenze, (3) correlazione presente e funzione cross-correlazione campionata con andamento che varia su basse frequenze;
- il tipo di picco selezionato, che specifica se il picco selezionato (ovvero il primo nell’intervallo di ‘lags’ maggiori e uguali di zero oltre la soglia di significatività di 2 deviazioni standard) è il massimo (o minimo) assoluto o un massimo (o minimo) locale.

Queste informazioni vengono riassunte in una tabella *EXCEL* e, poi, riportate in uno ‘shapefile’ puntuale in *QGIS*.

In GIS viene, infine, proposta una zonazione del versante in frana in funzione del ritardo nella risposta cinematica alla sollecitazione pluviometrica (Figura 141). Si riporta anche l’area, perimetrata con linea blu tratteggiata in Figura 141, che contiene le mire in cui il primo picco oltre la soglia di significatività della funzione cross-correlazione mostra segno positivo ad indicare un’iniziale risposta di innalzamento del riflettore alla sollecitazione pluviometrica rispetto all’abbassamento che ci si aspetterebbe e che si riscontra nelle altre mire (con segno negativo del picco selezionato).

La zonazione proposta considera il comportamento della frana di Sant’Andrea nell’ultimo anno e prevede la suddivisione in aree che rispondono alla

sollecitazione pluviometrica in meno di un giorno (area rossa in Figura 141) e in zone che reagiscono dopo più di un giorno (aree gialle in Figura 141). Si osserva come la porzione del versante che risponde prima alla sollecitazione pluviometrica, ovvero entro un giorno, corrisponde con una fascia orientata N-SW che comprende la berlinese del 1992, mentre le zone limitrofe mostrano un ritardo che supera il giorno tra gli eventi pluviometrici ed i relativi movimenti innescati.

Il moto quasi istantaneo della berlinese con le precipitazioni può essere dovuto al fatto che questa si è completamente svincolata nel corso dell'anno dalle strutture (pali e tiranti) che la mantenevano solidale al versante, seguendo ora una cinematica ed una dinamica parzialmente indipendenti dal resto del pendio.

Dal confronto con la suddivisione del corpo di frana in termini di ritardo di risposta alla sollecitazione pluviometrica (Figura 142) proposta *nel 2015 nella relazione dell'Università degli Studi di Padova ed inerente la seconda fase della Convenzione di ricerca* [56] emerge che:

- 1) il versante si muove con un ritardo dagli eventi pluviometrici innescanti nettamente inferiore rispetto al 2015, in cui il ritardo minimo si aggirava sui 5 giorni, mentre nel 2017-2018 la risposta in alcune zone avviene entro un lasso di tempo dell'ordine delle ore;
- 2) la porzione del versante occidentale che nel 2015 si muoveva successivamente a quella orientale, nel 2017-2018 sembra reagire prima dell'altra alla sollecitazione pluviometrica.



Figura 142 Zonazione di ritardo nella risposta alla sollecitazione pluviometrica del corpo di frana, sovrapposta alla zonazione cinematica. Immagine riportata nella 'Relazione tecnica inerente alla Seconda Fase della Convenzione. Definizione delle soglie di allertamento del fenomeno franoso della Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL)' nell'ambito della Convenzione di ricerca fra la Regione del Veneto (Dipartimento Difesa del Suolo e Foreste, Sezione Difesa del Suolo) e l'Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geoscienze), datata 2015 e stilata dall'Università degli Studi di Padova, (Dipartimento di Geoscienze, Responsabile Scientifico: dott. A. Galgaro) [56].

Un'analisi di correlazione fra le precipitazioni e le velocità di spostamento della frana, simile a quella descritta in precedenza, è oggetto della *relazione finale della Convenzione, stilata dal Dipartimento di Geoscienze dell'Università degli Studi di Padova in merito agli interventi per la mitigazione della pericolosità della frana di Sant'Andrea (2018)* [57]. Il risultato dello studio riportato è una suddivisione del versante in movimento basata sul ritardo nella risposta allo stimolo pluviometrico nell'ultimo anno (Figura 143), e si mostra analogo a quello ottenuto attraverso il procedimento descritto nelle righe precedenti e riportato in Figura 141. Si riconosce, infatti, il settore occidentale che risponde dopo meno di o al più un giorno, mentre il settore orientale mostra ritardi superiori al giorno (in particolare, secondo la stessa relazione dell'Università [57], oltre 1.75 giorni).



Figura 143 Suddivisione del corpo di frana di Sant'Andrea in zone ad egual ritardo nella risposta cinematica allo stimolo pluviometrico, riportata nella recente relazione del Dipartimento di Geoscienze dell'Università degli Studi di Padova [57].

Tornando alla zonazione ottenuta attraverso l'elaborazione eseguita (Figura 141), si nota che la porzione principale del corpo di frana che mostra un segno positivo della funzione cross-correlazione campionata al ritardo selezionato è situata a valle della berlinese in corrispondenza del cordolo a parallelogramma del 2005. Tale zona, analizzando la cross-correlazione, tenderebbe a rispondere bene alla sollecitazione pluviometrica, ovvero a mostrare, alle mire qui collocate, il massimo assoluto (o minimo) della funzione, su ritardi di 6 giorni circa (Figura 144 freccia blu). Si osserva, altresì, come quest'area coincida con quella identificata nel paragrafo precedente con deformazione volumetrica negativa ovvero in contrazione.

Infine, si riconosce che per le mire della zona citata e per gran parte delle mire lungo l'orlo della scarpata di degradazione la correlazione fra le due variabili non è molto buona come testimoniato dall'andamento del grafico in Figura 144, riferito alla mira P13. Tali mire sono localizzate nell'area che, nel corso dell'analisi sulla distribuzione spaziale dei rapporti tra la componente orizzontale e verticale del vettore spostamento, mostra una predominanza degli spostamenti sul piano orizzontale rispetto a quelli sulla verticale. Pertanto, una possibile integrazione dei ritardi calcolati a partire dalla sola componente verticale (z) con i risultati della correlazione della 'cumulata pluviometrica giornaliera' con la 'velocità media' orizzontale potrebbe affinare la zonazione del versante in termini di ritardo di risposta alla sollecitazione pluviometrica e, quindi, la conoscenza del fenomeno. Nel paragrafo successivo viene descritto il risultato di questo procedimento.

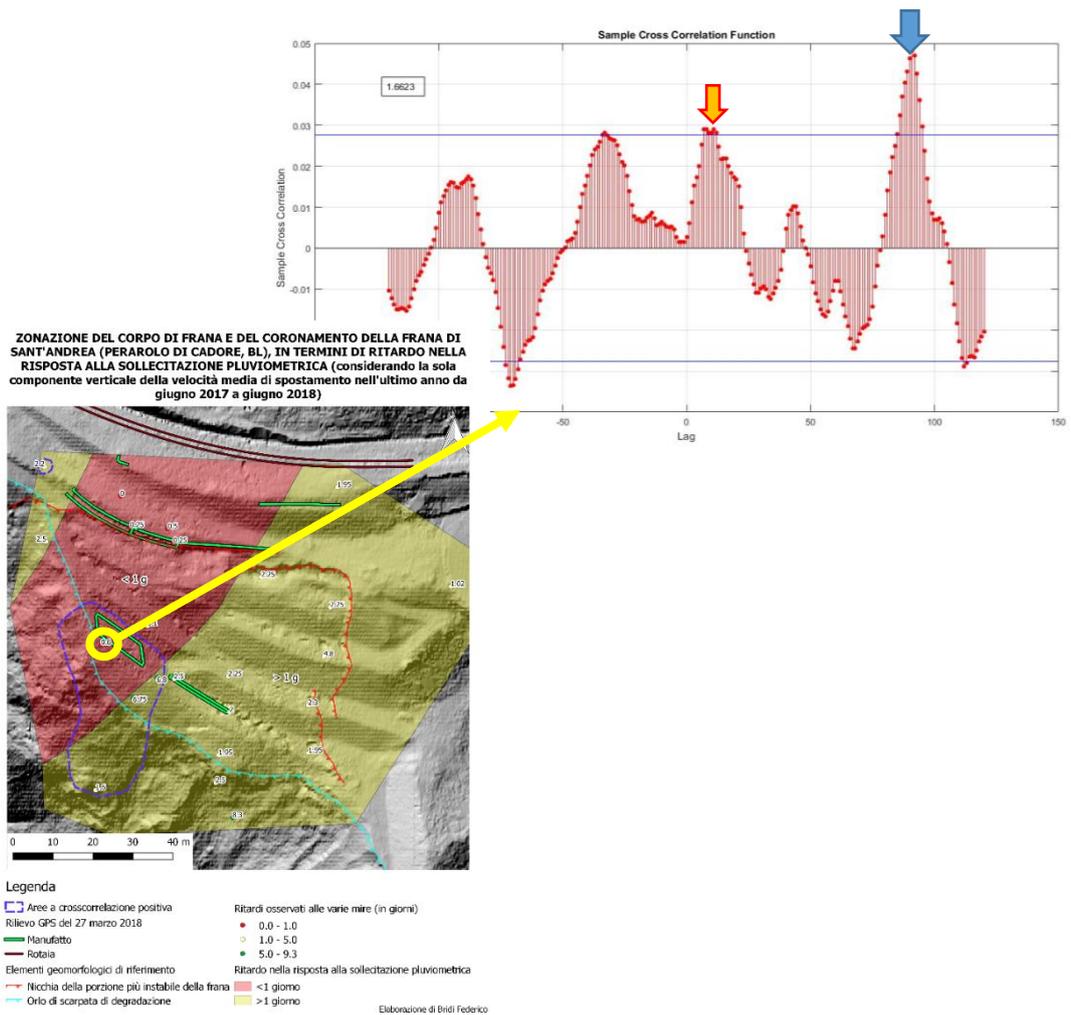


Figura 144 Particolare (sulla zonazione della frana di Sant'Andrea del ritardo di risposta alla sollecitazione pluviometrica dell'ultimo anno, Figura 141) dell'andamento della funzione cross-correlazione campionata, calcolata tra la 'cumulata pluviometrica giornaliera' e la 'velocità media verticale' nell'ultimo anno della mira P13. Tale mira è situata nella zona in cui la cross-correlazione è positiva ovvero che mostra una tendenza all'innalzamento rispetto all'abbassamento come risposta alla sollecitazione pluviometrica. Con la freccia arancio è evidenziato il primo picco oltre la soglia di significatività e quello selezionato per l'attribuzione del ritardo, mentre con la freccia blu il massimo assoluto della funzione cross-correlazione campionata ad un ritardo di 6.5 giorni.

7.2.7.3 Integrazione con il calcolo della crosscorrelazione con la velocità media orizzontale

Per verificare il legame tra la predominanza di una componente del vettore spostamento sull'altra e la qualità della funzione cross-correlazione campionata, si

è eseguito un procedimento di calcolo analogo a quello descritto nel paragrafo precedente utilizzando, però, come serie di dati delle ‘velocità medie’ quelle relative alla componente orizzontale. Si intende, cioè, che le ‘velocità medie’ sono state ottenute considerando la sola coordinata x di posizione delle mire ottiche della stazione topografica totale. La scelta di considerare la sola coordinata x , piuttosto che congiuntamente alla coordinata y , è dettata dalla volontà di evitare l’insorgere di eventuali (ed ulteriori) distorsioni artificiali del segnale rilevato dalla stazione topografica, che potrebbero generarsi dalla somma vettoriale delle due componenti x e y . Inoltre, si è osservato che il movimento sul piano orizzontale di quasi tutte le mire (eccetto quelle più stabili e quelle di riferimento) nel corso dei bimestri dell’ultimo anno sia dominato dalla componente parallela alla direzione di massima pendenza del versante ovvero dalla componente x , giustificando la decisione di prendere in considerazione solamente gli spostamenti in tale direzione a rappresentanza di quelli sviluppati sul piano orizzontale.

Il confronto fra il grafico relativo alla cross-correlazione campionata con la componente verticale della ‘velocità media’ della mira P6 (riportato in alto a destra in Figura 145) e quello ottenuto considerando la componente orizzontale, o meglio lungo x (riportato in basso a destra in Figura 145) dà un’idea della differenza del risultato e sulla possibilità di indagare in modo migliore la correlazione che intercorre tra le precipitazioni ed i movimenti del versante. Infatti, l’andamento della funzione cross-correlazione campionata ricavata dal calcolo con la ‘velocità media’ orizzontale (riportato in basso a destra in Figura 145) si mostra di più facile interpretazione del rispettivo grafico ottenuto considerando la componente verticale (riportato in alto a destra in Figura 145): il picco massimo assoluto si rileva immediatamente, essendo ben distinto dagli altri e ben oltre la soglia di significatività (segnato con la freccia gialla nel grafico in basso a destra in Figura 145).

ZONAZIONE DEL CORPO DI FRANA E DEL CORONAMENTO DELLA FRANA DI SANT'ANDREA (PERAROLO DI CADORE, BL), IN TERMINI DI RITARDO NELLA RISPOSTA ALLA SOLLECITAZIONE PLUVIOMETRICA (considerando la sola componente verticale della velocità media di spostamento nell'ultimo anno da giugno 2017 a giugno 2018)

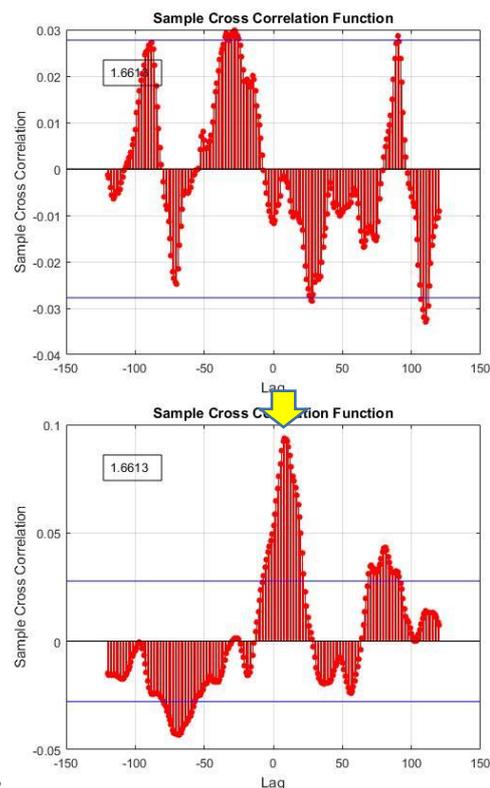
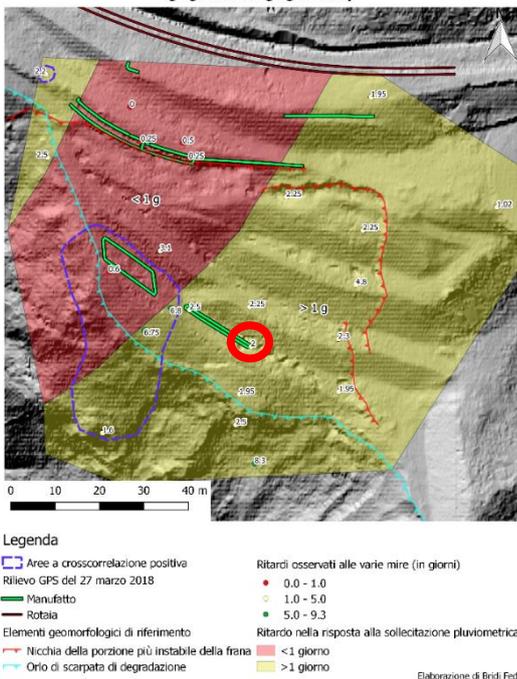


Figura 145 A destra zonazione in base al ritardo di risposta alla sollecitazione pluviometrica considerando la sola componente verticale, in cui viene evidenziata la posizione della mira P6. A destra in alto andamento della funzione cross-correlazione campionata considerando la sola componente verticale della velocità media. A destra in basso andamento della funzione cross-correlazione campionata considerando la sola componente orizzontale (x) della velocità media con evidente massimo assoluto positivo a 0.6 giorni di ritardo.

Si è, dunque, proceduto all'integrazione dei ritardi ottenuti considerando ciascuna delle due componenti. Per la scelta tra i due ritardi e, quindi, tra le due funzioni da attribuire a ciascuna mira si sono seguiti due criteri:

- 1) l'appartenenza della mira ad una delle due aree riconosciute nei paragrafi precedenti in particolare in Figura 135 (a) a prevalenza della componente orizzontale (Figura 135 (a) perimetrata con tratteggio rosso) o verticale (Figura 135 (a) perimetrata con tratteggio giallo);
- 2) la qualità dell'andamento della funzione cross-correlazione campionata, che risulta ottimale se si mostra variabile con basse frequenze e, quindi, in genere con massimi assoluti netti e di facile interpretazione (all'incirca come quello riportato in basso a destra in Figura 145).

Il risultato di questo procedimento è un'ulteriore zonazione del corpo di frana (Figura 146) basata sull'integrazione della cross-correlazione della 'cumulata pluviometrica giornaliera' delle due componenti, verticale e orizzontale (x), della 'velocità media', in funzione della localizzazione delle mire ottiche nelle zone a predominanza di una o dell'altra componente del vettore spostamento.

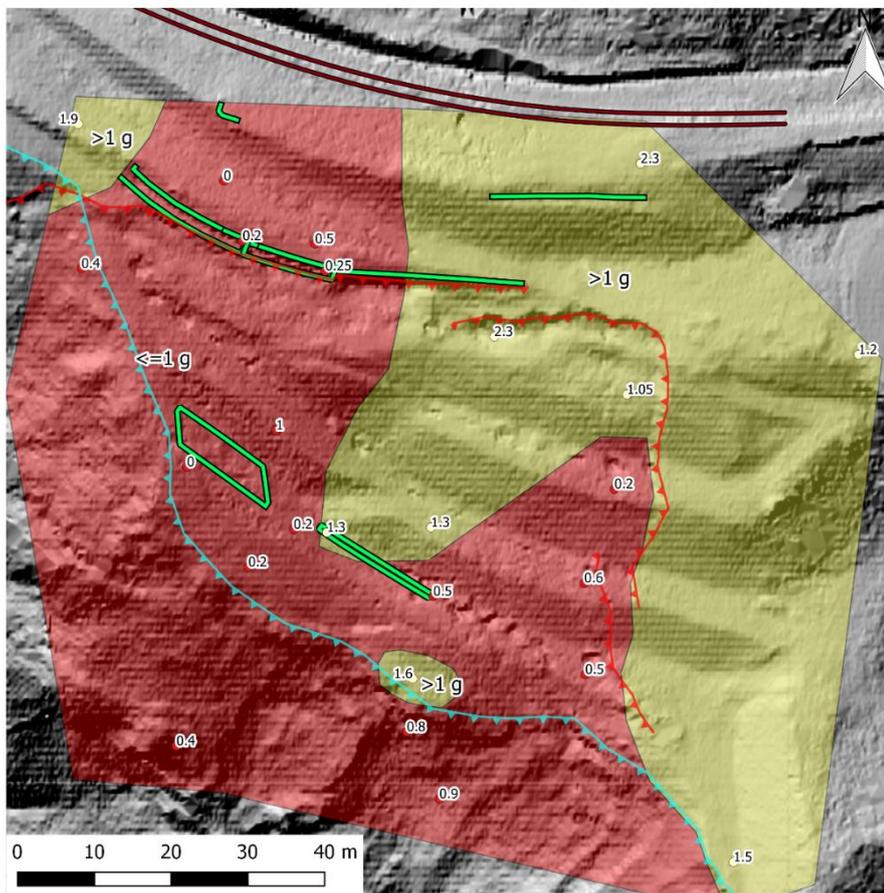
Analizzando la Figura 146 si possono riportare alcune considerazioni in merito alla nuova zonazione proposta:

- 1) le zone distinte, come nella zonazione precedente Figura 141, sono quelle con ritardo minore o uguale ad 1 giorno e quelle con ritardo maggiore al giorno. Quindi, anche in questo caso la risposta del versante alla sollecitazione pluviometrica è più rapida rispetto a quanto osservato nel 2015 [56];
- 2) si riconosce come in Figura 141 la fascia che comprende la berlinese e che si estende in direzione N-SW. In questo caso, però, la porzione del corpo di frana che reagisce agli eventi pluviometrici in meno di un giorno non è limitata alla sola fascia descritta, come in Figura 141, ma coinvolge anche la porzione a monte dell'orlo centro-orientale e più instabile (secondo quanto visto nei paragrafi precedenti) della scarpata di degradazione. In Figura 141 questa porzione è inserita all'interno della zona a risposta cinematica con ritardo oltre il giorno, che si riduce al solo settore di monte in Figura 146;
- 3) infine, si osserva la singolarità della risposta della mira P15, che presenta ritardi superiori al giorno, all'interno dell'area che reagisce entro 1 giorno. Il comportamento isolato del riflettore e, quindi, del blocco di materiale su cui è impostato è già stato osservato nei paragrafi precedenti (Figura 131).

7.2.7.4 Considerazioni riassuntive

Per riassumere, si è osservata, dunque, un'accelerazione della risposta del corpo di frana alla sollecitazione pluviometrica, la quale si può presentare con ritardi orari, soprattutto nella zona della berlinese e a valle di questa. Si è riconosciuta, inoltre, la possibilità di selezionare la direzione del sistema di riferimento, lungo la quale determinare la 'velocità media' per il calcolo della funzione cross-correlazione di ciascuna mira, in base alla componente predominante del vettore spostamento per ciascun riflettore. Tale accorgimento sembra di affinare l'analisi della correlazione fra le precipitazioni ed i movimenti del versante.

ZONAZIONE DEL CORPO DI FRANA E DEL CORONAMENTO DELLA FRANA DI SANT'ANDREA (PERAROLO DI CADORE, BL), IN TERMINI DI RITARDO NELLA RISPOSTA ALLA SOLLECITAZIONE PLUVIOMETRICA (considerando sia la componente verticale che orizzontale della velocità media di spostamento nell'ultimo anno da giugno 2017 a giugno 2018)



Legenda

Rilievo GPS del 27 marzo 2018

— Manufatto

— Rotaia

Elementi geomorfologici di riferimento

— Nicchia della porzione più instabile della frana

— Orlo di scarpata di degradazione

Ritardi osservati alle varie mire (in giorni)

● ≤ 1 g

○ > 1 g

Ritardo nella risposta alla sollecitazione pluviometrica

■ ≤ 1 giorno

■ > 1 giorno

Elaborazione di Bridi Federico

Figura 146 Zonazione del versante in cui è impostata la frana di Sant'Andrea in termini di ritardo nella risposta alla sollecitazione pluviometrica, basata sull'integrazione fra la cross-correlazione della cumulata pluviometrica giornaliera con la velocità media verticale (z) e orizzontale (x) delle mire della stazione topografica totale nell'ultimo anno (da giugno 2017 a giugno 2018). La base topografica è l'hillshade del DEM ottenuto dal rilievo Lidar della primavera 2018, commissionato dall'Università degli Studi di Padova. Sono riportati, inoltre, i risultati del rilievo GPS del 27 marzo 2018, eseguito dalla stessa Università e la posizione di alcuni elementi geomorfologici di riferimento, già descritti in precedenza.

7.2.8 Evento del 12 dicembre 2017

Il paragrafo precedente che descrive la correlazione fra le precipitazioni ed i movimenti della frana di Sant'Andrea offre lo spunto per analizzare alcuni grafici indicativi degli spostamenti registrati dalla stazione topografica totale in occasione della crisi del 12 dicembre 2017, che ha portato all'evacuazione del centro storico di Perarolo di Cadore.

In particolare, di seguito si propongono dei grafici relativi agli andamenti di alcune variabili cinematiche e pluviometriche nel mese precedente e nel mese successivo l'evento del 12 dicembre per alcune mire ottiche della stazione topografica totale.

Le variabili cinematiche analizzate sono le 'velocità medie' verticale ed orizzontale (lungo x), calcolate ed elaborate nel paragrafo precedente, rispettivamente indicate con ' v_z ' e ' v_x '. Mentre quelle pluviometriche sono le cumulate a 1 giorno, 3, 8 e 15 giorni (chiamate rispettivamente 'CP1', 'CP3', 'CP8' e 'CP15').

L'andamento delle variabili soprariportate viene indagato per le mire P2 (ovvero quella soggetta a maggiori spostamenti, nel cerchio rosso in Figura 147), P15 (posta in prossimità della porzione più instabile dell'orlo di scarpata di degradazione, nel cerchio giallo in Figura 147) e P1 (soggetta a movimenti esigui e posta nel tratto orientale e più 'stabile' della berlinese, nel cerchio fucsia in Figura 147), scelte dal campo di spostamento calcolato nei paragrafi precedenti per il bimestre 4 (Figura 147) in cui si colloca la crisi del 12 dicembre 2017.

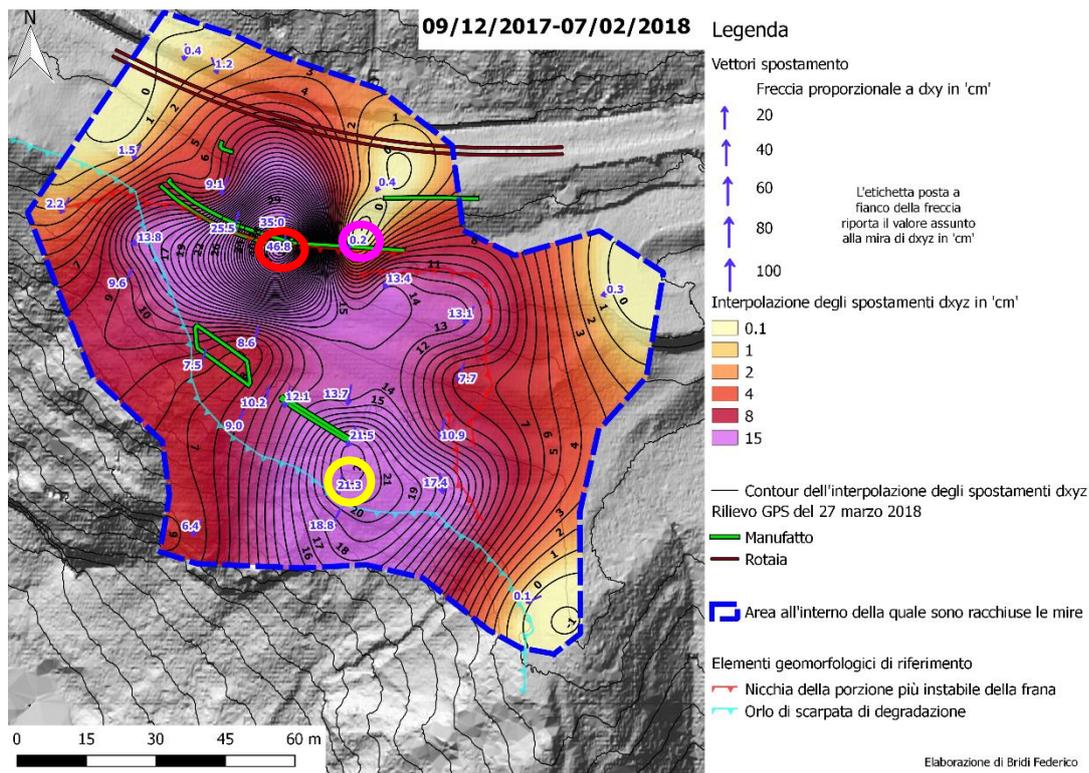


Figura 147 Campo degli spostamenti nel bimestre 4 (09/12/2017-07/02/2018) con evidenziate le mire di cui sono mostrati gli andamenti delle variabili cinematiche e pluviometriche menzionate nel testo.

Si riportano i grafici relativi alla mira P2 in Figura 148, dove i primi due dall'alto raffigurano rispettivamente gli andamenti della 'velocità media' verticale e orizzontale, mentre gli altri due la cumulata pluviometrica giornaliera (CP1) e le cumulate a 3, 8 e 15 giorni (CP3, CP8 e CP15).

Si può osservare come la componente verticale della 'velocità media' (i cui valori si attestano sull'ordine dei cm/giorno) mostri bene la risposta alla sollecitazione pluviometrica: infatti, essa, dopo un periodo caratterizzato da velocità oscillanti intorno ai 0 m/giorno, presenta un importante picco negativo (la cui entità può essere sottostimata a causa del filtraggio dei dati della velocità media al di sopra di valori pari a 20 volte il valor medio riscontrato nel corso dell'anno, come riportato nel paragrafo precedente) in corrispondenza dell'evento pluviometrico con picco della cumulata pluviometrica giornaliera di 104.2 mm (linea rossa tratteggiata in Figura 148). L'evento del 12 dicembre è seguito da un periodo con velocità che si

mantengono al di sotto dei 0 m/giorno e che corrisponde allo stesso intervallo di tempo in cui la cumulata pluviometrica a 15 giorni si mantiene costantemente sopra i 100 mm (rettangolo verde tratteggiato in Figura 148). Non essendosi verificate altre precipitazioni in questo periodo però, l'andamento della variabile 'velocità media' verticale può essere legato al rilassamento (linea arancio in Figura 148) a seguito del brusco aumento degli spostamenti. Nel periodo successivo all'evento meteorologico più importante, dunque, il trend di variazione della 'velocità media' verticale (linea arancio in Figura 148) e, quindi, il valor medio della variabile stessa si presentano maggiori rispetto a quelli assunti nel periodo precedente (linea verde in Figura 148). Infine, la successione di altri eventi meteorologici importanti ed il conseguente innesco di brusche accelerazioni del versante non consentono alla 'velocità media' (verticale in questo caso) di riassetarsi sui valori precedenti, determinando così un comportamento di isteresi della cinematica del versante che ne mina progressivamente ed in maniera sempre più rapida la stabilità.

Anche la componente orizzontale della 'velocità media' (che presenta valori dell'ordine dei cm/giorno, secondo grafico dall'alto in Figura 148) mostra una risposta alla sollecitazione pluviometrica corrispondente al picco della cumulata giornaliera di 104.2 mm, ma essa sembra reagire in un secondo momento rispetto alla componente verticale, essendo il picco (positivo) leggermente spostato in avanti nel tempo (freccia rossa in Figura 148). Inoltre, non si riscontra il trend di rilassamento con la stessa evidenza con cui si rileva nella componente verticale ed i valori della 'velocità media' orizzontale si mantengono oscillanti intorno ai 0 m/giorno. I picchi negativi della componente orizzontale della 'velocità media' riscontrabili appena dopo la risposta (positiva) alla sollecitazione pluviometrica (freccie blu in Figura 148) possono suggerire la tendenza al ribaltamento della mira stessa e, quindi, della berlinese sulla quale questa è collocata. Tali picchi si rilevano anche in periodi di scarse precipitazioni (freccie verdi in Figura 148), dimostrandosi molto più di semplice rumore e testimoniando l'evoluzione anche in assenza di un importante stimolo pluviometrico del movimento della struttura.

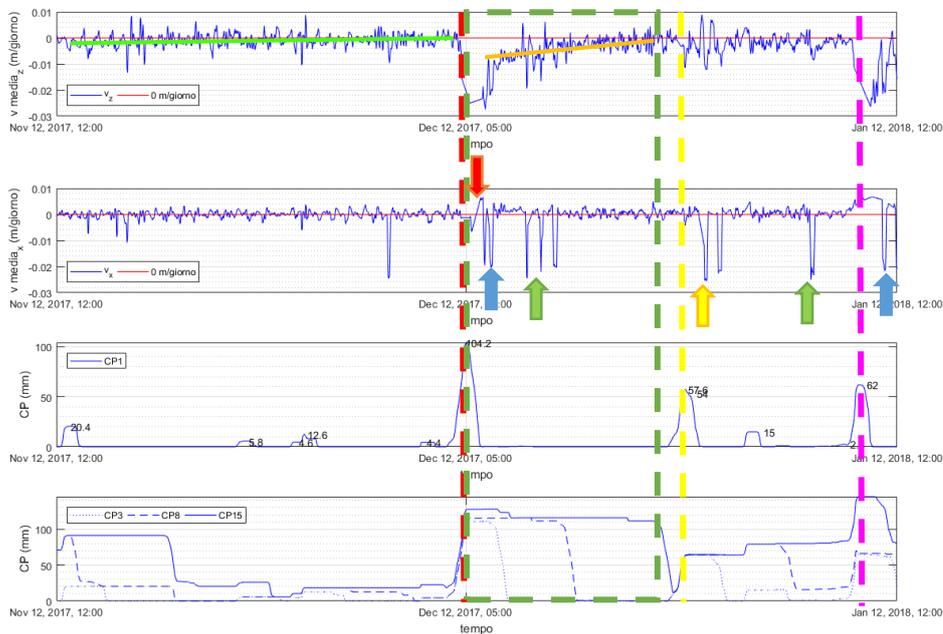


Figura 148 Andamento delle variabili cinematiche alla mira P2 ('velocità media' verticale-primo dall'alto- e orizzontale-secondo dall'alto-) e pluviometriche (cumulata giornaliera-terzo dall'alto- e a 3,8 e 15 giorni-quarto dall'alto-) un mese prima ed un mese dopo la crisi del 12 dicembre 2017.

Si nota, infine, un'accelerazione di entrambe le componenti cinematiche (linea fucsia tratteggiata in Figura 148) alla fine del periodo considerato in corrispondenza di un picco della cumulata pluviometrica a 15 giorni oltre i 100 mm e di un massimo locale di quella giornaliera sui 60 mm. La correlazione con la cumulata bisettimanale sembra importante: infatti, la risposta cinematica della mira P2 non è così rilevante per la componente verticale in corrispondenza di un altro picco della cumulata pluviometrica giornaliera di circa 57 mm, ma con una cumulata ai 15 giorni che si aggira sui 50 mm (linea gialla tratteggiata in Figura 148). A quest'ultimo evento risponde comunque la componente orizzontale in maniera negativa secondo un probabile moto di ribaltamento (freccia gialla in Figura 148).

Per quanto riguarda la mira P15 (Figura 149), la risposta cinematica alla sollecitazione pluviometrica corrispondente al picco della cumulata giornaliera del 12 dicembre 2017 di 104.2 mm non è così evidente ed istantaneo come nel caso della mira P2. Infatti, le componenti della ‘velocità media’ (che registrano valori dell’ordine dei centimetri/giorno) mostrano solo una leggera variazione (freccie rosse in Figura 149), passato un certo tempo dalla registrazione del picco della cumulata pluviometrica. Inoltre si osserva come la ‘velocità media’ verticale vari prima in senso positivo (freccia rossa nel primo grafico dall’alto in Figura 149) e solo successivamente mostri una chiara tendenza all’abbassamento (freccia blu nel primo grafico in Figura 149). Si può in questo caso solo intuire il trend di rilassamento per la componente z (linea arancio nel primo grafico in Figura 149). Le alte frequenze riscontrabili nell’andamento delle velocità poco dopo l’evento del 12 dicembre sono legate al cambiamento dell’intervallo di campionamento che passa da ogni 6 ore a ogni ora per motivi di protezione civile. Analizzando la risposta alle sollecitazioni pluviometriche nell’ultima parte dell’intervallo di tempo considerato si rileva come la componente orizzontale della ‘velocità media’ mostri una più chiara correlazione con la cumulata pluviometrica giornaliera, che, per questo riflettore, non si limita al solo evento caratterizzato da valori oltre i 60 mm a fine periodo (linea fucsia tratteggiata in Figura 149), ma anche a quello di circa 57 mm (linea gialla tratteggiata in Figura 149).

Anche per questa mira si intuisce come la ‘velocità media’, in particolar modo nella sua componente verticale, sia soggetta al fenomeno di isteresi rilevato anche nella mira P2 (con la linea verde in Figura 149 si evidenzia il trend di variazione medio della variabile cinematica ‘velocità media’ verticale nel periodo precedente all’evento meteorologico del 12 dicembre 2017).

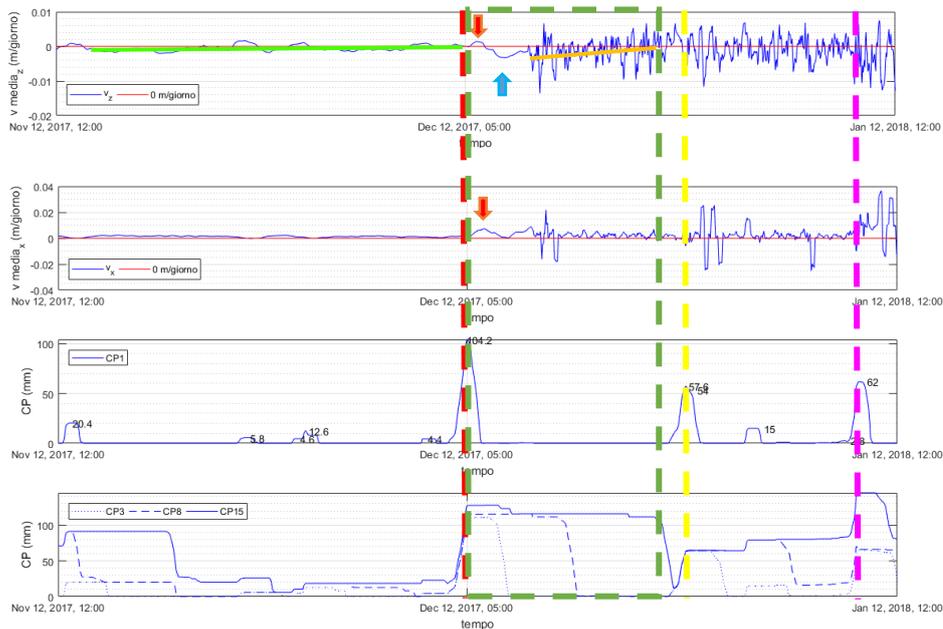


Figura 149 Andamento delle variabili cinematiche alla mira P15 ('velocità media' verticale-primo dall'alto- e orizzontale-secondo dall'alto-) e pluviometriche (cumulata giornaliera-terzo dall'alto- e a 3,8 e 15 giorni-quarto dall'alto-) un mese prima ed un mese dopo la crisi del 12 dicembre 2017.

La mira P1 mostra andamento della 'velocità media' verticale (primo grafico dall'alto in Figura 150) sempre al di sotto dei 0 m/giorno, ma con valori esigui ed al limite della rilevabilità (infatti in molti casi si attesta al di sotto del 1 mm e spesso dell'ordine dei decimi di millimetro, ovvero inferiore all'errore commesso nella misurazione). La componente orizzontale (secondo grafico dall'alto in Figura 150) mostra, invece, andamento più realistico e di facile interpretazione con valori spesso oltre il millimetro. La correlazione con l'evento pluviometrico innescante la crisi del 12 dicembre si rileva comunque in entrambi i casi (freccie rosse in Figura 150), osservando come la 'velocità media' orizzontale mostri una variazione negativa corrispondente ad un movimento verso monte che può essere spiegato con un moto di ribaltamento della mira stessa.

La correlazione delle variabili cinematiche con gli altri eventi pluviometrici (linee gialla e fucsia tratteggiate in Figura 150) sono difficilmente rilevabili, ad indicare

una risposta della mira P1 solamente agli eventi più intensi e probabilmente legata agli spostamenti del tratto occidentale della berlinese a cui la struttura su cui è posto il riflettore in esame è solidale.

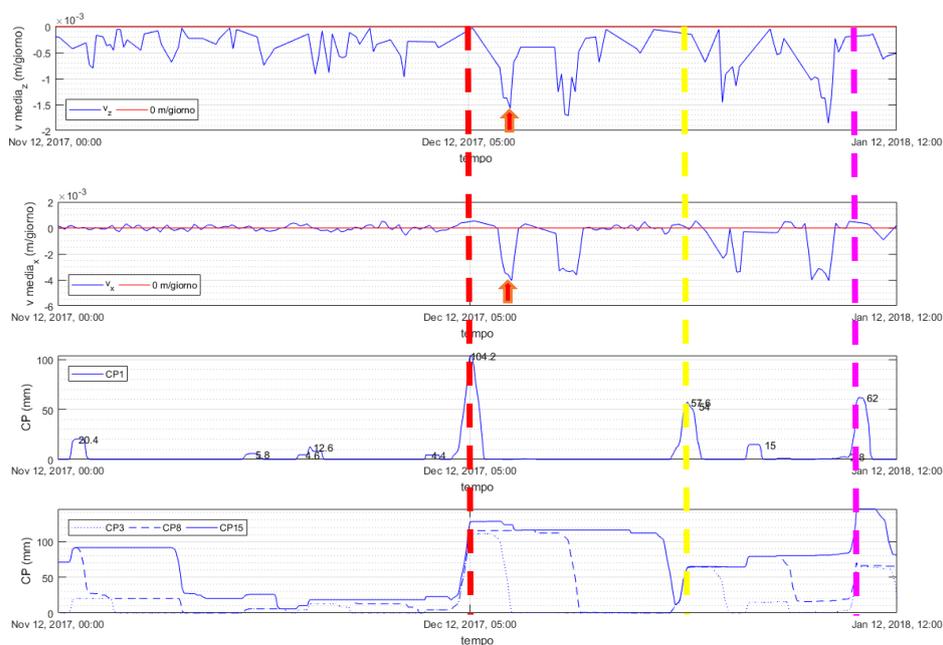


Figura 150 Andamento delle variabili cinematiche alla mira P1 ('velocità media' verticale-primo dall'alto- e orizzontale-secondo dall'alto-) e pluviometriche (cumulata giornaliera-terzo dall'alto- e a 3,8 e 15 giorni-quarto dall'alto-) un mese prima ed un mese dopo la crisi del 12 dicembre 2017.

Concludendo, si riassume che:

- 1) come osservato nei paragrafi precedenti, ad ogni mira è rilevabile la predominanza di una componente sulle altre;
- 2) le componenti della 'velocità media' mostrano valori un ordine di grandezza superiore nelle mire più instabili (es. mire P2 e P15 con valori intorno dell'ordine dei cm/giorno) rispetto a quelle più 'stabili' (es. mira P1 con valori al più che si aggirano sui mm/giorno in corrispondenza degli eventi più intensi);

- 3) si riconosce un trend di rilassamento in alcune componenti della ‘velocità media’ delle mire più instabili a seguito dell’accelerazione cinematica legata all’evento del 12 dicembre 2017;
- 4) il fenomeno di isteresi è intuibile dagli andamenti medi delle variabili cinematiche esaminate, in particolare della componente verticale, alle mire più instabili prima e dopo l’evento del 12 dicembre 2017 ed è legato alla successione di eventi meteorologici intensi a seguito di quello principale e, quindi, al conseguente innesco di brusche accelerazioni dei movimenti del versante, che non consentono di raggiungere attraverso il trend di rilassamento i valori medi assunti in precedenza;
- 5) si intuisce un movimento di ribaltamento della berlinese (dalle mire P1 e P2) e la sua rapida evoluzione.

7.3 Elaborazione dei dati ottenuti attraverso il rilievo fotogrammetrico da drone

7.3.1 Introduzione

Lo studio dei dati ottenuti da rilievi fotogrammetrici, in particolare i modelli digitale del terreno (DEM), consente, come già menzionato nei capitoli precedenti, di affinare la conoscenza sulla distribuzione areale dei movimenti del versante in frana, analizzando gli spostamenti dell’intera superficie del versante e non di soli alcuni punti di riferimento come le mire della stazione topografica totale. D’altro canto, però, la risoluzione temporale degli spostamenti è legata all’intervallo temporale che intercorre fra l’acquisizione di diverse immagini della stessa superficie. Inoltre, la precisione dei dati ottenuti da rilievo fotogrammetrico è legata alla precisione di misurazione del GPS, la quale è un ordine di grandezza minore (si parla di centimetri) rispetto a quella della stazione topografica totale robotizzata (la quale si aggira sui millimetri).

La fotogrammetria si basa sull'elaborazione di una serie di immagini fotografiche, parzialmente sovrapposte fra loro e che coprono l'intera estensione della superficie topografica da indagare [13]. Tali immagini possono essere acquisite da terra o dall'alto, a patto che la scala sia mantenuta costante [13]. Al fine di conservare invariata la scala delle immagini, con le quali poi sarà eseguita la fotogrammetria, è necessario che la distanza fra l'apparecchio di acquisizione e l'oggetto da indagare rimanga costante [13].

Il fenomeno di parallasse stereoscopica consiste nell'apparente cambio di posizione di oggetti fissi dovuto al cambio del punto di osservazione e dipende dalla quota di ciascun punto sul piano di riferimento [13]. Il parallasse stereoscopico insieme alla parziale sovrapposizione delle immagini acquisite consente di ricavare molte informazioni topografiche della superficie fotografata [13]. In particolare, l'elaborazione delle immagini attraverso appositi software ed il riconoscimento di punti di riferimento dalle coordinate geografiche note permette la rappresentazione tridimensionale della superficie indagata con una nuvola di punti a ciascuno dei quali sono attribuite informazioni spaziali (coordinate geografiche e quota) e spettrali (come ad esempio l'intensità delle onde elettromagnetiche riflesse da quel punto stesso).

La nuvola di punti, ottenuta attraverso la fotogrammetria, contiene, quindi, molte informazioni e da essa sono estraibili molti dati, quali il DEM della superficie rilevata.

Per quanto riguarda la frana di Sant'Andrea, nel corso degli anni si sono eseguiti una serie di rilievi fotogrammetrici sia da terra [55] che da velivolo [56]. In particolare, il 10 maggio 2018 è stato effettuato un rilievo fotogrammetrico da drone, per conto del *Dipartimento di Geoscienze dell'Università degli Studi di Padova*: la ditta *LTS s.r.l.* si è occupata della georeferenziazione topografica e dell'elaborazione delle immagini, mentre la ditta *Archetipo s.r.l.* dell'acquisizione delle foto da drone. Lo scrivente ha seguito parte dei rilievi, in particolare la georeferenziazione topografica ovvero il rilevamento della posizione dei 'ground control point'. Attraverso il riconoscimento nelle foto di tali punti è possibile

georeferenziare la nuvola di punti, frutto dell'elaborazione fotogrammetrica, e, quindi, estrarre il DEM della superficie indagata.

Le foto con drone (Figura 151) sono state eseguite con fotocamera nadirale ed ogni 12 metri lungo strisciate predefinite.



Figura 151 Drone utilizzato nel rilevamento del 10/05/2018. Foto dello scrivente.

7.3.2 Rilevamento della posizione dei 'ground control point' (10/05/2018)

I 'ground control point' sono materializzati attraverso una croce, disegnata sul terreno con una bomboletta spray e il cui centro costituisce il punto rilevato con il GPS. Il rilievo GPS prevede l'utilizzo di:

- una stazione GPS statica posta dietro il municipio di Perarolo di Cadore (cerchio rosso in Figura 152 a sinistra), la quale effettua le misure delle coordinate ogni secondo, garantendo una buona precisione e una georeferenziazione immediata del punto;
- una stazione GPS differenziale MASTER RTK (Figura 152 a sinistra), la quale effettua misure anch'essa ogni secondo e la cui precisione si attesta intorno ai 2 cm sul piano orizzontale e 3-4 cm sulla verticale. La stazione MASTER è posizionata sul corpo di frana in vicinanza del tornante della salita della Cavallera;
- un ROVER che comunica con il MASTER e con il quale vengono effettuate le misure delle coordinate dei 'ground control point' (Figura 152 a destra).



Figura 152 A sinistra stazione GPS MASTER RTK sulla frana di Sant'Andrea in occasione del rilievo fotogrammetrico con drone del 10/05/2018. Nel cerchio rosso la posizione della stazione GPS statica dietro il municipio di Perarolo. A destra rilevamento della posizione di un 'ground control point' con il ROVER. Foto dello scrivente.

La densità ed il numero di 'ground control point' rilevati influiscono sulla qualità del risultato dell'elaborazione fotogrammetrica, che consiste nella nuvola di punti precedentemente citata.

7.3.3 Elaborazione dei dati ottenuti dalla fotogrammetria delle immagini rilevate il 10/05/2018

Al fine di calcolare un campo di spostamenti del versante in frana, è necessario un confronto fra la nuvola di punti acquisita nel 2018 con quella ottenuta da un analogo rilevamento nella primavera-estate 2016, sempre per conto del *Dipartimento di Geoscienze dell'Università degli Studi di Padova*. Entrambe le nuvole di punti sono frutto dell'elaborazione fotogrammetrica delle immagini acquisite nel corso delle due campagne di rilevamento (2016 e 2018). Essendo fornite in due sistemi di riferimento diverse (l'ultima in WGS84/UTM32N-

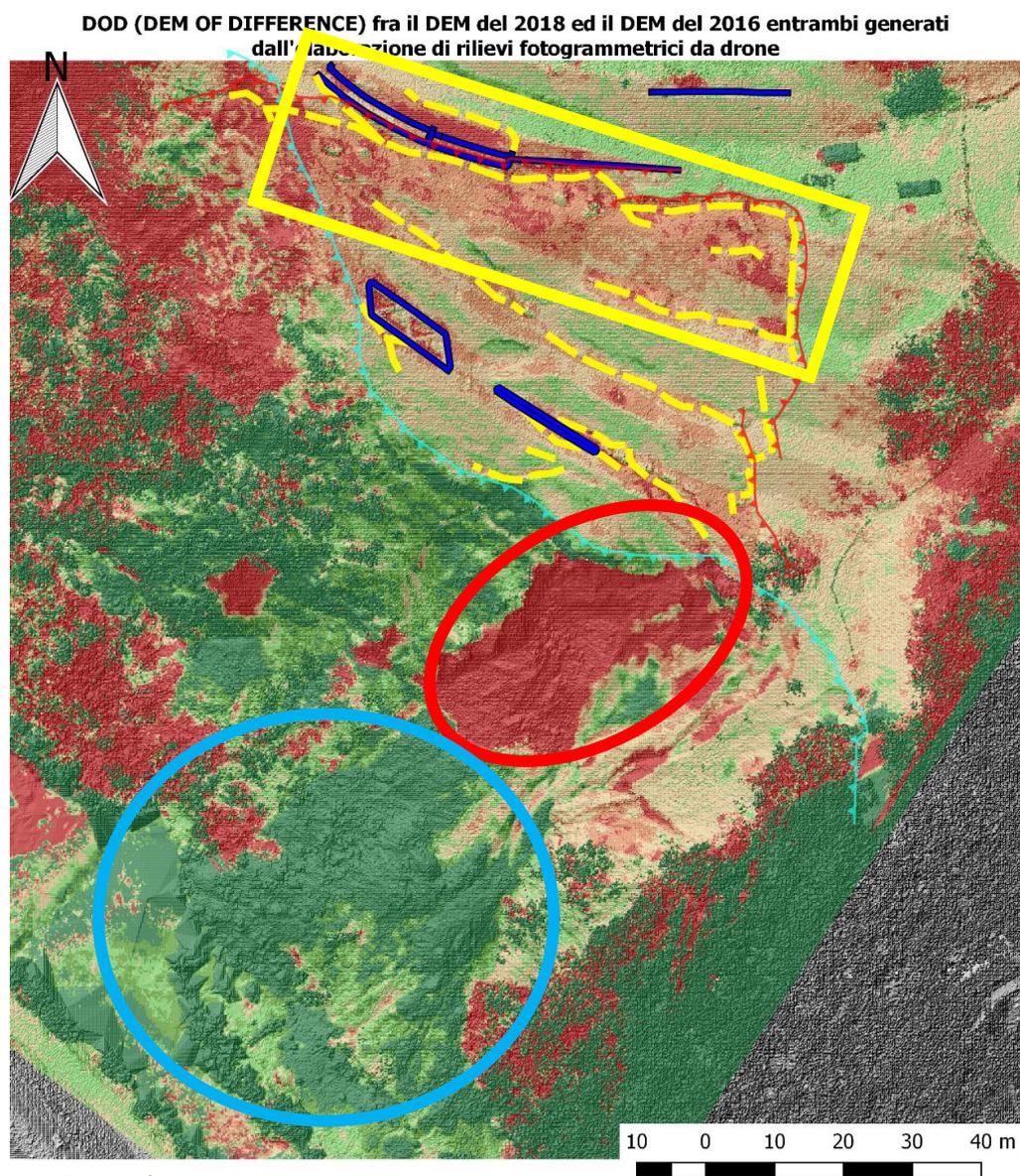
EPSG:32632-, mentre la prima in Monte Mario/Italy zone 1 –EPSG:3003), il sistema di riferimento della nuvola di punti del 2016 è stato convertito in WGS84/UTM32N tramite il *software ConVE della Regione del Veneto* (utilizzato dall'Università degli Studi di Padova).

Dalle nuvole di punti sono stati estratti i raster dei DEM (sono chiamati 'DEM' per semplicità anche se in realtà sono dei DSM, data la presenza della vegetazione e delle infrastrutture) e dell'intensità (radiometrica) della radiazione elettromagnetica riflessa dalla superficie indagata. L'estrazione è stata eseguita in *MATLAB* attraverso l'interpolazione lineare su una griglia a maglia quadrata con cella di lato 20 cm, comprendente la superficie a minor estensione coperta dai due rilievi (ovvero quella dal rilievo del 2016).

7.3.4 DEM Of Difference ('DOD'): calcolo degli spostamenti verticali

I DEM sono stati riportati in *QGIS* e ne è stata fatta la sottrazione attraverso '*Raster Calculator*', ovvero è stato sottratto al DEM del 2018 il DEM del 2016, al fine di rilevare gli spostamenti avvenuti sulla verticale nell'arco di tempo intercorso fra un rilievo e l'altro ovvero calcolare il DEM differenziale o 'DEM of difference' (D.O.D.). Gli spostamenti sono negativi, dunque, laddove la quota della superficie topografica ha subito una variazione in abbassamento, mentre sono positivi dove la superficie topografica si è alzata: in altre parole, nelle zone caratterizzate dal movimento franoso verso il basso del materiale si rilevano valori negativi del DOD, mentre le zone di accumulo del materiale si riscontrano valori positivi.

Il DOD risultante è riportato in Figura 153.



Legenda

Rilievo GPS del 27 marzo 2018

— Manufatto

— Fessura nel terreno

Elementi geomorfologici di riferimento

— Nicchia della porzione più instabile della frana

— Orlo di scarpata di degradazione

DOD (spostamento verticale in 'm')

≤ -0.8

-0.8 - -0.5

-0.5 - -0.2

-0.2 - 0

0 - 0.2

> 0.2

Elaborazione di Bridi Federico

Figura 153 'DEM of DIFFERENCE' (DOD) calcolato fra il DEM del 2018 e il DEM del 2016, entrambi ottenuti dai rilievi fotogrammetrici da drone eseguiti nei rispettivi anni. Come base topografica è riportato l'hillshade del DEM del 2018.

Si osservano importanti abbassamenti della superficie topografica in prossimità della porzione più instabile della scarpata di degradazione (cerchio rosso in Figura 153), mentre più a valle sul cono colluviale si riscontrano innalzamenti della superficie topografica e, quindi, accumuli di materiale (cerchio azzurro in Figura 153). Anche la porzione immediatamente a valle della nicchia della porzione più instabile della frana (rettangolo giallo in Figura 153) si presenta caratterizzata da importanti spostamenti verticali negativi ad indicare un abbassamento del suolo posto ai piedi della berlinese (alla quale sembra venir a mancare la contropinta al piede, generando l'instabilità rilevata nei paragrafi precedenti). Si nota che gli spostamenti sono di notevole entità (tra i 20 e gli 80 cm verso il basso) in corrispondenza delle fratture rilevate con il GPS nel marzo 2018, avvalorando in tal caso grazie all'evidenza geomorfologica il risultato dell'elaborazione. Un ulteriore elemento che concorre ad accreditare il risultato ottenuto è la porzione ben definita nel DOD posta immediatamente a monte della berlinese caratterizzata da abbassamenti maggiori degli 80 cm (rettangolo azzurro in Figura 154), la quale ha riscontro in campagna con una netta fessura nel terreno (rilevata anche nel rilievo del marzo 2018 ed evidenziata con linea gialla tratteggiata a destra in Figura 154).

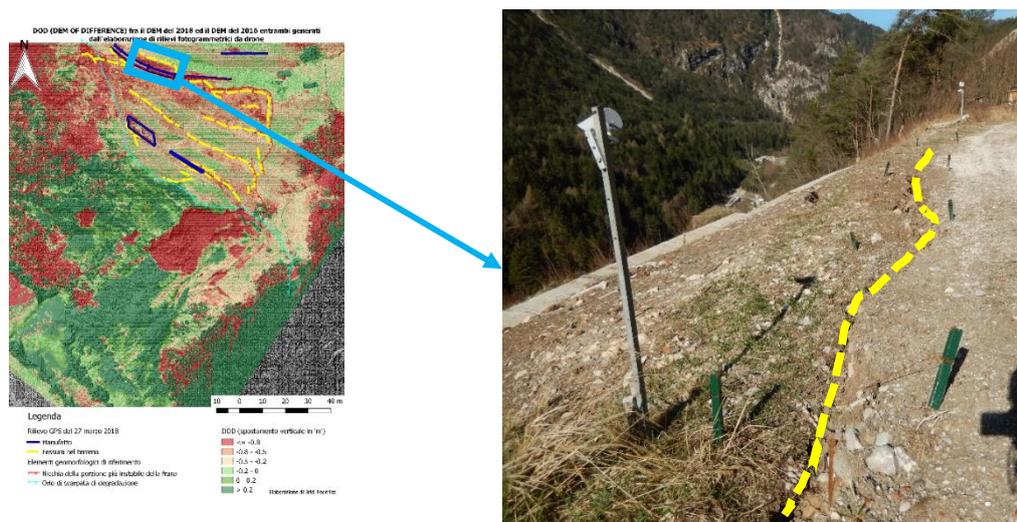


Figura 154 A sinistra evidenza del DOD di un'area ben definita e caratterizzata da spostamenti verticali importanti. A destra fessura riscontrata in campagna che delimita a monte l'area citata (foto dello scrivente 06/04/2018).

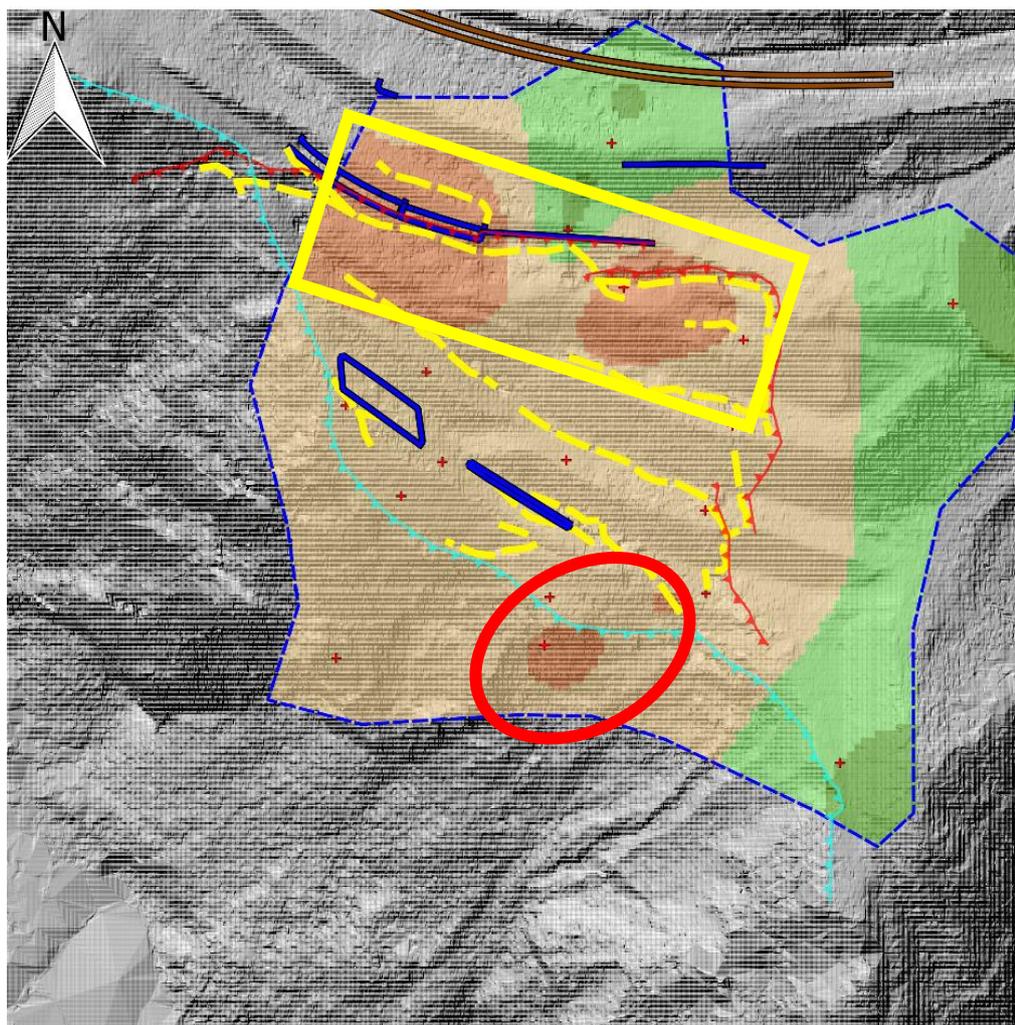
Nella zona di coronamento della porzione più instabile della frana l'area è prevalentemente soggetta a spostamenti da 0 a 20 cm in positivo (in colore verde chiaro): tale area si dimostra, quindi, più stabile della sottostante, come riscontrato nelle analisi fatte nei paragrafi precedenti. Infine, si evidenzia il disturbo che la vegetazione genera sul calcolo degli spostamenti, rendendo difficoltoso il calcolo dei movimenti del terreno nelle aree da essa ricoperte.

Si propone, di seguito, il campo di spostamento verticale dalla primavera 2016 alla primavera 2018 ottenuto attraverso l'elaborazione dei dati delle mire ottiche della stazione topografica totale di Perarolo di Cadore (Figura 155). L'interpolazione dei movimenti dei singoli riflettori (di tipo spline secondo l'algoritmo *'Multilevel b-spline interpolation'* di SAGA 2.3.2 implementato in QGIS) viene classificata in maniera analoga al DOD di Figura 153 (con l'accorgimento che in quel caso l'unità di misura degli spostamenti è il 'm', mentre in Figura 155 è il 'cm').

Confrontando i due campi di spostamento ottenuti da DOD (Figura 153) e dall'interpolazione dei dati registrati alle mire ottiche (Figura 155), si possono apportare alcune considerazioni:

- 1) nel campo ottenuto con i dati della stazione topografica totale (Figura 155) si riconosce l'area di coronamento soggetta a spostamenti di minor entità come nel DOD (Figura 153), mentre la porzione a valle della nicchia morfologica è omogeneizzata in termini di spostamenti, non rilevando le eterogeneità fra diverse porzioni del corpo di frana come avviene, invece, nel DOD. I valori di spostamento verticale, attribuiti a quest'area, si attestano intorno ai -50 e -20 cm, che sono anche quelli medi rilevati nel medesimo settore del DOD (attraverso l'algoritmo '*Zonal statistics*' di *QGIS* si è riscontrato un valor medio di poco maggiore dei -0.5 m). Tale omogeneizzazione è dovuta al carattere puntuale delle informazioni estratte dalle mire, le quali non consentono di rilevare le variazioni dei movimenti con continuità e buona risoluzione spaziale (la distanza fra i riflettori vaia tra i 5 e i 25 m, [56]);
- 2) si riconoscono le aree interessate da spostamenti verticali di entità maggiori anche nell'interpolazione dei dati della stazione topografica totale e che coincidono con la zona della nicchia del settore più instabile della frana (rettangolo giallo in Figura 155) e con la porzione orientale della scarpata di degradazione (cerchio rosso in Figura 155), come evidenziato con le stesse figure e colori nel DOD (Figura 153). Nel DEM differenziale si osserva, però, una maggior definizione areale delle zone interessate da spostamenti di diversa entità, che, come visto in Figura 154, hanno riscontro anche in campagna.

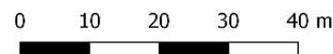
Interpolazione della componente verticale degli spostamenti delle mire della stazione topografica totale di Perarolo dal 2016 al 2018.



Legenda

- Area all'interno della quale si trovano le mire
- + Posizione mire utili
- Rilievo GPS del 27 marzo 2018
- Manufatto
- Rotaia
- Fessura nel terreno
- Elementi geomorfologici di riferimento
- v Nicchia della porzione più instabile della frana
- Orlo di scarpata di degradazione

- Interpolazione di 'dz' registrato alle mire ottiche (in 'cm')
- <= -80
 - -80 - -50
 - -50 - -20
 - -20 - 0
 - 0 - 20
 - > 20



Elaborazione di Bridi Federico

Figura 155 Interpolazione degli spostamenti verticali registrati dalle mire ottiche della stazione topografica totale di Perarolo di Cadore dalla primavera 2016 alla primavera 2018. Il raster dell'interpolazione è stato classificato come il DOD (Figura 153), al fine di facilitarne il confronto. Come base topografica è riportato l'hillshade del DEM del 2018.

7.3.5 Considerazioni riassuntive

Il monitoraggio attraverso rilievo fotogrammetrico si mostra, dunque, ottimale per quanto riguarda la continuità e la risoluzione areale ovvero la perimetrazione delle zone caratterizzate da entità di spostamenti differenti, mentre la risoluzione temporale è vincolata alla disponibilità dei dati ovvero all'intervallo di tempo che intercorre tra le diverse campagne di acquisizione delle immagini. Infine, la precisione del dato ottenuto attraverso l'analisi dei dati fotogrammetrici è legata alla precisione del rilievo GPS, la quale si attesta sull'ordine dei centimetri, mentre la precisione della stazione topografica totale può arrivare al millimetro.

7.4 Considerazioni riassuntive

Il monitoraggio della frana di Sant'Andrea dell'ultimo anno attraverso la stazione topografica totale robotizzata di Perarolo di Cadore e degli ultimi due anni attraverso i risultati dei rilievi fotogrammetrici con drone ha consentito di rilevare una situazione alquanto frammentata ed eterogenea del corpo di frana dal punto di vista cinematico, deformativo e di risposta alla sollecitazione pluviometrica. Tale condizione rende la conoscenza e la previsione sull'evoluzione del fenomeno complessa e di difficile identificazione. Un controllo costante dei movimenti del versante si mostra, dunque, necessario soprattutto per motivi di protezione civile.

Le elaborazioni dei dati di monitoraggio hanno permesso di rilevare:

- 1) il progressivo peggioramento delle condizioni di instabilità del versante nel corso degli anni;
- 2) l'evoluzione del fenomeno nell'ultimo anno;
- 3) lo svincolo del tratto occidentale della berlinese del 1992 dal resto del versante;
- 4) il trend regressivo del fenomeno franoso;

- 5) la predominanza della componente verticale degli spostamenti in alcune zone (in particolare nell'area a monte) del corpo più instabile della frana e di quella orizzontale in altre (ad esempio nella porzione di valle);
- 6) l'accelerazione nella risposta cinematica del corpo di frana alla sollecitazione pluviometrica;
- 7) la dipendenza della cinematica della frana dalla cumulata pluviometrica a 1 giorno e a 15 giorni.

Si sono, infine, confrontate due tecniche di monitoraggio, ovvero tramite stazione topografica totale robotizzata e tramite rilievi fotogrammetrici da drone, rilevando potenzialità e limiti di ciascuna e riconoscendone il completamento vicendevole.

CAPITOLO 8: Integrazioni del sistema di monitoraggio

8.1 Introduzione

Nel corso degli ultimi mesi sono state programmate e realizzate alcune integrazioni del sistema di monitoraggio della frana di Sant'Andrea. Parte di queste consistono in miglioramenti dei sistemi presenti, mentre altre prevedono l'installazione di nuove strumentazioni che permettono di controllare i movimenti del versante in frana con nuovi approcci e nuove tecniche. In particolare, le prime riguardano i sistemi:

- della stazione topografica totale robotizzata;
- delle stazioni GPS/GNSS;
- estensimetrici e fessurimetrici;

le seconde, invece, consistono nella predisposizione di un sistema basato su webcam fotogrammetriche.

La loro descrizione è riportata nella *relazione finale della Convenzione di ricerca tra la Regione del Veneto e l'Università degli Studi di Padova, intitolata "Interventi per la mitigazione della pericolosità della frana di Sant'Andrea, Perarolo di Cadore (BL)" redatta dal Dipartimento di Geoscienze dell'Università degli Studi di Padova* [57].

8.2 Integrazioni del sistema di monitoraggio topografico con stazione topografica totale robotizzata

Come visto in precedenza nel capitolo sull'elaborazione dei dati di monitoraggio dell'ultimo anno, la significatività dei risultati ottenuti dai dati della stazione topografica totale è strettamente correlata al numero di riflettori disposti sull'area

in frana: maggiore è il numero più alto è il livello di significatività e di dettaglio dei risultati delle elaborazioni. Ad esempio, per il calcolo del campo delle velocità o degli spostamenti un risultato ad un dato nodo della griglia è realmente significativo se questo nodo è vicino ad una o più mire, mentre per il calcolo del campo di deformazione il nodo dev'essere circondato su tutti i lati da mire, affinché il valore attribuitogli sia significativo (la significatività per il campo di deformazione è più critica che per il campo di velocità)

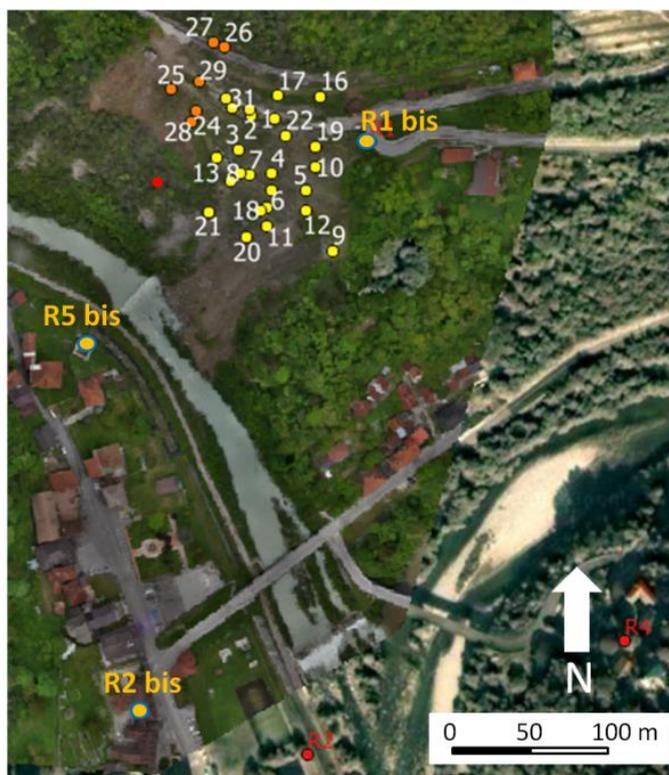


Figura 156 Posizione delle mire attuali e delle mire di riferimento che saranno aggiunte prossimamente (in grassetto), su ortofoto ottenuta con fotogrammetria da drone (rilievo 2018) e s i dati di Google Maps (per l'area non coperta dai rilievi da drone. Immagine dalla relazione finale della Convenzione intitolata "Interventi per la mitigazione della pericolosità della frana di Sant'Andrea, Perarolo di Cadore (BL)", Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova, 2018 [57].

[57].

Alla luce di ciò, una prima integrazione del sistema della stazione topografica totale di Perarolo, implementata nel corso dell'estate 2018, consiste nell'aggiunta di nuove mire sia di riferimento (ovvero quelle ritenute stabili e le cui posizioni

vengono rilevate all'inizio ed alla fine di ogni ciclo di misurazione con lo scopo di localizzare la stazione topografica totale nello spazio) che sul versante instabile. Per quanto riguarda le mire di riferimento sono state installate (come rappresentato in Figura 156) la mira R5bis (nell'abitato di Perarolo), la mira R2bis (la quale sostituisce in un'altra posizione la mira R2, che mostrava risposte anomale, probabilmente legate a vibrazioni del relativo supporto) e la mira R1bis (a sostituzione della mira R1, asportata da terzi e che sarà interessata come lo è stata la mira R1 dal movimento del corpo di frana seppur in maniera marginale) [57].

In merito alle mire sul corpo di frana sono state installate 10 nuove mire oltre al ripristino della P16 asportata (Figura 157) [57]. La definizione della posizione delle nuove mire è stata determinata attraverso l'ausilio delle elaborazioni attraverso il toolbox di *Matlab* 'grid_strain', presentato nell'articolo "*Characterization of landslide ground surface kinematics from terrestrial laser scanner and strain field computation*" di Teza et al. (2008) [47]. L'aggiunta di riflettori deve avvenire, infatti, nelle posizioni adeguate, affinché attraverso i loro dati possa essere rilevata l'affidabilità della zonazione ottenuta con il toolbox 'grid_strain' [57].

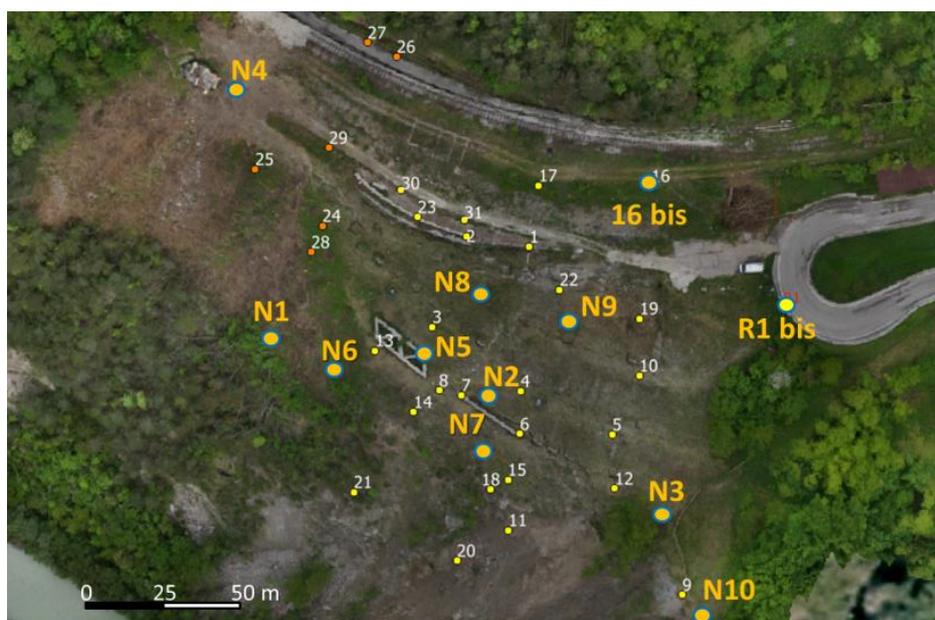


Figura 157 Posizione delle mire attualmente presenti e delle mire installate nell'estate 2018 (in grassetto). Immagine tratta dalla relazione finale della Convenzione intitolata "Interventi per la mitigazione della pericolosità della frana di Sant'Andrea, Perarolo di Cadore (BL)", Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova, 2018 [57].

Un'ulteriore integrazione del sistema della stazione topografica totale riguarda il 'software di pilotaggio' che definisce le modalità di registrazione dei dati. Tali sviluppi consistono [57]:

- 1) nella variazione automatica dell'intervallo temporale che intercorre fra i diversi istanti di campionamento ovvero il passaggio dalle 6 ore ad una misura a scala oraria e viceversa. In particolare, la riduzione dell'intervallo temporale di campionamento dovrà avvenire quando si ha il raggiungimento o l'avvicinamento alle soglie pluviometriche e cinematiche di pre-allarme e/o allarme, soprattutto in presenza di previsioni meteo non favorevoli;
- 2) nell'introduzione di una routine che consenta di riportare i dati misurati dalla stazione topografica totale non solo nel sistema di riferimento locale ma anche in WGS84 UTM32N, in modo tale da ottenere per ogni istante temporale di campionamento la posizione della mira nel sistema di riferimento locale, nel sistema di riferimento WGS84 UTM32N, le

componenti di velocità istantanea nel sistema di riferimento locale e le componenti della velocità in direzione Est, Nord e verticale.

8.3 Integrazione del sistema di monitoraggio con stazioni GPS/GNSS

I dati acquisiti dal sistema di posizionamento mediante stazioni permanenti GPS/GNSS (cfr. al capitolo sul monitoraggio) verranno integrati con quelli della stazione topografica totale in maniera automatica in modo tale da:

- registrare informazioni utili sulla cinematica del versante anche quando la stazione totale per qualunque motivo non fosse attiva;
- costituire nuovi punti di misura di dati cinematici e, quindi, infittire la rete di osservazione;
- verificare la bontà delle misure della stazione topografica totale stessa (i due sistemi dovranno fornire risultati coincidenti a meno delle rispettive incertezze per punti coincidenti o vicini, eventuali discrepanze dei dati dovranno essere indagate e implicano il passaggio dal campionamento ogni 6 ore a quello orario).

8.4 Integrazione dei sistemi estensimetrici e fessurimetrici

Il sistema di monitoraggio estensimetrico e fessurimetrico è stato aggiornato tra giugno e luglio 2018 (Figura 159) con:

- 1) il ripristino dell'estensimetro E3 (Figura 159), situato nella porzione più orientale del corpo di frana e la cui funzionalità è stata compromessa dagli eventi del dicembre 2017-gennaio 2018 (rettangolo giallo in Figura 158, nella quale l'estensimetro in esame è l'S3) [57];
- 2) lo spostamento della testa dell'estensimetro E1 (Figura 159) dall'ancoraggio alla berlinese (ormai instabile) alla sommità di un palo di jet grouting immediatamente a valle;
- 3) l'installazione di un fessurimetro a base lunga (F1 posto a valle in Figura 159) e di un estensimetro a filo (E4 in Figura 159) in corrispondenza di fratture sull'ultima gradinatura nel settore sud-orientale del corpo di frana;
- 4) l'installazione di un fessurimetro a base lunga (F1 posto a monte in Figura 159) a monte del cordolo del 1995 a nord-est della berlinese (cfr. al capitolo sulla frana di Sant'Andrea);
- 5) l'installazione di alcuni fessurimetri da parete sul muro di contenimento a tergo della vecchia ferrovia (F4 in Figura 159), ma anche sulla berlinese (Figura 160).

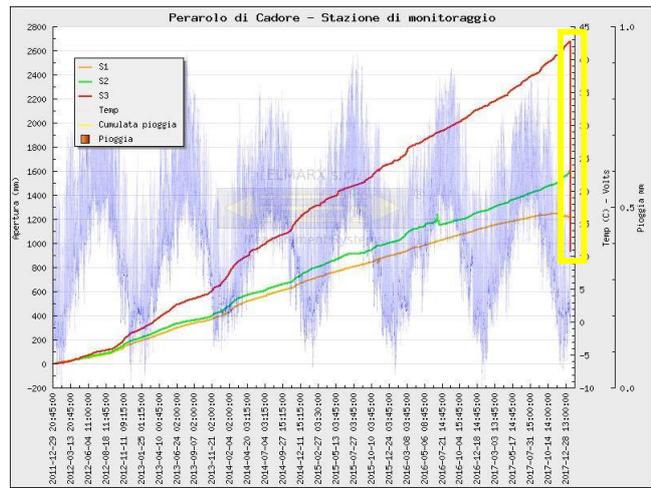


Figura 158 Deformate estensimetriche da fine dicembre 2011 a fine dicembre 2017 con evidenziazione della perdita della funzionalità dell'estensimetro S3 (o E3) da dicembre 2017 (rettangolo giallo). (CLIOS s.r.l. [8])

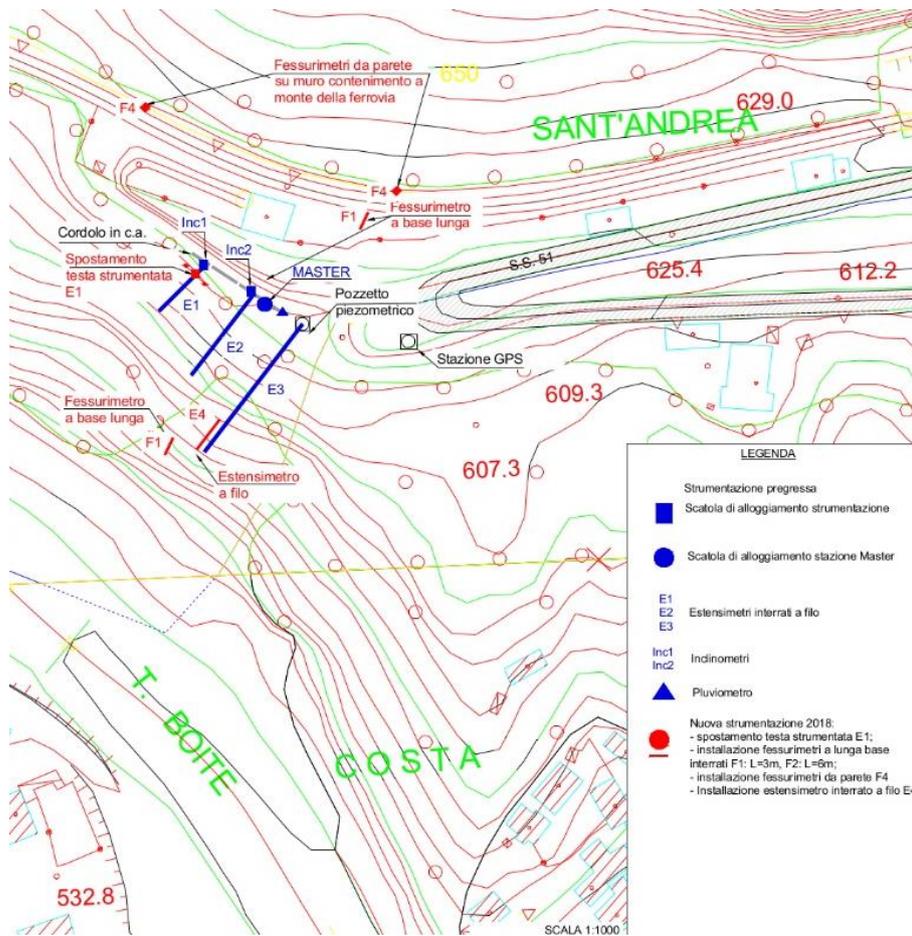


Figura 159 Situazione del sistema di monitoraggio estensimetrico e fessurimetrico a luglio 2018 (CLIOS s.r.l. [8]).



Figura 160 Fessurimetro sulla berlinese. Foto dello scrivente del 29/05/2018.

8.5 Installazione del sistema di monitoraggio mediante webcam fotogrammetriche

Si sta, inoltre, procedendo con l'introduzione di un sistema di monitoraggio basato su webcam o fotocamere in posizione remota, che grazie agli sviluppi tecnologici e in termine di elaborazione dei dati degli ultimi anni sembra al giorno d'oggi realizzabile ed efficacemente utilizzabile [57]. In particolare, una fotocamera in posizione remota consente [57]:

- 1) l'acquisizione di immagini con un numero di pixels elevato (≥ 16 Mpx), compatibile con la modellazione fotogrammetrica;
- 2) la sua programmazione e gestione da remoto (tramite Wi-Fi);
- 3) una sua facile alimentazione (con pannelli solari);
- 4) il lavoro in condizioni ambientali difficili (l'accesso è necessario solo ad intervalli programmati).



Figura 161 Pilastro topografico al di sopra della galleria in destra Boite, dove sarà collocato il box contenente la fotocamera da remoto. Foto dello scrivente del 10/05/2018.

Tale sistema di monitoraggio consiste in 2-3 webcam, due delle quali saranno installate sul versante opposto della frana di Sant'Andrea in destra Boite e un'altra in paese al fine di fornire diversi angoli di vista della superficie indagata (Figura 162) [57]. Inoltre, al fine di effettuare rilievi anche in condizioni notturne sarà realizzato un sistema di illuminazione dell'area interessata attraverso fari led (sempre posizionati sul versante in destra Boite). In particolare, le fotocamere verranno inserite in appositi box con lo scopo di preservarli dalle intemperie ma al contempo di permetterne l'acquisizione delle immagini [57]. Tali box, per quanto riguarda le webcam che saranno poste più a monte, saranno collocati su pilastri topografici posizionati al di sopra del tratto in galleria della linea ferroviaria in destra Boite (Figura 161).

Le fasi di messa in opera ed attività di tale sistema di monitoraggio sono due [57]:

- 1) fase di calibrazione, nel corso della quale vengono calcolati i parametri di calibrazione intrinseci (legati all'ottica) ed estrinseci (posizione relativa di fotocamere e target), tramite l'ausilio di altre webcam oltre a quelle definitive. Si prevede, inoltre, l'utilizzo di alcuni punti di controllo a terra per migliorare la modellazione fotogrammetrica;
- 2) fase di monitoraggio, in cui le fotocamere definitive raccolgono i dati che vengono trattati secondo i parametri calcolati nella fase precedente. Il risultato è una nuvola di punti georeferenziata nel sistema di riferimento WGS84 UTM 32N della superficie indagata, ottenuta mediante modellazione fotogrammetrica. L'utilizzo dei parametri intrinseci ed estrinseci consente di elaborare le immagini con fotogrammetria anche in condizioni climatiche non ottimali.

La fase di calibrazione viene, dunque, eseguita prima dell'inizio dell'attività di monitoraggio di tale sistema e successivamente ad intervalli programmati per far fronte a problemi stagionali (es. dilatazione dei supporti) [57].

Si precisa come il sistema di webcam fotogrammetriche sia integrante di quello con stazione topografica totale. Il primo, infatti, è adatto al monitoraggio del fronte più avanzato della frana, sul quale l'installazione di mire ottiche è problematica per la loro probabile caduta e motivi di sicurezza nel corso del loro posizionamento [57].

Infine, in Figura 162 si riporta la vista 3D della frana con la proiezione delle linee di vista delle tre fotocamere (linee tratteggiate) e l'area coperta dalla stazione topografica totale (ellisse tratteggiate) [57]. Si osserva che le due coperture coincidono per estensione trasversale al versante, consentendo l'integrazione reciproca dei sistemi di monitoraggio.

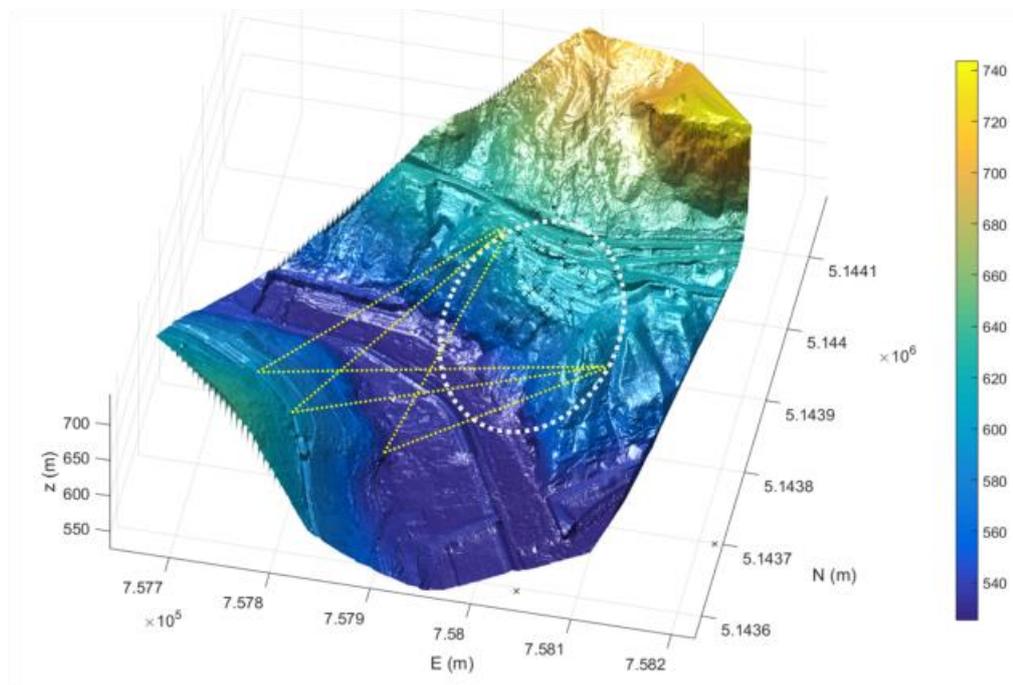


Figura 162 Vista 3D della frana con la proiezione delle linee di vista delle tre fotocamere (linee tratteggiate) e l'area coperta dalla stazione topografica totale (ellisse tratteggiata). Immagine dalla relazione finale della Convenzione intitolata "Interventi per la mitigazione della pericolosità della frana di Sant'Andrea, Perarolo di Cadore (BL)", Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova, 2018 [57].

8.6 Integrazione dei dati provenienti dalle diverse strumentazioni

Per concludere, si è proceduto a realizzare un sistema di controllo centralizzato che registri i segnali provenienti da [57]:

- 1) stazione topografica totale robotizzata;
- 2) pluviometro (non riscaldato [57], posto sulla porzione sommitale del corpo di frana - Figura 163);
- 3) webcam fotogrammetriche (in corso di installazione);
- 4) estensimetri;
- 5) fessurimetri;



Figura 163 Stazione pluviometrica sul corpo della frana di Sant'Andrea. Foto dello scrivente del 06/04/2018.

I dati delle webcam richiedono particolari trattamenti e per la prima fase di test forniranno un supporto visivo 3D al sistema di allertamento, mentre quelli della stazione topografica totale, del pluviometro e degli estensimetri sono utilizzati per la gestione delle soglie di preallarme/allarme, che saranno ridefinite prossimamente alla luce dei nuovi dati di monitoraggio e degli interventi realizzati e di prossima realizzazione [57].

CAPITOLO 9: Progettazione geologica delle opere e dei sistemi finalizzati alla mitigazione della pericolosità della frana di Sant'Andrea

9.1 Introduzione

Dai risultati del monitoraggio della frana di Sant'Andrea è possibile, oltre che determinare le soglie cinematiche e pluviometriche di preallarme ed allarme, anche ricavare informazioni utili alla definizione e progettazione delle opere di messa in sicurezza del versante. In particolare, dall'integrazione dei dati di monitoraggio con il modello idro-geologico concettuale si può stilare un progetto d'intervento più consapevole delle caratteristiche peculiari del fenomeno di dissesto e, quindi, maggiormente efficace.

La messa in sicurezza della frana di Sant'Andrea, per le particolari condizioni geologiche e idrogeologiche che la caratterizzano (legate soprattutto alla presenza dei gessi con le relative problematiche idrogeologiche e geotecniche annesse –cfr. al capitolo sui fenomeni di dissesto idrogeologico in aree a substrato gessoso-) e per l'entità del fenomeno stesso (il quale coinvolge una vasta porzione del versante –cfr. al capitolo sulla frana di Sant'Andrea), si presenta particolarmente complessa e richiede un'organizzazione degli interventi in modo coordinato e sequenziale [20]. Per quanto riguarda il corpo di frana stesso ovvero la porzione centrale del corpo di frana (corrispondente grossomodo al trapezio rosso in Figura 164), gli interventi attivi realizzati nel corso dell'estate 2018 vengono descritti al paragrafo 9.6.

Per la sistemazione dell'area compresa tra la nicchia di frana e il muro a tergo del vecchio tracciato ferroviario (corrispondente grossomodo al rettangolo azzurro in Figura 164), invece, sono progettati alcuni interventi tra cui [20]:

- la realizzazione di una struttura altamente deformabile in cemento armato tirantata passivamente e fondata su micropali con capacità di reazione bilaterale (ovvero in grado di lavorare sia in compressione che in trazione) in corrispondenza della berlinese attualmente presente e proseguendo linearmente verso nord-est in direzione del tornante della Cavallera;
- l'impermeabilizzazione della superficie del versante con materiale da riporto a granulometria fine e guaine sintetiche con la costruzione di canalette e l'allontanamento delle acque di raccolta;
- la realizzazione di un sistema di captazione delle acque di scorrimento sotterraneo più superficiale (cfr. al capitolo sul modello geologico ed idrogeologico concettuale) ed identificato come dominio idrogeologico "poco profondo" nella *relazione di Geologia Applicata Studio Associato (2018)* [20].

Gli interventi previsti per questa porzione del versante sono progettati e seguiti soprattutto per gli aspetti geologico, geotecnico e idrogeologico da *Geologia Applicata Studio Associato* (presso il quale lo scrivente ha svolto il tirocinio curriculare). Essi sono esaminati dettagliatamente nei paragrafi successivi e sono esposti nella *"Relazione geologica e idrogeologica sulle indagini, caratterizzazione e modellazione geologica del sito" a supporto della "Progettazione geologica, geotecnica, geoidrologica, e strutturale delle opere in terra e roccia e dei sistemi complessivamente finalizzati alla messa in sicurezza della frana denominata "Busa del Cristo" sita nel Comune di Valle di Cadore e di Perarolo (Belluno), nell'ambito della proprietà ferroviaria"* (*Geologia Applicata Studio Associato, 2018*) [20].

Infine, per l'area a monte del tracciato ferroviario (corrispondente grossomodo al rettangolo giallo in Figura 164) è prevista la ristrutturazione del sistema di drenaggio superficiale, che, come evidenziato nel punto 8 dell'elenco degli elementi rilevati nel corso del sopralluogo del 06/04/2018 dallo scrivente (cfr. al capitolo di inquadramento dell'area di studio, paragrafo sull'inquadramento geomorfologico), mostra una funzionalità limitata e talora compromessa.

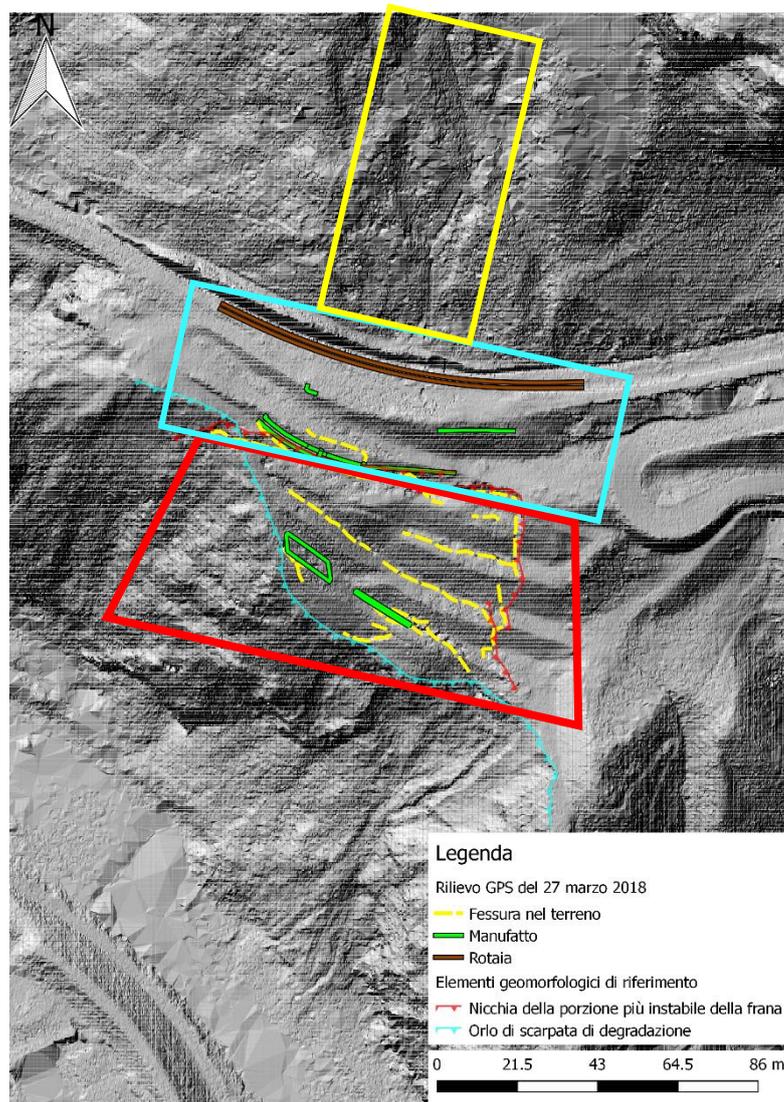


Figura 164 Lumeggiamento del DEM del 2018 ottenuto attraverso i rilievi Lidar, con rappresentazione degli elementi geomorfologici di riferimento ed i risultati del rilievo GPS del 27 marzo 2018.

Di seguito saranno analizzati alcuni degli interventi previsti da progetto di intervento RFI (*Geologia Applicata Studio Associato, 2018*) [20][20], con particolare attenzione a quello consistente nella struttura in cemento armato e tirantata in prossimità della berlinese, le cui fasi di progettazione sono state seguite dallo scrivente nel corso del tirocinio.

Infine, nell'ultimo paragrafo di questo capitolo sono descritte brevemente le misure adottate nell'estate 2018 dalla *Regione del Veneto* per l'impermeabilizzazione della superficie in frana a valle della berlinese del 1992 (trapezio rosso in Figura 164) e delle fratture sul muro a tergo del vecchio tracciato ferroviario (quest'ultimo segnato con doppia linea marron in Figura 164).

9.2 Opera di contenimento a valle del vecchio tracciato ferroviario

L'opera è prevista in progressiva sostituzione della berlinese del 1992, la cui vita utile è oramai in esaurimento (come rilevato nei capitoli precedenti). Essa consiste in una struttura dalle caratteristiche altamente deformabili, costituita da tiranti passivi, micropali con capacità di lavorare sia in compressione che in trazione e in uno scudo sommitale in calcestruzzo sottile e molto armato. Quest'ultimo elemento è progettato in modo tale che si deformi inizialmente in maniera elastica, successivamente in maniera elasto-plastica ed, infine, analogamente ad una membrana in trazione: tali comportamenti si esplicano con l'incremento degli spostamenti del materiale a tergo dell'opera stessa ed implicano una fessurazione del calcestruzzo e deformazione degli elementi metallici dell'armatura (che determinano l'esaurimento della vita della struttura solamente quando diventano molto elevati. Secondo il progetto, la vita utile di tale opera si aggirerebbe sui 100 anni, contro i quasi 30 anni della berlinese presente). Il carattere altamente deformabile di quest'opera è legato soprattutto alla tipologia di movimento del versante (il quale è intimamente correlato all'evoluzione reologica e morfodinamica dei gessi in presenza d'acqua interstiziale e filtrante e non appare, quindi, facilmente rappresentabile da un legame tra sforzi, deformazioni e spostamenti) ed è in contrasto con quello rigido della berlinese del 1992, la quale mostra una scarsa deformabilità, i tiranti sono pre-tesi, i micropali sono abbastanza superficiali ovvero ancorati nella porzione di terreno in movimento (Figura 165) ed i cordoli in calcestruzzo sono molto rigidi e poco armati.

L'opera ha, quindi, lo scopo di creare un volume di terreno solidale in grado di contrastare il movimento della porzione di monte, causato dal detensionamento per il mancato supporto al piede, dove il versante è più instabile [20]. I tiranti ed i micropali saranno intestati a profondità maggiori rispetto a quelli della berlinese del 1992 (Figura 165, frecce rosse=tiranti e micropali di progetto, frecce viola=tiranti e micropali della berlinese attualmente presente sul versante), in modo tale da innestarli su una porzione stabile del sottosuolo come dal modello geologico concettuale predisposto e descritto nei capitoli precedenti [20]. La perforazione dei pali avverrà con barre autoperforanti prevedendo l'adozione di un fluido di perforazione di boiaccia cementizia resistente ai solfati (evitando, dunque, in parte quei fenomeni che favoriscono l'infiltrazione dell'acqua in prossimità di questi elementi richiamati nel capitolo sulla frana di Sant'Andrea) [20]. L'utilizzo di tale fluido consente, inoltre, il riempimento di eventuali cavità presenti nel sottosuolo e, quindi, l'incremento della resistenza meccanica del materiale e la diminuzione della permeabilità [20].

Massima attenzione verrà posta nel non creare sovrappressioni all'interno delle cavità eventualmente incontrate, onde evitare la riduzione delle forze resistenti e compromettere le condizioni di stabilità già metastabili.

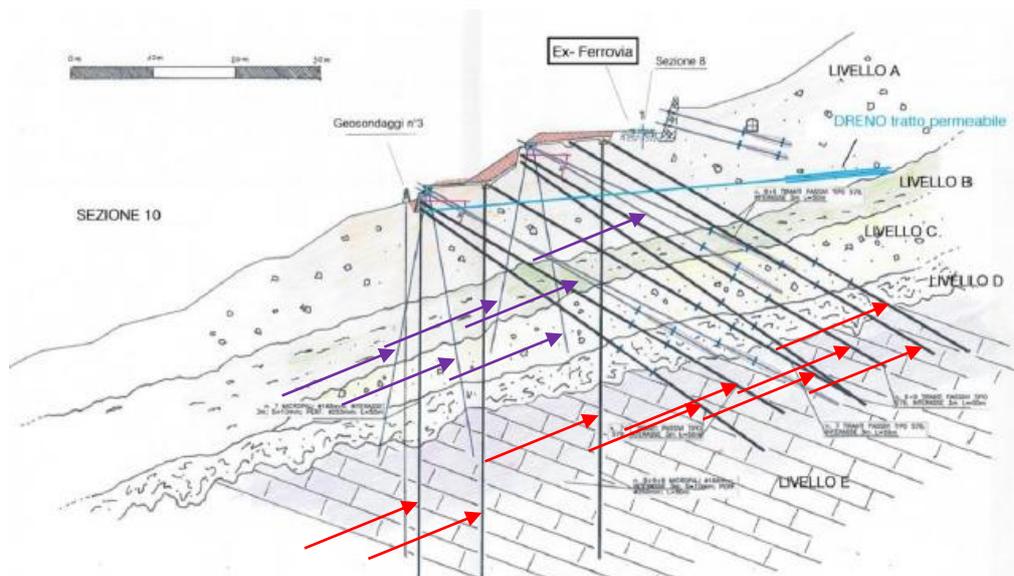


Figura 165 Sezione geologica con l'insieme degli elementi della struttura del progetto del 2018 descritta e riportata nella "Relazione geologica e idrogeologica sulle indagini, caratterizzazione e modellazione geologica del sito" a supporto della "Progettazione geologica, geotecnica, geoidrologica, e strutturale delle opere in terra e roccia e dei sistemi complessivamente finalizzati alla messa in sicurezza della frana denominata "Busa del Cristo" sita nel Comune di Valle di Cadore e di Perarolo (Belluno), nell'ambito della proprietà ferroviaria RFI S.p.A.", Geologia Applicata Studio Associato (2018) [20]. Con le frecce viola sono segnalati anche i micropali ed i tiranti della berlinese attualmente presente sul versante, i quali si mostrano intestati per poco o per nulla nel materiale più compatto e consistente, ovvero il substrato roccioso ('livello E' per l'immagine o 6° unità per il modello geologico esposto in questo lavoro) a differenza di quelli di progetto (frecce rosse).

La berlinese del 1992, la quale presenta molti tiranti collassati (Figura 166 e Figura 167), così come il cordolo di calcestruzzo, ed alcuni micropali verticali estirpati per carenza di ancoraggio, possiede ancora una certa capacità vincolare residua e, quindi, una sua demolizione traumatica e rapida per la sostituzione con la nuova struttura potrebbe determinare una brusca diminuzione delle condizioni di stabilità critica dell'ammasso, innescando processi di accelerazione difficilmente prevedibili (senza considerare i problemi legati alla sicurezza del personale operante e le conseguenze dei carichi dinamici che verrebbero ad insistere sul versante nel corso dell'attività di demolizione da parte dei macchinari). Si opta, pertanto, per una soluzione di continuità spazio-temporale tra l'opera vecchia e quella nuova, che verrebbero a coesistere, ovvero per un graduale passaggio delle forze dalle vecchie strutture, man mano che le loro parti

collassano, alle nuove, durante la progressiva loro attivazione. Si vengono, così, ad evitare improvvise variazioni del campo di tensione e di deformazione, che minerebbero la critica stabilità dell'ammasso.

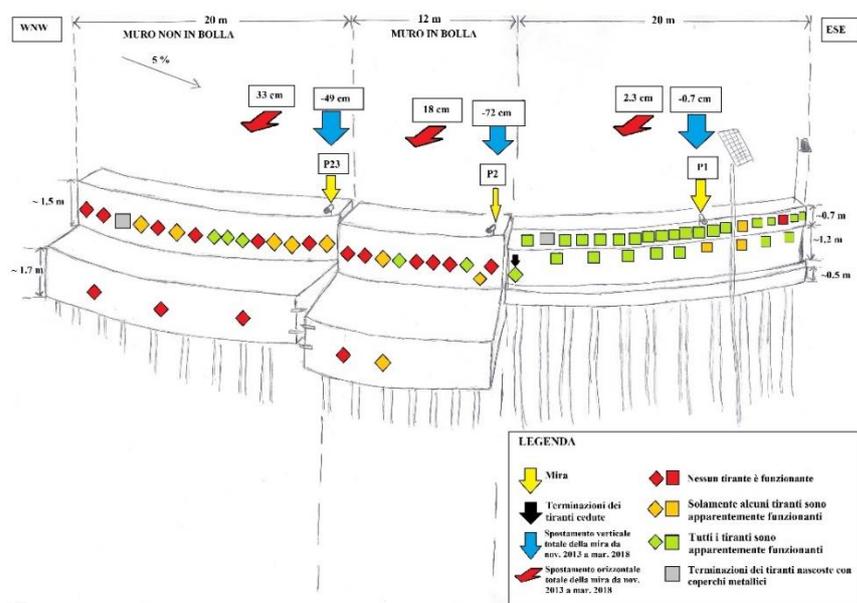


Figura 166 Rappresentazione grafica dei risultati del catasto dei tiranti apparentemente funzionanti e non del cordolo tirantato e su micropali del 1992. La porzione lunga circa 20 m e posta più a Est sembra avere ancora un buon numero di tiranti funzionanti rispetto al settore occidentale. Lavoro di catasto dello scrivente eseguito il 24/05/2018.



Figura 167 Tiranti non più in funzione della berlinese del 1992. Foto dello scrivente del 24/05/2018.

La disposizione della nuova struttura seguirebbe, quindi, quella preesistente, ovvero la berlinese del 1992 ed il cordolo del 1995. Nel corso degli ultimi mesi, però, alla luce dei dati di monitoraggio della stazione topografica totale e delle evidenze geomorfologiche, si è proposta una variazione dell'intervento (rappresentato per la sua intera estensione planimetrica con linea bianca con bordo nero in Figura 168), consistente nello spostamento a valle della porzione più orientale (ovvero quella che avrebbe dovuto seguire il cordolo del 1995 –linea viola in Figura 168) in linea con il settore più occidentale (Figura 168). Tale variazione consentirebbe alla struttura di agire direttamente su quelle porzioni del versante in cui gli spostamenti e le deformazioni si mostrano di maggior entità rispetto alla zona in cui l'opera è stata precedentemente progettata e, quindi, di ostacolare la probabile progressiva retrogressione del fenomeno stesso (freccia verde in Figura 168).

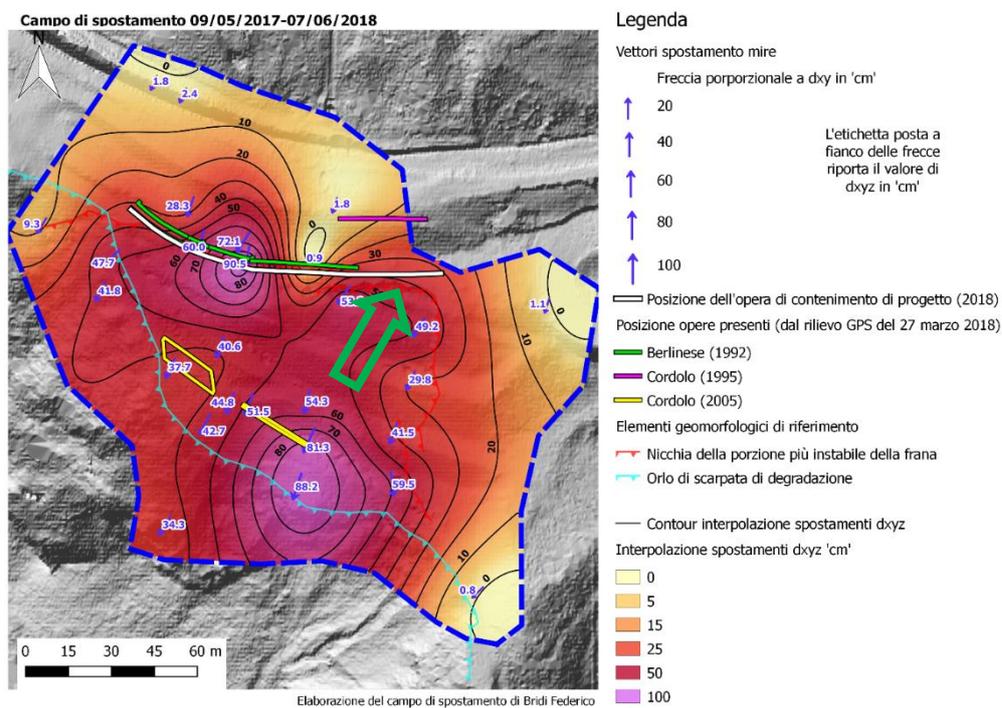


Figura 168 Posizionamento delle opere presenti e della struttura descritta nella relazione di Geologia Applicata Studio Associato (2018) [20] sopra il campo di spostamento dell'ultimo anno ottenuto dall'elaborazione dei dati della stazione topografica totale. La freccia verde suggerisce il trend regressivo del fenomeno franoso.

I dati di monitoraggio relativi agli spostamenti registrati alle mire ottiche della stazione topografica totale sono utilizzati per la definizione delle sollecitazioni che verrebbero ad agire sulle strutture e, quindi, delle capacità in termini di resistenza meccanica delle stesse. Tali dati vengono calcolati lungo le direzioni x, y e z del sistema di riferimento locale relativo alla stazione topografica totale (cfr. al capitolo sull'elaborazione dei dati di monitoraggio dell'ultimo anno, paragrafo relativo alla stazione topografica totale robotizzata) e per zone strutturalmente omogenee (Figura 169).

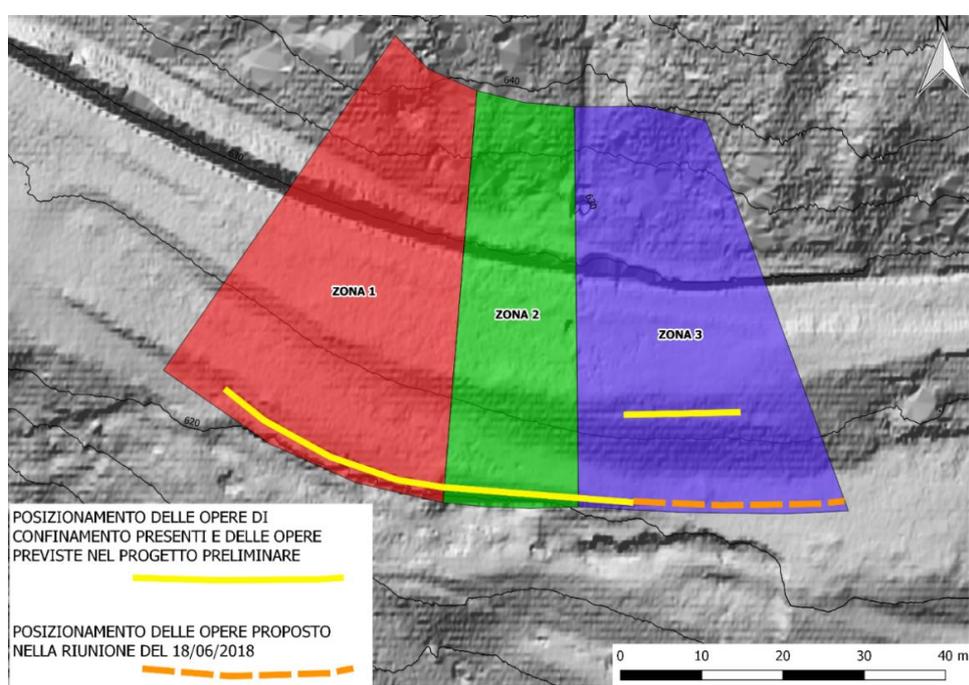


Figura 169 Definizione delle zone strutturalmente omogenee per l'intervento descritto nella relazione di Geologia Applicata Studio Associato (2018) [20].

Infine, nell'ultimo periodo sono stati programmati i lavori inerenti la fase cantieristica iniziale, i quali sono volti, soprattutto, alla messa in sicurezza del cantiere, essendo l'area d'intervento molto instabile e, quindi, il contesto operativo delicato. Si prevede, dunque, l'esecuzione di una prima fila di opere retrostante la berlinese, ovvero a monte della stessa, come vincoli provvisori per mantenere la berlinese stessa parallela al versante, la quale si trova in equilibrio precario e presenta un forte rischio di ribaltamento. Inoltre, il versante nel corso

dei lavori verrà monitorato (attraverso assestimetri, celle di carico, ... [20]), al fine di misurare le deformazioni indotte dai carichi che verranno ad insistere sul versante in questa fase.

9.3 Sistema di captazione delle acque di filtrazione/scorrimento “poco profondo”

Tale intervento è volto a regimare le acque già in parte intercettate dalla galleria drenante e che scorrono lungo il contatto fra l’Orizzonte A e l’Orizzonte B del modello geologico concettuale (Figura 170 ellisse rossa- cfr. al capitolo sul modello geologico ed idrogeologico concettuale), in particolare nella porzione di maggior depressione della paleo-forma valliva. Per quanto riguarda il drenaggio del dominio di filtrazione/scorrimento più profondo sarebbero necessari dei dreni inclinati che dalla base del versante in frana andassero ad intercettare la base dell’Orizzonte C (Figura 170 ellisse blu- cfr. al capitolo sul modello geologico ed idrogeologico concettuale).

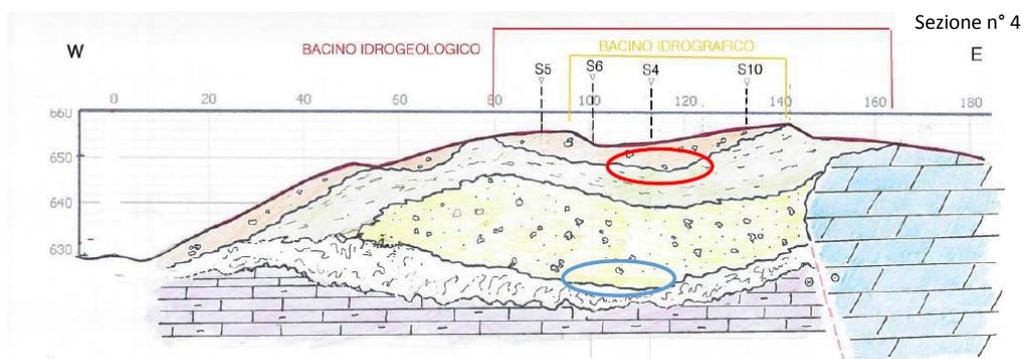


Figura 170 Sezione geologica interpretativa (modificata) delle indagini geoelettriche GG-E2 di GG Service s.a.s. del 2018 ([20], allegato 1), riportata nella “Relazione geologica e idrogeologica sulle indagini, caratterizzazione e modellazione geologica del sito” a supporto della “Progettazione geologica, geotecnica, geoidrologica, e strutturale delle opere in terra e roccia e dei sistemi complessivamente finalizzati alla messa in sicurezza della frana denominata “Busa del Cristo” sita nel Comune di Valle di Cadore e di Perarolo (Belluno), nell’ambito della proprietà ferroviaria RFI S.p.A.”, Geologia Applicata Studio Associato (2018) [20]. Sono evidenziate le posizioni dei punti di massima depressione della paleo-forma valliva all’interfaccia tra gli orizzonti più permeabili e quelli meno permeabili, ovvero dove dovrebbe concentrarsi lo scorrimento idrico (cerchi rosso e azzurro).

I dreni devono essere, pertanto, mirati verso queste zone critiche (ellissi in Figura 170) che potranno essere rilevate solamente attraverso un'assistenza geologica in corso d'opera continuativa e la perforazione ad aria compressa, in modo tale da poter rilevare eventuali venute d'acqua durante la realizzazione dei fori e, quindi, l'intercettazione della filtrazione o dello scorrimento sotterraneo [20]. I tubi drenanti sono costituiti da una porzione terminale permeabile, la quale va posizionata a monte del sistema di tiranti (la cui zona d'influenza sarà caratterizzata da bassa permeabilità legata all'iniezione della boiaccia cementizia per la loro esecuzione), e dal tratto in uscita impermeabile in modo da non condurre le acque altrove nell'ammasso (Figura 171) [20].

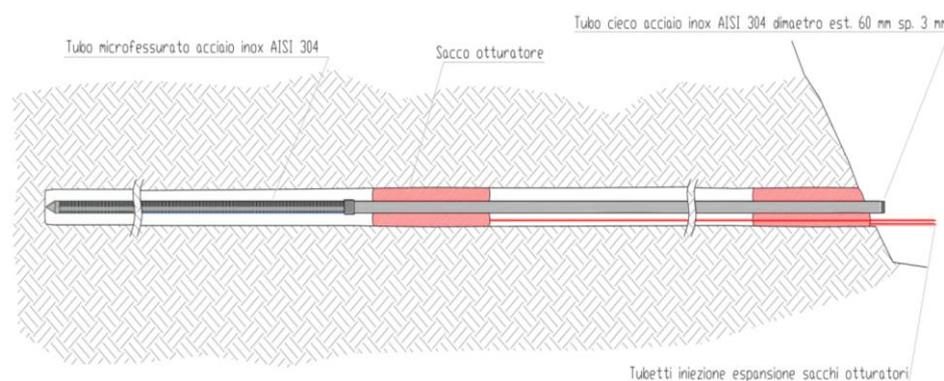


Figura 171 Sezione dei dreni con tratto terminale impermeabilizzato. Secondo quanto riportato nella “Relazione geologica e idrogeologica sulle indagini, caratterizzazione e modellazione geologica del sito” a supporto della “Progettazione geologica, geotecnica, geoidrologica, e strutturale delle opere in terra e roccia e dei sistemi complessivamente finalizzati alla messa in sicurezza della frana denominata “Busa del Cristo” sita nel Comune di Valle di Cadore e di Perarolo (Belluno), nell’ambito della proprietà ferroviaria RFI S.p.A.”, Geologia Applicata Studio Associato (2018) [20].

Secondo progetto, i dreni saranno lunghi circa 50 m, partiranno circa 30 m a valle rispetto alla ferrovia con angolo di 10° verso l'alto rispetto all'orizzontale (Figura 172 freccia rossa) e saranno posti con spaziatura di 3 m l'uno dall'altro [20].

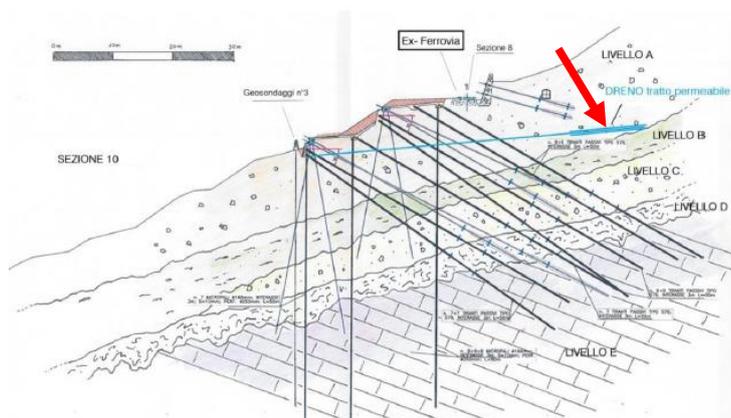


Figura 172 Sezione geologica (già vista in Figura 165) con l'insieme degli elementi della struttura del progetto del 2018 descritta e riportata nella “Relazione geologica e idrogeologica sulle indagini, caratterizzazione e modellazione geologica del sito” a supporto della “Progettazione geologica, geotecnica, geoidrologica, e strutturale delle opere in terra e roccia e dei sistemi complessivamente finalizzati alla messa in sicurezza della frana denominata “Busa del Cristo” sita nel Comune di Valle di Cadore e di Perarolo (Belluno), nell'ambito della proprietà ferroviaria RFI S.p.A.”, *Geologia Applicata Studio Associato (2018) [20]*. In questo caso è evidenziata la posizione del dreno (freccia rossa).

9.4 Monitoraggio

Nel corso dei lavori è previsto il monitoraggio attraverso assestimetri, celle di carico, ... (come già menzionato) [20], ma anche attraverso la stazione topografica totale, laddove le mire saranno preservate dai lavori di cantiere, con intervallo di campionamento orario [57].

Inoltre, nella relazione di *Geologia Applicata Studio Associato (2018) [20]* si fa riferimento all'installazione di un nuovo sistema di monitoraggio dell'area soggetta ai relativi interventi di progetto al fine di determinarne l'efficacia e la risposta del versante. Questo sistema sarà basato su 6 assestimetri a registrazione automatica oraria posizionati lungo 3 sezioni indicative del contesto geologico del versante (verosimilmente rappresentative delle 3 zone strutturalmente omogenee identificate in Figura 169) con lunghezza di circa 50 m (3 di questi monitoreranno la direzione verticale e altri tre saranno disposti sub-orizzontalmente in accordo con la posizione delle barre di progetto) [20]. Inoltre, sulla testa di alcune barre

verranno applicate delle celle di carico per determinare lo sforzo tensionale a cui sono sottoposte [20].

9.5 Indagini in corso d'opera

Si precisa come nel corso delle prime fasi dei lavori saranno eseguite delle perforazioni di sondaggio con lo scopo di ricavare informazioni geotecniche/geomeccaniche dei materiali presenti a partire dai parametri di perforazione, ma anche dall'utilizzo di telecamere che saranno inserite nei fori. Inoltre, verranno effettuate una serie di prove dilatometriche.

A queste indagini si aggiunge anche l'assistenza geologica in corso d'opera [20]: il tutto volto alla verifica della corrispondenza tra il modello geologico concettuale e la situazione effettiva riscontrata e, quindi, ad una realizzazione degli interventi mirata ed efficace, adottando eventuali misure correttive e migliorative laddove necessario.

9.6 Interventi di impermeabilizzazione eseguiti nell'estate 2018

Infine, si accenna ai lavori di impermeabilizzazione di parte del versante eseguiti dalla Regione del Veneto nel corso dell'estate 2018. Essi consistono in:

- 1) impermeabilizzazione della superficie del versante (comprensiva della



Figura 173 Impermeabilizzazione della superficie in frana a valle della berlinese con geo-membrane e regimazione delle acque raccolte con la canaletta drenante per opera della Regione del Veneto nell'estate 2018. Foto dello scrivente del 06/09/2018.

berlinese del 1992 e del settore a valle di questa - trapezio rosso in Figura 164 -) per mezzo di geo-membrane fissate ed ancorate con chiodi in acciaio (Figura 173). Tale porzione è stata precedentemente oggetto di un intervento di sbancamento per alleggerire il pendio stesso. L'acqua piovana che cade sulle geo-membrane viene convogliata da una canaletta di scolo trasversale al versante (Figura 173) verso oriente dove si allaccia ad un'altra opera di scolo drenante già presente e che scorre attraverso l'abitato di Costa, scaricando l'acqua nel fiume Piave;

- 2) impermeabilizzazione con resine espandenti monocomponenti delle fratture sul muro a tergo della vecchia linea ferroviaria e di alcune fessure nel terreno (Figura 174).



Figura 174 Impermeabilizzazione della fratture sul muro a tergo del vecchio tracciato ferroviario con resine espansive per opera della Regione del Veneto nell'estate 2018. Foto dello scrivente del 06/09/2018.

Nel corso di un evento meteorologico intenso, avvenuto nelle ultime settimane di agosto 2018, l'ostruzione della canaletta che corre attraverso l'abitato di Costa ne ha determinato il parziale allagamento. Si riconosce che tale inconveniente è dovuto alla concomitanza di tre condizioni: 1) l'intensità dell'evento meteorologico stesso, 2) la mancata pulizia della canaletta che attraversa Costa e 3) l'esigua luce della porzione del canale di scolo in prossimità dello sfocio nel fiume Piave.

Nonostante il problema dell'allagamento della frazione di Costa, gli interventi di impermeabilizzazione sembrano aver raggiunto l'effetto desiderato: infatti, gli estensimetri e la stazione topografica totale non hanno registrato importanti movimenti a seguito degli eventi meteorologici ad elevata intensità che sono avvenuti successivamente all'esecuzione di tali lavori.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sul fenomeno franoso di Sant'Andrea si è cercato di individuare e sintetizzare la successione storica dei movimenti del versante instabile e degli interventi eseguiti, ponendo particolare attenzione all'evoluzione dell'evento parossistico del novembre 2000. Prima di procedere alle analisi di monitoraggio dello fenomeno, viene proposto un modello geologico-idrogeologico concettuale del pendio instabile sulla base dei dati e delle informazioni disponibili da alcune indagini condotte nel corso degli anni sul corpo di frana. Il modello è basato sulla presenza di una paleo-forma valliva con asse orientato all'incirca Nord-Sud in corrispondenza di una probabile fascia cataclastica. Nel corpo di riempimento della paleo-valle si sono riconosciute tre unità (o orizzonti) geologiche dalle geometrie estremamente variabili nello spazio e distinte per differenze nella granulometria predominante e nelle proprietà geotecniche-idrogeologiche. Analogamente il substrato roccioso è stato suddiviso in diverse unità in funzione del grado di alterazione dello stesso (e, quindi, ancora una volta, delle proprietà geotecniche ed idrogeologiche) e della composizione litologica. Dal punto di vista strettamente idrogeologico, si è ipotizzata la presenza di domini di filtrazione/scorrimento dell'acqua pensili legati al contrasto di permeabilità tra le diverse unità geologiche identificate.

Una ricerca bibliografica sulla relazione che intercorre tra i fenomeni agenti nei materiali gessosi e l'innescò e l'attività delle frane ha evidenziato, inoltre, l'esigua attenzione posta in passato in merito a tale argomento, di cui il seguente lavoro si presenta come un caso di studio.

Il monitoraggio del fenomeno franoso di Sant'Andrea ha, dunque, consentito di determinarne alcune importanti caratteristiche cinematiche e deformative, tra le quali:

- la situazione frammentata ed eterogenea del corpo di frana;
- l'evoluzione del fenomeno nell'ultimo anno;

- lo svincolo del tratto occidentale della berlinese del 1992 rispetto al resto del versante;
- il trend regressivo del fenomeno franoso;
- la predominanza della componente verticale degli spostamenti in alcune zone (in particolare nell'area più a monte) del corpo più instabile della frana e di quella orizzontale in altre (ad esempio nel settore di valle);
- l'accelerazione nella risposta cinematica del versante in frana alla sollecitazione pluviometrica;
- la dipendenza della cinematica della frana dalla cumulata pluviometrica a 1 giorno e a 15 giorni.

Per quanto riguarda la cross-correlazione tra la velocità media di spostamento di ciascuna mira della stazione topografica totale e la sollecitazione pluviometrica, si è avanzata la proposta di rilevare e tenere in considerazione nel calcolo della funzione cross-correlazione la componente dominante del vettore 'velocità media'. La bontà di questa possibile scelta procedurale è avvalorata dal confronto dei risultati ottenuti nel calcolo della cross-correlazione tra la cumulata pluviometrica giornaliera nell'ultimo anno e le componenti verticale ed orizzontale della variabile cinematica considerata.

Si sono raffrontati, inoltre, due sistemi di monitoraggio differenti: ovvero quello tramite stazione topografica totale e quello attraverso rilievo fotogrammetrico da drone. Quest'ultimo, a fronte di un'elevata continuità spaziale e risoluzione areale del dato rilevato, presenta una risoluzione temporale spesso esigua in funzione del tempo intercorso fra i diversi rilievi fotogrammetrici ed una precisione delle misure legata a quella del rilievo GPS (che solitamente è un ordine di grandezza minore di quella della stazione topografica totale). Il monitoraggio con la stazione topografica totale è, invece, caratterizzato da un'elevata risoluzione temporale (variabile in funzione delle necessità) e da una buona precisione del dato (millimetrica), ma presenta una bassa continuità e una bassa risoluzione areale delle misure strettamente legate alla disposizione dei riflettori sul versante in movimento. I due sistemi vengono, quindi, a completarsi ed integrarsi a vicenda:

infatti, mentre la tecnica fotogrammetrica si presta particolarmente per lo studio dell'evoluzione della scarpata di degradazione ovvero della porzione più impervia e soggetta a movimenti di maggior entità, il monitoraggio attraverso la stazione topografica totale è adeguato per l'analisi dei movimenti dell'area più a monte. Il riconoscimento del carattere complementare delle due tecniche di monitoraggio, già rilevato dall'*Università degli Studi di Padova*, si concretizza con la predisposizione di un sistema di rilievo fotogrammetrico da terra automatico che verrà installato nei prossimi mesi ed andrà ad affiancare quello della stazione topografica totale.

Si osserva, infine, come i dati di monitoraggio della frana di Sant'Andrea non siano volti solamente alla definizione delle soglie di pre-allarme ed allarme per scopi di protezione civile, ma anche ad un avanzamento delle conoscenze del fenomeno al fine di progettare più coscientemente ed efficacemente opere per la mitigazione della pericolosità del fenomeno studiato. A tal proposito si sono descritti gli interventi, per i quali gli studi geologici sono stati eseguiti da *Geologia Applicata Studio Associato* e che, oltre alla regimazione delle acque sia superficiali che sotterranee (dato il loro importante contributo all'instabilità della frana, evidenziato nei capitoli di questa tesi), prevedono la realizzazione di una struttura altamente deformabile, quindi concepita secondo un approccio moderno di contenimento/condizionamento del fenomeno deformativo, che verrà ad appoggiarsi in parte al cordolo tirantato del 1992, ormai quasi completamente svincolato dal resto del versante.

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio le persone che ho incontrato e mi hanno accompagnato sia durante questi mesi di tirocinio/tesi che nel corso degli studi universitari.

Un grazie di cuore a coloro che mi hanno educato, sostenuto ed aiutato a crescere.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] ABU SEIF ES.S. (2014) Geotechnical Characteristics of Anhydrite/Gypsum Transformation in the Middle Miocene Evaporites, Red Sea Coast, Egypt. Arab J Sci Eng, Volume 39, Pages 247-260;
- [2] ADASTRA s.r.l., Bondesan A. (2008) Realizzazione di opere di consolidamento della frana della “Busa del Cristo” in comune di Perarolo. Indagini geofisiche ad alta risoluzione con tecnica ERT. Rapporto tecnico. Su incarico dell’impresa Prevedello Isidoro s.r.l. attraverso la società di ingegneria IPROS di Padova;
- [3] AGENZIA REGIONALE PER LA PREVENZIONE E PROTEZIONE AMBIENTALE DEL VENETO (ARPAV) (2018) Principali Variabili Meteorologiche dal 1994 al 2017. Al link: <http://www.arpa.veneto.it/dati-ambientali/open-data/clima/principali-variabili-meteorologiche> ;
- [4] ALBERTO W., GIARDINO M., MARTINOTTI G., TIRANTI D. (2008) Geomorphological hazards related to deep dissolution phenomena in the Western Italian Alps: Distribution, assessment and interaction with human activities. Engineering Geology. Volume 99, Issues 3–4, Pages 147-159;
- [5] AUTORITÀ DI BACINO DEI FIUMI ISONZO, TAGLIAMENTO, LIVENZA, PIAVE, BRENTA-BACCHIGLIONE (2013) Piano stralcio di Assetto idrogeologico del bacino del fiume Piave http://pai.adbve.it/index_PAI4B.html;
- [6] CARGNEL G., (1966-1967) Sondaggi geognostici di accertamento e progetto di consolidamento lungo la tratta galleria Monte Zucco-Busa del Cristo sulla linea Treviso-Calalzo. Per conto del Ministero dei Trasporti e Aviazione Civile, Azienda Autonoma delle Ferrovie dello Stato, Compartimento di Venezia, Direzione Lavori;

- [7] CARGNEL G. (1971) Opere di sostegno e di consolidamento e sistemi di allarme in aree franose lungo la linea ferroviaria Treviso-Calalzo. Atti del 2° Convegno Nazionale di studi sui problemi di Geologia Applicata;
- [8] CLIOS s.r.l., Cargnel O. (2018) Informazioni e dati del sistema di monitoraggio estensimetrico della frana di Sant'Andrea, Perarolo di Cadore (BL);
- [9] COMUNE DI VALLE DI CADORE (2015) Carta delle Fragilità. Piano di Assetto Territoriale del comune di Valle di Cadore. Al link: <http://www.comune.valledicadore.bl.it/amministrazione-trasparente/pianificazione-e-governo-del-territorio/pat-piano-di-assetto-del-territorio> ;
- [10] Corso di 'Geofisica applicata' (Corso di Laurea Magistrale in Geologia e Geologia tecnica, presso l'Università Degli Studi di Padova, frequentato nel primo semestre dell'anno accademico 2016-2017), appunti e dispense;
- [11] Corso di 'Geologia stratigrafica e geologia regionale' (Corso di Laurea Triennale in Scienze Geologiche, presso l'Università Degli Studi di Padova, frequentato nel secondo semestre dell'anno accademico 2014-2015), appunti e dispense del modulo di geologia regionale;
- [12] Corso di 'Geologia tecnica e progettazione geologico-tecnica' (Corso di Laurea Magistrale in Geologia e Geologia tecnica, presso l'Università Degli Studi di Padova, frequentato nel primo semestre dell'anno accademico 2017-2018), appunti e dispense;
- [13] Corso di 'Geomorfologia applicata' (Corso di Laurea Magistrale in Geologia e Geologia tecnica, presso l'Università Degli Studi di Padova, frequentato nel secondo semestre dell'anno accademico 2016-2017), appunti e dispense;

- [14] Corso di 'Geotecnica' (Corso di Laurea Magistrale in Geologia e Geologia tecnica, presso l'Università Degli Studi di Padova, frequentato nel primo semestre dell'anno accademico 2016-2017), appunti e dispense;
- [15] ENTE DELLE FERROVIE DELLO STATO (Direzione Centrale Opere Civili del Dipartimento Potenziamento e Sviluppo (Trieste)) (1990) Documento tecnico con oggetto "Dissesto al km 122+500/600 della linea Treviso-Calalzo". Firmato dal funzionario geologo ed inviato al capo unità tratti di linea Treviso (Venezia);
- [16] FENTI V. (1987) Relazione geologica su n. 4 sondaggi eseguiti in località Busa del Cristo nel comune di Perarolo (Provincia di Belluno). Sondaggi realizzati dall'Impresa Romolo Bardin S.p.a. per conto dell'Ente Ferrovie dello Stato, Compartimento di Venezia, Linea Treviso-Calalzo;
- [17] FERROVIE DELLO STATO SOCIETÀ DI TRASPORTI E SERVIZI PER AZIONI, Mele R., Riccardelli N., Dinuzzi L., Mercatelli S., Palleschi M.E., Rossi F.M., Gargiulo S., Relazione geologica nell'ambito della "Linea Treviso-Calalzo. Variante di tracciato della galleria di M. Zuco tra il km 121+0.38 e il km 124+850 circa";
- [18] FS S.p.a. (Servizio di Potenziamento e Sviluppo Venezia (Geologia) dell'Area Rete Zona Territoriale Nord-Est) (1996) Istruzioni per l'interpretazione dei dati provenienti dall'impianto di rilevamento della frana in località "Busa del Cristo". Linea Treviso-Calalzo;
- [19] GATTINONI P. (2009) Parametrical landslide modeling for hydrogeological susceptibility assessment: from the Crati Valley to the Cavallerizzo landslide (Southern Italy). Nat Hazards, Volume 50, Pages 161-178
- [20] GEOLOGIA APPLICATA STUDIO ASSOCIATO, Cadrobbi L. (2018) Relazione geologica e idrogeologica sulle indagini, caratterizzazione e

modellazione geologica del sito a supporto della “Progettazione geologica, geotecnica, geoidrologica, e strutturale delle opere in terra e roccia e dei sistemi complessivamente finalizzati alla messa in sicurezza della frana denominata “Busa del Cristo” sita nel Comune di Valle di Cadore e di Perarolo (Belluno), nell'ambito della proprietà ferroviaria” per conto di RFI S.p.A.;

- [21] GEOSONDAGGI s.p.a., Fornasiero E., Freddo A. (2003) Località Busa del Cristo comuni di Perarolo di Cadore e Valle di Cadore (BL). Indagini geognostiche, geotecniche e geofisiche propedeutiche al progetto di consolidamento di versanti in frana, interventi in alveo e ripristino viabilità. Indagine geognostica. Su incarico della Regione Veneto-Ufficio del Genio Civile di Belluno;
- [22] GEOSONDAGGI s.p.a., Fornasiero E., Freddo A. (2003) Località Busa del Cristo comuni di Perarolo di Cadore e Valle di Cadore (BL). Indagini geognostiche, geotecniche e geofisiche propedeutiche al progetto di consolidamento di versanti in frana, interventi in alveo e ripristino viabilità. Indagine geosismica. Su incarico della Regione Veneto-Ufficio del Genio Civile di Belluno;
- [23] GOOGLE EARTH (2018) Immagini satellitari;
- [24] GUERRERO J., GUTIÉRREZ F. (2017) Gypsum scarps and asymmetric fluvial valleys in evaporitic terrains. The role of river migration, landslides, karstification and lithology (Ebro River, NE Spain). *Geomorphology*. Volume 297, Pages 137-152;
- [25] GUTIÉRREZ ELORZA M., GUTIÉRREZ SANTOLALLA F. (1998) Geomorphology of the Tertiary gypsum formations in the Ebro Depression (Spain). *Geoderma*. Volume 87, Issues 1–2, Pages 1-29;

- [26] GUTIÉRREZ F., PARISE M., DE WAELE J., JOURDE H. (2014) A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews*. Volume 138, Pages 61-88;
- [27] ISTITUTO SUPERIORE PER LA PROTEZIONE E LA RICERCA AMBIENTALE Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000. Al link http://193.206.192.231/carta_geologica_italia/nord.htm . In particolare, si è analizzato il Foglio n. 12 'Cortina d'Ampezzo', datato 1940 e realizzato a cura della SEZIONE GEOLOGICA DELL'UFFICIO IDROGRAFICO DEL MAGISTRATO DELLE ACQUE-VENEZIA con rilevamenti diretti da DAL PIAZ G. ed eseguiti da CASTIGLIONI B., DAL PIAZ G., LEONARDI P., MERLA G., TREVISAN L., ZENARI S.;
- [28] JHA A.K., SIVAPULLAIAH P.V. (2017) Unpredictable Behaviour of Gypseous/Gypsiferous Soil: An Overview. *Indian Geotech J.*, Volume 47, Pages 503-520;
- [29] LEICA GEOSYSTEMS AG (2009) Leica TM 30. Dati tecnici;
- [30] MATHWORKS Inc, informazioni in merito a ed installazione dei toolbox di MATLAB. Al link: <https://it.mathworks.com/products/matlab.html> ;
- [31] MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO E DEL MARE Geoportale nazionale. Servizi WMS. Al link: <http://www.pcn.minambiente.it/mattm/servizio-wms/> . In particolare si sono utilizzati i servizi relativi ai 'Prodotti Lidar-Regione Veneto' (aggiornato al 2013), 'Ortofoto a colori anno 2012 con relative date del volo' e 'PAI-pericolosità idrogeologica' (aggiornato al 2013);
- [32] PERETTI P. (2006) Perarolo di Cadore-Frana di Sant'Andrea. Campagna di test in sito sull'effettuazione di 'pali-jet'. Relazione illustrativa;
- [33] PROGEO s.r.l., Cappelli I., Furani M., Galassi G., Pulelli G. (1991) Linea Treviso-Calalzo. Indagini geosismiche e geomeccaniche sui movimenti

franosì in corrispondenza della Busa del Cristo dal km. 122+200 al km. 122+600. Per conto di Ente Ferrovie dello Stato Divisione tecnologie e sviluppo di sistema Direzione centrale opere civili – Ufficio 1° (Geologia);

- [34] PROTEZIONE CIVILE DELLA REGIONE DEL VENETO, Mariani R. (2018) Rapporto n. 3 di marzo aggiornamento al 20.03.2018, frana Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL), esame movimenti ultimi 7-15 giorni (dalle 06.00 del 05.03.2018 alle 06.00 del 20.03.2018);
- [35] PROTEZIONE CIVILE DELLA REGIONE DEL VENETO, Mariani R. (2018) Rapporto n. 1 di aprile aggiornamento al 12.04.2018, frana Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL), esame movimenti ultimi 7-15 giorni (dalle 06.00 del 28.03.2018 alle 06.00 del 12.04.2018);
- [36] PROTEZIONE CIVILE DELLA REGIONE DEL VENETO, Mariani R. (2018) Rapporto n. 2 di maggio aggiornamento al 16.05.2018, frana Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL), esame dei movimenti legati all'evento di pioggia del 14-15 maggio e analisi degli ultimi 15 giorni (dalle 06.00 del 01.05.2018 alle 06.00 del 16.05.2018);
- [37] PROTEZIONE CIVILE DELLA REGIONE DEL VENETO, Mariani R. (2018) Rapporto n. 1 di giugno aggiornamento al 08.06.2018, frana Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL), esame dei movimenti legati al periodo dal 28 maggio al 8 giugno (dalle 06.00 del 28.05.2018 alle 06.00 del 08.06.2018);
- [38] REGIONE DEL VENETO GIUNTA REGIONALE, Cargnel G., Pellegrini G.B., Valdinucci A. (1978) Relazione geologica applicata nell'ambito dello "Studio geologico applicato delle pendici montane sovrastanti Perarolo (Belluno), nel quadro della protezione idro-geologica del centro abitato";

- [39] REGIONE VENETO, G.P. Bozzo (1995) Comune di Perarolo di Cadore. Situazione di instabilità di alcuni tratti della S.S. 51 di Alemagna. Relazione;
- [40] REGIONE DEL VENETO (Giunta Regionale, Segreteria Regionale ai Lavori Pubblici, Direzione Difesa del Suolo), Carraro M., Luchetta A., Bettella M., Bianco A., Bonetto I., Bortoluzzi V., Maurizio I., Piccolo D., Salti L., Taranta R., Baglioni A., Gaspari E. (1999) Dissesti idrogeologici nel Comune di Perarolo di Cadore. Perimetrazione delle Aree a Rischio. Allegato B5;
- [41] REGIONE DEL VENETO (Direzione geologia e ciclo dell'acqua), Baglioni A., Toffoletto F. (2001) Rapporto geologico preliminare sulla frana che ha interessato il centro storico di Perarolo (BL) il giorno 18.11.2000;
- [42] REGIONE VENETO (2004) Sezioni CTR Raster alla scala 1:10.000. Infrastruttura dei Dati Territoriali della Regione Veneto. Al link <https://idt.regione.veneto.it/app/metacatalog/> ;
- [43] RETE FERROVIARIA ITALIANA, Archivio e dati;
- [44] SEIJMONSBERGEN A. C., DE GRAAFF L.W.S. (2006) Geomorphological mapping and geophysical profiling for the evaluation of natural hazards in an alpine catchment. Natural Hazards And Earth System Sciences. Volume 6, Issue 2, Pages 185-193;
- [45] SGI STUDIO GALLI INGEGNERIA S.p.A., Galli A., Marsala V., Miccadei E., Daverio F., Filippi E., Benetazzo P., Burigo P., Negri G., Menti L., Sommacal R., Cappelin D. (2012) All.A-Relazione Tecnico Illustrativa nell'ambito dello "Interventi di mitigazione per gli scenari di rischio geologico, idraulico e di consolidamento dell'abitato di Perarolo di

Cadore (BL). STUDIO DI PREFATTIBILITÀ”. Per conto della Regione Veneto Segreteria Regionale per l’Ambiente Direzione Difesa del Suolo;

- [46] TEZA G., ATZENI C., BALZANI M., GALGARO A., GALVANI G., GENEVOIS R., LUZI G., MECATTI D., NOFERINI L., PIERACCINI M., SILVANO S., UCCELLI F., ZALTRON N. (2008) Ground-based monitoring of high-risk landslides through joint use of laser scanner and interferometric radar. *International Journal of Remote Sensing*. Volume 29, Pages 4735-4756;
- [47] TEZA G., PESCI A., GENEVOIS R., GALGARO A. (2008) Characterization of landslide ground surface kinematics from terrestrial laser scanner and strain field computation. *Geomorphology*, Volume 97, Pages 424-437;
- [48] TEZA G., PESCI A. (2015) grid_strain grid_strain3. Release 1.5-July 2015. User’s guide;
- [49] TORRI R., MURGESE D., MORINO C. (2013) Sinkhole Monitoring to Support Landslide Management. In: Margottini C., Canuti P., Sassa K. (eds) *Landslide Science and Practice*, Volume 6, Pages 747-754;
- [50] TRAVELLETTI J., DEMAND J., JABOYEDOFF M., MARILLIER F. (2010) Mass movement characterization using a reflexion and refraction seismic survey with the sloping local base level concept. *Geomorphology*. Volume 116, Issues 1–2, Pages 1-10;
- [51] UFFICIO GEOTECNICO DELLA REGIONE VENETO, Bozzo G.P., Baglioni A. (1985) Relazione geologica. Dissesti in località Costa nel comune di Perarolo di Cadore;
- [52] UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA, Genevois R. (2003) Relazione geologico-tecnica;

- [53] UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA (Dipartimento di Geologia, Paleontologia e Geofisica), Genevois R., Pellegrini G.B., Sedeo R., Siorpaes C., Gianolla P., Piccin G., Mason L., Caporali A., Rocca M., Squarzon C. (2003) Relazione geologico-tecnica nell'ambito dello "Studio sui fenomeni franosi generalizzati del Monte Zucco e di aree ad esso prossime nei comuni di Perarolo di Cadore e Valle di Cadore (BL)". Nell'ambito della Convenzione tra Regione Veneto (Direzione Difesa del Suolo e Protezione Civile) e l'Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geologia, Paleontologia e Geofisica);
- [54] UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA (Dipartimento di Geologia), Genevois R. (2011) Studio della frana di Perarolo di Cadore (BL). Nell'ambito della Convenzione fra la Regione del Veneto (Direzione Difesa del suolo) e l'Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geologia);
- [55] UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA (Dipartimento di Geoscienze) (2015) Relazione tecnica inerente alla Prima Fase della Convenzione. Definizione delle soglie di allertamento del fenomeno franoso della Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL). Nell'ambito della Convenzione di ricerca fra la Regione del Veneto (Dipartimento Difesa del Suolo e Foreste, Sezione Difesa del Suolo) e l'Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geoscienze);
- [56] UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA (Dipartimento di Geoscienze), Galgaro A. (responsabile scientifico), (2015) Relazione tecnica inerente alla Seconda Fase della Convenzione. Definizione delle soglie di allertamento del fenomeno franoso della Busa del Cristo in comune di Perarolo di Cadore (BL). Nell'ambito della Convenzione di ricerca fra la Regione del Veneto (Dipartimento Difesa del Suolo e Foreste, Sezione Difesa del Suolo) e l'Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geoscienze);

- [57] UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA, Dipartimento di Geoscienze, Galgaro A. (responsabile scientifico), (2018) Relazione finale della Convenzione. Interventi per la mitigazione della pericolosità della frana di Sant'Andrea, Perarolo di Cadore (BL). Nell'ambito della Convenzione di ricerca fra la Regione del Veneto (Dipartimento Difesa del Suolo e Foreste, Sezione Difesa del Suolo) e l'Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Geoscienze);
- [58] YILMAZ I. (2001) Gypsum/anhydrite: some engineering problems. Bull Eng Geol Environ, Volume 60, Pages 227-230;

ALLEGATI

Allegato:

Carta geomorfologica della frana di Sant'Andrea (Perarolo di Cadore, BL) e dell'area a monte.

(in formato A1, ripiegata a fine documento)

Allegato:

Andamento delle variabili meteorologiche ‘altezza di precipitazione’, ‘giorni piovosi’ e ‘temperatura media a 2 m dal suolo’ annuali e medie mensili alla stazione meteorologica ARPAV di Valle di Cadore (794 m s.l.m.)

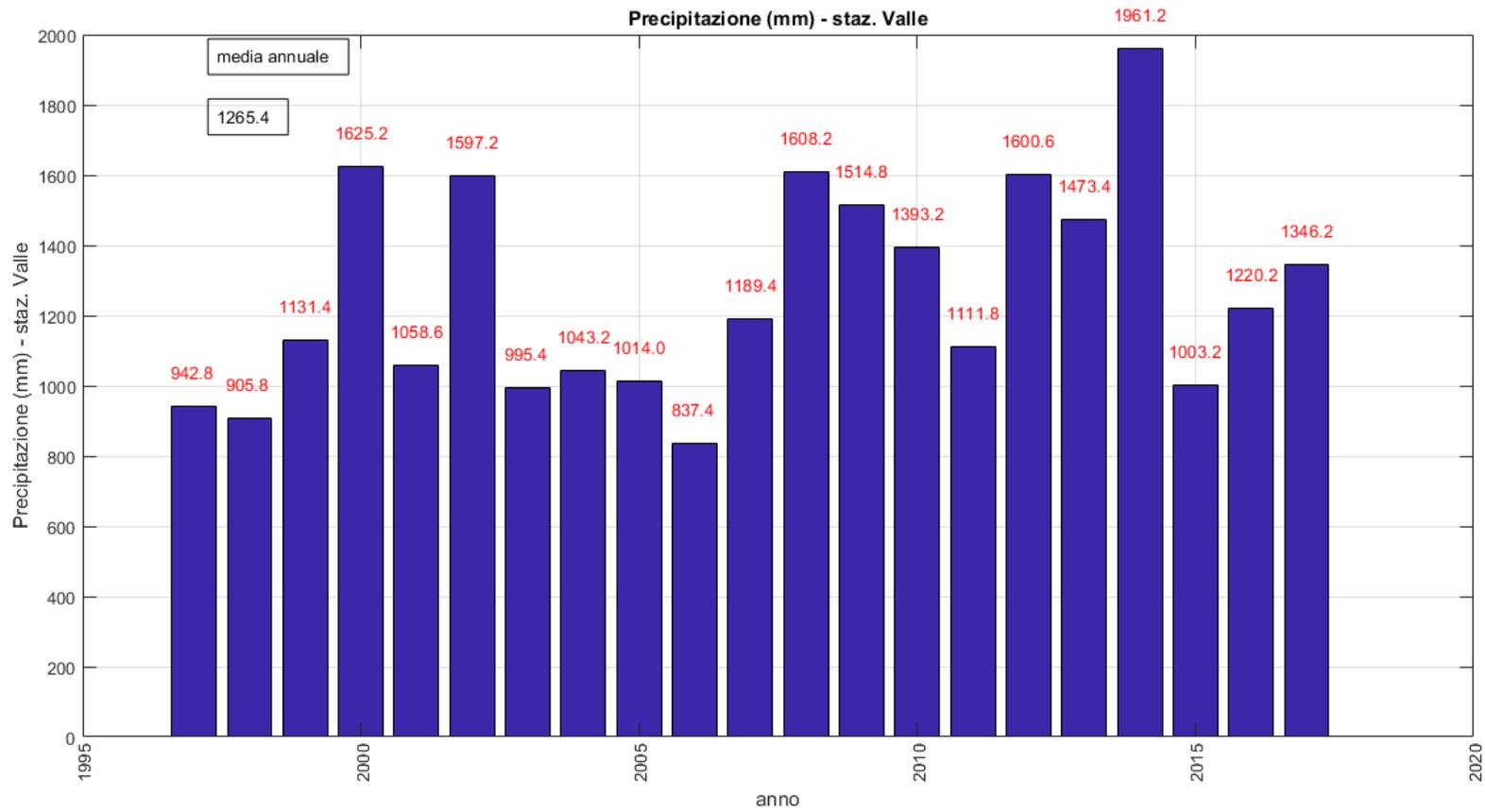


Figura 175 Andamento della variabile 'altezza di precipitazione annuale' dal 1997 al 2017 nella stazione pluviometrica di Valle di Cadore (elaborazione dati ARPAV [3] da parte dello scrivente).

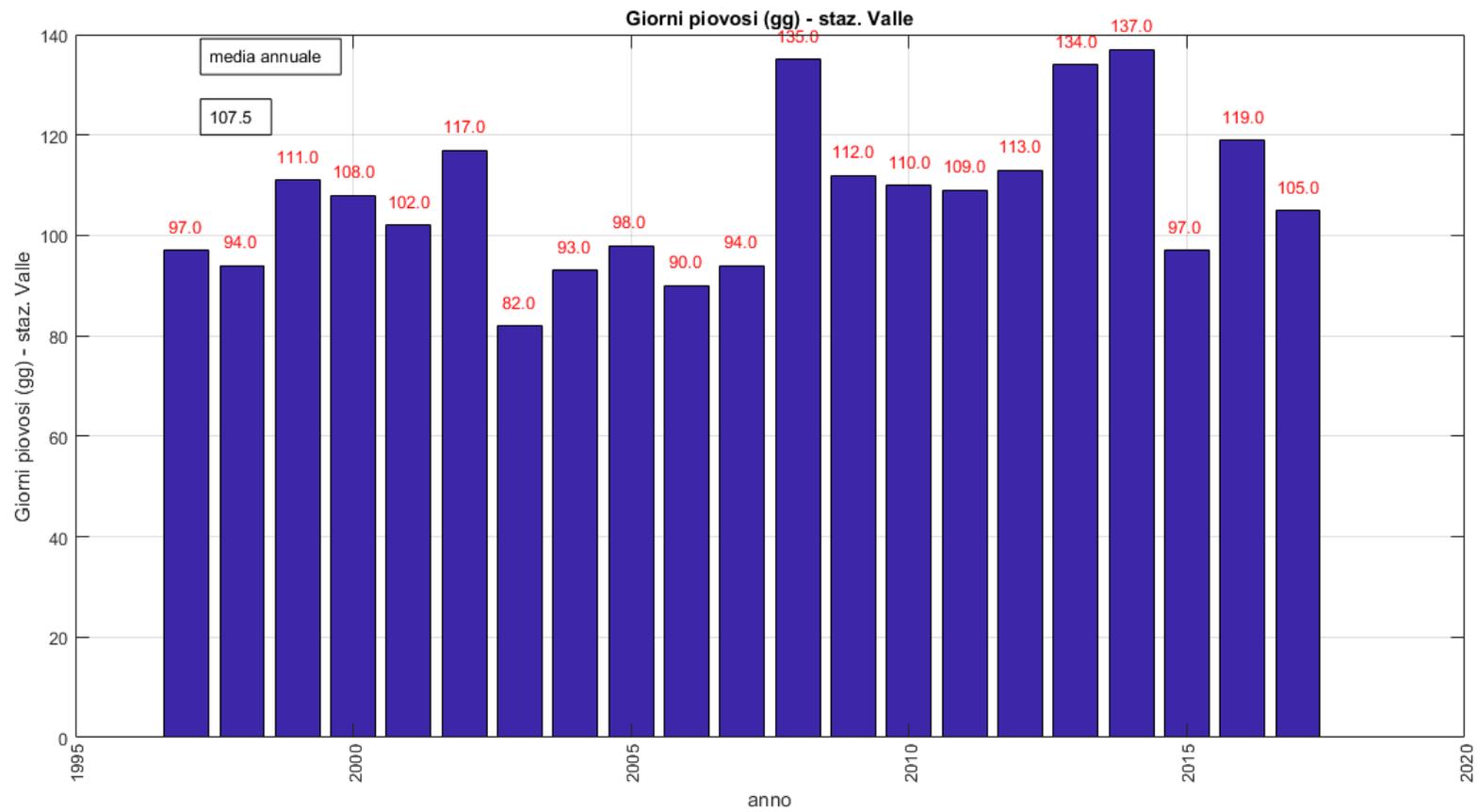


Figura 176 Andamento della variabile ‘giorni piovosi annuali’ dal 1997 al 2017 nella stazione pluviometrica di Valle di Cadore (elaborazione dati ARPAV [3] da parte dello scrivente).

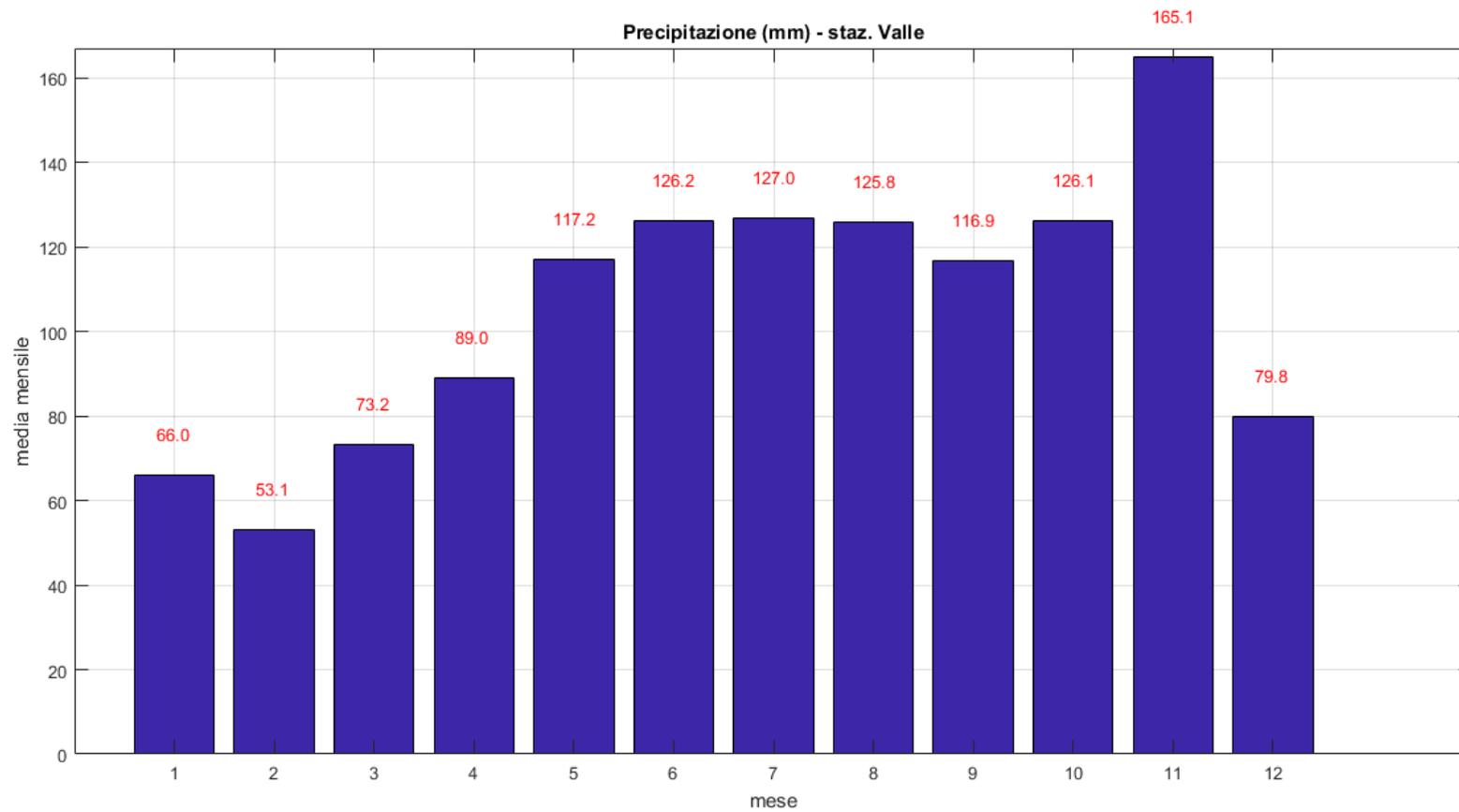


Figura 177 Andamento della variabile 'altezza di precipitazione mensile media' (dal 1997 al 2017) nel corso dell'anno nella stazione pluviometrica di Valle di Cadore (elaborazione dati ARPAV [3] da parte dello scrivente).

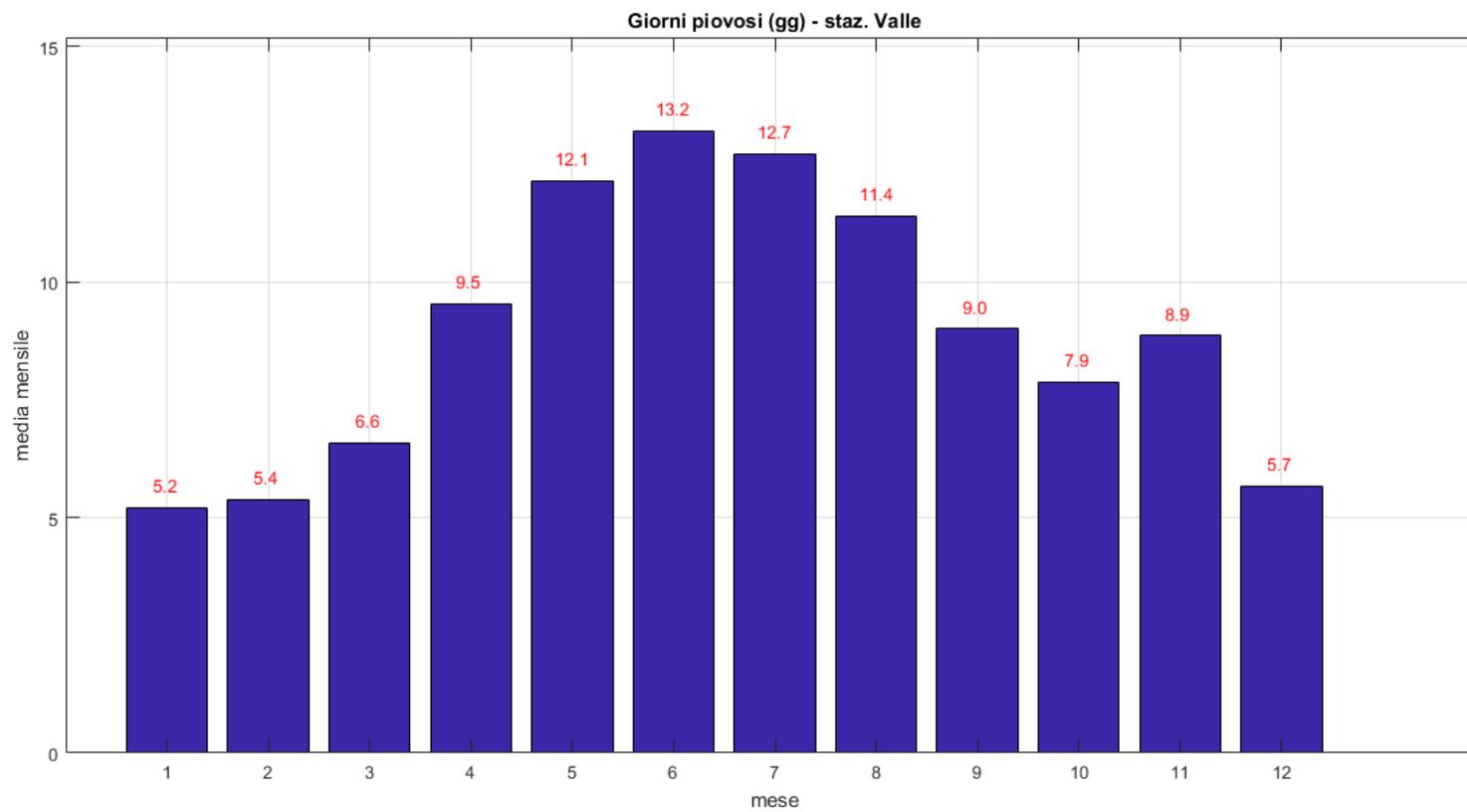


Figura 178 Andamento della variabile 'giorni piovosi mensili medi' (dal 1997 al 2017) nel corso dell'anno nella stazione pluviometrica di Valle di Cadore (elaborazione dati ARPAV [3] da parte dello scrivente).

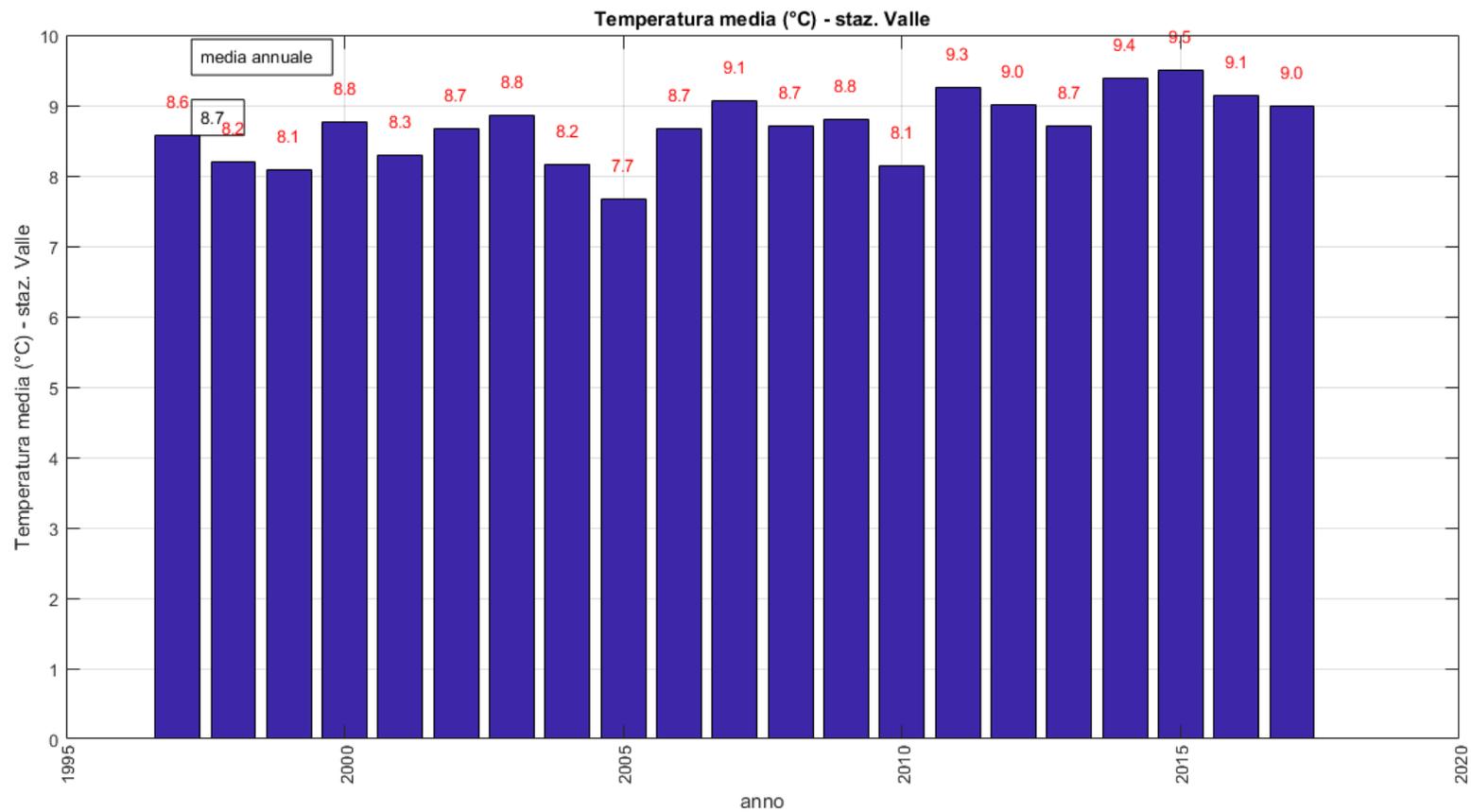


Figura 179 Andamento della variabile 'temperatura media a 2 m dal suolo' dal 1997 al 2017 nella stazione pluviometrica di Valle di Cadore (elaborazione dati ARPAV [3] da parte dello scrivente).

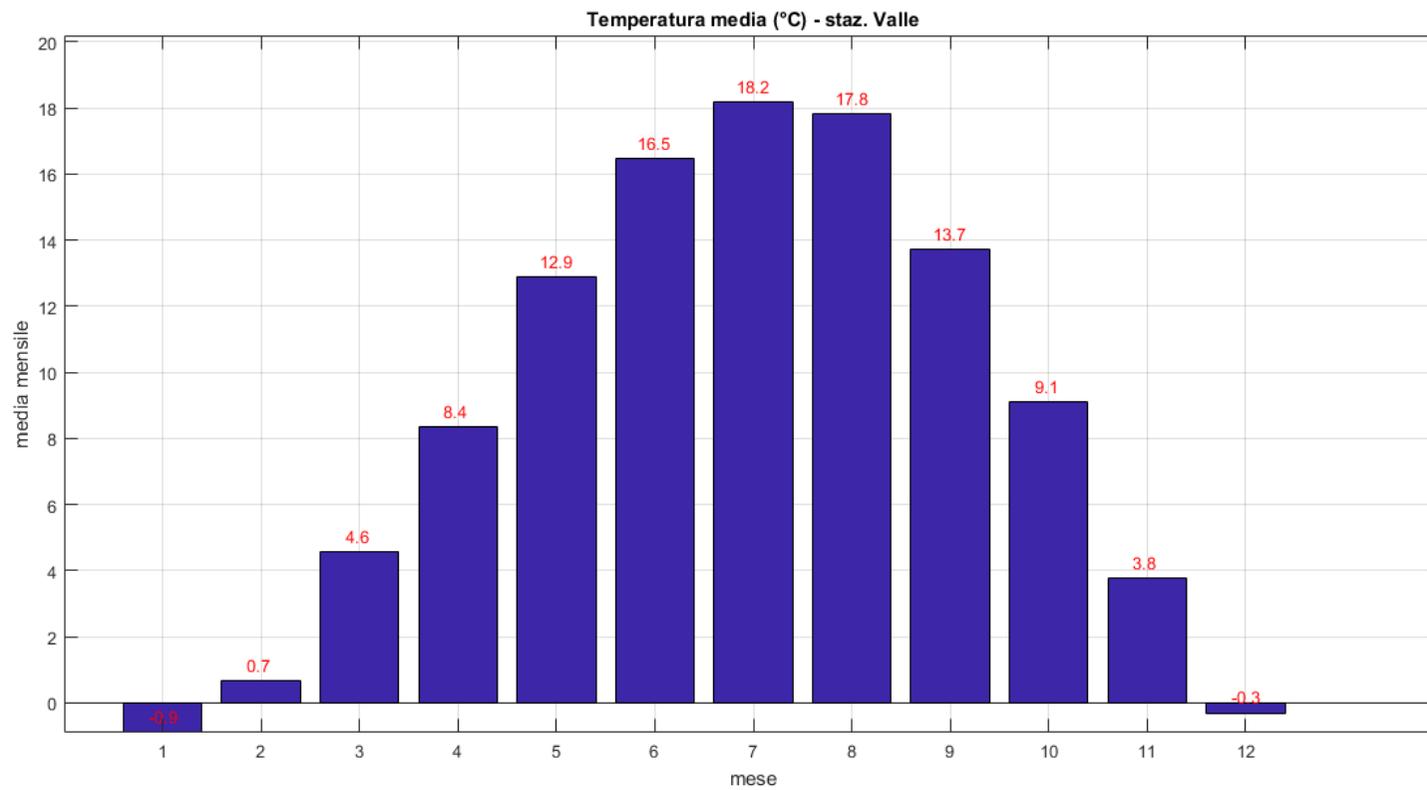


Figura 180 Andamento della variabile 'temperatura media a 2 m dal suolo mensile' (dal 1997 al 2017) nel corso dell'anno nella stazione pluviometrica di Valle di Cadore (elaborazione dati ARPAV [3] da parte dello scrivente).

Allegato:

Andamento delle variabili meteorologiche ‘altezza di precipitazione’, ‘giorni piovosi’ e ‘temperatura media a 2 m dal suolo’ annuali e medie mensili alla stazione meteorologica ARPAV di Domegge di Cadore (822 m s.l.m.)

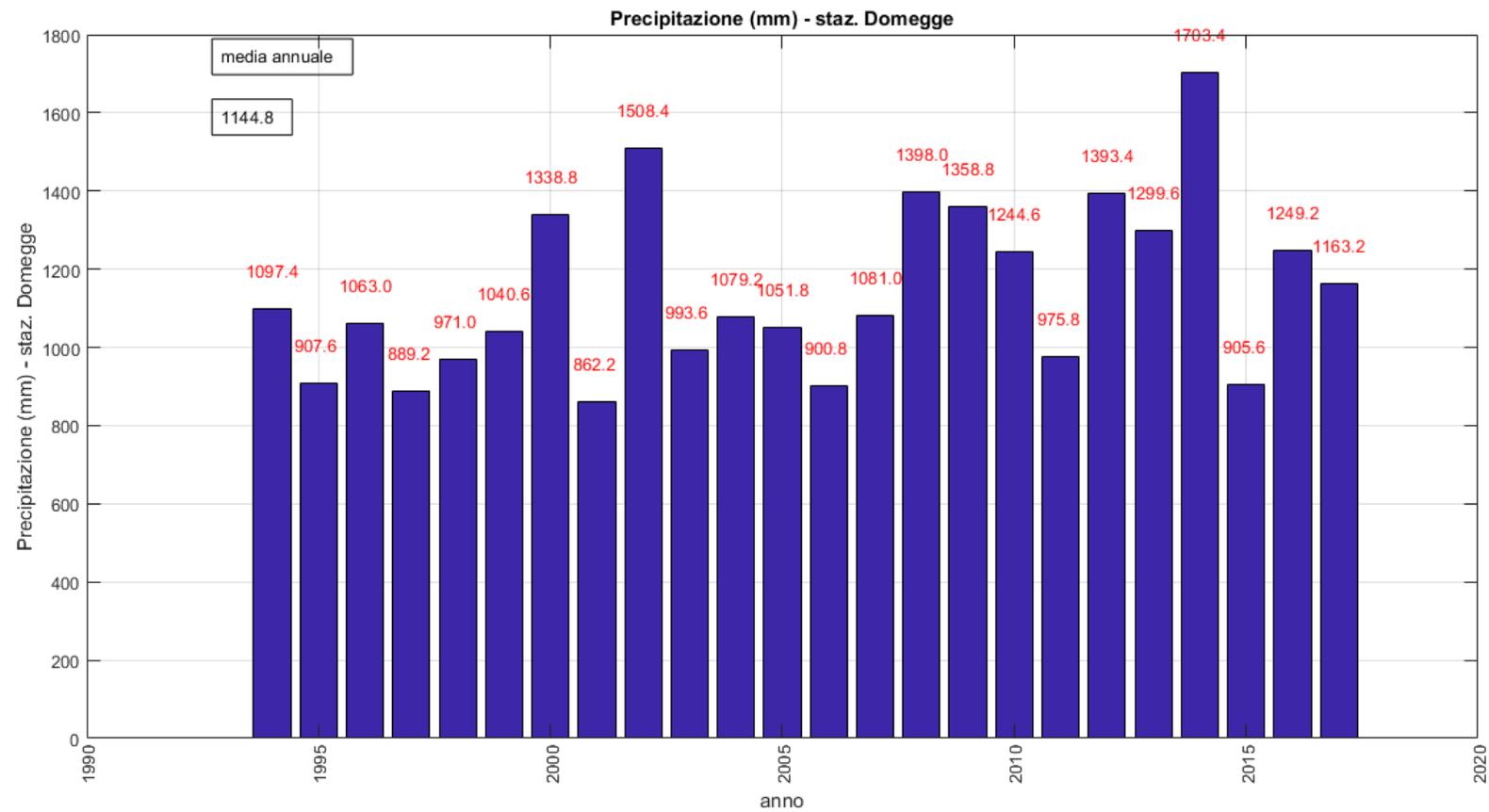


Figura 181 Andamento della variabile 'altezza di precipitazione annuale' dal 1994 al 2017 nella stazione pluviometrica di Domegge di Cadore (elaborazione dati ARPAV [3] da parte dello scrivente).

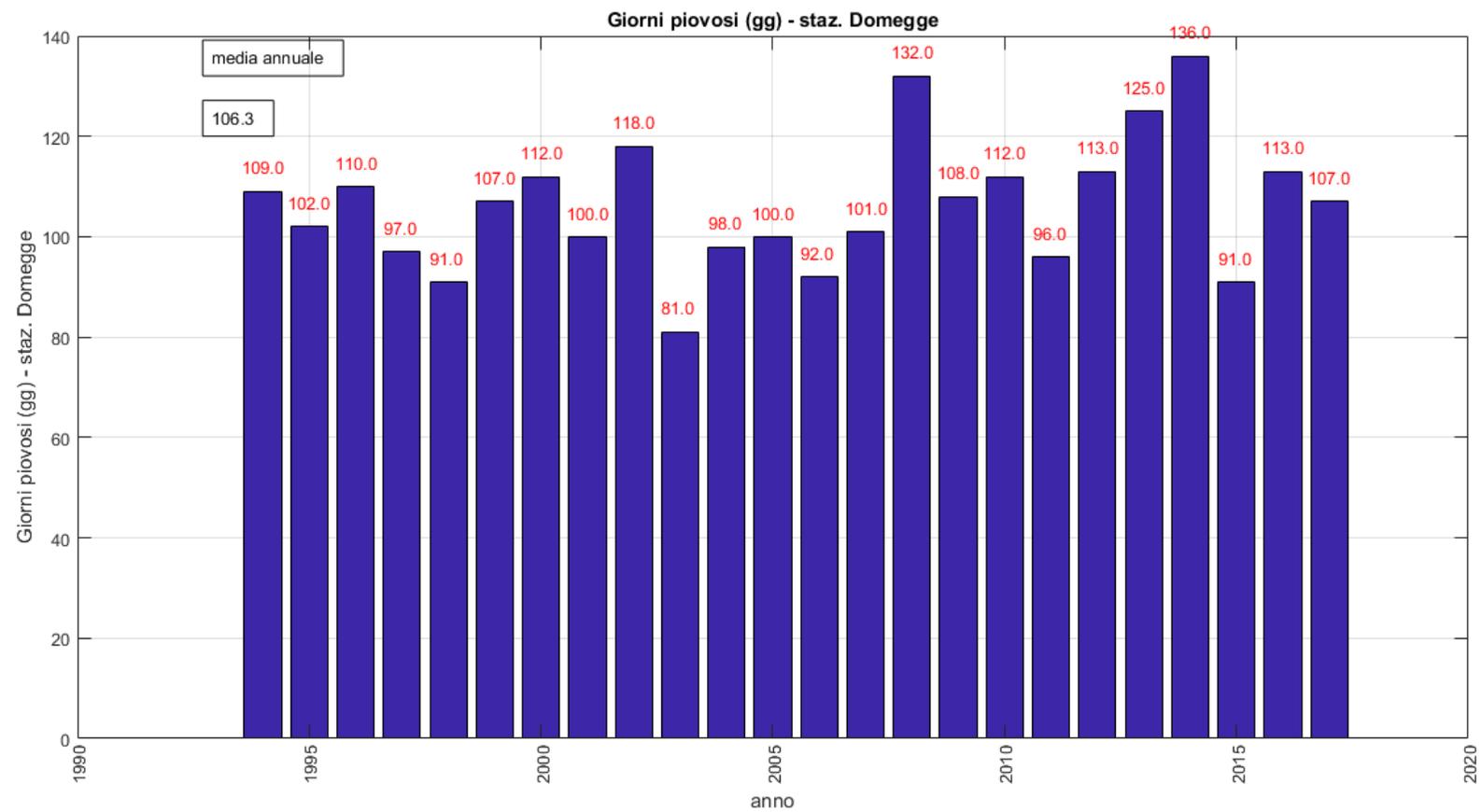


Figura 182 Andamento della variabile ‘giorni piovosi annuali’ dal 1994 al 2017 nella stazione pluviometrica di Domegge di Cadore (elaborazione dati ARPAV [3] da parte dello scrivente).

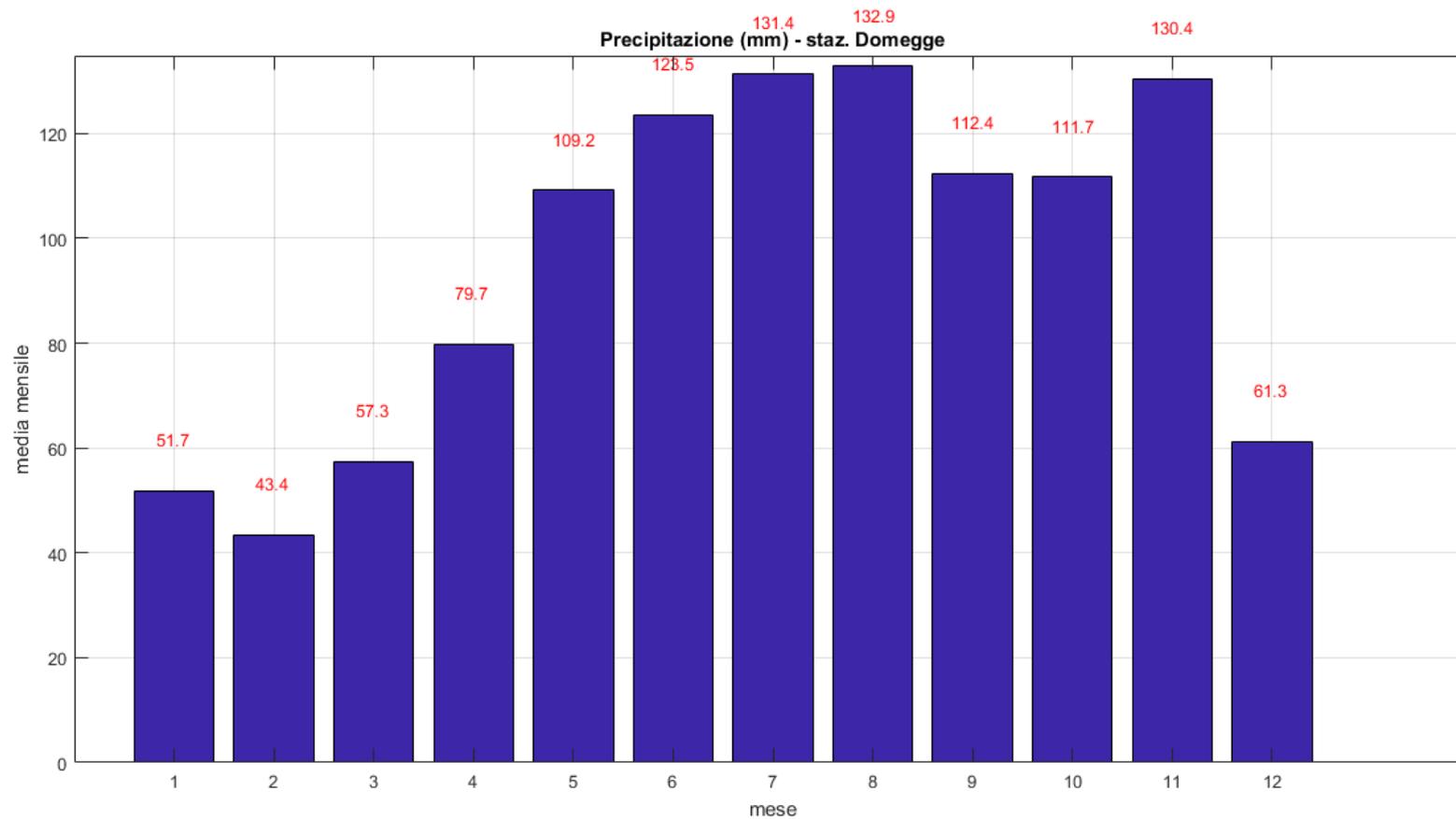


Figura 183 Andamento della variabile 'altezza di precipitazione mensile media' (dal 1994 al 2017) nel corso dell'anno nella stazione pluviometrica di Domegge di Cadore (elaborazione dati ARPAV [3] da parte dello scrivente).

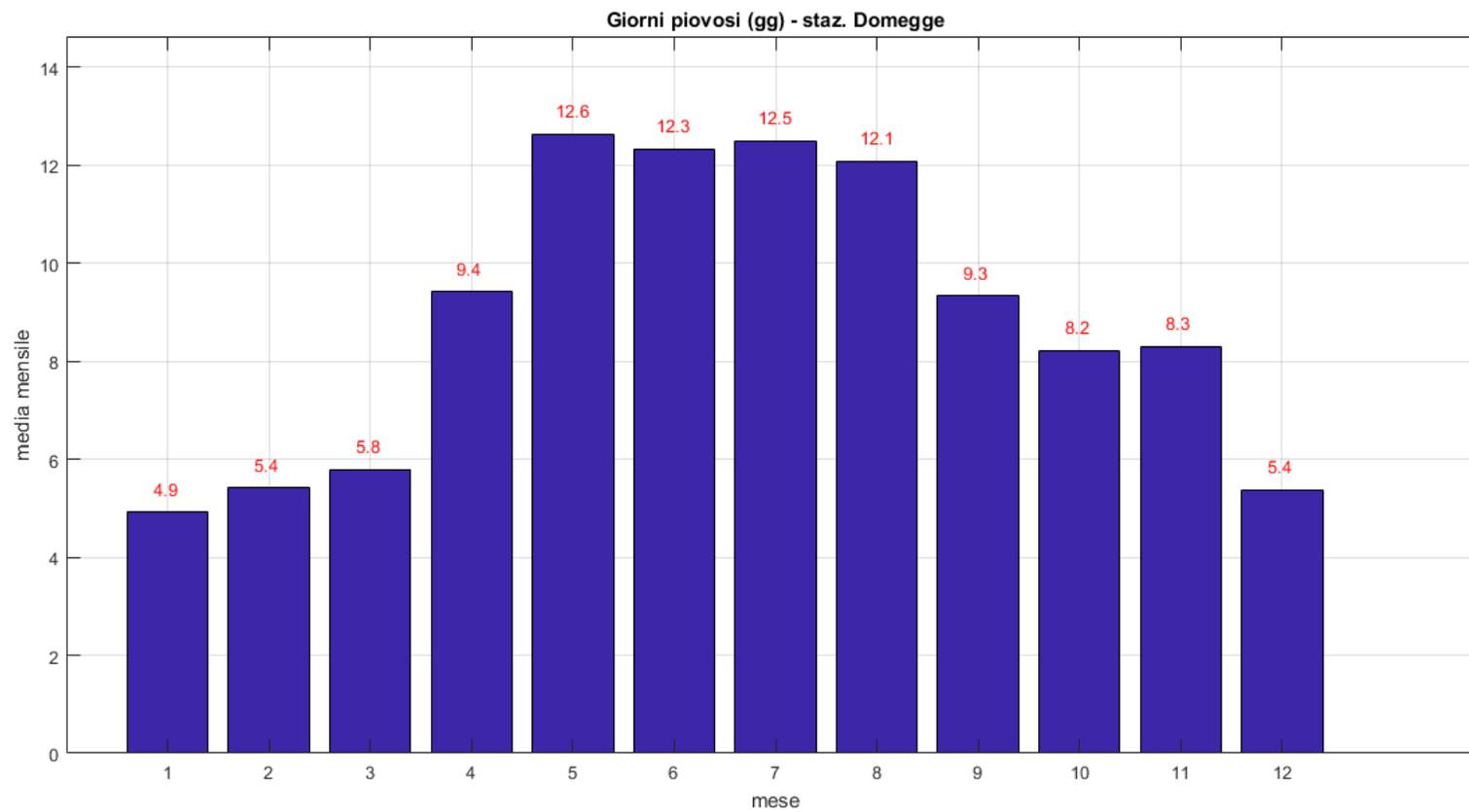


Figura 184 Andamento della variabile 'giorni piovosi mensili medi' (dal 1994 al 2017) nel corso dell'anno nella stazione pluviometrica di Domegge di Cadore (elaborazione dati ARPAV [3] da parte dello scrivente).

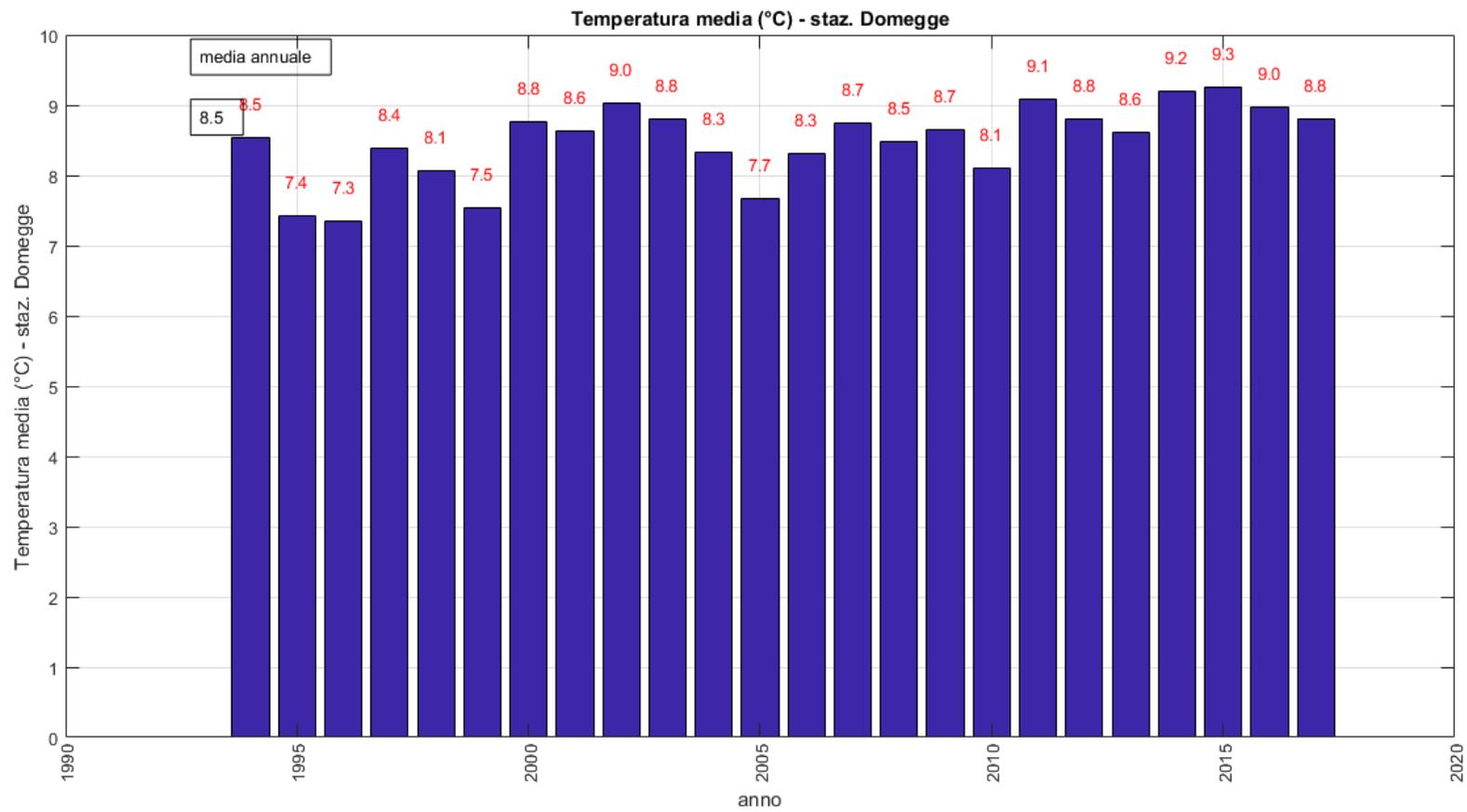


Figura 185 Andamento della variabile 'temperatura media a 2 m dal suolo' dal 1994 al 2017 nella stazione pluviometrica di Domegge di Cadore (elaborazione dati ARPAV [3] da parte dello scrivente).

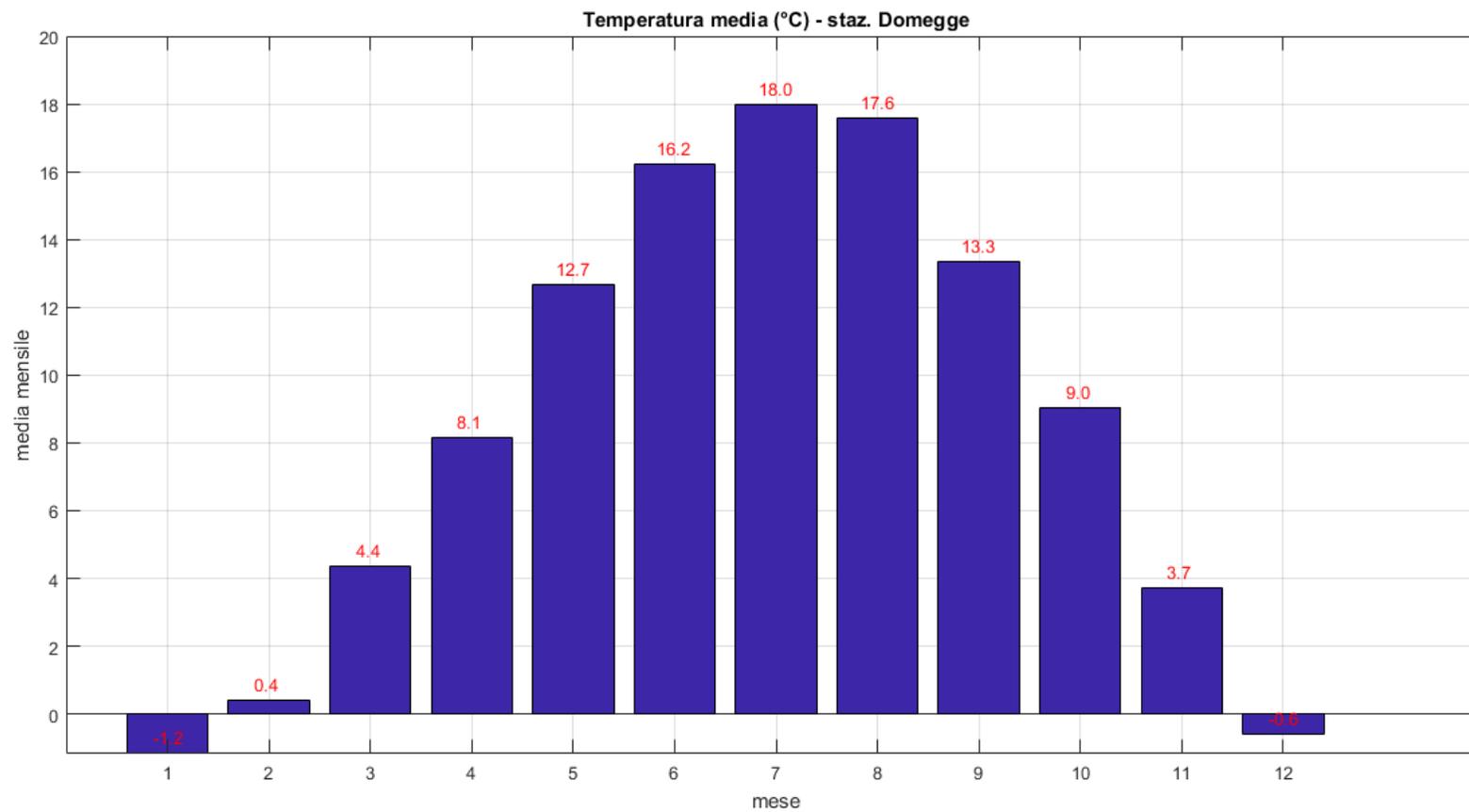


Figura 186 Andamento della variabile 'temperatura media a 2 m dal suolo mensile' (dal 1994 al 2017) nel corso dell'anno nella stazione pluviometrica di Domegge di Cadore (elaborazione dati ARPAV [3] da parte dello scrivente)

Allegato:

Interpretazione sondaggi geognostici (S1, S2, S3) riportati nella relazione “*Indagini geognostiche, geotecniche e geofisiche propedeutiche al progetto di consolidamento di versanti in frana, interventi in alveo e ripristino viabilità. Indagine geognostica. Prove di laboratorio*”, Geosondaggi S.p.a. (2003) [21].

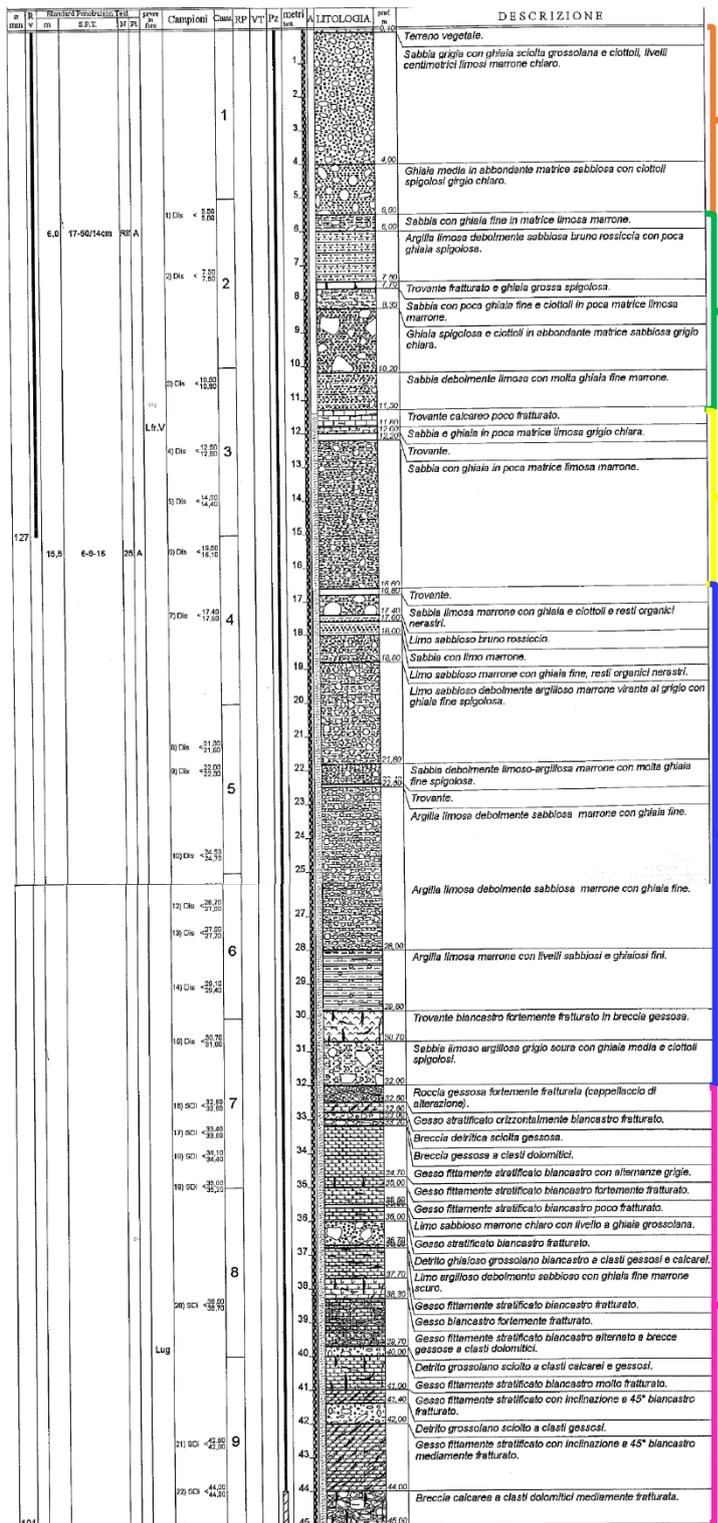


Figura 187 Stratigrafia del sondaggio S1 del settembre-ottobre 2003, realizzato da Geosondaggi S.p.a., e suddiviso in unità geologiche relativamente omogenee descritte nel testo. Sondaggio riportato nella relazione "Indagini geognostiche, geotecniche e geofisiche propedeutiche al progetto di consolidamento di versanti in frana, interventi in alveo e ripristino viabilità. Indagine geognostica. Prove di laboratorio", Geosondaggi S.p.a. (2003) [21].

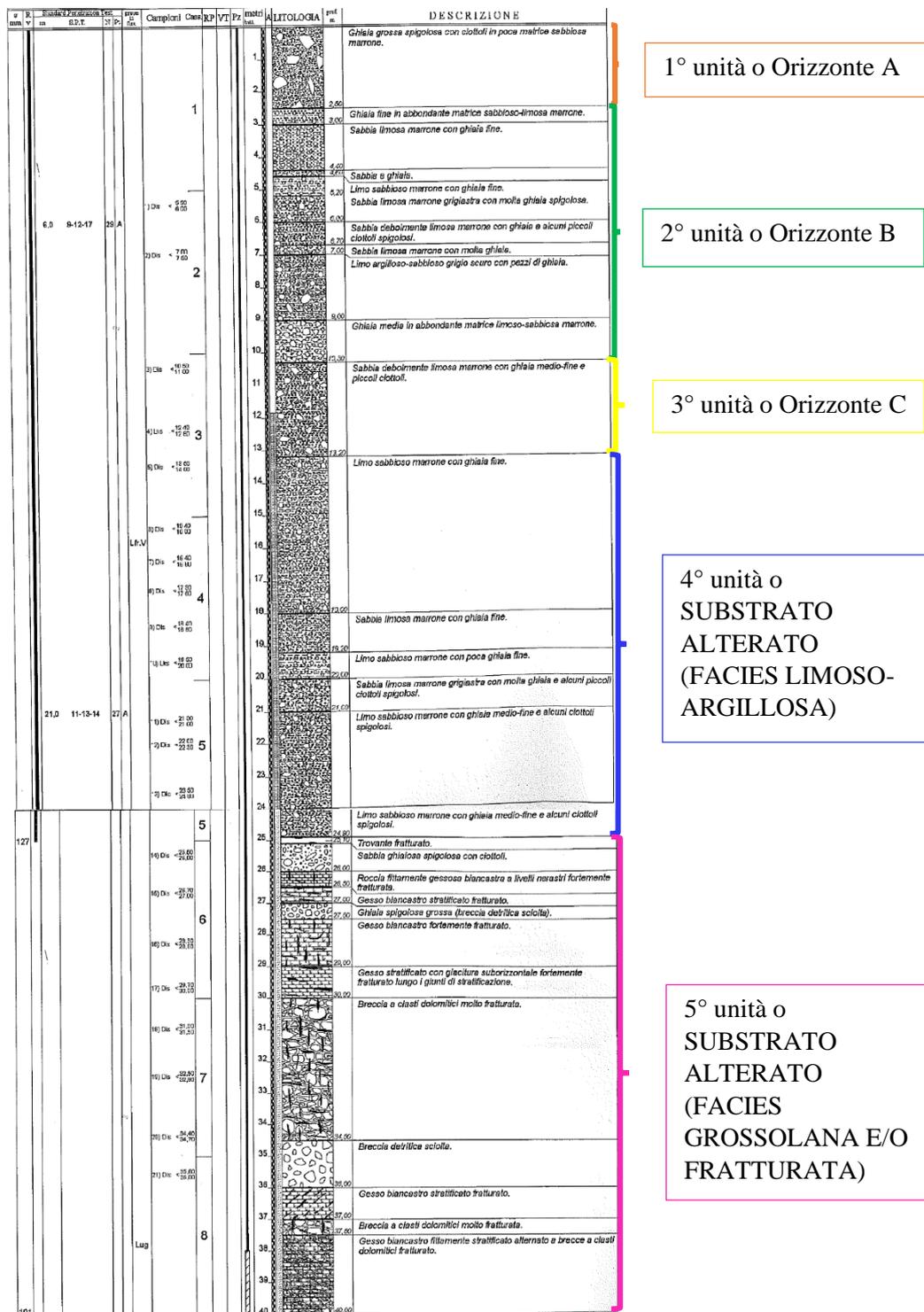


Figura 188 Stratigrafia del sondaggio S2 del settembre-ottobre 2003, realizzato da Geosondaggi S.p.a., e suddiviso in unità geologiche relativamente omogenee descritte nel testo. Sondaggio riportato nella relazione "Indagini geognostiche, geotecniche e geofisiche propedeutiche al progetto di consolidamento di versanti in frana, interventi in alveo e ripristino viabilità. Indagine geognostica. Prove di laboratorio", Geosondaggi S.p.a. (2003) [21].

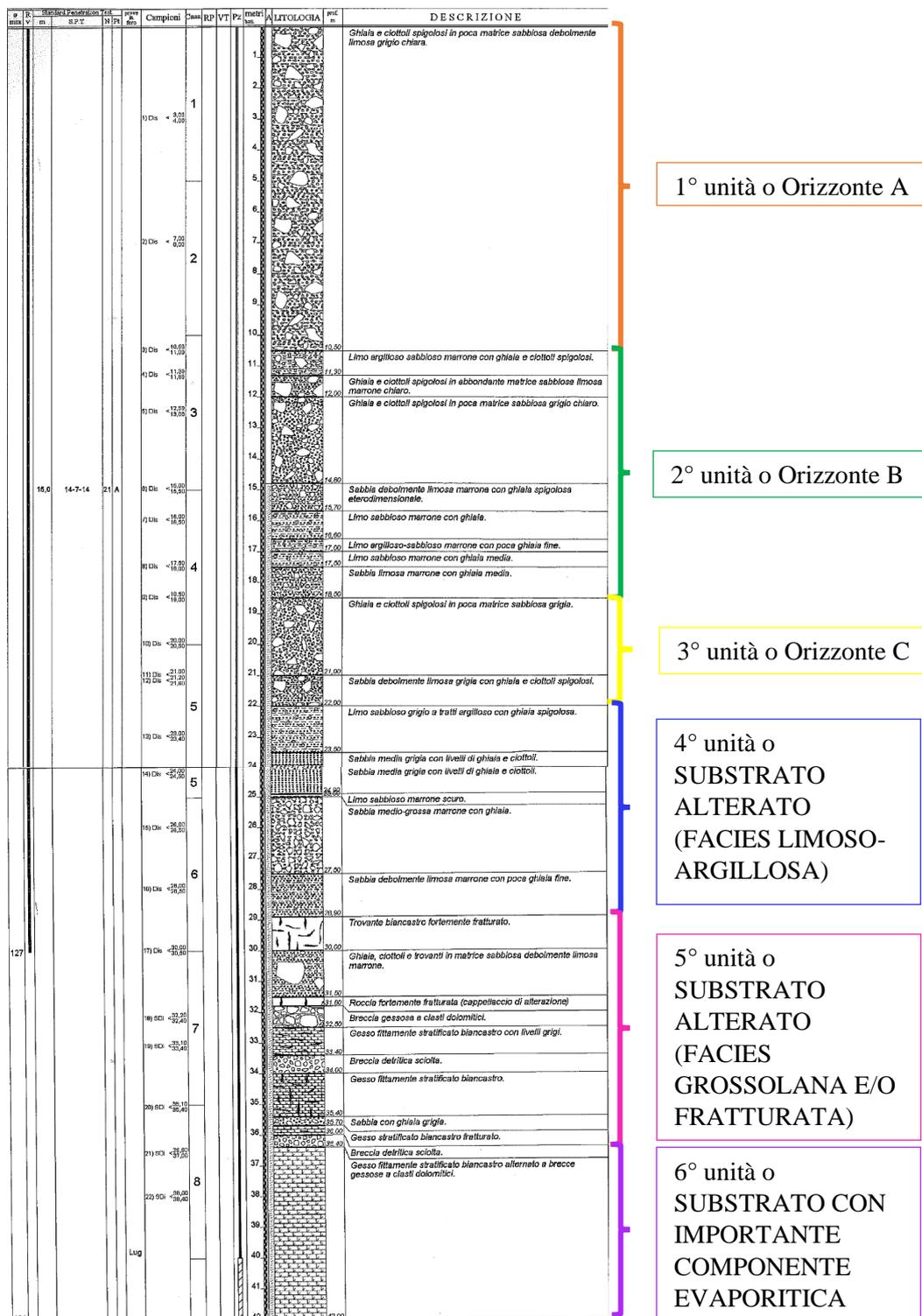
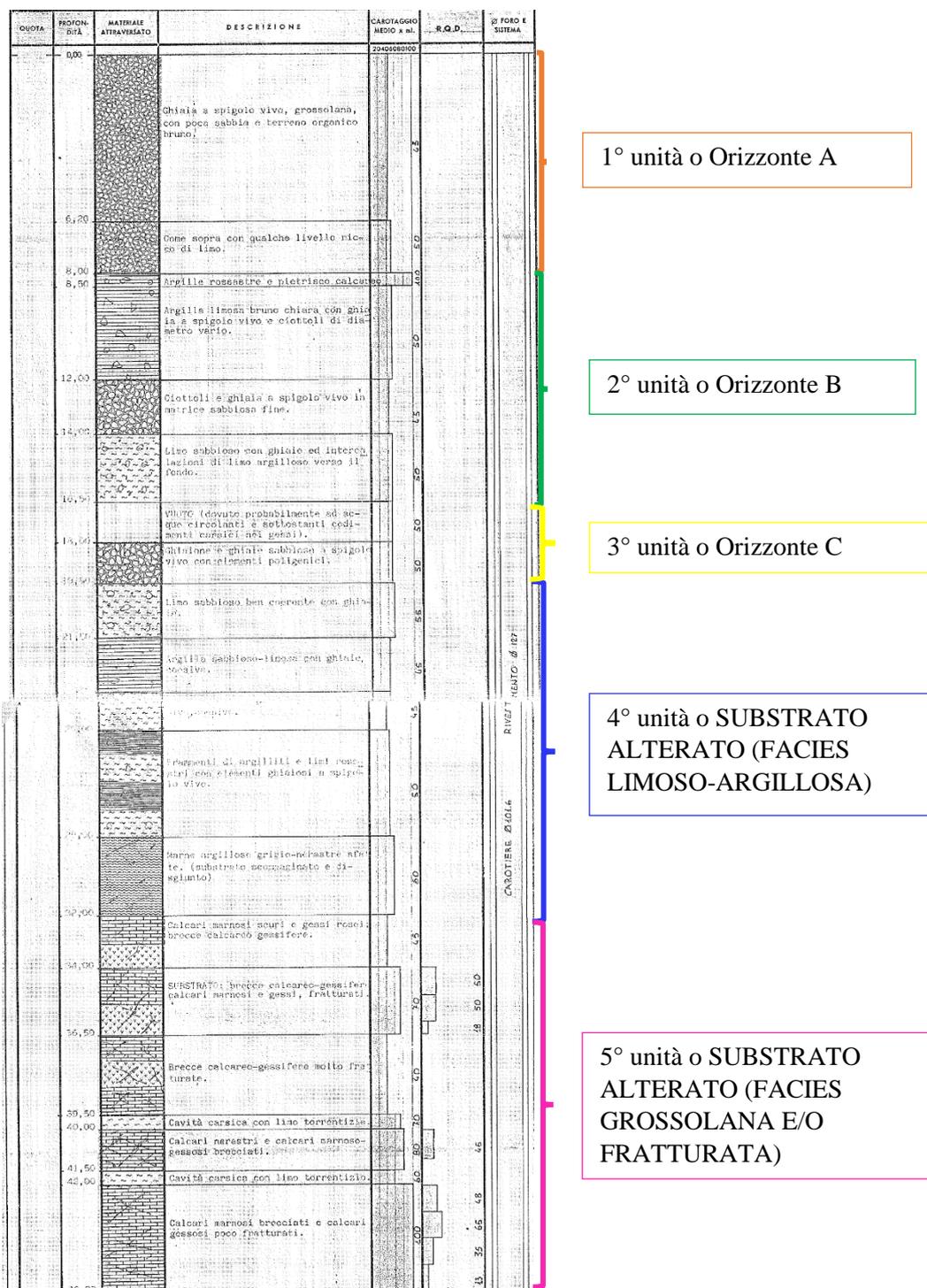


Figura 189 Stratigrafia del sondaggio S3 del settembre-ottobre 2003, realizzato da Geosondaggi S.p.a., e suddiviso in unità geologiche relativamente omogenee descritte nel testo. Sondaggio riportato nella relazione "Indagini geognostiche, geotecniche e geofisiche propedeutiche al progetto di consolidamento di versanti in frana, interventi in alveo e ripristino viabilità. Indagine geognostica. Prove di laboratorio", Geosondaggi S.p.a. (2003) [21].

Allegato:

**Interpretazione dei sondaggi geognostici riportati in allegato alla
“Relazione geologica su n. 4 sondaggi eseguiti in località Busa del Cristo
nel comune di Perarolo (Provincia di Belluno)”, geol. V. Fenti (1987)
[16].**



1° unità o Orizzonte A

2° unità o Orizzonte B

3° unità o Orizzonte C

4° unità o SUBSTRATO ALTERATO (FACIES LIMOSO-ARGILLOSA)

5° unità o SUBSTRATO ALTERATO (FACIES GROSSOLANA E/O FRATTURATA)

Figura 190 Stratigrafia del sondaggio 1 dell'agosto 1986, realizzato dall'Impresa Romolo Bardin S.p.a., e suddiviso in unità geologiche relativamente omogenee descritte nel testo. Sondaggio riportato come allegato alla "Relazione geologica su n. 4 sondaggi eseguiti in località Busa del Cristo nel comune di Perarolo (Provincia di Belluno)", geol. V. Fenti (1987) [16].

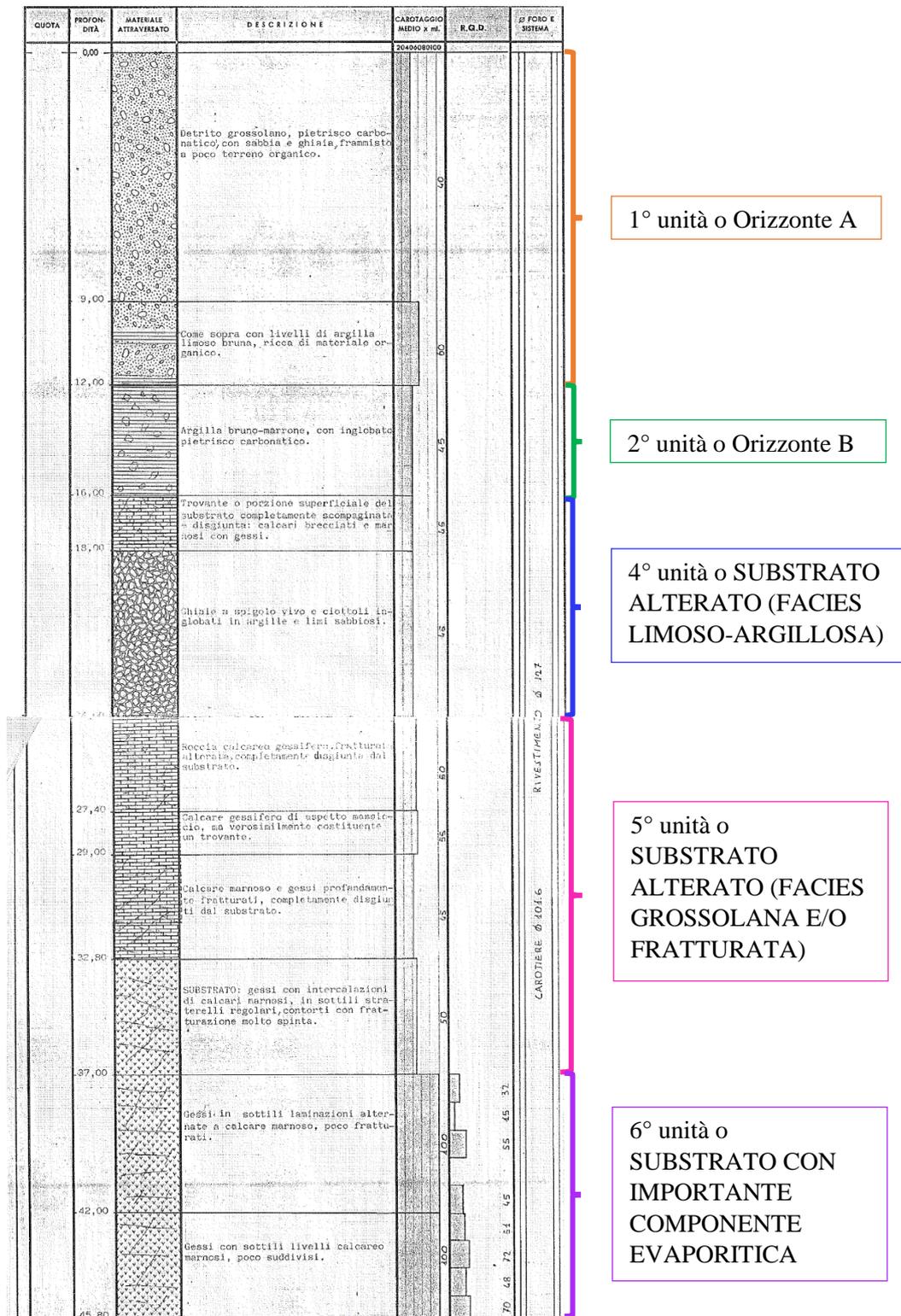


Figura 191 Stratigrafia del sondaggio 2 dell'agosto 1986, realizzato dall'Impresa Romolo Bardin S.p.a., e suddiviso in unità geologiche relativamente omogenee descritte nel testo. Sondaggio riportato come allegato alla "Relazione geologica su n. 4 sondaggi eseguiti in località Busa del Cristo nel comune di Perarolo (Provincia di Belluno)", geol. V. Fenti (1987) [16].

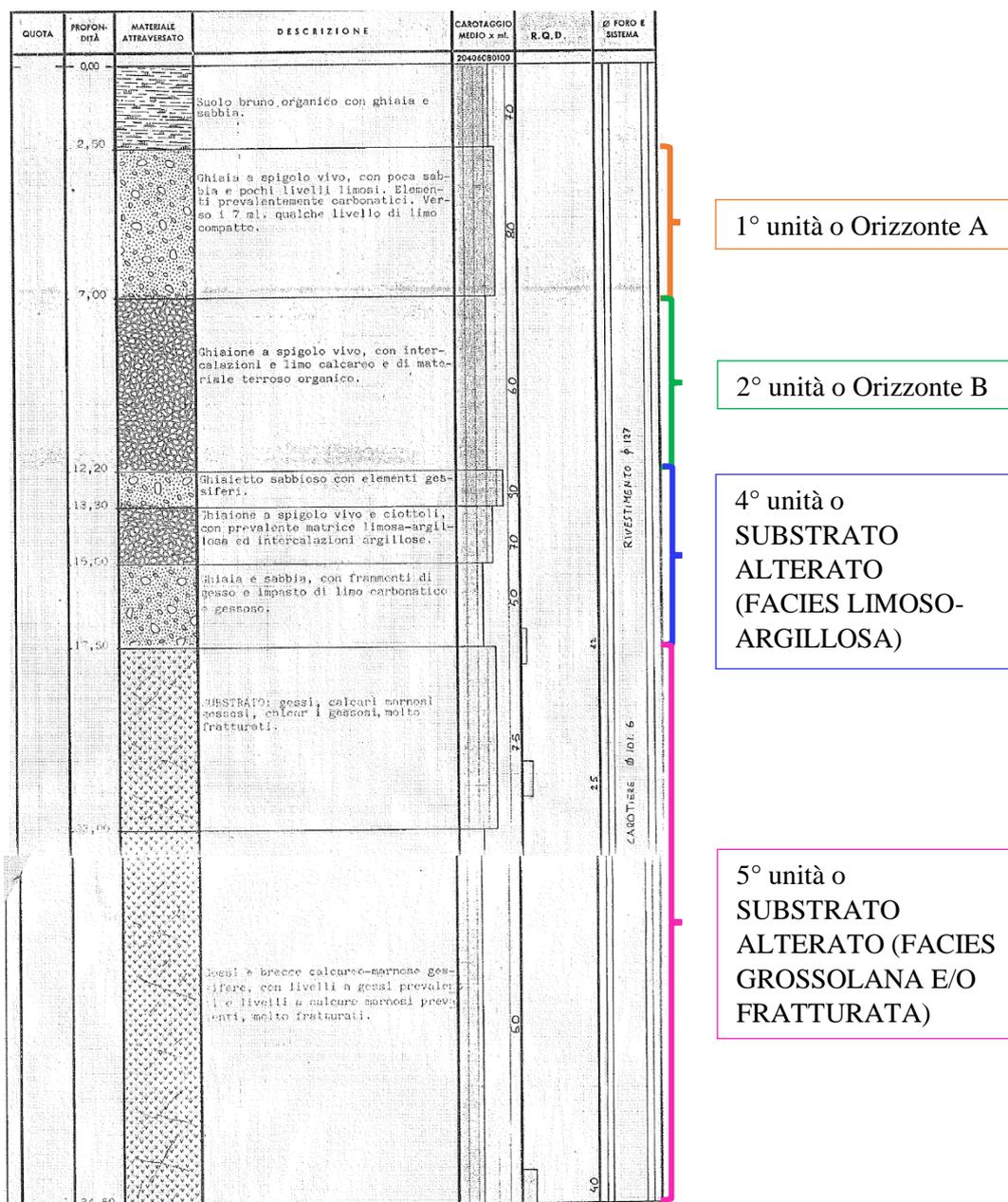
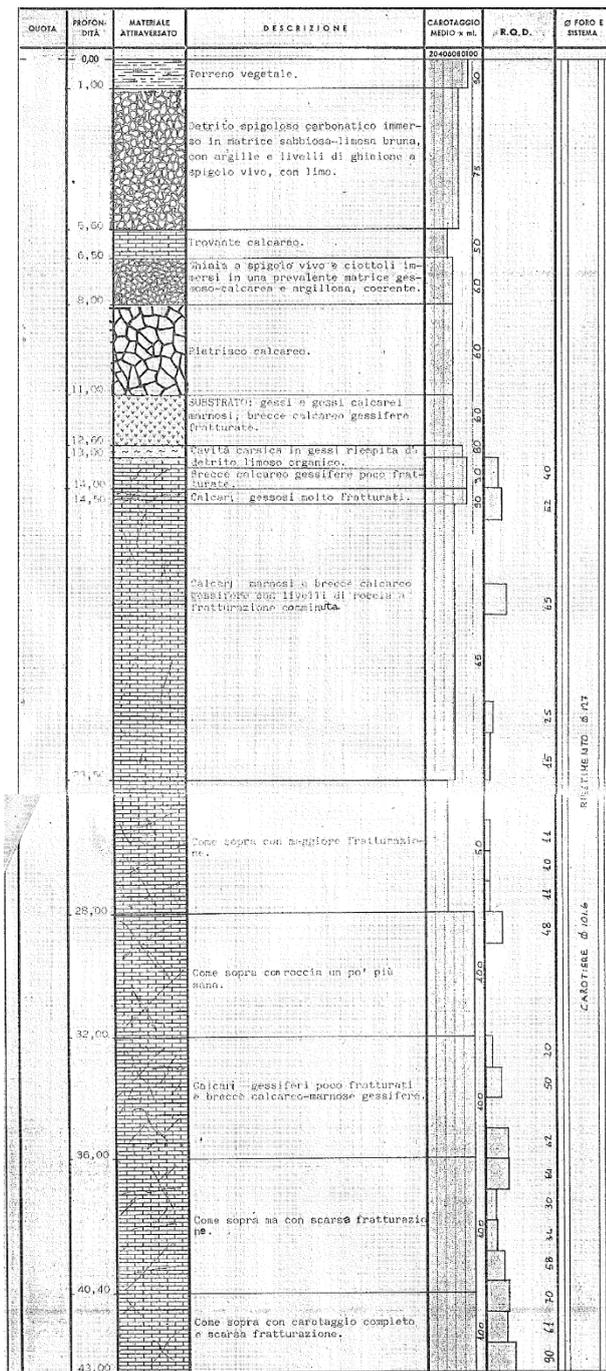


Figura 192 Stratigrafia del sondaggio 3 dell'agosto 1986, realizzato dall'Impresa Romolo Bardin S.p.a., e suddiviso in unità geologiche relativamente omogenee descritte nel testo. Sondaggio riportato come allegato alla "Relazione geologica su n. 4 sondaggi eseguiti in località Busa del Cristo nel comune di Perarolo (Provincia di Belluno)", geol. V. Fenti (1987) [16].



2° unità o Orizzonte B

4° unità o SUBSTRATO ALTERATO (FACIES LIMOSO-ARGILLOSA)

5° unità o SUBSTRATO ALTERATO (FACIES GROSSOLANA E/O FRATTURATA)

6° unità o SUBSTRATO CON IMPORTANTE COMPONENTE EVAPORITICA

Figura 193 Stratigrafia del sondaggio 4 dell'agosto 1986, realizzato dall'Impresa Romolo Bardin S.p.a., e suddiviso in unità geologiche relativamente omogenee descritte nel testo. Sondaggio riportato come allegato alla "Relazione geologica su n. 4 sondaggi eseguiti in località Busa del Cristo nel comune di Perarolo (Provincia di Belluno)", geol. V. Fenti (1987) [16].

Allegato:

Campi degli spostamenti della frana di Sant'Andrea, ottenuti dall'interpolazione dei dati registrati dalla stazione topografica totale robotizzata di Perarolo di Cadore (BL). Gli spostamenti sono calcolati sugli intervalli di tempo intercorsi tra l'aggiunta di nuove mire.

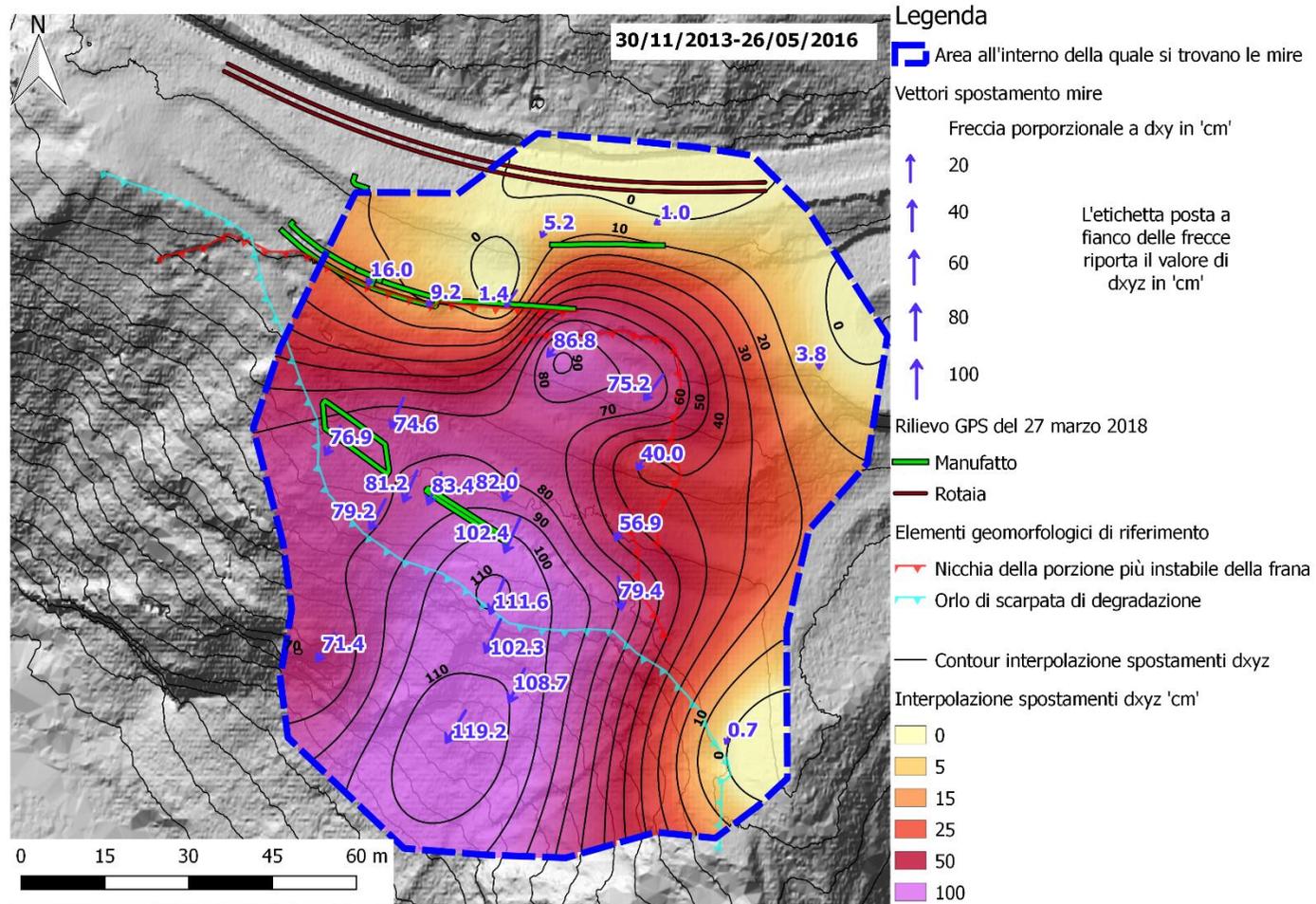


Figura 194 Campo degli spostamenti tra novembre 2013 e maggio 2016 della frana di Sant'Andrea.

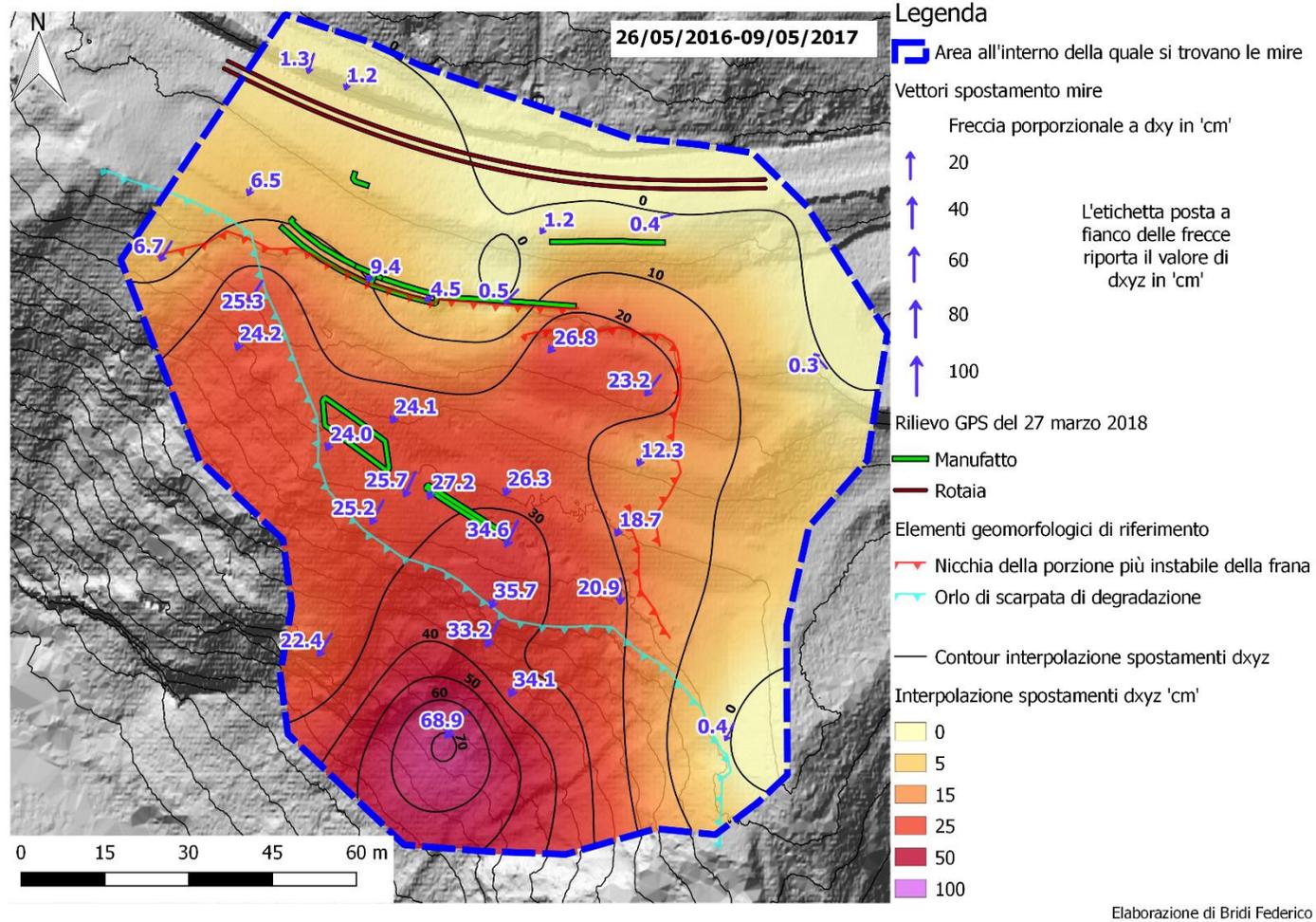


Figura 195 Campo degli spostamenti tra maggio 2016 e maggio 2017 della frana di Sant'Andrea.

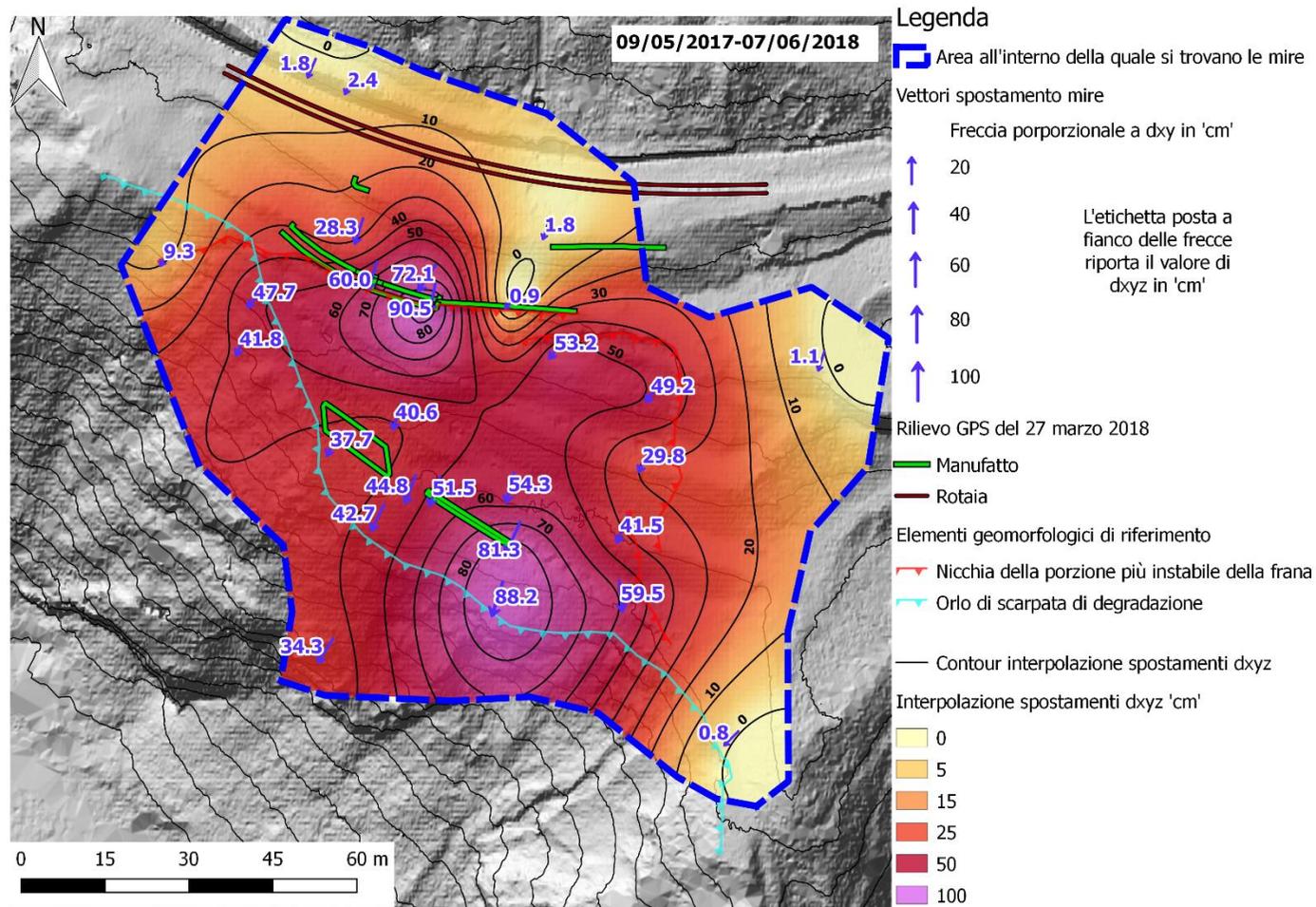


Figura 196 Campo di spostamenti tra maggio 2017 e giugno 2018 della frana di Sant'Andrea.

Allegato:

Campi degli spostamenti della frana di Sant'Andrea, ottenuti dall'interpolazione dei dati registrati dalla stazione topografica totale robotizzata di Perarolo di Cadore (BL). Gli spostamenti sono calcolati sui 6 bimestri dell'ultimo anno (ultimi 360 giorni).

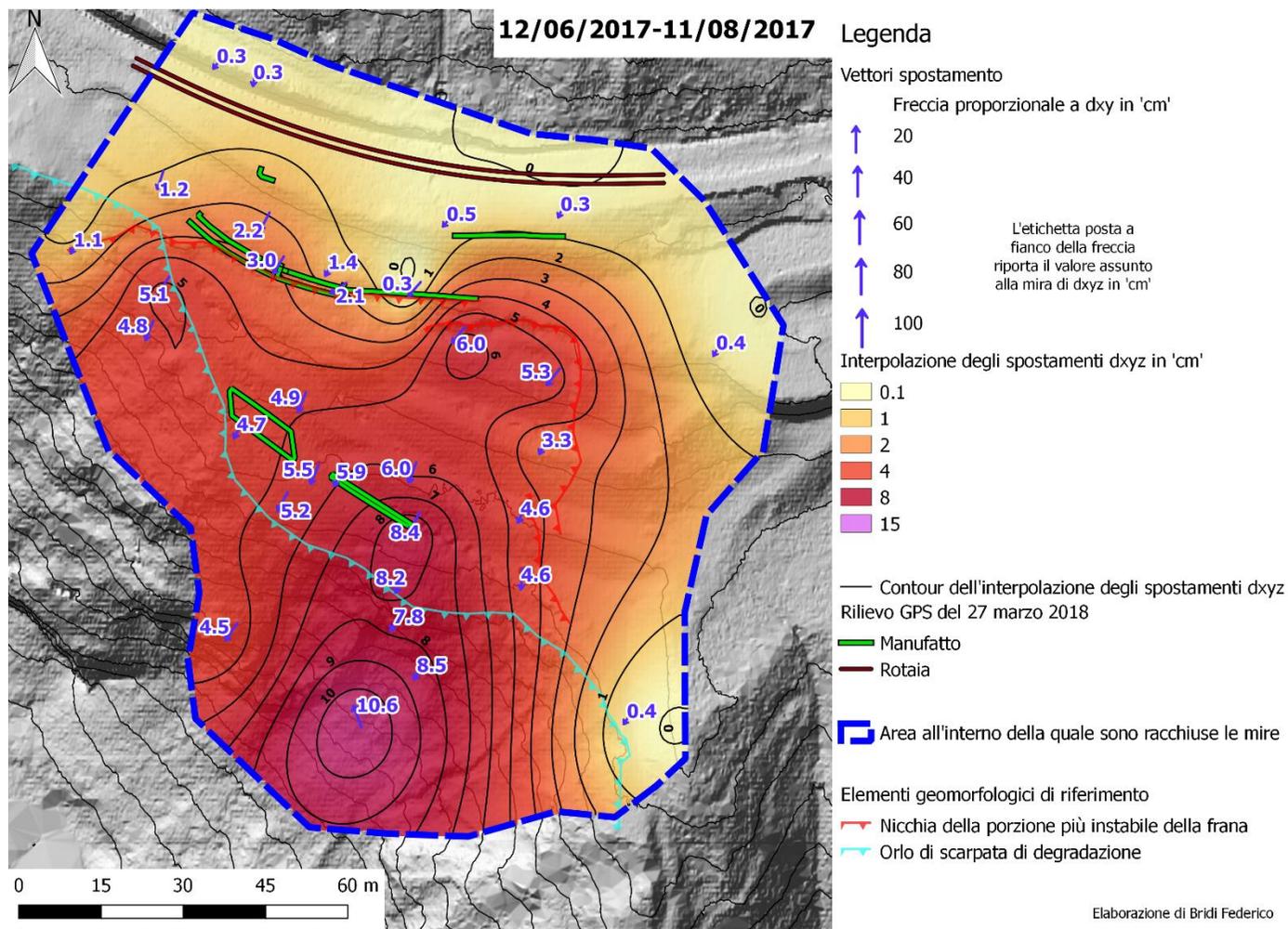


Figura 197 Campo di spostamenti nel bimestre 1 (12/06/2017-11/08/2017).

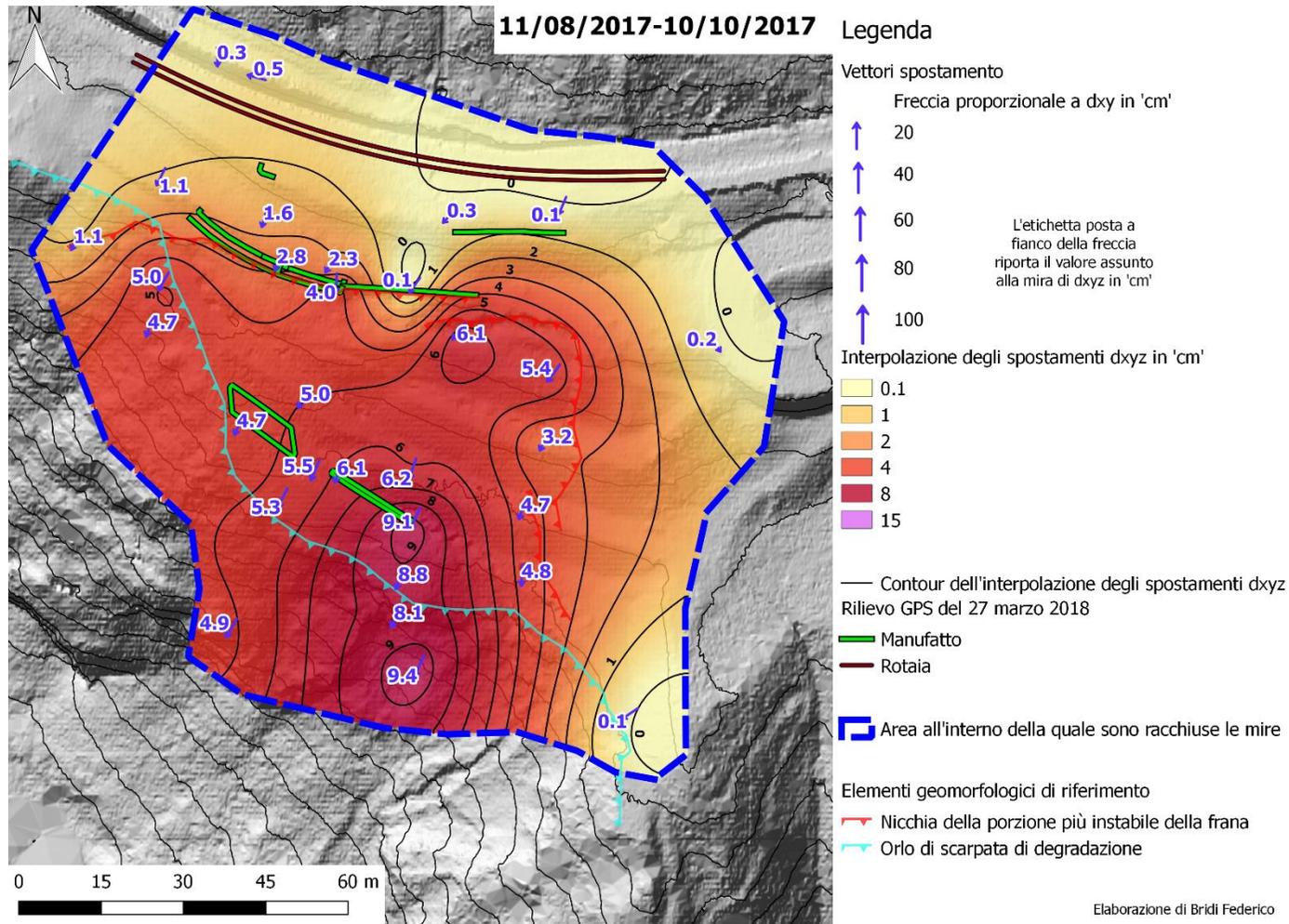


Figura 198 Campo degli spostamenti nel bimestre 2 (11/08/2017-10/10/2017).

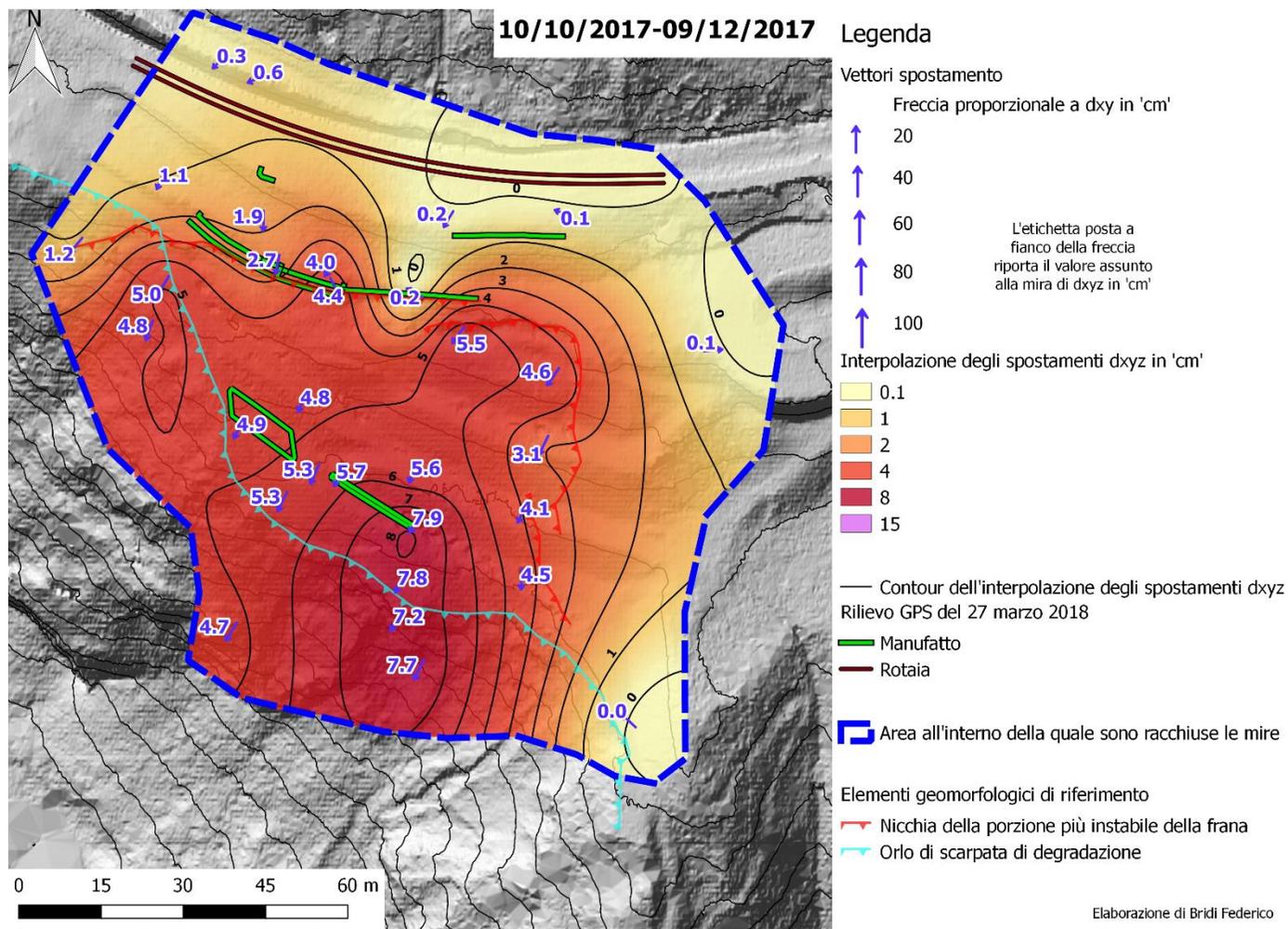


Figura 199 Campo degli spostamenti nel bimestre 3 (10/10/2017-09/12/2017).

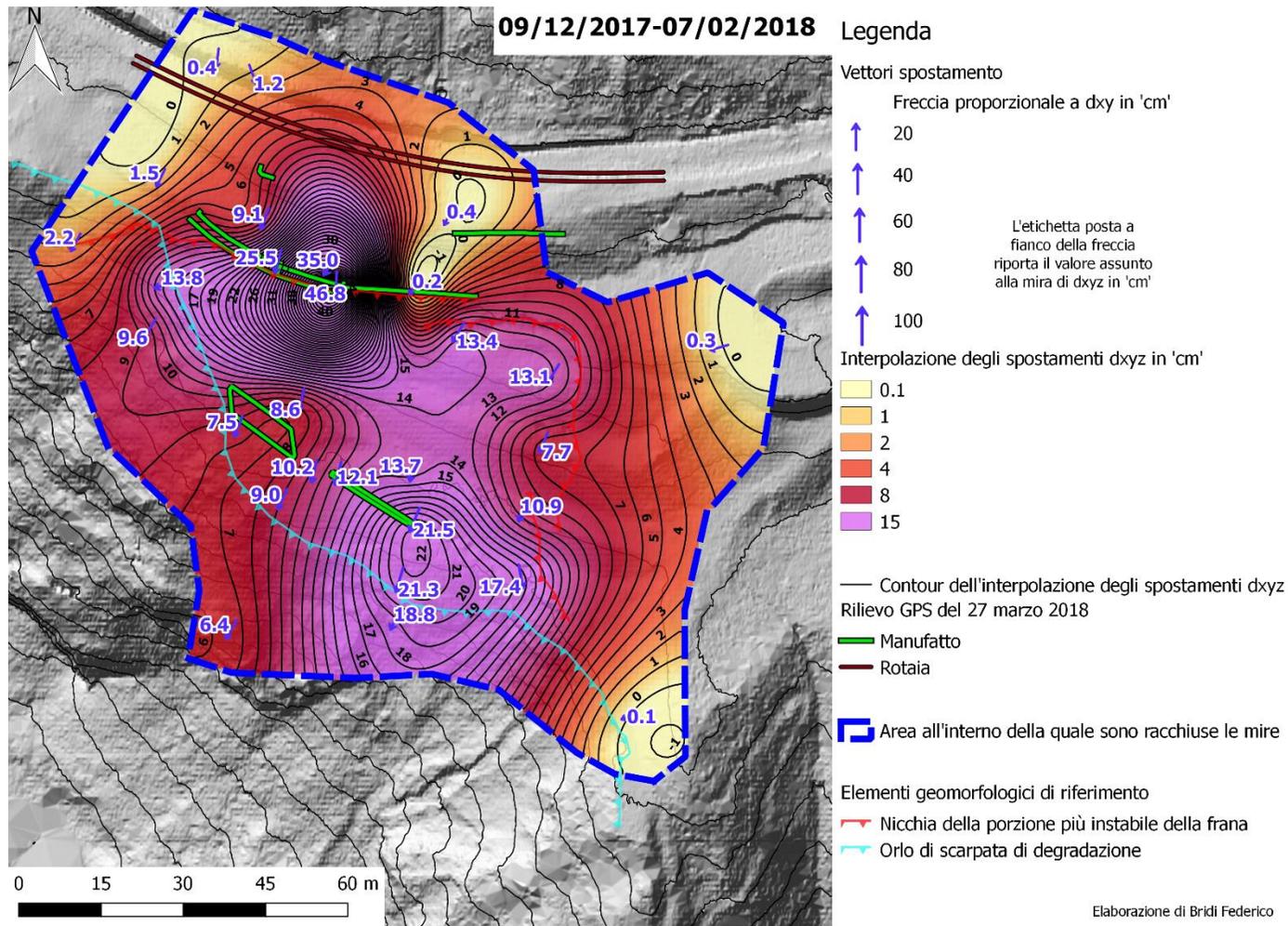


Figura 200 Campo degli spostamenti nel bimestre 4 (09/12/2017-07/02/2018).

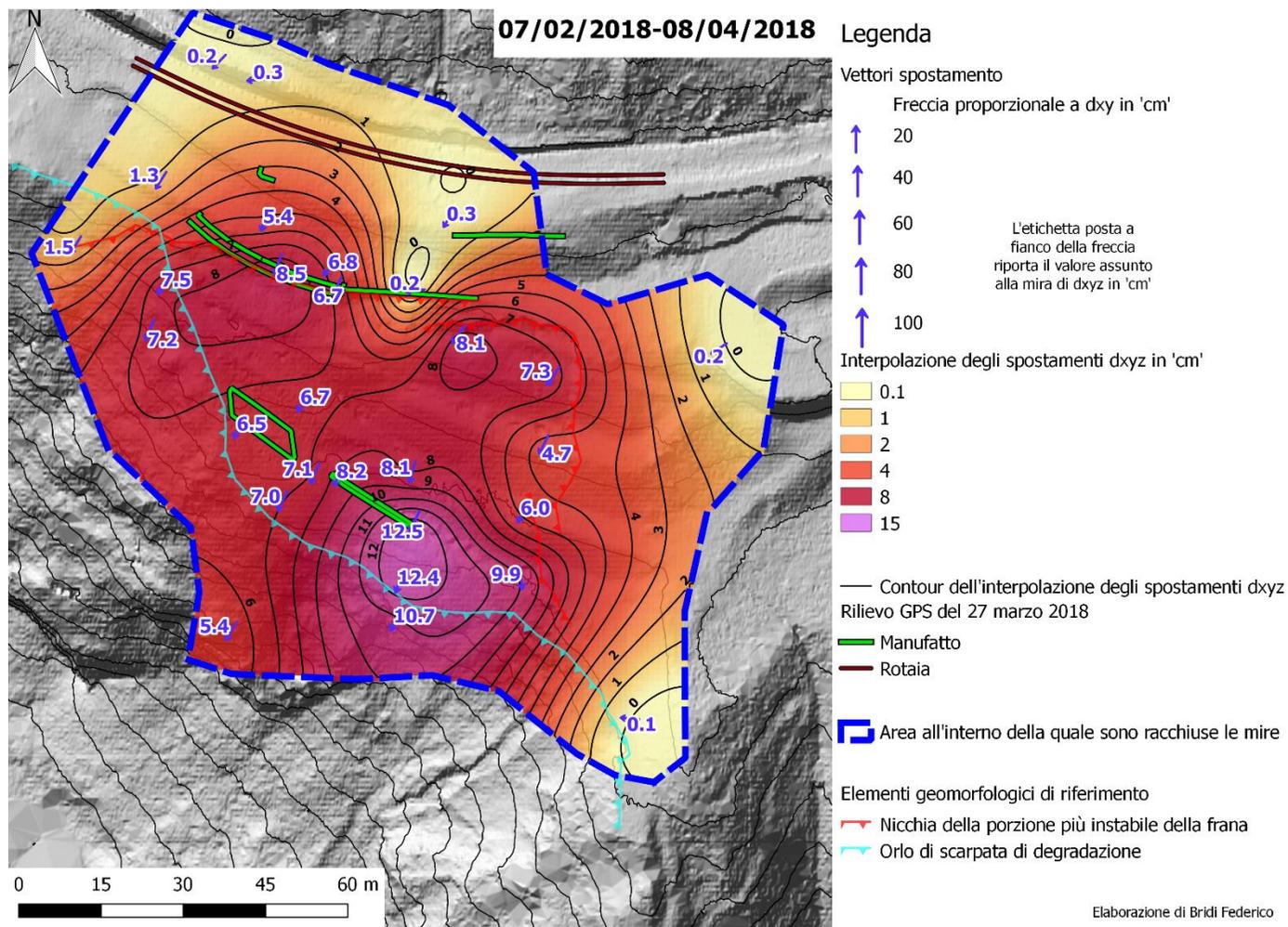


Figura 201 Campo degli spostamenti nel bimestre 5 (07/02/2018-08/04/2018).

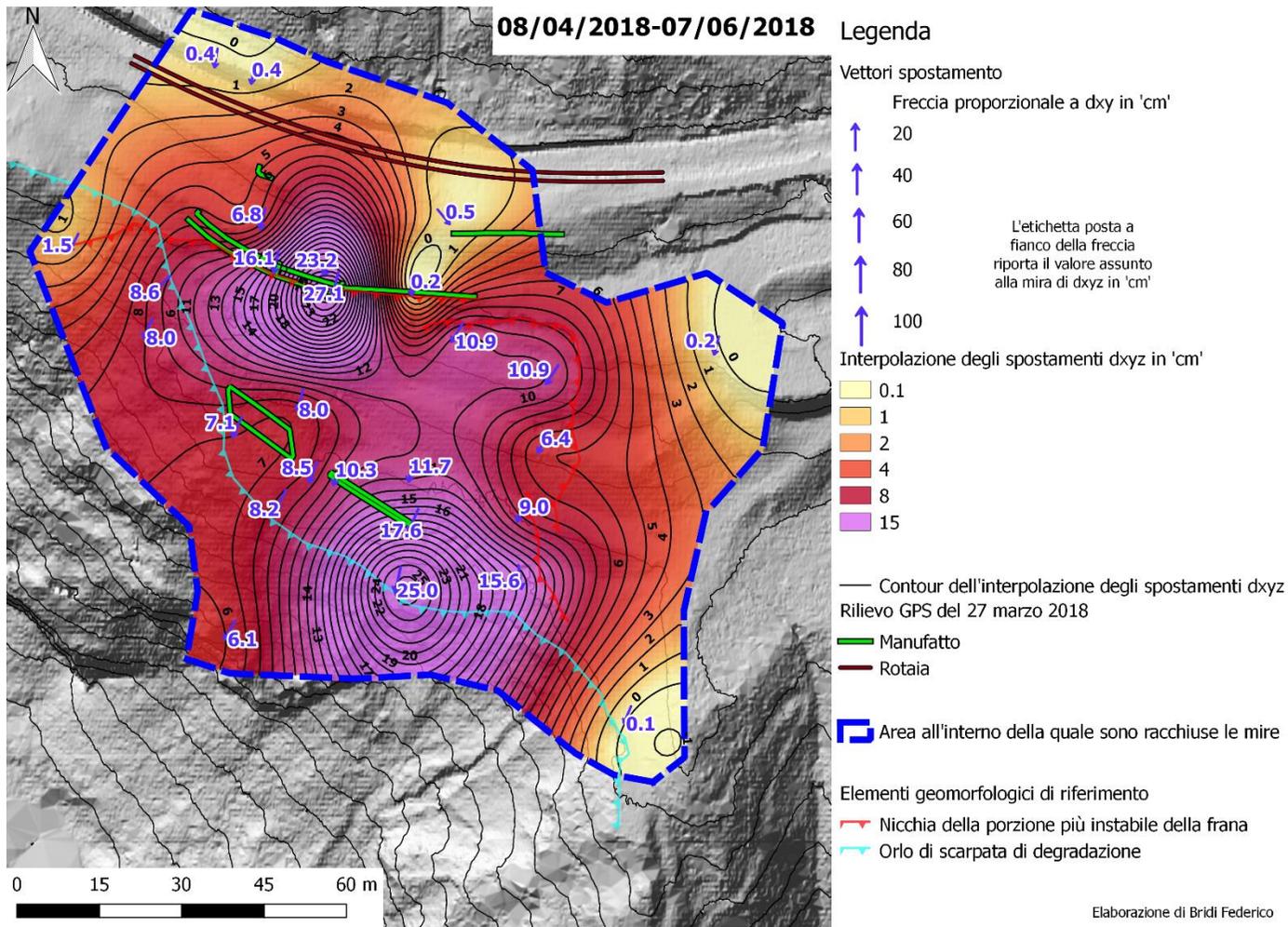


Figura 202 Campo degli spostamenti nel bimestre 6 (08/04/2018-07/06/2018).