Politecnico di Torino

Facoltà di Ingegneria

Anno accademico 2018-2019

Corso di laurea magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di laurea magistrale in

Analisi di Deformazioni Gravitative Profonde di Versante in Alta valle di Susa: la Frana del Cassas

Relatori:

Prof.ssa Ing. **Marina Pirulli**

Prof.ssa Ing. **Monica Barbero**

Prof. Ing. **Bartolomeo Vigna**

Prof. Ing. **Claudio Scavia**

Candidato:

Alex Muzio

In **collaborazione** con: **ARPA** Piemonte, **SITAF** e **Musinet** Engineering

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio la S.I.T.A.F. (Società Italiana per il Traforo Autostradale del Fréjus) & Musinet Engineering per aver acconsentito al trattamento dei dati di monitoraggio geotecnico, topografico, idrogeologico ed inclinometrico della frana del Cassas con riferimento al periodo 2012-2018.

Ringrazio l'A.R.P.A. (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale) Piemonte per aver acconsentito al trattamento dei dati di monitoraggio meteorologici, provenienti dalla stazione di Le Selle e di Salbertrand nel periodo 2014-2018, e per avermi fornito le informazioni geologico-tecniche, tratte da prove e sondaggi stratigrafici condotti nell'area in frana. Un particolare ringraziamento va al Dott. Mauro Tararbra, per la sua disponibilità nell'avermi chiarito incertezze e dubbi e per avermi fornito questi dati e informazioni necessari alla realizzazione dell'analisi svolta nel presente elaborato.

Ringrazio i miei relatori Prof.ssa M. Pirulli (D.I.S.E.G., Politecnico di Torino), Prof.ssa M. Barbero (D.I.S.E.G., Politecnico di Torino), Prof. B. Vigna (D.I.A.T.I., Politecnico di Torino) e Prof. C. Scavia (D.I.S.EG., Politecnico di Torino), per la loro disponibilità e l'aiuto fornitomi nella ricerca del materiale bibliografico inerente agli studi passati che sono stati condotti sul sito in esame, per le indicazioni guida al fine di realizzare una dettagliata ed estesa analisi dei dati di monitoraggio e per la costruzione del modello numerico. Dedico loro un'ulteriore ringraziamento riguardo alle nozioni che ho potuto acquisire dalle loro lezioni, ma soprattutto alla passione mi hanno trasmesso riguardo ai fenomeni fisici che governano la Geotecnica e interessano problematiche che sono all'ordine del giorno sul nostro territorio.

Ringrazio il Prof. Fiorucci (D.I.A.T.I., Politecnico di Torino) per avermi fornito i dati dell'analisi chimica delle acque riferiti alla galleria drenante e alle sorgenti affioranti dell'area del Cassas.

Ringrazio la mia famiglia, che mi è stata vicino durante tutto il tempo che ho dedicato al raggiungimento dei diversi obiettivi che hanno composto il mio percorso di studio, soprattutto nei momenti difficili, e alla costanza e determinazione che mi hanno insegnato ad applicare in ogni problema che devo affrontare. Ringrazio i miei amici, per il supporto che mi hanno dato nei momenti più difficili e l'entusiasmo che mi hanno trasmesso trasmesso nei momenti più felici, ma soprattutto per avermi fatto capire che è importante trovare del tempo per sé stessi e per gli altri nella vita di tutti i giorni, anche senza fare qualcosa di particolare.

PREFAZIONE

Il presente elaborato ha come obiettivo quello di comprendere le cause della frana del Cassas.

La frana del Cassas è ubicata nei pressi del comune di Salbertrand in provincia di Torino, nell'Alta Valle di Susa tra Ulzio e Chiomonte. È nato l'interesse di monitorare questa porzione di versante poiché, al piede della zona d'instabilità, sono presenti diversi elementi a rischio: partendo dalle infrastrutture presenti alla base dell'area in frana, si trova la stazione di servizio autostradale A32 Torino-Fréjus e il tratto ferroviario internazionale Torino-Modane; per quanto riguarda gli elementi ambientali a rischio, l'area in frana del Cassas fa parte del Gran Bosco di Salbertrand e, al piede dell'area in frana, scorre il fiume Dora Riparia. Questo particolare fiume riveste grande importanza anche da un punto di vista economico, poiché un suo sbarramento, a causa di uno scivolamento di materiale detritico proveniente dal versante in frana il quale si è già verificato in quella zona nel secolo scorso, potrebbe causare problemi all'impianto di produzione di energia idroelettrica situata più a valle nei pressi di Chiomonte.

La frana del Cassas interessa un'area di circa 500 000 m^2, si sviluppa su una lunghezza totale di 1800m, su un dislivello che va dai 1900m di una cresta spartiacque secondaria ai 1000m del fondovalle. Il tipo di movimento che si è registrato sull'area in frana è stato classificato come complesso ed è una manifestazione locale della Deformazione Gravitativa Profonda di Versante che caratterizza l'area oggetto di studio.

SOMMARIO

1 INTRODUZIONE 5

2 DESCRIZIONE DEL CASO DI STUDIO: LA FRANA DEL CASSAS 9

2.1 INTRODUZIONE 9
2.2 INQUADRAMENTO GENERALE 10
2.3 STORICO DEGLI EVENTI 14
2.4 ANALISI GEOMORFOLOGICA 16
2.5 DESCRIZIONE DEL SUBSTRATO ROCCIOSO DEL MATERIALE DETRITICO SOVRASTANTE 25
2.6 ANALISI STRUTTURALE DELL'AREA IN FRANA (DISCONTINUITÀ) 28
2.7 INFORMAZIONI GEOTECNICHE TRATTE DA PRECEDENTI STUDI 31
2.8 SCENARI DI PERICOLO IDENTIFICATI 35
2.9 ANALISI QUANTITATIVA DEL RISCHIO DEI MOVIMENTI 39

3 SISTEMA DI MONITORAGGIO 43

3.1 INTRODUZIONE 43
3.2 UBICAZIONE DELLA STRUMENTAZIONE 44
3.3 DESCRIZIONE DELLE STAZIONI METEOROLOGICHE DELL'A.R.P.A. PIEMONTE 47
3.4 DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE DI MONITORAGGIO S.I.T.A.F. 52
3.5 GALLERIA DRENANTE 67

4 ANALISI PRELIMINARE DEI DATI DI MONITORAGGIO 70

4.1 INTRODUZIONE 70
4.2 MOVIMENTI NEL SETTORE DI CORONAMENTO E SPERONE ROCCIOSO OCCIDENTALE 71
4.3 OSCILLAZIONI DI PORTATA E DI SOGGIACENZA DELLA FALDA 73
4.4 MOVIMENTI PROFONDI DEL CORPO FRANA 75

5 ANALISI DI DETTAGLIO DEI DATI DI MONITORAGGIO 77

5.1 INTRODUZIONE 77
5.2 ANALISI DEI DATI METEOROLOGICI 78
5.3 CORRELAZIONE TRA DATI METEOROLOGICI E DATI IDROGEOLOGICI 82
5.4 ANALISI DEI DATI INCLINOMETRICI 88
5.5 CORRELAZIONE TRA DATI INCLINOMETRICI E DATI IDROGEOLOGICI 96
5.6 CORRELAZIONE DI DATI METEOROLOGICI-IDROGEOLOGICI CON LA CONDUCIBILITÀ ELETTRICA E LA TEMPERATURA DELLE ACQUE ... 109
5.7 ANALISI CHIMICA DELLE ACQUE DELLE SORGENTI 113
5.8 PRESENZA DEI SOLFATI 116

6 MODELLAZIONE NUMERICA 117

6.1 INTRODUZIONE 117
6.2 ESTRAZIONE DELLA SUPERFICIE TOPOGRAFICA 118
6.3 RICOSTRUZIONE DELLA SEZIONE GEOLOGICO-TECNICA 120
6.4 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEL MATERIALE DETRITICO 128
6.5 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DELL'AMMASSO ROCCIOSO 132
6.6 SCELTA DEL METODO DI ANALISI E REALIZZAZIONE DEL MODELLO 137
6.7 BACK ANALYSIS E EFFETTO DI INNALZAMENTO DELLA FALDA 143

7 CONCLUSIONI 154

8 ALLEGATI 157

8.1 ALLEGATO I: ANALISI DEI DATI METEOROLOGICI 157
8.2 ALLEGATO II: CORRELAZIONE TRA DATI METEOROLOGICI E IDROGEOLOGICI 167

8.3 ALLEGATO III: ANALISI DEI DATI INCLINOMETRICI 201
8.4 ALLEGATO IV: CORRELAZIONE TRA DATI INCLINOMETRICI E IDROGEOLOGICI 235
8.5 ALLEGATO V: CORRELAZIONE TRA DATI METEOROLOGICI-IDROGEOLOGICI CON LA CONDUCIBILITÀ ELETTRICA SPECIFICA E LA TEMPERATURA DELLE ACQUE 250
8.6 ALLEGATO VI: DATI PROVE SPT 258
8.7 ALLEGATO VII: DETERMINAZIONE PARAMETRI GEOTECNICI DA PROVE NSPT 263

9 RIFERIMENTI E FONTI 267

9.1 INDICE DELLE FIGURE 267
9.2 INDICE DELLE TABELLE 270
9.3 INDICE DEI GRAFICI 272
9.4 BIBLIOGRAFIA 278
9.5 SITOGRAFIA 282
9.6 DATI FORNITI DAL D.I.A.T.I. DEL POLITECNICO DI TORINO 282
9.7 MATERIALE DIDATTICO UTILIZZATO 282
9.8 DATI FORNITI DALL'A.R.P.A. PIEMONTE 282
9.9 REPORT S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING FORNITI 284

CAPITOLO 1

1 Introduzione

Il termine frana indica il movimento di una massa di terreno o di un ammasso roccioso, caratterizzato da spostamenti verso l'esterno del versante stesso. La massa coinvolta nel movimento costituisce il corpo di frana ed è circoscritta dalla superficie topografica del versante e dalla superficie di scivolamento o superficie di distacco (Lancellotta, 2012).

Le frane possono essere classificate in vari modi, ad esempio in base allo stato di attività, al volume di massa spostata (Fell, 1994), alla velocità di movimento (Cruden & Varnes, 1996) e alla combinazione tra il tipo di materiale coinvolto e il tipo di movimento (Varnes, 1978).

Soffermandoci sulla classificazione dei fenomeni franosi in base al tipo di movimento si posso avere: crolli (falls), ribaltamenti (topples), scorrimenti o scivolamenti (slide), espandimenti (spreading), colate o flussi (flows) e movimenti complessi. È importante tener presente che un tipo di movimento può evolvere, durante la propagazione, in un altro tipo di movimento (Materiale didattico del corso di stabilità dei Pendii, Pirulli M., 2018).

Nel caso di terreni, la massa in movimento mantiene contatto con il terreno sottostante e si parla quindi di scivolamento mentre nel caso di ammassi rocciosi, quando si perde tale contatto, si parla di frane per crollo o ribaltamento. Nelle frane per espansione laterale il movimento è prevalentemente orizzontale e non si identifica né una superficie di scorrimento né una zona di deformazioni plastiche ben definita. I movimenti che presentano caratteristiche di un flusso vengono solitamente indicati come debris flow, se nel moto sono coinvolti materiali a grana grossa, o come mud flow, se sono coinvolti prevalentemente materiali a grana fine. I movimenti complessi possono essere generati dalla combinazione di due o più tipologie di movimento.

Il caso oggetto di studio è un fenomeno franoso il cui movimento è classificabile come complesso; questo movimento si può interpretare come un effetto o una manifestazione locale della Deformazione Gravitativa Profonda di Versante (DGPV) che caratterizza l'area oggetto di studio. Le DGPV sono fenomeni che si manifestano attraverso lenti e continui meccanismi deformativi dell'ammasso roccioso a carico di estese e profonde porzioni di versante; sono presenti in tutte le

principali unità cristalline dell'arco alpino occidentale, ma si sviluppano prevalentemente nei litotipi con importanti discontinuità litologiche e strutturali (Materiale didattico del corso di Stabilità dei Pendii, Pirulli M., 2018).

I fenomeni di instabilità dei pendii naturali possono essere dedotti da forze gravitazionali, da precipitazioni meteoriche, da azioni sismiche e da erosione, talora in combinazione con processi di decadimento della resistenza a taglio. Tutte le menzionate cause possono essere ovviamente concomitanti, ma anche quando l'instabilità sia apparentemente prodotta da una sola causa, l'analisi di un pendio richiede molte informazioni, da acquisire tramite indagini che riguardano diverse scale di osservazione (Lancellotta, 2012). Infatti, i pendii naturali sono di norma caratterizzati da una morfologia superficiale e profonda complessa e da una grande variabilità spaziale delle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni; ne consegue quindi che le indagini geologiche, idrogeologiche e geotecniche, la cui estensione ed approfondimento devono essere commisurati, in termini anche economici, all'importanza, alle finalità, all'estensione ed alla gravità del problema di studio e alla fase di progettazione, possono solo fornire un quadro approssimato e parziale della realtà fisica (Materiale didattico del corso di Stabilità dei Pendii, Pirulli M., 2018).

Le fasi fondamentali dello studio dei fenomeni d'instabilità riguardano anzitutto la raccolta di dati storici. Attraverso uno studio geologico, effettuato su una scala più ampia dell'area in esame è possibile ricostruire le vicissitudini tettoniche che hanno determinato i caratteri strutturali delle formazioni a piccola e a grande scala. Lo studio geomorfologico aiuterà ad individuare il corpo frana e i processi evolutivi in atto. Sulla scorta di queste osservazioni si distinguono le paleofrane, ossia i movimenti che si sono sviluppati in condizioni ambientali diverse da quelle attuali, dalle frane quiescenti, sviluppatesi in condizioni morfologiche e climatiche simili a quelle attuali (Lancellotta, 2012). Per quanto riguarda il caso in esame della Frana del Cassas, tali informazioni sono state dedotte sulla base di studi pregressi e sono state riportate all'interno del *capitolo 2*, il quale darà una completa descrizione della frana del Cassas, riportando un inquadramento generale dell'area instabile, una ricostruzione dei principali movimenti che hanno interessato il pendio nei secoli precedenti con indicazione della posizione delle superfici di scivolamento profonde, una descrizione geologica e geomorfologica e geotecnica del substrato roccioso e del materiale detritico sovrastante e infine un'analisi quantitativa del rischio.

È noto che i pendii naturali sono caratterizzati da modesti margini di sicurezza e i materiali coinvolti nei processi d'instabilità presentano caratteri di eterogeneità e complessità non comune. Per questo motivo, il monitoraggio gioca un ruolo essenziale, sia per comprendere la natura del fenomeno, sia per validare gli interventi di stabilizzazione. In tale ottica, un primo passo consiste nella misura delle pressioni interstiziali muovendo dalla considerazione che tali misure consentono sia la definizione delle condizioni di falda che la sua evoluzione nel tempo; alla misura delle pressioni interstiziali va associata quella degli spostamenti, che rappresentano un elemento essenziale per la definizione delle caratteristiche geometriche e cinematiche del corpo frana (Lancellotta, 2012). Per quanto riguarda il caso in esame della frana del Cassas, è stato dedicato un ampio spazio alla presentazione e all'analisi dei dati di monitoraggio: in particolare, il *capitolo 3* è dedicato alla presentazione del sistema di monitoraggio presente nell'area in frana del Cassas, il *capitolo 4* è dedicato ad una sintesi dei risultati tratti dall'analisi dei dati di monitoraggio nel periodo 2012-2018 con l'obiettivo principale di fornire al lettore indicazioni sulla posizione della falda e delle superfici di scivolamento e, infine, il *capitolo 5*, è dedicato ad un'analisi di dettaglio di questi dati dove, mediante ausilio di grafici e tabelle riassuntive, vengono fatte tutta una serie di correlazioni tra dati meteorologici, idrogeologici, inclinometrici e di chimica delle acque, al fine di comprendere le cause scatenanti del movimento del versante in profondità.

Lo studio geotecnico sarà finalizzato a definire il profilo stratigrafico di dettaglio, le proprietà fisico-meccaniche dei principali tipi di terreno, la posizione e le caratteristiche delle falde idriche e consentirà quindi di accertare le condizioni di stabilità del pendio (Lancellotta, 2012). Nel caso in esame, la caratterizzazione geotecnica dei materiali costituenti il versante è iniziata riportando informazioni, tratte da studi passati sull'area in esame, all'interno del *capitolo 2*, con lo scopo di fornire una prima introduzione e descrizione, anche in ambito geotecnico, del caso di studio; la completa caratterizzazione è stata poi riportata nel dettaglio all'interno del *capitolo 6* inserendo, oltre alle informazioni tratte da studi passati presenti nel *capitolo 2*, anche i risultati di prove e sondaggi. Ciò è stato fatto poiché essa è stata utilizzata principalmente per la realizzazione del modello geotecnico descritto all'interno del *capitolo 6*; essa infatti costituisce uno dei diversi step che si sono seguiti per la realizzazione del modello geotecnico di una generica sezione di studio, volto a valutare il margine di sicurezza globale nei confronti dell'instabilità del versante al variare della posizione della falda.

Nel *capitolo 7* verranno riportate le conclusioni che si sono potute trarre dai capitoli precedenti: in particolare, verranno riportate le conclusioni sulle cause predisponenti e scatenanti del movimento in profondità e verrà descritto cosa provoca l'effetto di innalzamento della falda, sia sull'andamento degli spostamenti che sul margine di sicurezza globale nei confronti dell'instabilità del pendio.

CAPITOLO 2

2 Descrizione del caso di studio: la Frana del Cassas

2.1 Introduzione

Il presente capitolo ha la funzione di fornire le principali informazioni necessarie a descrivere il caso di studio. Verrà quindi fornito un inquadramento generale dell'ubicazione della frana e della sua estensione areale e volumetrica al *capitolo 2.2*, uno storico degli eventi che hanno interessato l'area in frana nei secoli precedenti in particolare con riferimento alla fase parossistica degli anni '60 al *capitolo 2.3*, un'analisi geomorfologica con indicazioni della posizione delle scarpate principali e secondarie al *capitolo 2.4*, una descrizione del substrato roccioso e del materiale detritico sovrastante al *capitolo 2.5*, un'analisi strutturale volta ad individuare la posizione e l'orientazione delle principali famiglie di discontinuità al *capitolo 2.6*, informazioni geotecniche tratte da precedenti studi al *capitolo 2.7*, l'individuazione dei principali scenari di pericolo al *capitolo 2.8* e un'analisi quantitativa del rischio al *capitolo 2.9*.

2.2 Inquadramento generale

La frana del Cassas si trova nell'Alta Valle di Susa vicino al comune di Salbertrand, tra Ulzio e Chiomonte. In *figura 2.1* è possibile vedere la posizione della Frana del Cassas all'interno della Val di Susa.

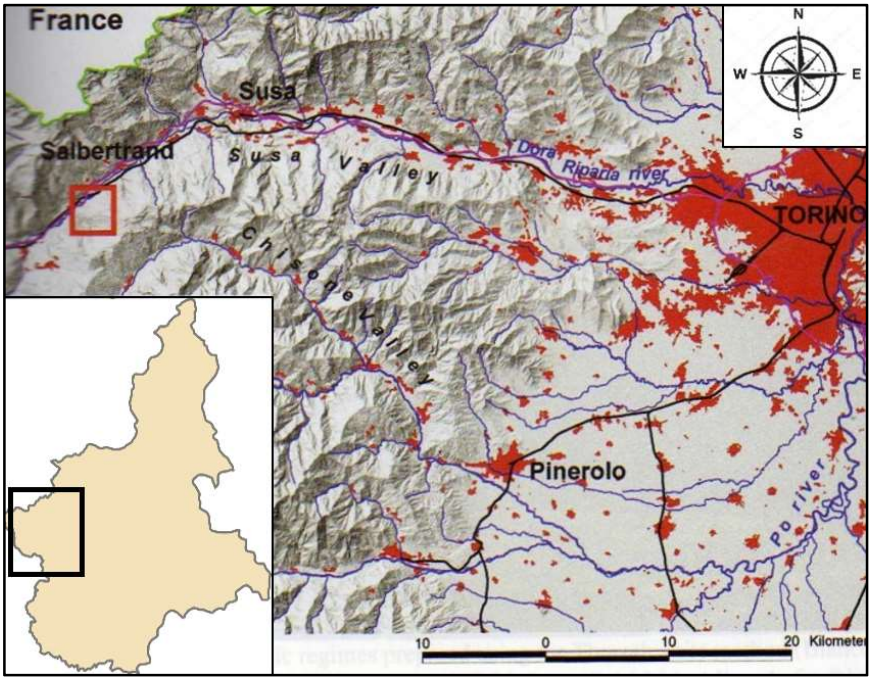


FIGURA 2.1-UBICAZIONE AREA IN FRANA PERIMETRATA CON UN RETTANGOLO ROSSO

La frana in esame, è stata ricercata all'interno del catalogo I.F.F.I. (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) presente all'interno del sito dell'Isprambiente (http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/suolo-e-territorio-1/iffi-inventario-dei-fenomeni-franosi-in-italia). Essa ha codice 001-00870-02 e, in *tabella 2.1,* sono sintetizzate le caratteristiche principali di tale frana.

TABELLA 2.1-CARATTERISTICHE FRANA CASSAS (I.S.P.R.A., 2016)

IDFrana	001 00870 002
Regione	Piemonte
Provincia	Torino
Comune	Salbertrand
Autorità di distretto	Po

Tipo di movimento	Complesso
Attività	Attivo/riattivato/sospeso
Litologia	r. metamorfiche a fogliazione pervasiva
Uso del suolo	/
Metodo usato per la valutazione del movimento e dell'attività	Dato storico/ archivio, Fotointerpretazione
Danno	n.d.
Area della frana (m2)	512061
Data evento (gg/mm/aaaa)	1954--, 1955-10, 1957-06-13
Causa	Materiale fratturato, orientazione sfavorevole discontinuità secondarie, precipitazioni eccezionali prolungate
Interventi	Reti, rilevati paramassi

In *figura 2.2* è rappresentata l'area della frana del Cassas. È stata perimetrata l'area in frana e, il tipo di movimento, è stato classificato come complesso, in quanto mostra cinematismi legati al ribaltamento, al crollo, allo scorrimento ed al colamento di detrito. Sul lato orientale del Cassas è presente un altro movimento complesso denominato "Testa di Mottas" e, sul versante opposto, è presente il movimento complesso di "Serre La Voute". Questi movimenti complessi sono le manifestazioni locali delle deformazioni gravitative profonde di versante che caratterizzano l'area in esame.

Il movimento ripetuto del versante in località Cassas, in concomitanza con il movimento denominato "Testa del Mottas" e di quello sul versante opposto di "Serre la Voute", hanno determinato più volte sbarramenti della Dora Riparia con formazione di temporanei bacini lacustri. Esso è stato definito generalmente lento (velocità dell'ordine del cm/anno) con temporanee accelerazioni (fino a m/sec) in fasi parossistiche durante le quali grandi volumi di roccia e di detrito si muovono verso valle, secondo differenti meccanismi di crollo, di scivolamento e di colata (Brovero et al., 1996a; Forlati et al., 2004; Morelli et al., 2005).

Al piede di questi movimenti complessi è possibile individuare una serie di elementi a rischio di importanza internazionale quali: l'autostrada A32 Torino-Frejus con annessa stazione di servizio, il tratto internazionale ferroviario Torino-Modane e il fiume Dora Riparia.

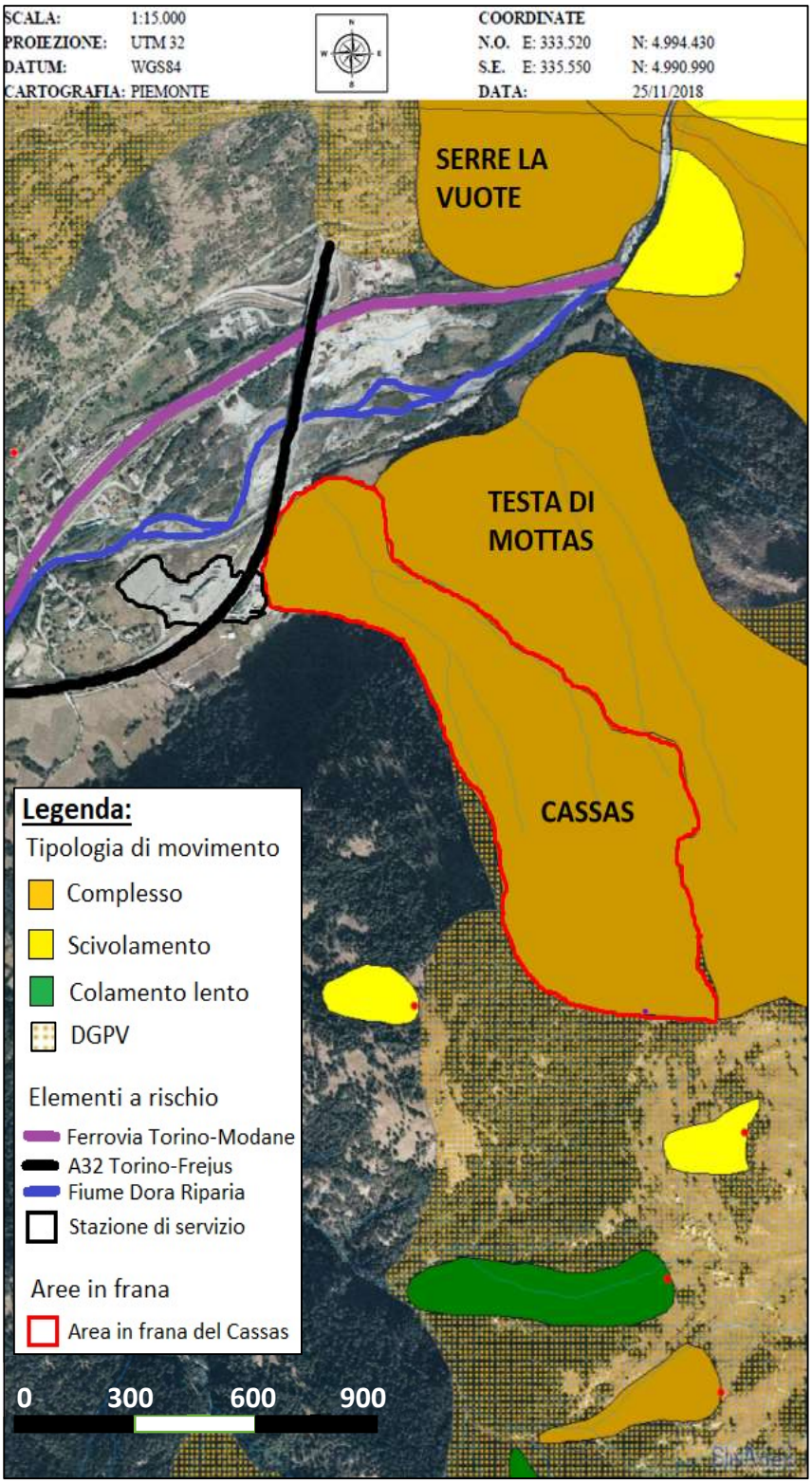


FIGURA 2.2-CARTOGRAFIA IFFI DELL'AREA OGGETTO DI STUDIO CON INDICAZIONE DEGLI ELEMENTI A RISCHIO

Si riportano di seguito alcuni dati del Cassas riferiti alla geometria, ai volumi dell'area in frana e alle zone più attive (Programma Interreg IVa Risknat, 2012):

- dislivello totale: dai 1900m di una cresta spartiacque secondaria ai 1000m del fondovalle;
- lunghezza totale: 1800 m;
- larghezza massima: 850 m;
- superficie totale: 0,5 km_2 circa;
- volume totale: stimato tra 20 e 30 x 10^6 m^3;
- lunghezza del settore più attivo: 1600 m;
- larghezza massima del settore più attivo: 350 m;
- volume del settore più attivo: stimato non inferiore ai 10x10^6 m^3.

2.3 Storico degli eventi

Le più antiche documentazioni dell'instabilità del versante del Cassas risalgono al 1629 e corrispondono a testimonianze dirette raccolte durante le "visite" dei funzionari in aree colpite da calamità naturali. In particolare, nella dettagliata cronaca del catastrofico evento alluvionale del 20 maggio 1728 lasciataci da Carlo Telmon, elemosiniere della Prevostura di Oulx, e trascritta da A. Bogge nel 1975 si narra: "…*Il Comune di Salbertrand non perdette alcuna casa ma le sue terre al piano furono distrutte ed asportate dal fiume (…). Le montagne dal lato opposto* [di Serre la Voute e quindi, inequivocabilmente quelle del Cassas, ndr.] *crollarono nel detto fiume in modo che questo crollo, fatto tutto nello stesso tempo, ne arrestò interamente il corso per lo spazio di qualche tempo*...".

Nel XIX° secolo, l'instabilità del versante provocò numerosi problemi alla linea ferroviaria Torino-Modane. M. Baretti e F. Sacco, famosi geologi dell'epoca, ritennero che le cause dell'instabilità vadano ricercate nell'intensa fratturazione della roccia e nella dissoluzione delle rocce calcaree che affiorano al piede del versante (Baretti, 1881, 1893; Sacco, 1898).

Durante l'intenso evento alluvionale del 12 -14 giugno 1957 un grande scivolamento dislocò, di circa 250m, un'ampia porzione della parte alta del versante. I settori distali della massa in frana evolsero in una serie di colate detritiche che raggiunsero il fondovalle sovralluvionando, con spessori massimi di 1.5 m, un ampio conoide che si allargò dove adesso sorge l'area di servizio autostradale. Le pareti che costituivano la nicchia di distacco, dettero a loro volta origine a una serie di crolli di roccia per effetto dei quali alcuni blocchi di grandi dimensioni rotolano fin verso il basso versante aprendo lunghi solchi nel bosco. La fase parossistica del movimento è proseguita fino al 1965. In *figura 2.3* è possibile vedere la situazione del versante nel 1965. Nel complesso, il movimento di scivolamento ha coinvolto circa 10 milioni di metri cubi di materiale mentre, attraverso le colate detritiche, è stato rimobilizzato circa 1 milione di metri cubi di materiale detritico (Morelli et al., 2005); l'accumulo di detrito raggiunse la sua più grande estensione, dato che esso copriva i 2/3 del conoide superficiale di fondovalle.

Nella *figura 2.4* vengono raccolte tre fotografie che illustrano come è evoluto il versante del Cassas dal termine della fase Parossistica dell'anno 1965 all'anno 2002.

FRANA DEL CASSAS

Comune:	Salbertrand
Bacino idrografico:	Dora Riparia
Tipo di frana:	scivolamento/colamento
Data: 12-14 giugno	1957
Volume :	10 000 000 m^3

FIGURA 2.3- FRANA DEL CASSAS: VISTA PANORAMICA DEL 1965, ALLA FINE DELLA FASE PAROSSISTICA INIZIATA CON L'ALLUVIONE DEL GIUGNO 1957 (FOTO DI G.V. DAL PIAZ IN: BROVERO ET AL. 1996A)

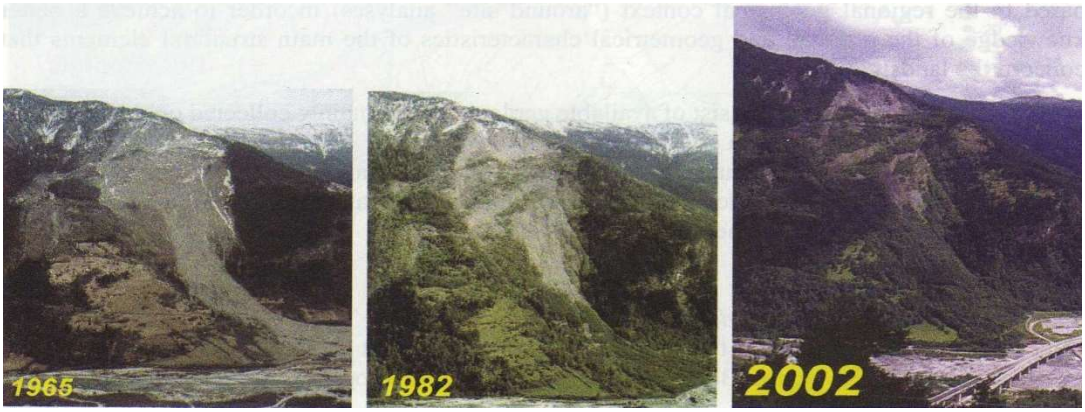


FIGURA 2.4-EVOLUZIONE DELLA FRANA DEL CASSAS (1965 E 1982: BROVERO ET AL., 1996A; 2002:FOTOGRAFIA DI L.PARO)

A partire dagli anni ’80 i numerosi ed estesi accumuli gravitativi presenti sul versante destro della Valle di Susa, e quindi compresa la frana del Cassas, vennero associati all’evoluzione delle cosiddette “Deformazioni Gravitative Profonde” le quali coinvolgono lo spartiacque Val Susa-Val Chisone per alcuni chilometri ed i versanti per alcune centinaia di metri in profondità (Puma et al., 1984; Mortara & Sorzana, 1987; Puma et al., 1989). A partire dai primi anni ’90, a causa della presenza del tracciato autostradale e della relativa stazione di servizio al piede della frana del Cassas, venne installato un sistema di monitoraggio. I dati inclinometrici, testimoniarono movimenti del versante (circa 100÷120 mm/anno), peraltro evidenziati da gradini di scivolamento di neoformazione nell’accumulo più recente (Programma Interreg IVa Risknat, 2012).

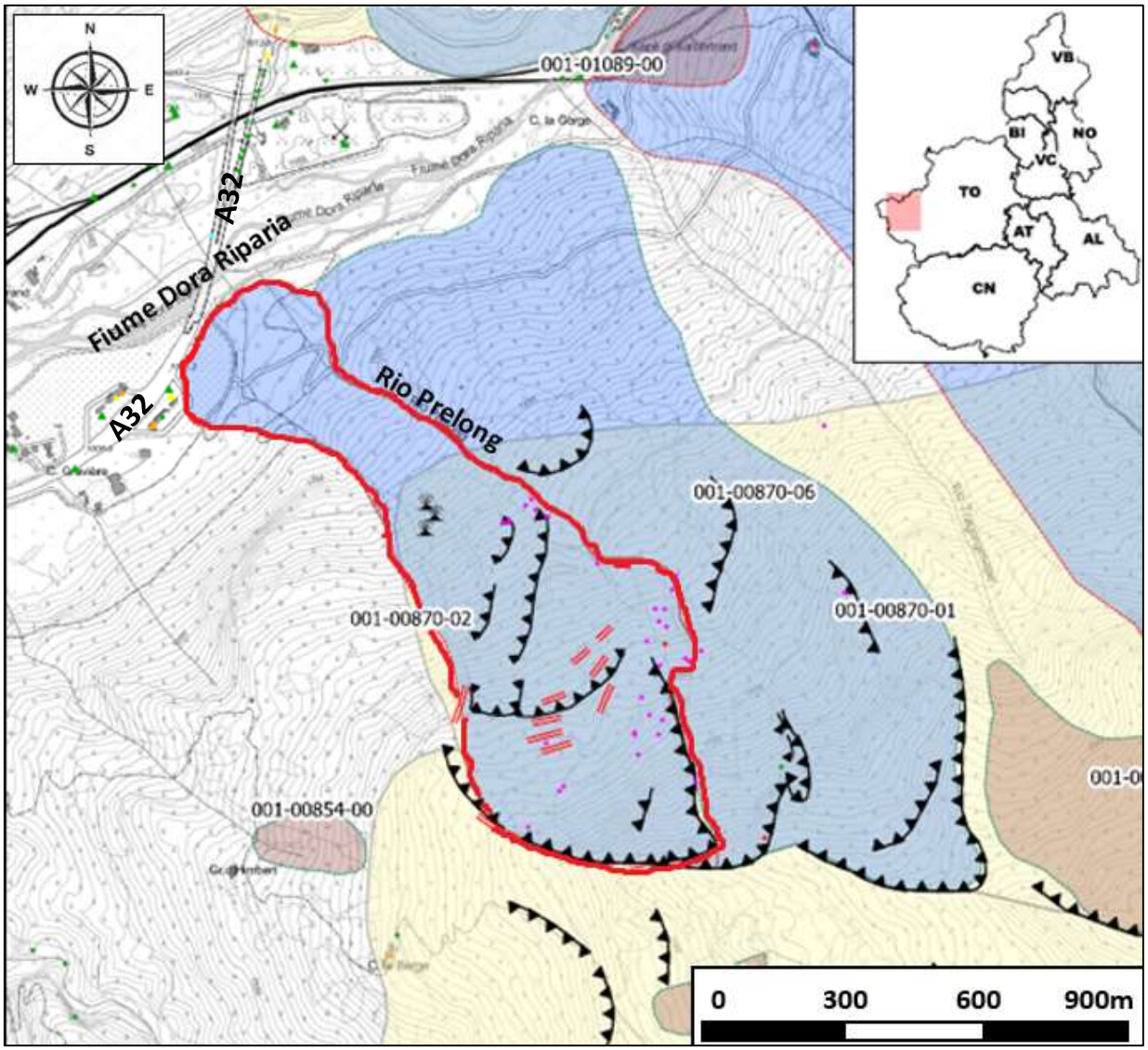
2.4 Analisi geomorfologica

La frana del Cassas si ubica sul fianco Nord-orientale della dorsale spartiacque Dora-Chisone. L'osservazione a grande scala di questo tratto di dorsale mostra caratteristiche che denotano una deformazione gravitativa profonda dell'ammasso in calcescisti generalizzata su vasta area.

La zona di distacco, che si sviluppa lungo lo spartiacque secondario della Testa di Mottas, avente direzione circa N80W, presenta un'esposizione a Nord. Il resto del corpo frana, tende invece a seguire l'esposizione a NW del sottostante versante, descrivendo nell'insieme una progressiva rotazione, terminante sul conoide di fondovalle. Il corpo frana si presenta modellato da numerose scarpate, la più marcata delle quali, lo attraversa trasversalmente con andamento pressoché rettilineo dalla quota 1350 alla quota 1550 circa (Programma Interreg I Italia-Francia, 1996).

Con riferimento alla *figura 2.5*, è possibile descrivere la morfologia dell'area in frana del Cassas:

- la frana del Cassas è delimitata sul lato orientale dal Rio Prelong mentre il piede arriva molto vicino al tratto autostradale A32 e al fiume Dora Riparia;
- nella zona di coronamento, sono presenti la scarpata principale e alcune fratture/trincee: con un tratto nero è rappresentato l'andamento dell'orlo della scarpata principale e con un doppio tratto rosso la presenza di fratture/trincee, le quali sono ubicate molto vicine alla scarpata principale;
- nella parte medio sommitale dell'area in frana, è ancora possibile osservare l'andamento dell'orlo delle tre scarpate secondarie; in particolare, quella che si trova più vicina al coronamento, segue un andamento che risulta sub parallelo all'andamento delle curve di livello ed essa risulta essere "circondata" da una serie di fratture/trincee. Le altre due scarpate secondarie più a valle, non hanno più l'orlo che tende a seguire l'andamento delle curve di livello immergendo verso NO;
- procedendo verso valle dalle ultime scarpate secondarie descritte, è possibile notare che, nella parte centrale dell'area in frana del Cassas, siano presenti delle emergenze idriche, indicate in nero con simbolo a forma di zampillo; a valle di tali sorgenti, termina anche l'area colorata in giallo ocra, che rappresenta l'estensione della zona interessata al fenomeno di Deformazione Gravitativa Profonda di Versante (DGPV).



Legenda:

001-00870-02 → Codice frana Cassas

→ Perimetrazione area in frana Cassas

Frane
- Complesso
- DGPV
- Scivolamento rotazionale/traslativo

Elementi Morfologici
- Orlo di scarpata
- Emergenza idrica
- Frattura/Tincea

Dati Interferometrici
- < 10

Dati interferometrici ERS periodo 1992-2001

Aggiornamento: 10/2018 Scala: 1: 15000

FIGURA 2.5-ELEMENTI MORFOLOGICI DELL'AREA IN FRANA, SIFRAP 2018

Dalla *figura 2.6* alla *figura 2.8* sono mostrati alcuni scatti fotografici che permettono di osservare più "da vicino" le caratteristiche di tale settore; in particolare, nella *figura 2.6* è possibile osservare le trincee che si sono formate a monte del settore di coronamento, nella *figura 2.7* è possibile

osservare un'apertura di dimensioni metriche lungo la zona di coronamento e in *figura 2.8* è ancora possibile osservare il settore centrale e il piede della frana.

FIGURA 2.6-TRINCEE A MONTE DEL SETTORE DI CORONAMENTO (SIFRAP, 2018)

FIGURA 2.7-APERTURA METRICA DEI GIUNTI NEL SETTORE DI CORONAMENTO (FORLATI ET AL., 2004)

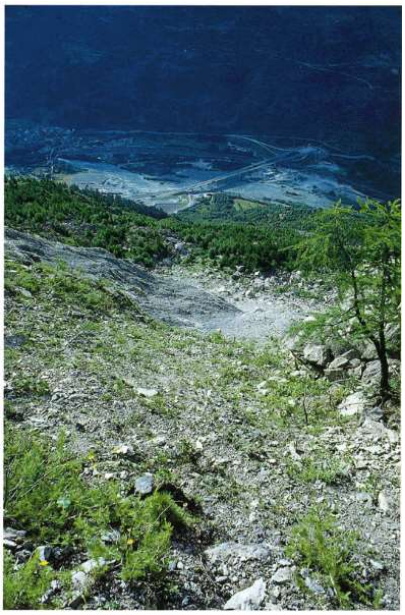


FIGURA 2.8-SETTORE CENTRALE ED IL PIEDE DELLA FRANA IN UNA RIPRESA DALL'ALTO VERSO IL BASSO. AL FONDO LA PIANA DI SALBERTRAND CON IL COLLEGAMENTO AUTOSTRADALE TORINO-MODANE (PROGRAMMA INTERREG I ITALIA-FRANCIA, 1996)

Con riferimento alla *figura 2.9,* è ancora possibile osservare che, lo stato di attività dell'area in frana del Cassas, è considerato come "attivo", essendo il perimetro dell'area in frana del Cassas di colore rosso; inoltre è possibile osservare che, eccetto la zona di accumulo nel fondovalle e la parte occidentale della zona di coronamento, la restante area del Cassas è un'area soggetta a crolli e/o ribaltamenti diffusi in quanto a essa è sovrapposto un reticolo di colore rosso.

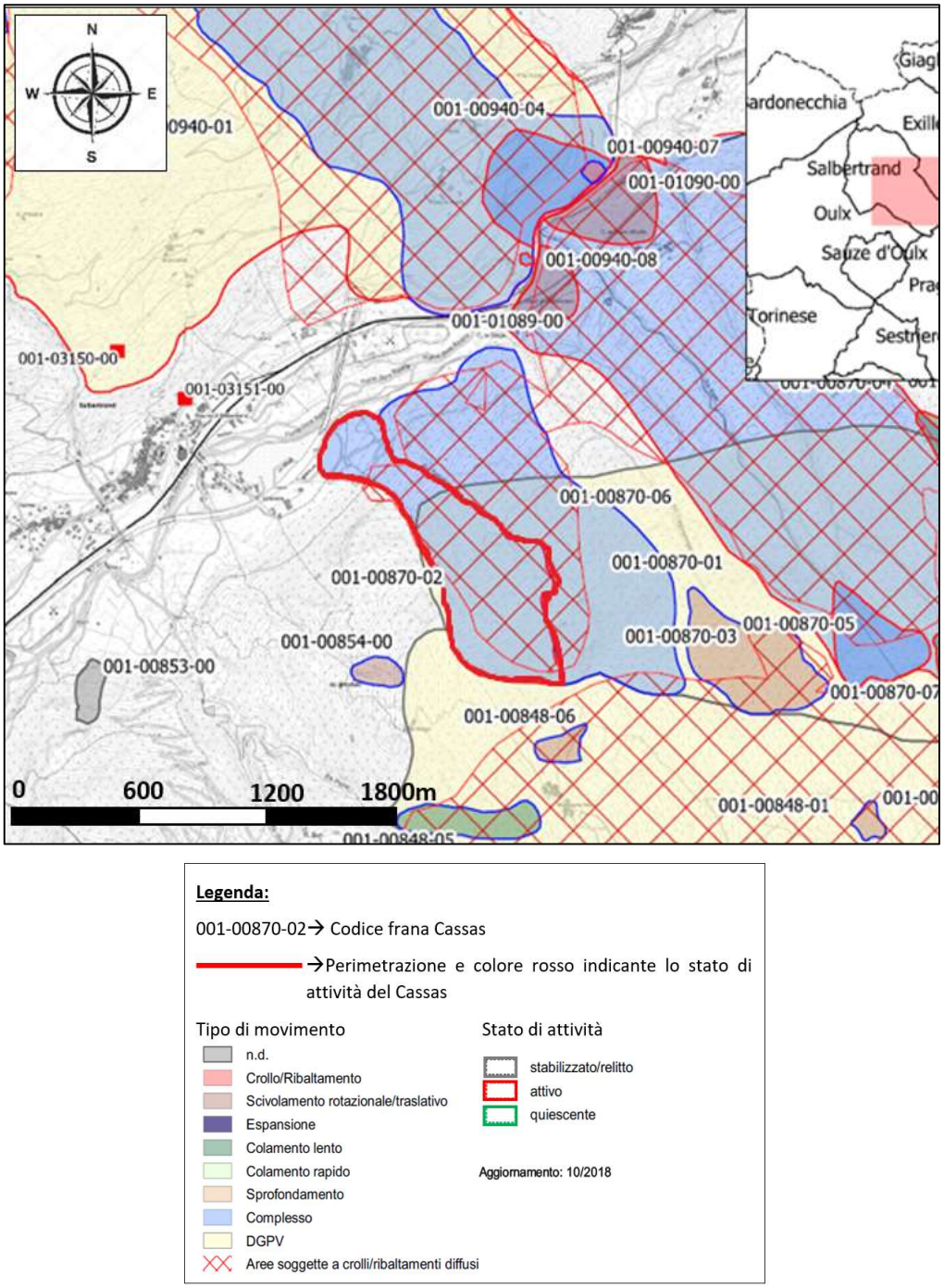


FIGURA 2.9-TIPO DI MOVIMENTO E STATO DI ATTIVITÀ (SIFRAP, 2018)

Si procede ora alla descrizione dei sotto settori del pendio del Cassas. I sotto settori del pendio del Cassas saranno descritti da Est a Ovest nei seguenti punti che fanno riferimento alla *figura 2.10* (Forlati et al., 2004):

- "Sapé d'Exilles": essa è una zona di accumulo di frana, la cui estensione varia da un'altitudine di 2350m al fondo valle per circa 2.5 km^2 (altezza più di 1000m). Questo accumulo di frana, più quello di Eclause di fronte ad esso, formano una diga di valle originando la pianura di Ulzio-Salbertrand.
- (B) e (D) sono altre zone di accumulo; esse sono più piccole di (A) e hanno una forma a lobo (lobe-shaped), e si sovrappongono ai depositi alluvionali di fondovalle. Il più largo tra i due, (D), è particolarmente articolato poiché ricopre un altro accumulo ad Est (C) mentre ad Ovest (D) è parzialmente coperto dall'accumulo "1957 Cassas". Le scarpate principali di questi accumuli (C, D e "1957 Cassas") sono unite insieme e allineate secondo direzioni sub-rettilinee da Est a Ovest.
- al piede del settore (A) c'è una scarpata la cui origine è legata all'erosione del fiume Dora Riparia; l'instabilizzazione del piede, a causa dell'erosione del fiume, è molto probabilmente la causa delle deformazioni verificatesi lungo il canale di circonvallazione A.E.M. (canale dove l'acqua della Dora Riparia è trasportata all'impianto idroelettrico di Chiomonte), ubicato al piede di questo settore (A).
- all'interno dei settori (B) e (D), ad un'altitudine di 1300m, sono riconosciute due scarpate allineate. Gli allineamenti di queste scarpate sono probabilmente dovuti alla presenza di precedenti morfologie legate alla modellazione fluviale che sono state poi coperte dagli accumuli (B) e (D) e poi parzialmente riesumati.
- nella parte occidentale del Cassas è presente un'altra evidente scarpata, alta decine di metri.; l'origine di questa scarpata è probabilmente dovuta all'erosione fluviale passata e, al piede di essa, sono collocati un grande Talus e la stazione autostradale di servizio.
- le scarpate di maggior interesse dal punto di vista dell'evoluzione della morfologia sono osservabili nel settore "Cassas 1957 ": una scarpata è posizionata nella parte superiore del settore mentre l'altra è trasversale il settore con una direzione Nord-Sud.
- a fondovalle, sono stati osservati alcuni conoidi alluvionali. Alcuni di questi, di piccole dimensioni, sono posizionati al piede degli accumuli di frana. Tra questi, il conoide

posizionato al piede del "Cassas 1957 " è stato coinvolto nell'evento Parossistico degli anni '60. Successivamente, questo conoide è stato coinvolto nella costruzione della stazione di servizio autostradale A32 il quale poggia anche sul deposito alluvionale del fiume Dora Riparia

LEGENDA
1. Scarpata principale del Cassas evento Giugno 1957;
2. Scarpata principale del fenomeno gravitazionale;
3. Scarpate secondarie di origine gravitazionale;
4. Scarpate di erosione fluvio-torrentizia
5. Accumuli di frana;
6. Principali affioramenti rocciosi;
7. Attuali depositi fluvio-torrentizi;
8. Conoidi alluvionali
9. Depositi a schiera fluvio-torrentizi
10. Talus
11. Cicatrice della frana e area di transizione
12. Area caratterizzata da caratteristiche morfologiche riferita e DGPV

FIGURA 2.10-VISTA DEL PENDIO DESTRO DELLA VALLE DI SUSA, DA SALBERTRAND A SERRE LA VOUTE, CON INDICAZIONI DEI PRINCIPALI ELEMENTI MORFOLOGICI (FORLATI ET AL., 2004)

Si passa ora a descrivere l'evoluzione geomorfologica. La mappa ufficiale dell'Istituto Geografico Militare del 1934 di *figura 2.11* mostra già caratteristiche che possono essere interpretate come indizi di instabilità del pendio del Cassas: sono evidenziate piccole scarpate (A), una trincea (B) e piccole frane (C).

Facendo riferimento alla fotografia aerea del luglio 1954 di *figura 2.12*, sono mostrate importanti caratteristiche (Forlati et al., 2004):

- (L) parte superiore già coinvolta nell'incipiente scivolamento;
- (F) scarpata principale del Cassas; la superficie di scivolamento è mostrata in cima a quest'area con dislocazioni verticali di alcune decine di metri;
- (D) due settori di frana attivi (complesso scivolamento rapido di detrito);
- accumulazione di grandi blocchi sul lato orientale del pendio, probabilmente derivanti da frane di diverse età che raggiunsero il fondo valle; quest'accumulazione è parzialmente rimodellata nel suo settore occidentale, dove è mostrata una scarpata di circa 80m (S);

- (A) un'ampia zona boschiva (da circa 1450 a 1200m) sotto la scarpata (S). (A) è confinata lateralmente da due corsi d'acqua che producono un conoide sul fondo del pendio. È stato ipotizzato che l'ampia zona boschiva sia anch'essa un accumulo gravitazionale;
- (C) area di accumulo situata nel lato orientale del Cassas che presenta anche alcune scarpate a causa di movimenti al piede.

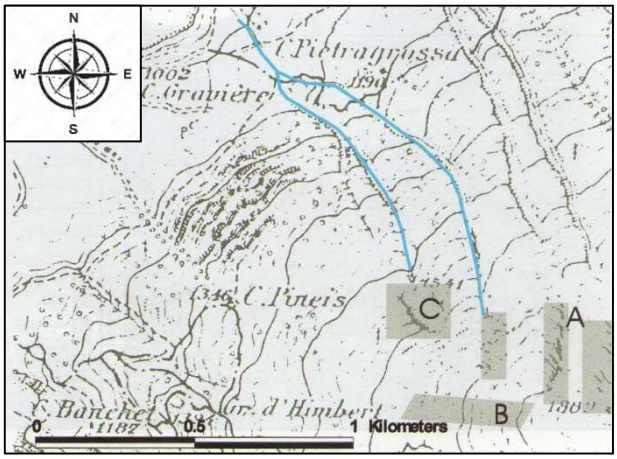
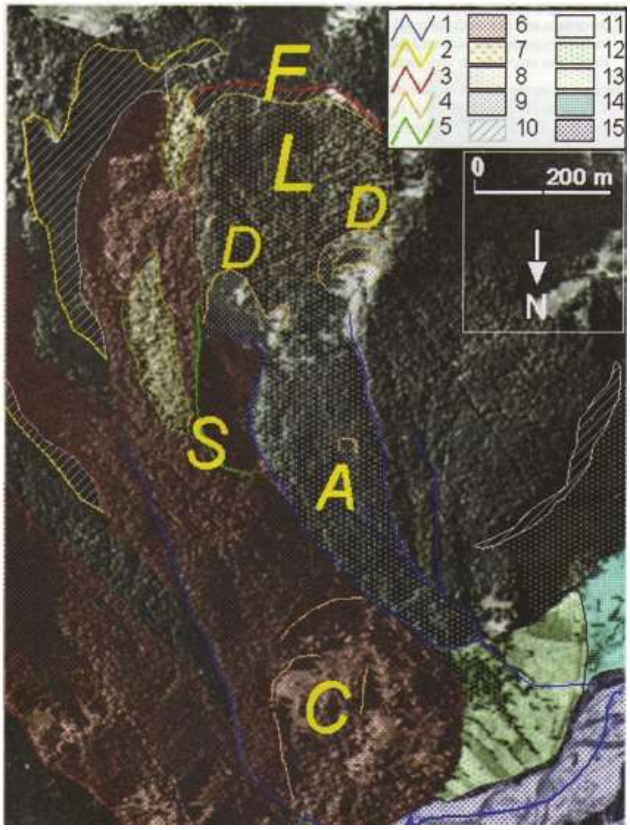


FIGURA 2.11-MAPPA S SCALA 1:25 000 (IGM SHEET N.54, II SE, OULX). LE ZONE IN OMBRA INDICANO LE PRINCIPALI CARATTERISTICHE D'INSTABILITÀ

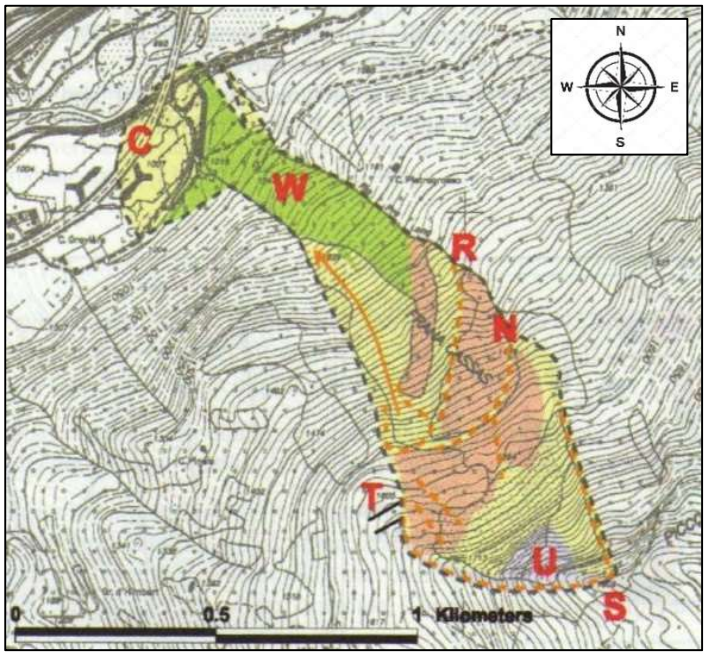


LEGENDA
1. Modello idrografico;
2. Scarpate gravitazionali;
3. Scarpata principale del Cassas;
4. Scarpate secondarie gravitazionali;
5. Scarpate gravitazionali e di erosione;
6. Accumuli di frana all'esterno dell'area del Cassas
7. Accumulo di grossi blocchi senza vegetazione;
8. Settore della frana del Cassas con evidenze di movimento;
9. Complex slide-rapid flow landislides;
10. Affioramento del substrato roccioso principale;
11. Presunta accumulazione di frana;
12. Conoide alluvionale;
13. Talus
14. Depositi a schiera fluvio-torrentizi
15. Attuali depositi fluvio-torrentizi

FIGURA 2.12-MAPPA GEOMORFOLOGICA BASATA SULLE FOTOGRAFIE AEREE DATATE LUGLIO 1954 (FORLATI ET AL., 2004)

Viene di seguito fatta una breve digressione che, attraverso la *figura 2.12*, permette di spiegare da un punto di vista geomorfologico, ciò che è avvenuto durante la fase parossistica degli anni 60'. Durante l'evento del giugno 1957, la parte superiore del pendio del Cassas (L in *figura 2.12*) è stata sottoposta a uno spostamento totale di 250m, principalmente per scivolamento e, sul fianco destro, si è formata una scarpata sub-verticale, di decine di metri di altezza, da cui una parte del detrito esistente iniziò a scorrere. La superficie di scivolamento ha coinvolto il substrato roccioso ed essa è ancora visibile ad oggi nella parte superiore del pendio. La maggior parte delle rocce dislocate, molto probabilmente sono state accumulate nell'ampia depressione subito sotto il settore L, coprendo la scarpata S (*figura2.12*). L'ammasso roccioso dislocato non era eccessivamente disarticolato, come evidenziato da molti alberi preservati e dal grande resto della copertura del suolo sul corpo di accumulo. Parte del materiale dislocato ha raggiunto il fondo valle con dei processi di debris flow, depositandosi sul conoide alluvionale al piede del pendio con uno spessore massimo di 1.5m. I movimenti del Cassas continuarono anche dopo gli eventi parossistici 1957-1965 (Forlati et al., 2004).

Riprendendo la descrizione geomorfologica dell'area in frana, in *figura 2.13* si può vedere come all'interno del corpo di accumulo, sono delineate alcune importanti scarpate (N e R). La (R) taglia trasversalmente l'area in frana, separando la zona superiore, caratterizzata da prevalente scivolamento, da quella inferiore in cui i debris flow sono prevalenti. La (N) è collocata nella stessa posizione. La *figura 2.13* mostra ancora la scarpata (T), la quale è una uphill-facing scarp posizionata sul lato ad Ovest della frana a un'altitudine di 1600m.



LEGENDA

S.	Scarpata principale;
R e N.	Scarpate minori;
T.	Antica up-hill facing scarp;
U.	Substrato roccioso;
W.	Recente colonizzazione forestale;
C.	Posizione più bassa del detrito nel parossismo del 1963

FIGURA 2.13- RAPPRESENTAZIONE SINTETICA DEI PRINCIPALI ELEMENTI MORFOLOGICI SULLA FRANA DEL CASSAS (DA FOTO AEREE 1963-2001) (FORLATI ET AL., 2004)

In sintesi, le evidenze morfologiche indicano che: l'intera frana è in movimento, le scarpate separano zone con differenti cinematismi e corrispondono agli elementi morfostrutturali sepolti sotto l'accumulazione gravitazionale.

2.5 Descrizione del substrato roccioso del materiale detritico sovrastante

La descrizione del substrato roccioso inizia fornendo informazioni sulla neotettonica e sismologia. In particolare, la porzione di alta Valle di Susa oggetto di studio, illustrata in *figura 2.14*, è caratterizzata da una serie di vaste frane su entrambi i fianchi della valle (Serre de la Voute, Cassas, Sauze d'Oulx ecc…). La presenza di tali fenomeni può essere posta in relazione alla presenza di un'intensa fascia di deformazione, la cui direzione sarebbe parallela a quella del corso della Dora Riparia fra Susa e Oulx, con direzione cioè all'incirca NE/SW (Carraro et al., 1979; 1980).

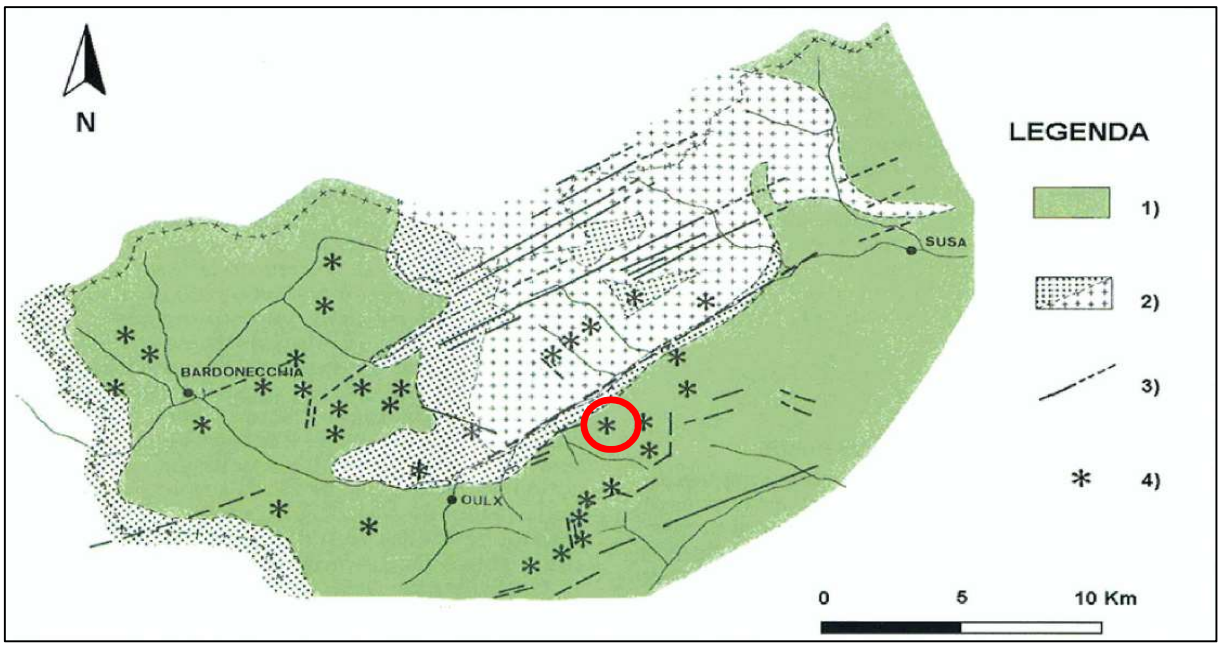


FIGURA 2.14-SCHEMA GEOLOGICO STRUTTURALE DELL'ALTA VALLE DI SUSA. LEGENDA: 1) COMPLESSO DEI CALCESCISTI CON PIETRE VERDI; 2) MASSICCIO CRISTALLINO DELL'AMBIN E SUA COPERTURA NORMALE; 3) TRACCIA DELLE LINEAZIONI PRINCIPALI; 4) UBICAZIONE DEI PRINCIPALI MOVIMENTI GRAVITATIVI DI CUI QUELLO RICERCHIATO IN ROSSO È LA FRANA DEL CASSAS (RAMASCO & SUSELLA, 1979)

Si verifica quindi in generale che, l'intenso stato di fratturazione delle rocce prodotto dall'attività neotettonica, possa provocare l'isolamento di settori di versante più o meno estesi, passibili di una evoluzione in senso gravitativo. È quindi verosimile che, le fratture presenti sul versante ove è situata la frana del Cassas, si siano generate a margine di sistemi di faglia, riscontrabili sul versante opposto della valle (Programma Interreg I Italia-Francia, 1996). I versanti più ricorrentemente coinvolti da deformazioni gravitative sono proprio quelli dove si alternano più frequenti cicli di gelo-disgelo e di fusione della neve, processi che favoriscono la percolazione profonda dell'acqua e la progressiva destabilizzazione del substrato (Mortare & Sorzana, 1987).

Si pone ora l'attenzione sulla composizione dell'ammasso roccioso del tratto di Valle di Susa in esame, descritto tramite la Carta Geologica d'Italia in *figura 2.15*.

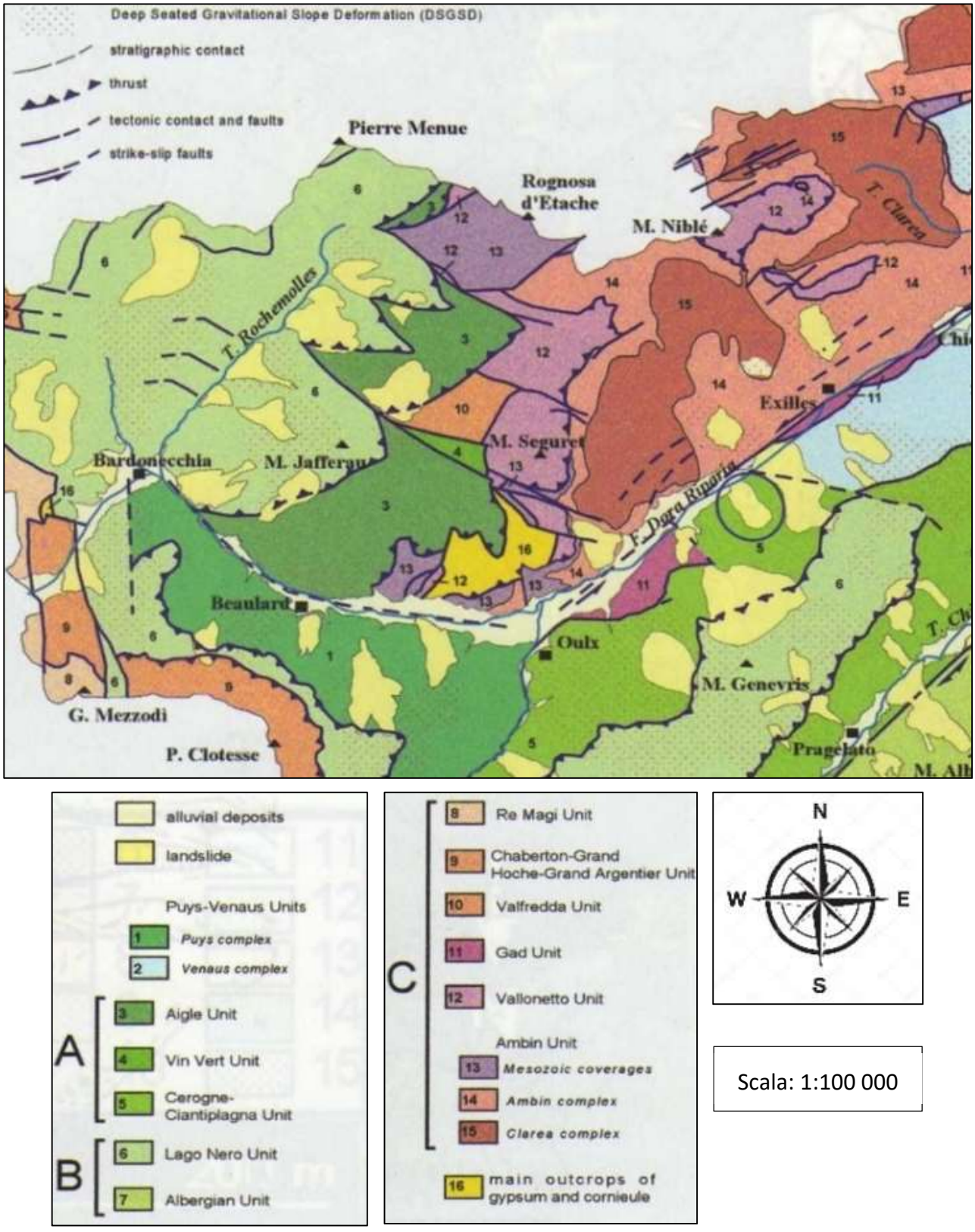


FIGURA 2.15-MAPPA GEOLOGICA STRUTTURALE DEL FOGLIO DI BARDONECCHIA 153 DEL CGI E LEGENDE DELLE UNITÀ TETTONICO STRATIGRAFICHE; RICERCHIATO IN BLU: FRANA DEL CASSAS (CARTA GEOLOGICA D'ITALIA, 2002)

Partendo dall'osservazione generale della mappa geologica strutturale illustrata in *figura 2.15,* sono state distinte diverse unità tettonico-stratigrafiche di diverse origini paleogeografiche (Dela Pierre et al., 1997; Polino & Al., 2002):

A. unità oceaniche consistenti in meta-ofioliti e calcescisti (unità di Piemonte e Liguria dove ricade anche la frana del Cassas);
B. unità di margine continentale fatte di dolomiti Mesozoiche e Calcescisti;
C. basamento poli-metamorfico consistente in Gneiss, quarziti, micascisti e meta-basiti (Complesso Ambin e Clarea) e copertura sedimentaria del Mesozoico (Brianconnais units).

Il versante dal quale prende origine la frana, fa parte del complesso A ed è modellato nei calcescisti del Dominio Piemontese appartenenti all'"Unità di Cerogne-Ciantiplagna" confinata in cima e alla base da contatti tettonici. Le unità principali sono calcescisti, calcescisti massicci carbonativi con interstrati di scisti micacei (spessore di mm-cm), metabasiti con locali metabrecce basaltiche e rare massive quarziti micacee (Polino et al., 2002).

Il tratto di Valle di Susa in oggetto, orientato secondo una direzione NE-SW, è posto in corrispondenza del contatto fra il Dominio Brianzonese e quello Piemontese, rappresentati rispettivamente dal Massiccio d'Ambin e dal Complesso dei Calcescisti con Pietre Verdi. Il primo, costituito da un basamento cristallino e da coperture meta-sedimentarie prevalentemente quarzitico-carbonatiche, affiora principalmente sul versante sinistro (opposto al versante dove è presente la frana del Cassas) mentre il secondo, caratterizza il versante destro (dove si ha la frana del Cassas) ed è costituito da scisti carbonatici e, subordinatamente, da ofioliti, filladi ed intercalazioni quarzitico-micacee (Programma Interreg IVa Risknat, 2012).

Il versante destro della Valle di Susa, ove è ubicato il fenomeno franoso del Cassas, presenta evidenze morfostrutturali geneticamente collegate a fenomeni di DGPV. Sono individuabili due settori di accumulo, affiancati ed in parte sovrapposti, caratterizzati dalla presenza di elementi rocciosi eterometrici (da ghiaie a megablocchi) commisti ad una matrice limoso-sabbiosa in quantità variabile. La nicchia di distacco, ad andamento arcuato, è modellata prevalentemente in scisti carbonatici molto competenti; la roccia si presenta molto fratturata ed allentata, caratterizzata da discontinuità osservabili talora come fratture con apertura metrica, anche per un centinaio di metri a monte del ciglio (Programma Interreg IVa Risknat, 2012).

2.6 Analisi strutturale dell'area in frana (Discontinuità)

Nel corso dell'estate 1994 è stata effettuata una campagna di rilevamento, durante la quale si è focalizzata l'attenzione sull'assetto litologico-strutturale e geomeccanico del versante in frana. La descrizione delle discontinuità è stata anch'essa tratta da studi passati (Forlati et al., 2004). In *figura 2.16* è mostrato il reticolo stereografico dei principali sistemi di discontinuità e la loro ubicazione nell'area in frana.

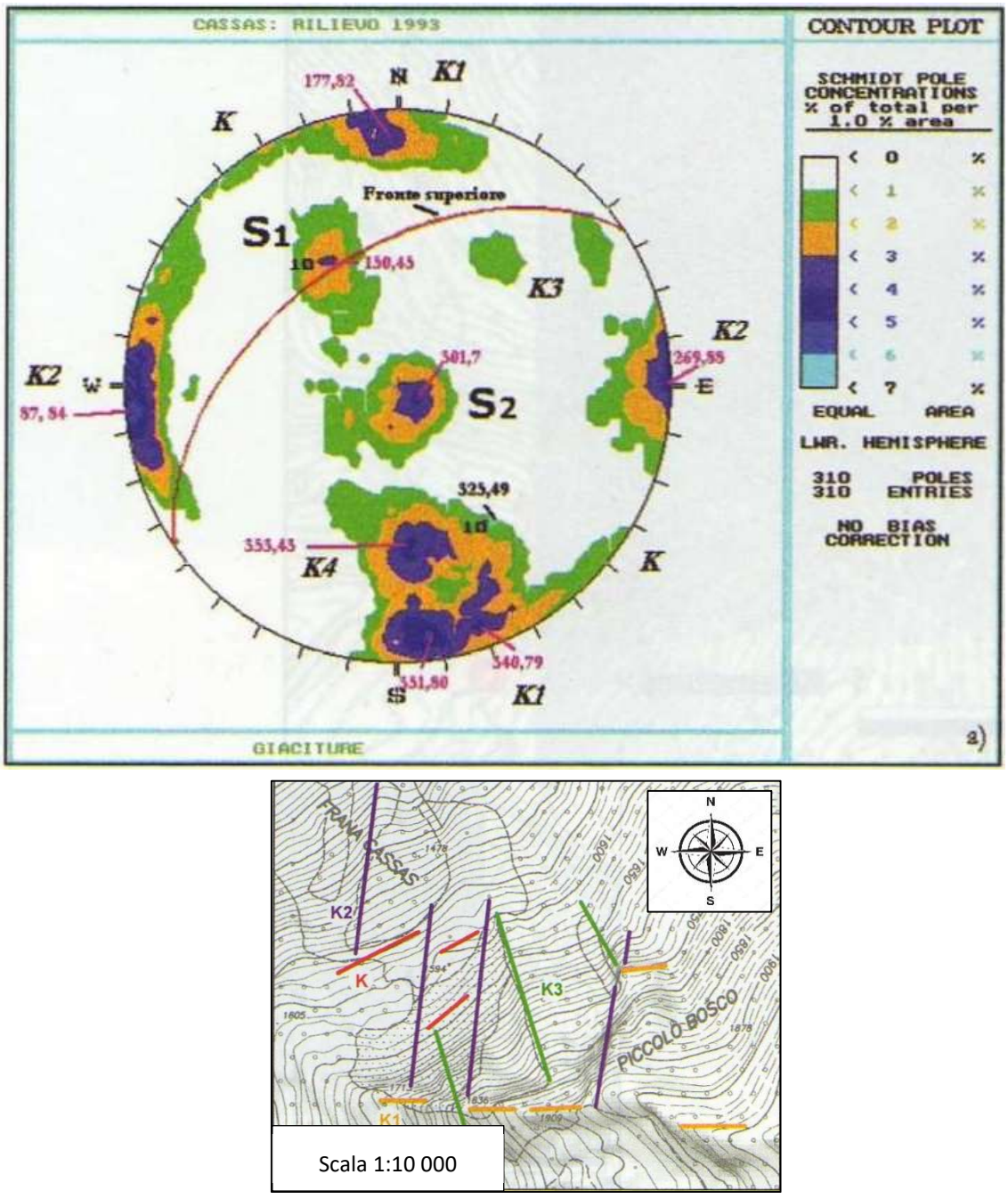


FIGURA 2.16-A) RETICOLO STEREOGRAFICO E SISTEMA DI DISCONTINUITÀ; B) ALLINEAMENTI MORFOLOGICI OSSERVATI NELLA PARTE SUPERIORE DELLA FRANA DEL CASSAS. S1 E S2 SONO PIANI DI SCISTOSITÀ; K1, K2, K3, K4 E K SONO SISTEMI DI GIUNTI (BROVERO ET AL., 1996A)

Dalla *figura 2.16*, i dati strutturali hanno permesso di osservare sei sistemi principali di frattura:

- il piano di scistosità (S1): immergente a S-SE con un'inclinazione di 40-50°;
- il piano di scistosità (S2): immergente a N con un'inclinazione di 40-50°;
- il sistema di discontinuità (K1): esso è sub verticale (inclinazione di 80-85°), con fratture persistenti immergenti a N350° e N170°, ovvero praticamente immergenti in direzione N-S;
- il sistema di discontinuità (K2): esso è sub verticale (inclinazione di 80-90°), con piani di frattura immergenti a N90° e N270° ovvero immergente in direzione E-O;
- il sistema di discontinuità (K3): i piani di frattura immergono a N220° e a N240°, ovvero a SE, con un'inclinazione di 50-70° ed essi sono meno persistenti rispetto a (K1) e (K2);
- il sistema di discontinuità (K4): i piani di frattura sono immergenti a N350°, ovvero praticamente in direzione N, con un'inclinazione di 40-50°;
- il sistema di discontinuità (K): sono fratture sub-verticali immergenti a SE e NW.

Come si può osservare dalla *figura 2.16 b:* il sistema (K1) corrisponde alla scarpata principale (nella parte occidentale) e a trincee sub parallele al coronamento della frana, il sistema (K2) corrisponde alla scarpata minore all'interno del corpo frana, il sistema (K3) corrisponde a fratture scarpate all'interno del corpo frana e sulla cima della frana (questi sistemi sono sub paralleli ai contorni laterali della frana) e il sistema (K) corrisponde alla scarpata principale nella parte orientale e a fratture all'interno del corpo frana e nella parte superiore della frana.

Un altro studio passato (Programma Interreg I Italia-Francia, 1996), ha permesso di individuare i cinematismi ammissibili inerenti all'intero ammasso. L'analisi cinematica che scaturisce dalla rappresentazione stereografica, consente di formulare alcune osservazioni inerenti principalmente la zona superiore del coronamento:

1. la mutua posizione del fronte superiore del versante rappresentato mediamente dalla giacitura α=325° e ψ=49°, del sistema indicato con K1 avente inclinazione di circa 80° ed elevata persistenza, del sistema indicato con Sd avente debole inclinazione di franapoggio e del sistema K2 ad andamento perpendicolare al sistema K1, favorisce un'instabilità per ribaltamento di porzioni prismatiche ad elevata snellezza.
2. il sistema indicato con K4, caratterizzato in parte da superfici di discontinuità aventi immersioni prossime al fronte superiore ed inclinazioni inferiori, determina la possibilità cinematica di scivolamenti di porzioni rocciose lungo le superfici generate da K4 e delimitate

lateralmente dal sistema K2 ed a tergo, dal sistema K1, avente funzione di giunto di trazione a monte;

3. la diversa spaziatura e persistenza dei sistemi di discontinuità scompone localmente l'ammasso roccioso in blocchi prismatici elementari ad elevato grado di libertà cinematica, i quali, dopo un iniziale scivolamento lungo le superfici generate dal sistema K4, assumono come moto principale quello caratteristico del crollo di massi (rotolamento, rimbalzo e scivolamento).

2.7 Informazioni geotecniche tratte da precedenti studi

È stato ritrovato un precedente studio (Forlati et al., 2004), il quale ha fornito i valori degli indici di classificazione dell'ammasso roccioso in zone limitrofe all'area in frana del Cassas. Gli indici di classificazione permettono di stimare le caratteristiche meccaniche (deformabilità e resistenza) e di fornire un'idea generale della condizione strutturale di tali ammassi. Per arrivare a definire un valore numerico di tali indici, sono stati analizzati dei provini prelevati sull'ammasso roccioso. Questi dati, si riferiscono a siti di misura ubicati intorno all'area in frana. Nella *figura 2.17* i siti 12,13, 14 e 28 sono i siti usati per la classificazione dell'ammasso roccioso. Sempre in *figura 2.17*, con il cerchio in blu, si è contornata l'area in frana del Cassas.

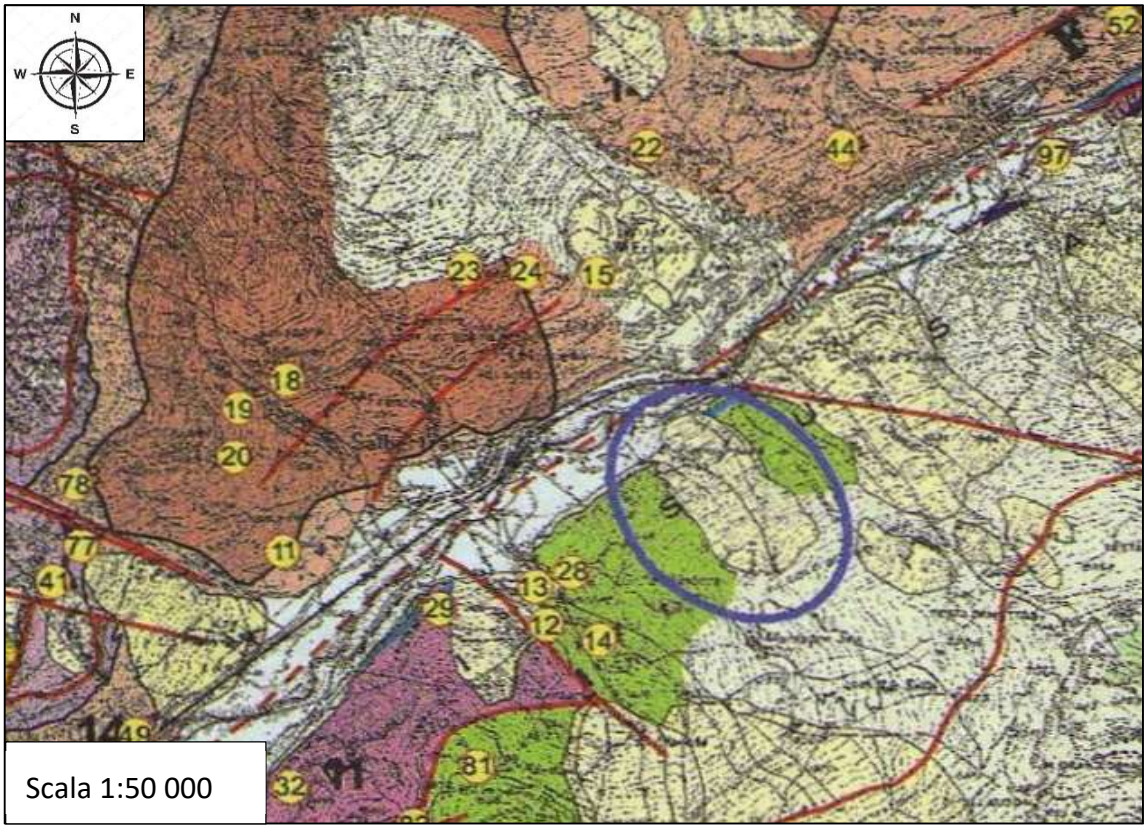


FIGURA 2.17-PORZIONE DELLA MAPPA GEOLOGICA DEL FOGLIO DI BARDONECCHIA; IL CERCHIO BLU INDICA LA POSIZIONE DELL'AREA IN FRANA DEL CASSAS (FORLATI ET AL., 2004)

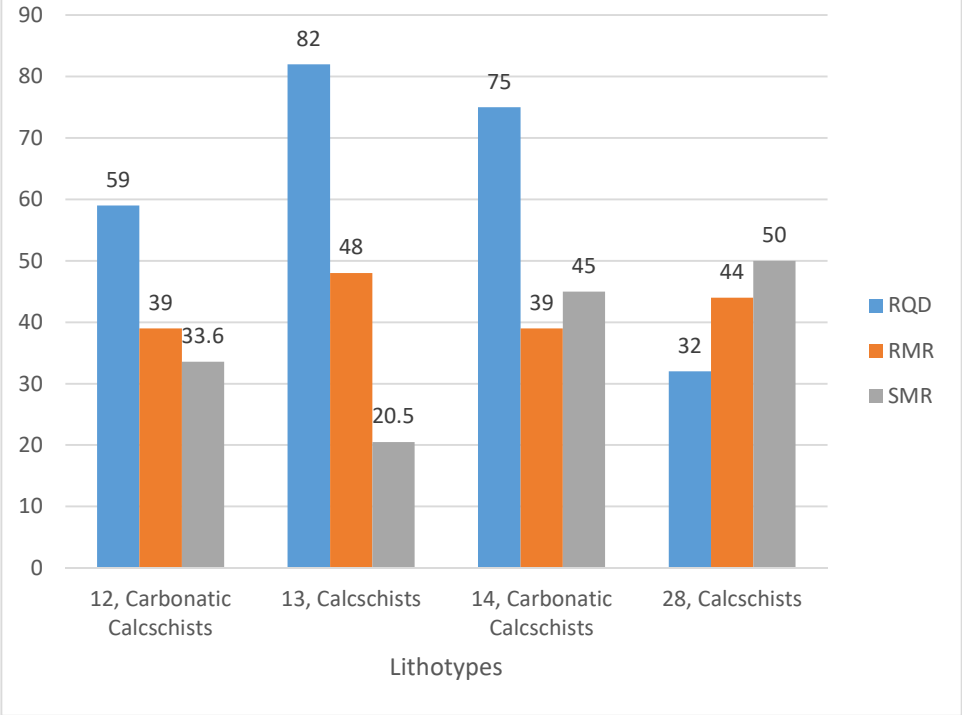
Questi dati hanno permesso la classificazione delle rocce del pendio secondo il metodo SMR-Slope Mass Rating (questo metodo permette una classificazione del pendio in classi di qualità secondo l'espressione "SMR=RMR + (F1xF2xF3)+F4" dove RMR è il Rock Mass Rating di (Bieniawski, 1974) mentre F1, F2, F3 e F4 sono fattori correttivi che definiscono il tipo di collasso del pendio risultante da relazioni geometriche tra sistemi di discontinuità e pendio secondo le regole I.S.R.M. (International Society for Rock Mechanics). Nella *tabella 2.2* sono riassunte le descrizioni delle classi

di qualità (Romana, 1990). I dati collezionati sono riassunti nel *grafico 2.1* dove sono riportati i relativi indici RMR, SMR e RQD. I dati portano a classificare l'ammasso roccioso in categoria III e IV. Inoltre, i dati sottolineano la grande variabilità delle condizioni geo-meccaniche dell'ammasso roccioso poiché, le misurazioni fatte in sito, sebbene molto vicine, hanno dato differenti valori di SMR (Forlati et al., 2004).

TABELLA 2.2-DESCRIZIONE DELLE CLASSI DI QUALITÀ DELL'AMMASSO ROCCIOSO (ROMANA, 1990)

Class	V	IV	III	II	I
SMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
Description	Very bad	Bad	Normal	Good	Very good
Stability	Quite unstable	Unstable	Partially unstable	Stable	Quite stable
Failure types	Traslational slide	Traslational slide and/or large wedge	Traslational slide and/or small wedge	Some blocks	No one

GRAFICO 2.1- DATI GEOMECCANICI IN ALCUNI SITI NELL'AREA CIRCOSTANTE LA FRANA DEL CASSAS (LAPENTA & TROMBETTA, 1996)



Le prove di laboratorio sui materiali raccolti nei sondaggi indicano una resistenza a compressione uniassiale di 58 MPa per gli scisti massicci e di 36 MPa per gli scisti filladici (Programma Interreg IVa Risknat, 2012).

Lo studio di Epifani (Epifani, 1991), ha permesso inoltre di fornire valori sulla permeabilità dei materiali costituenti il versante in esame. Di seguito, vengono riportati tali valori di permeabilità:

- calcescisti fratturati $k = 10\ cm/s$;
- detriti grossolani $k = 1\ cm/s$;
- detrito medio $k = 10^{-3} - 10^{-1} cm/s$;
- detrito più frazione fine $k = 10^{-4} - 10^{-2} cm/s$;
- depositi alluvionali $k = 10^{-3} - 10^{-1} cm/s$;

Al fine di definire al meglio, la tipologia di materiale detritico sovrastante il substrato roccioso e la rigidezza di questo materiale, sono state svolte delle prove di simica a rifrazione e dei sondaggi geognostici.

Con riferimento alla *figura 2.18,* la prova di sismica a rifrazione è stata svolta tra la quota di 1500mslm e 1000mslm con i sondaggi geognostici S4 e S1 ubicati rispettivamente a monte e a valle di essa; è anche possibile osservare la distribuzione delle zone caratterizzate da differenti velocità di propagazione delle onde di taglio.

La descrizione preliminare dei due fori S1 e S4 consente di definire lo spessore del movimento franoso e di caratterizzare i materiali coinvolti: nel tratto di versante compreso tra le quote 1500mslm e 1000mslm, il movimento franoso interessa materiali caotici (clasti, massi) in prevalente matrice sabbiosa e subordinariamente limosa.

Il rilievo sismico a rifrazione è stato effettuato lungo la massima pendenza per uno stendimento di circa 900 m. L'interpretazione delle dromocrone indica l'esistenza di quattro diversi orizzonti caratterizzati da velocità di propagazione delle onde di taglio crescenti da 500m/s a 4400m/s. Dal confronto della sismica a rifrazione con le stratigrafie dei sondaggi è emerso quanto segue (Programma Interreg I Italia-Francia, 1996):

- i calcescisti costituenti il substrato roccioso, quantunque fratturati, sono caratterizzati da velocità delle onde sismiche pari a 4000-4400m/s;

- l'ammasso roccioso molto disarticolato è caratterizzato da velocità delle onde sismiche pari a 3000-3800m/s;
- i materiali caotici prevalentemente a matrice sabbiosa, inglobanti clasti eterometrici e talora massi di diametro massimo di 2m, sono caratterizzati da velocità delle onde sismiche pari a 500-1800m/s;

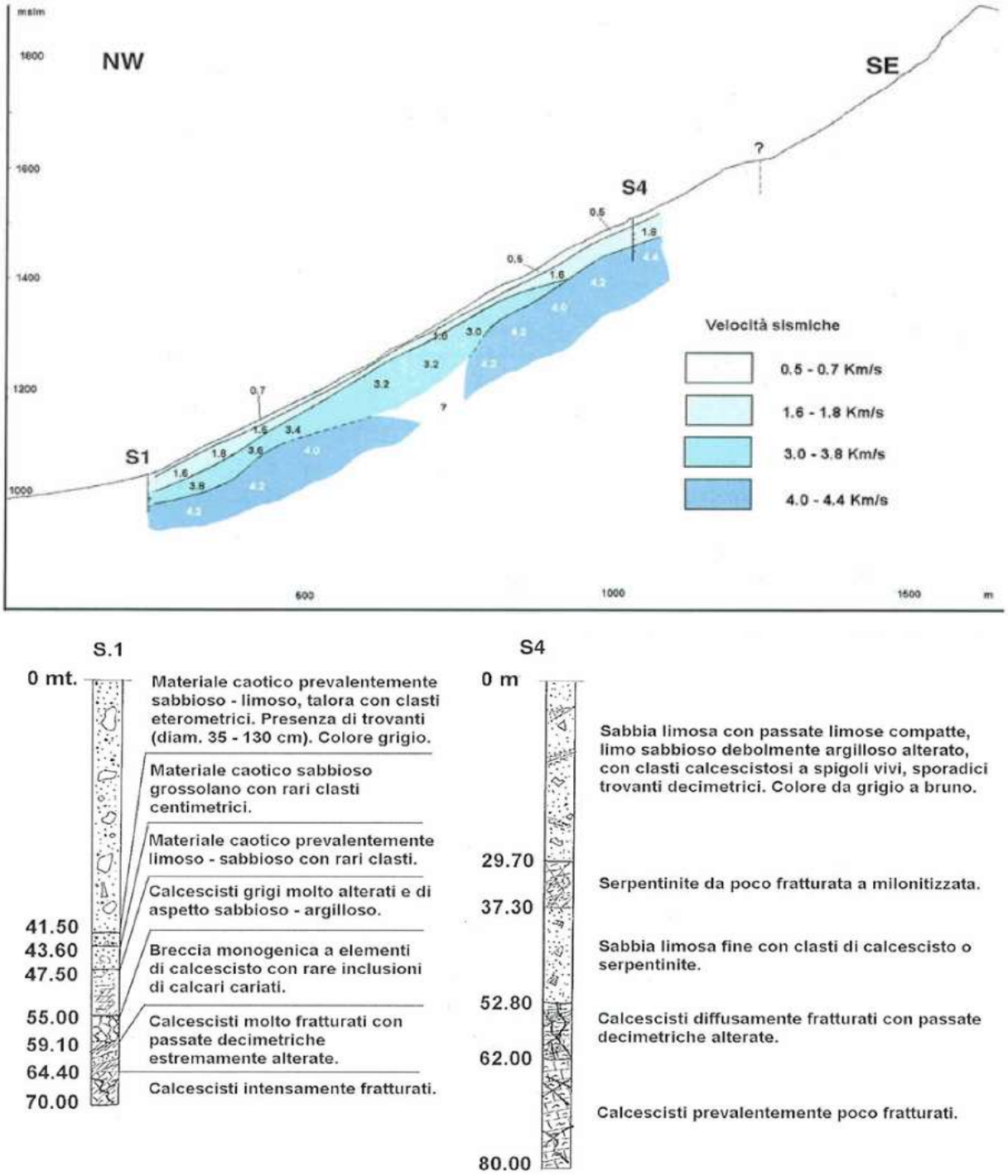


FIGURA 2.18-SOPRA:PROFILO TOPOGRAFICO E RISULTATI DELLA SISMICA A RIFRAZIONE; SOTTO: SONDAGGI STRATIGRAFICI (BROVERO ET AL., 1996 A)

2.8 Scenari di pericolo identificati

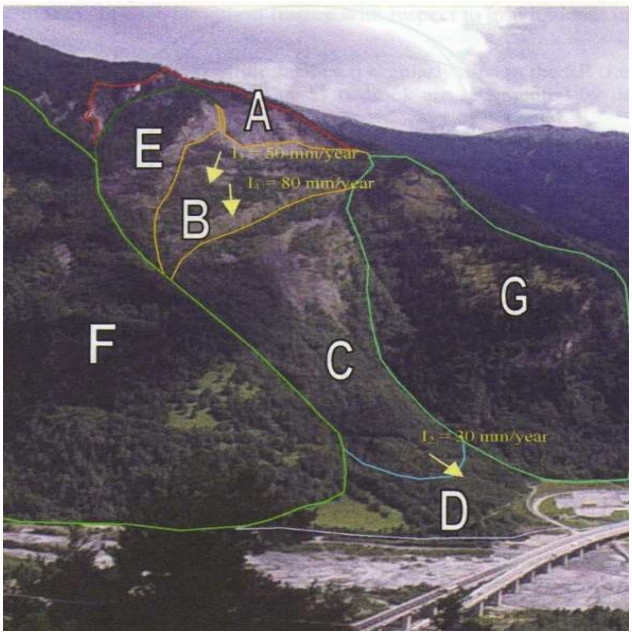


FIGURA 2.19-SUDDIVISIONE DELLA FRANA DEL CASSAS PER L'IDENTIFICAZIONE DEI PERICOLI (FORLATI ET AL., 2004)

Al fine di svolgere un'analisi di pericolosità dei movimenti profondi, è dapprima necessario procedere ad una suddivisione dell'area in frana del Cassas per poter identificare al meglio i possibili pericoli. Le analisi morfo-strutturali consentono di suddividere la frana del Cassas in zone contraddistinte da particolari cinematiche e dinamiche. Facendo riferimento alla *figura 2.19* è possibile individuare i seguenti settori (Forlati et al., 2004):

A. settore di nicchia: affioramenti di calcescisti intensamente fratturati ed allentati, con blocchi instabili di volumetria variabile; nel coronamento sono osservabili numerose e profonde fratture beanti;
B. settore di accumulo gravitativo in scivolamento: blocchi di volumetria variabile (massimo 15 m^3) in matrice sabbioso-limosa; individuazione di una superficie di scivolamento a circa 50÷60 m di profondità, approssimativamente al contatto con il substrato (dati inclinometrici);
C. settore di accumulo gravitativo di stile composito: blocchi di volumetria variabile (massimo 5m^3) in abbondante matrice sabbioso-limosa; in questo settore la dinamica risulta complessa a causa della combinazione di movimenti di scivolamento, colamento lento e rapido;
D. settore di conoide: area di espansione ed accumulo delle colate detritiche che hanno origine nelle parti medio alte del versante;
E. zona di accumulo in equilibrio metastabile: presente un accumulo di blocchi e mega-blocchi (20-30 m^3) di vecchie frane, parzialmente mobilizzate durante l'evento del 1957;
F. settore di accumulo gravitativo evoluto: corpo di accumulo di antico fenomeno gravitativo esteso fino al fondovalle; sono osservabili alcuni indizi di movimenti localizzati successivi alla formazione dell'accumulo e probabilmente ancora attivi.
G. ad Ovest del fenomeno gravitativo del Cassas è individuabile un settore di versante stabile in cui sono osservabili localizzati fenomeni gravitativi superficiali.

Per dare una spiegazione dell'evoluzione generale della frana del Cassas, in particolare per i settori B e C di *figura 2.19* all'interno dell'accumulo della frana del Cassas del 1957 dove sono mostrati importanti elementi d'instabilità, l'ipotesi espressa nello studio di Forlati (Forlati et al., 2004) è che il movimento del debris, che è stato originato durante l'evento del giugno 1957, rimanga costante col tempo con possibili accelerazioni durante le pesanti piogge. Il più grande volume mobilizzato corrisponde all'area B (circa 10^7 m^3) che è stato anche il volume mobilizzato nel giugno 1957. Il corpo detritico C presenta una complessa evoluzione con debris slide nel settore sommitale vicino al settore B e lenti debris flow nell'area medio inferiore. I movimenti continui nella parte superiore del pendio, accentuano un'accelerazione iniziata dal giugno 2001 (approssimativamente da 20 a 80 mm/anno), causata da pesanti piogge e dallo scioglimento della neve invernale-primaverile.

L'ipotesi di evoluzione per questi settori è riassunta in *figura 2.20* le cui lettere richiamate nella descrizione fanno riferimento alla *figura 2.19*:

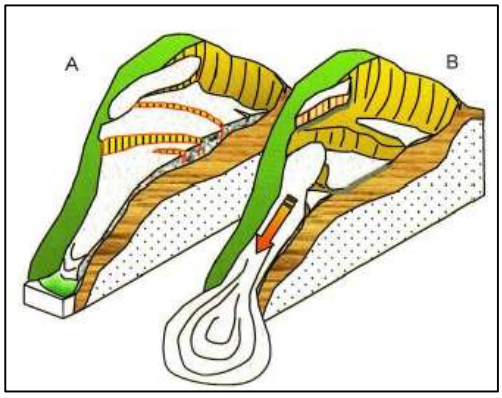


FIGURA 2.20-SCHEMA LONGITUDINALE DELLA FRANA: A) SITUAZIONE ATTUALE; B) IPOTESI DI EVOLUZIONE (FORLATI ET AL., 2004)

- lenti e continui movimenti nell'area C verso la zona di accumulo;
- gli scivolamenti nella parte superiore dell'area C producono instabilità nell'area B;
- a causa della deformazione progressiva dell'accumulo detritico o per causa di eventi d'innesco (piogge) che producono accelerazioni, è possibile che una o più superfici di scivolamento siano in condizioni di equilibrio limite fino al istantaneo collasso e sviluppo di una fase parossistica in cui parte dell'intero corpo B e probabilmente parte del corpo C scivolerebbero verso il fondovalle;
- la quantità d'acqua potrebbe condizionare la tipologia e la velocità del movimento dei detriti nell'area medio-bassa e conseguentemente i modi di accumulo nel fondovalle;
- lo scivolamento dell'area B, potrebbe anche condizionare la stabilità dell'area E, come già accaduto nel giugno del 1957 e il volume totale dell'area è circa $1.5x10^6$ m^3;
- il movimento potrebbe includere un volume totale di circa 10-12 $x10^6$ m^3 con accumulazione sia sul pendio che sul fondovalle. La forma dell'accumulazione potrebbe essere a forma di

lobo, considerando la tipologia di materiale e le forme dei più vecchi accumuli sul pendio stesso.

Nell'area occidentale della frana (G in *figura 2.19*), caratterizzata da una generale stabilità, il solo settore critico sembra essere lo sperone roccioso (T in *figura 2.13*) posizionato nella parte superiore del pendio vicino alla scarpata principale della frana del Cassas. In questo caso, l'ipotesi è che, durante un movimento generale del pendio, questo settore vorrebbe muoversi e tale parte di materiale fluirebbe nell'accumulo principale del Cassas e parte raggiungerebbe direttamente il fondo valle. Il volume di questa area instabile è circa $0.5x10^6$ m^3.

Gli scenari di pericolo identificati in questo studio (Forlati et al., 2004) sono:

- blocchi o masse di roccia cadenti dalla scarpata principale della frana del Cassas (velocità di alcuni m/s) con una zona di accumulo al piede della scarpata o sul pendio. Ogni blocco ha un volume massimo di alcune decine di m^3; la caduta dei blocchi a un massimo volume di 10^5 m^3;
- collasso di parti del pendio attraverso debris slide e flow (velocità variabile da alcuni m/min ad alcune decine di m/mese) con accumulazione in parte sul pendio e maggiormente a fondo valle. Il volume massimo è inferiore a $10x10^6$ m^3. È escluso, ad oggi, che il fenomeno potrebbe evolvere come una valanga detritica;
- collasso dell'intero corpo detritico, coinvolgente anche alcune parti esterne all'evento denominato "1957 Cassas": debris slide e flow (velocità variabile da alcuni m/min ad alcune decine di m/mese), caduta di blocchi provenienti dallo sperone roccioso sulla parte occidentale del Cassas con traiettorie che parzialmente convergono nel corpo di accumulo della frana del Cassas e parzialmente raggiungono il fondovalle dopo aver scavalcato il muro situato sopra la stazione di servizio e coinvolgimento dell'area E (*figura 2.19*) con movimenti complessi di tipo debris slide. Volumi di circa $10\text{-}15x10^6$ m^3.

Il presente studio (Forlati et al., 2004) a permesso anche di ottenere dei valori di probabilità di occorrenza.

- Il distacco di blocchi di roccia di dimensioni variabili da 1 a 20 m^3 sono assunti avere una frequenza annuale. Infatti, sebbene non siano presenti osservazioni dirette o non siano disponibili documenti storici di questo fenomeno, è supposto che un processo crioclastico con la degradazione dell'ammasso roccioso possa causare continui distacchi di elementi di

roccia intensamente fratturati dalla scarpata principale del Cassas; inoltre, l'assenza di vegetazione sui detriti al piede della scarpata sottolinea l'alta frequenza del fenomeno.

- La caduta di blocchi di roccia di grandi dimensioni (di circa $10^5 m^3$) ha una bassa frequenza, circa 10 anni.
- Per quanto riguarda i complessi fenomeni di debris slide e debris flow, è difficile stabilire una probabilità di occorrenza per fenomeni che coinvolgono l'intero pendio. Considerando gli scarsi dati storici disponibili e i pesanti eventi meteorologici del maggio 1728 e giugno 1957, è stato ottenuto un intervallo di tempo di circa 230 anni. Un tentativo di correlare la caduta di piogge con i movimenti è stato effettuato dalla società che gestiva il sistema di monitoraggio (C.T.M., 2003). Questa elaborazione ha dato come risultato un tempo di 50 anni, il quale può essere considerato la minima soglia dopo la quale la frana del Cassas manifesterà importanti accelerazioni indotte da pesanti piogge. Il tempo di ricorrenza è poi assunto come variante tra 50 e 250 anni. Questo tempo di ricorrenza è calcolato per un evento con movimento di volume detritico minore rispetto a quello del 1957 ($<1x10^7$ m^3). Il fenomeno gravitazionale, il quale coinvolgerebbe volumi superiori o uguali a $1x10^7$ m^3, ha un tempo di ritorno più grande di 230-250 anni.

La *tabella 1.3* riassume i valori di probabilità di occorrenza ottenuti.

TABELLA 2.3-PROBABILITÀ DI OCCORRENZA (FORLATI ET AL., 2004)

Table 4.4. Occurrence probability.

Scenario	Occurrence range (average)	Frequency
Rockfalls	1–50 (25)	1/25 = 0.04
Debris slide & flow ($<1 \times 10^7 m^3$)	50–250 (150)	1/150 = 0.007
Debris slide & flow ($1 \div 1.5 \times 10^7 m^3$)	250	1/250 = 0.004

2.9 Analisi quantitativa del rischio dei movimenti

L'analisi quantitativa del rischio dei movimenti è stata tratta dal PROGETTO IMIRILAND (Forlati et al., 2004).

Sono stati considerati tre scenari della frana del Cassas. Ogni scenario è caratterizzato da un'area d'innesco e di run-out e da una probabilità di occorrenza. I 3 scenari sono:

A. fenomeno di caduta massi: volumi tra 10^0 e 10^5 m^3, l'area interessata è ottenuta dalle traiettorie di caduta massi;
B. complesso fenomeno di debris slide and flow: volumi minori di 10^7 m^3, l'area interessata si basa sull'ipotesi morfologica per volumi di 1-2 x 10^6 m^3;
C. complessi fenomeni di debris slide and flow: volumi di 1-1.5 x 10^7 m^3, l'area influenzata si basa sull'ipotesi morfologica per volumi di circa 1.5x10^7 m^3.

Gli elementi a rischio sono riconosciuti attraverso la definizione della pianificazione del comune di Salbertrand. Questi elementi a rischio sono mostrati nella *figura 2.21*.

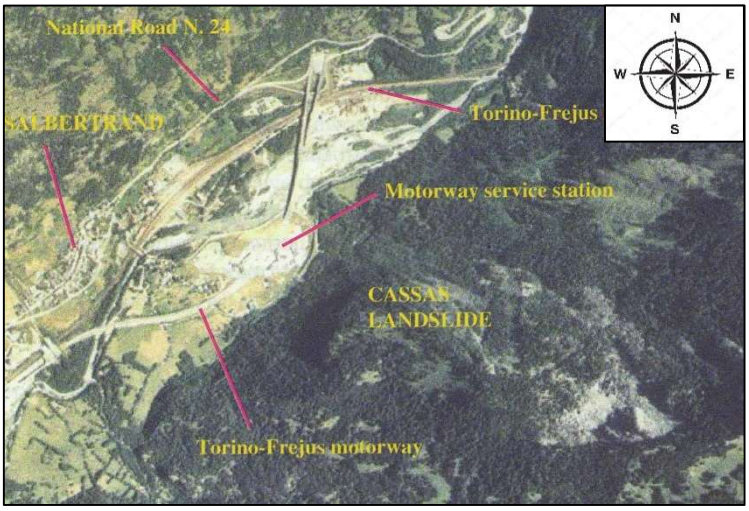


FIGURA 2.21-ELEMENTI A RISCHIO VICINO ALLA FRANA DEL CASSAS (FORLATI ET AL., 2004)

Sia nello scenario di caduta massi che negli scenari di debris slide and flow è stato assegnato un valore di vulnerabilità pari a 1 (valore massimo).

Nell'analisi quantitativa del rischio, è importante considerare l'incertezza nel sistema e soprattutto la delimitazione dell'area interessata, poiché essa è il risultato di ipotesi e valutazioni. Quindi, gli elementi a rischio vicini all'area influenzata, non possono essere considerati di avere vulnerabilità pari a zero e, conseguentemente, zero rischio. In particolare, riguardo allo scenario di debris slide

and flow maggiore di 10^7 m^3, l'area influenzata raggiunge il rilevato ferroviario ma è possibile che l'intera ferrovia possa essere impattata con pesanti conseguenze per la viabilità in entrambe le direzioni.

L'impatto previsto si ottiene moltiplicando i valori degli elementi a rischio e la vulnerabilità percentuale. Al fine di specificare una precisa valutazione quantitativa del danno per le attività economiche, i costi derivati dalle analisi economiche sono essenziali (ad esempio costi delle attività, costi di ricostruzione, costi di turnover, perdite di profitto ecc.). Per valutare gli impatti aspettati in campo ambientale e sociale (dove un valore economico è difficile da ottenere: si pensi ad esempio alla quantificazione della perdita di vite umane) sono stati usati degli indici.

L'ultima fase dell'analisi quantitativa del rischio riguarda la valutazione del rischio. Questa valutazione è ottenuta moltiplicando l'impatto aspettato con il valore numerico della probabilità di occorrenza riferita ad ogni scenario. I valori della probabilità di occorrenza sono stati ottenuti sulla base dei dati storici e sono già stati riassunti nella *tabella 2.3.*

Come mostrato in *figura 2.22, figura 2.23, figura 2.24 e figura 2.25* per gli scenari di debris flow and slide, il maggior rischio è connesso al corpo della frana sul pendio: questa situazione è possibile poiché la frana sul pendio è attiva. Per le corrette considerazioni del rischio reale solo ciò che esiste nell'area di accumulo del fondovalle deve essere valutato.

In *figura 2.22*, le mappe di rischio fisico sono state ottenute tramite tecniche GIS e viene illustrato il rischio fisico per i tre scenari analizzati. Per lo scenario di caduta massi, non esiste una distribuzione poiché esso è riferito ad un'area omogenea. Nei due scenari di debris slide and flow, i valori maggiori di rischio fisico sono quelli relativi alla stazione di servizio "Gran Bosco", quelli relativi all'autostrada A32 e quelli relativi alle aree classificate come aree produttive nella pianificazione del territorio.

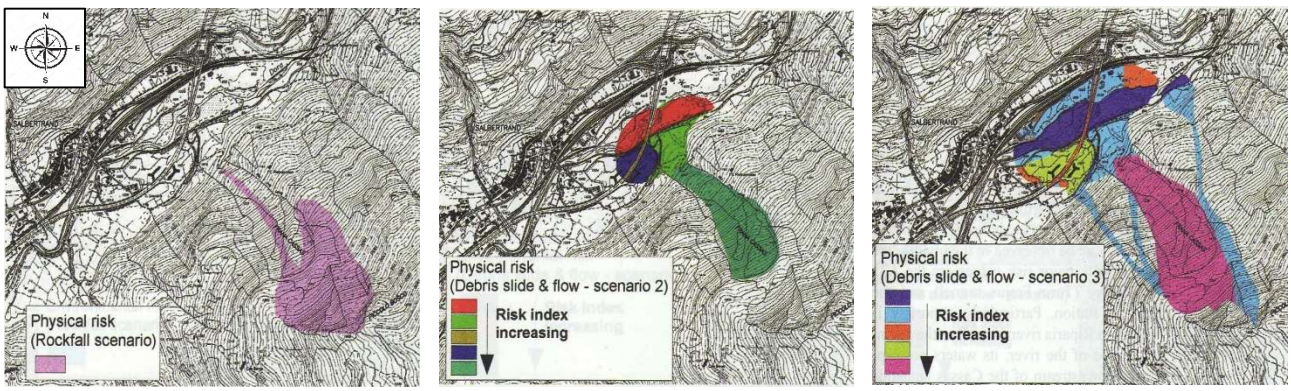


FIGURA 2.22-RISCHIO FISICO (FORLATI ET AL., 2004)

In *figura 2.23*, per quanto riguarda il rischio economico, può essere osservato che l'area con maggiore valore di rischio è l'autostrada A32 e la stazione di servizio. Particolarmente importante è il fiume Dora Riparia, in quanto la sua acqua viene catturata a valle della frana del Cassas da una centrale idroelettrica.

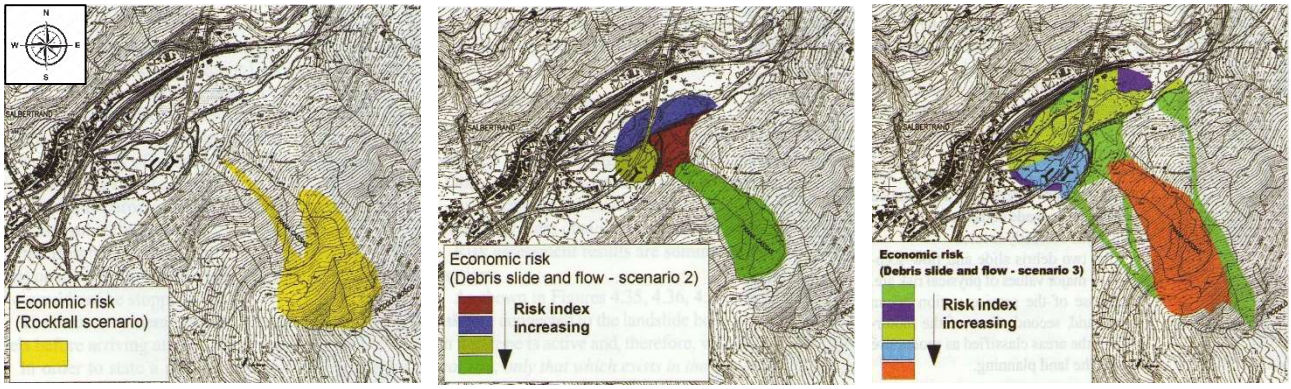


FIGURA 2.23-RISCHIO ECONOMICO (FORLATI ET AL., 2004)

In *figura 2.24*, per quanto riguarda il rischio ambientale, le principali aree con maggiori valori di rischio sono, l'area del pendio che fa parte del parco naturale del Gran Bosco di Salbertrand e l'area di fondo valle dove scorre il fiume Dora.

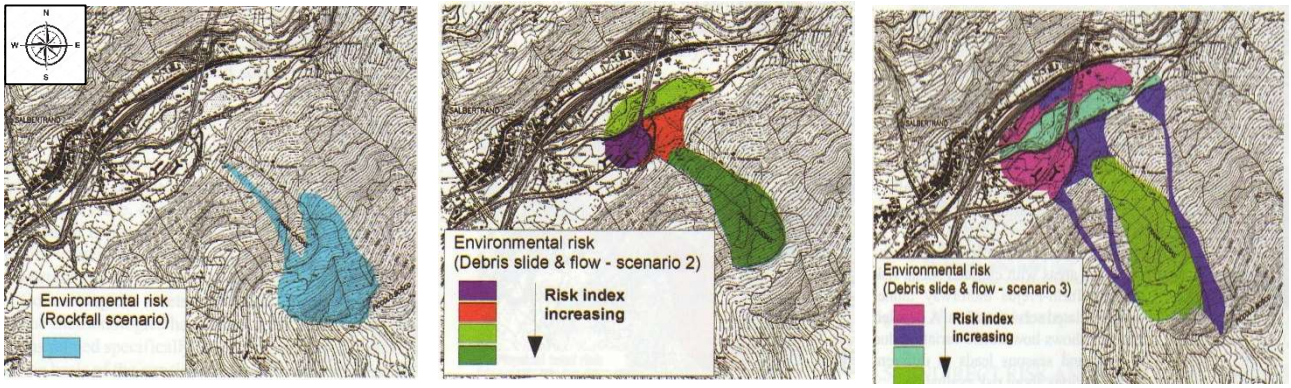


FIGURA 2.24-RISCHIO AMBIENTALE (FORLATI ET AL., 2004)

In *figura 2.25*, per quanto riguarda il rischio sociale associato allo scenario di caduta massi, il valore di rischio non è zero. Per quanto riguarda il rischio sociale associato gli scenari di debris slide and flow, l'area con elevato rischio sociale sono l'autostrada A32 Torino-Frejus e la relativa stazione di servizio.

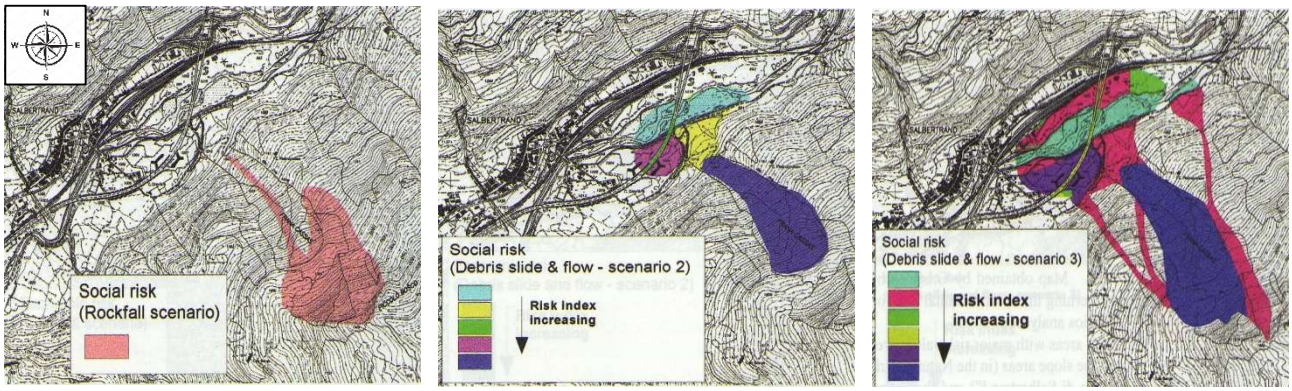


FIGURA 2.25-RISCHIO SOCIALE (FORLATI ET AL., 2004)

L'alto indice di rischio ottenuto per i settori del pendio coinvolti nell'attività del fenomeno non deve essere preso in considerazione; ciò deriva dal fatto che, per la frana del Cassas, è stato considerato un alto valore di probabilità di occorrenza e questo conduce ad un alto valore di rischio, anche se collegato a bassi valori di beni colpiti. Dunque, per una corretta analisi di rischio, è necessario considerare le aree interessate al fondovalle i cui valori di probabilità di occorrenza sono dieci volte inferiori a quelli sul pendio. In ogni caso, è importante sottolineare che l'autostrada e la stazione di servizio colpite dall'evoluzione della frana, presentano degli alti indici di rischio riguardanti il rischio fisico, economico, ambientale e sociale.

CAPITOLO 3

3 Sistema di monitoraggio

3.1 Introduzione

Nel presente capitolo verrà fornita una descrizione del sistema di monitoraggio e dell'opera di drenaggio.

Per quanto riguarda la descrizione del sistema di monitoraggio sono stati realizzati tre capitoli. Il *capitolo 3.2* fornirà informazioni riguardo la tipologia di strumenti presenti e l'ubicazione di essi nell'area in frana. Il *capitolo 3.3* descriverà nel dettaglio le stazioni meteorologiche gestite dall'A.R.P.A. Piemonte, riportando le principali informazioni sul principio di funzionamento e sulle caratteristiche tratte dalle schede tecniche. Il *capitolo 3.4* descriverà la strumentazione di controllo del quadro fessurativo del settore di coronamento e dello sperone roccioso occidentale, la rete idrogeologica composta da colonne piezometriche e misuratori di portata e la rete per la misura degli spostamenti in profondità composta da inclinometri, strumentazione DMS e sonde fisse.

Per quanto riguarda l'opera di drenaggio, il *capitolo 3.5* fornirà indicazioni sull'anno in cui essa è entrata in funzione, sulle tecniche di costruzione utilizzate e sullo scopo per la quale essa è stata realizzata.

3.2 Ubicazione della strumentazione

Si riporta nel seguito una descrizione completa del sistema di monitoraggio. Nell'area instabile, illustrata in *figura 3.1*, sono presenti:

- sensori elettrici rilevanti l'apertura di fratture (area CABINA 1, CABINA 2 e CABINA 6);
- stazioni topografiche totali che monitorano la posizione di mire sparse sull'area instabile;
- verticali piezometriche per il monitoraggio dei livelli di falda;
- misuratori delle portate superficiali e della galleria drenante entrata in funzione nel 2006;
- colonne inclinometriche per il monitoraggio degli spostamenti in profondità;
- stazioni meteorologiche gestite dall'A.R.P.A. Piemonte denominate Le Selle e Salbertrand;
- pluviometro PL1 e termometro T1 per il dato di precipitazione e temperatura dell'aria.

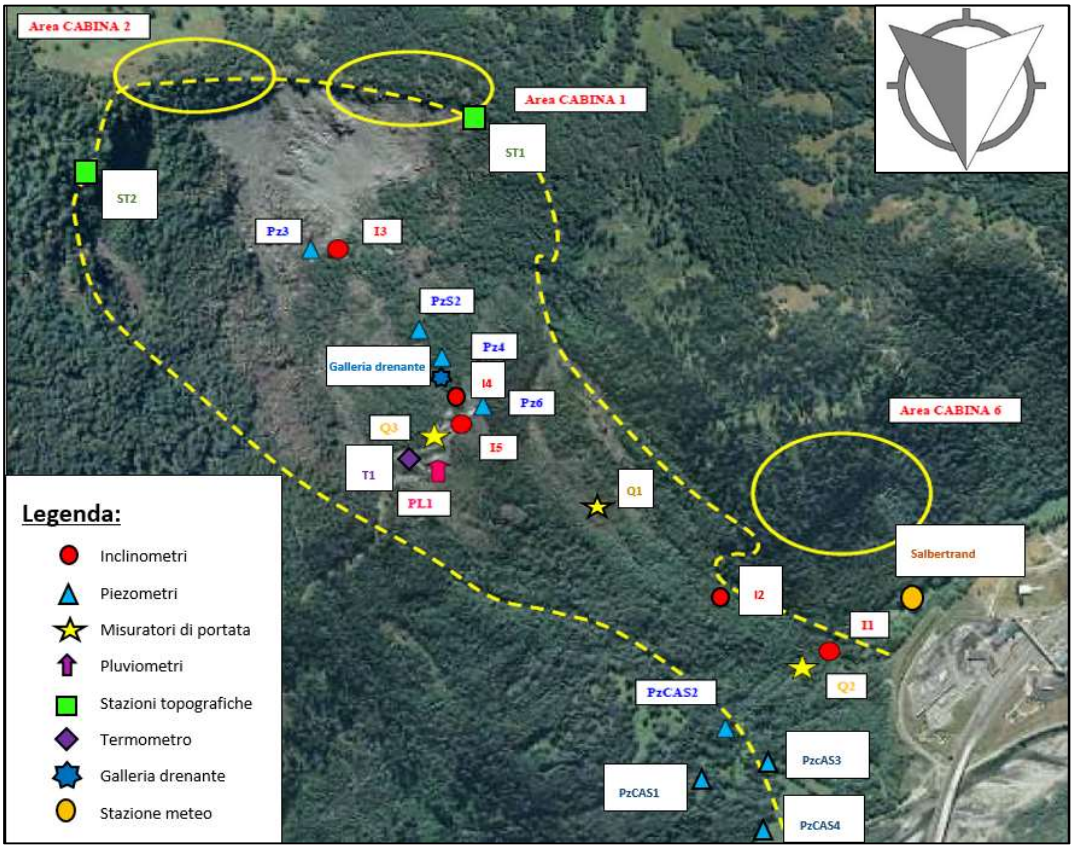


FIGURA 3.1-RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DELL'IMPIANTO DI MONITORAGGIO DELLA FRANA DEL CASSAS

Si riporta nella *tabella 3.1* e *tabella 3.2* l'ubicazione degli strumenti di monitoraggio gestiti da A.R.P.A. e S.I.T.A.F.

TABELLA 3.1-UBICAZIONI STAZIONI METEOROLOGICHE A.R.P.A. PIEMONTE

STRUMENTAZIONE A.R.P.A.	QUOTA [m.s.l.m.]	LATITUDINE (WGS84, G. Sess.)	LONGITUDINE (WGS84, G,Sess,)
Le Selle	1980	450316	065502
Salbertrand	1010	450416	065338

TABELLA 3.2-UBICAZIONE STRUMENTI DI MONITORAGGIO S.I.T.A.F.

STRUMENTAZIONE S.I.T.A.F.	QUOTA [ms.l.m.]	LATITUDINE (WGS84, G. Sess)	LONGITUDINE (WGS84, G. Sess)
Misuratore portata Q2	1045	45.071892	6.896856
Misuratore portata Q3	1390	45.068452	6.903368
Piezometro PZ3	1615	45.065345	6.905477
Piezometro PZS2	1550	45.066381	6.904257
Piezometro PZ4	1510	45.067039	6.903975
Piezometro PZ6	1430	45.068051	6.902981
Piezometro PzCas2	1085	45.073301	6.899316
Pluviometro PL1	1370	45.068990	6.903529
Termometro T1	1390	45.068452	6.903368
Inclinometro I1	1045	45.071441	6.89676
Inclinometro I2 (DMS)	1115	45.071277	6.898137
Inclinometro I3 (DMS)	1613	45.065403	6.905309
Inclinometro I4	1430	45.067961	6.902827

Inclinometro I5	1380	45.068886	6.902907

Tramite il software QGIS, mediante l'utilizzo delle informazioni raccolte sull'ubicazione della strumentazione di monitoraggio dai vari report emessi dalla S.I.T.A.F. & Musinet Engineering e, tramite l'utilizzo del modello digitale del terreno (DTM) reperito dal Geo portale della Regione Piemonte, è stato possibile ricreare una cartografia che mostra l'ubicazione degli strumenti. Tale cartografia è rappresentata in *figura 3.2*. Il risultato è riportato in *figura 3.2*.

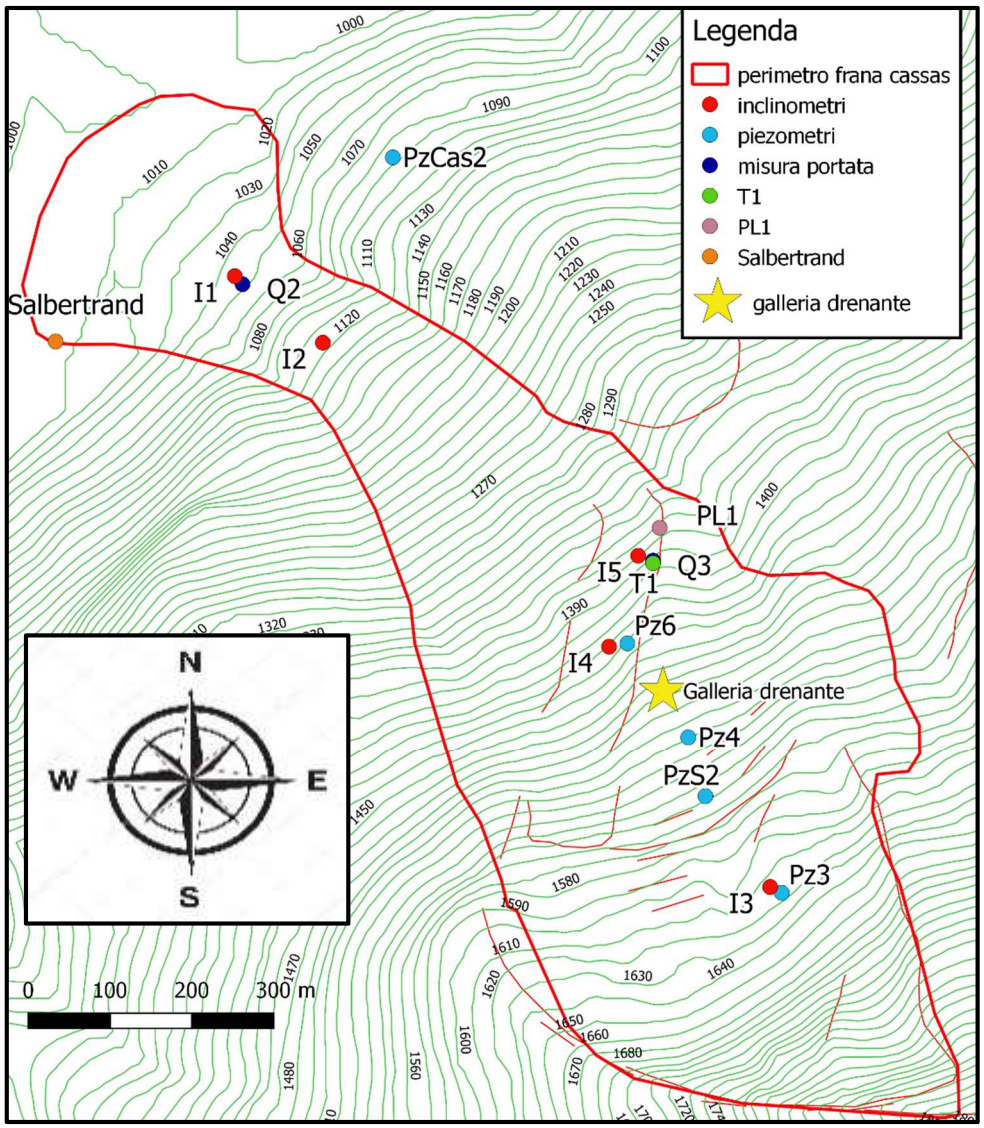


FIGURA 3.2-RICOSTRUZIONE DELLA POSIZIONE DEGLI STRUMENTI DI MONITORAGGIO TRAMITE QGIS

3.3 Descrizione delle stazioni meteorologiche dell'A.R.P.A. Piemonte

L'analisi dei dati meteorologici, che verrà fatta nei capitoli successivi, farà riferimento ai dati prelevati dalle stazioni "Le Selle" e "Salbertrand", rispettivamente ubicate a monte e al piede dell'area in frana del Cassas. Vengono pertanto riportate, nella *figura 3.3* e nella *figura 3.4*, alcune informazioni estratte dalle schede tecniche fornite dal sito web di A.R.P.A. Piemonte.

Dati stazione LE SELLE:

-località:	Gran Bosco di Salbertrand
-comune:	Salbertrand
-provincia:	Torino
-regione:	Piemonte
-quota:	1980m
-coordinate:	lat. 450316 & long. 065502 (WGS84, G. sess.)
-data di attivaz.:	1991-07-26
-bacino:	Dora Riparia
-sensori:	BHNPRTV

FIGURA 3.3- STAZIONE LE SELLE (SITOWEB A.R.P.A. PIEMONTE)

Dati stazione SALBERTRAND:

-località:	Graviere
-comune:	Salbertrand
-provincia:	Torino
-regione:	Piemonte
-quota:	1010m
-coordinate:	lat. 450416 & long. 065338 (WGS84, G. sess.)
-data di attivaz.:	1990-11-15
-bacino:	Dora Riparia
-sensori:	HNPTV

FIGURA 3.4-STAZIONE SALBERTRAND (SITOWEB A.R.P.A. PIEMONTE)

In *tabella 3.3* viene riportata la legenda dei sensori.

TABELLA 3.3-DESCRIZIONE DEI SENSORI DELLE STAZIONI AR.P.A. PIEMONTE

Sensore	Descrizione	Sensore	Descrizione
P	Pluviometro	N	Nivometro
T	Termometro	R	Radiometro
H	Igrometro	G	Radiazioni Gamma
B	Barometro	W	Tempo presente
V	Anemometro	F	Nefoipsometro
I	Igrometro		

In particolare, nei capitoli successivi, dove verranno fatte le correlazioni tra i dati dei vari strumenti di monitoraggio, si farà riferimento ai soli dati rilevati dai sensori PTN ovvero dati pluviometrici, di temperatura e nivometrici. Per tal motivo, viene di seguito riportata la descrizione di questi soli tre sensori tratta dal sito web di A.R.P.A. Piemonte.

FIGURA 3.5-PARTICOLARE DEL PLUVIOMETRO INSTALLATO SUL TETTO DEL MUSEO CRAVERI DI BRA (CN) (SITOWEB A.R.P.A. PIEMONTE)

Descrizione pluviometro (modello CAE-PMB2, *figura 3.5*)

Il sensore funziona secondo un procedimento meccanico: la precipitazione di acqua, passando attraverso una bocca tarata di 1000 cm², confluisce in un contenitore a bascula in equilibrio su alcuni supporti progettati per ridurre al minimo l'attrito. La bascula raccoglie acqua finché il peso (equivalente a 0.2 mm di pioggia caduta) non ne provoca il capovolgimento. Ad ogni capovolgimento della bascula viene generato ed inviato all'unità di acquisizione un impulso elettrico: il numero degli impulsi trasmessi fornisce la misura della quantità d'acqua caduta. La struttura meccanica consente di effettuare una taratura molto precisa dello strumento; le rilevazioni vengono poi elaborate dal software che opera a livello della stazione. Il software gioca un ruolo fondamentale perché depura il segnale dall'errore sistematico, che si presenta quando l'aumento di intensità della precipitazione costringe la bascula a movimenti molto rapidi e continui innescando una sorta di "rimbalzo"; la compensazione dell'errore garantisce una precisione del dato dal 5% fino al 2%.

In *tabella 3.4* vengono riportate le caratteristiche tecniche.

TABELLA 3.4-CARATTERISTICHE DEL PLUVIOMETRO A.R.P.A. PIEMONTE (SITO WEB A.R.P.A. PIEMONTE)

<table>
<tr><th colspan="2">Pluviometro (modello PMB2-CAE)</th><th colspan="2">Pluviometro riscaldato (modello PMB2/R-CAE)</th></tr>
<tr><td>Risoluzione</td><td>0.2mm di pioggia</td><td colspan="2" rowspan="4">Stesse caratteristiche di misura del modello descritto a sinistra (PMB2-CAE) più le caratteristiche elencate sotto.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Vaschetta basculante con appoggio a coltello</td></tr>
<tr><td>Bocca di raccolta</td><td>1000 cm^2</td></tr>
<tr><td colspan="2">Contatto magnetico reed</td></tr>
<tr><td>Campo di misura</td><td>0-300mm/h</td><td>Riscaldatore</td><td>Termostato da 350W, alimentazione 24V</td></tr>
<tr><td>Temperatura di lavoro</td><td>0-60°C</td><td>Funzionamento</td><td>Fino a -30°C</td></tr>
<tr><td>Dimensioni</td><td>385x584mm</td><td>Dimensioni</td><td>400x548mm</td></tr>
<tr><td>Peso</td><td>7 kg</td><td>Peso</td><td>10.9kg</td></tr>
</table>

FIGURA 3.6-PARTICOLARE DEL TERMOIGROMETRO INSTALLATO PRESSO LA STAZIONE DI CASELLE (TO) (SITO WEB A.R.P.A. PIEMONTE)

Descrizione termoigrometro (modello CAE-TU20, *figura 3.6*)

Il termoigrometro TU20 è un sensore completamente elettronico composto da un termometro e un igrometro: il primo misura la temperatura, il secondo l'umidità dell'aria. I due sensori che compongono il termoigrometro sono rispettivamente un termometro classe A e un igrometro il cui elemento sensibile è un condensatore con dielettrico polimerico a film sottile, la cui capacità elettrica varia in

maniera proporzionale all'umidità relativa. La struttura di contenimento è progettata per proteggere il sensore dall'usura provocata dalla radiazione solare e per garantirgli un'adeguata ventilazione, essenziale perché la rilevazione non venga falsata dal surriscaldamento dei componenti. La *tabella 3.5* riassume le caratteristiche dello strumento.

TABELLA 3.5-CARATTERISTICHE DEL TERMOIGROMETRO (A.R.P.A. PIEMONTE)

Termoigrometro		**Igrometro**		**Temometro aria schermato**	
Dimensioni	280(ϕ)x250mm	Campo di misura	0-100% U.R.	Elemento sensibile	PT100 1/3Din
Peso	1.2kg	Precisione a 25°C	2% fra 0 e 100% di U.R.	Campo di misura	-40 e +60°C
		Temp. Di lavoro	-20 e +50°C	Sensibilità	0.02°C
				Precisione	0.1°C a 0°C, 0.20°C su tutta la scala
				Influenza della radiaz. ambientale	<0.8°C

FIGURA 3.7-NIVOMETRO DELLA STAZIONE DI PRAGELATO (TO) (SITO WEB A.R.P.A. PIEMONTE)

Descrizione nivometro ad ultrasuoni (modello CAE-ULM20/N, *figura 3.7*)

Il nivometro a ultrasuoni è una versione specifica dell'idrometro ad ultrasuoni progettata per misurare l'aumento o la diminuzione del livello del manto nevoso; impiega il metodo ecometrico ad ultrasuoni: il tempo che l'impulso impiega a percorrere la distanza tra i sensori e la superficie del manto nevoso riferisce la misura dell'aumento o della diminuzione del suo livello. Il segnale viene filtrato dal software di elaborazione, che elimina le variazioni

correlate alle increspature locali del manto e alla temperatura dell'aria. Il nivometro è un modulo indipendente dotato di microprocessore: questo sistema ad intelligenza distribuita fa sì che già a livello del modulo venga eseguita una prima elaborazione dei dati che poi verranno presi in carico dalla stazione. In *tabella 3.6* vengono riportate le caratteristiche tecniche dello strumento.

TABELLA 3.6-CARATTERISTICHE DEL NIVOMETRO AD ULTRASUONI (A.R.P.A. PIEMONTE)

Nivometro ad ultrasuoni	
Range di misura	0-20m
Memoria Flash-Eprom dati	128KB (pari a circa un anno di dati)
Precisione di misura	0.2% della misura (tipicamente entro 1cm)
Risoluzione	1cm
Compensazione di temperatura	Tramite termometro interno alla stazione
Dimensioni	185(ϕ)x290mm
Peso	2.6kg

3.4 Descrizione della strumentazione di monitoraggio S.I.T.A.F.

Descrizione della strumentazione di controllo del coronamento e dello sperone roccioso occidentale

La descrizione è stata tratta dal Rapporto Interpretativo 01-2018 (mese di trasmissione giugno 2018) dell'impianto di monitoraggio del settore di coronamento e dello sperone roccioso occidentale della frana del Cassas da parte di S.I.T.A.F. & Musinet Engineering.

La rete di monitoraggio considera tre distinti impianti: due interessano la nicchia di distacco del fenomeno di dissesto principale (Cabine 1 e 2), il terzo la parete rocciosa che fronteggia l'area di servizio, la quale è posta esternamente al corpo di frana come illustrato in *figura 3.1.*

Con riferimento a giugno 2018 risultano operativi quattro su sei estensimetri della Cabina 1 (Es2, Es3, Es4, Es5) e i quattro estensimetri della Cabina 2 (Es7, Es8, Es12, Es13). Di contro non vengono acquisiti Es6, Es9 e Cl1 (Cabina 1) e Mg1 (Cabina 2). Lo scarico dati della memoria dell'acquisitore di Cabina 2 avviene manualmente, non essendo stato possibile ripristinare il modulo di trasmissione GPRS. La distribuzione degli strumenti è mostrata nella *figura 3.8*.

Per quanto riguarda lo sperone roccioso occidentale, nella seconda metà del 2016 sono state realizzate due postazioni ciascuna delle quali costituita da un acquisitore e quattro sensori: la Cabina 1, la quale è posta nel settore centro orientale della parete rocciosa considera i sensori Mg1, Mg2, Mg3 e Mg4 mentre la Cabina 2, la quale è posta nel settore centro occidentale della parete, contempla i sensori Mg5, Mg6, Mg7 e Mg8. Nel periodo autunnale del 2017, un secondo intervento ha portato alla realizzazione di due ulteriori postazioni, anch'esse attrezzate con quattro sensori ciascuna, che si possono così schematizzare: la Cabina 3, la quale è posta quasi al margine orientale della parete rocciosa, costituita da Mg9, Mg10, Mg11 e Mg12 e la Cabina 4, la quale è ubicata in posizione intermedia tra la Cabina 1 e la Cabina 2, rappresentata da Mg13, Mg14, Mg15 e Mg16. Anche in questo caso, le unità di acquisizione dati sono poste in prossimità del ciglio della scarpata e sono dotate di sistema di alimentazione con pannello solare e modem GPRS. Le informazioni rilevate vengono automaticamente trasmesse al server e rese disponibili per la consultazione on-line da parte del gestore del monitoraggio. L'ubicazione totale delle postazioni di controllo è riportata in *figura 3.9* e *figura 3.10*.

CABINA 1							CABINA 2				
Es2	Es3	Es4	Es5	Es6	Es9	Cl1	E12	Es13	Es7	Es8	Mg1
10/11/12	10/11/12	11/11/12	11/11/12	20/06/14	28/05/14	28/05/14	09/07/13	09/07/13	03/06/14	03/06/14	03/06/14

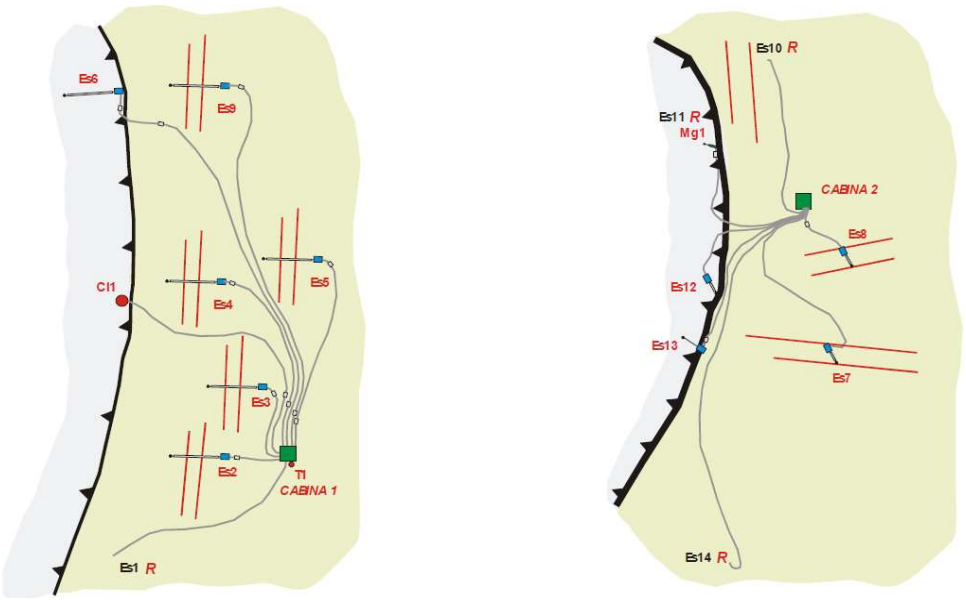


FIGURA 3.8-CORONAMENTO. UBICAZIONE SCHEMATICA DELLA STRUMENTAZIONE E DATA DI RIPRISTINO DEI SENSORI. R:STRUMENTO RIMOSSO; ES: ESTENSIMETRO A FILO; MG: FESSURIMETRO; CL: CLINOMETRO MONOASSIALE (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING, 2018)

FIGURA 3.9-SPERONE ROCCIOSO OCCIDENTALE. VISTA PANORAMICA E UBICAZIONE POSIZIONI DI MONITORAGGIO (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING, 2018)

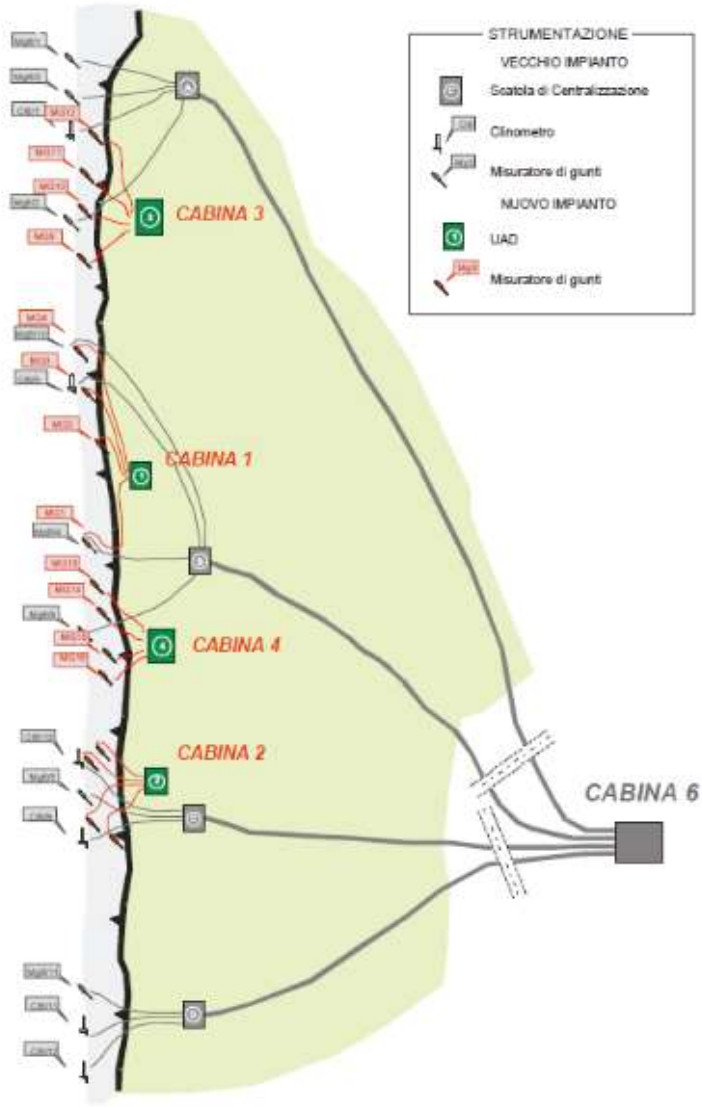


FIGURA 3.10-SPERONE ROCCIOSO OCCIDENTALE. UBICAZIONE SISTEMATICA DELLA STRUMENTAZIONE (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING, 2018)

Descrizione della strumentazione topografica di controllo dei movimenti superficiali

FIGURA 3.11-UBICAZIONE STAZIONI TOTALI (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING, 2017)

Con riferimento alla *figura 3.11*, nell'area in frana è presente una rete di monitoraggio topografica composta da un insieme di mire, ubicate in vari punti del corpo frana, i cui spostamenti sono monitorati da due stazioni totali.

Descrizione della rete di monitoraggio idrogeologica

La descrizione è stata tratta dal Rapporto Interpretativo 01-2018 (mese di trasmissione giugno 2018) dell'impianto di monitoraggio idrogeologico della frana del Cassas da parte di S.I.T.A.F. & Musinet Engineering eccetto che per il misuratore di portata in galleria al quale si è fatto riferimento ai dati forniti dal Prof. Vigna del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (D.I.A.T.I.) del Politecnico di Torino (B. Vigna, Gruppo di Idrogeologia Applicata del D.I.A.T.I.).

La rete di monitoraggio dei livelli di falda in origine considerava: sei punti di rilievo nell'ambito del corpo di frana (PzS1 – PzS2 – Pz3 – Pz4 - PzS5) e quattro punti di rilievo alla base del dissesto (Cas1 – Cas 2 – Cas 3 – Cas4). Le verticali PzS1 e PzS5 sono interrotte da diversi anni e non recuperabili ai fini del monitoraggio; la postazione Pz3 ha funzionato correttamente sino al giugno 2013 dopodiché la forte deformazione subita dalla tubazione ha reso inutilizzabile lo strumento. Nell'ottobre del 2013 è entrata in funzione una nuova verticale: denominata Pz6, che è posta in prossimità dell'imbocco della galleria drenante realizzata nel settore centrale del corpo di frana. Degli strumenti posti alla base del pendio solamente lo strumento Cas2 è funzionante. Esso è operativo dal settembre 2013 quando al suo interno è stato posizionato un nuovo sistema di rilievo automatico dei livelli. Le restati tre colonne non sono utilizzabili risultando di fatto interrotte e/o ostruite. Attualmente la rete considera quindi quattro punti di controllo attivi: PzS2, Pz4, Pz6, Cas2.

I misuratori di portata in origine erano tre: Q1 per il controllo della portata di una sorgente ubicata nel settore centrale dell'accumulo; Q2 a verifica della portata del ruscello presente alla base del dissesto e nel quale si raccolgono una parte significativa dei flussi superficiali circolanti nel corpo di frana e Q3 a controllare le portate drenate dalla galleria drenante messa in opera nel settore centro-sommitale del corpo di frana. Attualmente la strumentazione funzionante considera le postazioni Q2 e Q3.

Tutte le postazioni sono dotate di unità di acquisizione dati complete di modem GPRS per la trasmissione dei dati alla postazione di controllo di Bruzolo. Nel novembre 2013, in prossimità dell'imbocco della galleria drenante, è stato installato un pluviometro PL1. Lo strumento è funzionante dal maggio 2014.

La distribuzione degli strumenti è stata mostrata sia nelle precedenti figure, *figura 3.1* e *figura 3.2,* che nella *figura 3.12* dove, a differenza delle due figure precedenti, ci si concentra unicamente sugli

strumenti che monitorano il livello di falda e le portate e, utilizzando una diversa legenda a colori, si sintetizzano gli strumenti che, a dicembre 2017, sono funzionanti e quelli che non lo sono. La *tabella 10* fornisce inoltre informazioni sulla quota, longitudine e latitudine dei vari strumenti operativi mentre, nella *tabella 3.7* e nella *tabella 3.8,* sono riportate le caratteristiche della strumentazione utilizzata dalla S.I.T.A.F. & Musinet Engineering.

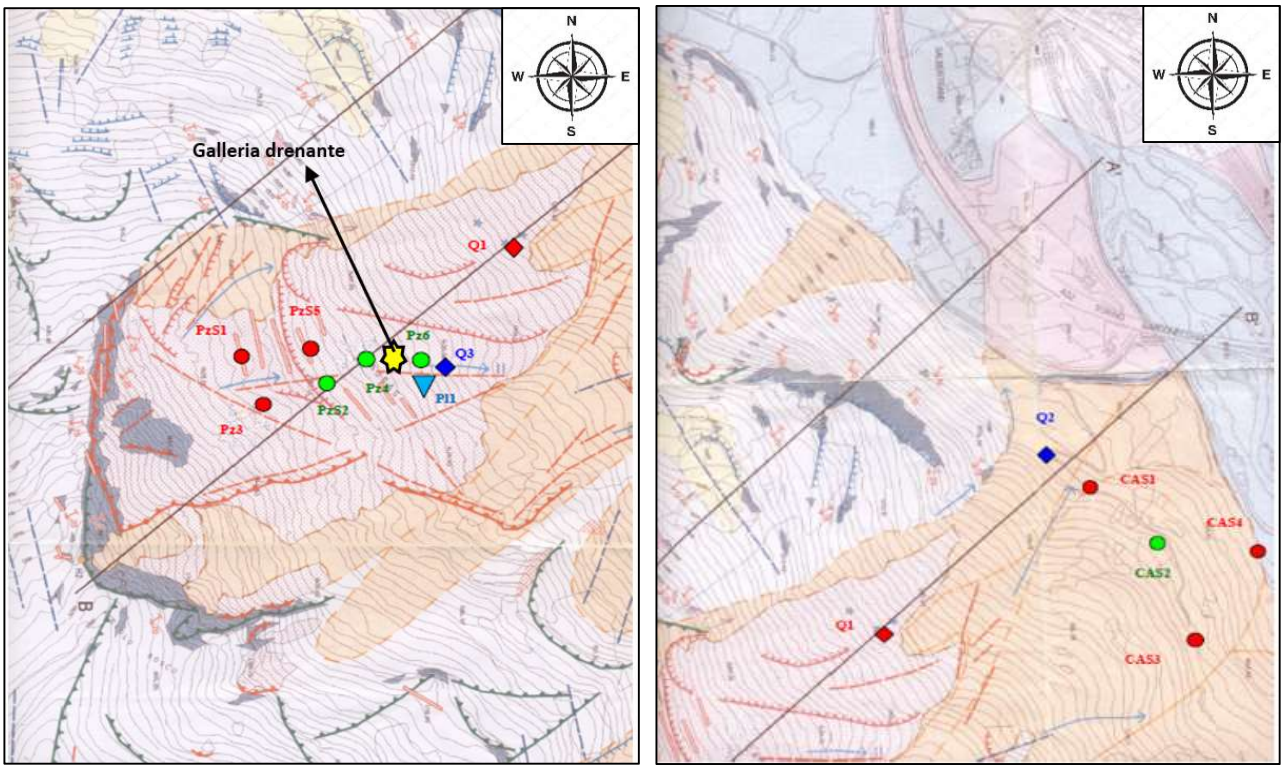


FIGURA 3.12-UBICAZIONE DELLA STRUMENTAZIONE: NELL'IMMAGINE DI SINISTRA È RAPPRESENTATA LA STRUMENTAZIONE NELLA PARTE SOMMITALE DELL'AREA IN FRANA MENTRE NELL'IMMAGINE DI DESTRA È RAPPRESENTATA LA STRUMENTAZIONE NELLA PARTE INFERIORE DELL'AREA IN FRANA; IN ROSSO: STRUMENTAZIONE DISMESSA; IN VERDE E AZZURRO: STRUMENTAZIONE FUNZIONANTE); (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING, 2018;)

TABELLA 3.7-UBICAZIONE MISURATORI DI PORTATA E DEI PIEZOMETRI

STRUMENTO	QUOTA [m.s.l.m.]	LATITUDINE (WGS84)	LONGITUDINE (WGS84)
Misuratore portata Q2	1045	45.071892	6.896856
Misuratore portata Q3	1390	45.068452	6.903368
Misuratore portata galleria	1490	45.067348	6.90375
Piezometro PZ3	1615	45.065345	6.905477
Piezometro PZS2	1550	45.066381	6.904257
Piezometro PZ4	1510	45.067039	6.903975
Piezometro PZ6	1430	45.068051	6.902981
Piezometro PzCas2	1085	45.073301	6.899316
Pluviometro PL1	1370	45.068990	6.903529
Termometro T1	1390	45.068452	6.903368

TABELLA 3.8-CARATTERISTICHE STRUMENTAZIONE IDROGEOLOGICA (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING 2018)

STRUMENTO	ACQUISITORE	TRASDUTTORE	Intervallo acquisizione [hh:mm]	Profondità di posa [m]
Q2	SIM MINILOG 2CH	STS-ATM/N/T	04:00	Piano Campagna
Q3	SIM 7353ML1213	OTR-s/n: P912502	01:00	Piano Campagna
Pz3	AC4_20 AC410958	STS-ATM/N-s/n: n.d.	08:00	63.0

PzS2	SIM MINLOG 4CH	STS-ATM/N-s/n: 937467	08:00	56.75
Pz4	SIM MINILOG 4CH	STS-ATM/N-s/n: 937464	08:00	53.0
Pz6	SIM 7353ML1213	STS-ATM/N-s/n: 937465	01:00	62.0
PzCas2	STS-DL/N-s/n: 766931	STS-DL/N-s/n: 766931	08:00	30.0
PL1	SIM 7353ML1213	mancante	01:00	Piano campagna
T1	SIM7353ML1213	OTR	01:00	Piano campagna

Nella *tabella 3.9* sono riportate le caratteristiche della strumentazione in foro attiva nel corso del 2017: profondità del tubo piezometrico, livello della falda a fine perforazione e profondità di posa del trasduttore di pressione.

TABELLA 3.9-CARATTERISTICHE DELLA STRUMENTAZIONE PIEZOMETRICA IN FORO (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING 2018)

STRUMENTO	Prof. Di fondo foro	Prof. Di posa	Livello piezometrico
PzS2	80.0	56.75	54.4
Pz4	80.0	53.0	50.6
Pz6	80.0	62.0	56.9

Dato che, nei capitoli successivi, i dati di tali strumenti saranno utilizzati per ricercare possibili correlazioni, si è deciso di riportare nelle seguenti pagine maggiori informazioni sulle caratteristiche degli acquisitori e dei trasduttori che si sono riusciti trovare dai rispettivi siti delle case fornitrici (SIM strumenti; STS Italia; OTR). In particolare, i dati che vengono riportati nel presente elaborato, sono stati prelevati dalle schede tecniche degli strumenti.

FIGURA 3.13-MINILOG, SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI (SITO WEB SIM STRUMENTI)

Minilog: sistema di acquisizione dati (*figura 3.13*)

L'unità di acquisizione dati MINILOG è un datalogger in grado di rispondere a tutte le esigenze e compatibile con tutta la strumentazione fornita dalla SIM STRUMENTI. Il MINILOG è alimentato da una batteria a 9V in grado di alimentare anche la maggior parte della strumentazione ad essa collegata.

FIGURA 3.14-TRASDUTTORE CON DATALOGGER DL/N70 (SITO WEB STS ITALIA)

Trasduttore con datalogger STS-DL/N70 (*figura 3.14*)

Il trasduttore con datalogger incorporato DL/N è particolarmente adatto al monitoraggio in continuo del livello delle acque di falda o di quelle di superficie. Questo dispositivo si avvale infatti di tre sistemi di misurazione integrati l'uno all'altro e concepiti per il rilevamento di valori quali il grado di conducibilità, la temperatura e la pressione.

FIGURA 3.15-TRASDUTTORE ATM/N (SITO WEB STS ITALIA)

Trasduttore ATM/N (*figura 3.15*)

E' un elemento di misura piezoresistivo e l'esecuzione avviene con cavo in PE o PUR. Le applicazioni tipiche sono per la misurazione del livello di riempimento e del livello in generale di pozzi, pozzi trivellati, contenitori, acque.

FIGURA 3.16-TRASDUTTORE ATM/N/T (SITO WEB STS ITALIA)

Traduttore di pressione per misure di livello ATM/N/T (*figura 3.16*)

Ha una costruzione compatta e robusta in acciaio Inox 1.4435 (AISI 316L) oppure in titanio (su richiesta), è un elemento di misura piezoresistivo, è usato per misure di pressione assoluta o relativa. Le applicazioni sono pozzi piezometrici, pianti fognari, serbatoi, laghi o fiumi e impianti di trattamento delle acque.

Trasduttore OTR: misuratore livello ad ultrasuoni (*figura 3.17*)

FIGURA 3.17-MISURATORE LIVELLO AD ULTRASUONI (SITO WEB OTR)

Il misuratore di livello idrometrico ad ultrasuoni è costituito da un sensore realizzato con un sistema ultrasonico in aria in grado di trasmettere una serie di impulsi e di riceverne l'eco di risposta il cui ritardo dipende dalla distanza che separa il sensore ultrasonico dalla superficie da misurare. Mediante l'elaborazione dei dati, il sensore è in grado di calcolare la distanza e di trasmetterla sotto forma di segnale elettrico in uscita. Le applicazioni sono per i livelli dei fiumi e per Stramazzi/Misuratori di portata.

Sonda di temperatura OTR (*figura 3.18*)

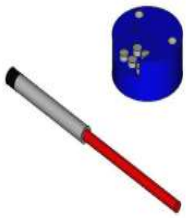


FIGURA 3.18-OTR SONDE DI TEMPERATURA (SITO WEB OTR)

Il circuito, di piccole dimensioni, presenta due morsettiere (un ingresso PT100 a 3 fili ed una uscita 4-20mA a 2 fili)v e un convertitore PT100 4-20mA. Per quanto riguarda le applicazioni, essi sono utilizzati per i seguenti scopi: monitoraggio generico delle temperature e correlazione tra temperatura e la misura di strumentazione per monitoraggio (e.g. inclinometri, flessurimetri etc.)

Descrizione della rete di monitoraggio inclinometrica

L'inclinometro è uno strumento di monitoraggio utilizzato per individuare gli spostamenti della massa franosa in profondità; in particolare, esso consente di localizzare con precisione la profondità entro cui avviene lo scorrimento.

Inoltre, dai dati forniti da tale strumento è possibile comprendere anche l'estensione della zona dove avviene lo scorrimento; infatti, se esso avviene ad una specifica profondità, si può parlare di superficie di scivolamento; d'altra parte, è possibile che lo scivolamento non si localizzi ad una specifica profondità ma anzi, coinvolga un certo intervallo di profondità; in tale situazione, è possibile avere la presenza di uno strato debole o in generale di una fascia dove si concentrano gli scorrimenti. Da questo strumento è possibile ottenere informazioni sull'entità, la direzione, e la velocità dello spostamento.

Come è possibile osservare dalla *figura 3.19*, l'inclinometro tradizionale è costituito da un tubo, solitamente di alluminio, e una sonda. Il tubo inclinometrico, nella parte inferiore, presenta un tappo di chiusura per non consentire l'infiltrazione dell'acqua.

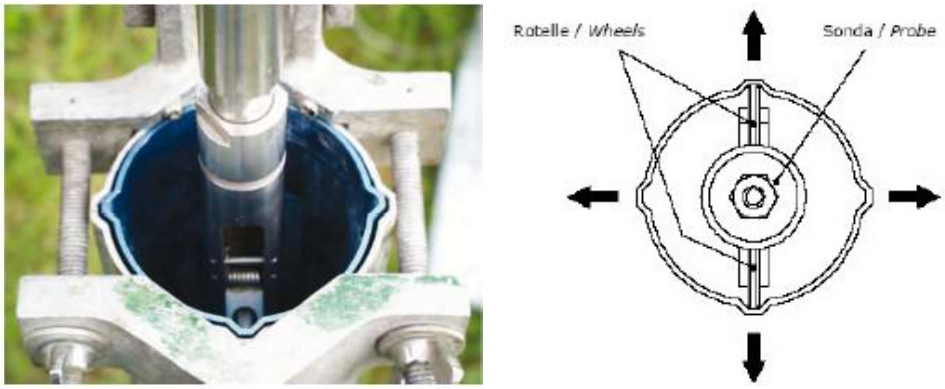


FIGURA 3.19-A DESTRA SI HA LA SEZIONE TRASVERSALE DEL TUBO INCLINOMETRICO CON SONDA INSERITA; A SINISTRA LA FOTO DIMOSTRATIVA (MATERIALE DIDATTICO DEL CORSO DI STABILITÀ DEI PENDII, PIRULLI 2018)

La tecnica di misura consiste nel calare la sonda lungo ciascuna delle due direzioni ortogonali definite dalle due coppie di guide; la sonda, procedendo dal basso verso l'alto, va a ricavare, per ogni direzione, in maniera indiretta tramite la misura dell'angolo di inclinazione rispetto alla verticale, il valore di spostamento e, sommando le componenti di spostamento, si trova l'entità dello spostamento complessivo ad ogni profondità. La *figura 3.20* riassume il procedimento appena descritto.

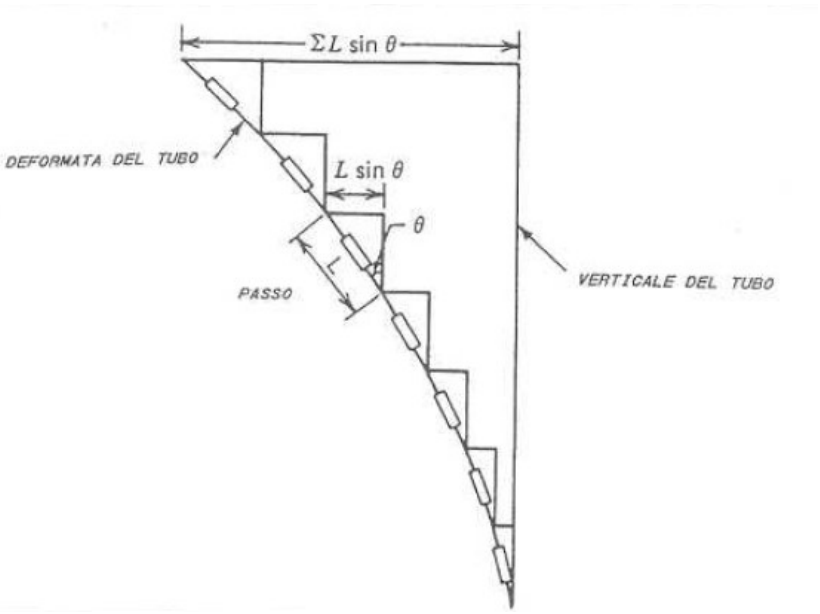


FIGURA 3.20- METODO PER OTTENERE IL MODULO DI SPOSTAMENTO (MATERIALE DIDATTICO DEL CORSO DI STABILITÀ DEI PENDII, PIRULLI M., 2018)

Ripetendo il procedimento anche per l'altra direzione ortogonale si hanno i due spostamenti s_x e s_y ad ogni profondità i quali vengono composti vettorialmente, ottenendo il modulo dello spostamento s, il suo azimut β e la sua inclinazione ϑ. La *figura 3.21* riassume quanto appena descritto.

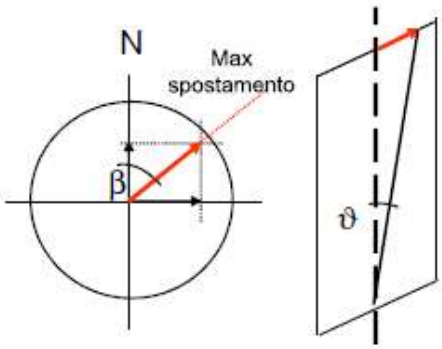


FIGURA 3.21-ELABORAZIONE DELLE MISURE INCLINOMETRICHE (MATERIALE DIDATTICO DEL CORSO DI STABILITÀ DEI PENDII, PIRULLI M., 2018)

Ove necessario, con riferimento alla *figura 3.22*, il tubo inclinometrico può essere attrezzato con una sonda fissa e, in questo caso, la trasmissione dei dati avviene in maniera automatica.

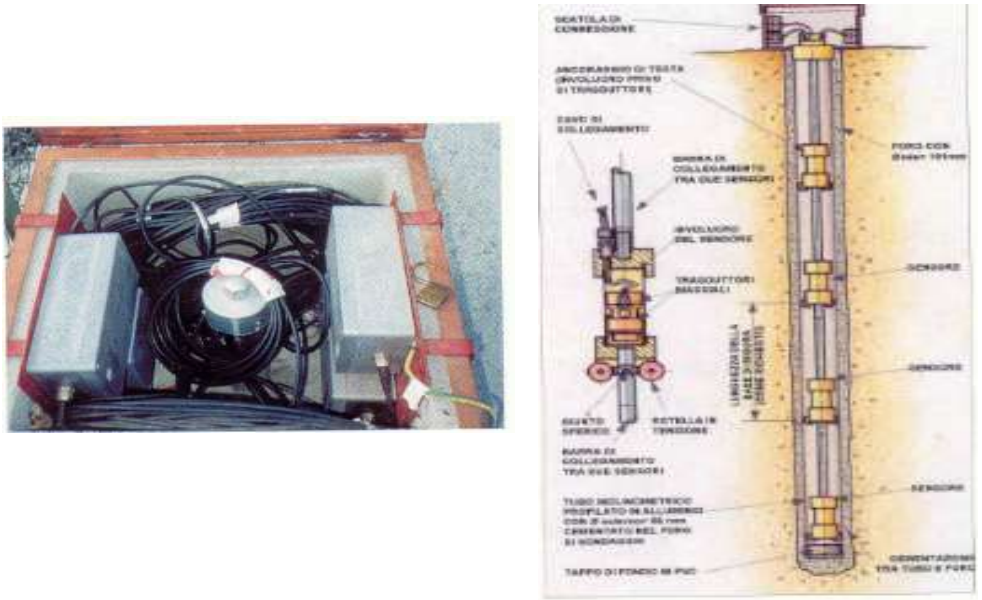


FIGURA 3.22-A SINISTRA SI HA LA TESTA DI UN TUBO INCLINOMETRICO ATTREZZATO CON SONDE FISSE; A DESTRA LO SCHEMA DI SONDA INCLINOMETRICA BIASSIALE, PER IL CONTROLLO DEI MOVIMENTI PROFONDI (MATERIALE DIDATTICO DEL CORSO DI STABILITÀ DEI PENDI, PIRULLI M., 2018)

Dato che, al momento d'installazione del tubo in sito, la tubazione potrebbe non essere del tutto verticale a causa di inevitabili errori di posizionamento, al momento dell'installazione si avrà una certa deviazione dalla verticale della tubazione; pertanto si effettua una "lettura di zero", che

consente di conoscere l'inclinazione iniziale del tubo ovvero l'inclinazione che il tubo presenta al momento dell'installazione in sito. Questa lettura è molto importante perché, nelle letture che verranno fatte in seguito, si depurerà la lettura assoluta rispetto alla lettura di zero per ottenere la lettura relativa cioè la variazione di inclinazione che il tubo ha subito a partire dal giorno della sua installazione in sito.

Si procede ora alla descrizione dello strumento di monitoraggio degli spostamenti in profondità chiamato colonna DMS (Differential Monitoring of Stability). La strumentazione è illustrata in *figura 3.23*. La DMS può essere pre-assemblata ed installata in sito formando una colonna strumentale, come una spina dorsale; i moduli facenti parte di questa colonna sono connessi tra loro da speciali giunti flessibili e ognuno di essi contiene uno o più sensori geotecnici e schede elettroniche per la raccolta e la trasmissione dei dati. Questi giunti flessibili che connettono i moduli, permettono di copiare la deformazione del foro mantenendo l'orientazione rispetto al sistema di riferimento definito durante l'installazione. A differenza dell'inclinometro dove la sonda si muoveva dal basso verso l'alto per eseguire la misura, nella colonna DMS la misura avviene contemporaneamente ad ogni profondità grazie all'inserimento di questa colonna di sensori. La tecnica, con cui si ricava lo spostamento alle varie profondità, è analoga a quella dell'inclinometro ovvero a partire da misure di angolo di deviazione dalla verticale viene ricavato in maniera indiretta, per mezzo di formule della trigonometria, lo spostamento relativo alle varie profondità.

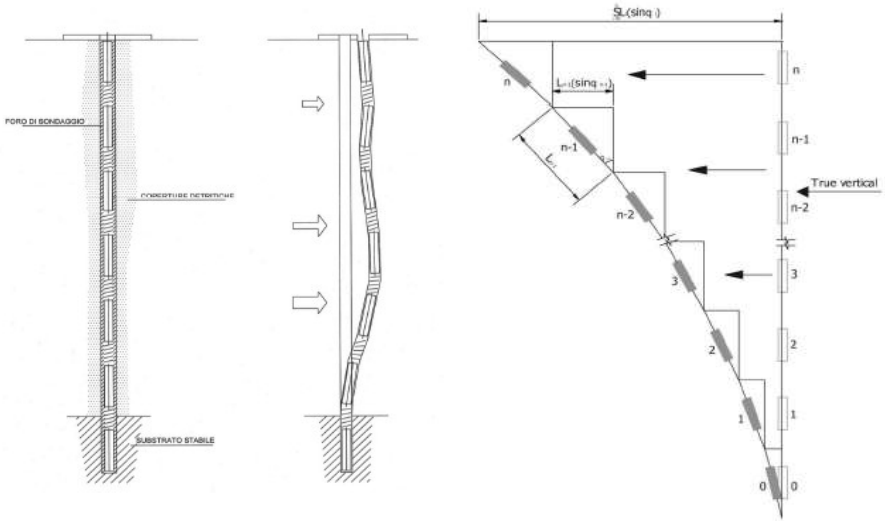


FIGURA 3.23-COLONNA DMS: A SINISTRA LO SCHEMA DI INSTALLAZIONE NEL TERRENO; AL CENTRO IL COMPORTAMENTO A SEGUITO DI TRASLAZIONE COPERTURE (FRANA); A DESTRA IL METODO PER OTTENERE IL MODULO DELLO SPOSTAMENTO (MATERIALE DIDATTICO CORSO DI STABILITÀ DEI PENDII, PIRULLI M., 2018)

Si procede ora alla descrizione della rete di monitoraggio inclinometrica S.I.T.A.F. La descrizione è stata tratta dal Rapporto Interpretativo 03-2018 (mese di trasmissione dicembre 2018) dell'impianto di monitoraggio inclinometrico della frana del Cassas da parte di S.I.T.A.F. & Musinet Engineering. La rete di monitoraggio inclinometrica, la cui posizione è illustrata in *figura 3.24*, si è evoluta negli anni come verrà nel seguito descritto.

Inizialmente era costituita da due verticali inclinometriche (I3 e I4) poste nella porzione medio-sommitale del corpo di frana. Nel 2001 si sono aggiunte due nuove colonne: una in prossimità del piede dell'accumulo I1, un'altra in posizione intermedia tra questa e le due poste superiormente I2.

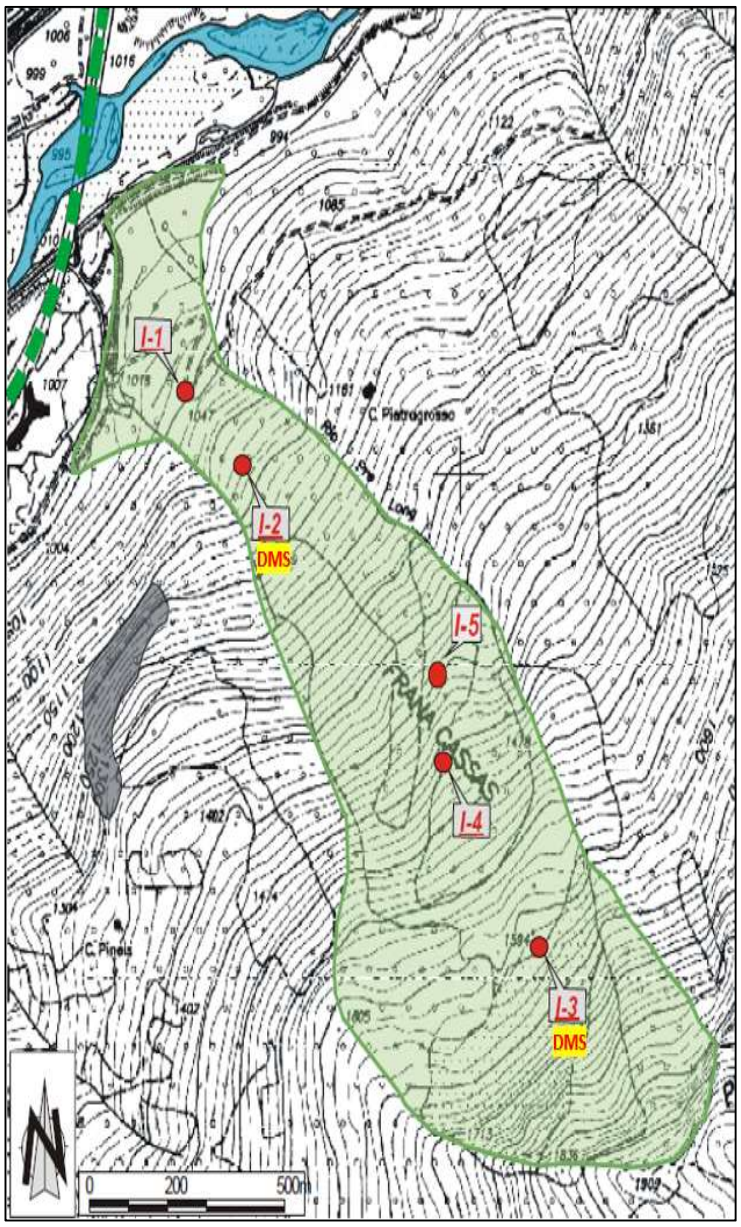


FIGURA 3.24-RETE INCLINOMETRICA (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING, 2018)

Dei quattro strumenti solamente l'I1 non ha intercettato superfici di movimento, gli altri hanno invece subito importanti deformazioni tali da renderne necessaria per alcuni la riperforazione ogni 2-4 anni. Le misure sono condotte a cadenza quadrimestrale e permettono di cogliere il trend cinematico che caratterizza su tempi stagionali il dissesto. Nel mese di ottobre del 2013 è stata posizionata una nuova colonna inclinometrica nel settore antistante la galleria drenante.

Durante la seconda ispezione del 2014 è stata rilevata la strozzatura della colonna I3 a 47.0 m da p.c., nel mese di gennaio del 2015 è stata posizionata all'interno della stessa verticale la strumentazione DMS che consente il monitoraggio in continuo dei parametri geotecnici in profondità. Questa strumentazione è stata inserita sino a 54 m di profondità

riuscendo a monitorare il piano di scivolamento storicamente riconosciuto.

Per quanto riguarda la colonna I2, a settembre 2017, anche lungo questa verticale è stata posizionata la strumentazione DMS che consente il monitoraggio in continuo dei parametri geotecnici in profondità sino a 40m dal p.c.

Infine, per quanto riguarda la colonna inclinometrica I5, durante la seconda ispezione del 2018 a causa degli eccessivi movimenti, essa non è risultata più ispezionabile manualmente. A metà giugno sono state installate nella colonna due sonde fisse collegate ad una centralina d'acquisizione; l'impianto è entrato in funzione il giorno 15/06/2018. L'acquisizione dei parametri è stata pianificata con una frequenza di campionamento pari a 1 ora. Ciascuna sonda fissa è in grado di rilevare l'inclinazione rispetto alla verticale su due assi distinti e tra loro ortogonali e che coincidono con le scanalature di guida della verticale inclinometrica. La configurazione della centralina di acquisizione è tale da rendere i dati rilevati già convertiti in gradi sessagesimali restituendo l'effettiva posizione geometrica dello strumento rispetto alla verticale. La *tabella 3.10* riassume le caratteristiche della strumentazione installata.

TABELLA 3.10-CARATTERISTICHE STRUMENTAZIONE COSTITUENTE L'IMPIANTO (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING, 2018)

	I1	I2**	I3	I4	I5
Quota testa tubo [m.s.l.m.]	1045	1115	1613	1430	1380
Quota piede tubo [m.s.l.m.]	985	1045	1553	1350	1280
Orientamento*	v	v	v	v	v
Lunghezza [m]	60.0	70.0	60.0	80.0	100.0
Ultima lettura utile [m]	59	65.5	60	80	100
Direzione guida di riferimento [°]	20N	310N	N	10N	325N
Azimut [°]	-20	50	0	-10	35
*v=verticale **=rilevata rottura colonna inclinometrica					

La strumentazione utilizzata per eseguire le ispezioni è costituita da un sistema inclinometrico definito dagli elementi indicati nella *tabella 3.11*.

TABELLA 3.11-DESCRIZIONE DELLE SONDE E CENTRALINE UTILIZZATE (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING, 2018)

STRUMENTO	MARCA	MODELLO	LETTURA TUBO CAMPIONE
Sonda inclinometrica manuale	Sis Geo	S 242 Sv 30	18/01/18
Sonda inclinometrica manuale	Sis Geo	S 242 Sv 30	21/06/18
Centralina di misura	Sis Geo	Archimede Datalogger	21/06/18
Centralina	Sis Geo	Archimede Datalogger	18/01/18

3.5 Galleria drenante

Questa opera di drenaggio profonda è entrata in funzione 2006. Le seguenti informazioni sono state tratte dal sito web dell'azienda che si è occupata dei lavori, ovvero la Musinet Engineering (Sito web Musinet Engineering).

Durante le fasi di monitoraggio, si sono registrate sul versante significative accelerazioni dei fenomeni, sia in termini di spostamenti con il tranciamento dei tubi inclinometrici appena installati, sia in termini di risalita dei livelli di falda; proprio questo ultimo aspetto ha condotto alla realizzazione di un'opera di drenaggio per il rallentamento del movimento.

La galleria drenante è stata scavata con mezzi tradizionali meccanici, supportati da espansori idraulici per le zone con roccia compatta, al fine di contenere il disturbo all'ammasso roccioso, senza utilizzo di esplosivo e di mezzi, tipo martellone, per limitare al massimo le vibrazioni. Le fasi di lavorazione possono essere così sintetizzate:

- preparazione della zona di cantiere con realizzazione di chiodature per il consolidamento del fronte di scavo e realizzazione di una berlinese tradizionale con micropali e tiranti attivi nella zona di imbocco della galleria; in *figura 3.25* e *figura 3.26* è illustrato l'imbocco della galleria;
- scavo della galleria procedendo per fasi successive di preconsolidamento dell'ammasso (mediante realizzazione sia al fronte che in calotta di chiodature con barre in vetroresina a perdere con lo scopo di consentire una prima iniezione e consolidare l'ammasso oggetto di scavo con saturazione dei vuoti) e successiva messa in opera di sostegni definitivi.

Sono stati posti in opera ombrelli di micropali di lunghezza 9m con sovrapposizione di 6m; gli ombrelli sono stati realizzati in serie di 10 elementi per i primi 50m di galleria e di 8 elementi nel seguito; sempre nei primi 50m sono stati realizzati ulteriori doppie coppie di micropali di lunghezza 6m a consolidamento dei piedritti;

Sono state posate in opera doppie centine formate da profilo HEA 140, con chiusura sul piano di calpestio della galleria con profilato UPN 160 e successiva posa in opera di uno strato di spritz beton armato strutturale con uno strato di rete elettrosaldata; la *figura 3.27* illustra il sistema di rinforzo descritto.

In fase di avanzamento si è proceduto alla realizzazione di drenaggi sub-orizzontali di lunghezza 30m con lo scopo di drenare il fronte evitando interferenze negative con lo scavo.

Al termine dello scavo, sono stati realizzati 10 dreni a ventaglio della lunghezza di 50m ciascuno per migliorare l'efficacia del drenaggio andando ad interessare una maggior volumetria di versante. In *figura 3*.28 è possibile osservare i 10 dreni disposti a ventaglio al termine dello scavo della galleria.

La galleria è stata realizzata con pendenza del 10 % in salita per consentire alle acque di uscire verso valle; le acque captate in galleria sono convogliate ad una piccola vasca in cemento armato munita di apposito stramazzo sfioratore a sezione controllata per la misurazione delle portate (*figura 3.29*) e successivamente allontanate con tubazione da 315mm fino al primo tornante, dove è posizionato un misuratore di portata automatico per la registrazione dei quantitativi di acque emunte.

Dalla *figura 3.30* si può ancora comprendere il tipo di materiale affiorante in superficie in corrispondenza dell'imbocco della galleria: sono sostanzialmente dei blocchi di roccia eterometrici in una matrice sabbiosa-limosa.

FIGURA 3.25-UBICAZIONE IMBOCCO DELLA GALLERIA (SITO WEB MUSINET ENGINEERING)

FIGURA 3.26-IMBOCCO DELLA GALLERIA CON REALIZZAZIONE DI DIAFRAMMA IN CALCESTRUZZO CON TIRANTI ATTIVI (CORTESIA PROF. VIGNA)

FIGURA 3.27-A)FOTOGRAFIA DELL'INTERNO DELLA GALLERIA; B)RINFORZO INTERNO DELLA GALLERIA DRENANTE (CORTESIA PROF. VIGNA)

FIGURA 3.28- DRENI SUB ORIZZONTALI AL TERMINE DELLO SCAVO DELLA GALLERIA DRENANTE (CORTESIA PROF. VIGNA)

FIGURA 3.29- VASCA IN CEMENTO ARMATO MUNITA DI STRAMAZZO SFIORATORE A SEZIONE CONTROLLATA PER LA MISURAZIONE DELLE PORTATE (CORTESIA PROF. VIGNA)

FIGURA 3.30- MATERIALE CIRCOSTANTE L'IMBOCCO DELLA GALLERIA DRENANTE (CORTESIA PROF. VIGNA)

CAPITOLO 4

4 Analisi preliminare dei dati di monitoraggio

4.1 Introduzione

L'analisi preliminare, che viene svolta in questo capitolo, consiste sostanzialmente nel riportare, in maniera sintetica, le principali informazioni che si sono potute estrarre dai vari report forniti dalla S.I.T.A.F. & Musinet Engineering. l report a disposizione permettono di trarre informazioni desunte dagli strumenti di monitoraggio nel periodo 2012-2018 e, ogni singolo report, analizza una sola tipologia di strumento di monitoraggio.

Si cercherà quindi di fornire le conclusioni generali riguardo:

1. l'evoluzione del quadro fessurativo presente nella zona di coronamento e nello sperone roccioso occidentale, con riferimento al *capitolo 4.2*;
2. la soggiacenza della falda e i valori di portata medi, minimi, massimi nel periodo 2012-2018, con riferimento al *capitolo 4.3*;
3. l'entità, direzione e profondità dei movimenti all'interno del corpo frana al fine di individuare le profondità rispetto alla quale è possibile che sia presente una superficie di scivolamento, con riferimento al *capitolo 4.4*.

4.2 Movimenti nel settore di coronamento e sperone roccioso occidentale

Partendo dall'analisi dei dati provenienti dal settore di coronamento e dallo sperone roccioso occidentale, la *tabella 4.1* e la *tabella 4.2* riassumono le principali informazioni che si sono potute trarre sugli strumenti presenti, sul periodo di osservazione e sulla comparsa o meno di spostamenti significativi.

I dati riportati, fanno riferimento al rapporto interpretativo 01-2018 sull'impianto di monitoraggio del coronamento e dello sperone occidentale della frana del Cassas, la cui trasmissione è avvenuta a giugno 2018 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering, 2018).

TABELLA 4.1-ESITO ANALISI DI DATI NEL CORONAMENTO

TRENCH CABINA 1		
Strumenti e periodo di osservazione	Es2, Es 3	Dal 10/11/12 al 04/06/18
	Es4, Es5	Dal 11/11/12 al 04/06/18
	Es6, Es9	Dal 28/05/14 al 04/06/18
	Cl1	Dal 28/05/14 al 04/06/18
Esito complessivo	Nessuno spostamento significativo	
TRENCH CABINA 2		
Strumenti e periodo di osservazione	Es 7, Es8	Dal 03/06/14 al 30/06/18
	Es 12, Es 13	Dal 10/07/13 al 30/06/18
	Mg1	Dal 03/06/14 al 30/06/18
Esito complessivo	Nessuno spostamento significativo	

TABELLA 4.2-ANALISI DATI SPERONE ROCCIOSO OCCIDENTALE

CABINA 1		
Strumenti e periodo di osservazione	Mg1, Mg2, Mg3 e Mg4	Dal 29/09/16 al 03/07/18
Esito complessivo	Nessuno spostamento significativo	
CABINA 2		

Strumenti e periodo di osservazione	Mg5, Mg6, Mg7 e Mg8	Dal 02/11/16 al 03/07/18
Esito complessivo	Nessuno spostamento significativo	
CABINA 3		
Strumenti e periodo di osservazione	Mg9, Mg10, Mg11 e Mg12	Dal 29/09/16 al 03/07/18
Esito complessivo	Nessuno spostamento significativo	
CABINA 4		
Strumenti e periodo di osservazione	Mg13, Mg14, Mg15 e Mg16	Dal 14/11/17 al 03/07/18
Esito complessivo	Nessuno spostamento significativo	

Come è possibile osservare dagli esiti complessivi degli strumenti ubicati nelle varie cabine del settore di coronamento e dello sperone roccioso occidentale, non è stato rilevato alcuno spostamento significativo.

4.3 Oscillazioni di portata e di soggiacenza della falda

Le informazioni contenute nel presente sotto capitolo, eccetto che per il misuratore di portata all'interno della galleria drenante le cui informazioni sono state fornite dal Prof. Vigna del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (D.I.A.T.I.) del Politecnico di Torino (B. Vigna, Gruppo di Idrogeologia Applicata del D.I.A.T.I.), fanno riferimento al rapporto interpretativo 01-2018 sull'impianto di monitoraggio idrogeologico della frana del Cassas, la cui trasmissione è avvenuta nel giugno 2018 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering).

Vengono di seguito riportate le conclusioni preliminari tratte dall'analisi dei dati nel periodo 2012-2018 dei vari strumenti idrogeologici. Nel corso del primo semestre del 2018 si è intervenuti su alcune criticità che interessavano l'impianto:

Nella *tabella 4.3*, *tabella 4.4*, *tabella 4.5* si riportano i valori medi, massimi e minimi acquisiti dai vari strumenti nel periodo 2012-2018.

TABELLA 4.3-MISURATORI DI PORTATA: PERIODO DI OSSERVAZIONE E ANALISI DATI (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING, 2018; B. VIGNA, GRUPPO DI IDROGEOLOGIA APPLICATA DEL D.I.A.T.I.)

STRUMENTO	PERIODO DI OSSERVAZIONE		ANALISI DATI: valori [l/min] (data associata)		
	dal	al	Medio	Massimo	Minimo
Q2	12/01/12	19/09/18	120	1564 (26/03/17)	14 (07/09/17)
Q3	12/01/12	19/09/18	22	87 (29/04/18)	0 (12/02/13)
Galleria	27/10/17	13/11/18	135	278 (29/04/18)	59 (08/10/18)

TABELLA 4.4-MISURATORI DEL LIVELLO DI SOGGIACENZA DELLA FALDA: PERIODO DI OSSERVAZIONE (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING, 2018)

STRUMENTO	PERIODO DI OSSERVAZIONE	
PzS2	19/10/12	31/07/18
Pz3	12/01/12	03/06/13
Pz4	19/10/12	10/01/18
Pz6	29/10/13	19/09/18
PzCas2	17/09/13	31/07/18

TABELLA 4.5-MISURATORI DEL LIVELLO DI SOGGIACENZA DELLA FALDA: ANALISI DEI DATI (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING, 2018)

STRUMENTO	ANALISI DATI: valori di soggiacenza [m] (data associata)			
	Medio	Massimo	Minimo	Oscillazione
PzS2	-54.32	-53.31 (31/05/18)	-54.58 (09/03/13)	1.27
Pz3	-61.60	-60.87 (12/01/12)	-61.93 (02/02/13)	1.05
Pz4	-50.58	-49.68 (01/12/16)	-50.98 (11/04/13)	1.30
Pz6	-54.02	-44.58 (04/06/18)	-58.19 (14/02/14)	13.61
PzCas2	-18.02	-16.91 (25/11/16)	-18.17 (05/03/14)	1.27

Si nota subito come il periodo primaverile dell'anno 2017 e 2018 sia di particolare interesse per i valori ottenuti dai misuratori di portata. Si nota infatti che in tale stagione i valori di portata, rilevati dai misuratori Q2, Q3 e dello strumento in galleria, siano decuplicati rispetto alla media nel primo misuratore di portata, quadruplicati nel secondo e raddoppiati nel terzo.

La primavera del 2018 è stata una stagione significativa anche per i valori rilevati dal piezometro Pz6 ubicato nel settore medio sommitale antistante la galleria drenante; ciò che infatti accadde nella primavera del 2018, fu un rapido innalzamento della soggiacenza della falda fino a -44.58m ovvero 10m al di sopra del valore medio rilevato nel periodo 2012-2018.

Il motivo di questo singolare comportamento rilevato negli strumenti Q2, Q3, dal misuratore di portata in galleria e Pz6 è da attribuirsi allo scioglimento nivale che solitamente avviene a partire dal mese di marzo/aprile. Verrà infatti dimostrato nel dettaglio nel *capitolo 5*, mediante grafici e correlazioni tra dati di stazioni meteorologiche e dati di soggiacenza e portata, come ciò che gioca un ruolo fondamentale nell'innalzamento dei valori di portata e di soggiacenza della falda non siano tanto le precipitazioni liquide brevi ed intense dei periodi estivi autunnali, bensì l'apporto di acqua derivante dal processo di fusione nivale primaverile e, nell'inverno 2018, la quantità di neve al suolo è stata decisamente maggiore rispetto agli anni precedenti.

4.4 Movimenti profondi del corpo frana

Le informazioni contenute nel presente sotto capitolo fanno riferimento al rapporto interpretativo 03-2018 sull'impianto di monitoraggio inclinometrico della frana del Cassas, la cui trasmissione è avvenuta nel dicembre 2018 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering, 2018).

Ricordando la strumentazione inclinometrica illustrata in *figura 3.24,* dei quattro inclinometri installati inizialmente (rispettivamente I1, I2, I3, I4) solamente l'I1 non ha intercettato superfici di scivolamento, gli altri hanno invece subito importanti deformazioni tali da rendere necessaria, per alcuni, la riperforazione ogni 2-4 anni.

Nel mese di ottobre del 2013 è stata posizionata una nuova colonna inclinometrica nel settore antistante la galleria drenante; la perforazione è stata eseguita a distruzione di nucleo e terebrata ad una profondità di 100 metri dal piano campagna.

Durante la seconda ispezione del 2014 è stata rilevata la strozzatura della colonna I3 a 47.0 m da p.c. Nel mese di gennaio del 2015 è stata posizionata all'interno della stessa verticale la strumentazione DMS (Differential Monitoring of Stability) che consente il monitoraggio in continuo dei parametri geotecnici in profondità; questa strumentazione è stata inserita sino a 54 m di profondità, riuscendo a monitorare il piano di scivolamento storicamente riconosciuto.

A settembre 2017, è stata perforata una nuova verticale in sostituzione della colonna I2, anche lungo questa verticale è stata posizionata la strumentazione DMS che consente il monitoraggio in continuo dei parametri geotecnici in profondità sino a 40 m dal p.c.

La *tabella 4.6* fornisce la sintesi di quanto appena scritto.

TABELLA 4.6-SINTESI DEI RISULTATI (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING, 2018)

	I1	I2*	I3*	I4**	I5
Evidenza movimento	no	si	si	si	si
Spost. Diff. Locale max. [mm]	4.5			59.3	72.0
Prof. Spost. Diff. Locale max [m]	48.0	13.0	47.0	59.0	47.0
Spost. Integr. Tratto deformato [mm]		120.0		147.6	125
Prof. Tratto deformato [m]		21.0-12.0	50.0-46.0	60.0-57.0	48.0-46.0
*=installazione sonda DMS **=rottura colonna					

I grafici ottenuti dagli strumenti inclinometrici, che permettono di visualizzare chiaramente le informazioni che sono contenute nella *tabella 4.6,* verranno riportati al *capitolo 5*. Si è deciso di riportarli al *capitolo 5* in modo da fornire non solo l'informazione inclinometrica riassunta nella *tabella 20* ma anche di correlare tale informazione con dati idrogeologici e meteorologici al fine di provare a dare una spiegazione di ciò che possa considerarsi il "motore" del movimento della massa franosa.

CAPITOLO 5

5 Analisi di dettaglio dei dati di monitoraggio

5.1 Introduzione

Nel presente capitolo si cercherà di mettere in correlazione i dati di monitoraggio provenienti dai diversi strumenti. L'obiettivo sarà quello di ricercare la causa principale dei movimenti in profondità che vengono rilevati dalla rete inclinometrica gestita da S.I.T.A.F. & Musinet Engineering. I dati che si avevano a disposizione per un'analisi di dettaglio coprivano l'intervallo le annate 2014-2018.

È stato compreso, che la più probabile causa scatenante dei movimenti in profondità è l'apporto di acqua derivante del processo di scioglimento nivale e da fenomeni piovosi di lunga durata; pertanto, l'analisi di dettaglio, e quindi la costruzione del presente capitolo, è strutturata nel seguente modo:

1. nel *capitolo 5.2* verrà condotta l'analisi dei dati meteorologici provenienti dalle stazioni Le Selle, Salbertrand e dal pluviometro PL1 e termometro T1. Ciò che si cercherà di realizzare, attraverso l'analisi di questi dati, sarà la distinzione tra precipitazione liquida e nivale;
2. nel *capitolo 5.3* si effettuerà la correlazione tra meteorologici (dato di precipitazione e di altezza neve al suolo) con i dati idrogeologici (ovvero dati di portata e di soggiacenza della falda);
3. nel *capitolo 5.4* verranno analizzati i dati inclinometrici al fine di individuare la posizione e l'orientamento delle superfici di scivolamento;
4. nel *capitolo 5.5* verrà mostrata la correlazione tra il dato idrogeologico di portata e/o di soggiacenza della falda con il dato inclinometrico in modo da comprendere se le rapide variazioni dei dati idrogeologici causino contestualmente un cambiamento nel trend degli spostamenti;
5. nel *capitolo 5.6* verrà mostrata la correlazione tra dato idrogeologico e meteorologico con conducibilità elettrica specifica e temperatura delle acque;
6. nel *capitolo 5.7* verrà condotta un'analisi chimica delle acque che indicherà un'importante presenza di solfati, la cui relazione con la formazione di deformazioni gravitative profonde verrà spiegata all'interno del *capitolo 5.8*.

5.2 Analisi dei dati meteorologici

I dati meteorologici delle stazioni Le Selle e Salbertrand sono stati ottenuti dall'A.R.P.A. Piemonte mentre i dati del pluviometro PL1 e del termometro T1 dalla S.I.T.A.F & Musinet Engineering.

Per le stazioni Le Selle e Salbertrand si avevano a disposizione dati di altezza neve al suolo sui 30 minuti espressi in metri, di temperatura dell'aria sui 30 minuti espressi in gradi Celsius, di precipitazione liquida sui 30 minuti espressi in millimetri, con riferimento al periodo 2014-2018; d'altra parte, per il pluviometro PL1 e il termometro T1, si avevano a disposizione dati dei livelli di pioggia su 1 ora e della temperatura dell'aria su 1 ora, i quali coprivano le finestre temporali che andavano dal 13/05/14 al 25/07/15 e dal 18/05/17 al 20/10/17.

Il *grafico 5.1* illustra l'andamento dell'altezza neve e della precipitazione liquida per l'anno 2014 nella stazione Le Selle mentre, il *grafico 5.2,* illustra l'andamento della precipitazione liquida e della temperatura dell'aria, sempre per l'anno 2014 per la stazione Le Selle.

Al fine di distinguere le precipitazioni nevose da quelle liquide, il dato più rappresentativo è sicuramente l'altezza di neve al suolo; infatti, se in un determinato giorno essa aumenta allora significa che, molto probabilmente, la precipitazione che è avvenuta nel giorno stesso è di tipo nevoso. D'altra parte, il dato di temperatura dell'aria non ha la stessa importanza che possiede il dato di altezza di neve al suolo nella distinzione tra precipitazione liquida e nevosa: è richiesta infatti una dettagliata conoscenza degli strati di atmosfera superiori per poter stabilire con certezza l'esatto grado Celsius in cui può venirsi a formare la precipitazione di tipo nevoso in una determinata località.

La neve si forma nell'alta atmosfera quando il vapore acqueo, a temperatura inferiore a 5 °C, brina attorno ai cosiddetti germi cristallini, passando dallo stato gassoso a quello solido, formando cristalli di ghiaccio, i quali cominciano a cadere verso il suolo quando il loro peso supera la spinta contraria di galleggiamento nell'aria e raggiungono il terreno senza fondersi. Questo accade quando la temperatura al suolo è in genere minore di 2 °C e negli strati intermedi non esistono temperature superiori a 0 °C dove la neve possa fondere e diventare acqua-neve o pioggia.

Si è deciso di considerare la precipitazione come precipitazione nevosa quando, in un determinato giorno, si registrava un incremento dell'altezza della neve e la temperatura dell'aria non superava i 2°C.

Il *grafico 5.3* illustra l'andamento dell'altezza neve con l'andamento delle precipitazioni liquide e nivali, per l'anno 2014 per la stazione Le Selle e, il *grafico 5.4,* illustra l'andamento della temperatura dell'aria con l'andamento delle precipitazioni liquide e nivali, dell'anno 2014 sempre per la stazione Le Selle.

I restanti grafici relativi alle altre stazioni e agli altri anni sono presenti in *allegato I*.

Si nota, praticamente in ogni grafico, che:

- il verificarsi di un evento di precipitazione nivale produce un rapido incremento dei valori di altezza di neve al suolo;
- se tale precipitazione nivale è una precipitazione isolata e la temperatura dell'aria tende, nelle ore e nei giorni successivi, a riportarsi ampiamente sopra lo zero, allora tale altezza di neve al suolo tende a ridursi tanto rapidamente quanto è cresciuta;
- se al contrario, come capita nei primi mesi invernali di ogni anno, ci sono diverse precipitazioni nivali ravvicinate e la temperatura dell'aria staziona principalmente al di sotto dello zero nelle ore e nei giorni successivi alla generica precipitazione nivale, allora l'altezza della neve tende a rimanere costante e a crescere al verificarsi di nuovi eventi di precipitazione nivale.

GRAFICO 5.1-STAZIONE LE SELLE: PRECIPITAZIONI E ALTEZZA NEVE, ANNO 2014

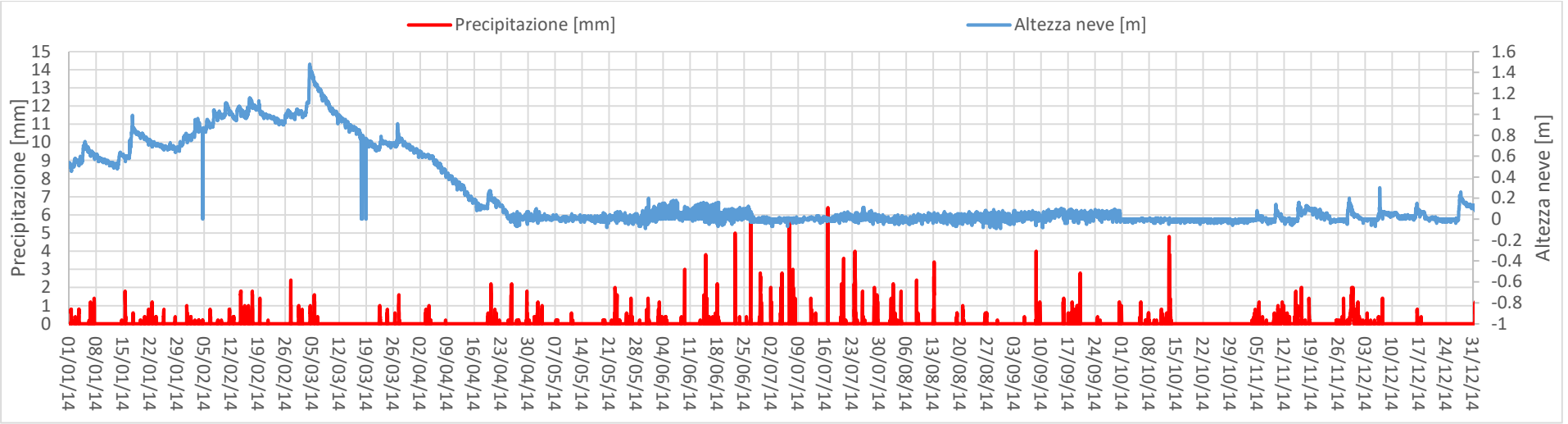


GRAFICO 5.2-STAZIONE LE SELLE: PRECIPITAZIONI E TEMPERATURA DELL'ARIA, ANNO 2014

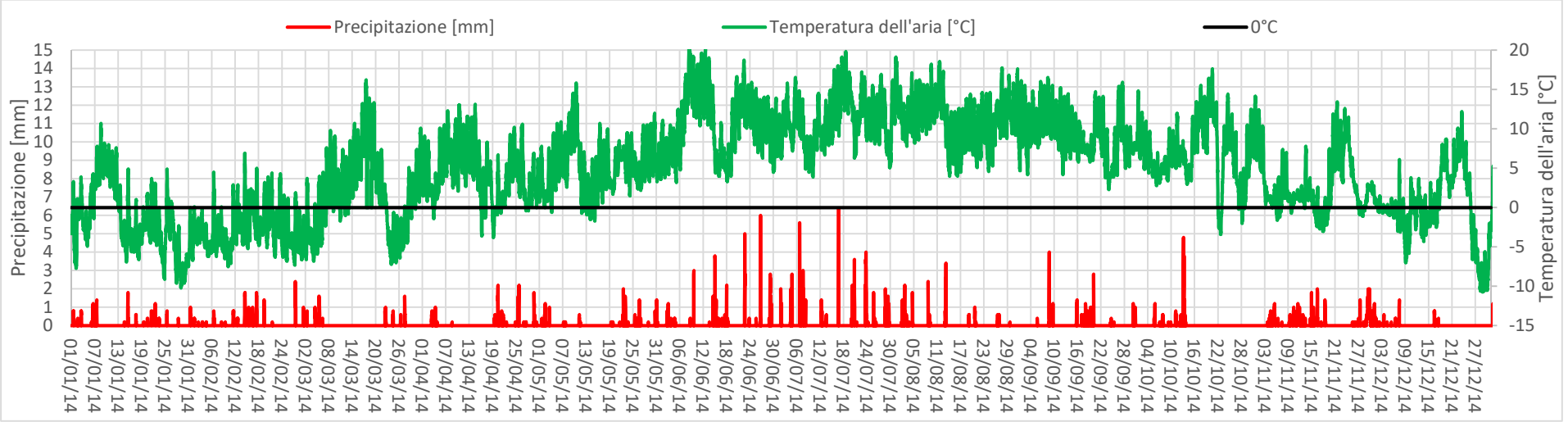


GRAFICO 5.3-STAZIONE LE SELLE: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E ALTEZZA NEVE, ANNO 2014

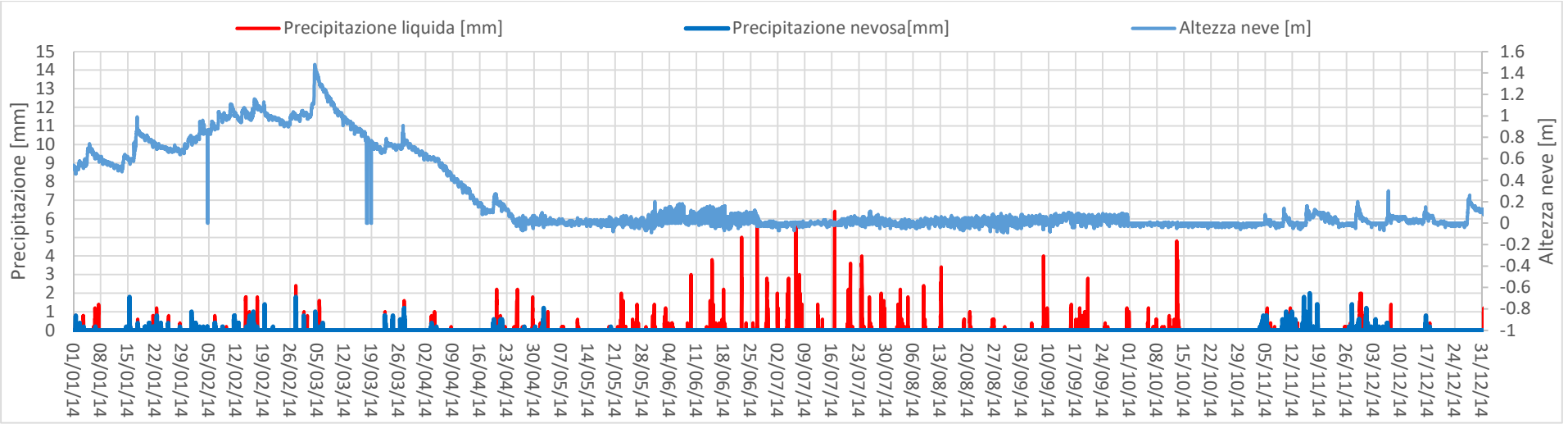
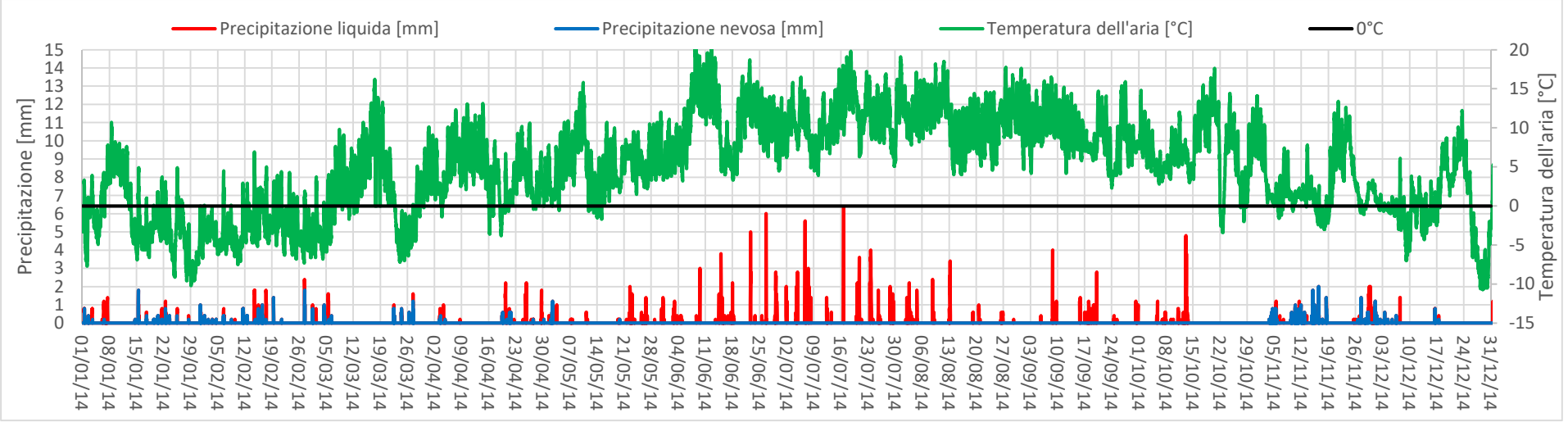


GRAFICO 5.4-STAZIONE LE SELLE: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E TEMPERATURA DELL'ARIA, ANNO 2014



5.3 Correlazione tra dati meteorologici e dati idrogeologici

Si è ricercata poi una possibile correlazione tra dati meteorologici (precipitazioni, temperatura dell'aria e altezza neve) e idrogeologici (portata e soggiacenza della falda) in quanto, al fine di verificare la stabilità di un versante, è importante controllare se esiste una quota parte consistente di acqua d'infiltrazione oppure, l'acqua che arriva dalle precipitazioni, subisce principalmente il fenomeno di evapotraspirazione e fenomeno di ruscellamento superficiale.

In base allo studio di Epifani (Epifani, 1991) sulla permeabilità degli strati che compongono il versante del Cassas riportato al *capitolo 2.7*, è lecito attendersi, data l'elevata permeabilità e grado di fratturazione, che ci sia un importante aliquota di acqua d'infiltrazione, che potrà quindi influire sul livello di soggiacenza della falda e sui valori di portata.

Le correlazioni che sono state realizzate sono elencate nel seguito:

- precipitazioni liquide/nevose e portata;
- altezza neve e portata;
- precipitazioni liquide/nevose e soggiacenza della falda;
- altezza neve e soggiacenza della falda;

I dati meteorologici, provenienti dalle varie stazioni, sono stati correlati con i dati idrogeologici, provenienti da piezometri e misuratori di portata, che provenivano da strumenti di monitoraggio quanto più possibile vicini alle stazioni stesse. Ne consegue che, i dati meteorologici e idrogeologici, sono stati correlati nel seguente modo:

- stazione Le Selle con:
  - ✓ misuratore di portata in galleria;
  - ✓ piezometro Pz4;
  - ✓ piezometro PzS2;
- stazione Salbertrand con:
  - ✓ misuratore di portata Q2;
  - ✓ misuratore di portata Q3;
  - ✓ piezometro Pz6;
  - ✓ piezometro PzCas2;
- Pluviometro PL1 e termometro T1:

- ✓ misuratore di portata Q3;
- ✓ piezometro PzS2;
- ✓ piezometro Pz4;
- ✓ piezometro Pz6.

Si riporta, dal *grafico 5.5* al *grafico 5.8,* un esempio di correlazione che è riferito all'anno 2018, tra i dati meteorologici della stazione Salbertrand ubicata al piede del pendio, i dati di portata del misuratore Q3 ubicato nel settore medio inferiore e del piezometro Pz6 ubicato nel settore antistante la galleria drenante. Per quanto riguarda l'anno 2018, la presenza di frequenti precipitazioni nevose, verificatesi nel periodo invernale, ha comportato un significativo accumulo di neve al suolo che, a seguito del periodo di scioglimento nivale, ha scaturito un consistente innalzamento dei valori di portata e soggiacenza della falda.

Gli altri grafici sono raccolti all'interno dell'*allegato II.*

GRAFICO 5.5-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI SALBERTRAND VS PORTATA DI Q3, ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO-SETTEMBRE)

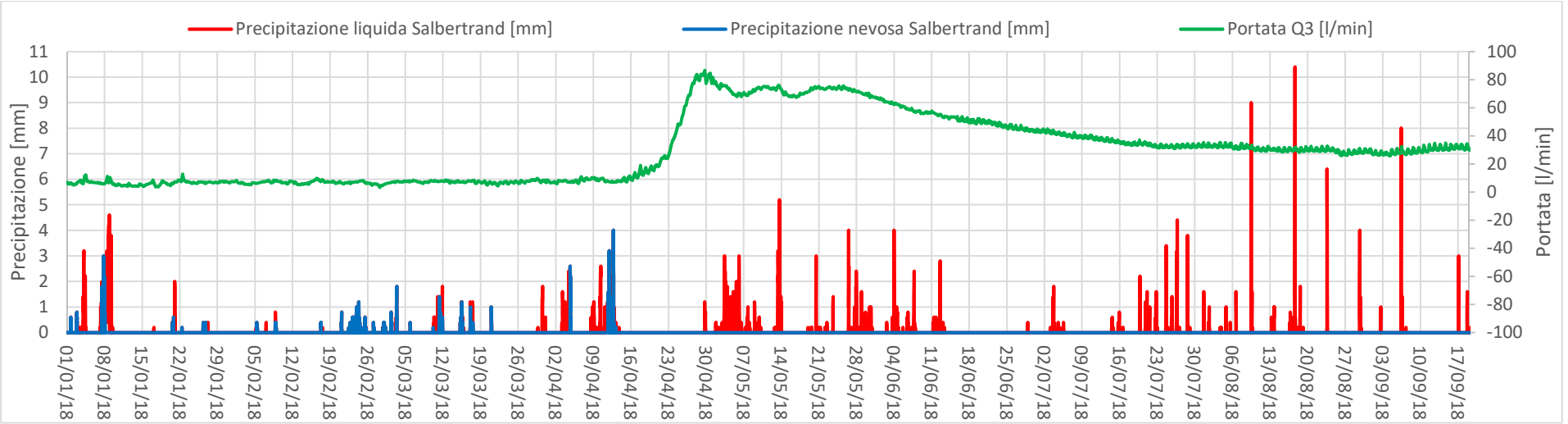


GRAFICO 5.6-ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND VS PORTATA DI Q3, ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO-SETTEMBRE)

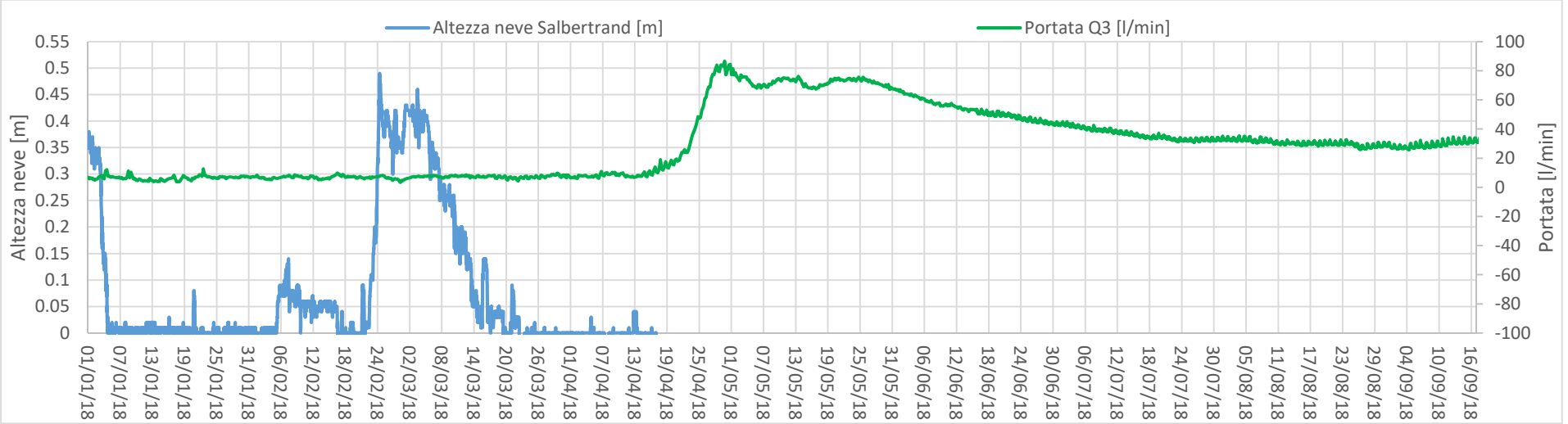


GRAFICO 5.7-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI SALBERTRAND VS SOGGIACENZA DI PZ6, ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO-SETTEMBRE)

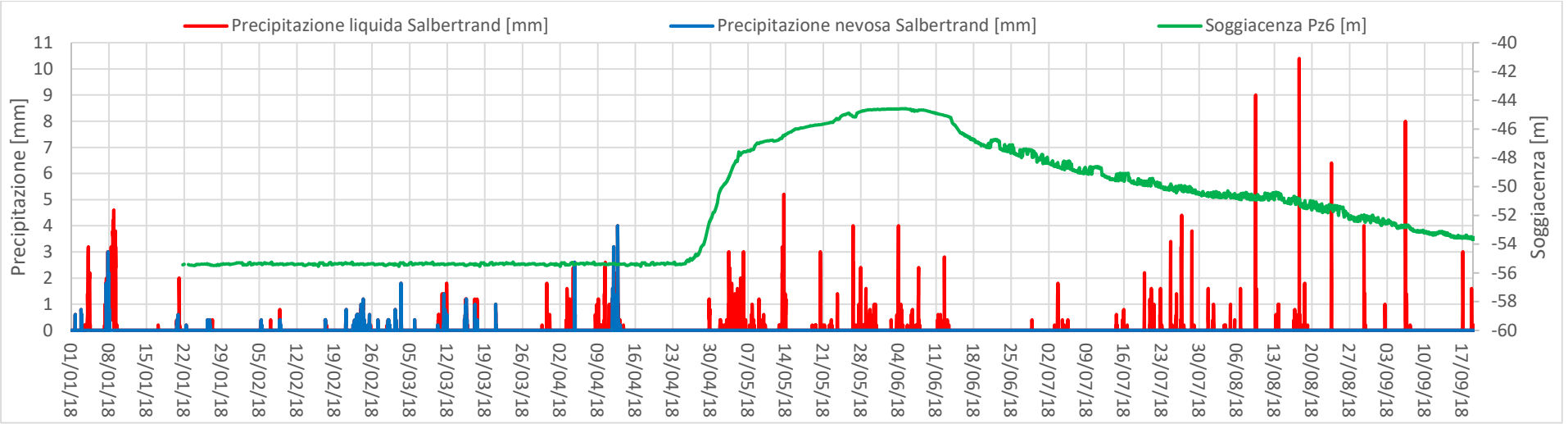
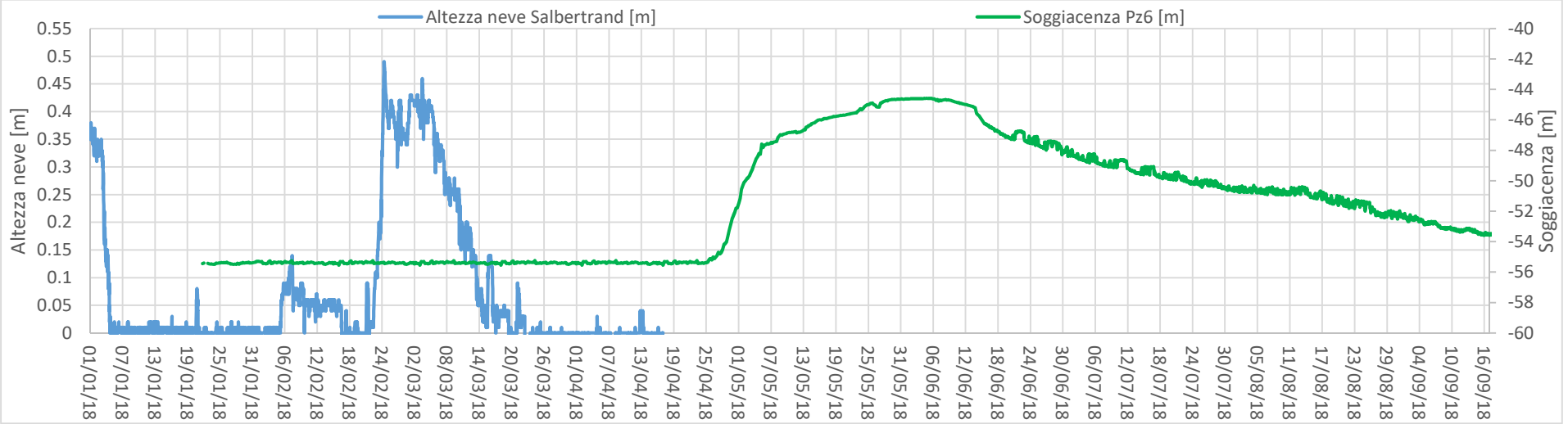


GRAFICO 5.8-ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND VS SOGGIACENZA DI PZ6, ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO-SETTEMBRE)



Dall'insieme di grafici raccolti in *allegato II* si nota che, per quanto riguarda il comportamento della falda, la principale causa dell'innalzamento è legata all'apporto di acqua entrante nel sottosuolo derivante dallo scioglimento delle nevi e dagli eventi di precipitazione liquida del periodo autunnale-invernale. D'altra parte, in presenza di brevi ed intense precipitazioni liquide, tipiche del periodo estivo-autunnale, la soggiacenza della falda non subisce significative variazioni proprio perché l'apporto di acqua meteorica viene ridotto tramite i processi di evapotraspirazione, i quali si rivelano molto intensi nella stagione estiva grazie alle elevate temperature. Invece, la presenza di eventi di precipitazione liquida a cavallo tra la stagione autunnale e invernale, ha una maggiore influenza sulla soggiacenza della falda, proprio perché il processo di evapotraspirazione si rivela meno intenso rispetto alla stagione estiva viste le minori temperature. Si riporta nel *grafico 5.9* l'incremento della soggiacenza della falda che si è verificata a seguito dell'importante apporto nevoso dell'inverno 2018 in cui il piezometro Pz6, ubicato nel settore antistante la galleria drenante, ha registrato un significativo incremento della soggiacenza della falda.

Dall'insieme di grafici raccolti in *allegato II* si nota che, per quanto riguarda il comportamento della portata, si sono registrati due diversi comportamenti nel misuratore Q2, ubicato al piede del versante, rispetto ai misuratori Q3 e quello presente nella galleria drenante, ubicati nella porzione mediana del versante. Il misuratore Q2 si rivela più sensibile al verificarsi di eventi di precipitazione liquida; si nota infatti come l'andamento della portata Q2 sia costellato da salti di portata contestuali all'innescarsi di eventi di precipitazione liquida. D'altra parte, l'entità dei salti nel misuratore Q3 e nel misuratore in galleria, al verificarsi di questi eventi di precipitazione liquida, è decisamente meno evidente rispetto a quelli verificatisi nel misuratore Q2; il misuratore Q3 e il misuratore in galleria incrementano significativamente il valore di portata in seguito al processo di scioglimento nivale. Una possibile spiegazione può essere legata all'ubicazione dei misuratori medesimi: infatti, il misuratore Q2 ha il compito di monitorare la portata del ruscello presente alla base del dissesto mentre, il misuratore Q3 e il misuratore in galleria, hanno il compito di controllare le portate drenate dalla galleria drenante messa in opera nel settore centro-sommitale del corpo frana; è quindi lecito attendersi delle maggiori portate rilevate durante i periodi di pioggia sulla postazione Q2 proprio perché, vista anche la forma dell'area in frana, l'acqua raccolta nei vari settori superiori va a convogliarsi al piede del versante. Si riporta nel *grafico 5.10* un confronto tra gli andamenti di questi tre misuratori di portata nell'anno 2018.

GRAFICO 5.9-PRECIPITAZIONI DI SALBERTRAND VS SOGGIACENZA DI PZS2, PZ6 E PZCAS2, ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO-LUGLIO)

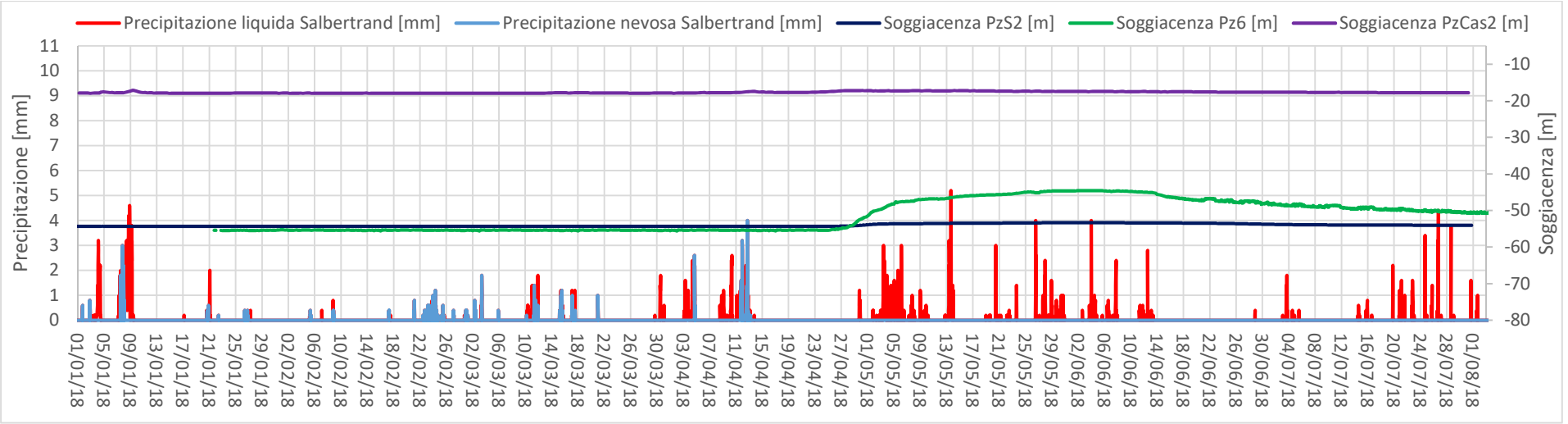
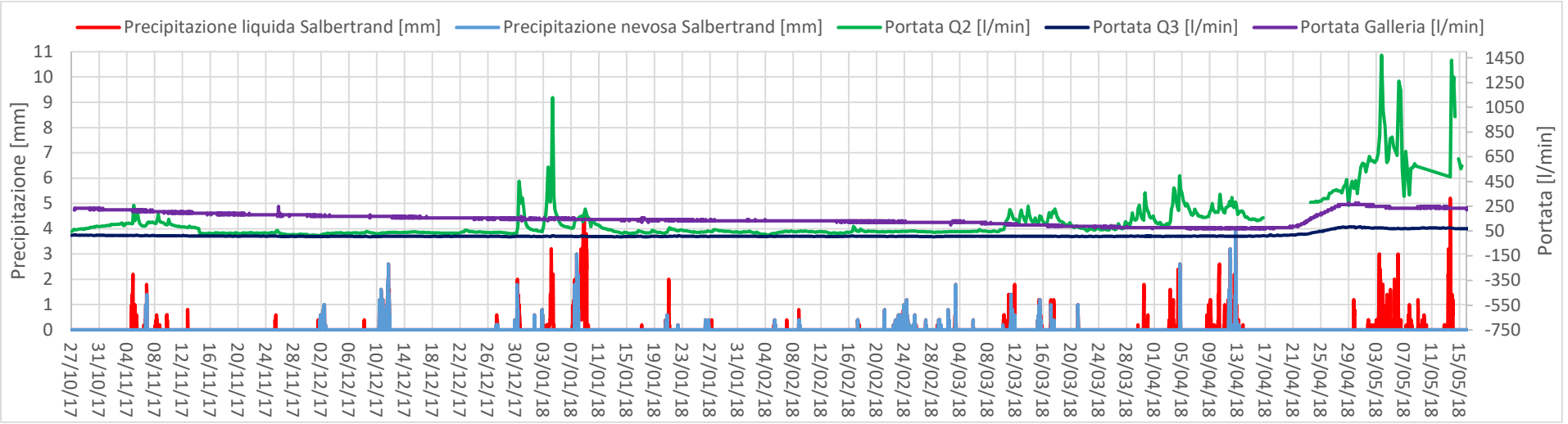


GRAFICO 5.10-PRECIPITAZIONI DI SALBERTRAND VS PORTATA DI Q2, Q3 E GALLERIA, ANNO 2017-2018



5.4 Analisi dei dati inclinometrici

Il presente capitolo, realizzato mediante i dati riportati nei quindici report inclinometrici messi a disposizione dalla S.I.T.A.F. & Musinet Engineering, ha l'obiettivo di sintetizzare le principali informazioni sulle cinque colonne inclinometriche dall'anno 2014 all'anno 2018. Al fine di consentire la migliore comprensione e sintesi dei dati analizzati, esso è stato suddiviso in cinque parti ognuna riferita ad una colonna inclinometrica analizzata dal 2014 al 2018.

Riprendendo la *figura 3.24,* la rete di monitoraggio inclinometrica è composta da cinque verticali elencate nel seguente ordine: la colonna I1 è posta in prossimità del piede d'accumulo, la colonna I2 è posta in una posizione medio inferiore dell'area in frana, le colonne I3 e I4 sono poste nella parte medio sommitale e la colonna I5 posta nel settore antistante la galleria drenante.

In ogni report inclinometrico, per quanto riguarda le misure inclinometriche manuali condotte a cadenza quadrimestrale, sono presenti dei grafici di spostamento cumulativo e differenziale dove vengono diagrammate cinque curve e, la curva più recente, viene confrontata con le quattro restanti curve rilevate nei mesi e anni precedenti; in altre parole, la curva più recente è stata messa a confronto con le precedenti quattro curve relative all'ultimo anno e mezzo di dati. D'altra parte, le strumentazioni DMS, hanno permesso invece di fornire dati con una maggiore frequenza: infatti, si avevano curve a cadenza mensile e, in prossimità dell'intervallo di profondità in cui si ritiene l'esistenza di una superficie di scivolamento, si avevano a disposizione delle cumulate di spostamento il cui dato è stato fornito con frequenza di campionamento di 12 ore.

Si ricorda nuovamente che, per l'inclinometro I2, non si avevano dati a disposizione riguardo letture inclinometriche manuali fino al termine dell'anno 2017, in quanto non è mai stata ripristinata la rottura che è avvenuta nel 2009.

5.4.1 Colonna inclinometrica I1

In *figura 5.1* sono illustrate le caratteristiche dello strumento e la lettura di riferimento risale alla data 29/10/2001.

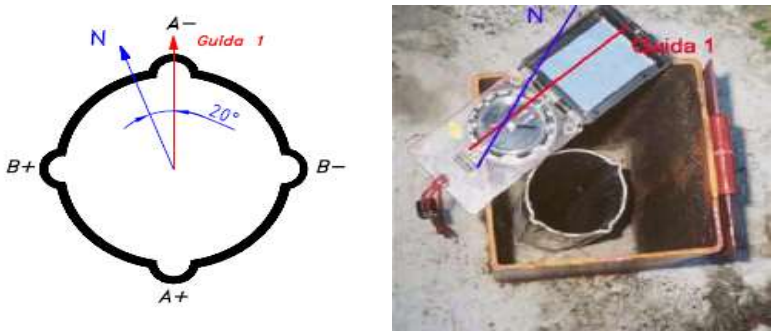


FIGURA 5.1-CARATTERISTICHE STRUMENTO I1: ORIENTAZIONE E PARTICOLARE FOTOGRAFICO (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING

Partendo dalla colonna inclinometrica I1, essa non mai riscontrato anomalie imputabili la presenza di piani di scivolamento. Nella *tabella 5.1* sono riassunte le informazioni tratte dai vari report, dove con "SDL max" s'intende lo spostamento differenziale locale massimo, con "SDI max" s'intende lo spostamento differenziale integrale massimo, con "Presenza PS" s'intende la presenza di piani di scivolamento e con "NO*" s'intende che non vi è la presenza di piani di scivolamento tuttavia non si è riusciti a calare la sonda sotto i 40m lungo le guide 1 e 3.

TABELLA 5.1-SINTESI DELLE LETTURE INCLINOMETRICHE MANUALI DELLA COLONNA INCLINOMETRICA I1 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

Lettura	SDL max [m]	Prof. SDL max [m]	SDI max da testa tubo [mm]	Presenza PS
23/04/2014	4.4	1	34.7	NO
15/07/2014	4	1	33.5	NO
06/10/2014	4	1	36.5	NO
30/05/2015	4.1	1	35.1	NO
07/07/2015	4.3	1	34.9	NO
01/10/2015	4.3	1	36.2	NO
13/04/2016	2.8	1.5	45.2	NO
01/08/2016	4.2	1	40.4	NO*
18/10/2016	4.1	1	40.4	NO*
15/05/2017	4.8	48	50.2	NO*
25/07/2017	4.8	48	48.2	NO*
27/11/2017	4.9	48	52	NO*
22/05/2018	4.8	48	54.4	NO*
30/07/2018	4.5	48	47.8	NO*
03/12/2018	4.5	48	57.8	NO*

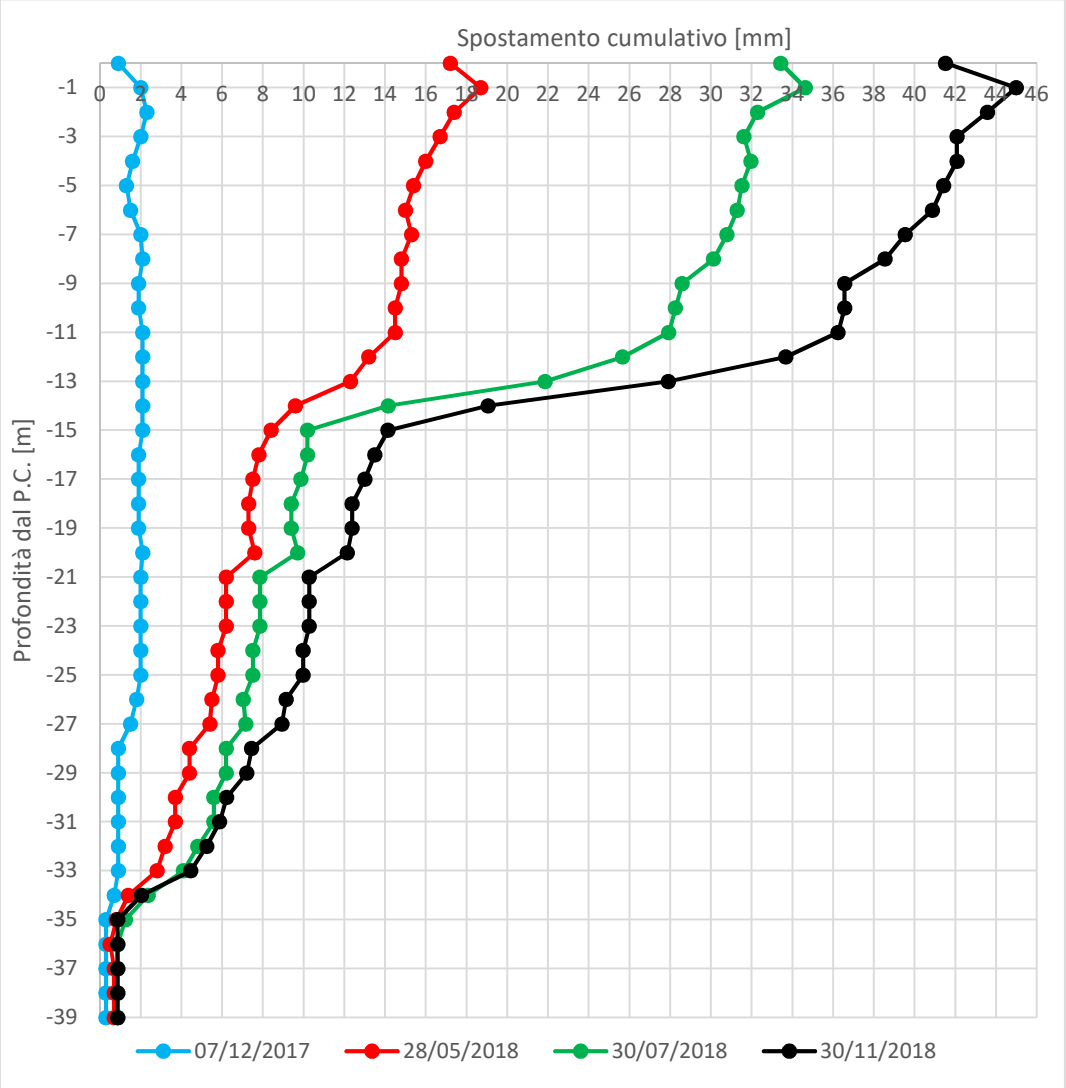
Si riportano, all'interno dell'*allegato III*, le curve di spostamento ottenute dalle letture manuali a cadenza quadrimestrale.

5.4.2 Colonna inclinometrica I2

Per la colonna inclinometrica I2, durante la prima lettura del 2009 eseguita il 05/06/09, è stata rilevata la rottura della colonna inclinometrica a -12.0 m dal piano campagna e, fino all'anno 2017 non si sono estratti dati da tale verticale. Ad ottobre del 2017 (21/10/17) è stata collocata, lungo la verticale inclinometrica, la colonna DMS che consente il monitoraggio in continuo lungo tutta la lunghezza dei parametri geotecnici sino a 40 metri dal p.c. La calibrazione della sonda è avvenuta il 28/10/17 e la data di scarico è stata il 07/12/2017.

È riportato il *grafico 5.11,* il quale illustra lo spostamento cumulativo al variare della profondità mentre in *allegato III* è presente anche il grafico di spostamento differenziale e il diagramma polare cumulativo. Si ritrova lo spostamento maggiore a 13m da p.c. con direzione 320°N e inizio del settore di deformazione a partire da 32m sempre in direzione 320°N.

GRAFICO 5.11-MODULO DELLO SPOSTAMENTO CUMULATIVO DMS-I2, PERIODO 2017-2018 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)



5.4.3 Colonna inclinometrica I3

In *figura 5.2* sono illustrate le caratteristiche dello strumento e la lettura di riferimento risale alla data 13/09/2010.

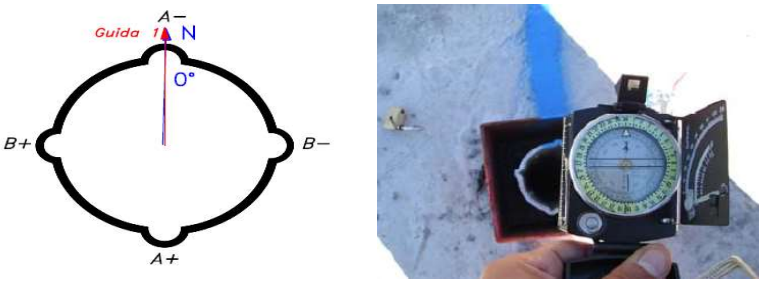


FIGURA 5.2- CARATTERISTICHE STRUMENTO I3: ORIENTAZIONE E PARTICOLARE FOTOGRAFICO (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

I grafici relativi alle letture inclinometriche manuali, eseguite tra il 2014 e il 2015, sono illustrati in *allegato III*; da essi si evince la presenza della superficie di scivolamento a 47m da p.c. e direzione di movimento 330°N.

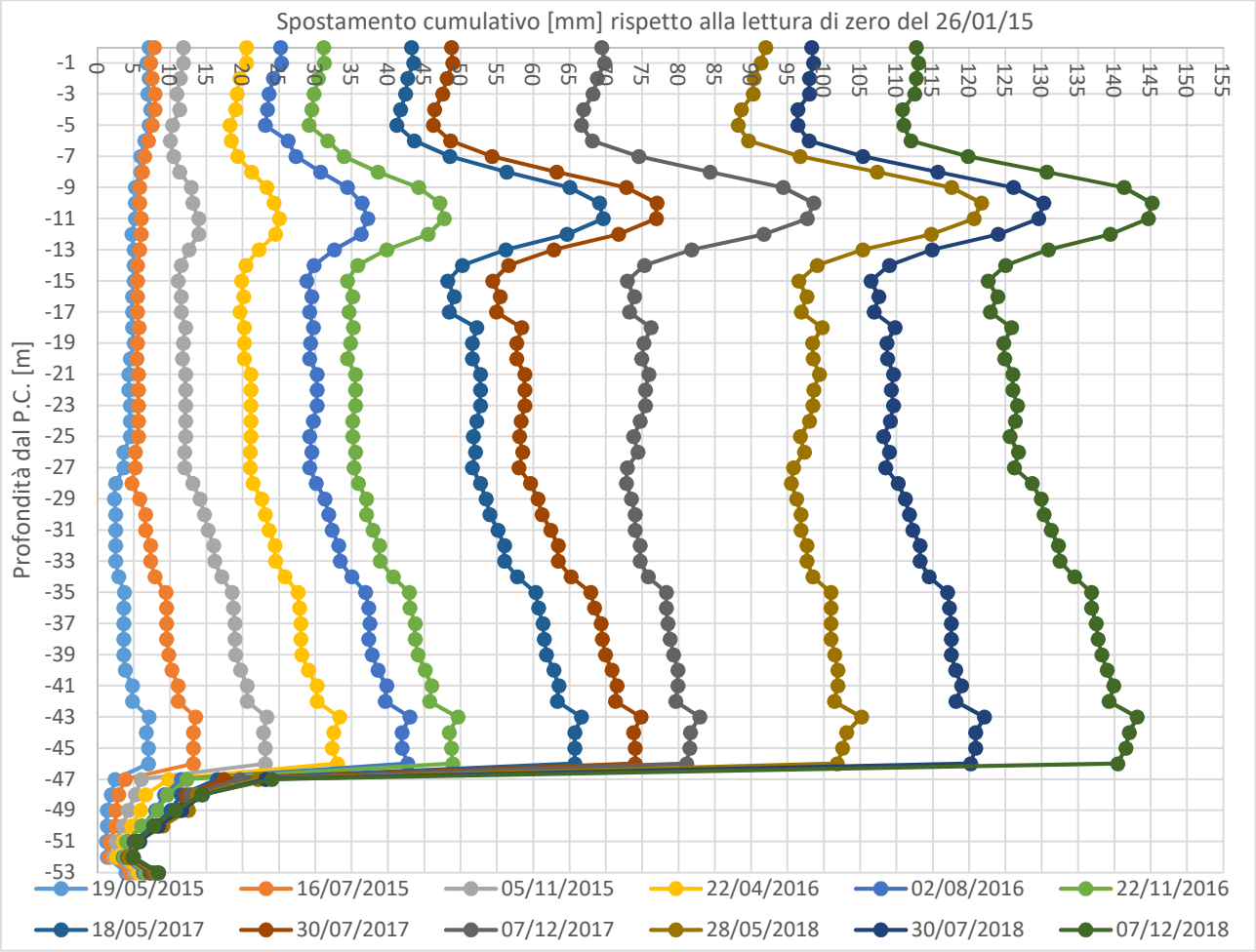
A gennaio 2015 è stata installata la sonda DMS che ha consentito il monitoraggio in continuo lungo tutta la lunghezza dei parametri geotecnici sino a 54 metri dal p.c. La *tabella 5.2* riassume i risultati ottenuti dalla lettura dei vari report inclinometrici e, con SC e SDL si intende lo spostamento cumulato e lo spostamento differenziale locale rispetto alla lettura del 26/01/15.

TABELLA 5.2-RIASSUNTO LETTURE QUADRIMESTRALE DMS-I3, PERIODO 2015-2018, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

Lettura	Prof. Zona di scivolamento	Direzione scivolamento	SC [mm]rxp 26/01/2015	SDL [mm] rxp 26/01/2015	Falda
19/05/2015	46-47	300°N	7	6.1	NO
16/07/2015	46-47	300°N	13.4	13.4	NO
05/11/2015	46-47	300°N	23.1	23.8	NO
22/04/2016	46-47	300°N	33	35.7	NO
02/08/2016	46-47	300°N	42.7	45.3	NO
22/11/2016	46-47	300°N	48.9	52.7	NO
18/05/2017	46-47	300°N	65.7	72.5	NO
30/07/2017	46-47	300°N	74	81.6	NO
07/12/2017	46-47	300°N	81.1	91.1	NO
28/05/2018	46-47	300°N	102.8	114.55	NO
31/07/2018	46-47	305°N	120.17	135.6	NO
07/12/2018	46-47	305°N	140.43	157.78	NO

Il *grafico 5.12* illustra l'evoluzione degli spostamenti cumulativi mentre i grafici di spostamento differenziale e il diagramma polare è presente all'interno dell'*allegato III.*

GRAFICO 5.12- MODULO DELLO SPOSTAMENTO CUMULATIVO DMS-I3, PERIODO 2015-2018 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)



Con riferimento al *grafico 5.12*, dall'analisi dei dati (18/05/2017), si è comprende che l'incremento di spostamento, che si può osservare alla quota compresa tra 4-15m da p.c., è dovuto allo schiacciamento prevalente lungo l'asse Z della tubazione inclinometrica.

Va sottolineato che, questa colonna ha risentito dell'evento alluvionale di novembre 2016, incrementando le velocità di movimento lungo il piano di scivolamento nel periodo invernale (generalmente quiescente rispetto alla stagione primaverile). Tale situazione verrà analizzata nel dettaglio, con l'ausilio dei dati idrogeologici, nel *capitolo 5.5*.

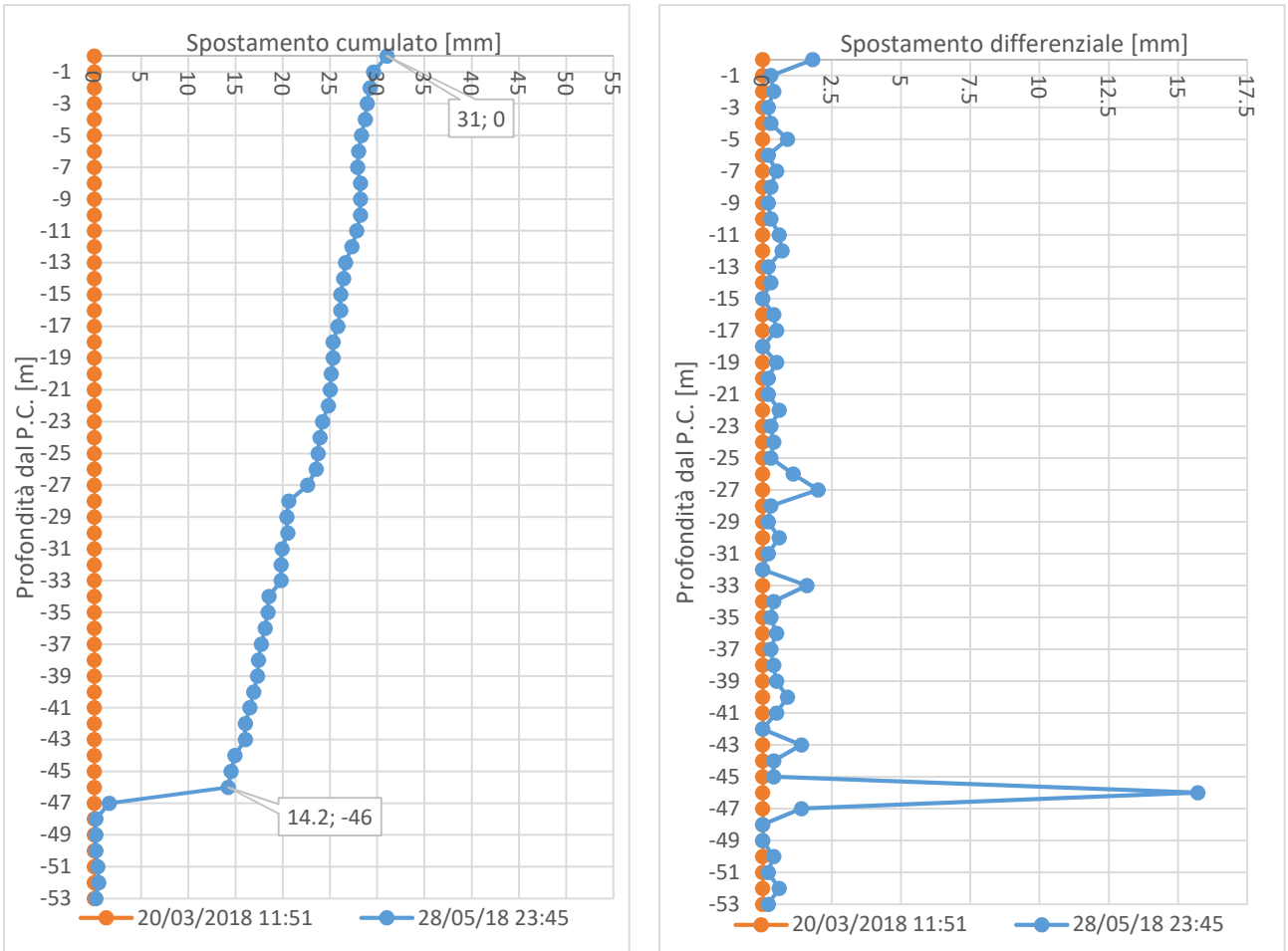
Sfortunatamente, la colonna DMS ha subito una folgorazione a causa di un cortocircuito e ha smesso di funzionare il 21/03/2018; il 26/05/2018 è stata ripristinata la comunicazione con la colonna strumentale.

A causa di questo malfunzionamento, S.I.T.A.F. & Musinet Engineering hanno fornito, tramite un report inclinometrico, una serie di dati inclinometrici aggiuntiva. Infatti, nell'anno 2018, è stata

prodotta anche una serie di risultati aggiuntiva per la colonna DMS-I3. Questo set di dati aggiuntivo per la colonna strumentata DMS-I3, ha riguardato il periodo che è andato dal 20/03/2018 al 28/05/2018 e i dati sono stati riferiti non alla lettura di zero del 26/01/2015 bensì al 20/03/18. Da tali dati, è stata creata la curva di spostamento cumulativo e di spostamento differenziale rappresentata nel *grafico 5.13.*

Il *grafico 5.13* evidenzia spostamenti differenziali pari o superiori a 1 mm nei tratti 26-27 m, 27-28 m, 33-34 m, 40-41 m e 43-44 m. Inoltre, se ora ci si concentra sull'andamento qualitativo della curva cumulata si nota come essa non sia pseudo verticale denunciando quindi un comportamento molto lontano da quello di blocco rigido. Ne consegue che l'accumulo in frana, a causa delle intense precipitazioni nevose ed il conseguente scioglimento primaverile, tenda a svincolarsi con la formazione di settori in movimento al di sopra del piano di scivolamento a 47 metri da p.c.

GRAFICO 5.13-SPOSTAMENTO CUMULATO E DIFFERENZIALE COLONNA DMS-I3, DEL 28/05/18 23:45 RISPETTO AL 20/03/18 11:51 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)



5.4.4 Colonna inclinometrica I4

In *figura 5.3* sono illustrate le caratteristiche dello strumento e la lettura di riferimento risale alla data 15/09/2010.

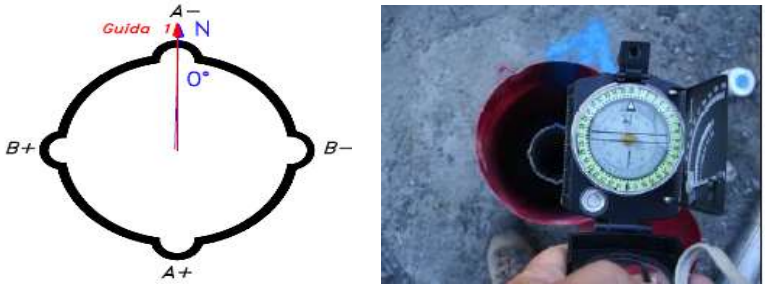


FIGURA 5.3- CARATTERISTICHE STRUMENTO I4: ORIENTAZIONE E PARTICOLARE FOTOGRAFICO (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

Le misure eseguite permettono di identificare la presenza di un tratto deformato tra 57 e 60m di profondità. Nella *tabella 5.3* sono riassunte le principali informazioni tratte delle varie letture inclinometriche manuali contenute nei vari report a disposizione dove, con "SDL max [mm]" s'intende lo spostamento differenziale locale massimo in millimetri, con "SDI [mm]" s'intende lo spostamento differenziale integrale, nella seconda colonna è indicato l'intervallo di profondità in cui sono ricavati i valori di SDL max e SDI, e le ultime due colonne si riferiscono rispettivamente alla velocità media del dissesto e quella nel periodo.

TABELLA 5.3-SINTENSI DELLE LETTURE INCLINOMETRICHE MANUALI ESEGUITE SULLA COLONNA I4 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

Lettura	SDL max [mm]	Prof. SDL max e SDI[m]	SDI [mm]	V media [mm/anno]	V periodo [mm/anno]
15/05/2014	41.93	57-60	114.92	31.3	18.1
18/07/2014	46.29	57-60 (59)	122.8	31.9	44.9
21/10/2014	46.81	57-60 (59)	124.8	30.4	7.7
14/05/2015	50.8	57-60	132.6	28.4	13.8
17/07/2015	55.7	57-60	140.6	29	45.6
23/10/2015	59.3	57-60	147.6	28.9	26

Il giorno 23/10/15 è stata eseguita l'ultima misura lungo la colonna inclinometrica. Il giorno 20/04 è stata rilevata la strozzatura della colonna inclinometrica che ha impedito il corretto passaggio della sonda al di sotto del piano di scivolamento storicamente riconosciuto.

In *allegato III* sono illustrati i grafici di spostamento cumulativo, differenziale e il diagramma polare che sono stati ottenuti dalle letture inclinometriche manuali.

5.4.5 Colonna inclinometrica I5

In *figura 5.4* sono illustrate le caratteristiche dello strumento e la lettura di riferimento risale alla data 5/11/2013.

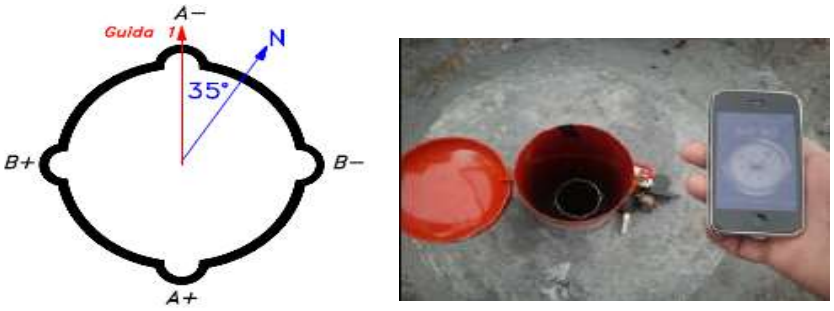


FIGURA 5.4- CARATTERISTICHE STRUMENTO I5: ORIENTAZIONE E PARTICOLARE FOTOGRAFICO (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

Si rileva la presenza di un piano di scivolamento a 47.0m dal p.c. Si riporta, nella *tabella 5.4*, una sintesi delle restanti letture dove, con "SDL max [mm]" s'intende lo spostamento differenziale locale massimo in millimetri, con "SDI [mm]" s'intende lo spostamento differenziale integrale, nella seconda colonna è indicato l'intervallo di profondità in cui sono ricavati i valori di SDL max e SDI. In *allegato III* sono riportati i grafici ottenuti dai report inclinometrici.

TABELLA 5.4-SINTESI DELLE LETTURE INCLINOMETRICHE MANUALI DELLA COLONNA I5 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

Lettura	SDL max [mm]	Prof. SDL max e SDI[m]	SDI [mm]
08/05/2014	4.17	47	6.57
16/07/2014	6.5	47	11.5
15/10/2014	8.6	47	16.5
13/05/2015	14.8	47	28.6
15/07/2015	18.5	47	40.5
21/10/2015	21.9	47	53.5
19/04/2016	28.1	47	61.7
03/08/2016	32.9	47	72.1
19/10/2016	35	47	75.1
18/05/2017	48.2	47	95.7
27/07/2017	54.5	47	103.2
24/11/2017	58.9	47	108.4
24/05/2018	72*	47	125*
*analisi eseguita solo con la guida 2			

Durante la seconda ispezione del 2018 l'importante deformazione a 47.0m da p.c. non ha consentito il passaggio della sonda inclinometrica al di sotto del piano di scivolamento. A metà giugno sono state installate, nella colonna inclinometrica I5, due sonde fisse la cui trattazione si rimanda al *capitolo 5.5*

5.5 Correlazione tra dati inclinometrici e dati idrogeologici

Nel presente capitolo sono riportate le correlazioni svolte tra i dati idrogeologici (livello di soggiacenza della falda e di misura della portata) e i dati inclinometrici riferiti all'evoluzione degli spostamenti in prossimità della superficie di scivolamento.

Vengono analizzate nel dettaglio quattro finestre temporali, rispettivamente:

- anno 2015:
- gennaio 2016 – ottobre 2016;
- novembre 2016 – dicembre 2017;
- anno 2018

All'interno di queste quattro finestre temporali vengono fatte delle correlazioni tra i dati idrogeologici e i dati inclinometrici dei vari strumenti a disposizione. Viene correlato il dato di una generica colonna inclinometrica con i dati idrogeologici più vicini.

La colonna I2 sarà correlata con:

- il piezometro Pz6;
- il piezometro PzCas2;
- il misuratore di portata Q3;

La colonna inclinometrica I3 con:

- il piezometro PzS2;
- il piezometro Pz4;
- il piezometro Pz6;
- il misuratore di portata Q3;
- il misuratore di portata in galleria.

Le sonde fisse S1 e S2, della colonna inclinometrica I5 con:

- il piezometro PzS2;
- il piezometro Pz6;
- il misuratore di portata Q3;
- il misuratore di portata in galleria.

A titolo di esempio, si riporta la correlazione riferita al periodo novembre 2016-dicembre 2017, in quanto ciò che è accaduto è ritenuto di particolare interesse.

Avendo a disposizione la curva cumulata dello spostamento alla profondità della superficie di scivolamento, ovvero a circa 47m, illustrata nel *grafico 5.14*, essa è stata suddivisa in intervalli caratterizzati da una pendenza costante. La pendenza locale ha un'interpretazione fisica poiché rappresenta la velocità degli spostamenti e il risultato è rappresentato nel *grafico 5.15*. Dopo aver analizzato la curva degli spostamenti, il metodo seguito prevedeva la correlazione di tale curva di spostamento cumulato con l'andamento della soggiacenza della falda e della portata.

Si riporta nel *grafico 5.16* e nel *grafico 5.17,* la correlazione con il piezometro Pz6 e il misuratore di portata Q3. Focalizzandosi sull'andamento dei soli dati idrogeologici, si vede come la soggiacenza della falda e l'andamento della portata sono caratterizzati da due rapidi incrementi: il primo, più rapido, è avvenuto nell'arco di una settimana mentre il secondo è avvenuto nell'arco di qualche settimana. Il primo, si è rilevato negli ultimi giorni di novembre, ovvero al termine dell'importante evento di precipitazione (nevosa e liquida per Le Selle e solo liquida per Salbertrand) avvenuto il 26 novembre mentre il secondo, è avvenuto nei primi giorni di aprile, conseguentemente all'importante apporto di acqua nel sottosuolo derivante dal processo di scioglimento nivale.

Sempre con riferimento al *grafico 5.16* e *grafico 5.17*, la curva degli spostamenti, da novembre 2016 a dicembre 2017, ha subito nel complesso due accelerazioni e due decelerazioni. Si nota che gli spostamenti hanno accelerato quando la falda si è innalzata (seppur con un certo sfasamento di poche settimane) e hanno iniziato a decelerare quando la falda o la portata ha iniziato a ridursi (va sottolineato però che la decelerazione degli spostamenti è iniziata ad avvenire circa due settimane dopo l'inizio dell'approfondimento della falda o della riduzione della portata).

5.5.1 Colonna DMS-I3, novembre 2016-dicembre 2017

GRAFICO 5.14- COLONNA DMS I3, SPOSTAMENTO CUMULATO A PROFONDITÀ 46-47M, DIREZIONE 315°N, PERIODO NOVEMBRE 2016 – DICEMBRE 2017 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

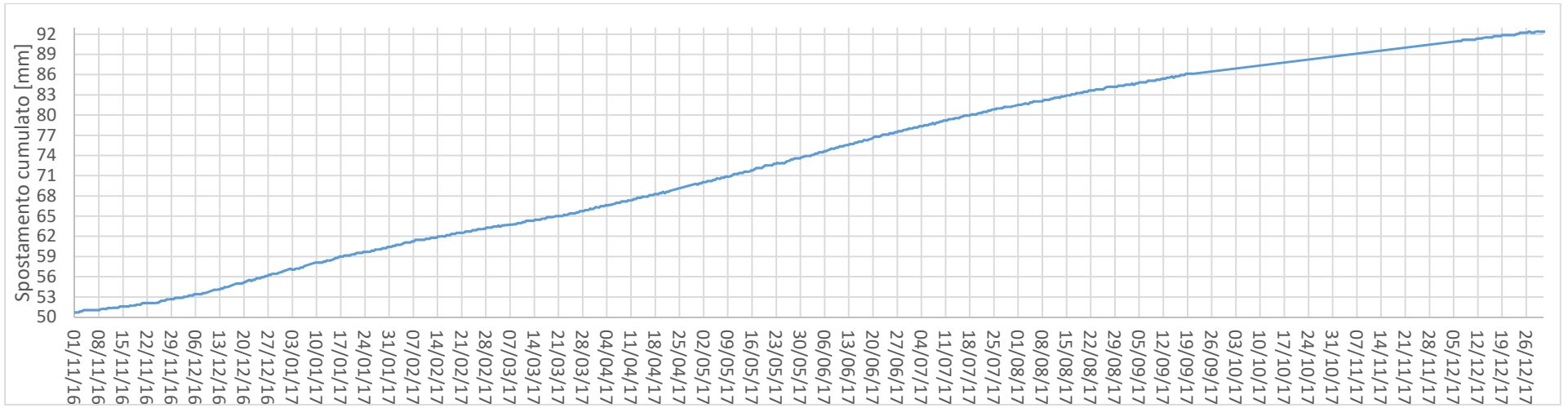


GRAFICO 5.15- COLONNA DMS I3, ANALISI DELLA CURVA DI SPOSTAMENTO CUMULATO A PROFONDITÀ 46-47M, DIREZIONE 315°N, PERIODO NOVEMBRE 2016 – DICEMBRE 2017

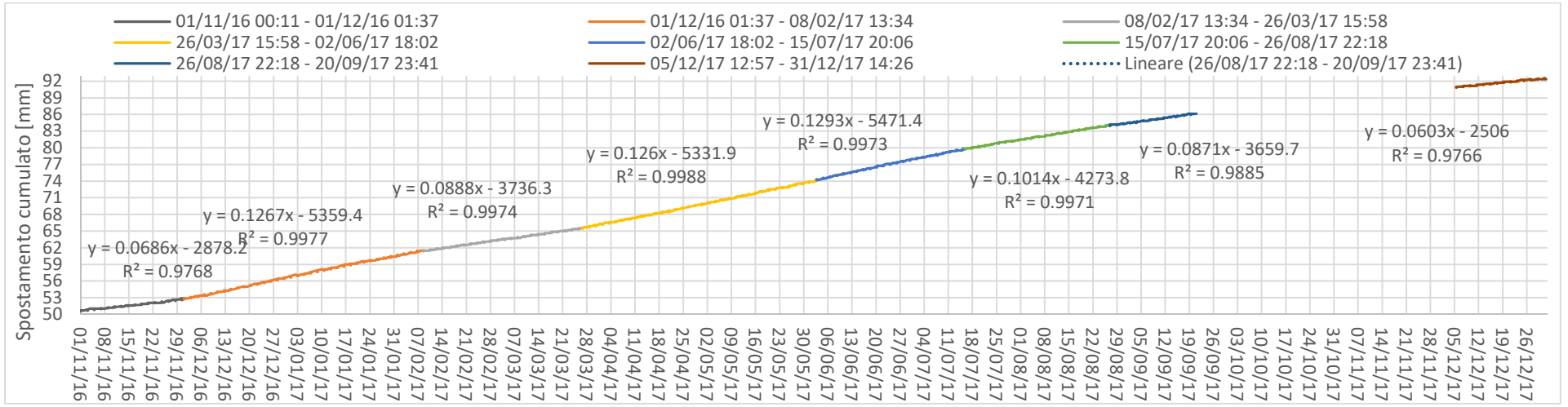


GRAFICO 5.16- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I3 ZONA 46-47M VS SOGGIACENZA DI PZ6 PERIODO NOVEMBRE 2016 DICEMBRE 2017

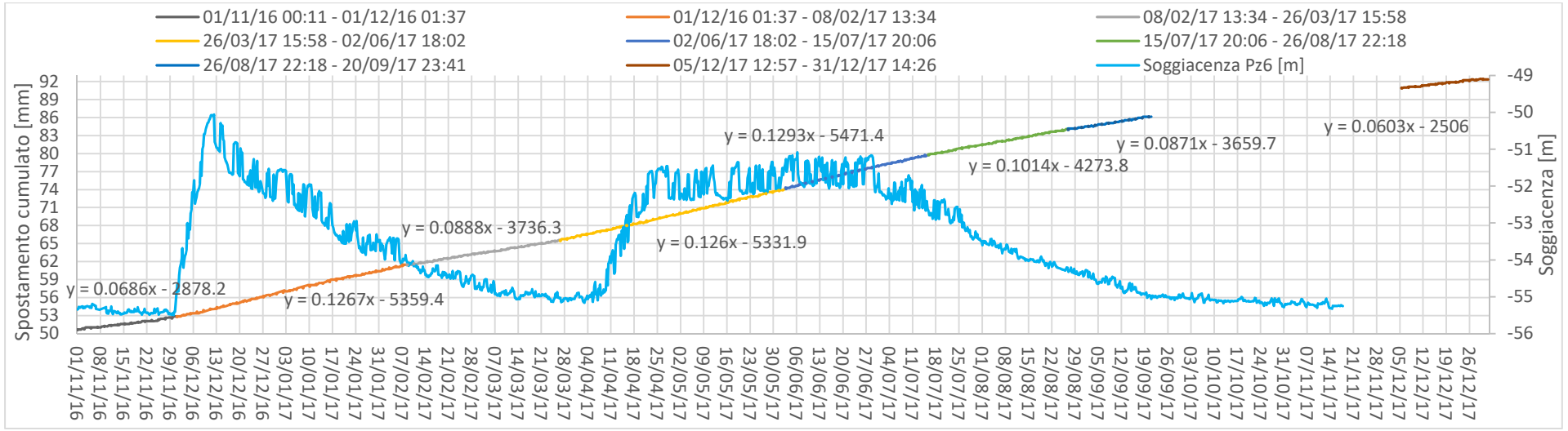
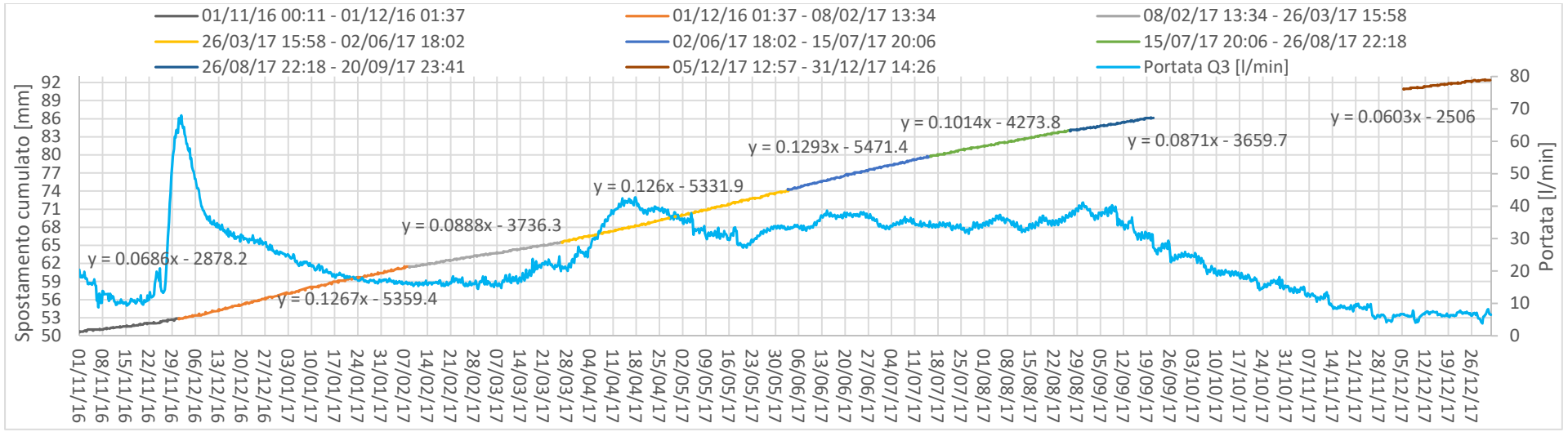


GRAFICO 5.17- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I3 ZONA 46-47M VS PORTATA DI Q3 PERIODO NOVEMBRE 2016 DICEMBRE 2017



Riguardo l'importante evento meteorologico del 26 novembre 2016, anche la verticale I5, sebbene con step di lettura differenti rispetto alla DMS-I3, ha evidenziato un marcato incremento deformativo che, in questo caso, risulta accorpato (non essendo stato possibile effettuare l'ispezione nel mese di dicembre) sia l'evento alluvionale di novembre 2016 che allo scioglimento nivale di inizio primavera. Infatti, considerando il *grafico 5.18* degli spostamenti cumulati e il *grafico 5.19* degli spostamenti differenziali, comparando gli incrementi di spostamento differenziale locale e integrale tra le ultime due letture (in particolare ci si riferisce alla curva nera di ottobre 2016 con la curva rossa di maggio 2017), ovvero le letture a cavallo dell'evento di precipitazione di fine novembre, si nota come il distacco tra queste due letture consecutive sia maggiore rispetto al distacco che si registra tra due generiche letture consecutive.

GRAFICO 5.18- CURVA RISULTANTE DEGLI SPOSTAMENTI E ANGOLO DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE INTEGRALE DAL BASSO, PERIODO 2016-2018, COLONNA I5, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

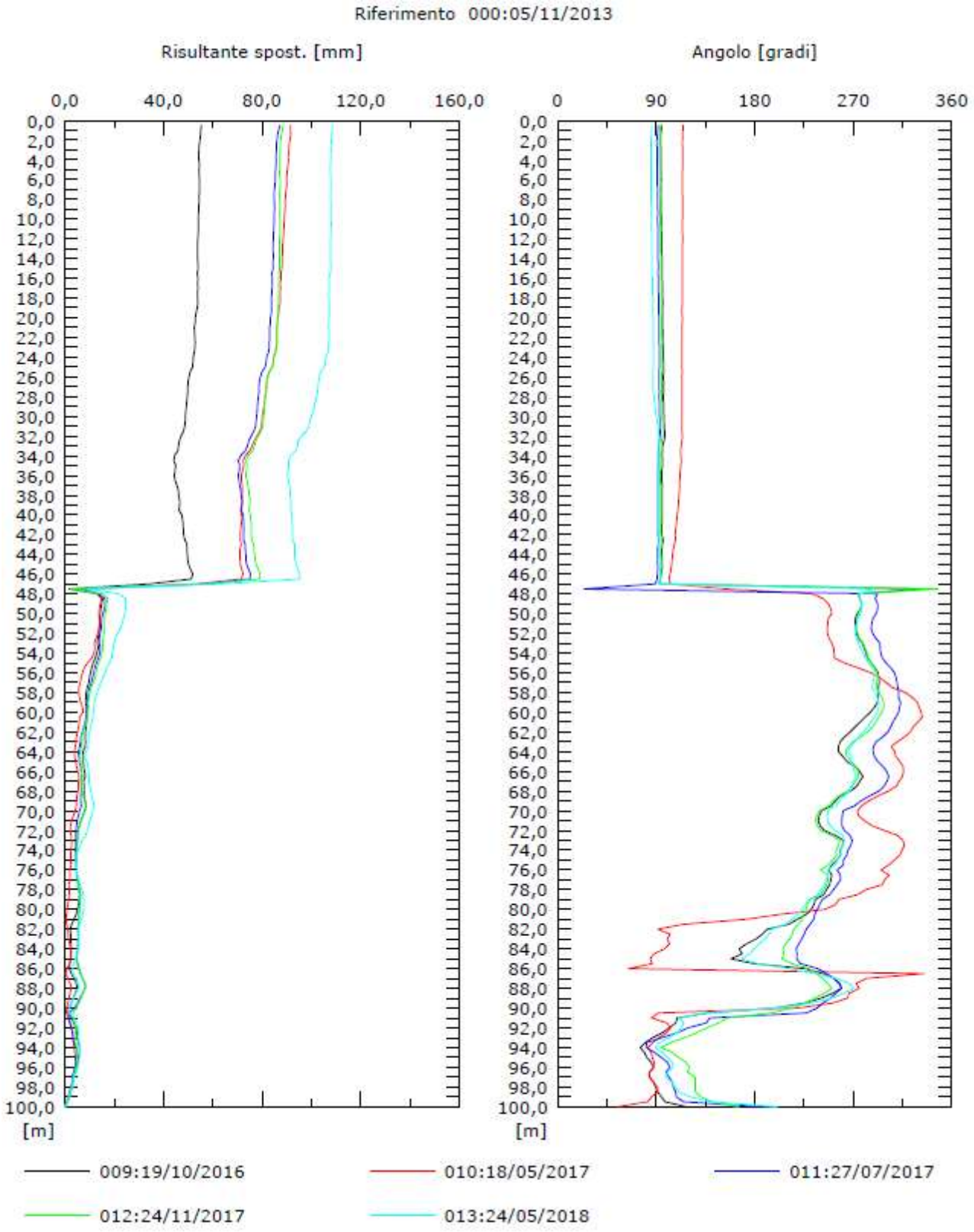
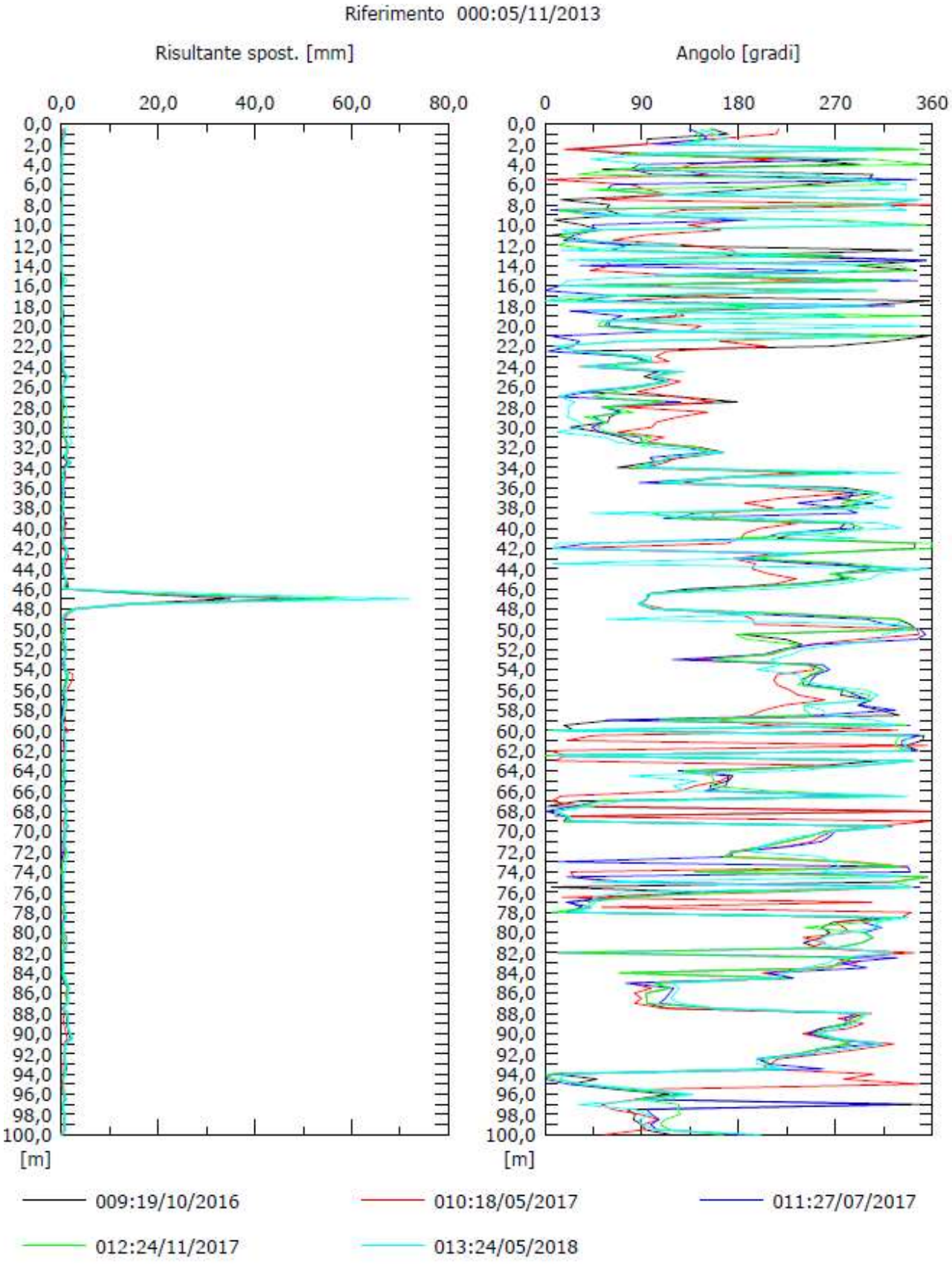


GRAFICO 5.19- CURVA RISULTANTE DEGLI SPOSTAMENTI ESPRESSA IN MILLIMETRI E ANGOLO ESPRESSO IN GRADI DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE DIFFERENZIALE LOCALE DAL BASSO, PERIODO 2016-2018, COLONNA I5, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)



Si riportano ancora alcune delle correlazioni realizzate nell'anno 2018. Tale anno è stato quello in cui si è riusciti a produrre un maggior numero di correlazioni con i dati idrogeologici poiché si avevano dati inclinometrici provenienti da tre diverse colonne, rispettivamente: la DMS-I3, la DMS-I2 e le sonde fisse S1 e S2 posizionate all'interno della colonna I5.

Quest'anno risulta di particolare interesse poiché è stato l'anno in cui si è accumulata la maggiore quantità di neve al suolo e, conseguentemente, è stato anche l'anno in cui si sono verificate le variazioni maggiori nei dati idrogeologici: si pensi ad esempio all'innalzamento di 10m del livello di falda, registrato nel piezometro Pz6, posizionato nel settore antistante la galleria drenante.

Considerando la colonna DMS-I2 si riporta la correlazione eseguita tra la cumulata degli spostamenti in prossimità della superficie di scivolamento, il piezometro Pz6 e il misuratore Q3. Il risultato è mostrato nel *grafico 5.20* e nel *grafico 5.21*. Complessivamente si nota come l'importante innalzamento del livello di falda e di portata hanno causato un incremento della velocità dei movimenti e viceversa.

GRAFICO 5.20- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I2 ZONA 11-16M VS SOGGIACENZA DI PZ6 ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO – OTTOBRE)

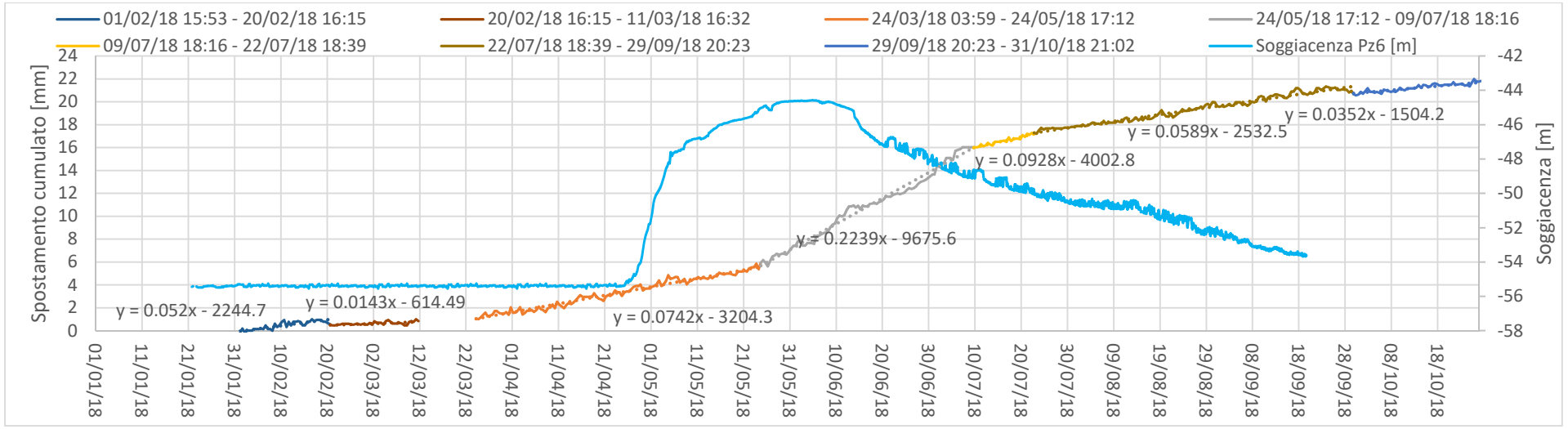
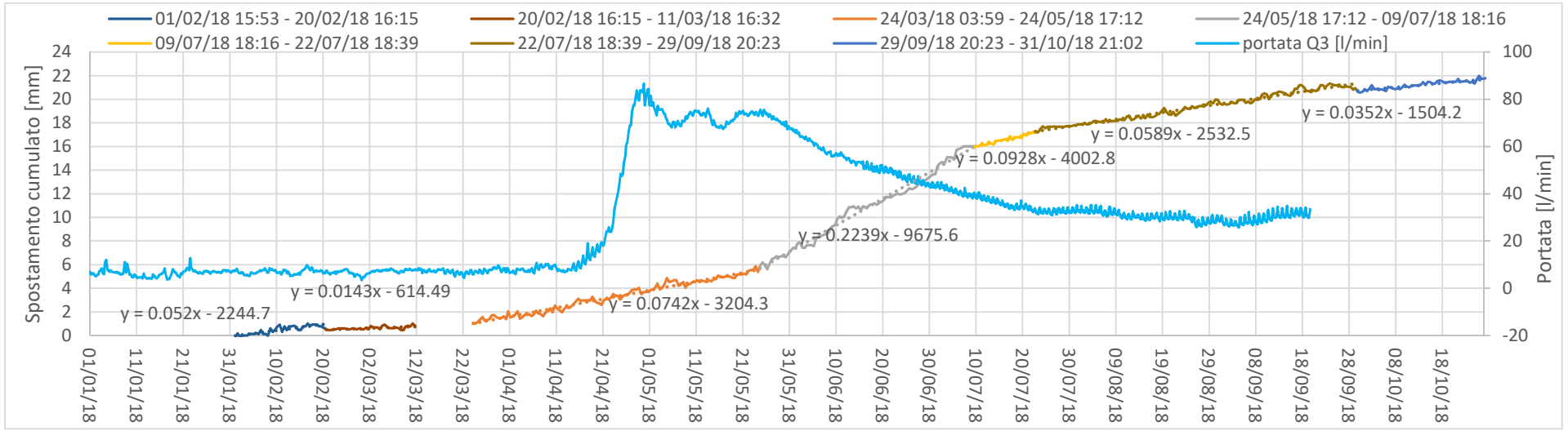


GRAFICO 5.21- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I2 ZONA 11-16M VS PORTATA DI Q3 ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO – OTTOBRE)



È stata infine svolta l'analisi dei dati provenienti dalle sonde fisse collocate all'interno della colonna I5. Esse sono state installate a metà giugno dell'anno 2018. I dati che sono stati ottenuti dalla S.I.T.A.F. & Musinet Engineering ricoprono un periodo di circa due mesi (15/06 - 19/09). La sonda più profonda si è fermata a 46.3 m da p.c. mentre, la più superficiale, a 28.5 m da p.c. L'acquisizione dei parametri è stata pianificata con una frequenza di campionamento pari a 1 ora.

Ciascuna sonda fissa è in grado di rilevare l'inclinazione rispetto alla verticale su due assi distinti, tra loro ortogonali, che coincidono con le scanalature di guida della verticale inclinometrica.

Nella *tabella 5.5* sono indicati i valori rilevati successivamente all'installazione degli strumenti riportati in gradi sessagesimali per ciascun sensore; essi sono da considerarsi i valori di riferimento per le valutazioni.

TABELLA 5.5-COLONNA INCLINOMETRICA I5, INCLINAZIONE ASSOLUTA PER LE SONDE FISSE S1 E S2 (LETTURA DI ZERO), (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

Strumento	S1Y	S1X	S2Y	S2X
Inclinazione (°)	6.417	-2.416	-1.034	-0.537

Il canale X di ciascuno strumento coincide con quello definito dalle guide N-S mentre il canale Y, ortogonale al precedente, è riferito al piano delle guide dirette E-O.

I dati riguardanti l'inclinazione assoluta relativi alle sonde S1 e S2 nel periodo considerato, sono diagrammati nel *grafico 5.22* e nel *grafico 5.23*.

GRAFICO 5.22-COLONNA I5, SONDA FISSA S1, INCLINAZIONE ASSOLUTA, ANNO 2018, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

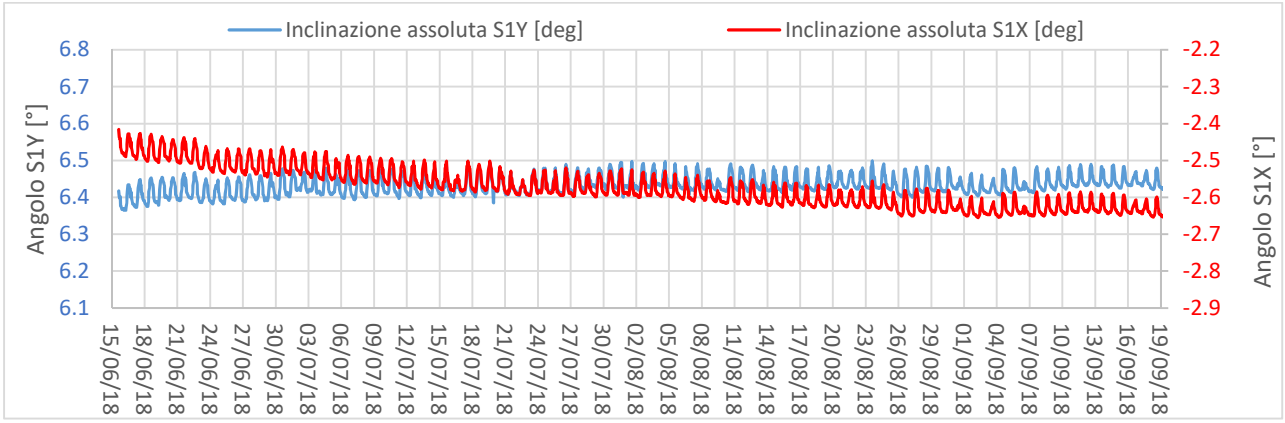
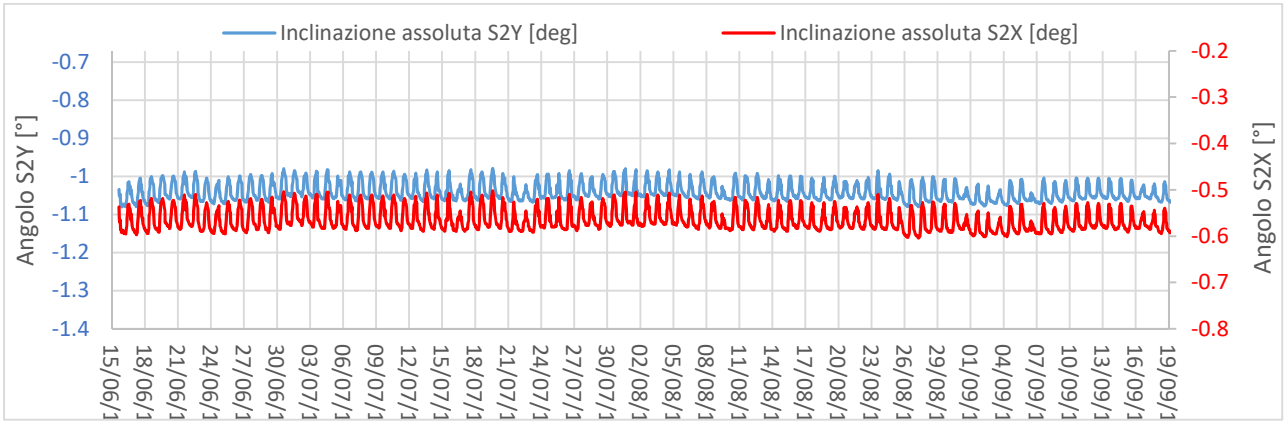


GRAFICO 5.23-SONDA FISSA S2, INCLINAZIONE ASSOLUTA, ANNO 2018 (PERIODO GIUGNO-SETTEMBRE), (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

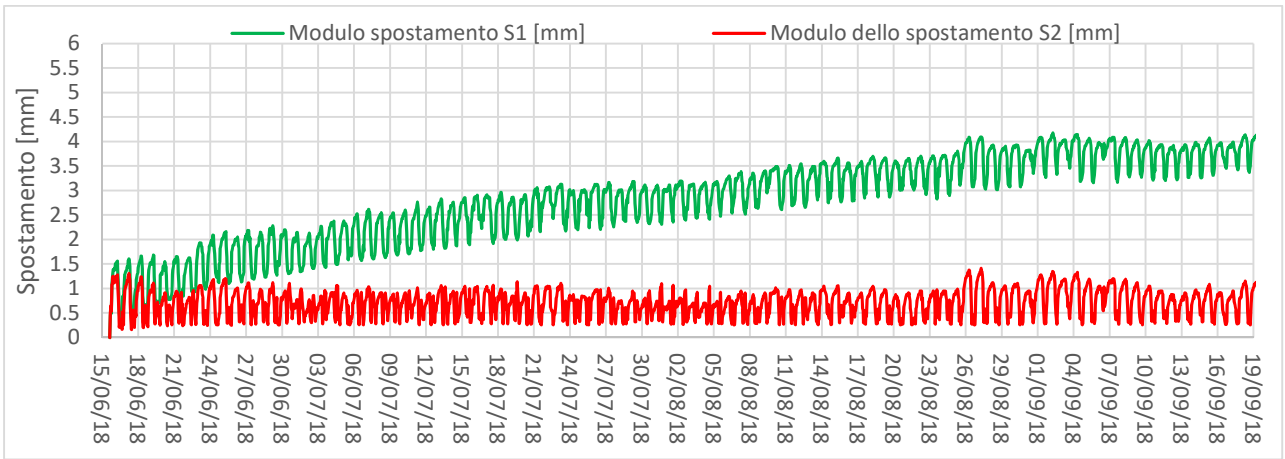


Successivamente, tramite i valori della lettura di zero raccolti in *tabella 5.5*, si sono ricavate le inclinazioni relative. In seguito, si è considerata la lunghezza della sonda pari ad 1m e si sono considerati i valori di inclinazione relativa appena ottenuti; da essi si è ricavato lo spostamento in direzione X e direzione Y tramite l'espressione:

$$s = L \cdot sen\, \vartheta$$

dove "s" è lo spostamento lungo una delle due direzioni, "L" è la lunghezza della sonda pari a 1000mm e "ϑ" è l'inclinazione relativa lungo una delle due direzioni. Si è poi ricavato il modulo del vettore spostamento risultante. Si è deciso di confrontare l'andamento del modulo dello spostamento, tratto dalla sonda S1 e dalla sonda S2 nei due mesi di osservazione, attraverso il *grafico 5.24*.

GRAFICO 5.24-COLONNA I5, SONDE FISSE S1 E S2, CONFRONTO TRA I MODULI DI SPOSTAMENTO, ANNO 2018 (PERIODO GIUGNO-SETTEMBRE)

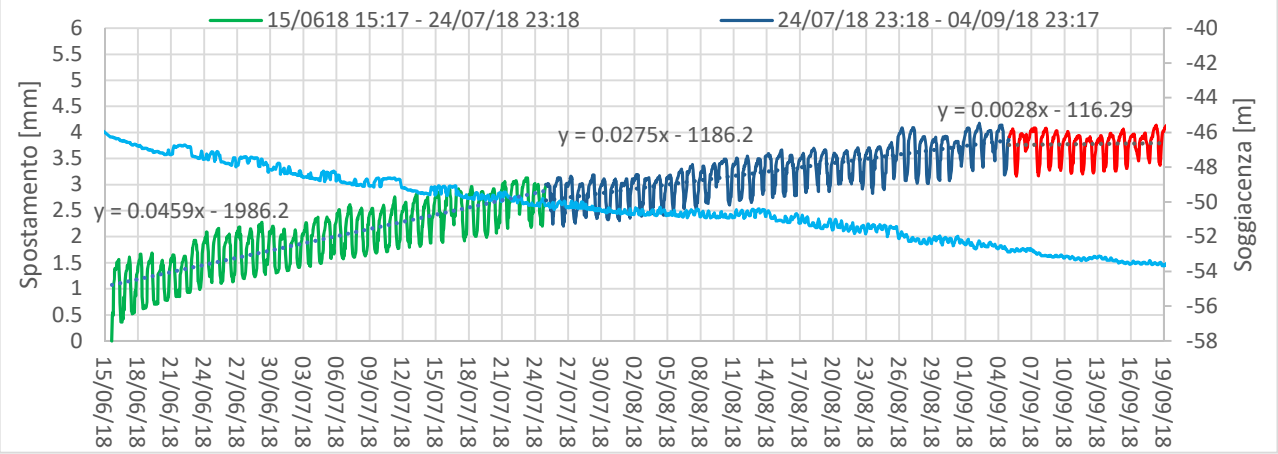


Dal *grafico 5.24* si osserva come il modulo dello spostamento, sebbene abbia avuto un andamento quotidiano oscillante a causa dell'influenza delle oscillazioni giornaliere della temperatura dell'aria

rilevate del termometro T1, manifesti per la sonda S1 un trend crescente mentre, per quanto riguarda la sonda S2, non si è riusciti a percepire nessun trend crescente simile quello rilevato per la sonda S1. In base a quest'ultima osservazione, è stata scelta solo la sonda S1 per effettuare le correlazioni con i dati idrogeologici di soggiacenza della falda e di portata.

Quindi, anche per l'andamento dello spostamento cumulato ricavato per la sonda fissa S1, si è suddiviso l'intervallo temporale in sotto intervalli in modo da poterli approssimare con una linea di tendenza di tipo lineare, la cui pendenza fosse riconducibile alla velocità dei movimenti. Successivamente è stata realizzata, attraverso il *grafico 5.25,* la correlazione tra il dato di soggiacenza della falda riferito al piezometro Pz6 e il dato di spostamento cumulato rilevato dalla sonda fissa S1 nel periodo 15/06/18-19/09/18.

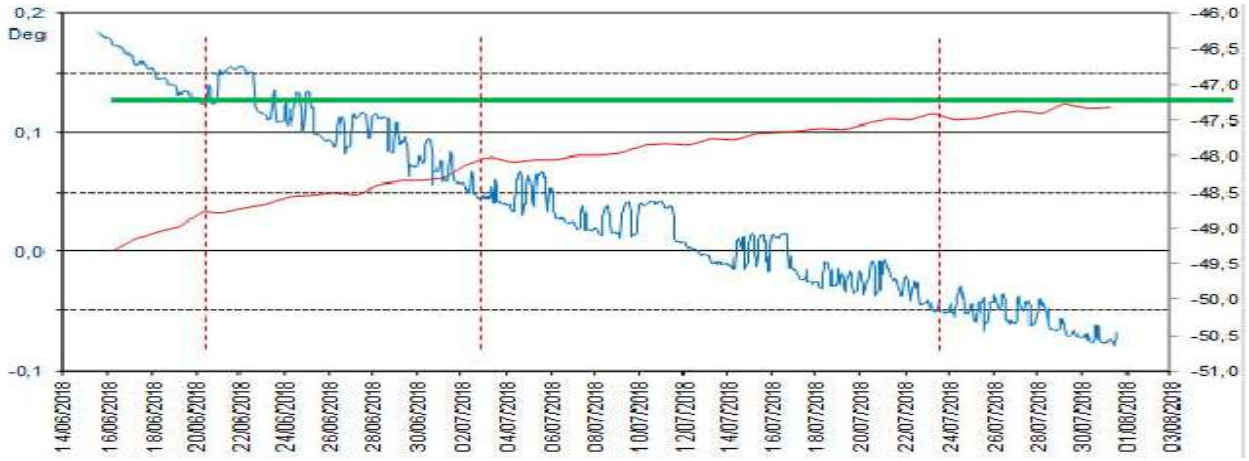
GRAFICO 5.25-COLONNA I5, SONDA S1, MODULO DELLO SPOSTAMENTO VS SOGGIACENZA DI PZ6, ANNO 2018 (PERIODO GIUGNO-SETTEMBRE)



Si osserva come l'abbassamento della falda produca una decelerazione degli spostamenti.

Anche i tecnici della S.I.T.A.F., avendo loro a disposizione il dato di soggiacenza della falda direttamente all'interno della stessa colonna inclinometrica in cui sono state posizionate le sonde fisse (I5), hanno realizzato il *grafico 5.26* e, da esso, sono giunti alla stessa conclusione.

GRAFICO 5.26-COLONNA I5, SONDA S1, DEVIAZIONE ANGOLARE VERTICALE VS PIEZOMETRIA, ANNO 2018 (PERIODO GIUGNO-AGOSTO). IN VERDE LA QUOTA DEL PIANO DI SCIVOLAMENTO, IN ROSSO L'EVOLUZIONE DELL'INCLINAZIONE RELATIVA E IN BLU L'EVOLUZIONE DELLA SOGGIACENZA DELLA FALDA (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)



5.6 Correlazione di dati meteorologici-idrogeologici con la conducibilità elettrica e la temperatura delle acque

I dati di portata, temperatura e di conducibilità elettrica specifica dell'acqua sono forniti dal Prof. Vigna del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (D.I.A.T.I.) del Politecnico di Torino. Per la soggiacenza della falda, si sono utilizzati i dati provenienti dal piezometro Pz6 forniti dalla S.I.T.A.F. & Musinet Engineering e, per i dati meteorologici, si è fatto riferimento ai dati della stazione Le Selle forniti dall'ARPA Piemonte.

Nel *grafico 5.27* e nel *grafico 5.28* è possibile osservare la correlazione tra la portata e la conducibilità elettrica specifica dell'acqua in galleria e la correlazione tra la portata e la temperatura dell'acqua in galleria. Dal 20 al 27 aprile 2018 e dal 6 al 12 novembre 2018 la conducibilità elettrica specifica è passata da 1000µs/cm a 850µs/cm e da 943 µs/cm a 801 µs/cm, la temperatura dell'acqua da 5.8°C a 5.5°C e da 5.8°C a 5.45°C mentre la portata è cresciuta da 1.3l/s a 4.4l/s e da 1.1l/s a 3.01l/s.

Per provare a dare una spiegazione a queste riduzioni di conducibilità elettrica specifica e temperatura dell'acqua, sono stati prodotti altri due grafici, ovvero il *grafico 5.29* e il *grafico 5.30*. Nel *grafico 5.29* la portata in galleria è diagrammata con l'andamento dell'altezza di neve al suolo della stazione Le Selle e, nel *grafico 5.30*, essa è diagrammata con le precipitazioni rilevate nella stazione Le Selle.

Ciò che causa questo rapido cambiamento nelle curve di portata, di temperatura e di conducibilità elettrica specifica è l'apporto di acqua proveniente dal processo di scioglimento di neve al suolo. Ciò spiega la riduzione di temperatura dell'acqua mentre l'abbassamento di conducibilità elettrica è legato al fatto che questo grande apporto di acqua, derivante dal processo di scioglimento nivale, non percorre un lungo tragitto a contatto con le rocce per arrivare allo strumento di misura; di conseguenza, non si arricchisce a sufficienza di minerali, rispetto all'acqua che si muove solo all'interno del sottosuolo; pertanto ciò abbassa la conducibilità elettrica specifica dell'acqua nel punto di misura.

GRAFICO 5.27- GALLERIA DRENANTE: PORTATA VS CONDUCIBILITÀ ELETTRICA SPECIFICA DELL'ACQUA, ANNO 2018

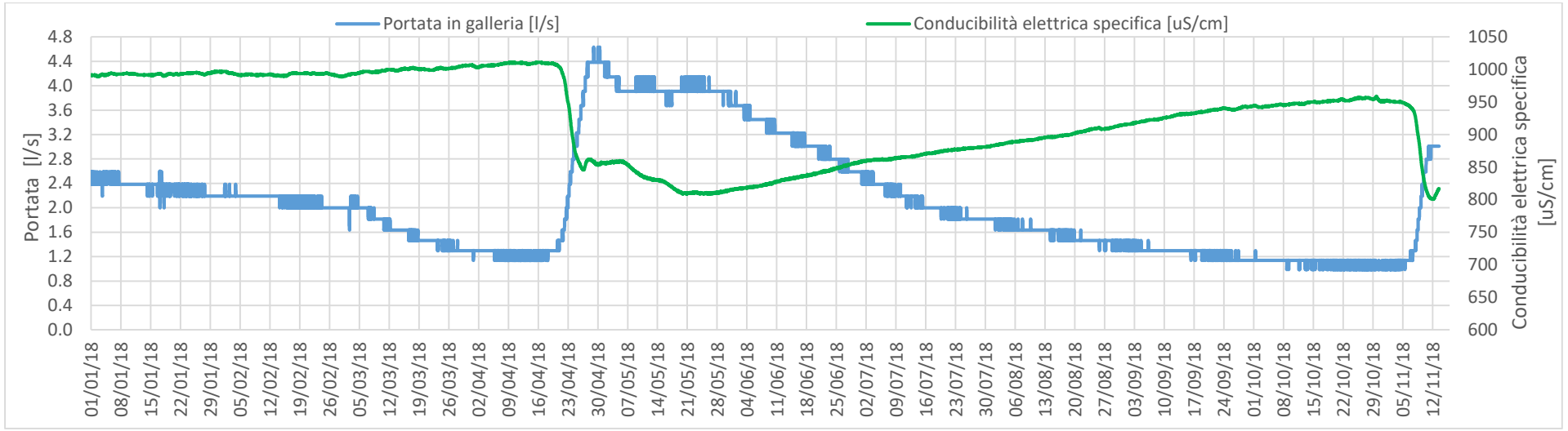


GRAFICO 5.28-GALLERIA DRENANTE: PORTATA VS TEMPERATURA DELL'ACQUA, ANNO 2018

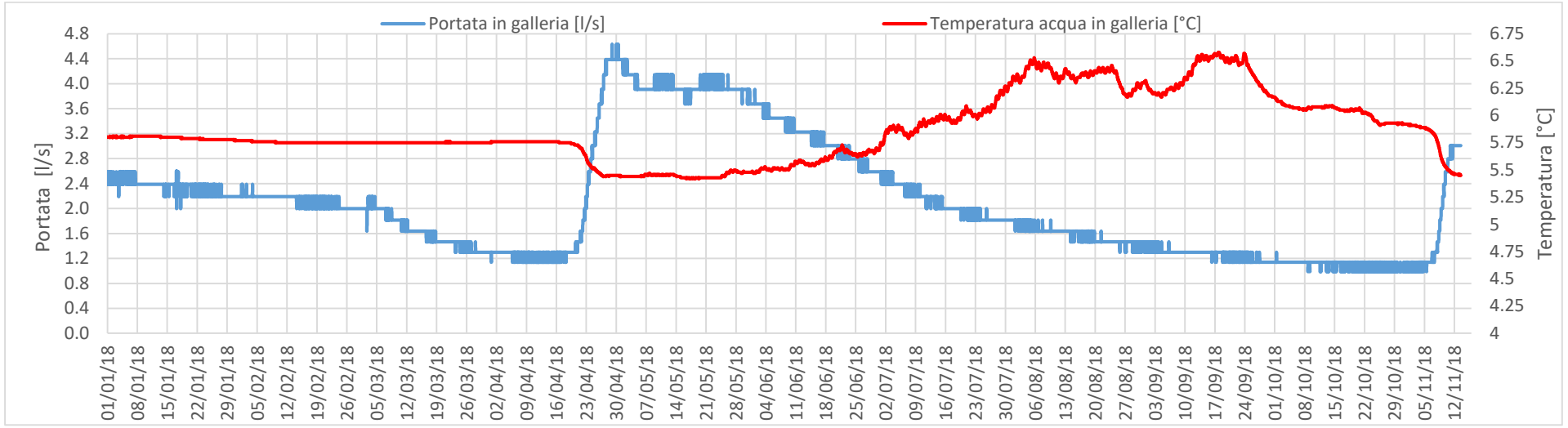


GRAFICO 5.29-ALTEZZA DI NEVE AL SUOLO VS PORTATA IN GALLERIA VS SOGGIACENZA DI PZ6, ANNO 2018

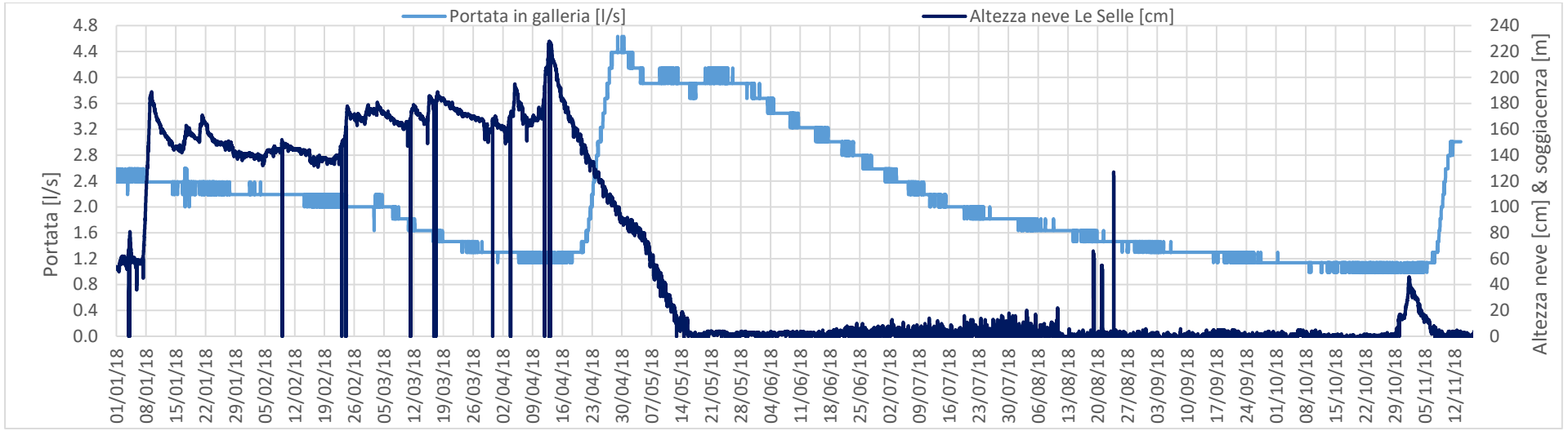
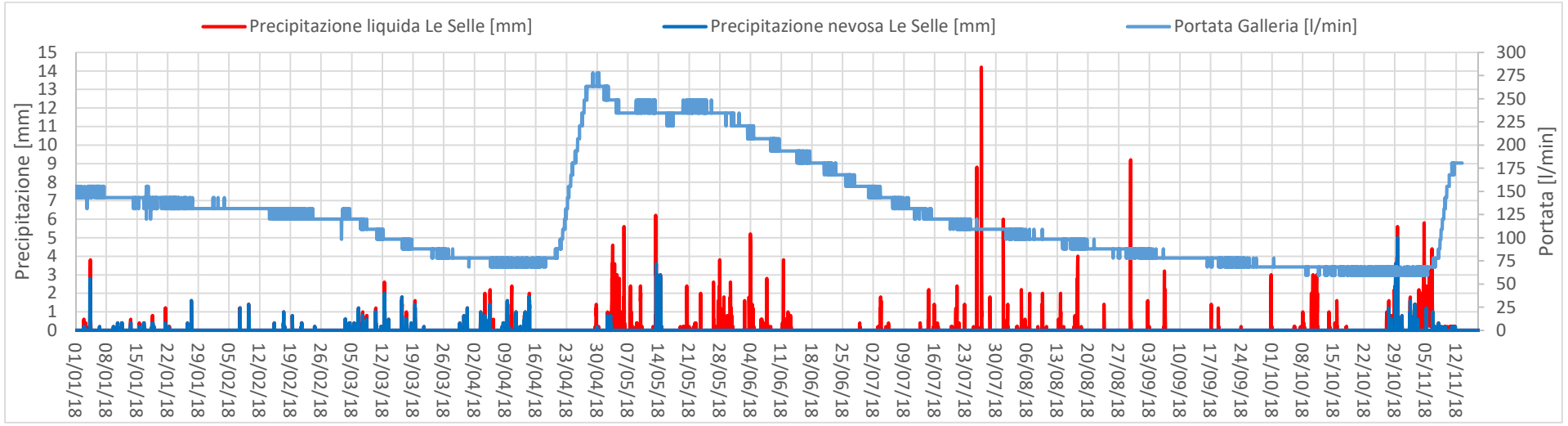


GRAFICO 5.30-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI LE SELLE VS PORTATA IN GALLERIA, ANNO 2018



Nell'*allegato V* sono anche presenti delle altre correlazioni con i dati di temperatura dell'acqua e di portata dei misuratori Q2 e Q3. Il periodo osservato va da metà anno 2016 a fine estate del 2018.

In base all'analisi di questi dati, i picchi nei valori di portata sono ricondotti a due situazioni: la prima è legata al processo di scioglimento nivale, poiché in alcuni picchi, durante la fase di crescita della portata, la temperatura si è ridotta e viceversa; la seconda è legata al manifestarsi di intense precipitazioni liquide, poiché quando il picco di portata si manifestava senza causare cambiamenti alle classiche oscillazioni quotidiane della temperatura, si è ritrovata la presenza di una precipitazione liquida.

5.7 Analisi chimica delle acque delle sorgenti

I dati utilizzati sono forniti dal Prof. Fiorucci del D.I.A.T.I. del Politecnico di Torino. È stata svolta un'analisi chimica delle acque in tre diversi luoghi denominati nel seguito come: "CASSAS galleria", "CASSAS lungo strada" e "CASSAS sorgenti" (quest'ultima si riferisce alle sorgenti affioranti in superficie). Si avevano a disposizione le concentrazioni dei vari ioni il giorno 28/10/17 e il giorno 13/07/18 per le due zone denominate "CASSAS galleria" e "CASSAS lungo strada" mentre per "CASSAS sorgenti" si avevano solo i dati riferiti al 13/07/18. In totale si avevano quindi a disposizione cinque analisi chimiche dell'acqua delle sorgenti.

Per fornire un'immediata comprensione delle concentrazioni di cariche positive e negative, nelle cinque analisi chimiche a disposizione, sono stati realizzati due istogrammi i quali riportano le concentrazioni, espresse in [Mg/l], per le cinque analisi chimiche a disposizione; nel dettaglio, il *grafico 5.31* riporta le concentrazioni di ioni positivi mentre il *grafico 5.32* riporta le concentrazioni di ioni negativi.

GRAFICO 5.31- ANALISI CHIMICA DELLE ACQUE, CONCENTRAZIONE IONI POSITIVI [MG/L]

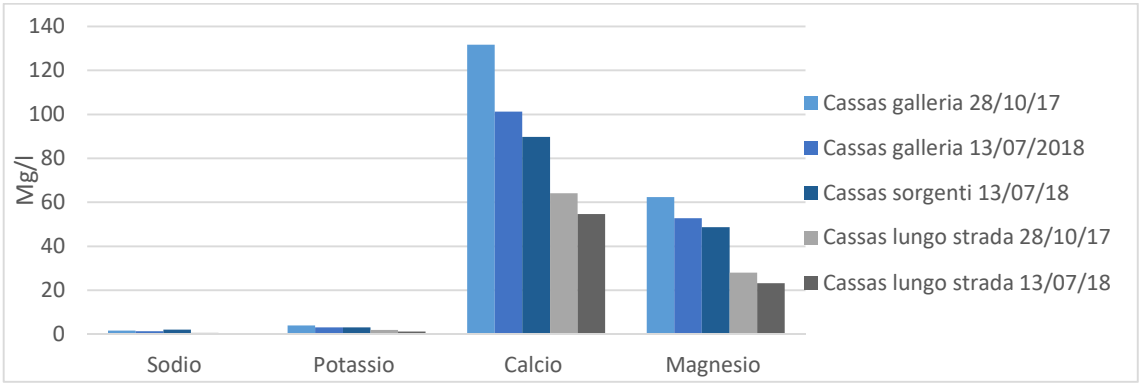
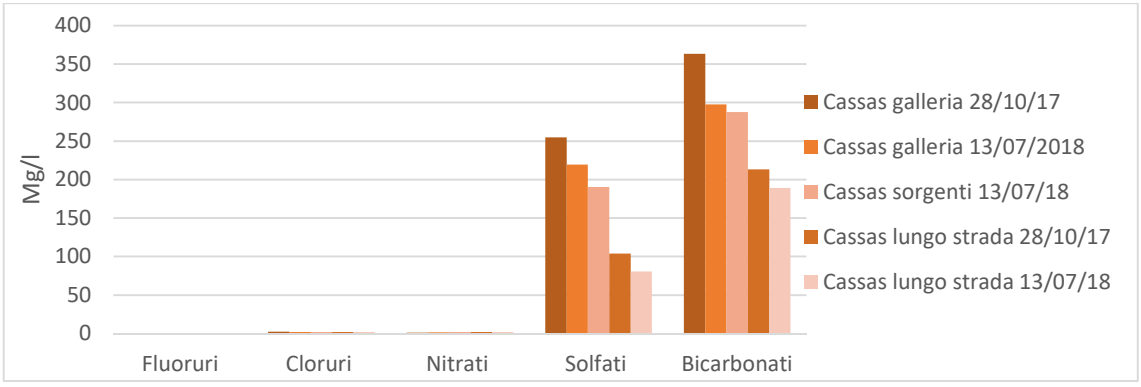


GRAFICO 5.32-ANALISI CHIMICA DELLE ACQUE, CONCENTRAZIONE IONI NEGATIVI MG/L]



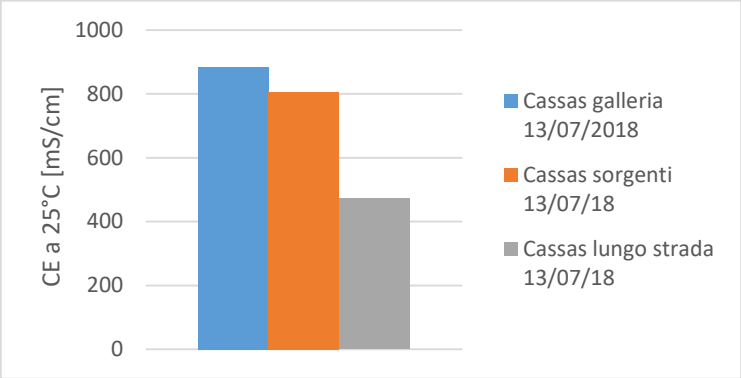
Si nota la maggior presenza di Calcio e Magnesio e di Solfati e Bicarbonati. Il punto di misura "CASSAS galleria" è quello con la maggiore concentrazione di metalli alcalino terrosi (Calcio e Magnesio) e di solfati e bicarbonati, seguito dalla sorgente "CASSAS sorgenti" e infine da "CASSAS lungo strada".

La presenza di ioni disciolti nelle acque dipende principalmente da processi di dissoluzione delle rocce attraversate dalle acque sorgive prima della loro emersione. Il substrato dell'area in frana appartiene al "Complesso dei Calcescisti con Pietre Verdi" ed è costituito in parte da scisti carbonatici; pertanto, il processo chimico che porta alla dissoluzione dei carbonati prende il nome di fenomeno carsico. L'assorbimento di anidride carbonica nell'acqua piovana e nell'acqua di infiltrazione rende quest'ultima più aggressiva nei confronti della roccia carbonatica. Una volta in contatto con la roccia, l'aggressività dell'acqua viene neutralizzata tramite la dissoluzione dei carbonati. Questo processo è controllato da due fattori.

- Cinetica di reazione: il processo di dissoluzione è endotermico, ovvero richiede apporto di energia; se l'acqua è fredda, il processo ha luogo lentamente al punto che in condizioni di climi freddi le acque riemergono ancora sottosature, ovvero senza avere completato la reazione di dissoluzione.
- Presenza di altri ioni: la presenza in soluzione, o nella roccia, di altri ioni (tipicamente Magnesio e solfati) condiziona fortemente la dissoluzione, in genere favorendola.

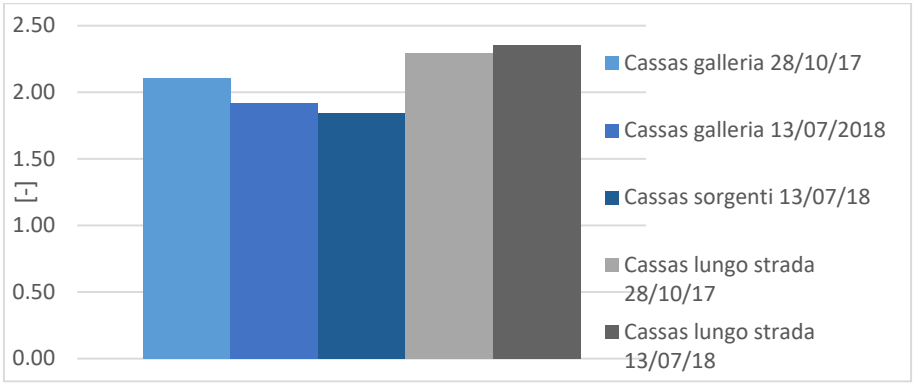
La conducibilità elettrica specifica è direttamente proporzionale alla mineralizzazione delle acque; di conseguenza, i punti di misura più ricchi di ioni positivi sono quelli che hanno la maggiore conducibilità elettrica. A conferma di tale ragionamento si riporta il *grafico 5.33*, che riassume i valori di conducibilità elettrica alla temperatura di 25°C per i tre siti in esame.

GRAFICO 5.33- ANALISI CHIMICA DELLE ACQUE, CONDUCIBILITÀ ELETTRICA SPECIFICA A 25°C



Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na) e Potassio (K) sono i cationi più significativi presenti nelle acque carsiche; nelle sorgenti in esame si è notata una preponderante concentrazione di Calcio e Magnesio. Essi derivano da processi di dissoluzione del carbonato di Calcio ($CaCO_3$). Il rapporto tra Calcio e Magnesio può essere indice dei tempi di residenza delle acque nel sottosuolo in quanto il carbonato di Calcio, dalla cui dissoluzione proviene parte del Calcio, è più rapidamente solubile del carbonato doppio di Calcio e Magnesio ($CaMg(CO_3)_2$) da cui proviene il Magnesio. Il *grafico 5.34* riassume i valori del rapporto Ca/Mg per le cinque analisi chimiche a disposizione.

GRAFICO 5.34-ANALISI CHIMICA DELLE ACQUE, RAPPORTO CA/MG



Si nota come “CASSAS lungo strada” abbia valori maggiori rispetto a ”CASSAS galleria”.

Per quanto riguarda Sodio e Potassio, essi non sono coinvolti in processi di dissoluzione sotterranea.

Nitrati, Cloruri e Solfati, insieme al bicarbonato, sono i principali anioni presenti nelle acque carsiche. I nitrati provengono dall’azoto atmosferico, dalla lisciviazione dei suoli e dagli accumuli organici e sono indice di pressione antropica sull’acquifero. I cloruri provengono principalmente dalle precipitazioni e dalla lisciviazione di strade su cui si utilizzano sali in funzione antigeliva. I solfati provengono principalmente dalla dissoluzione dei carbonati con componente gessosa ed in minore quantità dalla lisciviazione della pirite presente nei calcari; possono inoltre essere di origine antropica. Nelle cinque analisi chimiche a disposizione si è rilevata una grande quantità di solfati e bicarbonati rispetto ai restanti anioni citati.

5.8 Presenza dei solfati

Nelle cinque analisi chimiche a disposizione si è rilevata una grande quantità di solfati e bicarbonati.

I solfati provengono principalmente dalla dissoluzione dei carbonati con componente gessosa e, in minore quantità, dalla lisciviazione della pirite presente nei calcari. La presenza di solfati nelle acque circolanti, è un dato di grande importanza, poiché essi possono essere legati alla riduzione di volume in profondità la quale causa, conseguentemente, deformazioni in superficie (Sinkhole). A tal proposito, vengono ora riportate le principali conclusioni che sono state tratte da uno studio condotto in Alta Valle di Susa sui Sinkholes e sulle Deformazioni Gravitative Profonde di Versante (Alberto et al.).

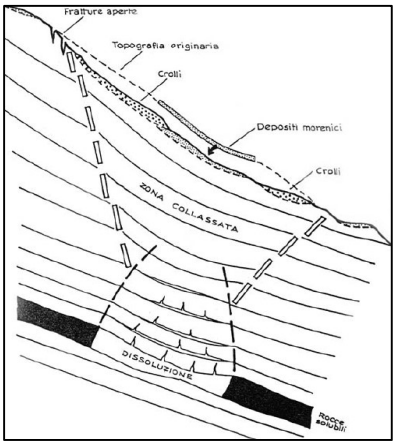


FIGURA 5.5-PROFILO GEOLOGICO ATTRAVERSO IL SINKHOLE DI VILLENUEVE (ALBERTO ET AL.)

Per Sinkholes, secondo l'accezione proposta da Monroe (1970), s'intende una depressione o collasso superficiale dovuto a crollo di piccole cavità sotterranee generate da carsismo; essi, possono essere ricondotti geneticamente alla riduzione di volume, che si registra nell'ammasso roccioso in profondità, in conseguenza di fenomeni di dissoluzione, come riportato in *figura 5.5*. Gli elementi necessari per la realizzazione di fenomeni di dissoluzione, sono rappresentati dalla presenza di masse rocciose altamente solubili (gessi ed evaporiti; calcari e marmi) e da abbondante circolazione d'acqua.

L'abbondante circolazione d'acqua nel sottosuolo è un fattore presente nel versante del Cassas, tuttavia si esclude che possano esistere degli strati di rocce solubili di spessore significativo come quello illustrato in *figura 5.5*. Si ritiene infatti che questi fenomeni di dissoluzione non vadano a concentrarsi ad una determinata profondità ma interessino localmente l'ammasso.

In ogni caso, la valle di Susa risulta essere interessata a questo tipo di fenomeni, si riporta ad esempio il Sinkhole ritrovato nei pressi di Chiomonte in *figura 5.6*.

FIGURA 5.6-SINKHOLE PRESSO CHIOMONTE (ALBERTO ET AL.)

CAPITOLO 6

6 Modellazione numerica

6.1 Introduzione

Nel presente capitolo è stata condotta un'analisi numerica agli elementi finiti di una sezione di studio che è stata estratta dall'area in frana del Cassas.

Per costruire il modello geotecnico, si è dapprima estratta la superficie topografica da ambiente GIS come descritto nel *capitolo 6.2* e, successivamente, è stata realizzata la sezione geologico-tecnica come riportato al *capitolo 6.3*. Essa è stata realizzata a partire dalle informazioni tratte dai sondaggi stratigrafici forniti dall'A.R.P.A. Piemonte e dalla sezione rappresentante il profilo delle velocità delle onde di taglio ottenuta da un'indagine di sismica a rifrazione (Brovero et al., 1996a). All'interno della sezione geologico-tecnica, si sono inserite le posizioni degli inclinometri e dei piezometri che hanno permesso di ricostruire la posizione delle superfici di scivolamento e l'andamento medio della falda. Mediante informazioni tratte da prove in sito e dedotte da studi passati, si sono caratterizzati da un punto di vista geomeccanico gli strati facenti parte della sezione geologico-tecnica, come descritto al *capitolo 6.4* per il materiale detritico e al *capitolo 6.5* per l'ammasso roccioso.

Si è deciso di condurre un'analisi numerica mediante il metodo agli elementi finiti (FEM) come riportato al *capitolo 6.6*, tarando il modello geotecnico mediante un'analisi a ritroso come spiegato al *capitolo 6.7*.

6.2 Estrazione della superficie topografica

La sezione di studio è stata estratta dal software QGIS mediante il plug-in "Profile tool" e il comando "Terrain profile".

Prima dell'estrazione sono state riportate, in ambiente GIS, tutte le informazioni disponibili come descritto nel seguito.

All'interno del software freeware QGIS è stato dapprima inserito il modello digitale del terreno (DTM), ottenuto attraverso il geo-portale della Regione Piemonte (http://www.geoportale.piemonte.it). Successivamente, esso è stato ritagliato, in modo da focalizzarsi nell'area oggetto di studio e, dal DTM ritagliato, si sono estratte le curve di livello con intervallo di 10m.

In seguito, sono stati inseriti vari layers, i quali sono stati scaricati dalla tematica "Geologia e dissesto" facente parte del geo-portale gestito dall'A.R.P.A. Piemonte (http://webgis.arpa.piemonte.it/geoportale/index.php/tematiche/geologia-e-dissesto). In particolare, sono stati scaricati i layers riferiti al perimetro dell'area in frana del Cassas, alla posizione dei sondaggi e alle evidenze morfologiche. Considerando il layer scaricato riferito alle evidenze morfologiche, esso è costituito da altri due "sotto-layer": gli elementi morfo puntuali, che saranno indicati con un asterisco nella *figura 6.1*, rappresentano le emergenze idriche (sorgenti) nell'area in esame, e gli elementi morfo lineari, i quali rappresentano l'insieme di scarpate minori presenti nel settore medio sommitale dell'area in frana, rappresentati con una linea rossa nella *figura 6.1*.

Dalle informazioni sulla posizione degli strumenti di monitoraggio della S.I.T.A.F., contenute nei vari report a disposizione, si sono inseriti singolarmente i vari strumenti in ambiente GIS; si sono quindi creati i layers chiamati "inclinometri","piezometri", "PL1" riferito al pluviometro,"T1" riferito al termometro, "misura portata" riferiti ai misuratori di portata.

Infine, dalle informazioni contenute nelle schede tecniche delle stazioni meteorologiche "Le Selle" e "Salbertrand" gestite dall'A.R.P.A. Piemonte, si sono posizionate anch'esse all'interno dell'ambiente GIS.

Una volta inserite tutte le informazioni disponibili nell'ambiente GIS, si è ricercata una sezione di studio. Si è deciso di tracciare una sezione che potesse intercettare il maggior numero di sondaggi stratigrafici, strumenti di monitoraggio e, al tempo stesso, seguisse al meglio la linea di massima

pendenza; la posizione è mostrata in *figura 6.1*. In base alla sezione scelta, si nota subito come, tra gli inclinometri e i piezometri ubicati nel sito in esame, l'inclinometro I5 e il piezometro PzCas2, essendo molto distanti dalla sezione in esame, non sono stati presi in considerazione nella successiva modellazione numerica. Per quanto riguarda gli altri inclinometri e piezometri ed evidenze morfologiche, l'inclinometro I2, l'inclinometro I4, il piezometro Pz4, il piezometro Pz6 e due delle tre emergenze idriche vanno a posizionarsi molto vicini alla sezione di studio; pertanto, tali dati saranno quelli che avranno una maggiore affidabilità per la modellazione numerica. I restanti strumenti di monitoraggio si rivelano moderatamente distanti dalla sezione scelta; si è presa la decisione di inserirli comunque nella sezione oggetto di studio.

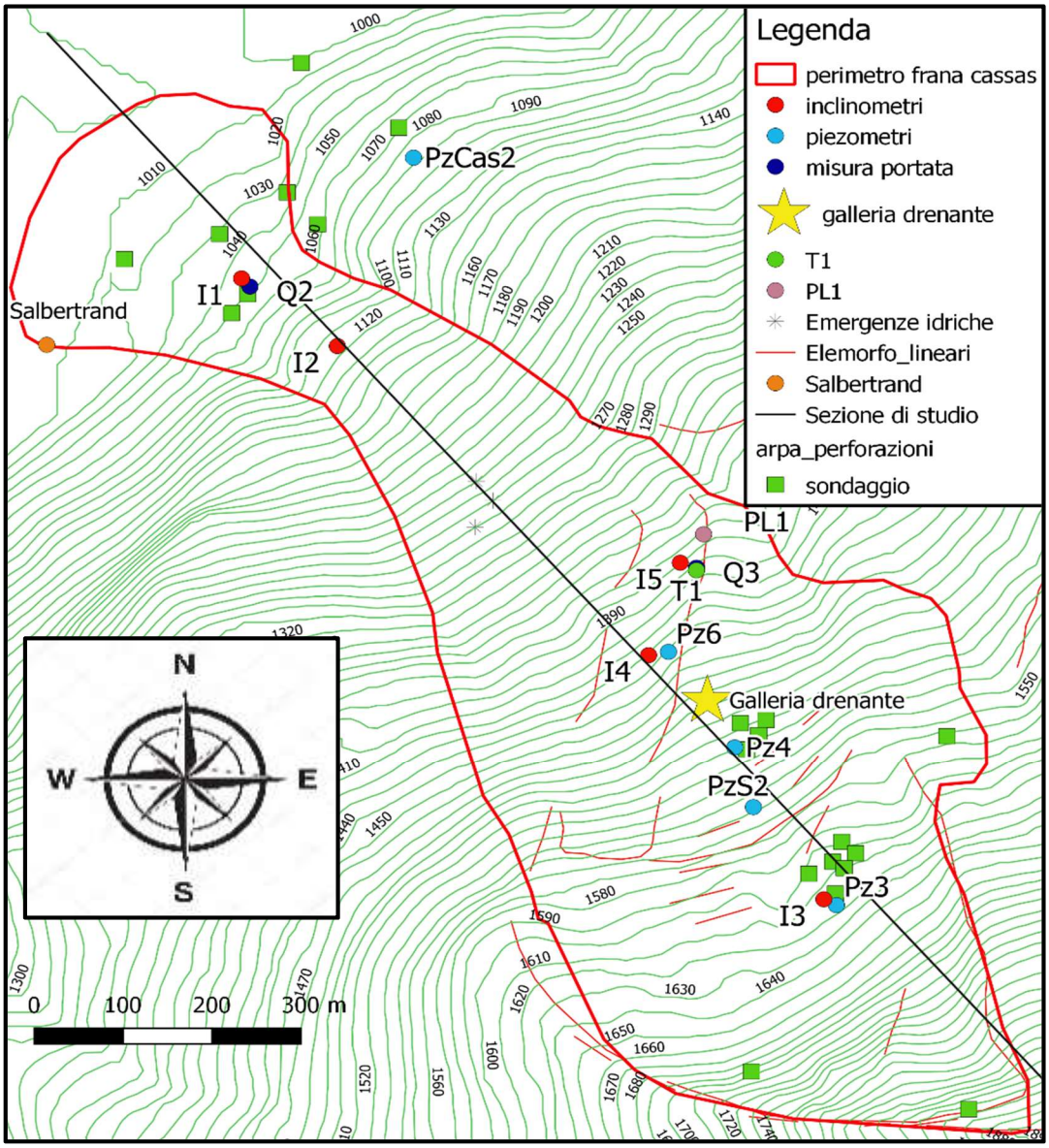


FIGURA 6.1-SEZIONE DI STUDIO RICAVATA DAL SOFTWARE QGIS

6.3 Ricostruzione della sezione geologico-tecnica

Per la ricostruzione della sezione geologico-tecnica, sono dapprima posizionati i sondaggi stratigrafici e la sezione raffigurante il profilo delle velocità delle onde di taglio, come descritto al *capitolo 6.3.1*.

È seguita un'analisi dei sondaggi stratigrafici, volta alla ricostruzione della stratigrafia del versante, e un'analisi dei dati di monitoraggio delle colonne inclinometriche, volta al tracciamento delle superfici di scivolamento, come riportato al *capitolo 6.3.2*.

È stato infine ricostruito l'andamento medio della falda, tramite le informazioni provenienti dell'analisi di monitoraggio delle colonne piezometriche e dei sondaggi stratigrafici, confrontandolo con la posizione delle superfici di scivolamento, come riportato al *capitolo 6.3.3*.

6.3.1 Sondaggi stratigrafici e sismica a rifrazione

I sondaggi stratigrafici sono stati forniti dall'A.R.P.A. Piemonte e, la sezione raffigurante il profilo delle velocità delle onde di taglio, è stata ottenuta dall'indagine di sismica a rifrazione realizzata da 1500m a 1000m, riportata in un precedente studio (Brovero et al., 1996a).

Si sono dapprima inserite le coordinate della superficie topografica, ricavate in precedenza dal software QGIS, all'interno di un ambiente vettoriale creando quindi una polilinea. Il software che è stato utilizzato è AutoCAD.

Successivamente, mediante la conoscenza della quota di ubicazione dei sondaggi, essi sono stati posizionati all'interno della sezione e, da 1500m a 1000m, è stato inserito anche il profilo di velocità delle onde di taglio. La sezione presentava quindi l'aspetto illustrato in *figura 6.2.*

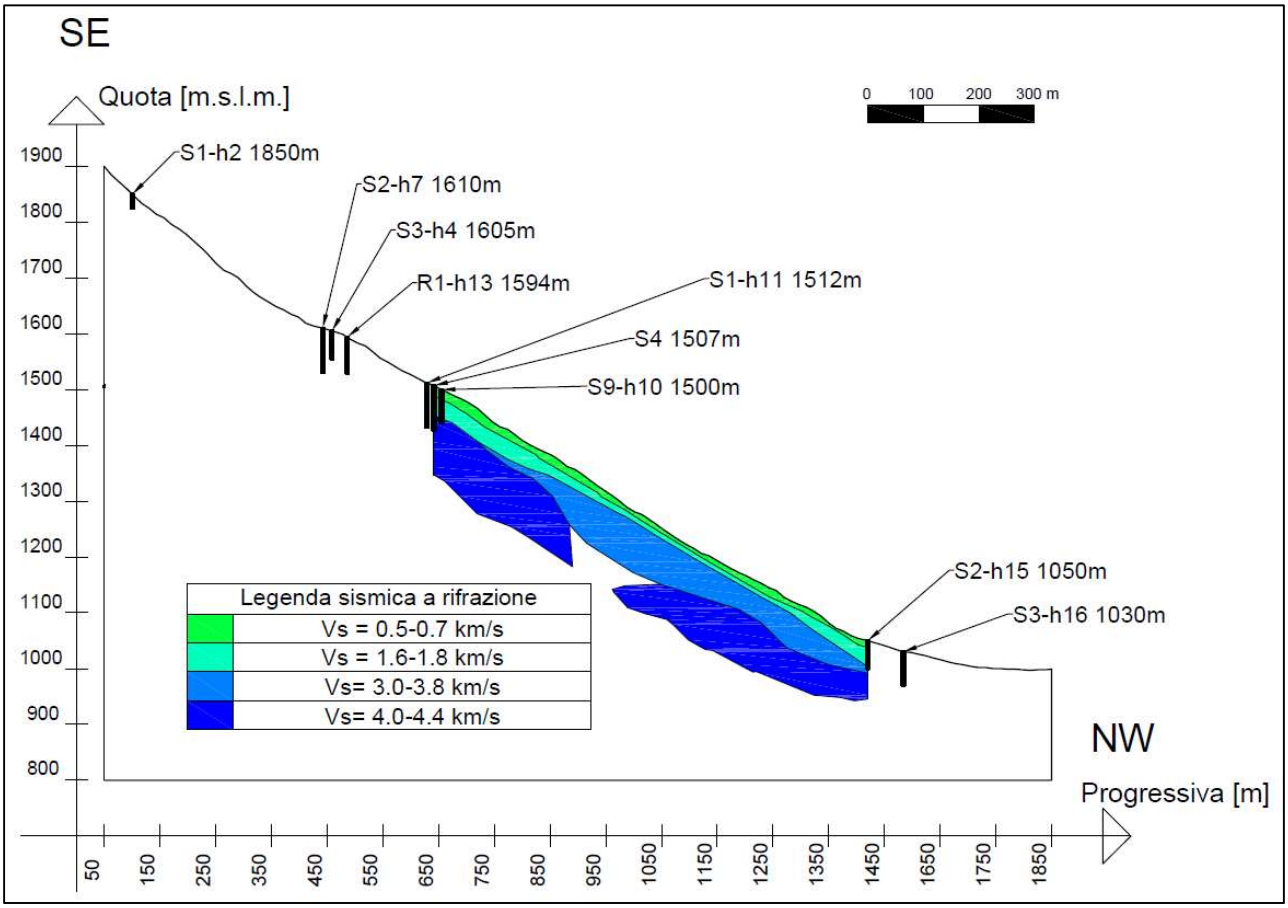


FIGURA 6.2-INSERIMENTO DEI SONDAGGI STRATIGRAFICI E DELLA SISMICA A RIFRAZIONE ALL'INTERNO DELLA SEZIONE DI STUDIO

6.3.2 Stratigrafia e superfici di scivolamento

Sono stati analizzati nel dettaglio i singoli sondaggi stratigrafici e le note descrittive riguardanti la sismica a rifrazione del precedente studio (Brovero et al., 1996a). Riassumendo le note descrittive della sismica a rifrazione (Programma Interreg I Italia-Francia, 1996) si aveva:

- un primo strato di materiale caotico prevalentemente a matrice sabbioso-limosa inglobanti clasti eterometrici e talora massi di diametro massimo 2m la cui velocità di propagazione delle onde di taglio varia tra 500 e 1800m/s;
- un ammasso roccioso molto disarticolato caratterizzato da velocità delle onde sismiche comprese tra 3000 e 3800 m/s;
- strato di calcescisti costituenti il substrato roccioso, quantunque fratturati con velocità delle onde sismiche compresa tra 4000 e 4400m/s.

In un secondo tempo, i sondaggi stratigrafici sono stati "semplificati", attribuendo ad ognuna delle descrizioni relative ad una certa potenza di un certo sondaggio stratigrafico, dei numeri variabili da 1 a 5, i quali si riferiscono ad uno dei cinque strati con cui si è deciso di semplificare la realtà: i primi

due strati rappresentano la massa di materiale detritico grossolano in movimento al di sopra dell'ammasso roccioso in calcescisto e, gli ultimi tre, sono stati utilizzati per caratterizzare al meglio l'evoluzione del grado di fratturazione e di alterazione dell'ammasso roccioso decrescente al crescere della profondità. I cinque strati vengono descritti di seguito nel dettaglio in ordine crescente di profondità:

- strato di terreno di copertura limoso-sabbioso fine con rari clasti (strato 5): si sviluppa a partire dalla quota di 1715mslm fino al piede del versante, ha una potenza molto ridotta di circa 2-3m, e si evolve seguendo l'andamento della superficie topografica;
- strato di detrito in abbondante matrice sabbiosa (strato 4): esso è composto da clasti rocciosi e ghiaia eterometrica in abbondante matrice sabbiosa fine e ghiaia con sabbia limosa o debolmente limosa; tale strato ha una potenza variabile intorno alla cinquantina di metri ed è alla base di esso, che si sono trovate le superfici di scivolamento;
- strato più superficiale dell'ammasso roccioso (strato 3): esso è stato definito nei sondaggi come il "cappellaccio di calcescisto", il quale si presenta molto fratturato ed alterato e ha una potenza variabile nell'intervallo di qualche metro; tale potenza è stata controllata andando a considerare, nella semplificazione dei sondaggi stratigrafici, le porzioni di ammasso roccioso aventi un RQD (Rock Quality Designation) inferiore al 30% e caratterizzate quindi da un fitto grado di fratturazione;
- strato intermedio dell'ammasso roccioso (strato 2): esso è uno strato in calcescisto diffusamente fratturato e moderatamente alterato; la sua potenza è variabile intorno alla decina di metri e, essa è stata controllata andando a considerare nella semplificazione dei sondaggi stratigrafici, le porzioni di ammasso roccioso aventi un RQD compreso tra il 30% e il 70% e un non eccessivo grado di fratturazione ed alterazione;
- strato di base del substrato in calcescisto (strato 1): esso costituisce il vero e proprio substrato roccioso in calcescisto, il quale si presenta moderatamente fratturato e lievemente alterato; si è deciso di assegnare questo strato quando il RQD risultava essere compreso tra il 70% e il 100% e il grado di fratturazione e alterazione erano piuttosto ridotti.

Considerando, ad esempio, il sondaggio più a monte, ubicato a 1850m, la semplificazione della stratigrafia è illustrata nella *tabella 6.1*. Si ricorda che il sottile strato superficiale di copertura,

composto da terreno limoso-sabbioso fine con rari clasti, è stato trovato a partire dalla quota 1715m fino al piede del versante.

TABELLA 6.1-SEMPLIFICAZIONE DEI SONDAGGI STRATIGRAFICI FORNITI DALL'A.R.P.A. PIEMONTE

Sondaggio: S1 h2 1850m					
Prof. P.C.	Potenza	Descrizione	Falda da p.c.	RQD [%]	Strato
2	2	Terreno di copertura limoso sabbioso con clasti rocciosi eterometrici, frustali vegetali e apparati radicali, poco consistente, colore marrone chiaro	4.2	/	4
2.6	0.6	Calcescisto alterato, colore nerastro		15	3
4	1.4	Calcescisto filladico		15	3
6	2	Calcescisto alterato e assai fratturato, talora sfatto, colore grigio scuro con patine acracee di ossidazione		0	3
8.7	2.7	Calcescisto filladico a letti di fillasilicati argentei, debolemente alterato con livelli centimetrici anche sfatti e ossidati		60	2
22	13.3	Calcescisto filladico a letti di fillosilicati argentei. Presenza di vene max. centimetriche albitico quarzose. A letto livello metrico fratturato		90 e, nell'ultimo metro di potenza, 50	2
22.9	0.9	vuoto		/	2
25	2.1	Calcescisto filladico con una passata assai fratturata debolmente alterata. A letto livello decimetrico albitico quarzoso		50	2

L'attività di monitoraggio, svolta attraverso l'ispezione cadenzata delle colonne inclinometriche installate sul corpo di frana, è iniziata nel 1994 ed ha permesso di riconoscere le caratteristiche principali del fenomeno franoso mettendo in risalto i volumi e la dinamica evolutiva dalla porzione in movimento: attraverso le informazioni tratte dalle colonne inclinometriche si è ipotizzata la presenza di due superfici di scivolamento, una superiore e l'altra inferiore, che risultano indipendenti tra loro come illustrato in *figura 6.3* (Forlati et al., 2004).

La superficie di scivolamento superiore si sviluppa a partire dal settore di coronamento, raggiunge una profondità di circa 48m in prossimità della colonna inclinometrica I3 e di circa 58m in prossimità della colonna inclinometrica I4 e, infine, riemerge in prossimità dell'allineamento di sorgenti posizionate nel settore mediano del versante intorno ai 1300m. Per quanto riguarda la superficie di scivolamento inferiore, essa nasce in prossimità dell'allineamento di sorgenti a circa 1300m,

raggiunge la profondità di 13m in corrispondenza della colonna inclinometrica I2 e riemerge al piede del versante (Forlati et al., 2004 & Programma Interreg IVa Risknat, 2012).

Gli inclinometri ubicati al piede della frana indicano una media di movimento di 30mm/anno (Forlati et al., 2004); altri studi (Programma Interreg IVa Risknat, 2012) riportano velocità di movimento, a testa tubo, di circa 20mm/anno.

La massa in movimento è composta da materiale roccioso eterogeneo fluttuante in una matrice sabbiosa-limosa e vicino alla superficie di scivolamento sono state trovate brecce di roccia.

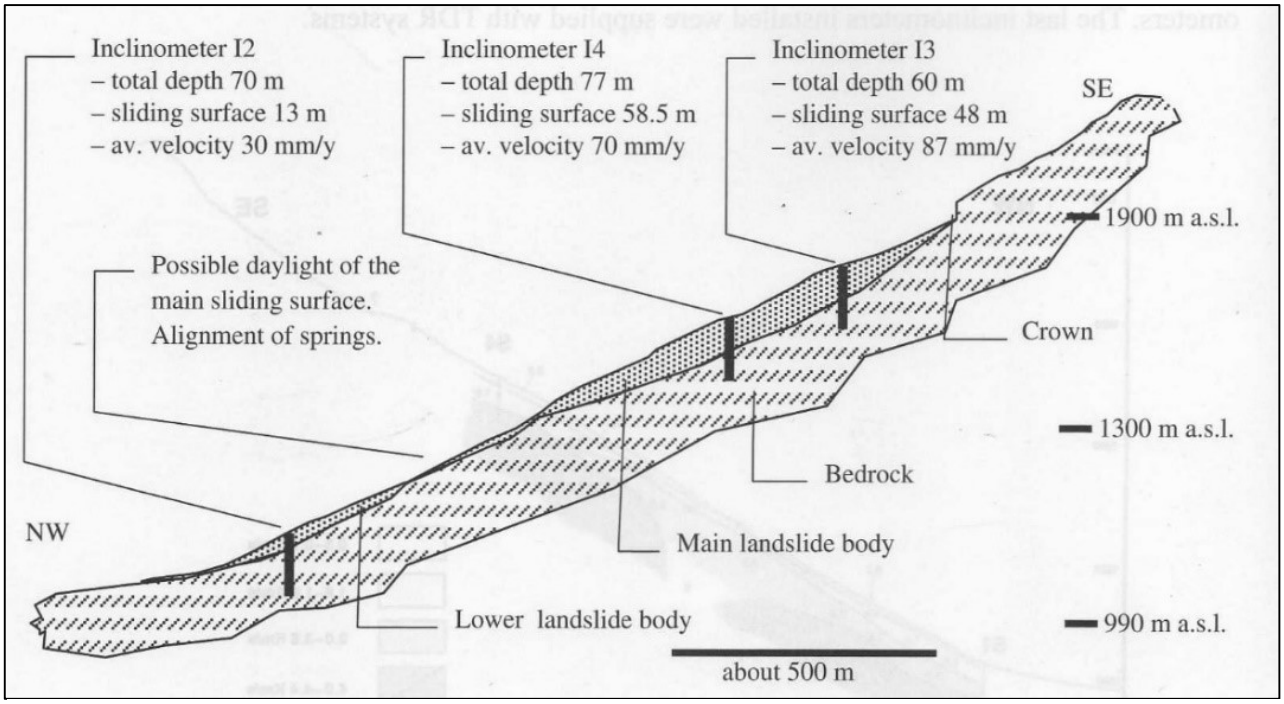
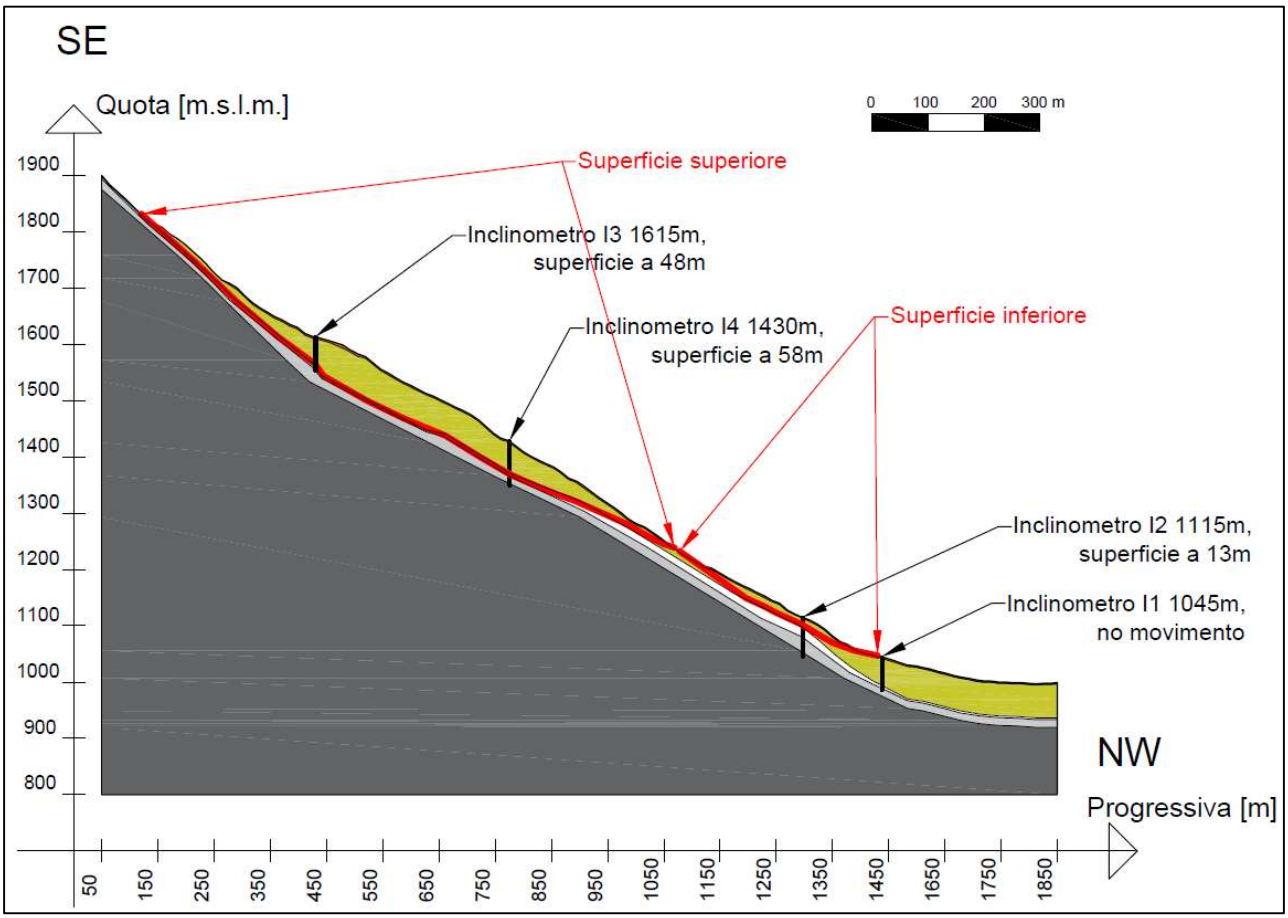


FIGURA 6.3-SEZIONE SCHEMATICA MOSTRANTE I PIÙ RILEVANTI STRUMENTI DI MONITORAGGIO E RISULTATI OTTENUTI (FORLATI ET AL., 2004)

L'analisi dei dati inclinometrici condotta nella finestra temporale 2012-2018 al *capitolo 5.4*, ha ritrovato le stesse superfici di scivolamento e, per quanto riguarda la colonna inclinometrica I1 posizionata al piede del versante a valle della colonna inclinometrica I2, non sono state ritrovate evidenze significative di movimento.

Avendo in mente la stratificazione descritta, si sono realizzate quattro polilinee all'interno dell'ambiente vettoriale del software AutoCAD e si è ottenuta la sezione geologico-tecnica rappresentata in *figura 6.4* in cui è riportata anche la posizione delle due superfici di scivolamento dedotta dall'analisi di monitoraggio degli inclinometri. Tali superfici di scivolamento vanno a

localizzarsi in prossimità dell'interfaccia tra strato detritico (Strato 2) e strato più superficiale dell'ammasso roccioso (Strato 3).



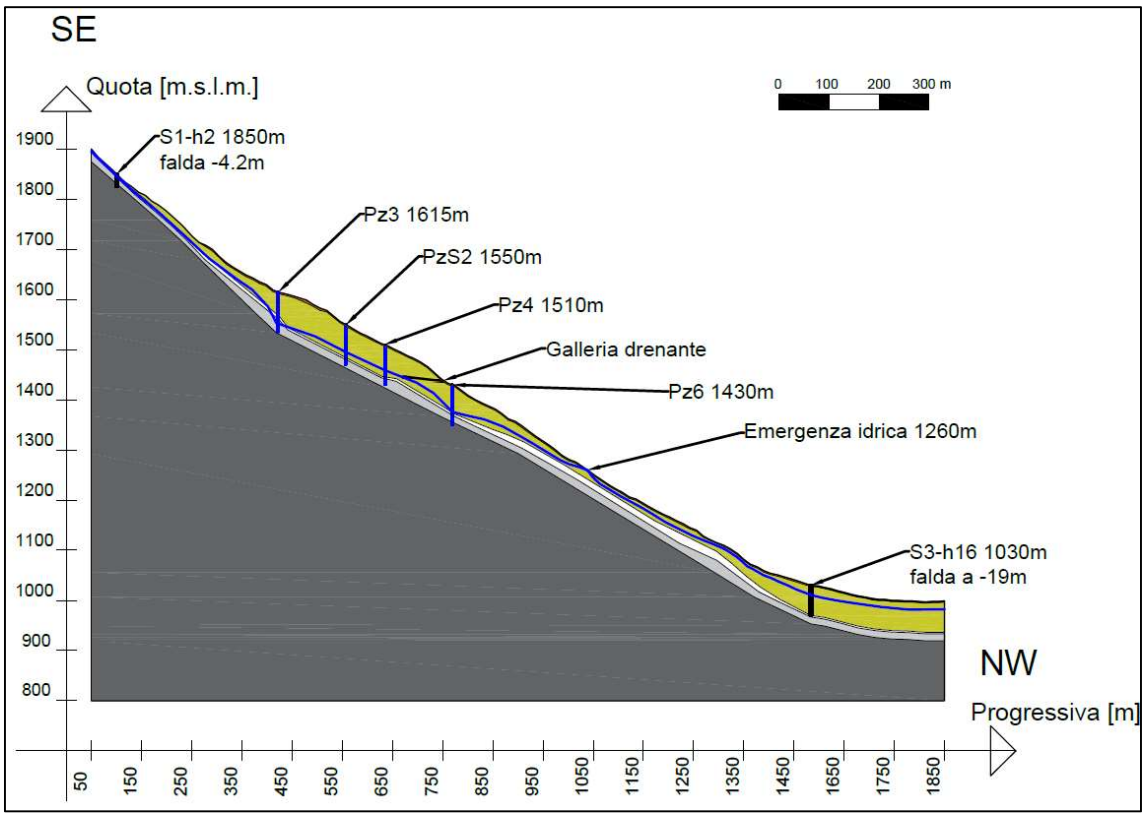
Stratigrafia	
	Strato 1: terreno di copertura limoso-sabbioso fine con rari clasti
	Strato 2: strato di detrito in matrice sabbiosa
	Strato 3: calcescisto molto fratturato ed alterato (RQD<30)
	Strato 4: calcescisto diffusamente fratturato moderatamente alterato (30<RQD<70)
	Strato 5: Calcescisto meno fratturato e alterato (70<RQD<100)

FIGURA 6.4-SEZIONE GEOLOGICO-TECNICA CON POSIZIONE DEGLI INCLINOMETRI E RICOSTRUZIONE DELLA POSIZIONE DELLE SUPERFICI DI SCIVOLAMENTO DALL'ANALISI DI MONITORAGGIO DEGLI INCLINOMETRI

6.3.3 Soggiacenza della falda e superfici di scivolamento

Nella *figura 6.5* è riportato l'andamento della falda medio, ottenuto con riferimento:

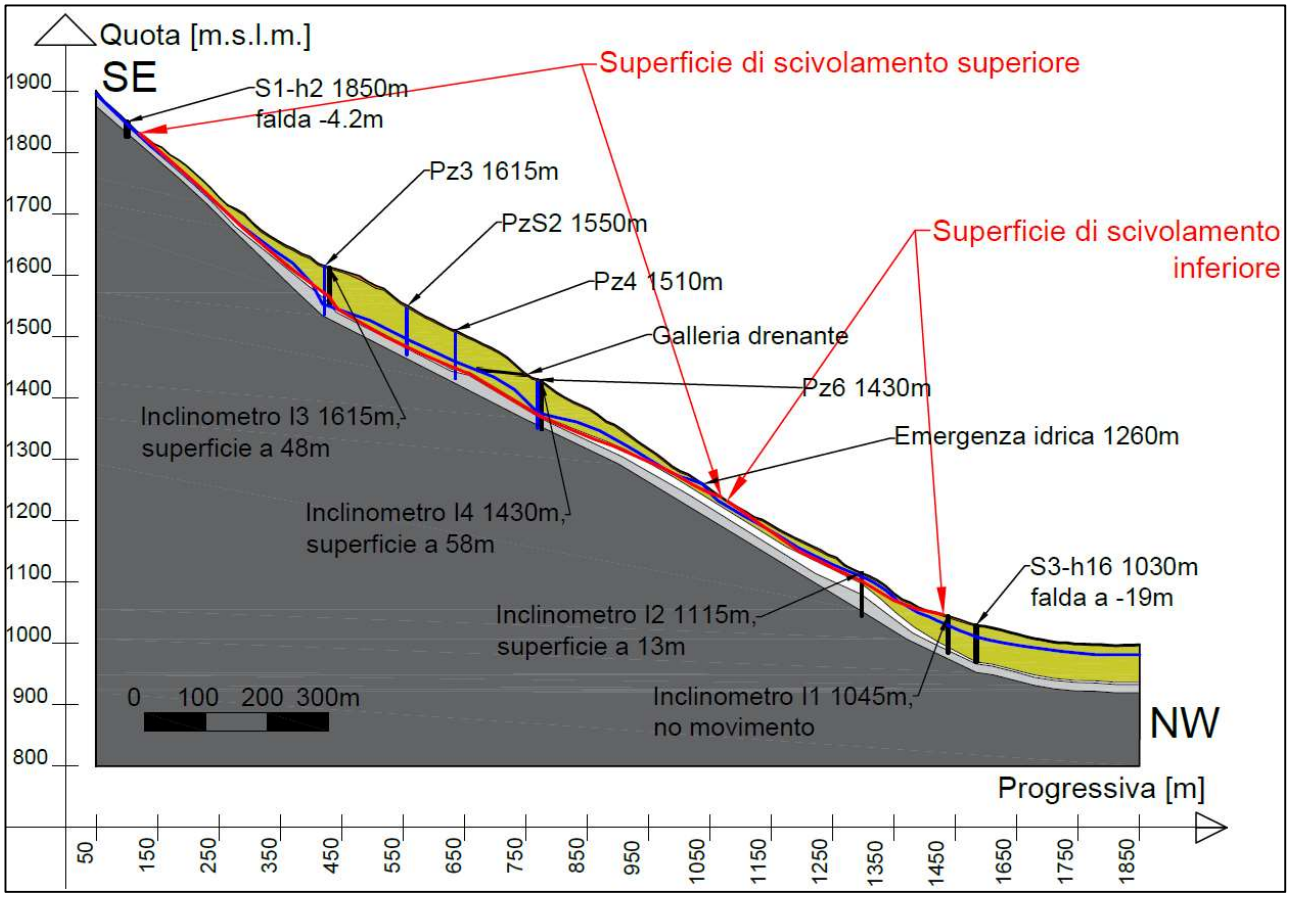
- alla soggiacenza media dei piezometri rilevata nel periodo di analisi dei dati di monitoraggio 2012-2018 per quanto riguarda il settore medio sommitale;
- alla posizione della falda rilevata dai sondaggi S1-h2 (1850mslm) e S3-h16 (1030mslm per quanto riguarda il settore di coronamento (intorno ai 1850mslm) e il piede del versante (intorno ai 1030mslm);
- alla posizione delle emergenze idriche (tra 1250-1300mslm) dove è lecito attendersi che la falda arrivi al piano campagna per il settore medio inferiore (intorno ai 1300mlsm).



Stratigrafia	
	Strato 1: terreno di copertura limoso-sabbioso fine con rari clasti
	Strato 2: strato di detrito in matrice sabbiosa
	Strato 3: calcescisto molto fratturato ed alterato (RQD<30)
	Strato 4: calcescisto diffusamente fratturato moderatamente alterato (30<RQD<70)
	Strato 5: Calcescisto meno fratturato e alterato (70<RQD<100)

FIGURA 6.5-SEZIONE GEOLOGICO-TECNICA CON POSIZIONE DELLA FALDA MEDIA NEL PERIODO 2012-2018

Nella *figura 6.6* si è deciso di riportare l'andamento medio della falda con la posizione delle superfici di scivolamento. Si nota come, nella maggior parte del versante, la soggiacenza della falda si trova al di sopra della superficie di scivolamento fatta eccezione per alcune zone quali in prossimità dell'inclinometro I3, in prossimità delle emergenze idriche nella porzione medio sommitale di versante e al piede della superficie di scivolamento inferiore.



Stratigrafia	
	Strato 1: terreno di copertura limoso-sabbioso fine con rari clasti
	Strato 2: strato di detrito in matrice sabbiosa
	Strato 3: calcescisto molto fratturato ed alterato (RQD<30)
	Strato 4: calcescisto diffusamente fratturato moderatamente alterato (30<RQD<70)
	Strato 5: Calcescisto meno fratturato e alterato (70<RQD<100)

FIGURA 6.6-SEZIONE GEOLOGICO-TECNICA E RICOSTRUZIONE DELLE SUPERFICI DI SCIVOLAMENTO DALL'ANALISI DI MONITORAGGIO DEGLI INCLINOMETRI

6.4 Caratterizzazione geotecnica del materiale detritico

Al fine di caratterizzare, da un punto di vista geotecnico i due strati superiori della sezione, si è fatto riferimento ai risultati delle prove penetrometriche dinamiche (SPT), eseguite al piede del versante, forniti da A.R.P.A. Piemonte.

Si avevano tre prove a disposizione e, per ognuna di esse sono state riportate in *allegato VI* le caratteristiche generali, le caratteristiche geologiche, la stratigrafia intercettata e i valori delle tre serie di colpi (N1, N2 e N3) realizzati ogni 15 cm in corrispondenza della profondità a cui è stata eseguita la prova. Nel *capitolo 6.4.1* verranno elencate le formule di correlazione utilizzate per determinare i parametri geotecnici e nel *capitolo 6.4.2* verranno riportati i valori ottenuti.

6.4.1 Elenco formule di correlazione utilizzate per determinare i parametri geotecnici

Dal valore Nspt è possibile determinare il valore dell'angolo di resistenza al taglio mediante espressioni di letteratura. Sono state prese in considerazione più espressioni di letteratura in modo da avere un quadro generale della variazione del valore dell'angolo di resistenza al taglio.

1. Relazione di Shioi e Fukini, pubblicata nel Road Bride Specification (1982), la quale è valida per sabbie fini o limose e trova le sue condizioni ottimali di applicabilità per profondità di prova superiori a 8-10m per terreni sopra falda e superiori a 15 metri per terreni in falda.

$$\phi = \sqrt{15 \cdot N_{SPT}} + 15 \quad (Shioi\ \&\ Fukuni,\ 1982a)$$

2. Relazione di Shioi e Fukuni, pubblicata nel Japanese National Railway (1982); tale relazione è valida per tutti i tipi di suolo e l'angolo è pari a

$$\phi = 0.3 \cdot N_{SPT} + 27 \quad (Shioi\ \&\ Fukuni,\ 1982b)$$

3. Relazione di Schmertmann (1978); tale relazione è valida solo per le sabbie e le ghiaie l'angolo è calcolato in funzione della densità relativa. Le espressioni sono le seguenti:

   $\phi = 28 + 0.14 \cdot D_R$ per sabbia fine uniforme;

   $\phi = 31.5 + 0.10 \cdot D_R$ per sabbia media uniforme o fine ben gradata;

   $\phi = 34.5 + 0.10 \cdot D_R$ per sabbia grossa uniforme o media ben gradata;

   $\phi = 38 + 0.08 \cdot D_R$ per ghiaietto uniforme o sabbie e ghiaie poco limose;

   Per Schmertmann, tra i quattro casi a disposizione, si è ritenuto che, la formula che si avvicinasse di più al caso in esame fosse quella riferita a sabbie e ghiaie poco limose, vista la grande disomogeneità del materiale detritico rilevato dai sondaggi. La densità relativa è

stata calcolata con riferimento alla formula di Skempton (1986), la quale risulta valida per le sabbie; in seguito si riportano le espressioni utilizzate.

$$(N_1)_{60} = C_N \cdot N_{SPT}$$

In cui:

$$C_N = \frac{2}{1+\frac{\sigma'_v}{100}} \quad \text{per sabbie fini} \quad \& \quad C_N = \frac{3}{2+\frac{\sigma'_v}{100}} \quad \text{per sabbie grosse}$$

$$D_R = \sqrt{C_N \cdot \frac{N_{SPT}}{60}}$$

Infine, per quanto riguarda la densità, la quale sarà utilizzata per calcolare il peso specifico, il quale sarà utilizzato per calcolare le tensioni efficaci verticali, le quali saranno utilizzate per la stima della densità relativa con la formula di Skempton (1986), si è fatto riferimento alla tabella di Terzaghi e Peck (Terzaghi e Peck, 1967) trovata all'interno del Capitolo 1 della quarta edizione del libro "Geotecnica" del Prof. Lancellotta del Politecnico di Torino.

4. Per la sabbia limosa si è anche fatto riferimento ai valori indicativi dell'angolo di resistenza al taglio riportati nella tabella 1.5 del libro "Progettazione Geotecnica" dei professori Lancellotta, Costanzo e Foti del Politecnico di Torino.

In riferimento al valore del modulo elastico, si è utilizzata la relazione di Burland e Burbridge (1985), la quale è una correlazione valida per tutti i tipi di suolo e fornisce un range di valori plausibili per:

$$Nspt = 4 \longrightarrow E = (1.6 - 2.4) \cdot Nspt$$

$$Nspt = 10 \longrightarrow E = (2.2 - 3.4) \cdot Nspt$$

$$Nspt = 30 \longrightarrow E = (3.7 - 5.6) \cdot Nspt$$

$$Nspt = 60 \longrightarrow E = (4.6 - 7.0) \cdot Nspt$$

Dato che si avevano diversi valori di Nspt vicini a 45, è stata utilizzata una nuova relazione, ottenuta tramite una media delle relazioni per Nspt pari a 30 e per Nspt pari a 60:

$$Nspt = 45 \longrightarrow E = (4.2 - 6.3) \cdot Nspt$$

L'utilizzo di queste formule permette di ottenere un valore di modulo elastico in MPa.

Essendo che tale formula fornisce già un ampio range di variazione del modulo, si è deciso di utilizzare solo essa e di perfezionare poi il valore del modulo elastico nei vari tentativi che saranno realizzati per tarare il modello numerico tramite una Back Analysis.

Si riportano in *allegato VII* i valori ottenuti per le varie perforazioni.

6.4.2 Riassunto dei parametri ottenuti

Nella *tabella 6.2,* vengono riassunte le proprietà che sono state ottenute per le diverse tipologie di materiali in cui sono state condotte le prove penetrometriche dinamiche in sito.

TABELLA 6.2-RIASSUNTO DELLE PROPRIETÀ DEI MATERIALI DA PROVE IN SITO

Perf.	Materiale	γ	φ	E		
		[kN/m3]	[°]	Emin [Mpa]	Emax [Mpa]	Emedio [Mpa]
101071	Ghiaia medio fine in abbondante matrice argilloso sabbiosa a tratti limosa	22	38.1	180.6	270.9	225.75
	Ghiaia in matrice argilloso sabbiosa	22	38.0	176.4	264.6	220.5
101072	Sabbia fine limosa superficiale	20	28.1-31	9.6	14.4	12
	Ghiaia medio grossa in abbondante matrice argilloso limosa debolmente sabbiosa fine	20	38.1	125.8	190.4	158.1
	Ghiaia media in abbondante matrice sabbiosa fine debolmente argilloso limosa con livelli sabbioso limosi plastici	22	38.1	199.5	299.3	249.4
	Ghiaia media in abbondante matrice sabbiosa fine	22	38	176.4	264.6	220.5
102503	Ghiaia con sabbia limosa	22	38.1	195.3	293.0	244.1
	Ghiaia con sabbia debolmente limosa	22	38	174.3	261.5	217.9

Tali valori sono stati inizialmente assegnati ai due strati di materiale detritico della sezione geologica in base ai due seguenti ragionamenti:

- poiché, in base alle stratigrafie ricavate dai sondaggi, lo strato di materiale più fine si trova in superficie e inoltre, secondo la perforazione 101072, lo strato di sabbia limosa è stato intercettato tra 1.4 e 2m dal piano campagna, si è deciso di attribuite i parametri di deformabilità e resistenza ricavati per la sabbia limosa al primo strato della sezione geologica;
- osservando i valori di resistenza e deformabilità ottenuti per i vari strati di ghiaia, si nota come essi abbiano un angolo di resistenza al taglio e di modulo di deformabilità simile; inoltre, dalle prove in sito, tali valori sono stati ricavati tra una profondità di 10.8m e 29m

dal piano campagna. Si è deciso quindi, anche per non complicare eccessivamente il modello numerico con la suddivisione di tale strato di ghiaia in più sotto-strati, in cui comunque non si avevano sondaggi stratigrafici a sufficienza per fare una dettagliata suddivisione, di assegnare come valori di partenza, nella futura Back Analysis, un angolo di resistenza al taglio pari a 38° e un modulo di deformabilità variabile nell'intervallo tra i valori ricavati.

6.5 Caratterizzazione geotecnica dell'ammasso roccioso

Al fine di caratterizzare da un punto di vista geo-meccanico l'ammasso roccioso in esame, è necessario definirne le sue proprietà elastiche e il criterio di rottura.

Per definire queste caratteristiche si è fatto riferimento: ai dati provenienti da studi passati condotti sul sito del Cassas o su analoghi substrati rocciosi ubicati nell'alta Valle di Susa, ai risultati ottenuti dai sondaggi stratigrafici dell'A.R.P.A. Piemonte e, infine, ai valori di letteratura.

Come è già stato possibile osservare dalla sezione geologico-tecnica contenuta nel *capitolo 6.3*, l'ammasso roccioso è stato suddiviso in tre strati caratterizzati da un crescente grado di fessurazione ed alterazione al diminuire della profondità. Sarà quindi necessario definire i parametri per tutti e tre i strati con cui si è suddiviso il substrato in calcescisto. Al fine di definire il criterio di rottura e le proprietà elastiche si è deciso di passare attraverso le correlazioni con gli indici di classificazione.

Si è deciso di utilizzare l'indice RMR modificato (Rock Mass Rating, Bieniawski) per i tre strati con cui si è suddiviso l'ammasso in esame e poi, attraverso la formula di correlazione

$$GSI = RMR_{mod} - 5$$

si è calcolato l'indice GSI (Geological Stress Index).

Si è partiti quindi dalla stima dell'RMR modificato in cui si devono considerare quattro parametri: resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta indicata con "C_0", "RQD" (Rock Quality Designation), spaziatura delle discontinuità e condizione delle discontinuità. Esiste ancora un quinto parametro che permette di tener conto delle venute d'acqua; tuttavia, essendo che l'obiettivo è definire l'RMR modificato, a tale parametro si assegna il valore massimo pari a 15.

Partendo dal primo parametro, ovvero la resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta, dalle informazioni estratte dal Programma Interreg (Programma Interreg I Italia-Francia, 1996), riportate all'interno del *capitolo 2.7*, risulta che si sono ottenute, attraverso prove di laboratorio condotte sui calcescisti, due valori di resistenza: per calcescisti massivi C_0=58MPa e per calcescisti filladici C_0=36MPa. Nel modello si è fatto riferimento al valore medio pari a C_0=47MPa; pertanto, con riferimento alla *tabella 6.3*, tale valore ricade nell'intervallo 25-50MPa e quindi sono stati assegnati 4 punti a tutti e tre gli strati con cui è stato suddiviso il substrato.

TABELLA 6.3- DEFINIZIONE DEL PUNTEGGIO DA ATTRIBUIRE ALLA RESISTENZA A COMPRESSIONE MONOASSIALE (MATERIALE DIDATTICO DEL CORSO DI MECCANICA DELLE ROCCE, SCAVIA C. E & BARBERO M., 2017)

Co [MPa]	<1	1÷5	5÷25	25÷50	50÷100	100÷250	>250
Is [MPa]	Per bassi valori e preferibile la prova di compressione monoassiale			1÷2	2÷4	4÷10	>10
Punteggio	**0**	**1**	**2**	**4**	**7**	**12**	**15**

Per quanto riguarda l'RQD (Rock Quality Designation) esso rappresenta il recupero percentuale modificato, ed è dato dalla somma percentuale degli spezzoni di carota di lunghezza maggiore di 10cm rapportati alla lunghezza totale considerata; come già detto, in base ai valori forniti dai sondaggi stratigrafici, si è deciso di suddividere l'ammasso roccioso in tre strati aventi valore crescente di RQD con la profondità in cui:

- lo strato più superficiale dell'ammasso roccioso è caratterizzato da valori di RQD<30%;
- lo strato intermedio dell'ammasso roccioso è caratterizzato da valori di RQD compresi tra il 30% e il 70%;
- lo strato più profondo è caratterizzato da valori di RQD>70%.

Con riferimento alla *tabella 6.4*, sono stati assegnati 3 punti per lo strato superiore, 11 punti per lo strato intermedio e 17 punti per lo strato più profondo.

TABELLA 6.4-DEFINIZIONE DEL PUNTEGGIO DA ATTRIBUIRE AL RQD (MATERIALE DIDATTICO DEL CORSO DI MECCANICA DELLE ROCCE, SCAVIA C. & BARBERO M., 2017)

RQD [%]	<25	25÷50	50÷75	75÷90	90÷100
Punteggio	**3**	**8**	**13**	**17**	**20**

Infine, per quanto riguarda il punteggio da assegnare alle discontinuità, in termini di spaziatura e condizione, si è fatto riferimento ai punteggi contenuti in *tabella 6.5* e *tabella 6.6.* L'assegnazione dei punteggi è stata fatta tenendo presente che la spaziatura e le condizioni delle discontinuità variano molto nel versante in esame, come descritto nel lavoro di Lapenta e Trombetta (Lapenta & Trombetta, 1996) riportato al *capitolo 2.7*. Sebbene la spaziatura e le condizioni delle discontinuità varino molto nel versante è stato possibile comprendere che, nel complesso, il grado di fratturazione e di alterazione dell'ammasso roccioso in calcescisti tende a diminuire con il crescere della profondità, pertanto saranno assegnati dei punteggi in termini di spaziatura e condizioni delle discontinuità crescenti con la profondità.

Lo strato più superficiale dell'ammasso roccioso, indicato anche come il "cappellaccio dei calcescisti", presenta una spaziatura molto ridotta inferiore alla decina di centimetri pertanto sono stati assegnati 5 punti, nello strato intermedio la spaziatura cresce arrivando all'ordine di qualche decina di centimetri quindi sono stati assegnati 8 punti e, nello strato più profondo essa cresce ulteriormente arrivando ad avere spaziature comprese tra mezzo metro e un metro pertanto sono stati assegnati 10 punti. Per quanto riguarda le condizioni delle discontinuità, lo strato superficiale di ammasso roccioso si presenta alterato, di colore nerastro, talora sfatto con patine di ossidazione e presenza di filladi, pertanto, è stato assegnato ad esso il punteggio minore pari a 0 dalla *tabella 6.6* e, tenuto conto che le condizioni delle discontinuità migliorano con la profondità, è stato assegnato un punteggio pari a 10 per lo strato intermedio e pari a 20 per lo strato più profondo.

La *tabella 6.7* sottostante riassume i punteggi assegnati.

TABELLA 6.5- DEFINIZIONE DEL PUNTEGGIO DA ATTRIBUIRE ALLA SPAZIATURA MEDIA DELLE DISCONTINUITÀ (MATERIALE DIDATTICO DEL CORSO DI MECCANICA DELLE ROCCE, SCAVIA C. & BARBERO M., 2017)

Spaziatura media [m]	**<0.06**	0.06÷0.2	0.2÷0.6	0.6÷2	>2
Punteggio	**5**	**8**	**10**	**15**	**20**

TABELLA 6.6- DEFINIZIONE DEL PUNTEGGIO DA ATTRIBUIRE ALLA CONDIZIONE GENERALE DELLE DISCONTINUITÀ (MATERIALE DIDATTICO DEL CORSO DI MECCANICA DELLE ROCCE, SCAVIA C. & BARBERO M., 2017)

Condizioni generali discontinuità	Riempimento di argilla molle di potenza > 5 mm o Discontinuità collegate aperture > 5 mm	Superfici lisce e riempimenti argillosi di potenza < 5 mm o Discontinuità collegate con aperture di 1÷5 mm	**Superfici poco scabre. Apertura delle discontinuità < 1mm**	**Superfici scabre. Apertura delle discontinuità < 1mm**	**Superfici molto scabre. Discontinuità chiuse e separate**
Punteggio	**0**	**10**	**20**	**25**	**30**

TABELLA 6.7-RIASSUNTO DEI PUNTEGGI ASSEGNATI E CALCOLO DELL'INDICE GSI PER GLI STRATI CARATTERIZZANTI L'AMMASSO ROCCIOSO IN CALCESCISTI

	C0	RQD	Spaziatura Discontinuità	Condizioni discontinuità	Acqua	RMRmod	GSI
Strato superiore fratturato e alterato	4	3	5	0	15	27	22
Strato intermedio	4	11	8	10	15	48	43
Substrato	4	17	10	20	15	66	61

Successivamente, si è deciso di provare a vedere se si potesse fare un confronto con qualche studio passato. Nel *capitolo 2.7* è stato riportato un istogramma di Lapenta e Trombetta (Lapenta e Trombetta, 1996) illustrato nel *grafico 2.1,* che riporta dei valori di RMR ottenuti attraverso l'analisi di quattro provini di calcescisto estratti dall'ammasso roccioso in esame nel sito del Cassas.

Si è deciso di provare a calcolare l'RMR per verificare se i valori ottenuti potessero avvicinarsi al punteggio medio di RMR ottenuto nello studio di Lapenta e Trombetta pari a 40. Per calcolare l'RMR bisogna considerare anche il parametro delle venute d'acqua; sulla base di quanto riportato al *capitolo 2.7*, in particolare si cita il lavoro di Epifani sulla permeabilità (Epifani, 1991) il quale assegna per i calcescisti fratturati un valore di permeabilità elevato pari a $k = 10\ cm/s$, si conclude che, il punteggio sulle venute d'acqua secondo la *tabella 6.8,* tenda a variare all'incirca tra 0 e 4.

TABELLA 6.8- DEFINIZIONE DEL PUNTEGGIO DA ATTRIBUIRE ALLE VENUTE D'ACQUA (MATERIALE DIDATTICO DEL CORSO DI MECCANICA DELLE ROCCE, SCAVIA C. & BARBERO M., 2017)

Condizioni generali roccia	Venute d'acqua	Stillicidi	Bagnata	Umida	Asciutta
Punteggio	0	4	7	10	15

Quindi l'RMR calcolato è riassunto in *tabella 6.9*.

TABELLA 6.9-PUNTEGGI ASSEGNATI AI VARI PARAMETRI E CALCOLO DELL'RMR DI BASE

	C0	RQD	Spaziatura Discontinuità	Condizioni discontinuità	Acqua	RMR
Strato intermedio	4	11	8	10	2	35
Substrato	4	17	10	20	2	53

I valori di RMR ottenuti sono prossimi al valore medio di RMR pari a 40 ottenuto nell'istogramma rappresentato nel *grafico 2.1* presente al *capitolo 2.7* (Lapenta & Trombetta, 1996). Si conclude quindi che, i ragionamenti fatti sulla determinazione dell'RMR, forti di aver ritrovato analogie con tale studio passato, possano considerarsi soddisfacenti.

I valori di GSI determinati per i vari sotto strati con cui si è suddiviso il substrato, raccolti in *tabella 6.7*, possono essere utilizzati per determinare il modulo di deformazione mediante formule empiriche. Tale modulo è stato calcolato con riferimento alla formula empirica di Hoek, Carranza e Corkum (Hoek, Carranza-Torres and Corkum, 2002) assumendo come grado di disturbo un valore pari a zero. Le espressioni utilizzate sono quindi:

- per una $C0 \equiv \sigma_{ci} \leq 100\ MPa$ → $E_{rm}(GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\frac{GSI-}{40}}$;
- per una $C0 \equiv \sigma_{ci} > 100\ MPa$ → $E_{rm}(GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}}$

La *tabella 6.10* riassume i valori ottenuti per i vari strati.

TABELLA 6.10-VALORI DEL MODULO ELASTICO OTTENUTI PER I VARI STRATI CON CUI È STATO SCHEMATIZZATO L'AMMASSO ROCCIOSO

	E [Mpa]
Strato superiore molto fratturato e alterato	1012.7
Strato intermedio	4581.9
Substrato	12913.6

Passando al criterio di rottura, è stato scelto il criterio generalizzato di Hoek e Brown, il quale è analogo all'originale ma, negli anni, sono state introdotte alcune modifiche per ottenere dati sempre più corrispondenti alle evidenze sperimentali. Le equazioni che descrivono tale criterio sono riportate nel seguito.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \cdot \left(m_b \cdot \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Dove $m_b = m_i \cdot \exp\left(\frac{GSI-1}{28-14 \cdot D}\right)$, $s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3 \cdot D}\right)$, $a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}}\right)$

Ne consegue che, le differenze rispetto al criterio originale riguardano l'esponente "a" e i parametri "mb" ed "s", i quali dipendono dalla qualità dell'ammasso roccioso espressa con l'indice "GSI", e dal grado di disturbo espresso con il termine "D".

Per quanto riguarda la costante caratteristica del materiale roccioso, indicata con "mi", essa assume valori diversi al variare del tipo di matrice rocciosa. Il valore rappresentativo della costante "mi" per è pari a 10 per gli scisti massivi ed è pari a 7.5 per gli scisti filladici; per il modello in esame si è deciso di utilizzare un valore medio pari a 8.75.

Si sono calcolati i parametri "mb", "s" ed "a" per i vari strati ed i valori sono riassunti in *tabella 6.11.*

TABELLA 6.11-VALORI DEI PARAMETRI UTILIZZATI NEL CRITERIO GENERALIZZATO DI HOEK &BROWN PER I TRE STRATI CON CUI SI È SUDDIVISO L'AMMASSO ROCCIOSO

	mb	s	a
Substrato profondo	2.2	0.013	0.50
Strato intermedio	1.2	0.002	0.51
Strato superiore fratturato e alterato	0.6	0.0002	0.54

6.6 Scelta del metodo di analisi e realizzazione del modello

Una volta definita la sezione geologico-tecnica e definite le caratteristiche geo-meccaniche dei vari strati, si sono ricavate tutte le informazioni necessarie per realizzare un modello geotecnico; pertanto, si è passati alla modellazione numerica. La prima scelta da compiere, consiste nel scegliere con quale metodo di analisi studiare il fenomeno di instabilità nel presente sito.

I metodi di analisi che si sono appresi durante il percorso di laurea magistrale sono stati il metodo all'equilibrio limite (LEM) e il metodo agli elementi finiti in campo continuo (FEM). Si riassumono nel seguito alcune delle principali caratteristiche.

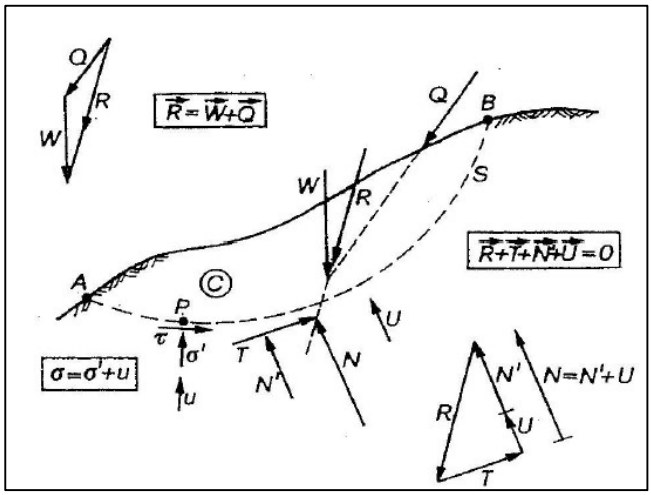


FIGURA 6.7- METODO DELL'EQUILIBRIO LIMITE NEL CASO DI SCIVOLAMENTO PIANO, (MATERIALE DIDATTICO DEL CORSO DI STABILITÀ DEI PENDII, PIRULLI 2018)

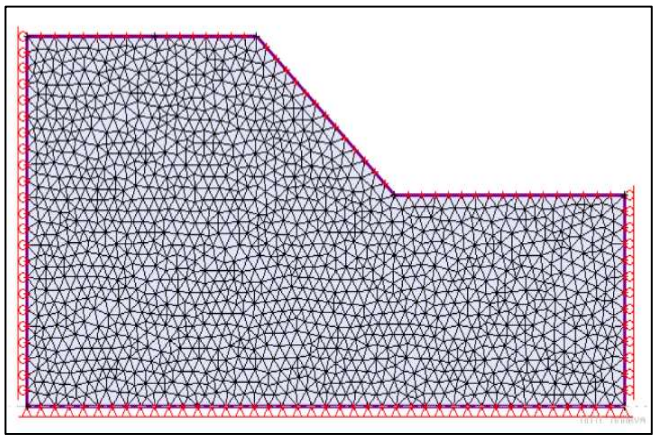


FIGURA 6.8-METODI DI ANALISI IN CAMPO CONTINUO (MATERIALE DIDATTICO DEL CORSO DI STABILITÀ DEI PENDII, PIRULLI 2018)

Nel metodo all'equilibrio limite (LEM) la condizione di equilibrio limite è raggiunta quando, in un punto sulla superficie di scivolamento, il taglio agente è pari a quello resistente (riferimento a *figura 6.7*). La legge costitutiva utilizzata è quella rigida perfettamente plastica, che corrisponde a non seguire il processo deformativo e quindi a non studiare il fenomeno di rottura progressiva e ad utilizzare le equazioni cardinali della statica per studiare l'equilibrio del corpo visto come rigido. Nel metodo agli elementi finiti (riferimento a *figura 6.8*) in campo continuo (FEM) il sottosuolo viene suddiviso in elementi di geometria semplice formando una mesh. Considerando i metodi in campo continuo, essi non permettono un distacco tra gli elementi finiti di conseguenza quello che restituisce l'analisi numerica sarà una fascia plasticizzata caratterizzata da elevati valori di deformazione dove si ritiene che nella realtà sia possibile si formi la superficie di scivolamento; si considera quindi, a differenza del metodo all'equilibrio limite (LEM), la deformazione e si utilizzano quindi leggi

costitutive più complesse. Considerare la deformazione permette di studiare il fenomeno di rottura progressiva.

Per il caso in esame, al fine di studiare il fenomeno di rottura progressiva e di confrontare gli spostamenti ottenuti con il modello numerico con gli spostamenti rilevati dagli inclinometri, si è scelto di utilizzare il metodo delle tensioni in campo continuo.

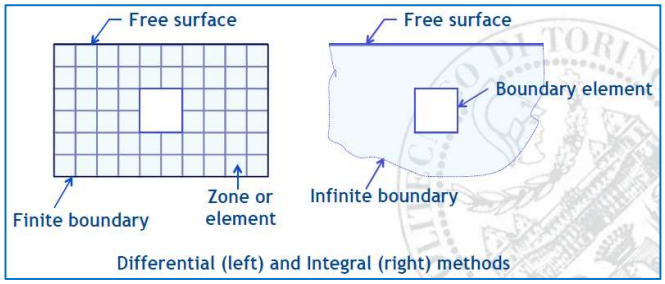


FIGURA 6.9-DIFFERENTIAL METHODS E INTEGRAL METHODS (MATERIALE DIDATTICO DEL CORSO DI NUMERICAL METHODS FOR GEOTECHNICAL ENGINEERING, BARLA 2018)

Nei metodi numerici utilizzati nella meccanica del continuo si può fare riferimento a due categorie che si distinguono in base al modo in cui la soluzione viene approssimata. I "Differential Methods" dove l'approssimazione è fatta all'interno del dominio e gli "Integral Methods" dove l'approssimazione è fatta sul contorno del dominio (riferimento a *figura 6.9*). I "Differential Methods" si distinguono ancora in "Finite Difference Method" e "Finite Element Method" i quali danno risultati simili nella pratica ma hanno un differente approccio matematico.

Per la realizzazione del modello numerico è stato utilizzato il software RS2 del pacchetto della Rocscience. Tale metodo opera nella meccanica del continuo secondo il "Finite Element Method". Nella realizzazione del modello si sono seguiti i seguenti passi: geometria, dimensioni del modello, discretizzazione e vincoli, scavo progressivo, cambio della legge costitutiva e inserimento della falda.

Per quanto riguarda la geometria, essa fa riferimento alla sezione geologo-tecnica di *figura 6.4,* quindi si è proceduto riportando le stesse polilinee di interfaccia tra gli strati all'interno dell'ambiente di RS2.

Per quanto riguarda le dimensioni del modello, si è prolungata la polilinea rappresentante la superficie topografica e le polilinee rappresentanti le interfacce tra i vari strati con due tratti orizzontali, rispettivamente a monte e al piede del pendio, in modo che l'influenza dei vincoli di bordo, che saranno inseriti in un secondo momento, non vada a creare problemi numerici o ad influenzare i risultati ottenuti nell'area del modello oggetto di studio ovvero lungo il versante.

Il secondo passo ha riguardato la discretizzazione del modello (inserimento della mesh) con inserimento dei vincoli esterni. Per quanto riguarda la scelta della mesh, nel "Finite Element Method" la regione è suddivisa in un numero di elementi distinti, di forma geometrica semplice e le

equazioni differenziali governanti il problema in esame saranno risolte sui nodi e verranno utilizzate opportune interpolazioni per definire gli altri valori all'interno delle aree degli elementi. Per il problema in esame si è utilizzata una mesh composta da elementi finiti triangolari a 6 nodi, con densità crescente al diminuire della profondità, in quanto è in prossimità delle stratigrafie superficiali, composte dal cappellaccio dei calcescisti e materiale detritico, che ci si aspetta il maggior grado di deformazione.

L'inserimento dei vincoli esterni è necessaria in quanto si sta trattando un problema al contorno nella meccanica del continuo (Boundary Value Problem) il quale, al fine di ottenere una soluzione unica, necessita oltre che delle equazioni differenziali anche di condizioni al contorno; si è scelto di imporre delle limitazioni allo spostamento tramite l'inserimento di vincoli aggiuntivi al bordo del modello. È intuitivo attendersi che, sufficientemente lontano dal pendio, in condizioni di piano campagna orizzontale e stratigrafia orizzontale, ogni sezione verticale sia una sezione di simmetria pertanto, il singolo punto appartenente a tale sezione, potrà manifestare solo spostamenti in direzione verticale e non in direzione orizzontale; ne consegue quindi che, in tale zona, si possa posizionare un carrello verticale che limiti gli spostamenti orizzontali e non quelli verticali. Per quanto riguarda la superficie topografica, nel caso in esame essa non è soggetta a carichi derivanti da opere strutturali e/o infrastrutturali pertanto, essendo quindi una superficie libera, non si è posizionato alcun vincolo (condizione free-surface). Infine, per quanto riguarda la base inferiore del modello, essa è situata a sufficiente profondità rispetto alla superficie topografica, dunque è lecito attendersi che l'entità degli spostamenti verticali, imputabili a ciò che accade in superficie, sia molto piccola; pertanto si possono posizionare dei carrelli orizzontali che impediscano lo spostamento verticale.

La realizzazione del modello è iniziata pensando ad un dominio scatolare ed alla successiva realizzazione di stages, tali da simulare uno scavo progressivo sino a giungere al profilo reale. Si sono realizzati in totale sei stages, ove nei primi tre si è provveduto allo scarico di porzioni di materiali, giungendo al profilo reale al quarto stage. Nello stage cinque si è passati da una legge costitutiva elastica ad una legge elastica perfettamente plastica per i primi quattro orizzontamenti considerati, lasciando una legge costitutiva elastica solo per lo strato più profondo dell'ammasso roccioso caratterizzato da resistenza e rigidezza maggiore. Ciò è stato fatto perché, dai capitoli precedenti, si è compreso che siano i primi tre strati più superficiali ha manifestare movimenti. Nell'ultimo stage si è aggiunta la presenza della falda. Dalla *figura 6.10* a *figura 6.15* sono riportati gli stages realizzati.

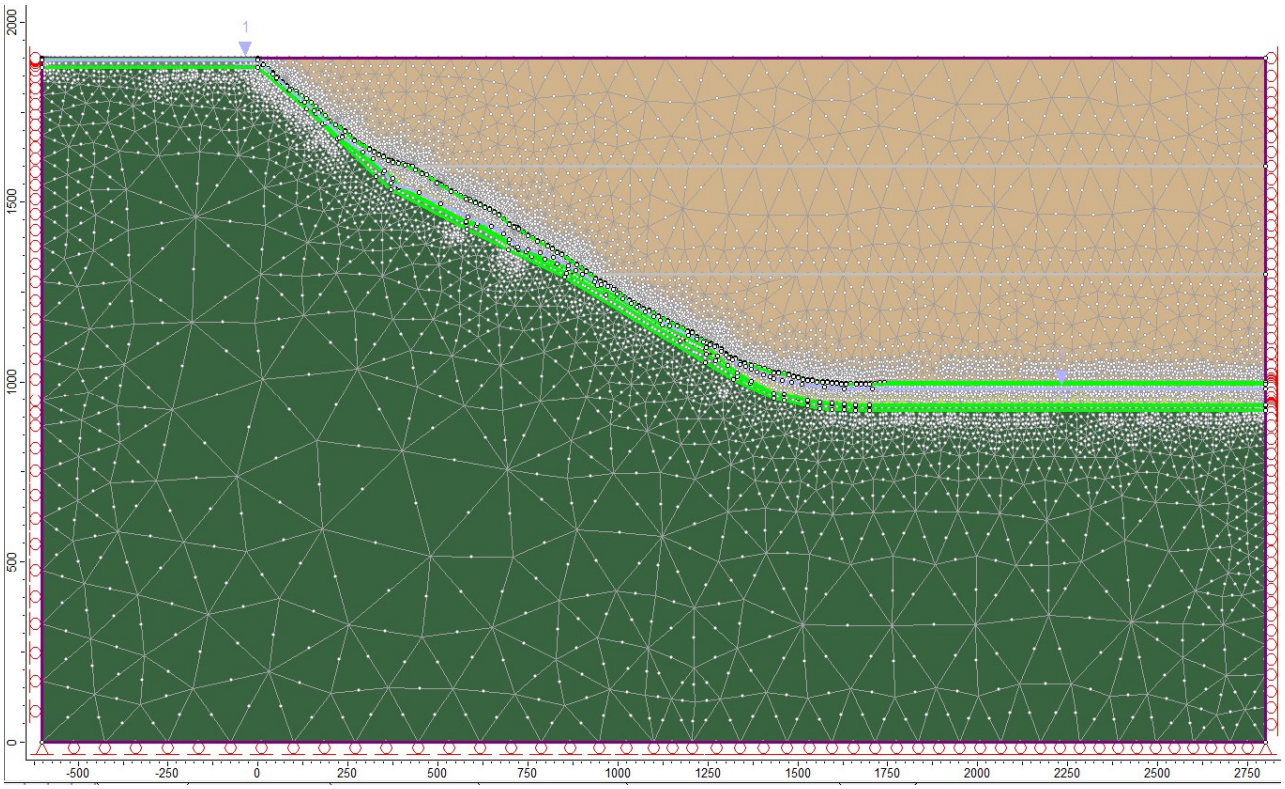


FIGURA 6.10-STAGE 1, MODELLO SCATOLARE

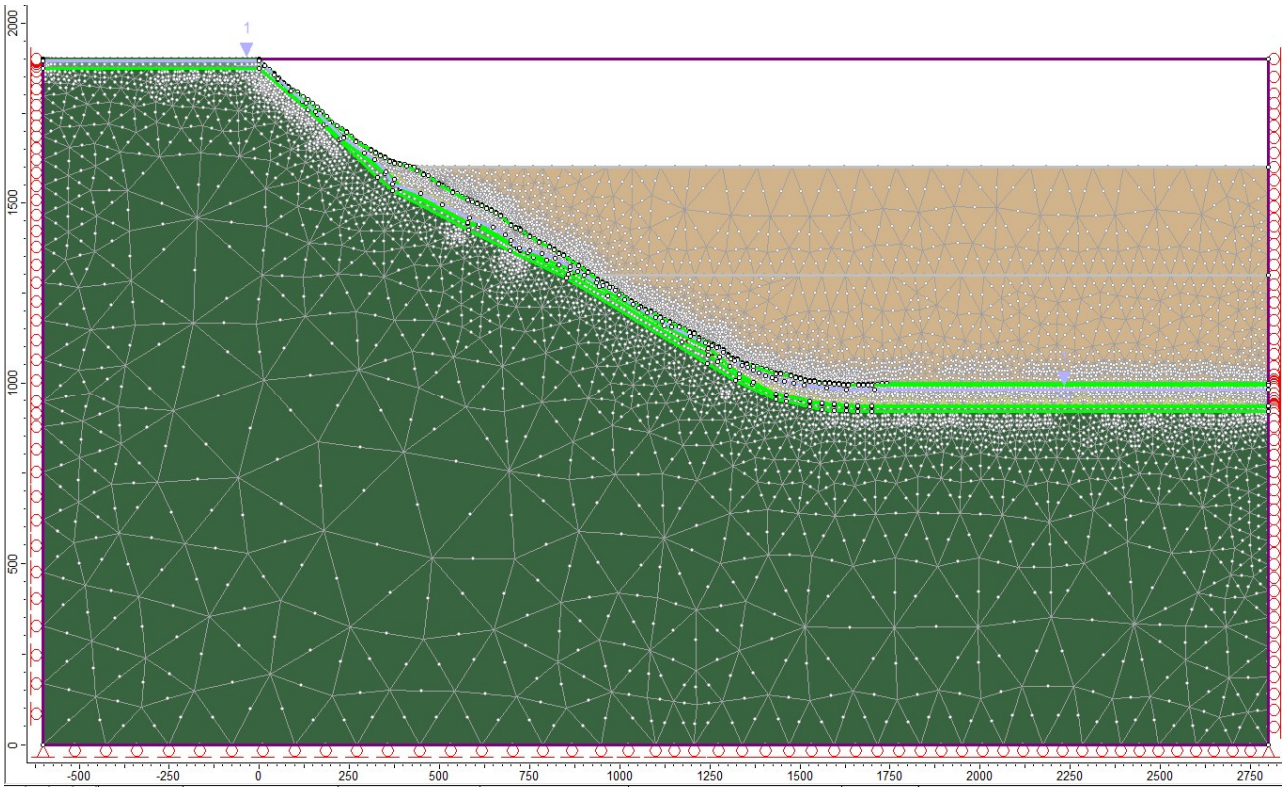


FIGURA 6.11-STAGE 2, PRIMA FASE DI SCARICO

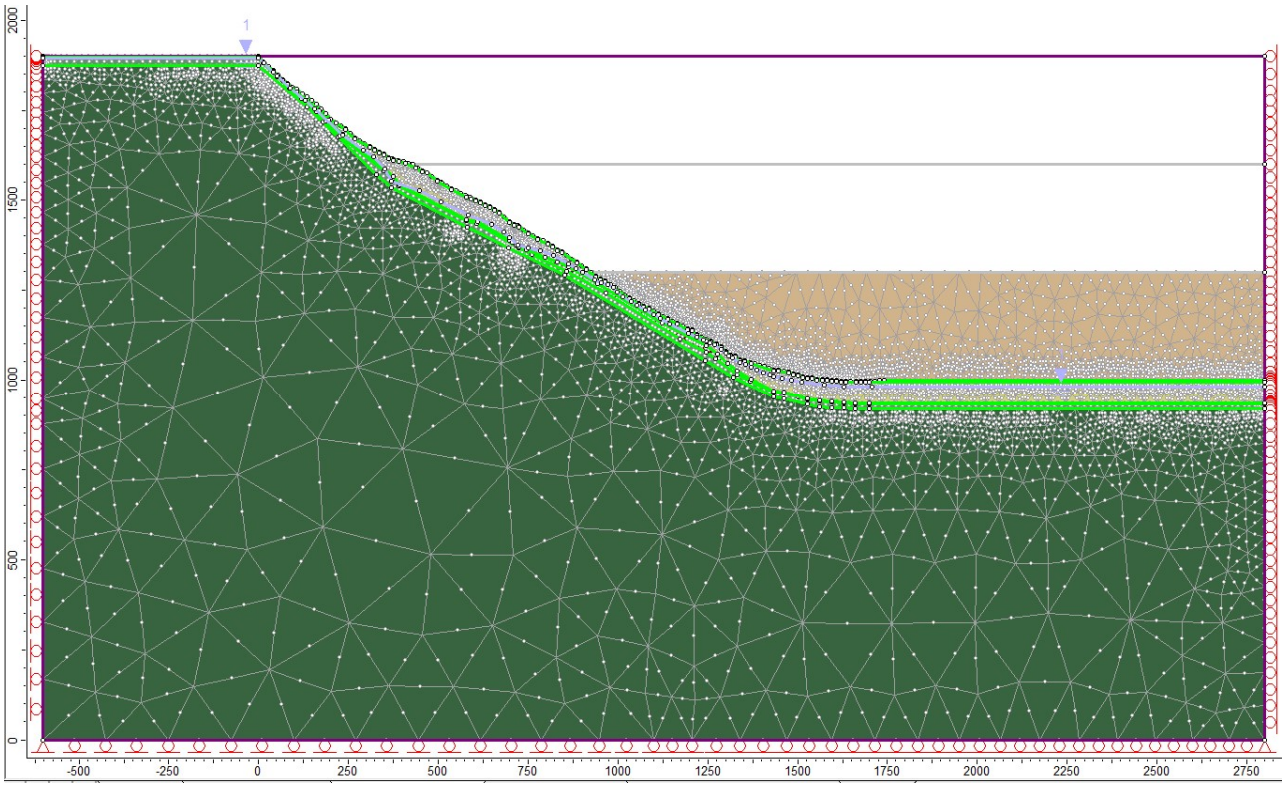


FIGURA 6.12-STAGE 3, SECONDA FASE DI SCARICO

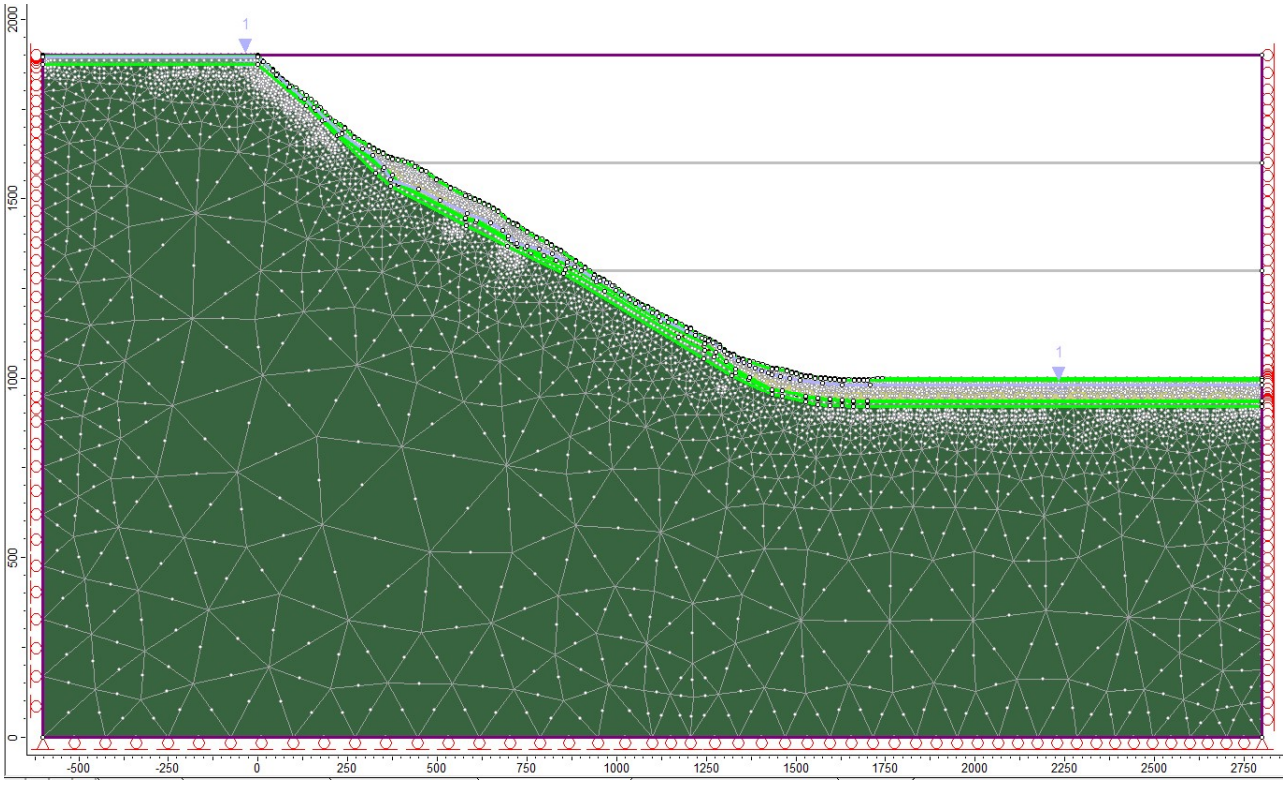


FIGURA 6.13-STAGE 4 TERZA E ULTIMA FASE DI SCARICO

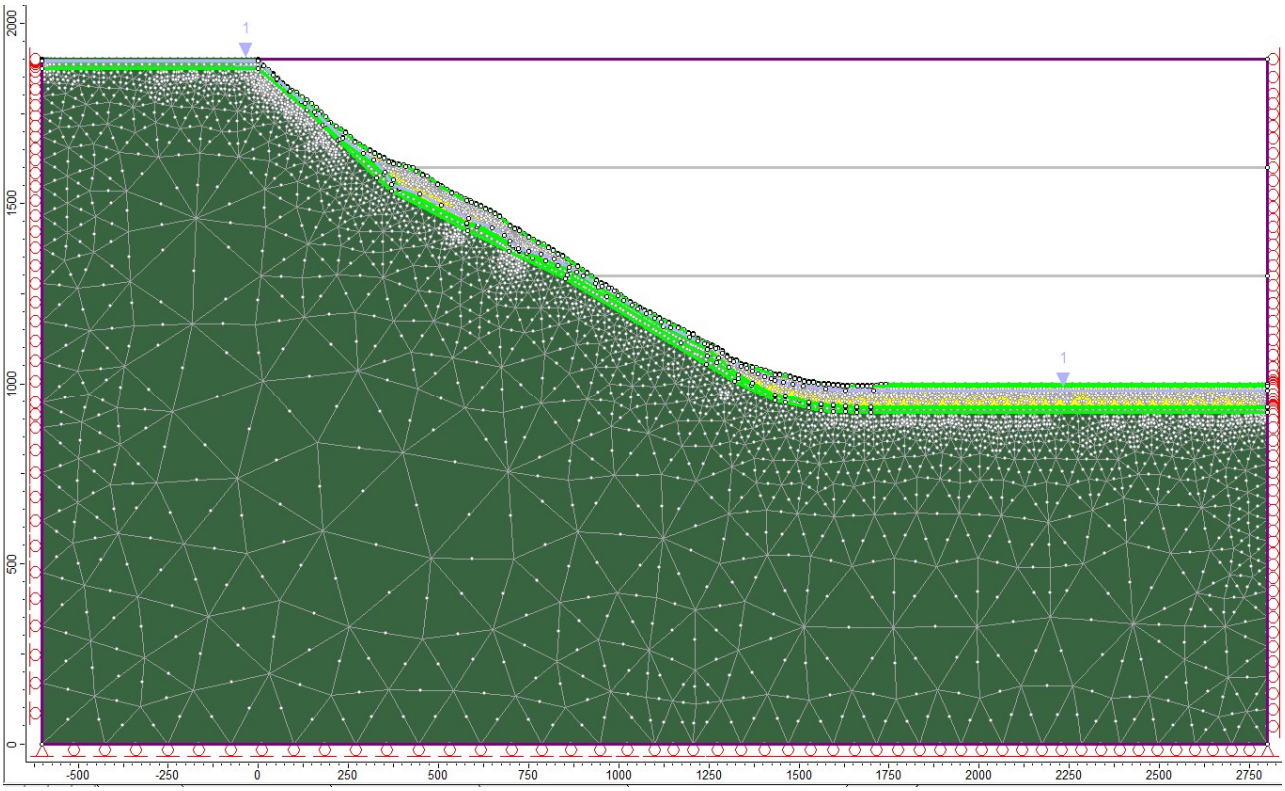


FIGURA 6.14-STAGE 5, PASSAGGIO ALLA LEGGE ELASTO PLASTICA PERFETTA

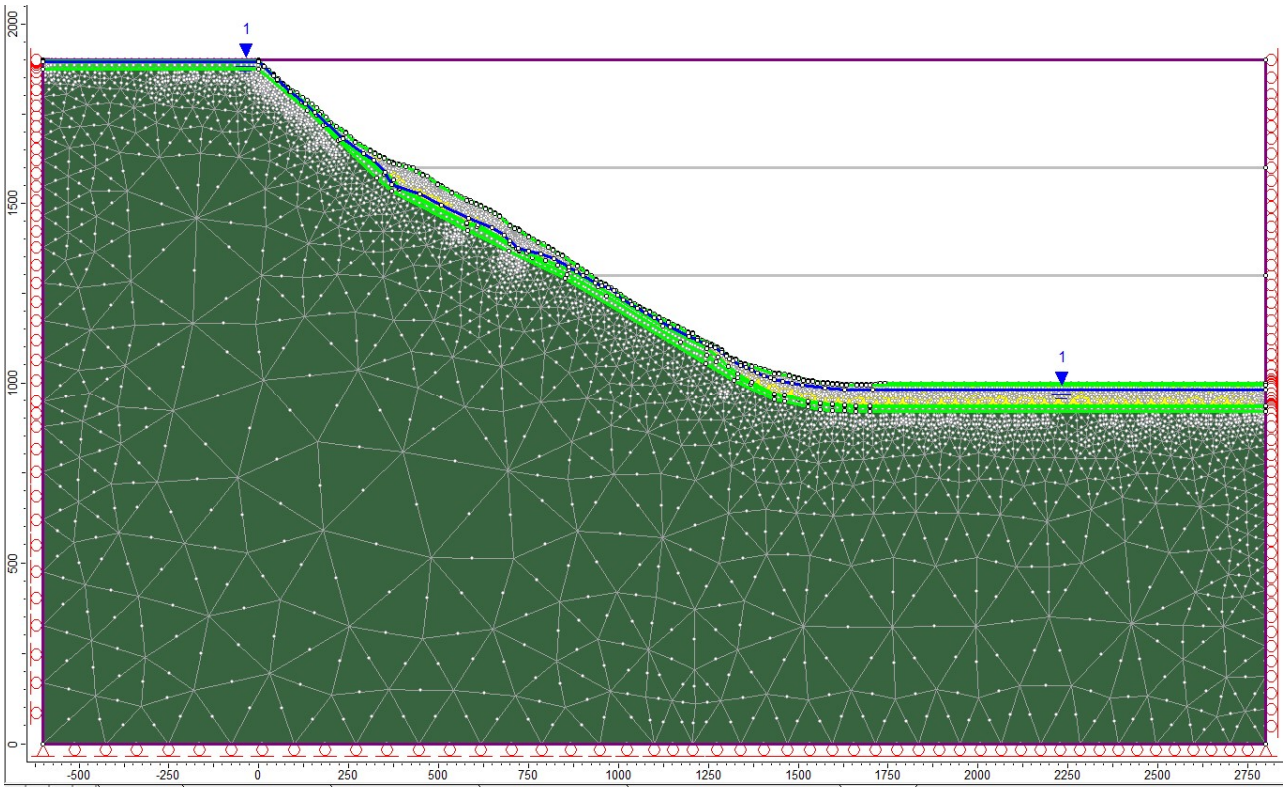


FIGURA 6.15-STAGE 6, INSERIMENTO DELLA FALDA

6.7 Back analysis e effetto di innalzamento della falda

L'analisi a ritroso ha come obiettivo quello di validare il modello geotecnico realizzato. La validazione del modello è stata effettuata lanciando quattro analisi numeriche di cui:

- la prima analisi ha considerato la posizione media della falda nel periodo 2012-2018 e ha permesso di determinare, mediante lo Shear Strength Reduction Method (nello Shear Strength Reduction Method il software riduce progressivamente i parametri di resistenza di un termine chiamato Stregth Reduction Factor finché si arriva all'impossibilità di convergenza della soluzione), il fattore di sicurezza globale del pendio, la rottura progressiva e il luogo dove si concentrano le massime deformazioni a taglio il quale può essere interpretato come la zona dove possono ubicarsi le superfici di scivolamento;
- la seconda analisi è di fatto analoga alla prima solo che si è considerata la posizione massima della falda nel periodo 2012-2018;
- le ulteriori due analisi condotte sono servite per validare anche l'entità degli spostamenti restituiti dal modello. In particolare, si è utilizzato il seguente procedimento:
    1. attraverso l'analisi dei dati di monitoraggio svolta al *capitolo 5*, si è andati a considerare l'intervallo di tempo necessario all'innalzamento della falda dal valore medio al valore massimo; determinato tale intervallo di tempo, si è andati a determinare l'incremento di spostamento rilevato nella colonna DMS-I2 in prossimità della superficie di scivolamento;
    2. è stata lanciata un'analisi numerica con la posizione media della falda e un'altra analisi numerica con la posizione massima della falda; da esse, nella posizione della colonna I2, si è calcolata la differenza di spostamento in prossimità della superficie di scivolamento;
    3. infine si è confrontato l'incremento di spostamento ottenuto nel modello numerico con l'incremento di spostamento dai dati di monitoraggio, ottenendo risultati simili.

Riguardo all'ultimo punto dell'analisi a ritroso, delle quattro colonne inclinometriche a disposizione nella sezione di studio, solo le colonne I2 e I3 avevano la strumentazione DMS tale da fornire un dato con una maggiore frequenza rispetto alla lettura quadrimestrale inclinometrica. Successivamente, si è notato che la colonna I3 ha registrato una lacuna di dati, legata ad un malfunzionamento dello strumento nell'intervallo di tempo di innalzamento della falda dal valore medio al valore massimo; inoltre, tale colonna non si trova sulla sezione di studio come la colonna

I2 ma dista da essa una cinquantina di metri e, nell'intorno della colonna I3, situata nel settore medio sommitale, non si aveva un grande numero di sondaggi a disposizione per ricostruire al meglio la sezione geologico-tecnica. In definitiva, per le problematiche riferite alla colonna I3, si è deciso di fare affidamento solamente alla colonna I2 per quest'ultimo passo di taratura del modello.

6.7.1 Risultati ottenuti dalla prima analisi

Si riportano i risultati della prima analisi riferita alla posizione media della falda e all'applicazione dello Shear Strength Reduction Method.

Il critical SRF, il quale corrisponde al fattore di sicurezza del versante, risulta essere pari ad 1.14. La *tabella 6.12* riassume la riduzione dei parametri che è avvenuta per i primi quattro strati della sezione geologico-tecnica.

TABELLA 6.12-RIDUZIONE DEI PARAMETRI DI RESISTENZA, ANALISI 1, FALDA MEDIA

Parametri inseriti nel modello relativi ad un SRF=1				
Strati deposito		Angolo di attrito [°]	Coesione [MPa]	
strato superficiale		31	0.020	
strato di detrito		38	0.032	
Strati ammasso	C0 [MPa]	mb [-]	s [-]	a [-]
cappellaccio e breccia	47	0.56	0.0001	0.54
strato intermedio	47	1.14	0.002	0.51
Parametri relativi ad un SRF=FS=1.14				
Strati deposito		Angolo di attrito [°]	Coesione [MPa]	
strato superficiale		27.8	0.018	
strato di detrito		34.4	0.028	
Strati ammasso	C0 [MPa]	mb [-]	s [-]	a [-]
cappellaccio e breccia	41.23	0.48	0.0001	0.55
strato intermedio	41.23	0.96	0.002	0.51

Nel seguito viene riportata l'evoluzione della rottura progressiva della prima analisi riferita alla posizione media della falda e all'applicazione dello Shear Strength Reduction Method. Essa è illustrata in *figura 6.16* e *figura 6.17*. Inizialmente, applicando un SRF=1, la fascia con maggiori deformazioni massime a taglio viene a collocarsi alla base dello strato detritico mentre, applicando il critical SRF=1.14, nascono delle ulteriori bande di taglio che si sviluppano anche all'interno dello strato detritico, le quali permettono di ipotizzare l'esistenza di tre superfici di scivolamento.

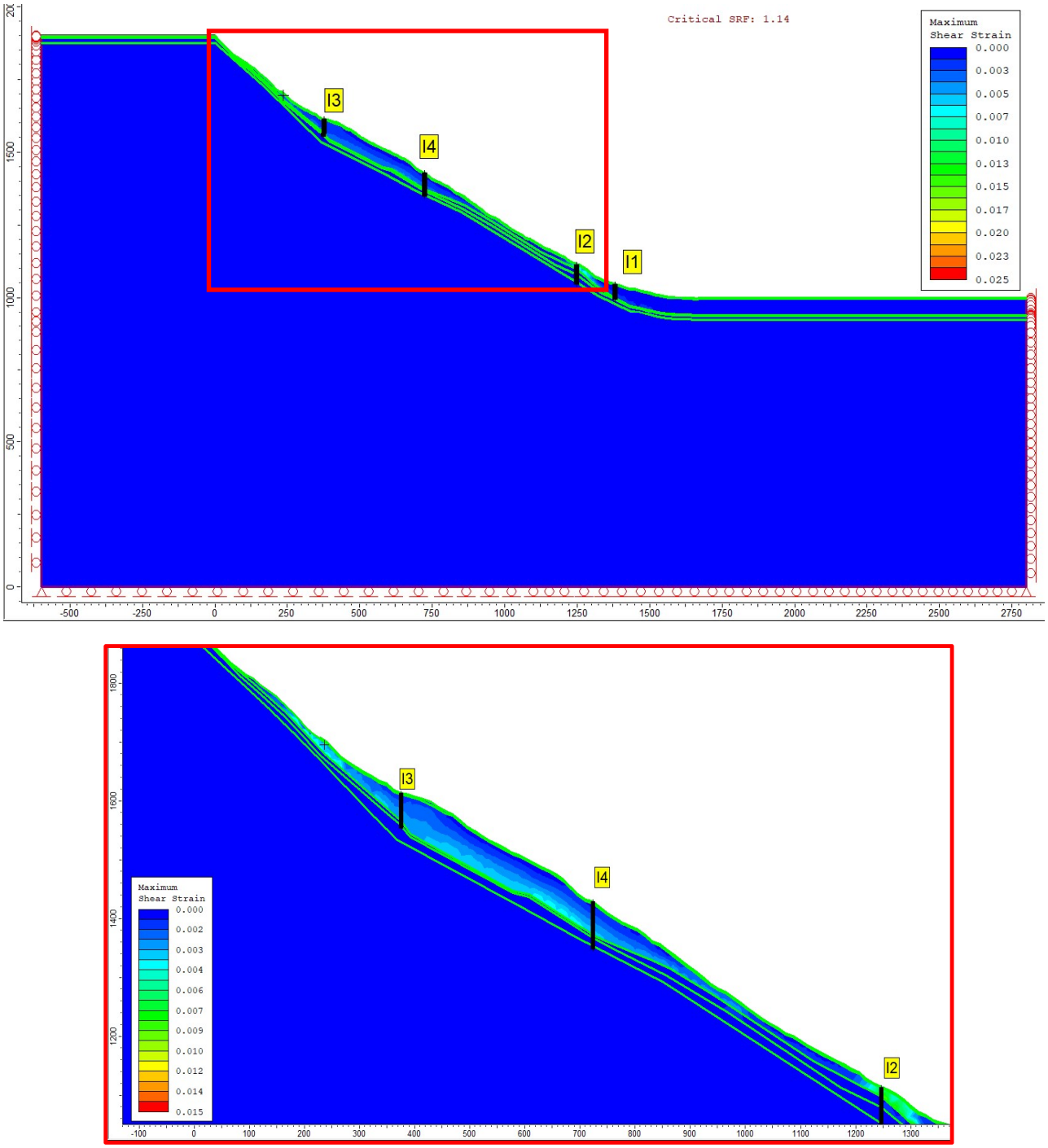


FIGURA 6.16-A)MASSIME DEFORMAZIONI DI TAGLIO, FALDA MEDIA, SRF=1; B) ZOOM NELLA PORZIONE DI INTERESSE

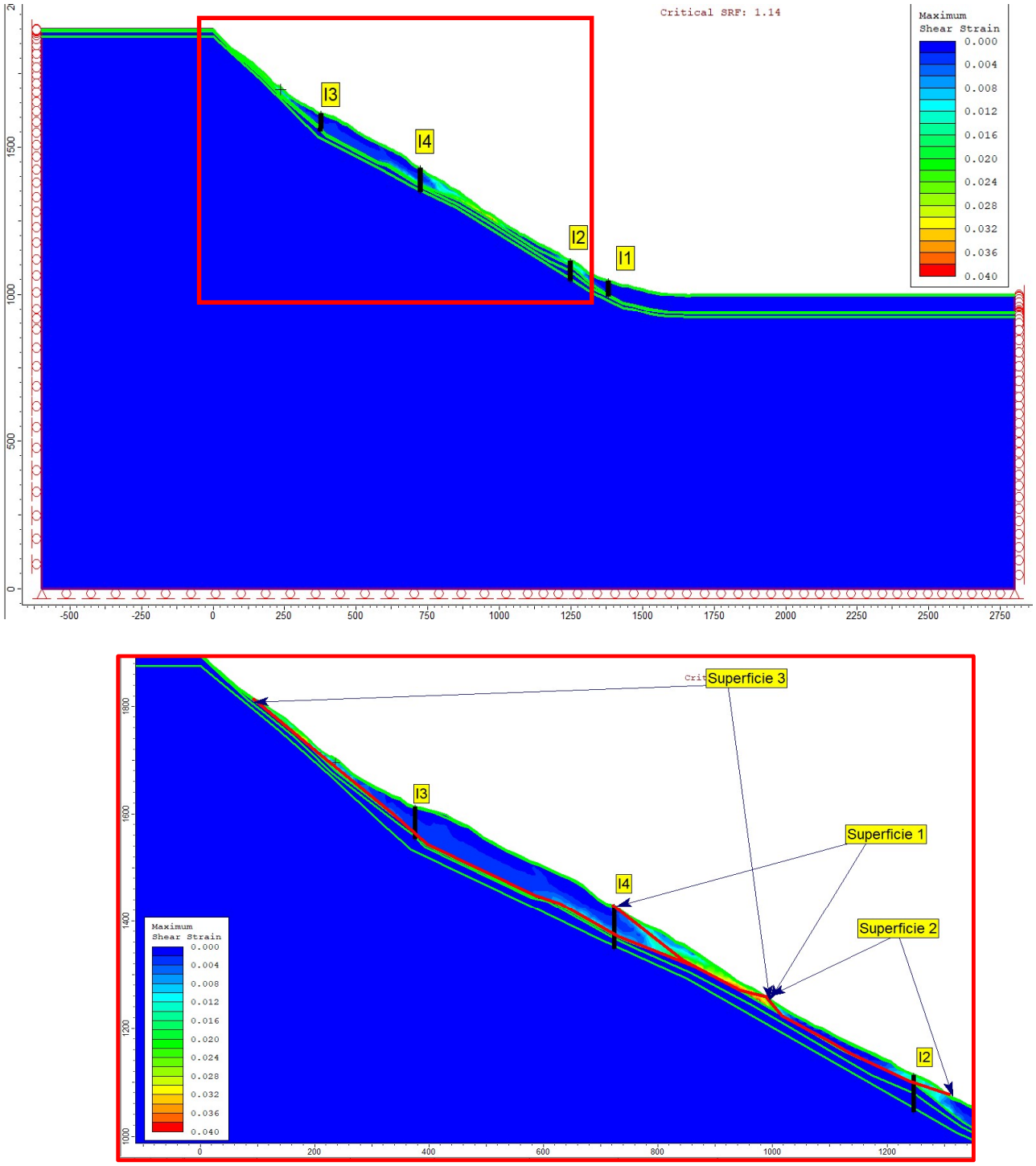


FIGURA 6.17-A)MASSIME DEFORMAZIONI DI TAGLIO, FALDA MEDIA CRITICAL SRF=1.14; B) ZOOM NELLA PORZIONE DI INTERESSE CON INDICAZIONE DELLA POSIZIONE DELLE SUPERFICI DI SCIVOLAMENTO

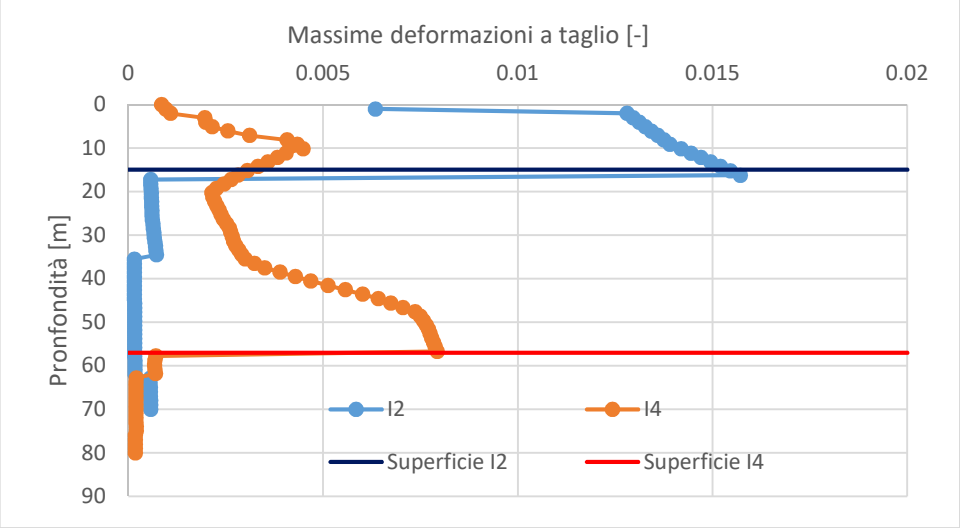
La distribuzione delle massime deformazioni di taglio sul versante ha permesso di individuare l'esistenza di tre superfici di scivolamento quando ai parametri geo-meccanici viene applicato un Critical SRF=1.14; quindi, con riferimento alla *figura 6.17*:

- la Superficie 1 è quella che ha origine poco a valle dell'inclinometro I4, segue in profondità la banda di taglio e riemerge in superficie in corrispondenza delle emergenze idriche (sorgenti);
- la Superficie 2 è quella che ha origine in prossimità delle sorgenti e riemerge in superficie poco a valle dell'inclinometro I2;
- la Superficie 3, poco probabile rispetto alle due superfici precedentemente descritte a causa dei minori valori di deformazione massima a taglio, è quella che si sviluppa immergendosi a monte a circa 1800m, segue la fascia di deformazione che si propaga lungo l'interfaccia tra lo strato di detrito e il cappellaccio di calcescisti e riemerge in prossimità delle sorgenti.

Si riporta in seguito il *grafico 6.1* e il *grafico 6.2* che riassumono le massime deformazioni a taglio per le quattro colonne inclinometriche presenti nel modello.

Partendo dal *grafico 6.1*, per la colonna I2 il valore maggiore della massima deformazione di taglio è alla profondità di 15-16m, profondità alla quale corrisponde la superficie di scivolamento individuata nella colonna DMS-I2 nell'analisi dei dati di monitoraggio condotta al *capitolo 5*. Per la colonna I4 il valore maggiore della massima deformazione di taglio è a 57m, la quale corrisponde alla profondità dove è stata ritrovata la superficie di scivolamento tramite l'analisi dei dati di monitoraggio condotta al *capitolo 5*. L'incremento locale di deformazione massima a taglio nella colonna I4 intorno alla profondità di 10m, è dovuto alla superficie di scivolamento indicata come "Superficie 1" nella *figura 6.17*, la quale va ad emergere proprio in prossimità di tale colonna.

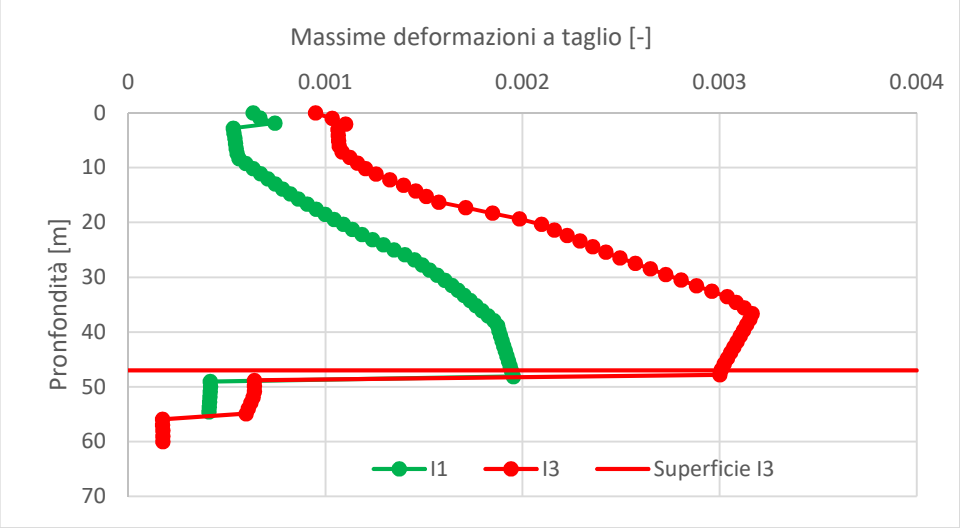
GRAFICO 6.1-MASSIME DEFORMAZIONI A TAGLIO OTTENUTE DA SIMULAZIONI NUMERICHE COLONNE I2E I4, POSIZIONE MEDIA DELLA FALDA, SRF=FS=1.14



Passando al *grafico 6.2*, analogamente, per quanto riguarda la colonna I3 si ritrova il valore massimo di deformazione alla profondità di 47m, quota alla quale è stata individuata la superficie di scivolamento nell'analisi dei dati di monitoraggio condotta al *capitolo 5*. La colonna I1 è quella che ha dato minori valori di deformazione massima a taglio rispetto alle altre colonne, ciò è in accordo con le conclusioni tratte dall'analisi dei dati di monitoraggio condotta al *capitolo 5*, in quanto essa è la colonna che non ha mai dato segni significativi di movimento nelle varie letture inclinometriche svolte.

La colonna I3, sebbene abbia dato valori maggiori di deformazione rispetto alla colonna I1, non ha dato valori di deformazione elevati come quelli osservati nelle colonne I2 e I4; si ritiene che ciò sia dovuto al fatto che la colonna I3 non vada a posizionarsi perfettamente sulla sezione di studio (infatti essa di trova a circa una cinquantina di metri) e inoltre, nell'intorno della colonna I3, non si avevano sufficienti sondaggi o indagini sismiche per ricostruire con maggiore precisione l'andamento della stratigrafia; l'analisi numerica ha però almeno permesso di ritrovare la posizione della superficie di scivolamento a 47m.

GRAFICO 6.2- MASSIME DEFORMAZIONI A TAGLIO OTTENUTE DA SIMULAZIONI NUMERICHE COLONNE I1E I3, POSIZIONE MEDIA DELLA FALDA, SRF=FS=1.14



6.7.2 Risultati ottenuti dalla seconda analisi

In questa seconda analisi la posizione della falda è stata innalzata dai valori medi ai valori massimi registrati nel periodo 2012-2018. Nella pratica ciò ha comportato un innalzamento dal valore medio di circa 1m nei vari piezometri, fatta eccezione per il piezometro Pz6, dove l'innalzamento è stato pari a 10m (a causa dell'importante scioglimento nivale avvenuto nell'anno 2018).

Il fattore di sicurezza globale ottenuto dall'analisi si è ridotto passando da 1.14 a 1.11.

Per quanto riguarda l'evoluzione della rottura progressiva, si possono riportare le stesse conclusioni fatte nella prima analisi con una sola differenza: la superficie che nella *figura 6.16* riferita all'analisi 1 era chiamata "Superficie 1" ha ora, grazie all'innalzamento della falda, un'estensione maggiore. A conferma di ciò si riporta la *figura 6.18*.

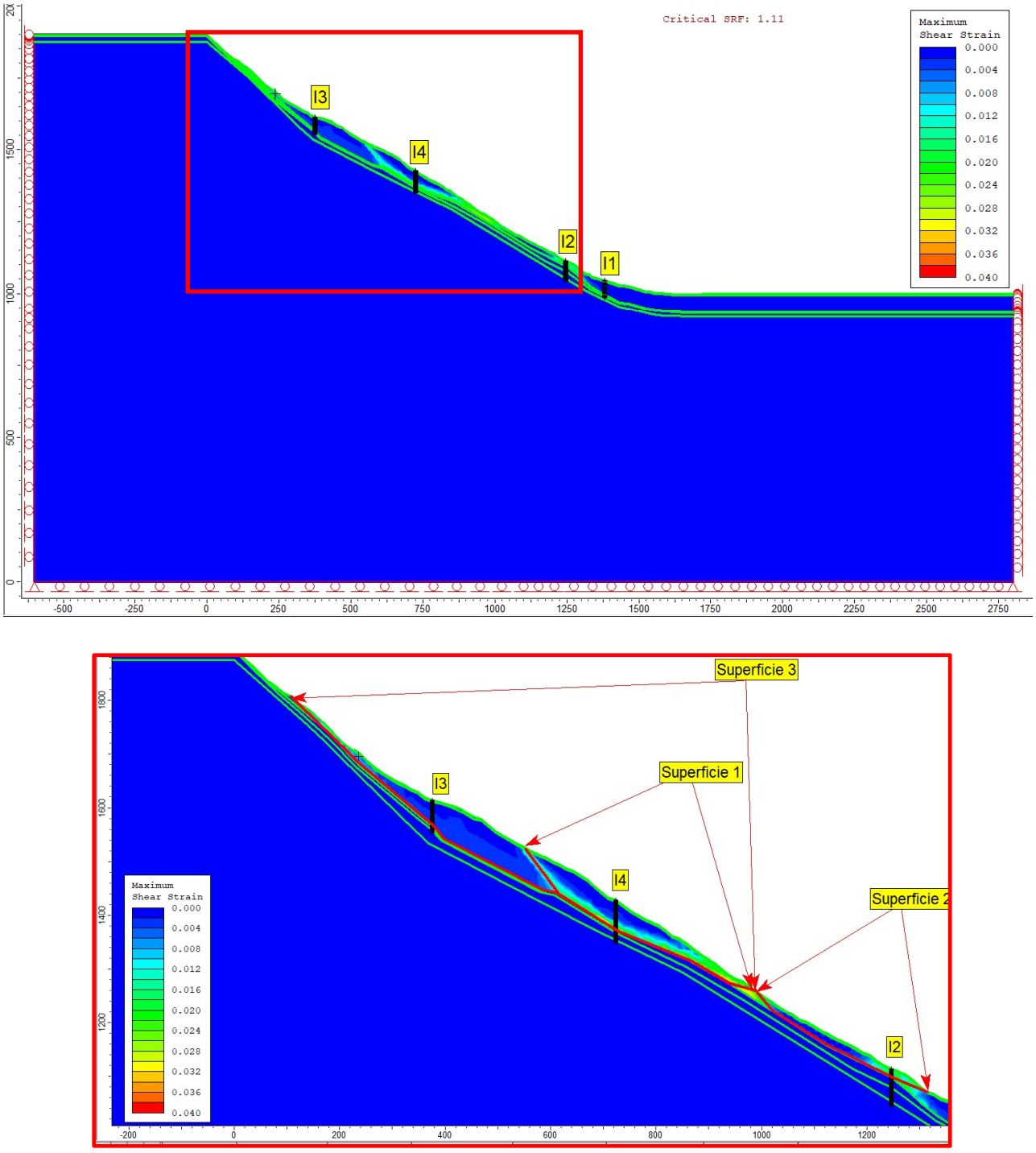
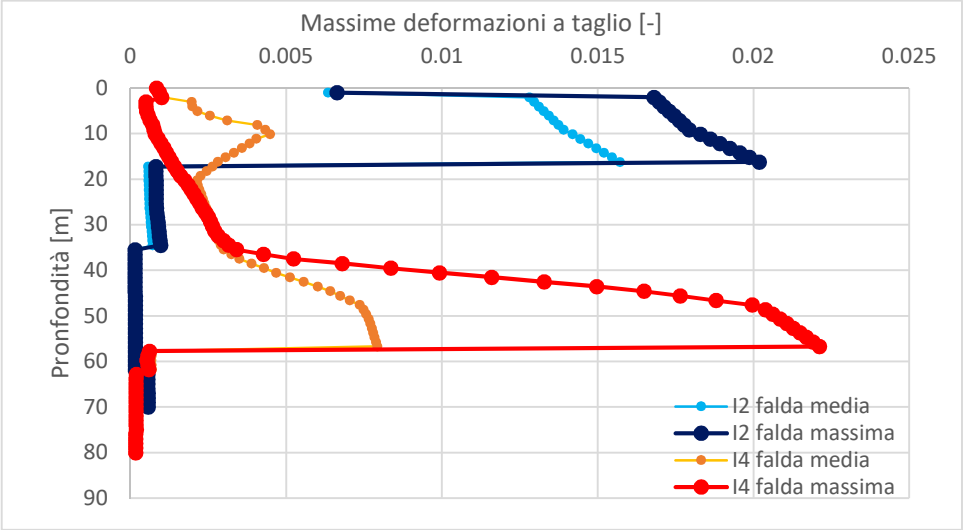


FIGURA 6.18- A)MASSIME DEFORMAZIONI DI TAGLIO, FALDA MASSIMA CRITICAL SRF=1.11; B) ZOOM NELLA PORZIONE DI INTERESSE CON INDICAZIONE DELLA POSIZIONE DELLE SUPERFICI DI SCIVOLAMENTO

Per quanto riguarda l'andamento delle massime deformazioni a taglio lungo le colonne inclinometriche si è deciso, sulla base di quanto concluso nella prima analisi, di riportare i dati riferiti alle sole colonne I2 e I4 in quanto sono quelle di maggior interesse e affidabilità. È stato quindi realizzato il *grafico 6.3*.

GRAFICO 6.3-CONFRONTO TRA MASSIME DEFORMAZIONI A TAGLIO OTTENUTE DA SIMULAZIONI NUMERICHE COLONNE I2 E I4 CON POSIZIONE MEDIA E MASSIMA DELLA FALDA



Dal *grafico 6.3* si possono fare due osservazioni:

- come ci si aspettava, l'innalzamento della falda ha provocato un significativo incremento delle massime deformazioni a taglio in prossimità delle zone dove è presente la superficie di scivolamento (circa 16m per la colonna I2 e circa 57m per la colonna I4);
- considerando le curve relative alla sola colonna I4 si nota come, alla profondità di 10m, la curva riferita alla posizione della falda media da dei valori di deformazione massima maggiori rispetto a quelli riferiti alla falda massima; ciò è dovuto al fatto che, con la posizione della falda media, la Superficie 1 veniva ad emergere nel pendio molto vicino alla testa della colonna I4 (riferimento a *figura 6.17*) mentre, con la posizione della falda massima, la Superficie 1, essendosi maggiormente estesa, va ad emergere a monte della colonna I4, avendo quindi una minore influenza su di essa nei primi metri di profondità (riferimento a *figura 6.18*).

6.7.3 Risultati ottenuti dalle restanti due analisi

Le ulteriori due analisi condotte sono servite per validare anche le entità degli spostamenti restituiti dal modello. Attraverso l'analisi dei dati di monitoraggio svolta al *capitolo 5*, si è andati a considerare l'intervallo di tempo necessario all'innalzamento della falda dal valore medio al valore massimo; considerando i piezometri PzS2 e Pz6 si sono quindi realizzati il *grafico 6.4* e il *grafico 6.5,* che hanno permesso di concludere che il passaggio dal valore medio al valore massimo è avvenuto tra il 25/04/18 e il 06/06/18.

GRAFICO 6.4-PASSAGGIO DA VALORE MEDIO A VALORE MASSIMO PIEZOMETRO PZS2

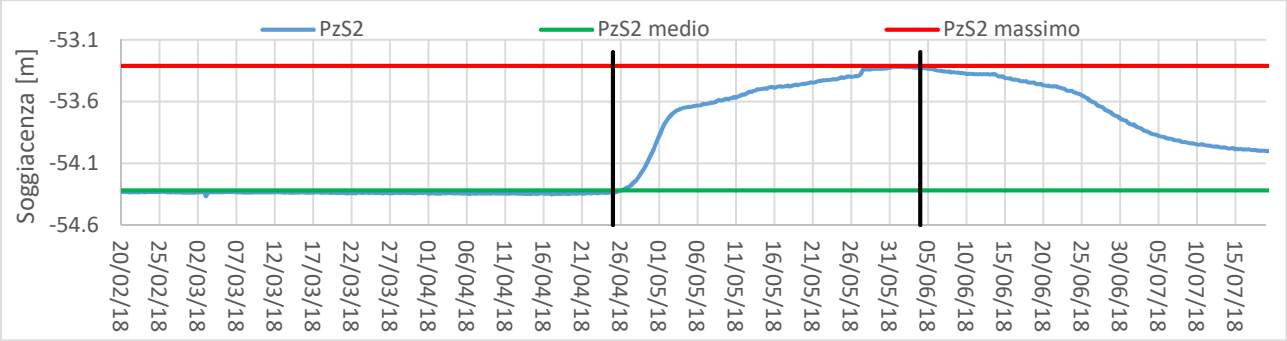
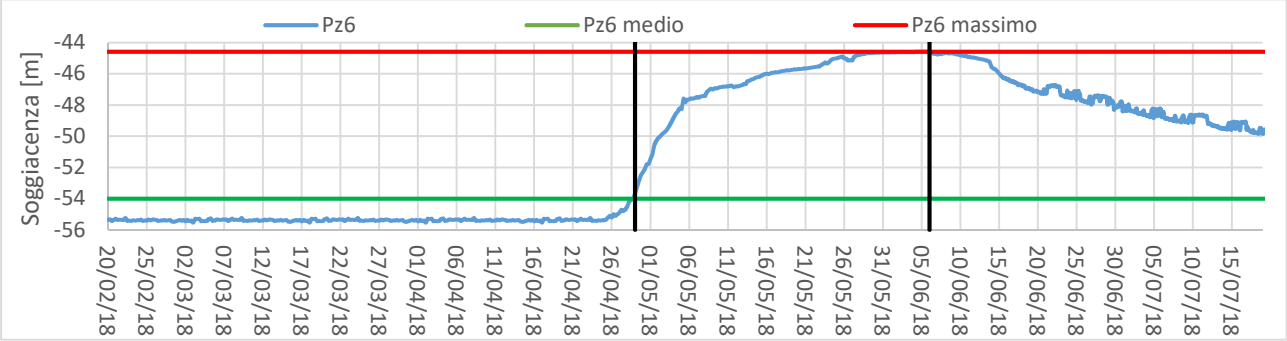
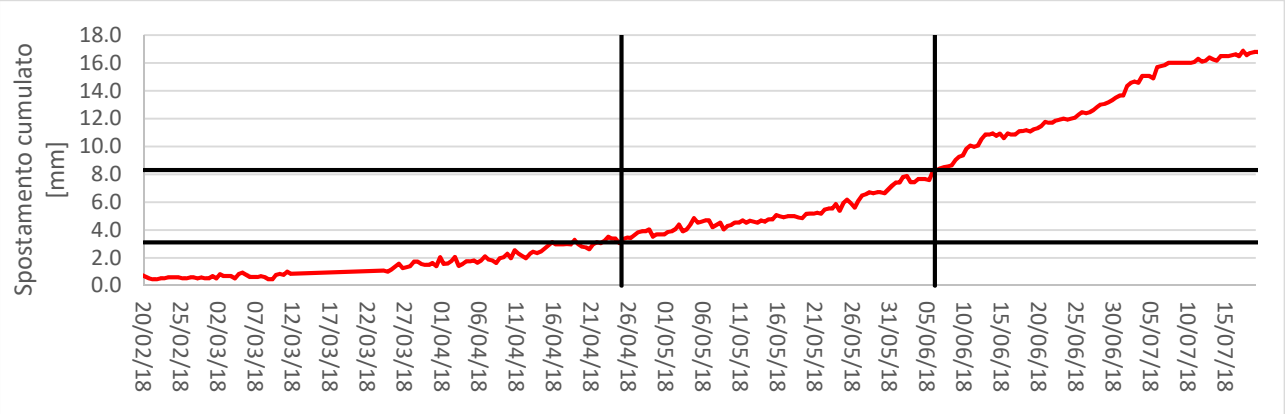


GRAFICO 6.5- PASSAGGIO DA VALORE MEDIO A VALORE MASSIMO PIEZOMETRO PZ6



Determinato tale intervallo di tempo, si è andati a determinare l'incremento di spostamento rilevato nella colonna I2 in prossimità della superficie di scivolamento. Si è prodotto quindi il *grafico 6.6* e da esso l'entità di spostamento, dal 25/04/18 al 06/06/18, è stato di circa 5-6mm.

GRAFICO 6.6-DMS-I2 ZONA 11-16M, INNALZAMENTO FALDA DAL VALORE MEDIO AL VALORE MASSIMO



È stata lanciata un'analisi con la posizione media della falda e un'altra analisi con la posizione massima della falda; da esse, nella posizione della colonna I2, si è calcolata la differenza di spostamento in prossimità della superficie di scivolamento. La *tabella 6.13* riporta i risultati di differenza di spostamento, indicato con il termine Δs, ottenuto dalle analisi numeriche.

TABELLA 6.13-DIFFERENZA DI SPOSTAMENTO OTTENUTA TRA POSIZIONE MASSIMA DELLA FALDA E POSIZIONE MEDIA DELLA FALDA, MEDIANTE SIMULAZIONE NUMERICA

Colonna I2	
Profondità [m]	Δs [m]
11.2	0.012
12.2	0.010
13.2	0.009
14.2	0.007
15.2	0.005
16.2	0.003

Si ritiene soddisfacente il confronto tra i valori ottenuti dall'analisi numerica e quelli misurati.

6.7.4 Conclusioni

Le analisi numeriche condotte hanno consentito di evidenziare il processo che conduce il versante in studio all'instabilità e l'influenza su di esso della variazione del livello di falda. L'innalzamento della falda ha prodotto una riduzione del margine di sicurezza nei confronti della stabilità globale del pendio e ha incrementato l'entità delle deformazioni di taglio massime in corrispondenza delle superfici di scivolamento.

CAPITOLO 7

7 Conclusioni

L'analisi condotta ha permesso di individuare le cause predisponenti e scatenanti del movimento gravitativo profondo che interessa il versante del Cassas, di analizzare nel dettaglio i dati di monitoraggio nel periodo 2012-2018 e di costruire un modello numerico agli elementi finiti.

Le cause predisponenti del movimento franoso sono legate alla situazione stratigrafica (porzioni superficiali di calcescisti molto fratturate), alla pendenza del versante, alla pendenza del substrato e all'approfondimento vallivo operato dalle glaciazioni.

Le cause scatenanti del dissesto sono invece legate ai notevoli incrementi dei livelli idrici, legati al processo di fusione nivale e ad eventi piovosi di lunga durata che addirittura, in situazioni eccezionali, potrebbero far evolvere il dissesto da una deformazione gravitativa profonda di versante ad un vero e proprio collasso come quello avvenuto negli anni '60.

L'analisi dei dati di monitoraggio ha permesso di individuare la posizione delle superfici di scivolamento, di comprendere come la risalita dei livelli idrici non sia legata ad eventi di precipitazione rapidi ed intensi (grazie ai processi di evapotraspirazione, di ruscellamento e alla presenza della galleria drenante) bensì a processi di fusione nivale o eventi piovosi di lunga durata. Tale risalita dei livelli idrici causa inoltre un'accelerazione del movimento del corpo frana, rimanendo comunque controllata dall'azione del sistema drenante.

L'opera di drenaggio profonda gioca un ruolo fondamentale sulla stabilità del versante poiché essa permette di ridurre il livello di soggiacenza della falda, prevenendo quindi il manifestarsi di importanti accelerazioni dei movimenti profondi.

Al fine realizzare il modello numerico agli elementi finiti, si è dapprima scelta una sezione di studio all'interno dell'area in frana e, successivamente, è stata realizzata la sezione geologico-tecnica. Le interfacce tra i vari strati sono state definite per mezzo informazioni tratte di sondaggi e dalla prova sismica non invasiva (sismica a rifrazione). Si è anche ricostruito l'andamento della falda, per mezzo dell'informazione di soggiacenza tratta dai sondaggi stratigrafici, dai piezometri e dall'ubicazione delle emergenze idriche nel versante.

Ricostruita la sezione geologico-tecnica e caratterizzati da un punto di vista geomeccanico i vari strati per mezzo di prove penetrometriche statiche, sondaggi stratigrafici e informazioni tratte da studi passati, sono seguite delle analisi numeriche; esse hanno permesso di comprendere come le condizioni di stabilità globale del versante siano dipendenti dai livelli idrici e il fattore di sicurezza globale sia prossimo all'unità, coerentemente con i periodici movimenti registrati dagli strumenti di monitoraggio.

8 Allegati

8.1 Allegato I: analisi dei dati meteorologici

GRAFICO 8.1- STAZIONE LE SELLE: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONE NEVOSE E ALTEZZA NEVE, ANNO 2015

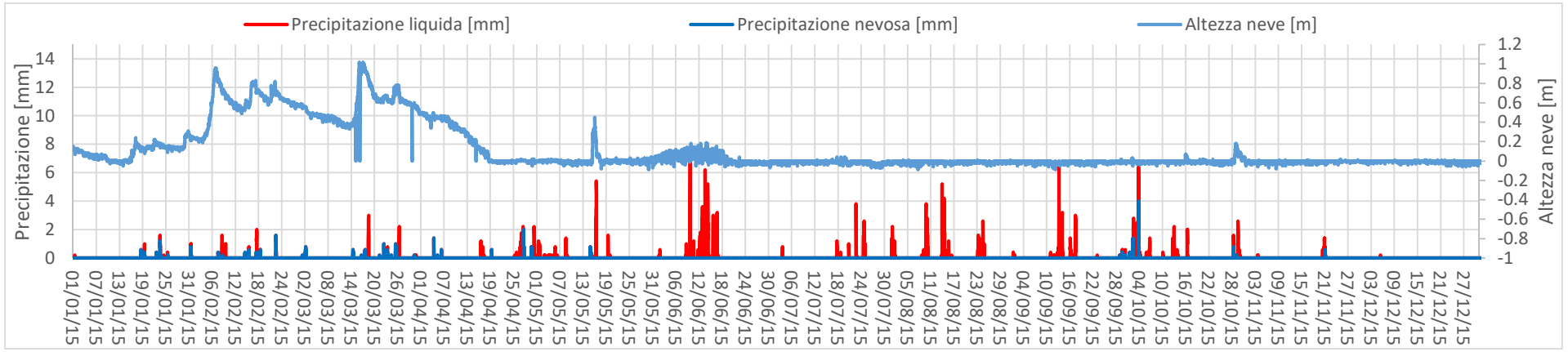


GRAFICO 8.2-STAZIONE LE SELLE: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E ALTEZZA NEVE, ANNO 2015

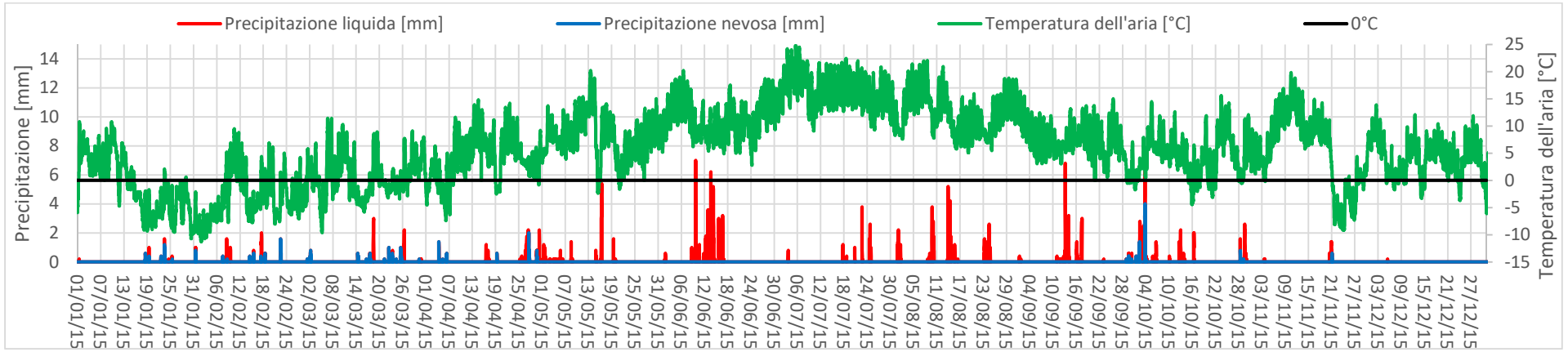


GRAFICO 8.3-STAZIONE LE SELLE: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E ALTEZZA NEVE, ANNO 2016

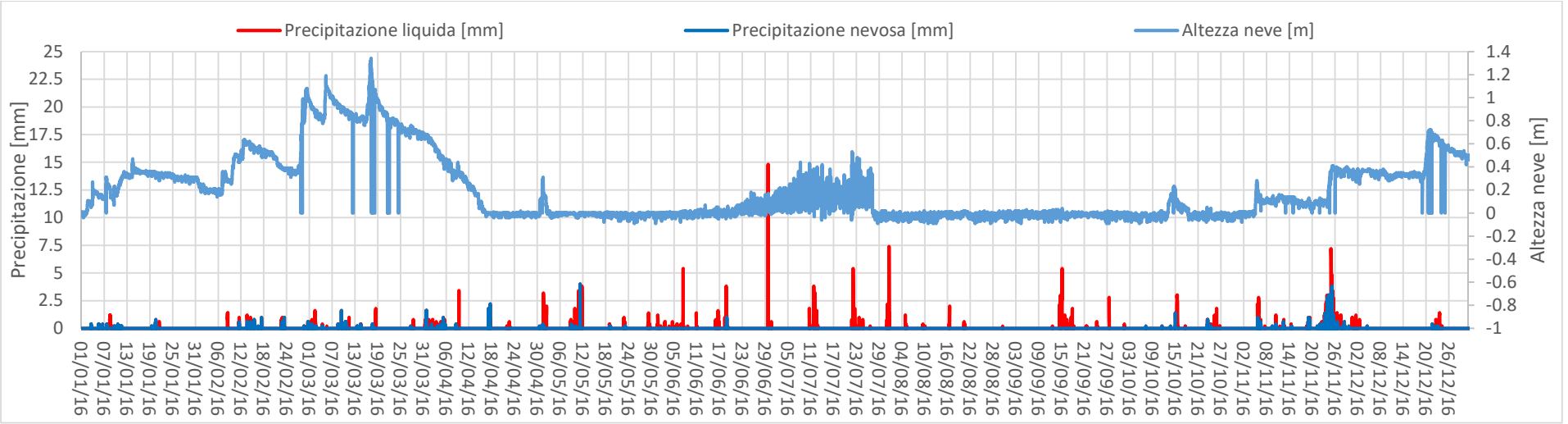


GRAFICO 8.4-STAZIONE LE SELLE: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E TEMPERATURA DELL'ARIA, ANNO 2016

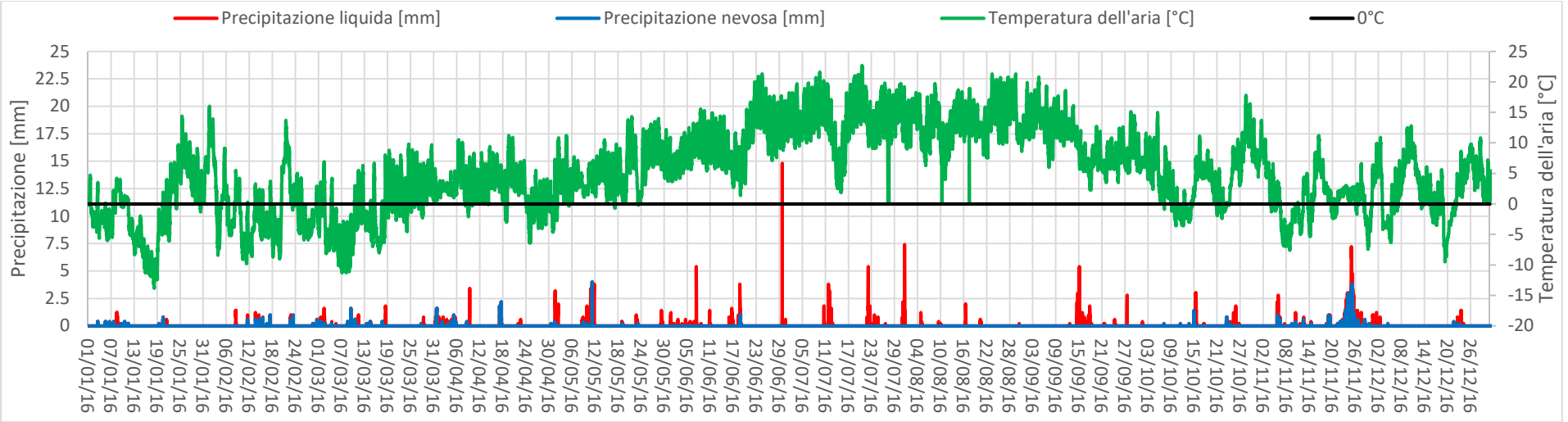


GRAFICO 8.5-STAZIONE LE SELLE: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E ALTEZZA NEVE, ANNO 2017

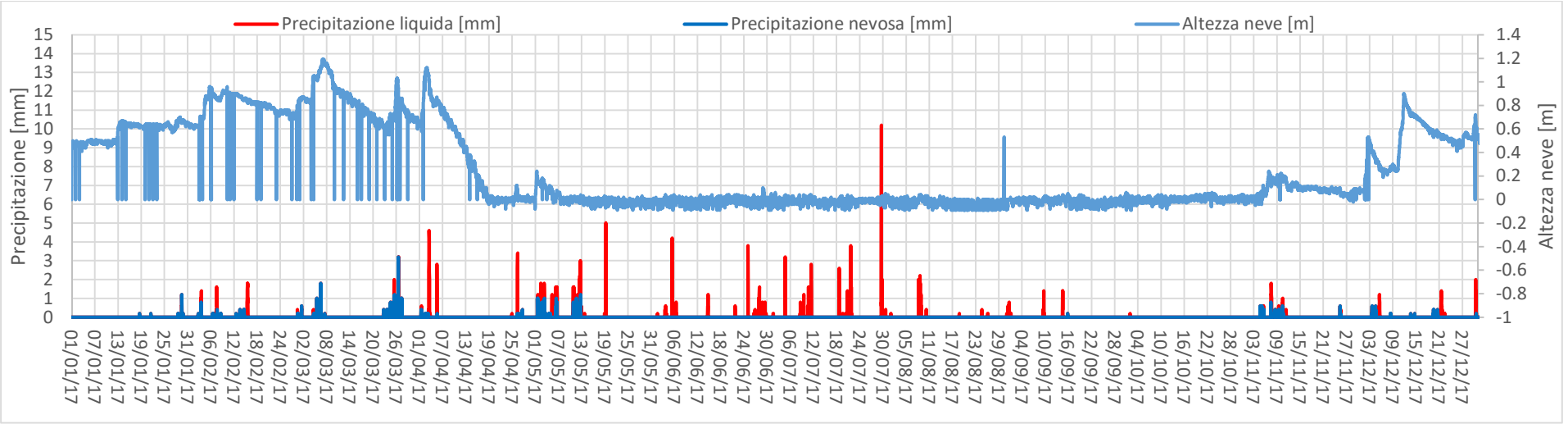


GRAFICO 8.6-STAZIONE LE SELLE: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E TEMPERATURA DELL'ARIA, ANNO 2017

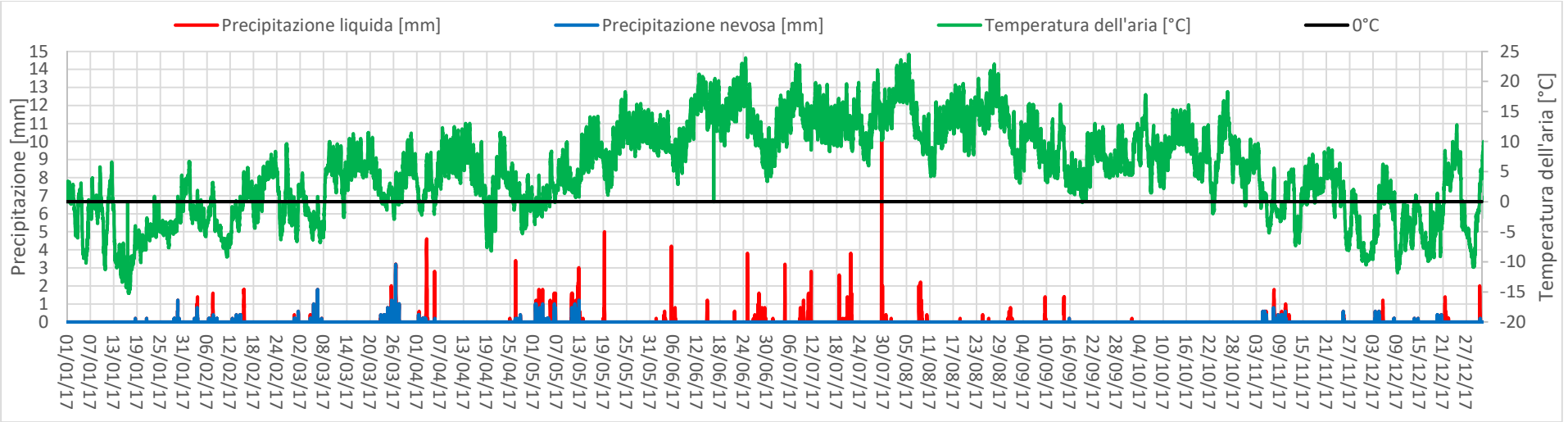


GRAFICO 8.7-STAZIONE LE SELLE: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E ALTEZZA NEVE, ANNO 2018

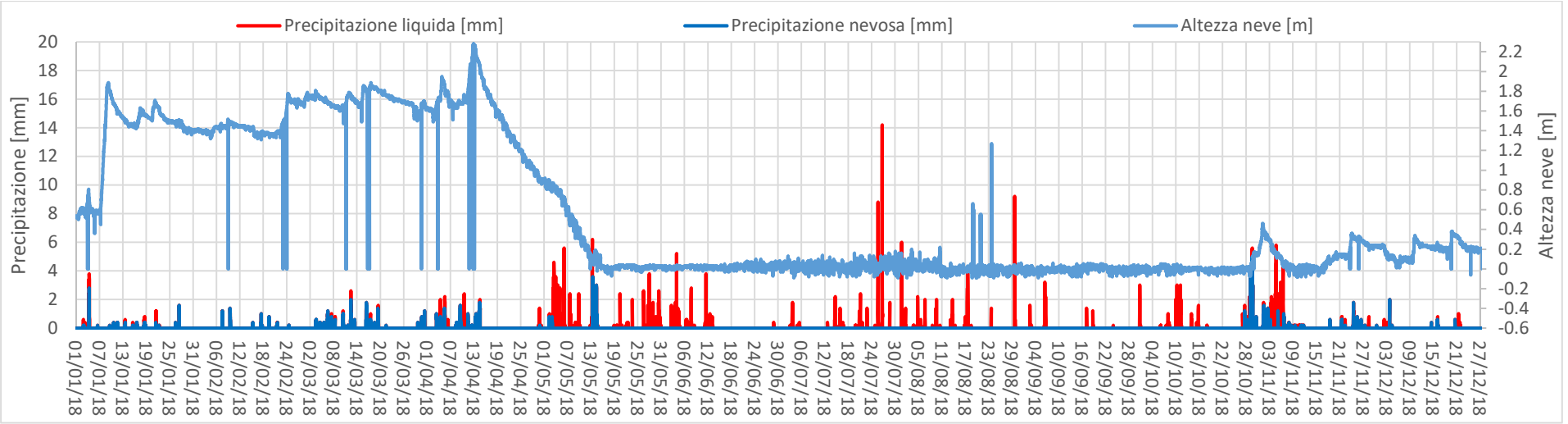


GRAFICO 8.8-STAZIONE LE SELLE: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E TEMPERATURA DELL'ARIA, ANNO 2018

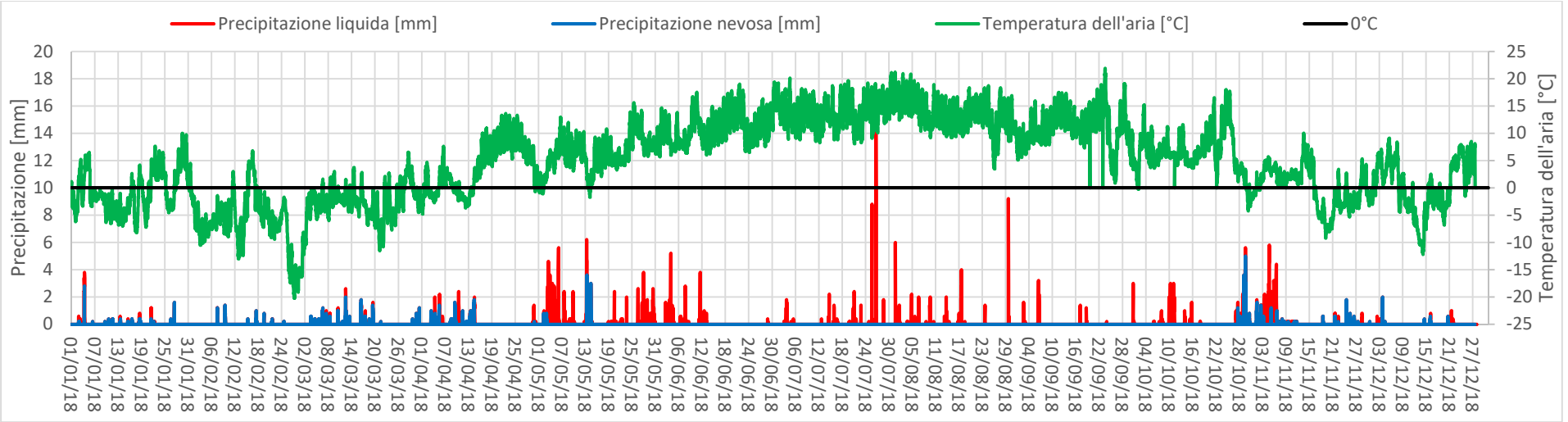


GRAFICO 8.9-STAZIONE SALBERTRAND: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E ALTEZZA NEVE, ANNO 2014

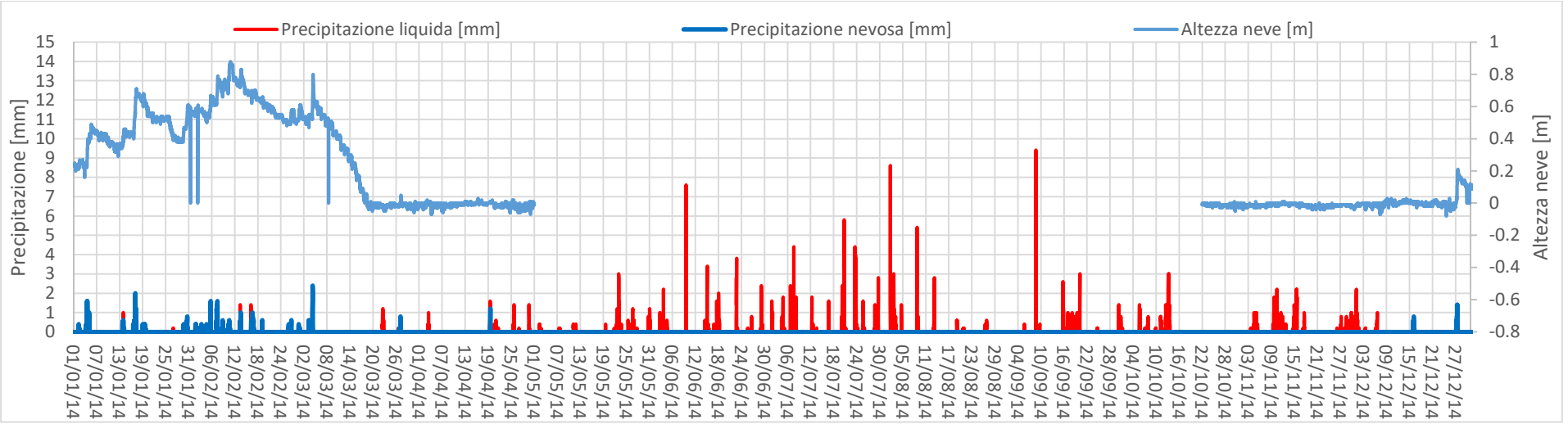


GRAFICO 8.10-STAZIONE SALBERTRAND: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E TEMPERATURA DELL'ARIA, ANNO 2014

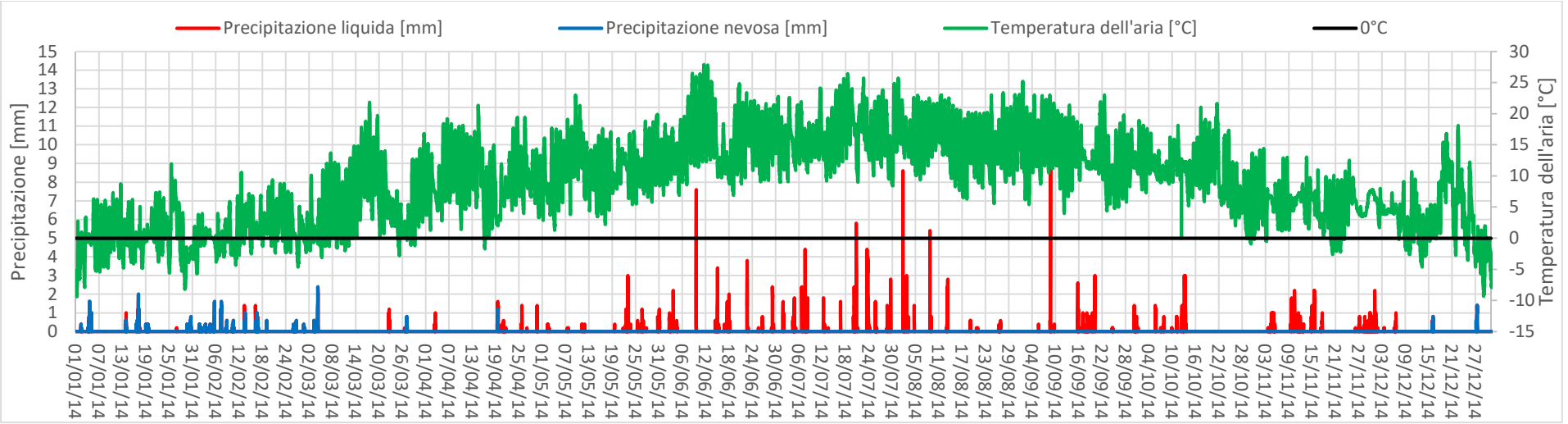


GRAFICO 8.11-STAZIONE SALBERTRAND: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E ALTEZZA NEVE, ANNO 2015

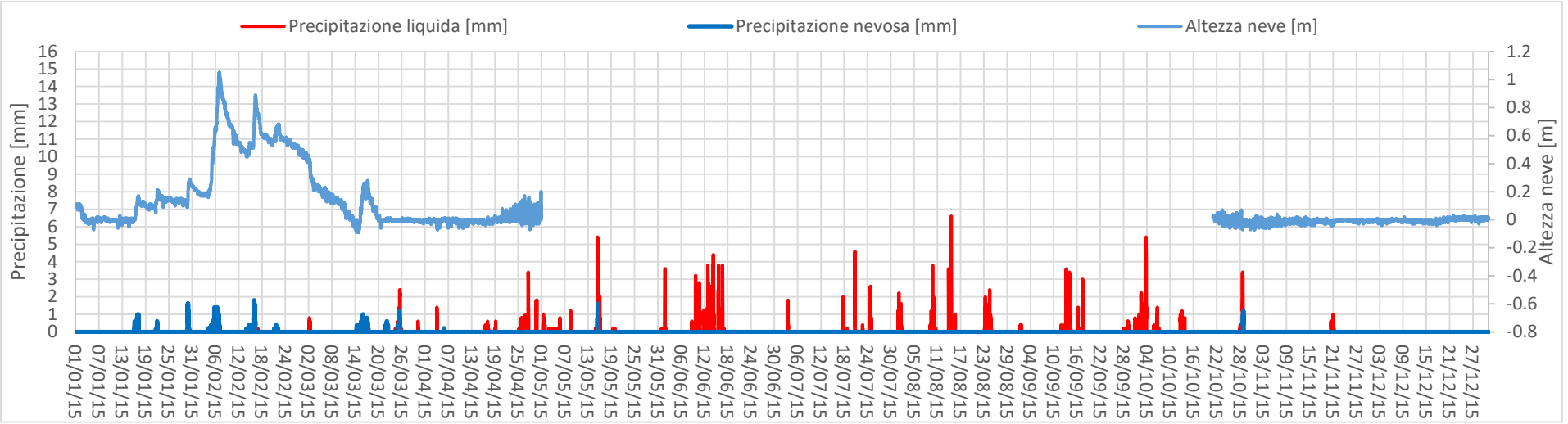


GRAFICO 8.12-STAZIONE SALBERTRAND: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E TEMPERATURA DELL'ARIA, ANNO 2015

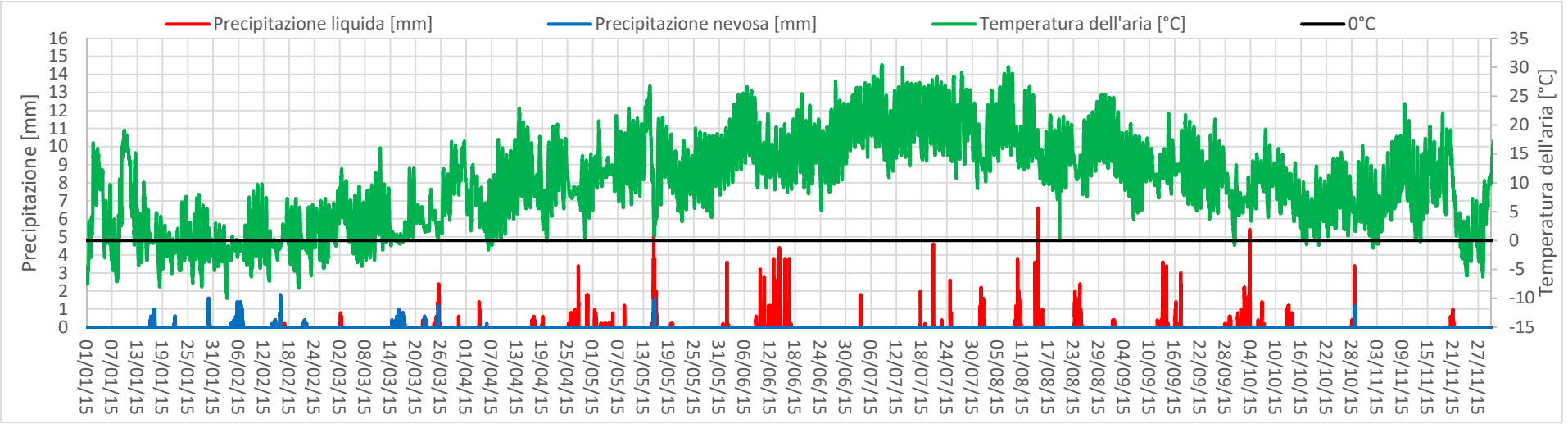


GRAFICO 8.13-STAZIONE SALBERTRAND: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E ALTEZZA NEVE, ANNO 2016

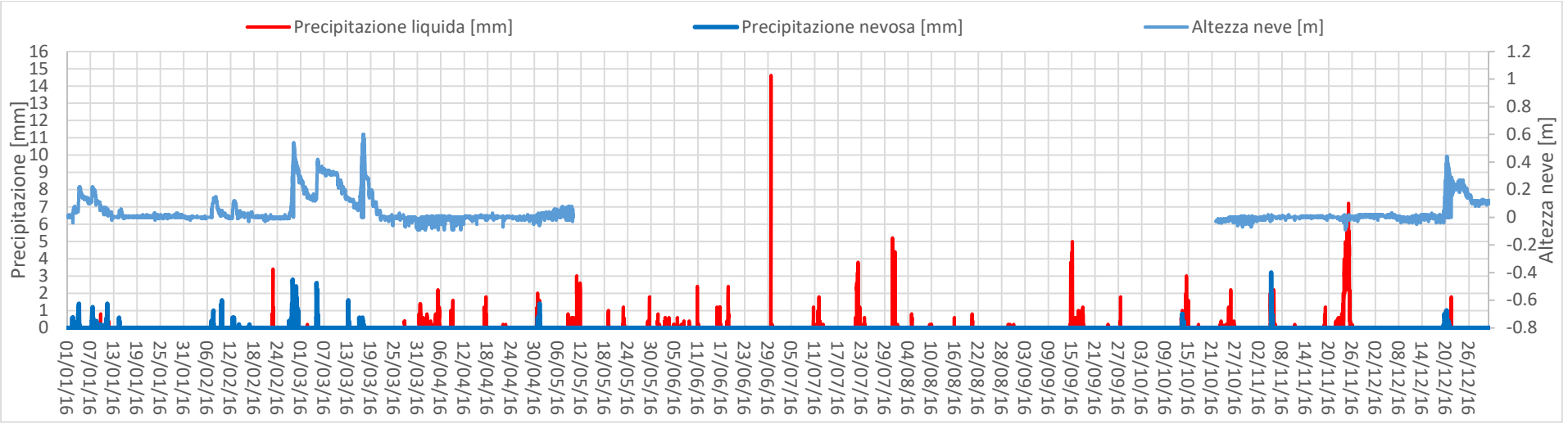


GRAFICO 8.14-STAZIONE SALBERTRAND: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E TEMPERATURA DELL'ARIA, ANNO 2016

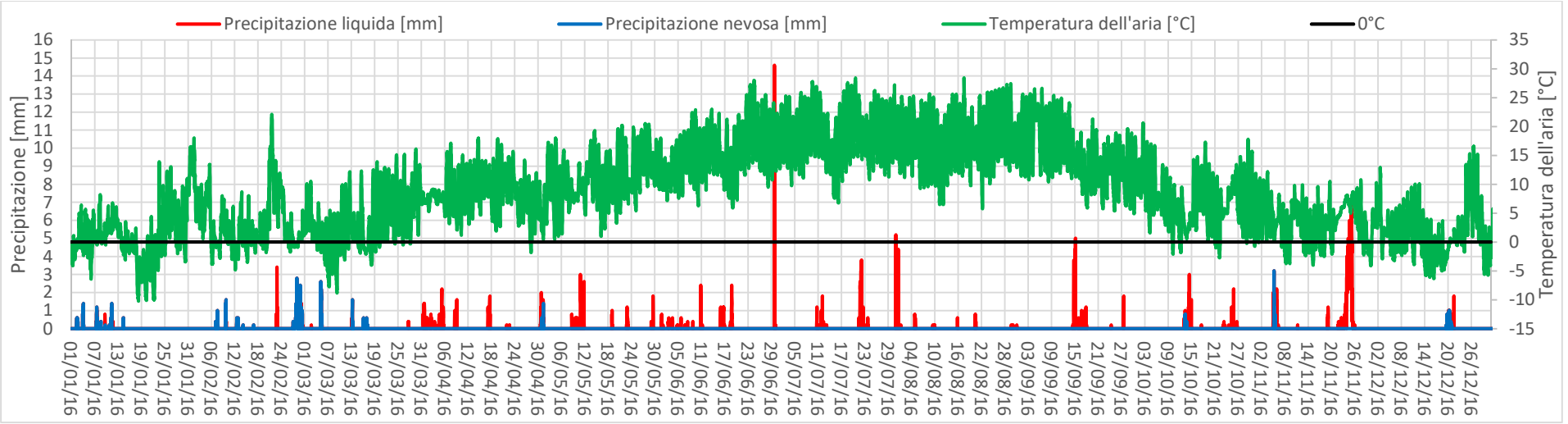


GRAFICO 8.15-STAZIONE SALBERTRAND: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E ALTEZZA NEVE, ANNO 2017

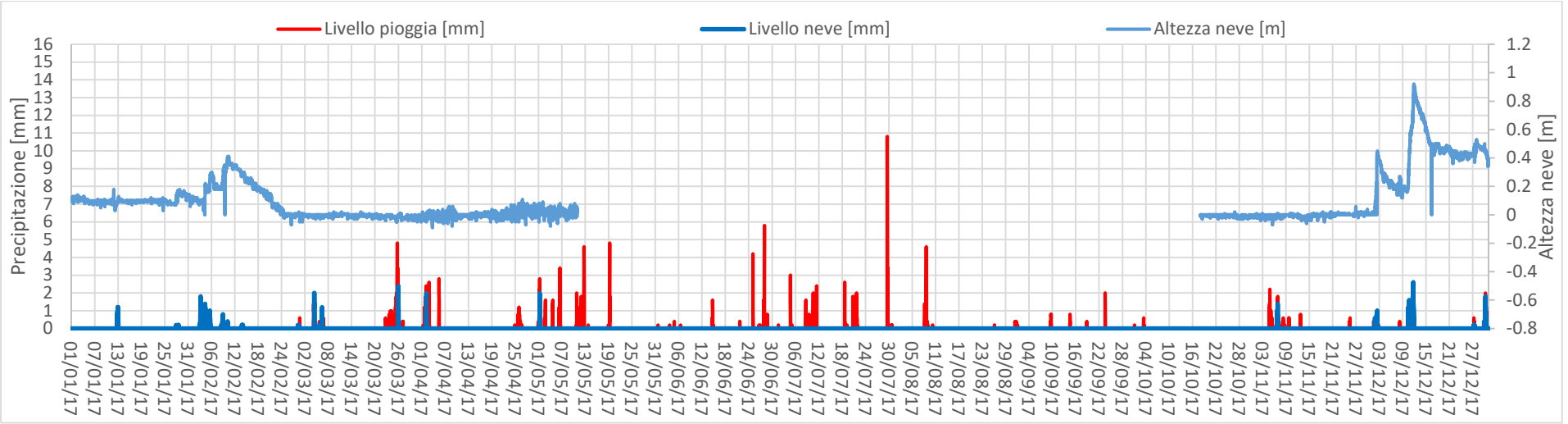


GRAFICO 8.16-STAZIONE SALBERTRAND: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E TEMPERATURA DELL'ARIA, ANNO 2017

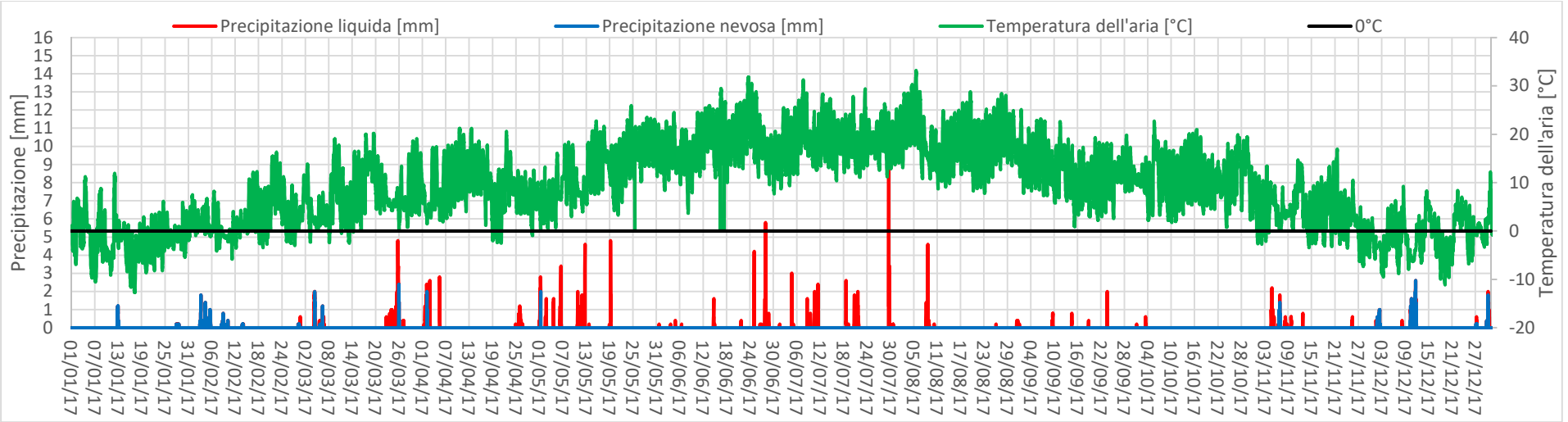


GRAFICO 8.17-STAZIONE SALBERTRAND: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E ALTEZZA NEVE, ANNO 2018

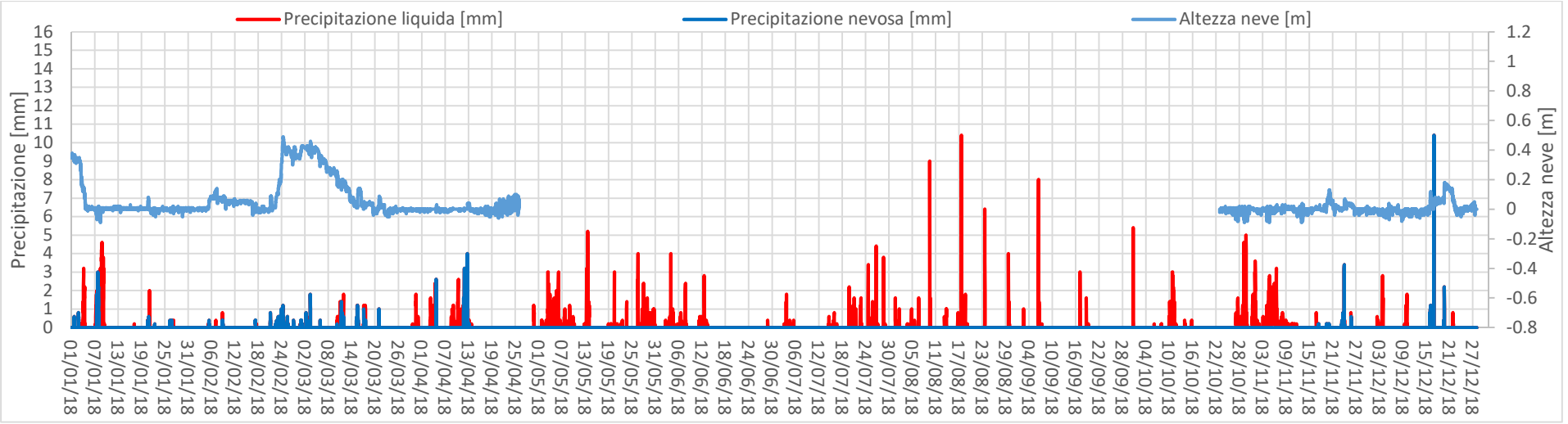


GRAFICO 8.18-STAZIONE SALBERTRAND: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONE NEVOSE E TEMPERATURA DELL'ARIA, ANNO 2018

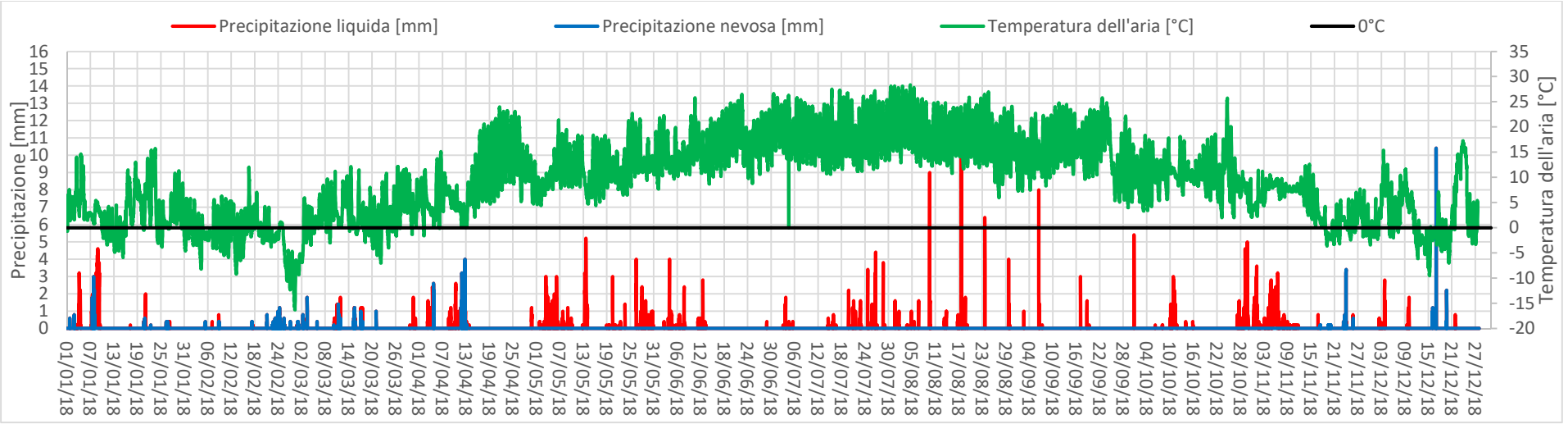


GRAFICO 8.19-STRUMENTI PL1 E T1: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E TEMPERATURA DELL'ARIA, ANNO 2014-2015(PERIODO 20/05/14-13/07/15)

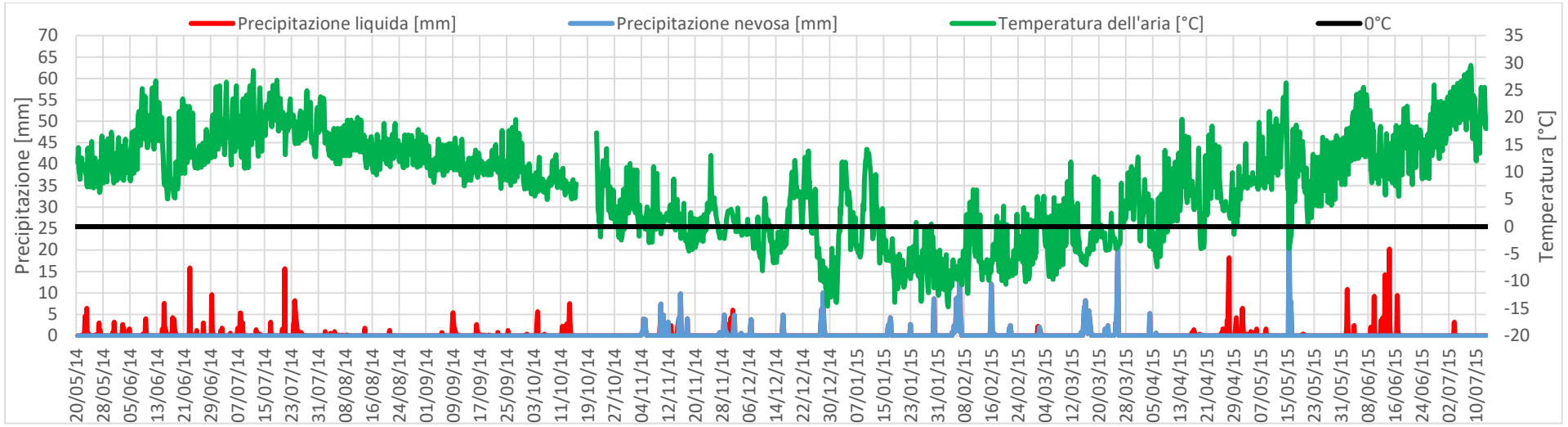
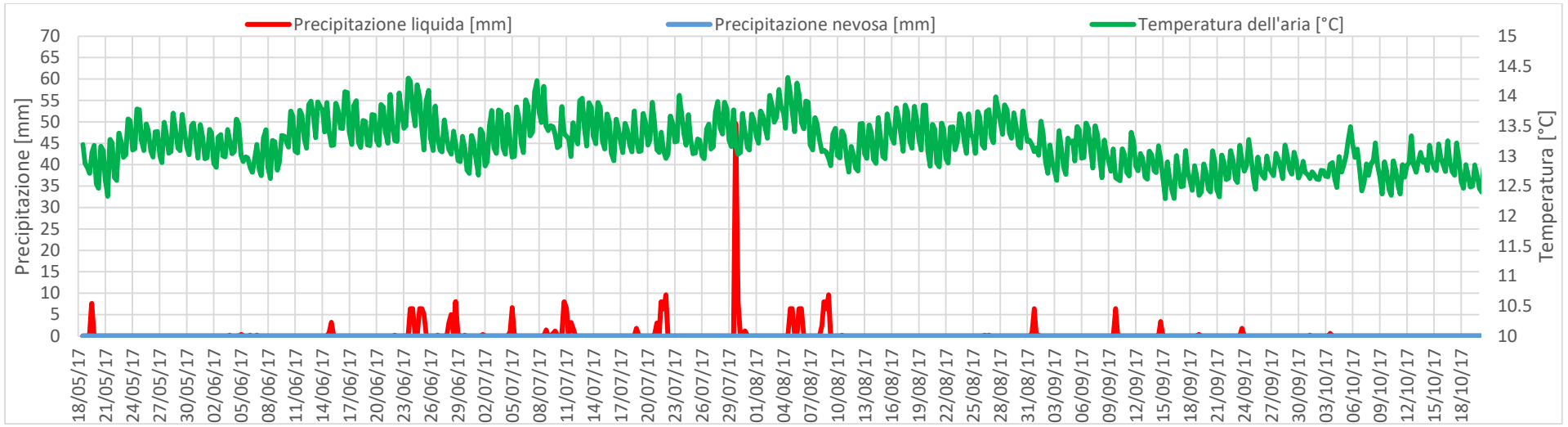


GRAFICO 8.20-STRUMENTI PL1 E T1: PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E TEMPERATURA DELL'ARIA, ANNO 2017 (PERIODO 18/05/17-20/10/17)



8.2 Allegato II: correlazione tra dati meteorologici e idrogeologici

GRAFICO 8.21-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI LE SELLE VS SOGGIACENZA DI PZS2, ANNO 2014

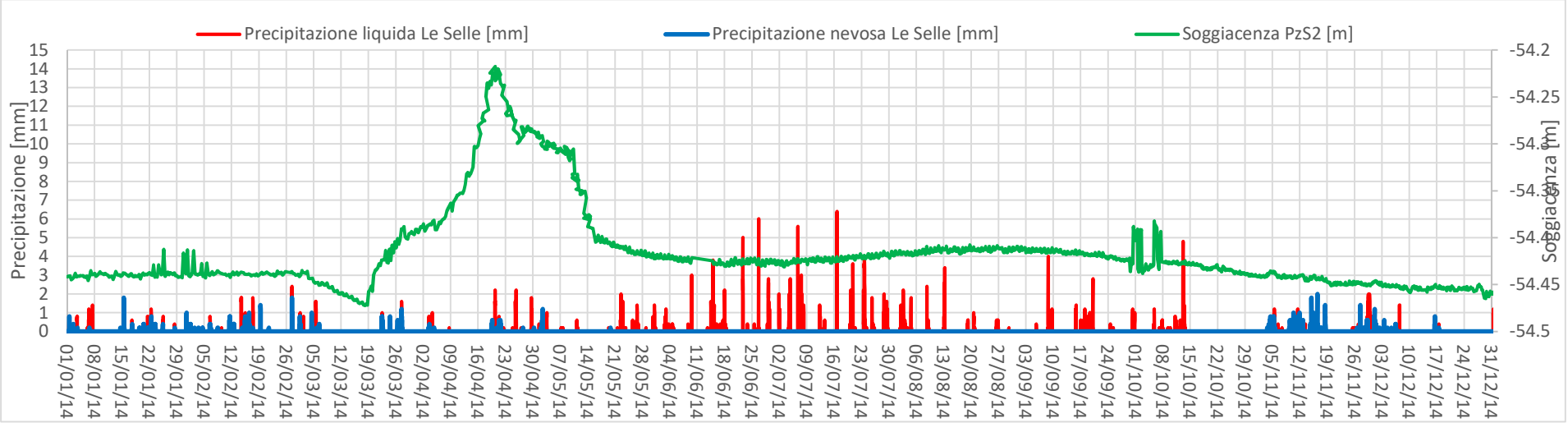


GRAFICO 8.22-ALTEZZA NEVE DI LE SELLE VS SOGGIACENZA DI PZS2, ANNO 2014

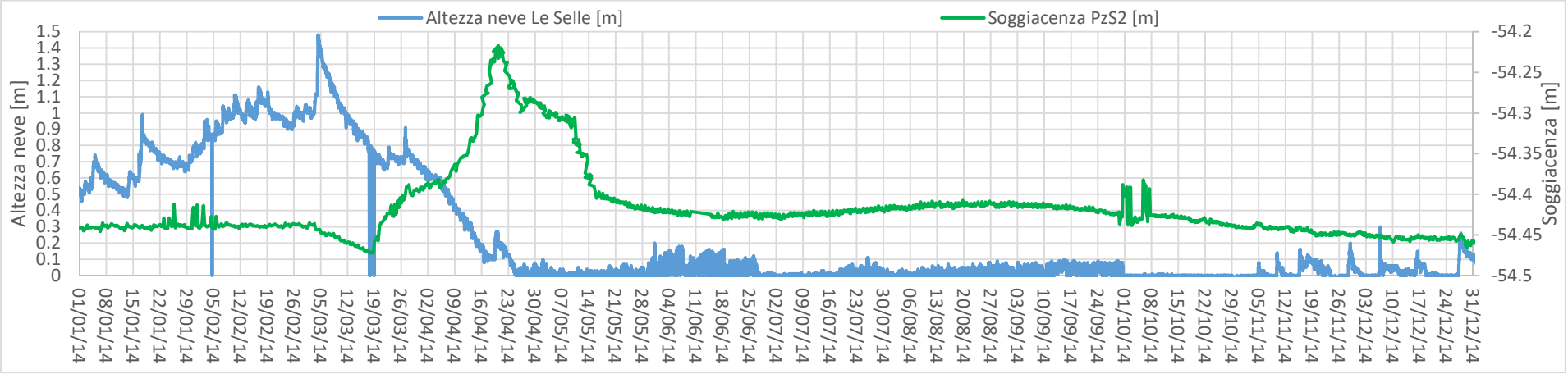


GRAFICO 8.23-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI LE SELLE VS SOGGIACENZA DI PZ4, ANNO 2014

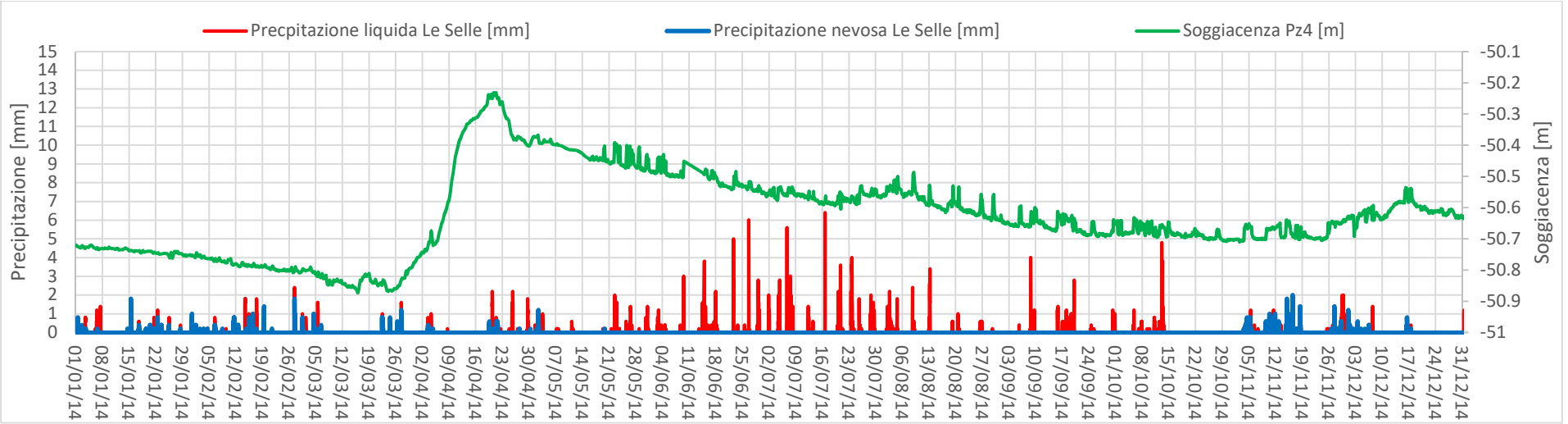


GRAFICO 8.24-ALTEZZA NEVE DI LE SELLE VS SOGGIACENZA DI PZ4, ANNO 2014

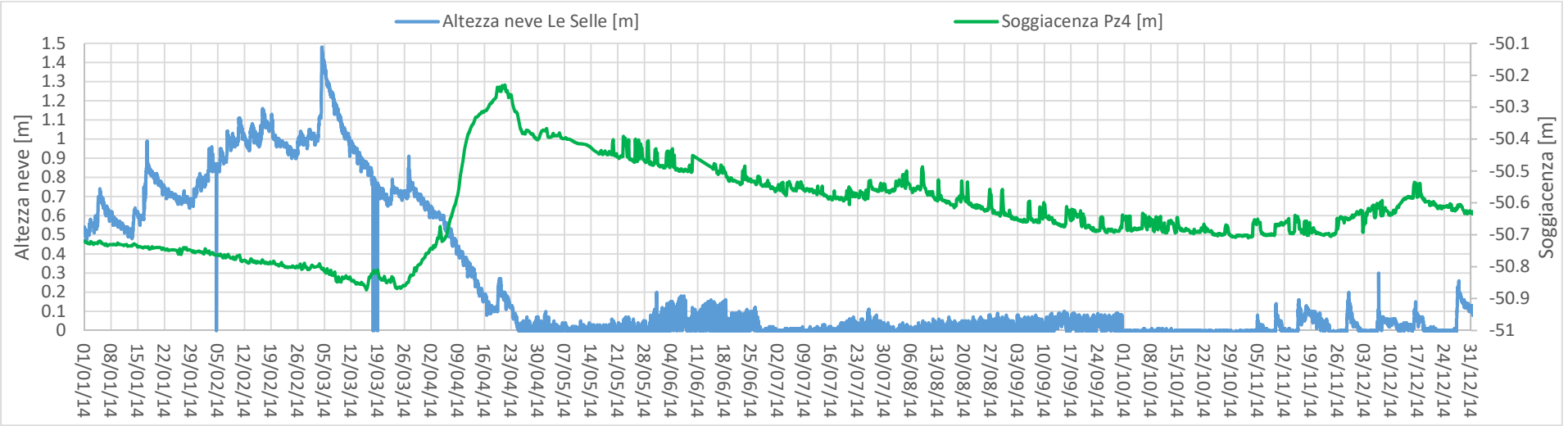


GRAFICO 8.25-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI SALBERTRAND VS PORTATA DI Q2, ANNO 2014

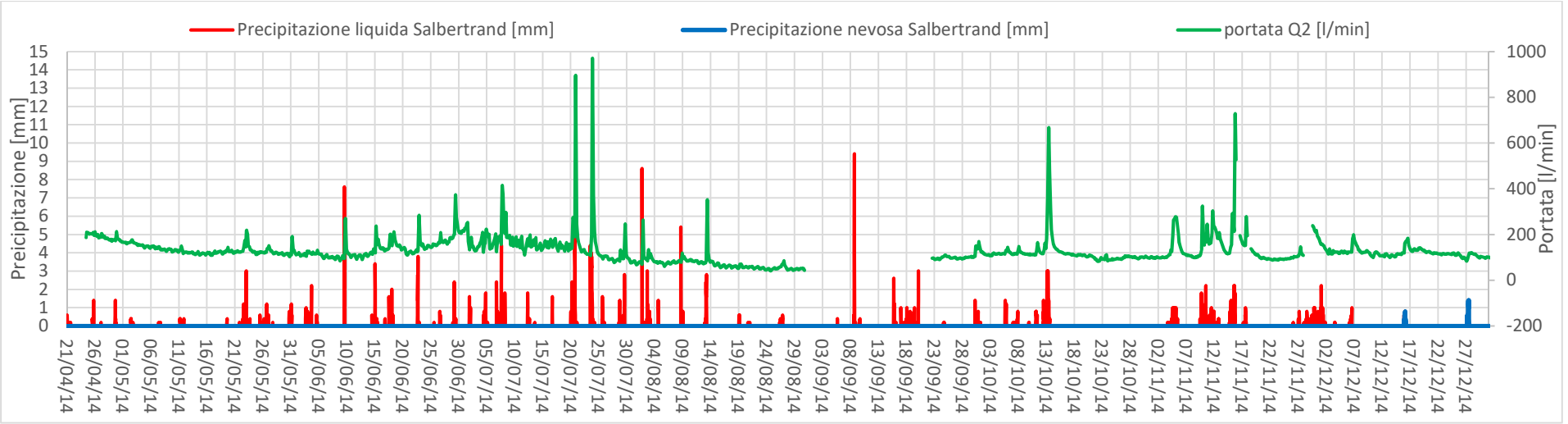


GRAFICO 8.26-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI SALBERTRAND VS PORTATA DI Q3, ANNO 2014

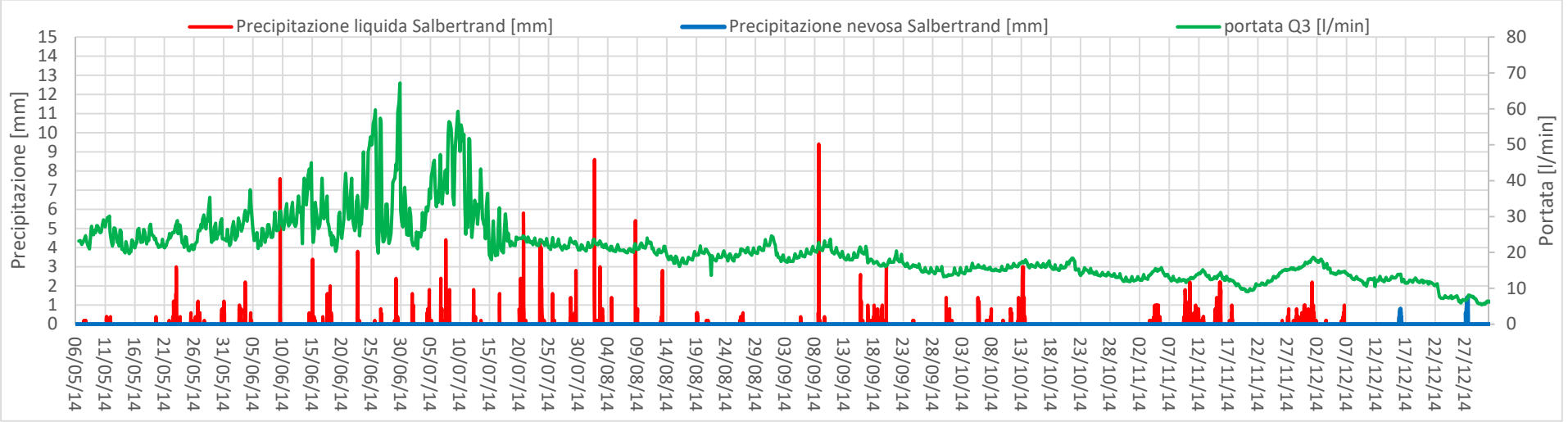


GRAFICO 8.27-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE VS SOGGIACENZA DI PZS2, ANNO 2014

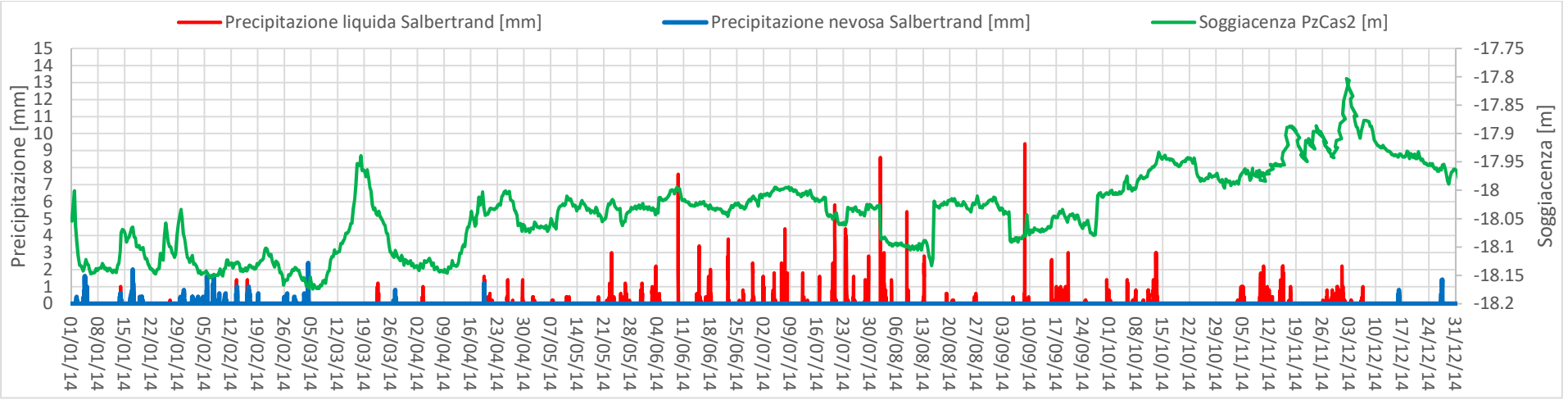


GRAFICO 8.28-ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND VS SOGGIACENZA DI PZCAS2, ANNO 2014

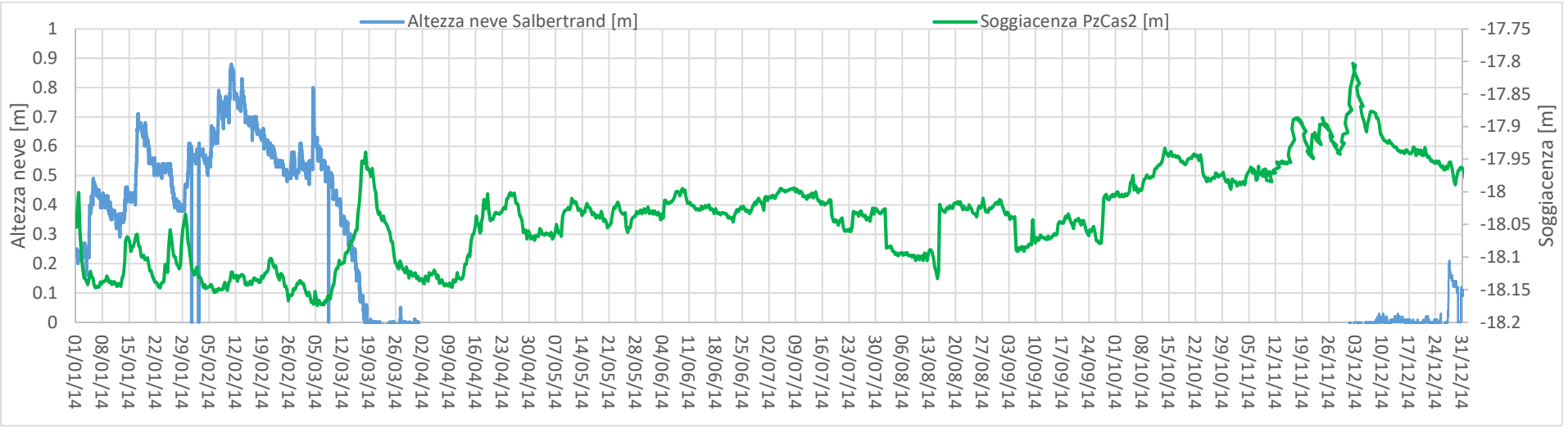


GRAFICO 8.29-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI SALBERTRAND VS SOGGIACENZA DI PZ6, ANNO 2014

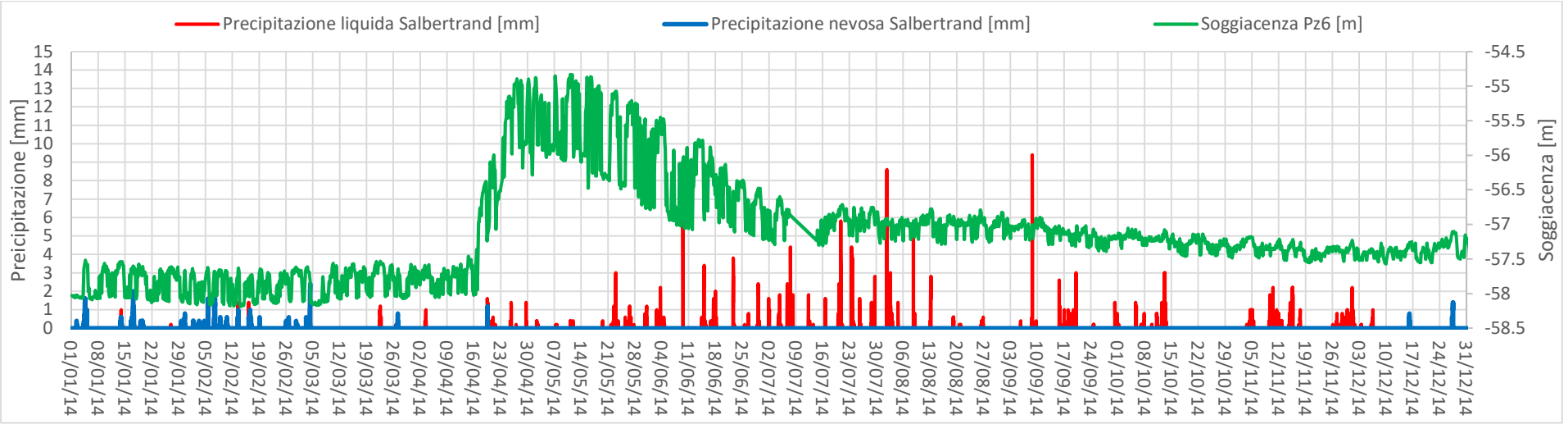


GRAFICO 8.30-ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND VS SOGGIACENZA DI PZ6, ANNO 2014

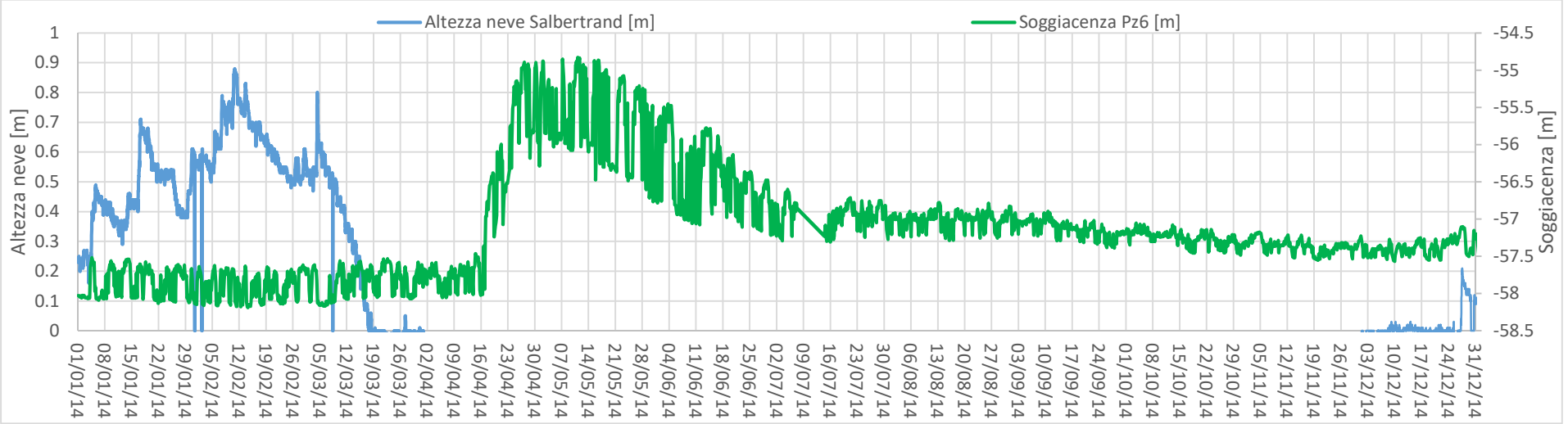


GRAFICO 8.31-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI LE SELLE VS SOGGIACENZA DI PZS2, ANNO 2015 (PERIODO GENNAIO-LUGLIO)

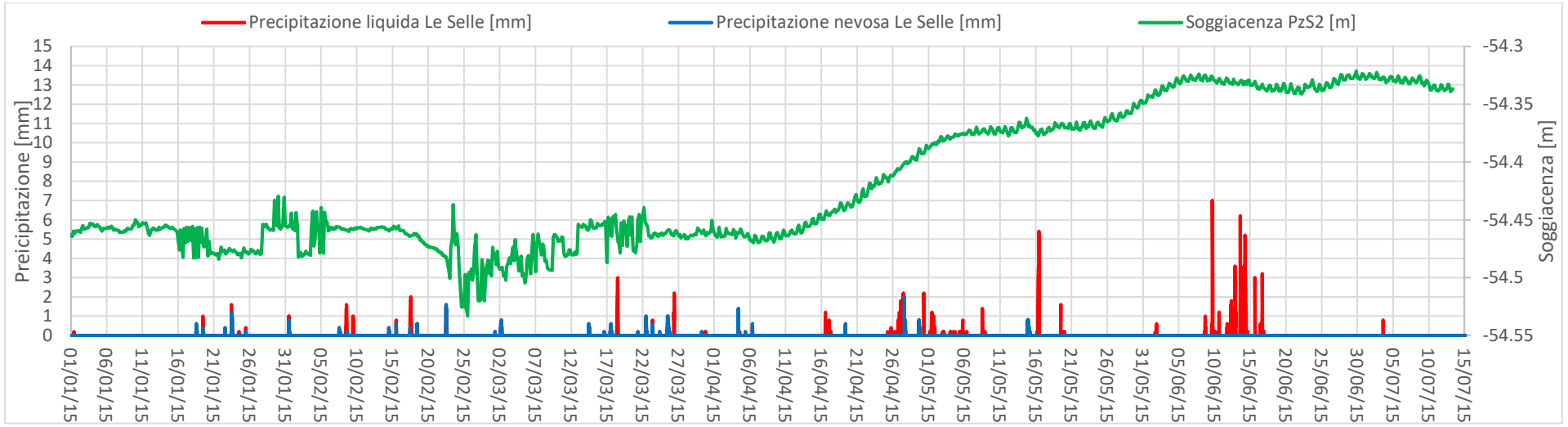


GRAFICO 8.32-ALTEZZA NEVE DI LE SELLE VS SOGGIACENZA DI PZS2, ANNO 2015 (PERIODO GENNAIO-LUGLIO)

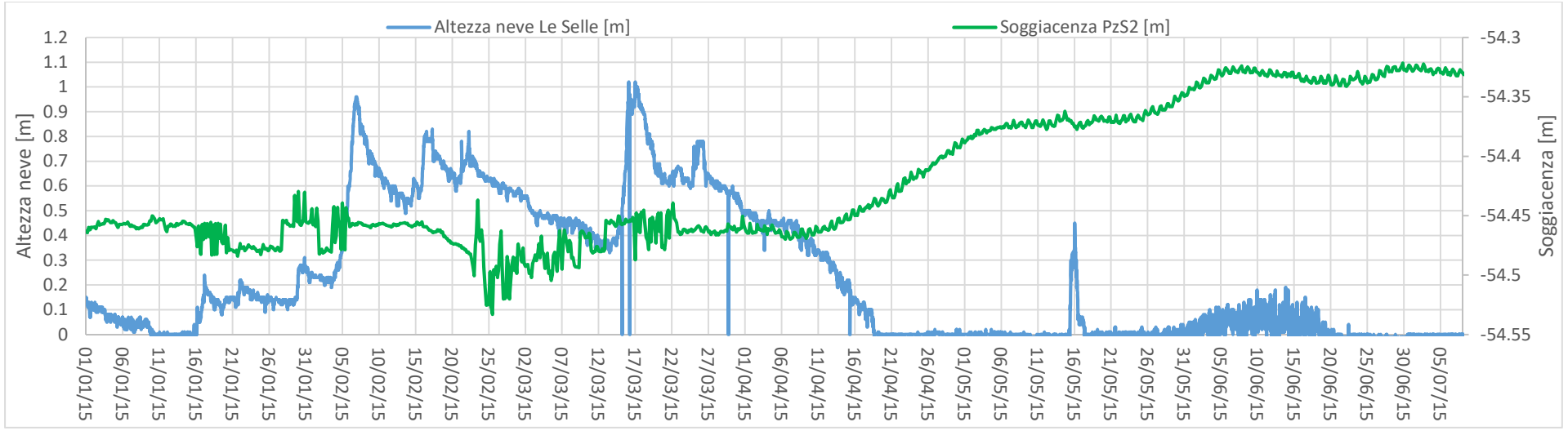


GRAFICO 8.33-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI LE SELLE VS SOGGIACENZA DI PZ4, ANNO 2015 (PERIODO GENNAIO-LUGLIO)

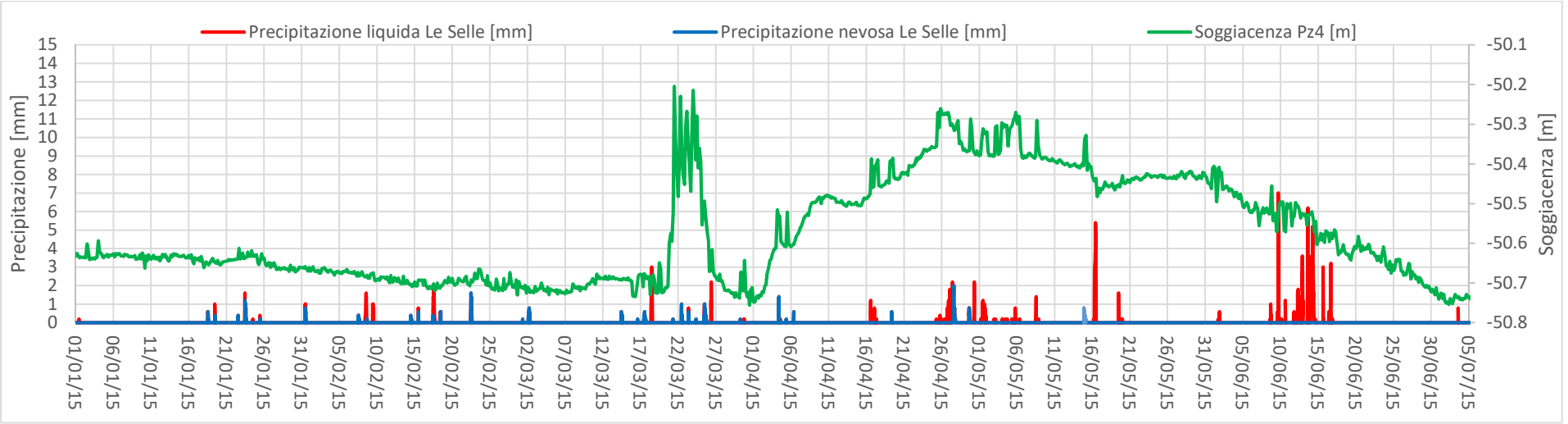


GRAFICO 8.34-ALTEZZA NEVE DI LE SELLE VS SOGGIACENZA DI PZ4, ANNO 2015 (PERIODO GENNAIO-LUGLIO)

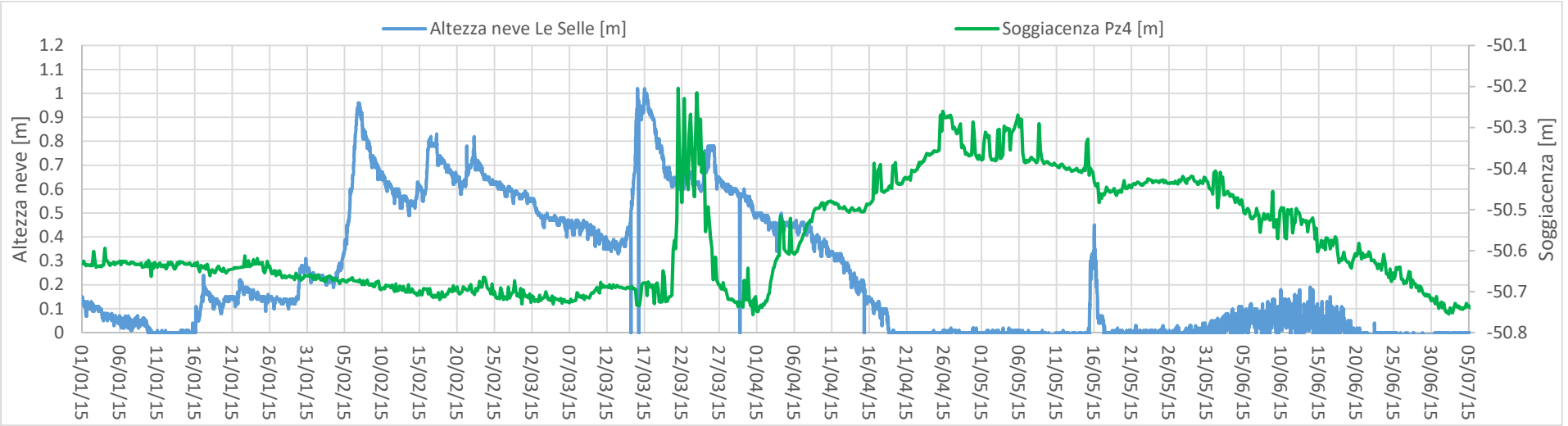


GRAFICO 8.35-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI SALBERTRAND VS PORTATA DI Q2, ANNO 2015

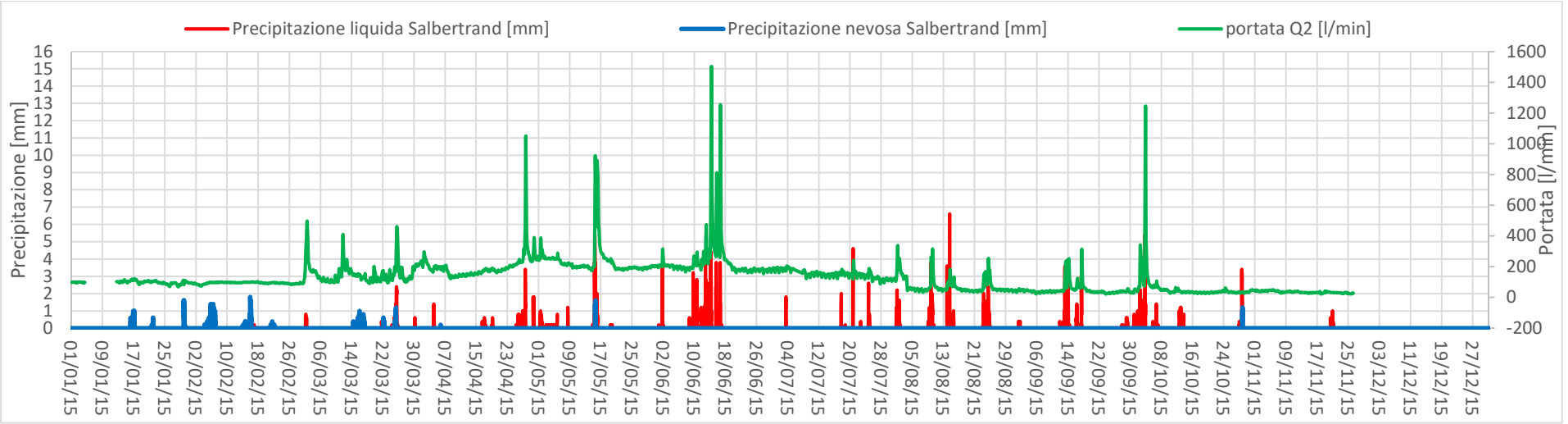


GRAFICO 8.36-ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND VS PORTATA DI Q2, ANNO 2015

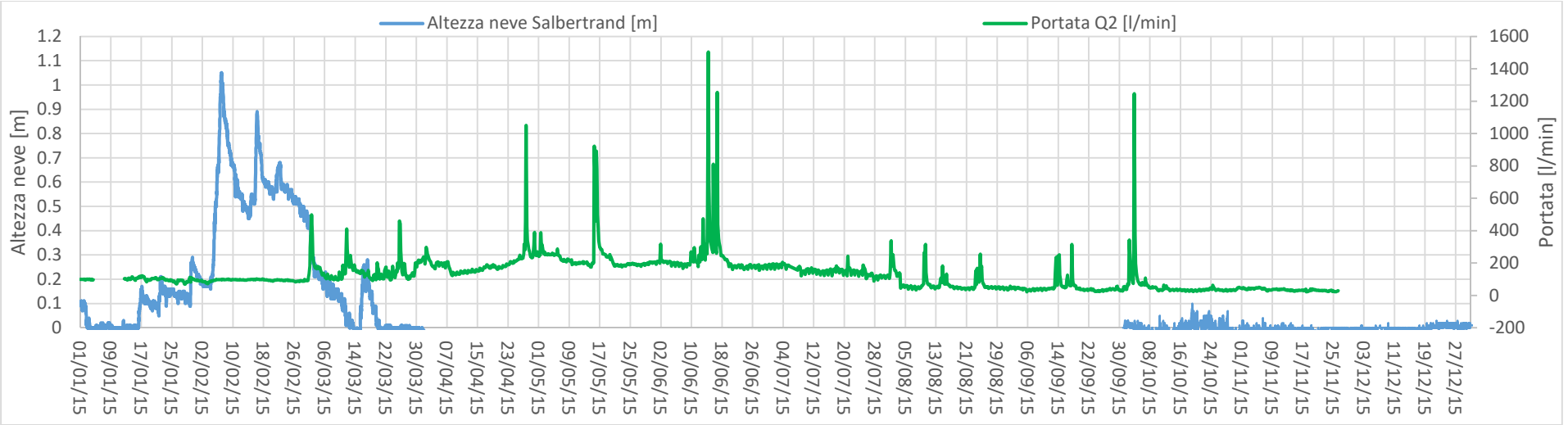


GRAFICO 8.37-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI SALBERTRAND VS PORTATA DI Q3, ANNO 2015 (PERIODO GENNAIO-LUGLIO)

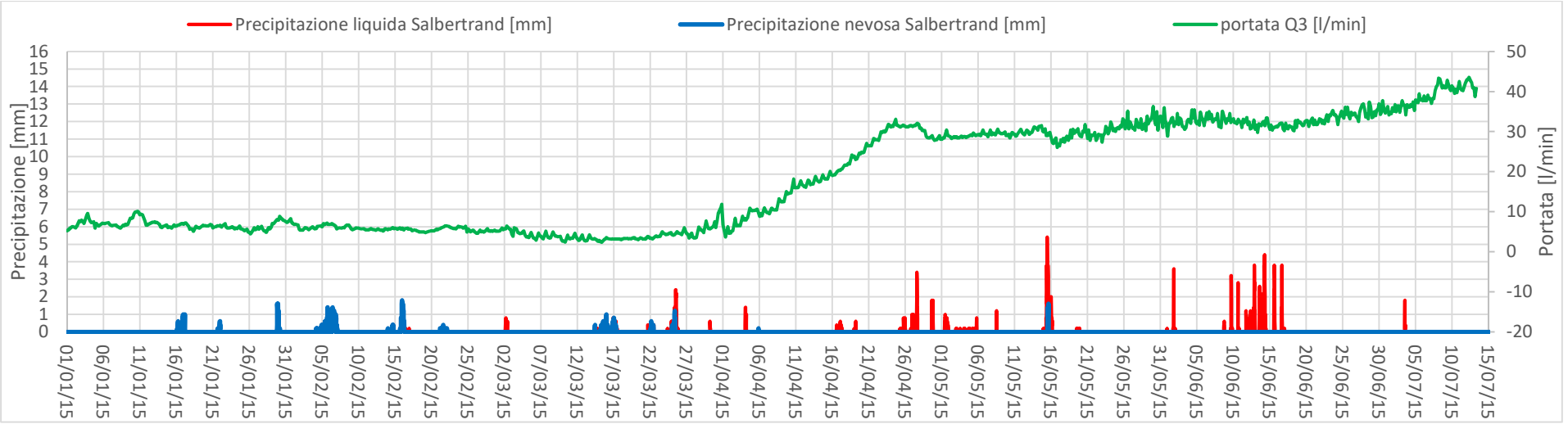


GRAFICO 8.38-ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND VS PORTATA DI Q3, ANNO 2015 (PERIODO GENNAIO-LUGLIO)

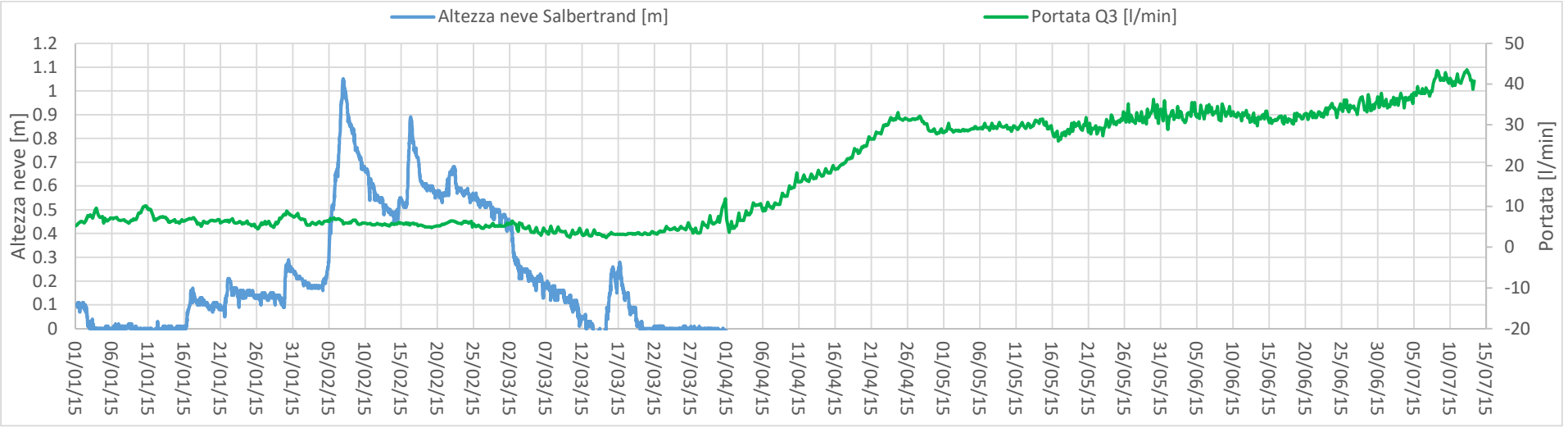


GRAFICO 8.39-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI SALBERTRAND VS SOGGIACENZA DI PZCAS2, ANNO 2015

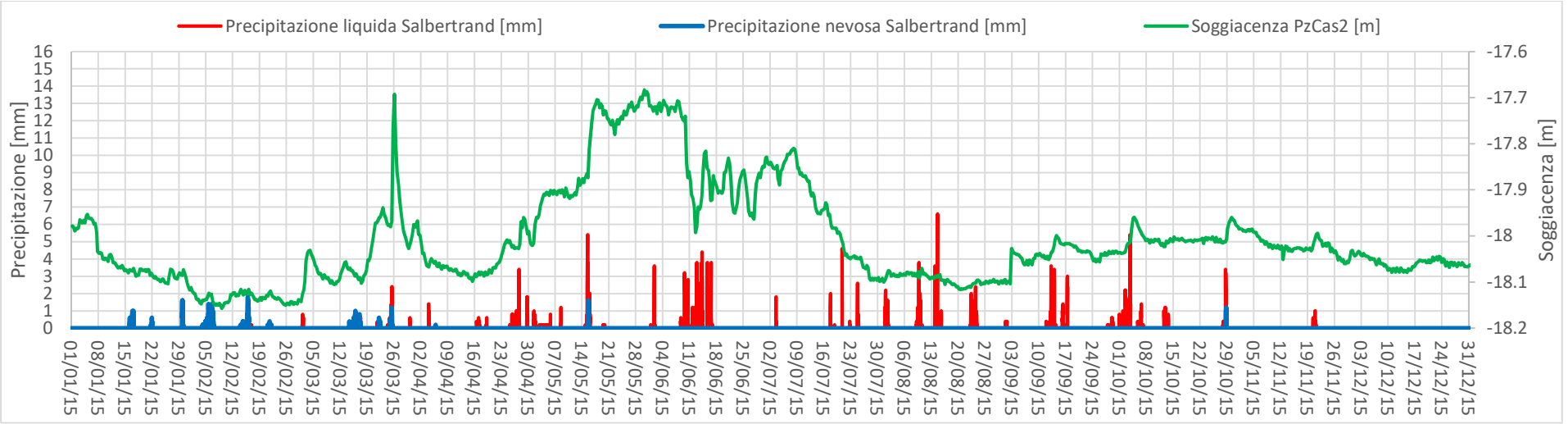


GRAFICO 8.40-ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND VS SOGGIACENZA DI PZCAS2, ANNO 2015

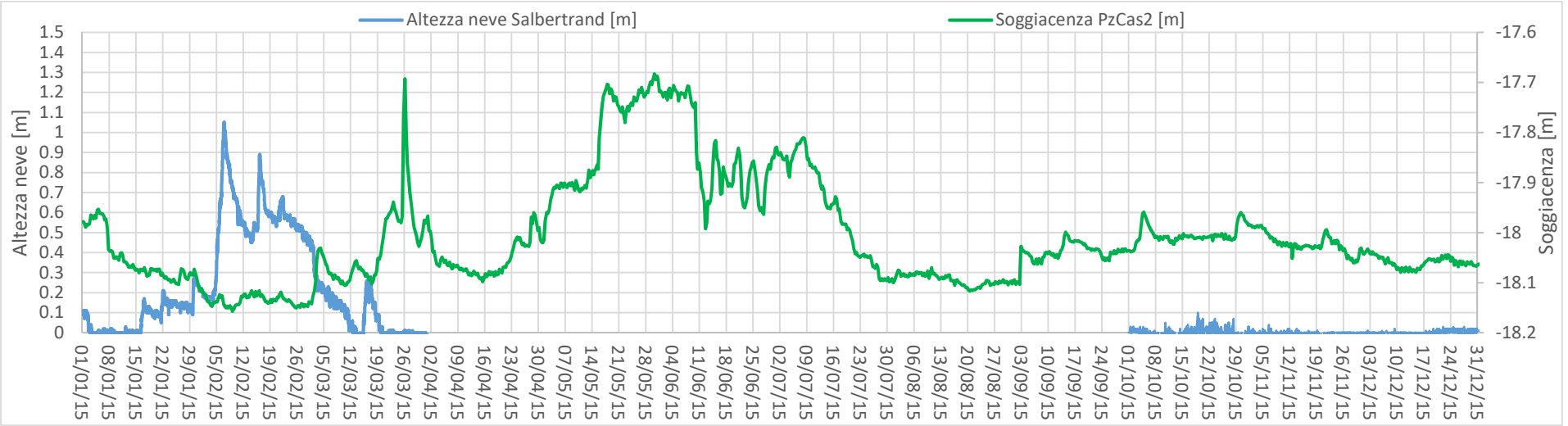


GRAFICO 8.41-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI SALBERTRAND VS SOGGIACENZA DI PZ6, ANNO 2015

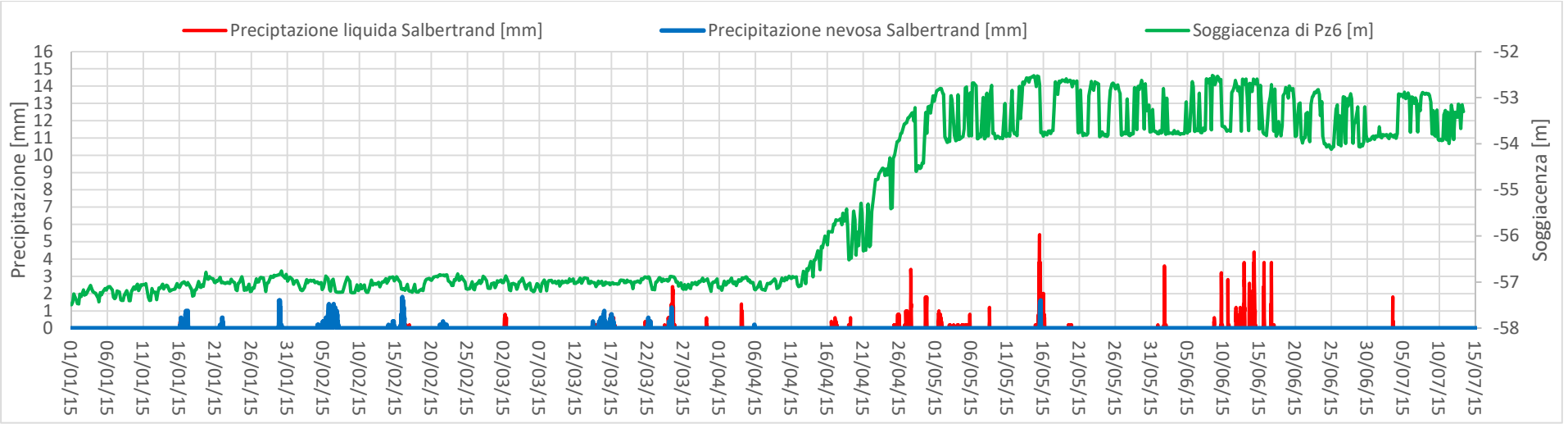


GRAFICO 8.42-ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND VS SOGGIACENZA DI PZ6, ANNO 2015

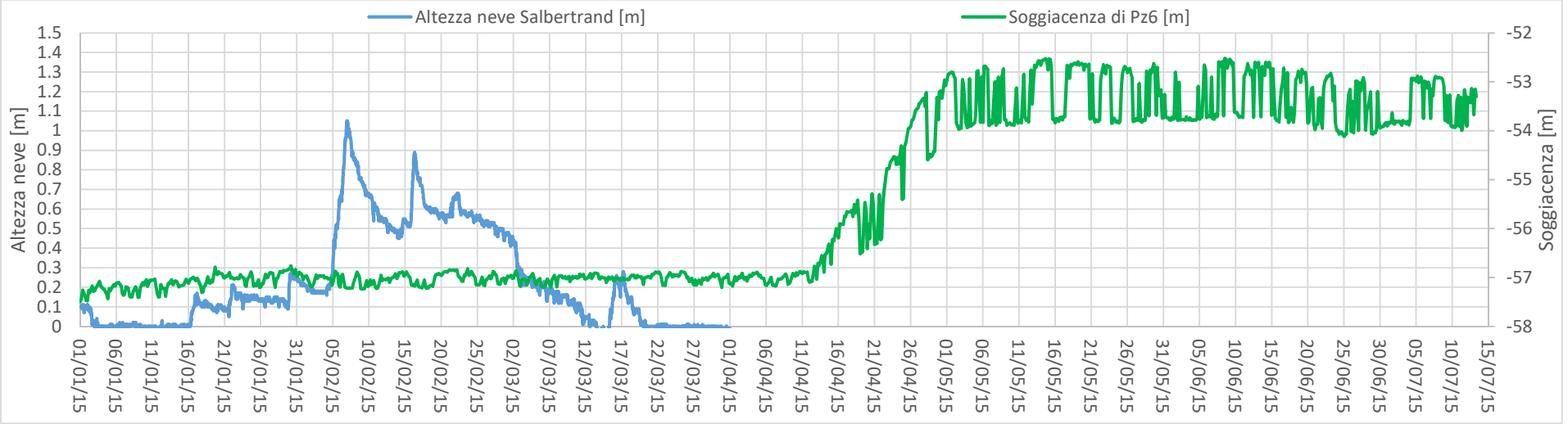


GRAFICO 8.43-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI PL1-T1 VS PORTATA DI Q3, ANNO 2014-2015 (PERIODO 20/05/14-13/07/15)

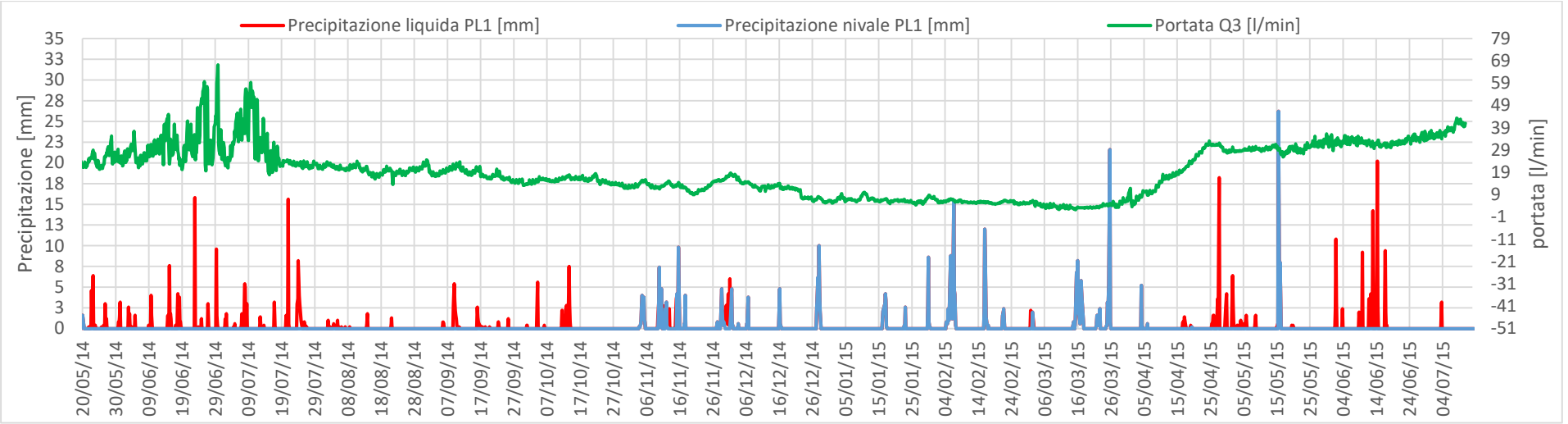


GRAFICO 8.44-PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E TEMPERATURA DELL'ARIA DI PL1-T1, ANNO 2014-2015 (PERIODO 20/05/14-13/07/15)

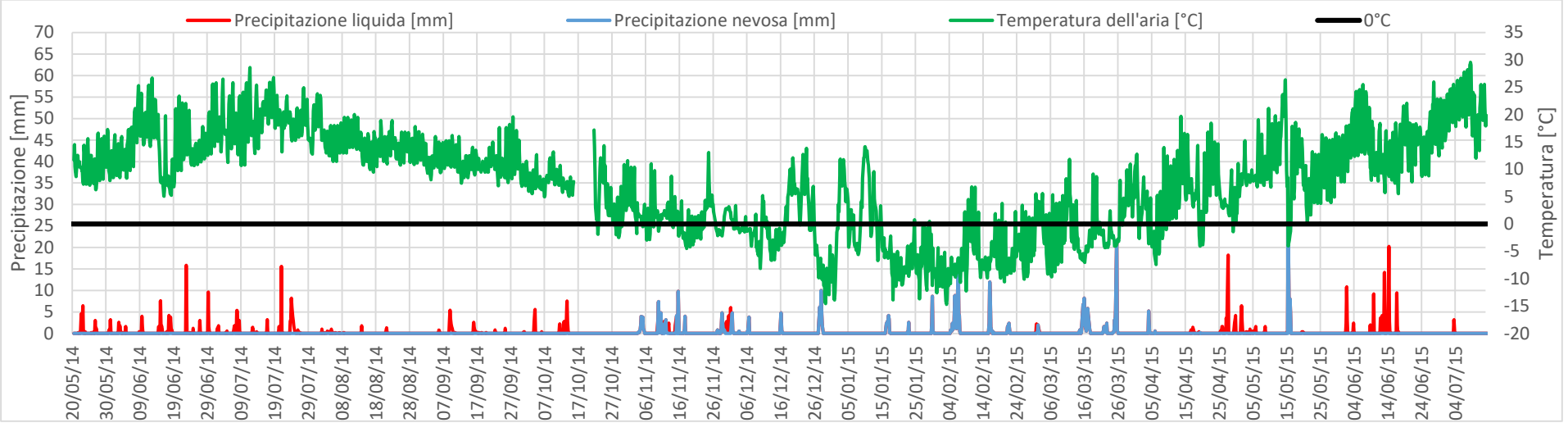


GRAFICO 8.45-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI PL1-T1 VS SOGGIACENZA DI PZS2, ANNO 2014-2015 (PERIODO 20/05/14-13/07/15)

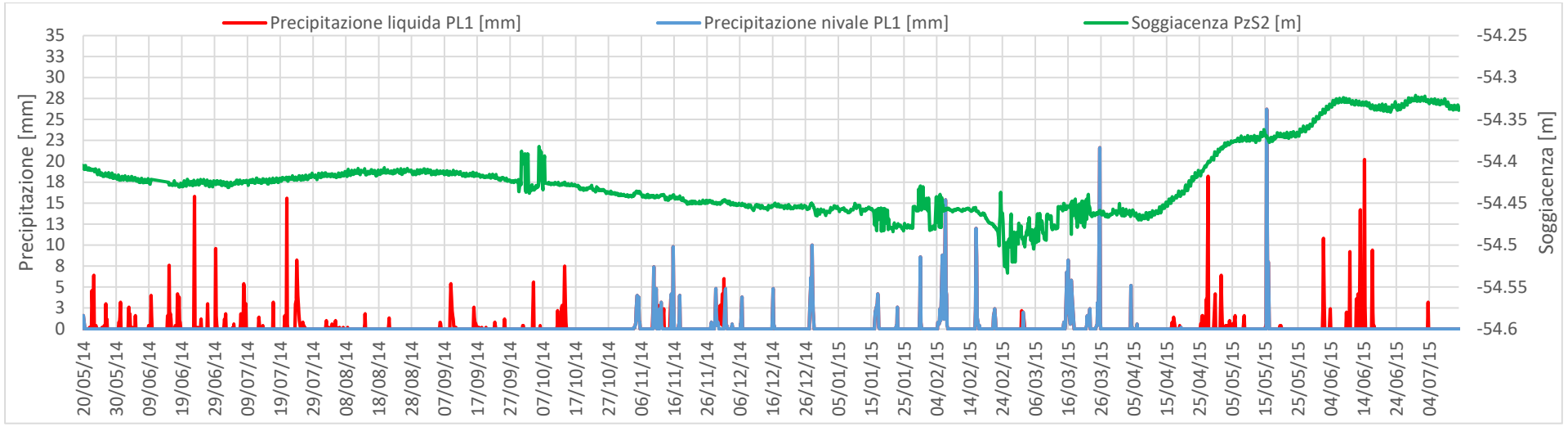


GRAFICO 8.46-PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E TEMPERATURA DELL'ARIA DI PL1-T1, ANNO 2014-2015 (PERIODO 20/05/14-13/07/15)

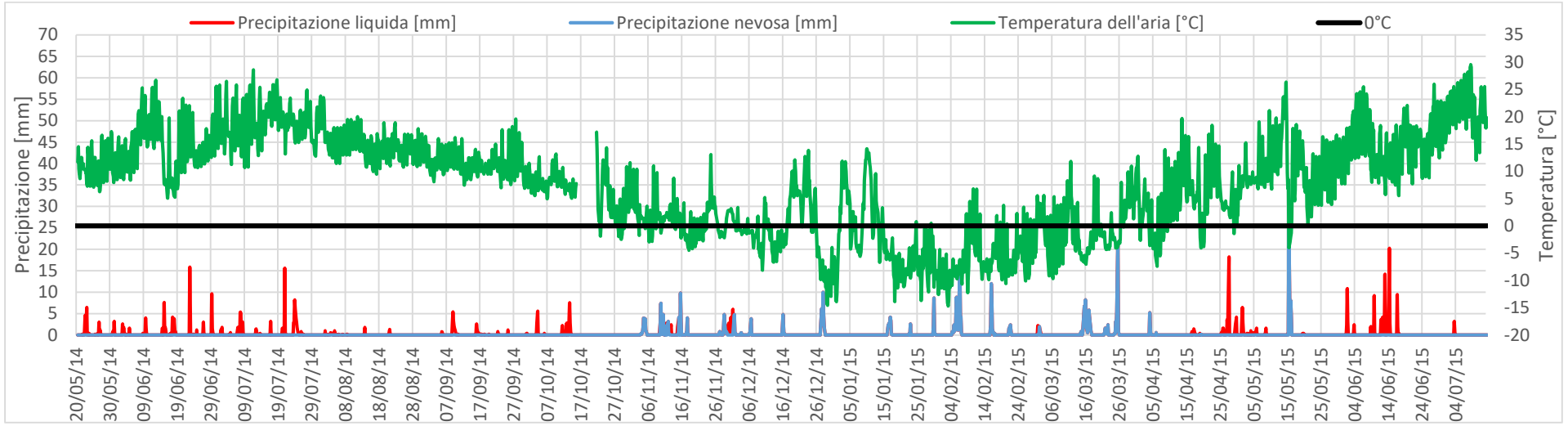


GRAFICO 8.47-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI PL1-T1 VS SOGGIACENZA DI PZ4, ANNO 2014-2015 (PERIODO 20/05/14-13/07/15)

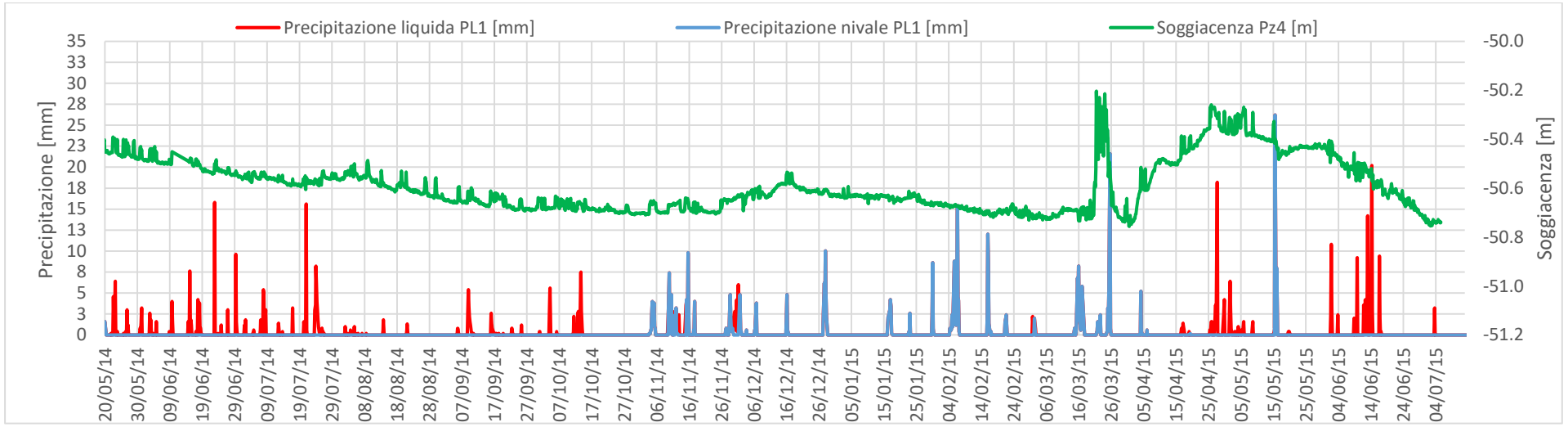


GRAFICO 8.48-PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E TEMPERATURA DELL'ARIA DI PL1-T1, ANNO 2014-2015 (PERIODO 20/05/14-13/07/15)

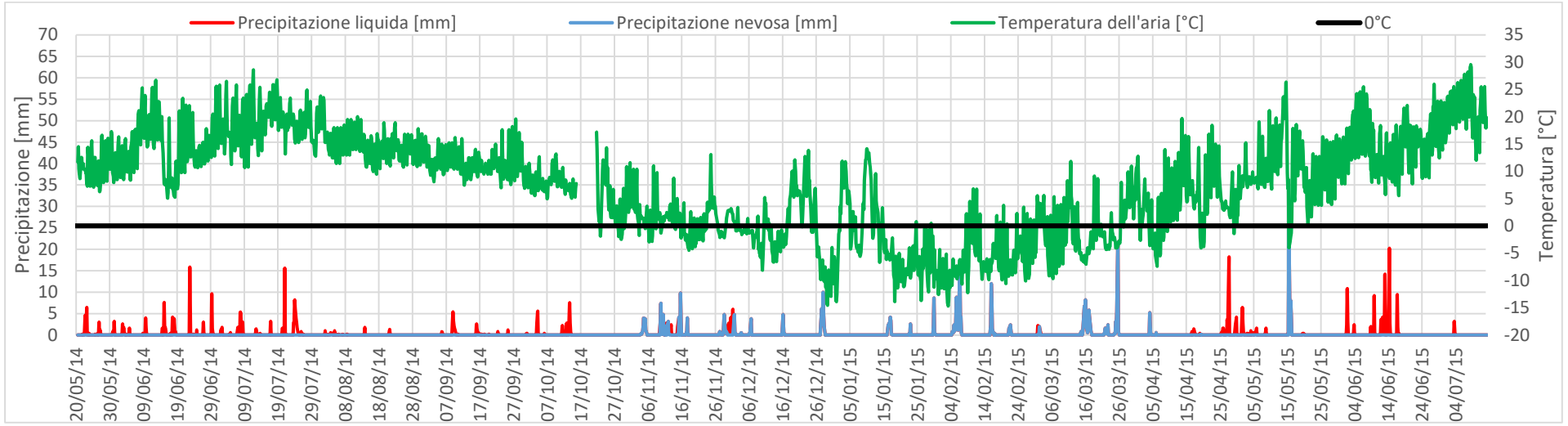


GRAFICO 8.49-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI PL1-T1 VS SOGGIACENZA DI PZ6, ANNO 2014-2015 (PERIODO 20/05/14-13/07/15)

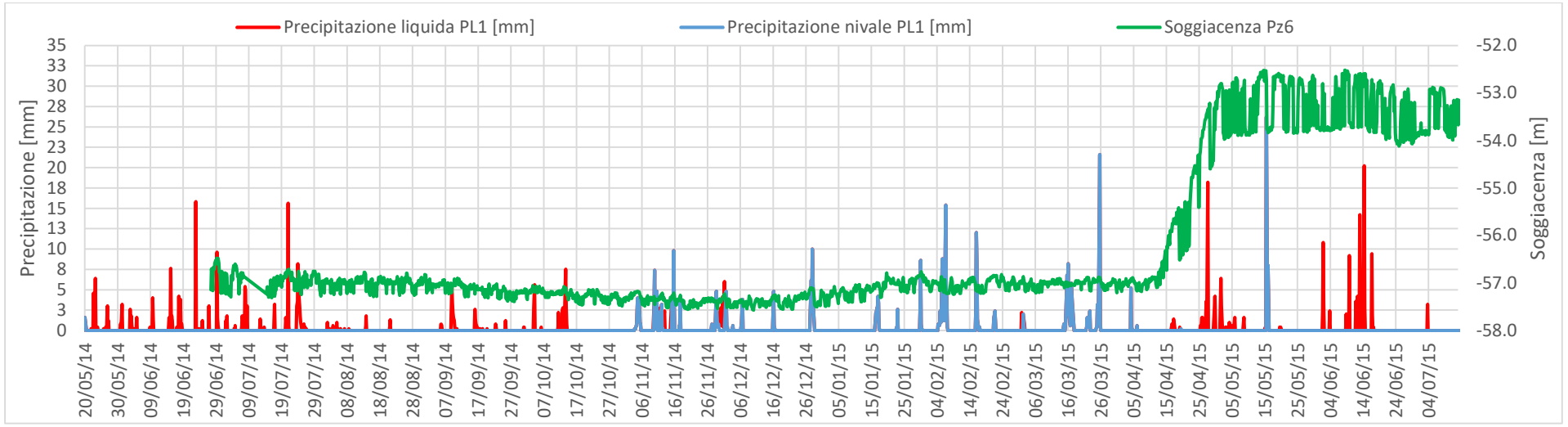


GRAFICO 8.50-PRECIPITAZIONI LIQUIDE, PRECIPITAZIONI NEVOSE E TEMPERATURA DELL'ARIA DI PL1-T1, ANNO 2014-2015 (PERIODO 20/05/14-13/07/15)

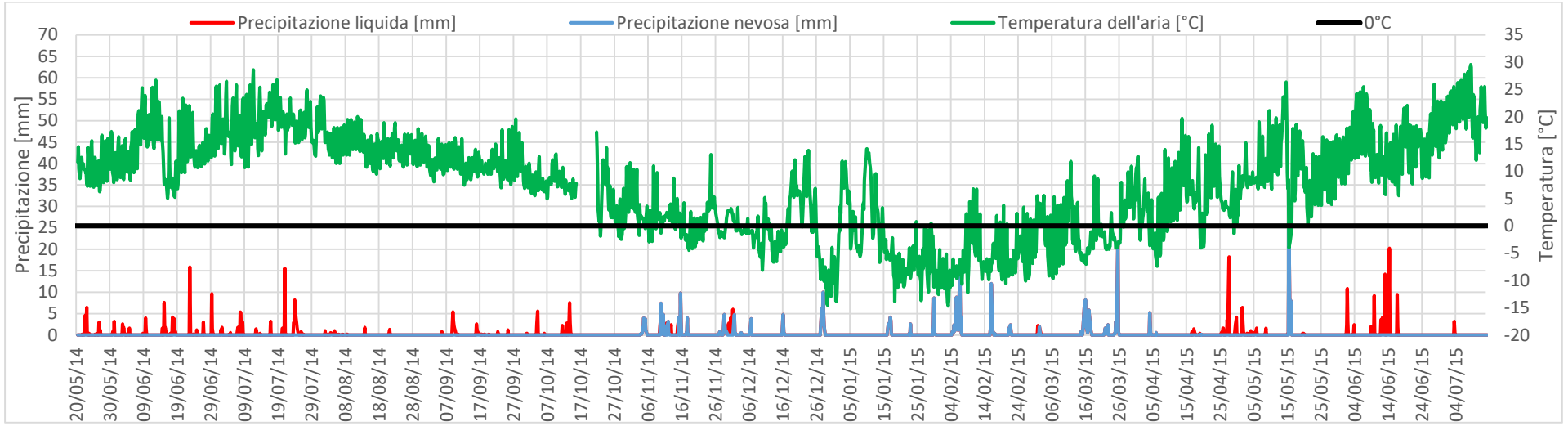


GRAFICO 8.51-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI LE SELLE VS SOGGIACENZA DI PZS2, ANNO 2016 (PERIODO APRILE-DICEMBRE)

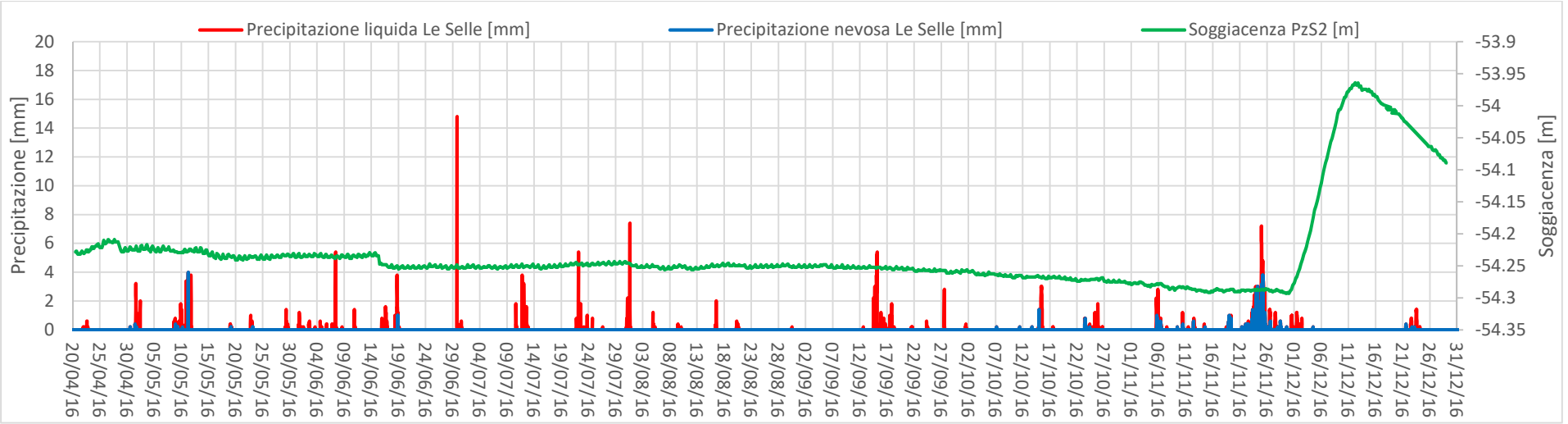


GRAFICO 8.52-ALTEZZA NEVE DI LE SELLE VS SOGGIACENZA DI PZS2, ANNO 2016 (PERIODO APRILE-DICEMBRE)

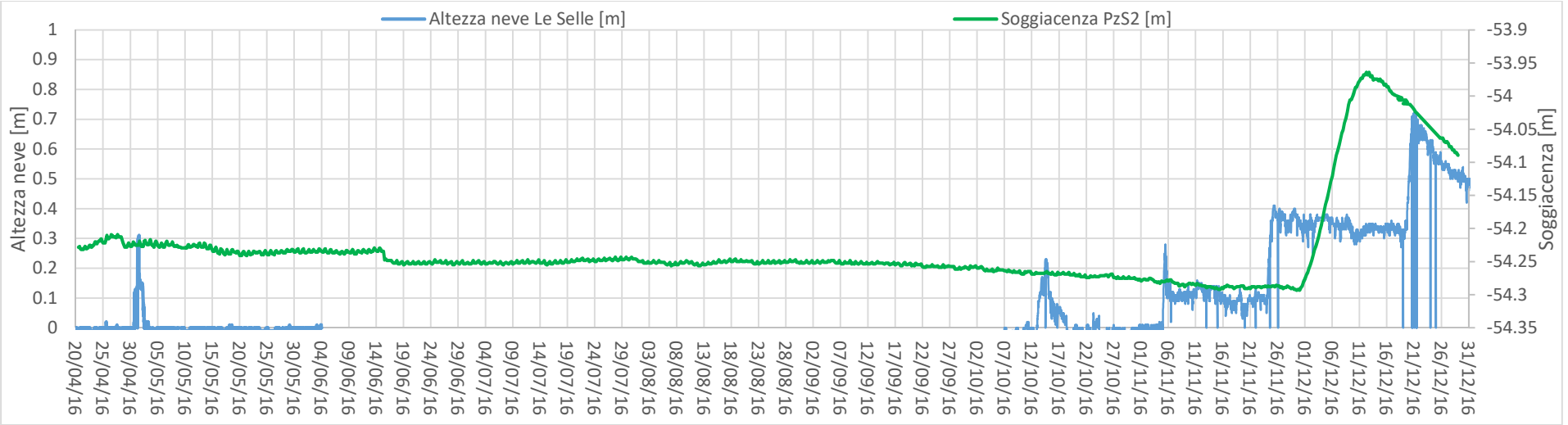


GRAFICO 8.53-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI LE SELLE VS SOGGIACENZA DI PZ4, ANNO 2016 (PERIODO APRILE-OTTOBRE)

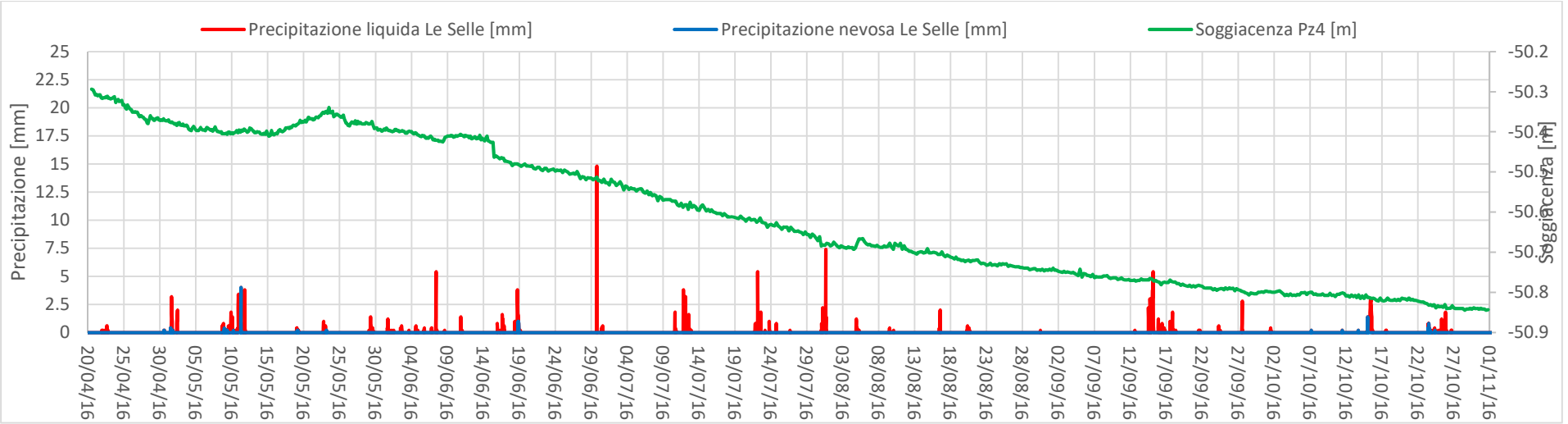


GRAFICO 8.54-ALTEZZA NEVE DI LE SELLE VS SOGGIACENZA DI PZ4, ANNO 2016 (PERIODO APRILE-OTTOBRE)

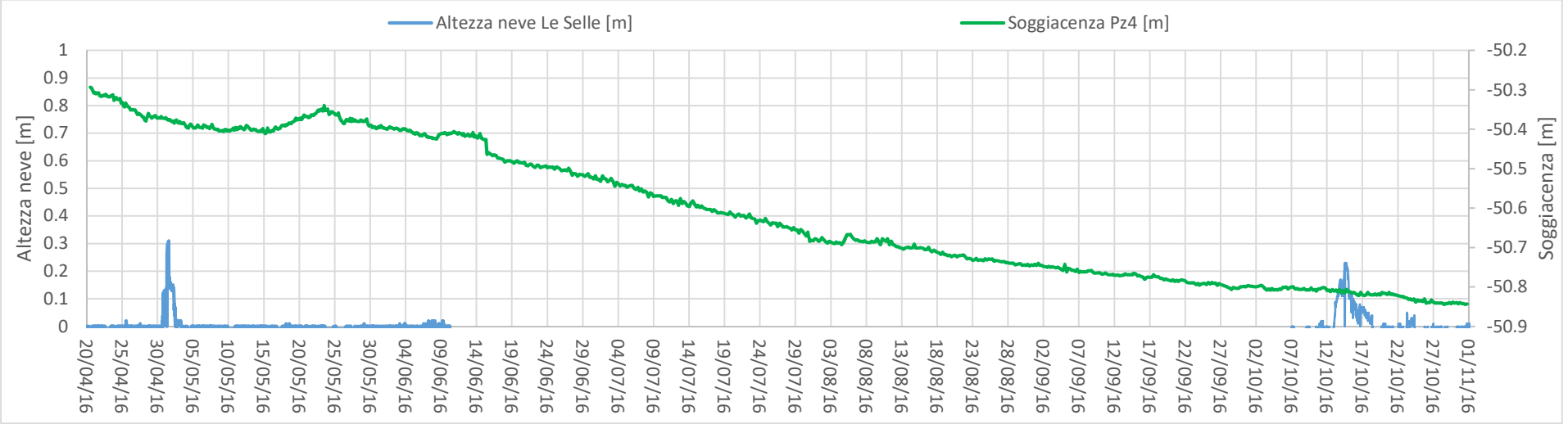


GRAFICO 8.55-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI SALBERTRAND VS PORTATA DI Q2, ANNO 2016 (PERIODO APRILE-DICEMBRE)

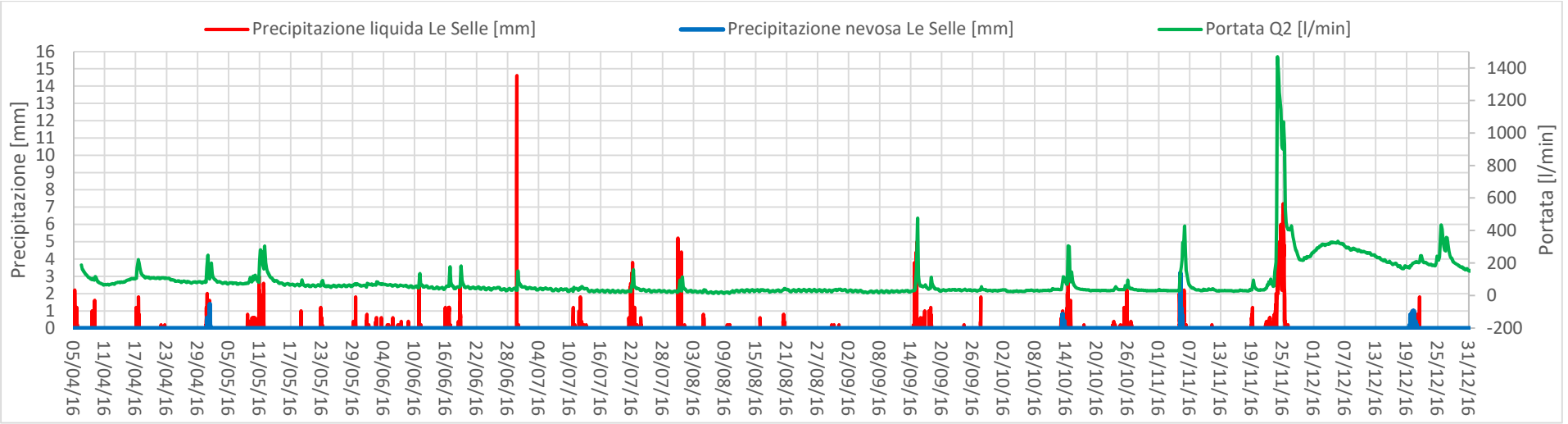


GRAFICO 8.56-ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND VS PORTATA DI Q2, ANNO 2016 (PERIODO APRILE-DICEMBRE)

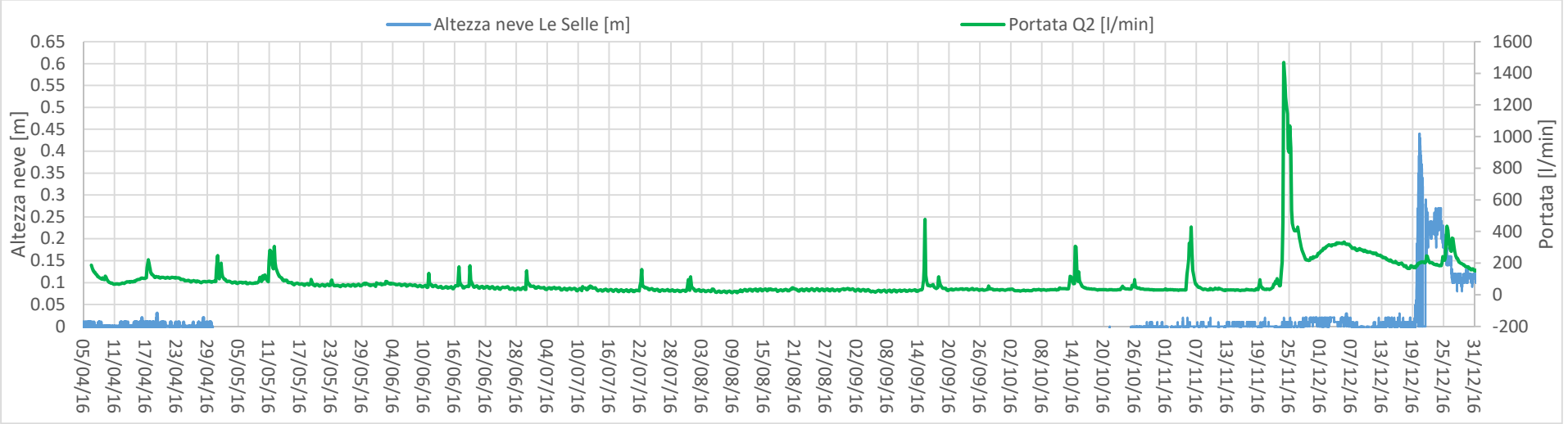


GRAFICO 8.57-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI SALBERTRAND VS PORTATA DI Q3, ANNO 2016

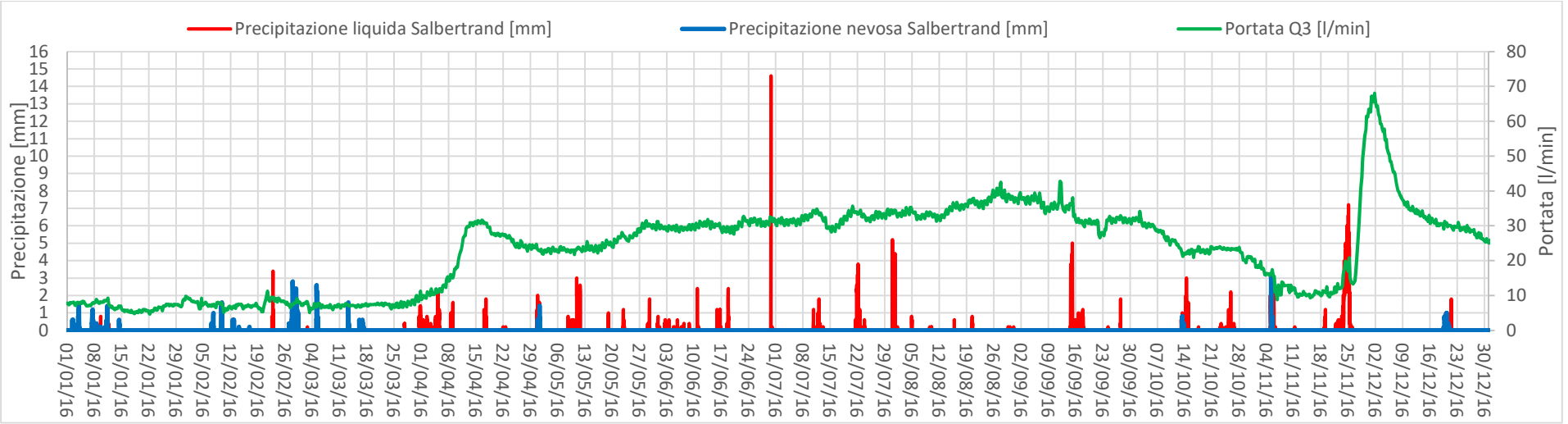


GRAFICO 8.58-ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND VS PORTATA DI Q3, ANNO 2016

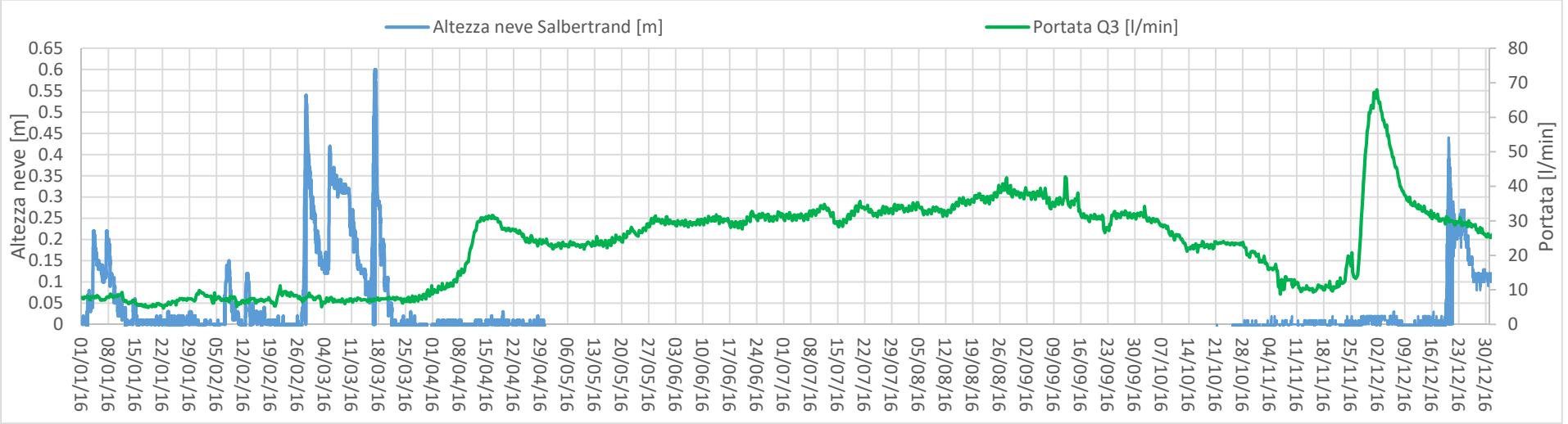


GRAFICO 8.59-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI SALBERTRAND VS SOGGIACENZA DI PZCAS2, ANNO 2016

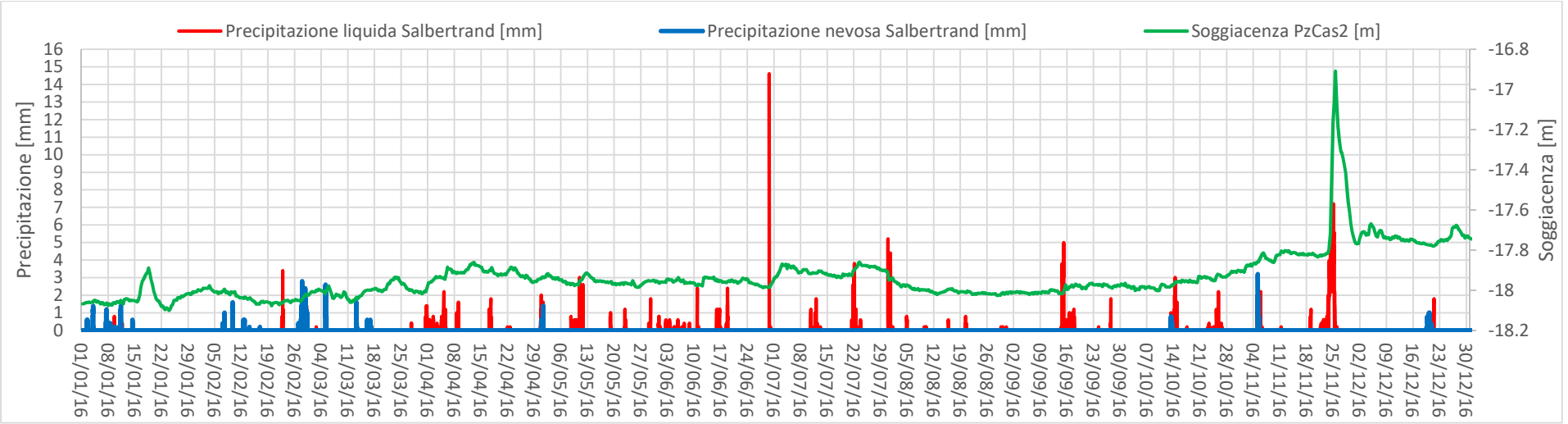


GRAFICO 8.60-ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND VS SOGGIACENZA DI PZCAS2, ANNO 2016

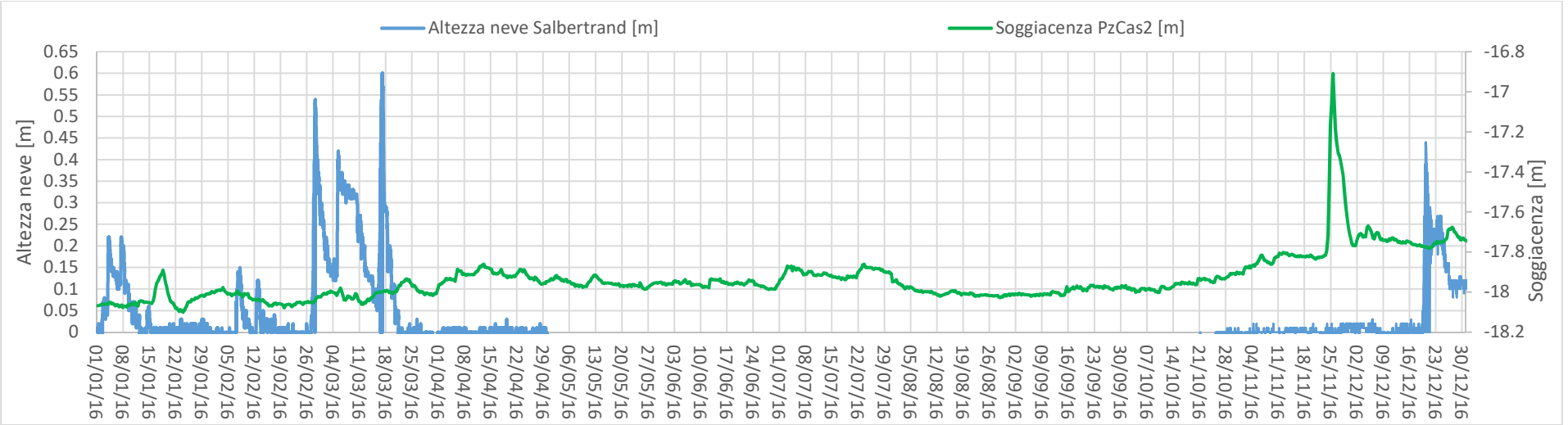


GRAFICO 8.61-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI SALBERTRAND VS SOGGIACENZA DI PZ6, ANNO 2016

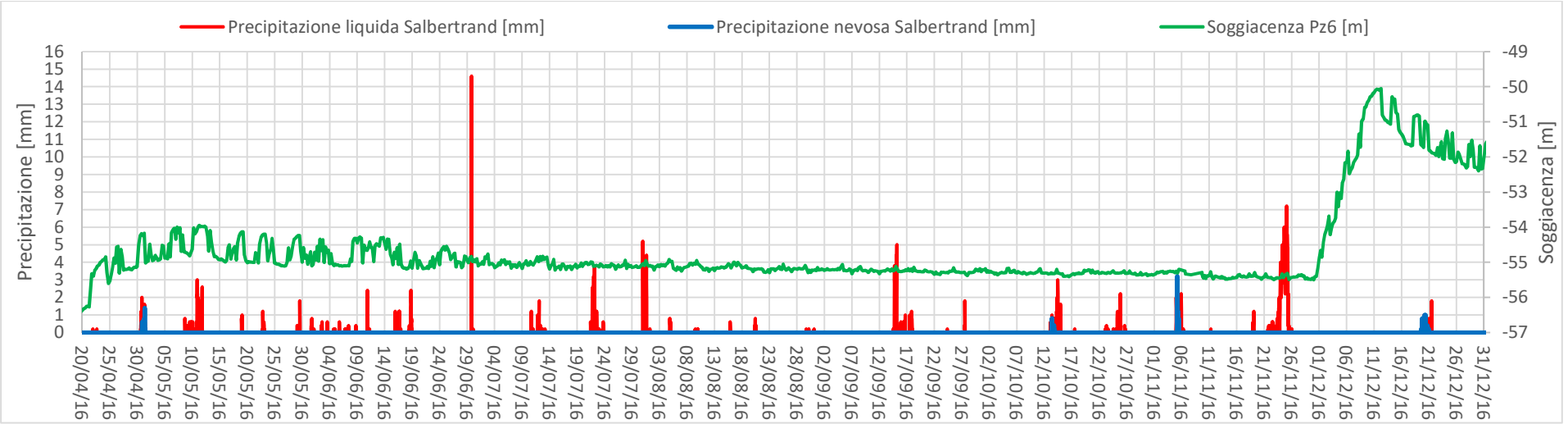


GRAFICO 8.62-ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND VS SOGGIACENZA DI PZ6, ANNO 2016

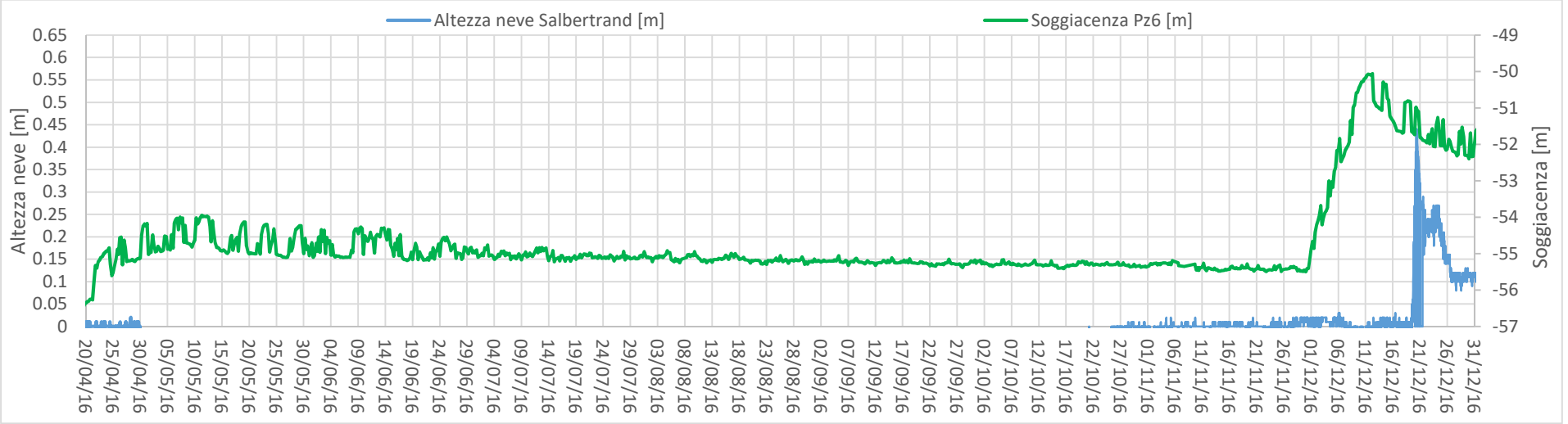


GRAFICO 8.63-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI LE SELLE VS SOGGIACENZA DI PZS2, ANNO 2017

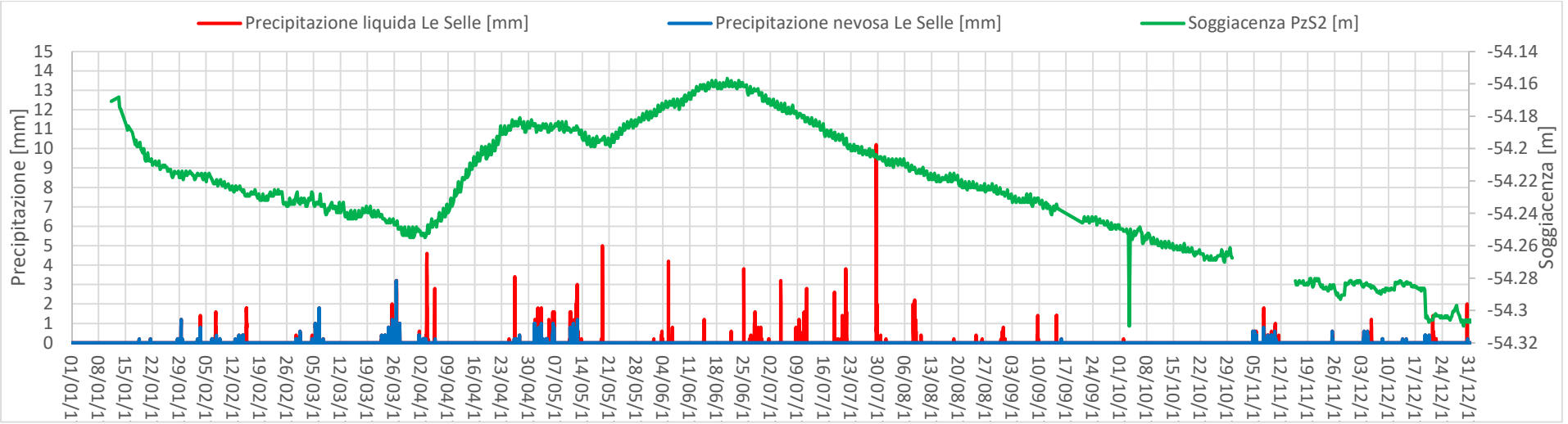


GRAFICO 8.64-ALTEZZA NEVE DI LE SELLE VS SOGGIACENZA DI PZS2, ANNO 2017

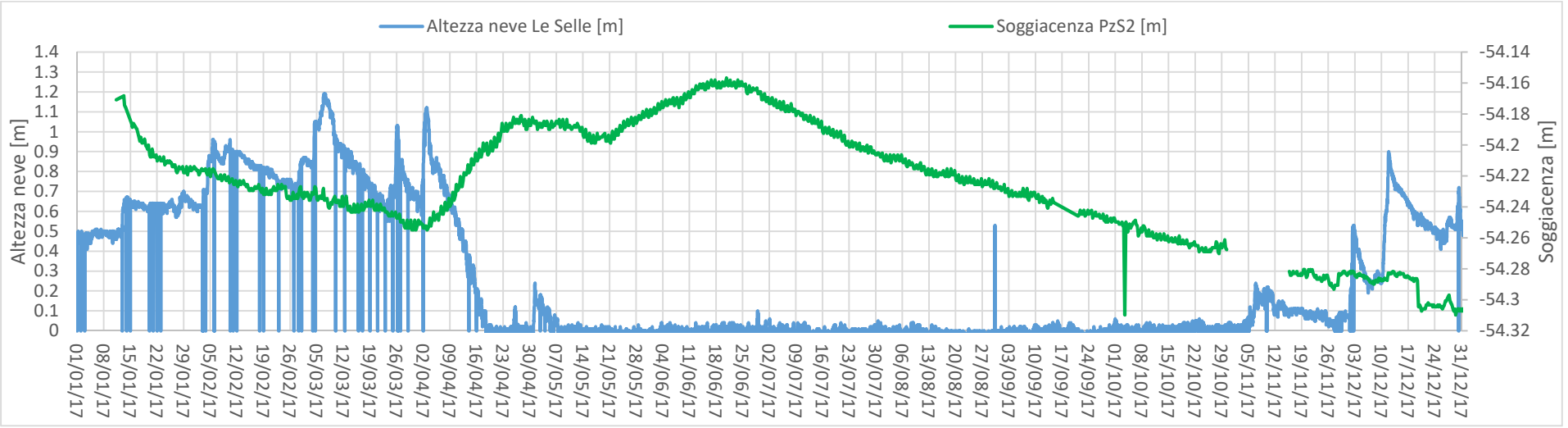


GRAFICO 8.65-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI LE SELLE VS SOGGIACENZA DI PZ4, ANNO 2017

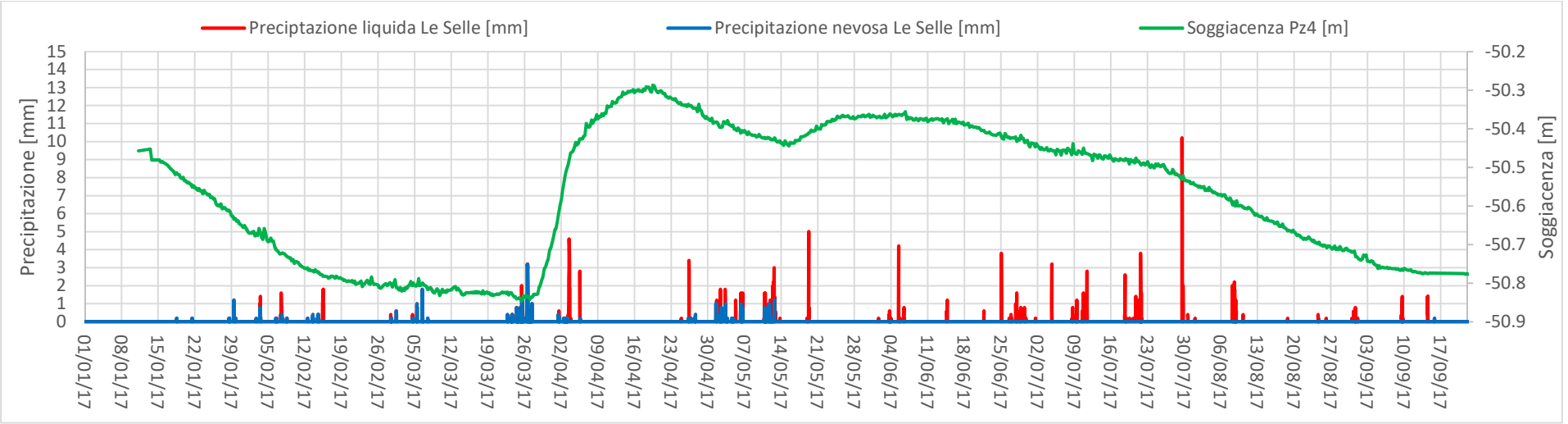


GRAFICO 8.66-ALTEZZA NEVE DI LE SELLE VS SOGGIACENZA DI PZ4, ANNO 2017

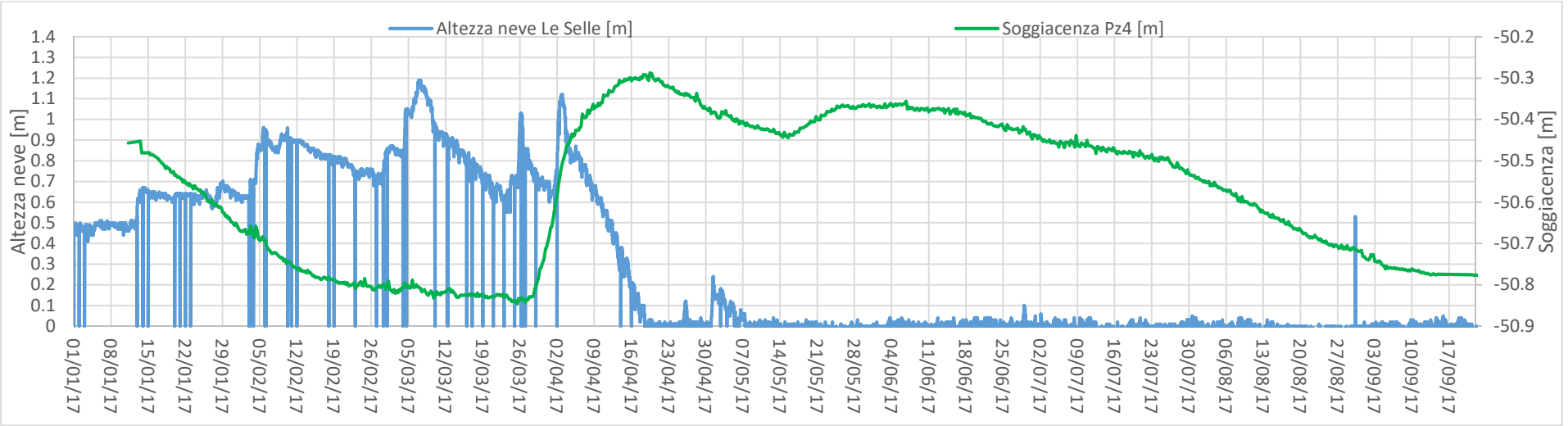


GRAFICO 8.67-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI SALBERTRAND VS PORTATA DI Q2, ANNO 2017

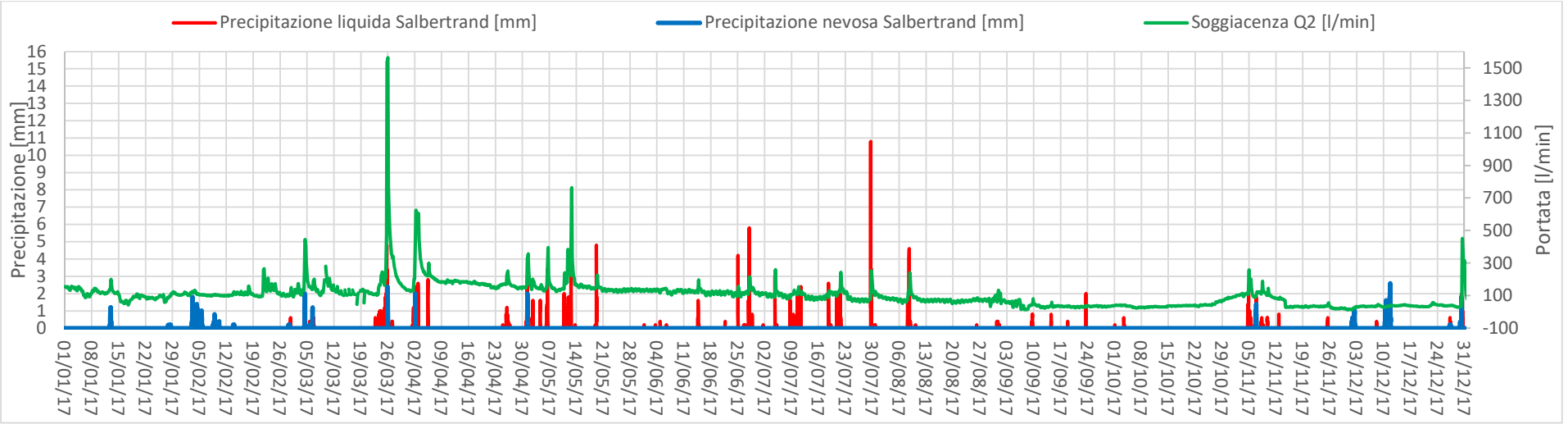


GRAFICO 8.68-ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND VS PORTATA DI Q2, ANNO 2017

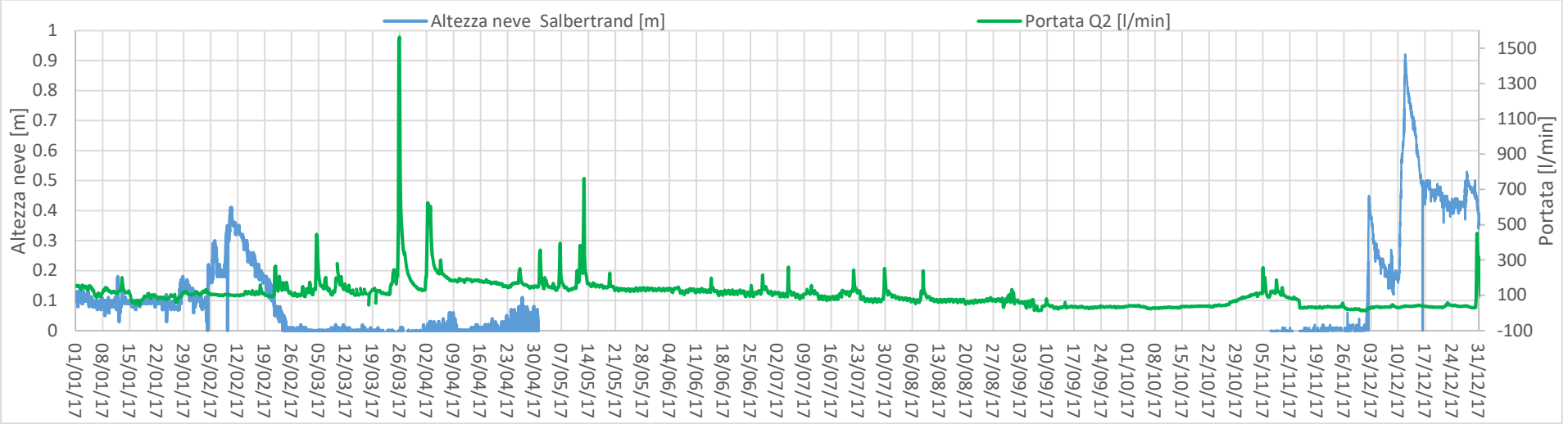


GRAFICO 8.69-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI SALBERTRAND VS PORTATA DI Q3, ANNO 2017

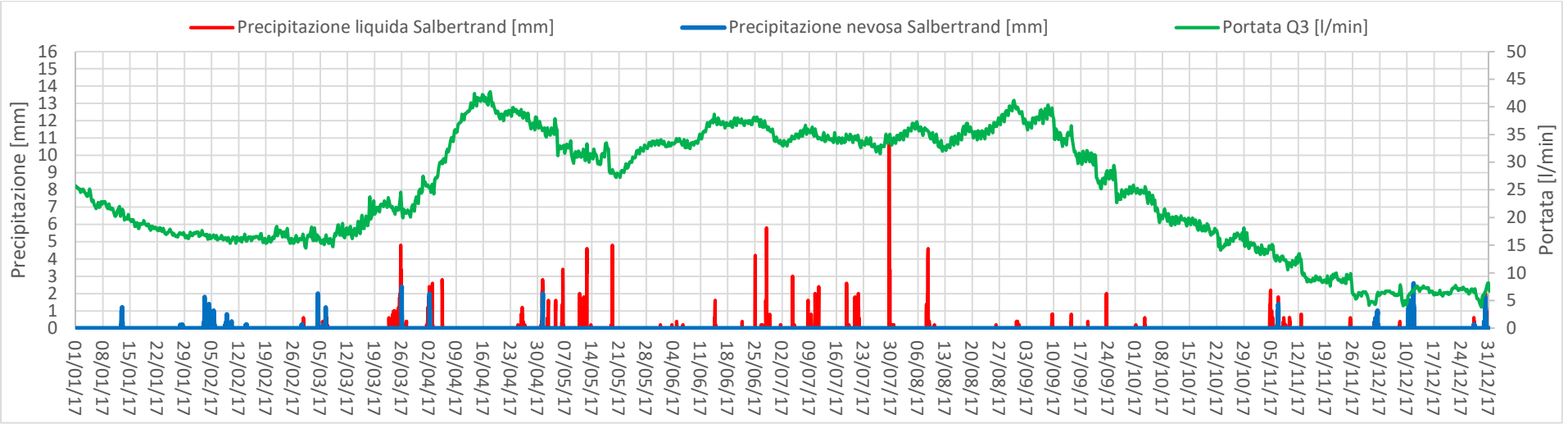


GRAFICO 8.70-ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND VS PORTATA DI Q3, ANNO 2017

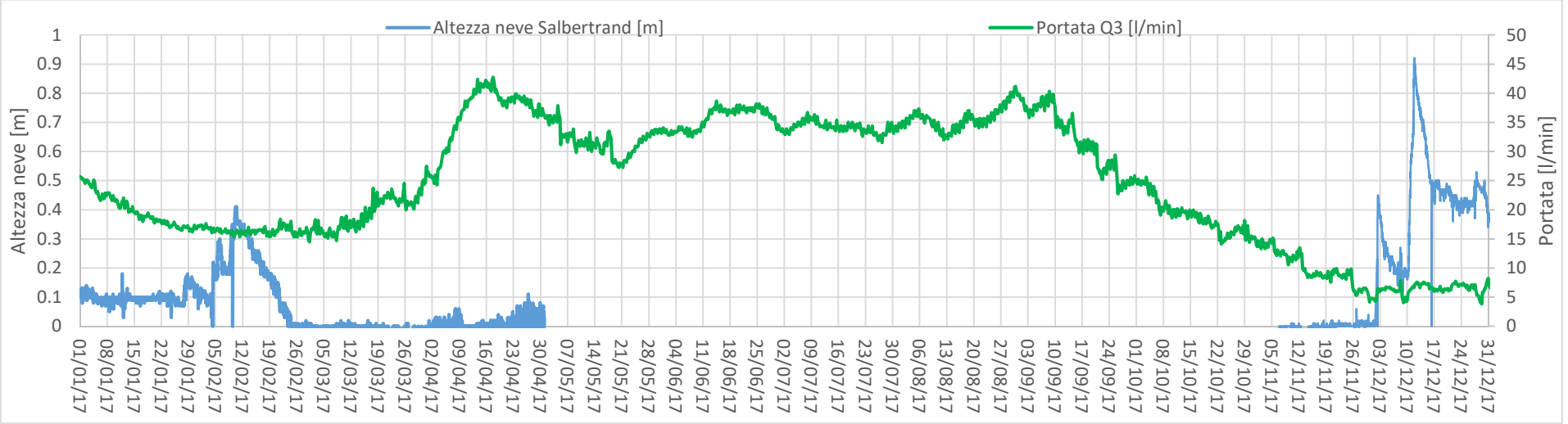


GRAFICO 8.71-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI SALBERTRAND VS SOGGIACENZA DI PZS2, ANNO 2017

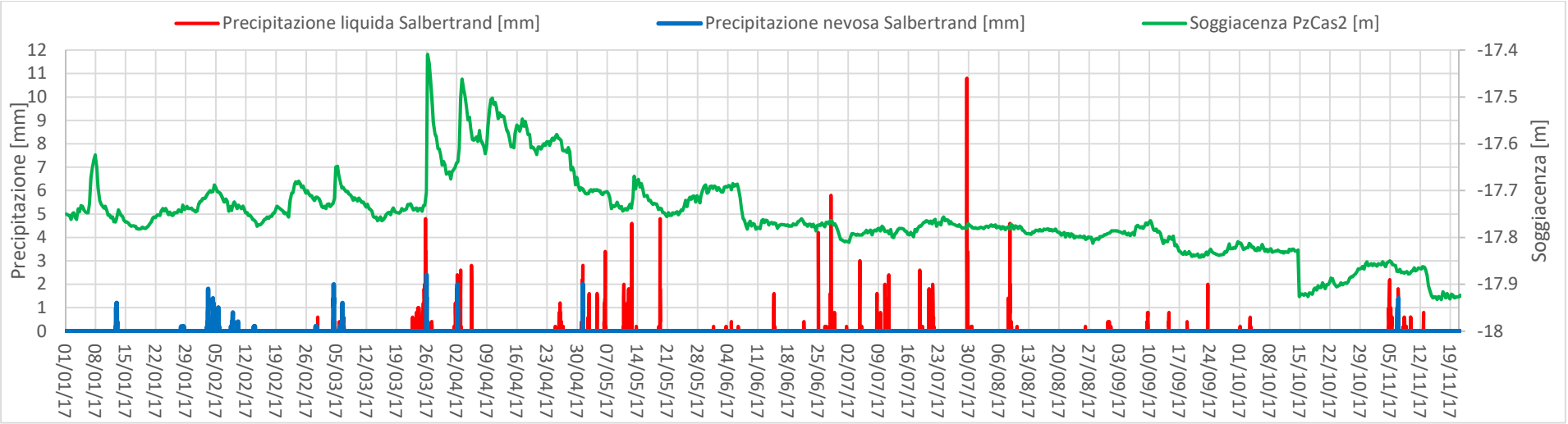


GRAFICO 8.72-ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND VS SOGGIACENZA DI PZS2, ANNO 2017

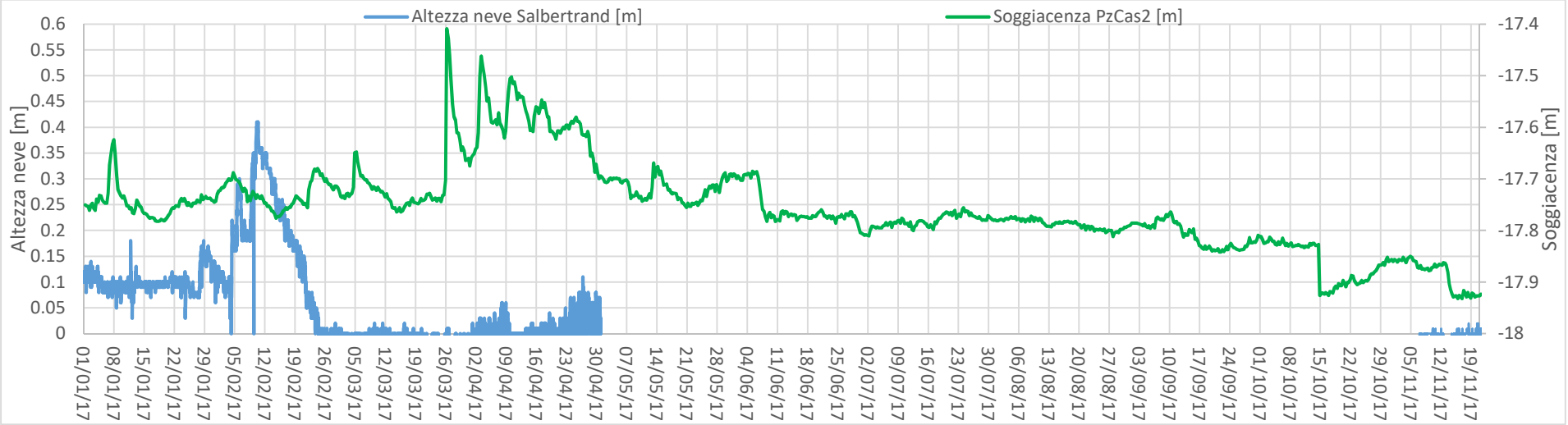


GRAFICO 8.73-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE VS SOGGIACENZA DI PZ6, ANNO 2017

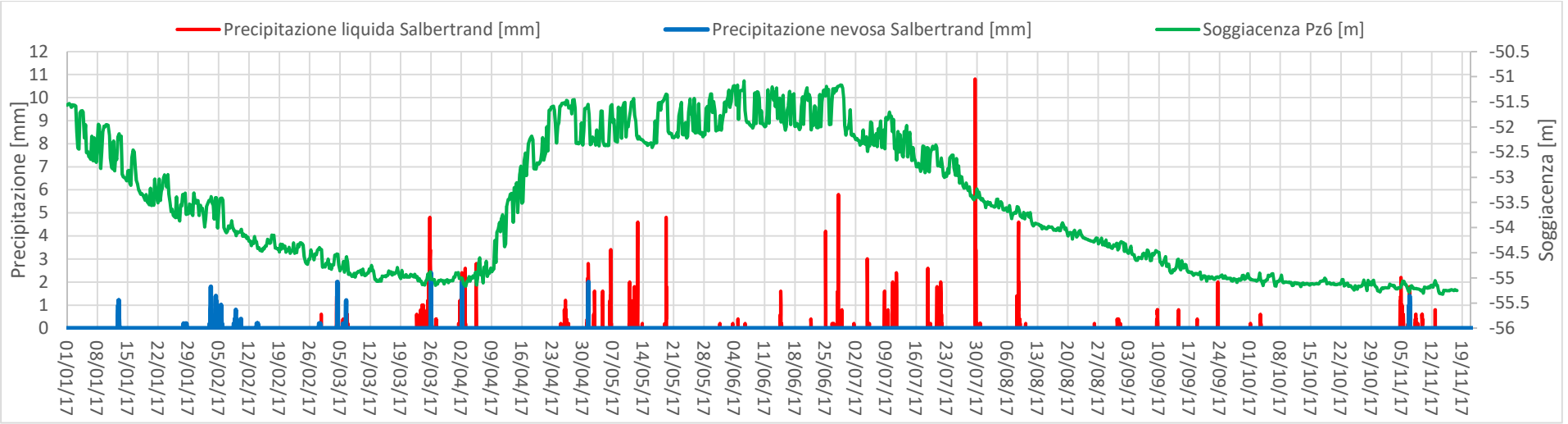


GRAFICO 8.74-ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND VS SOGGIACENZA DI PZ6, ANNO 2017

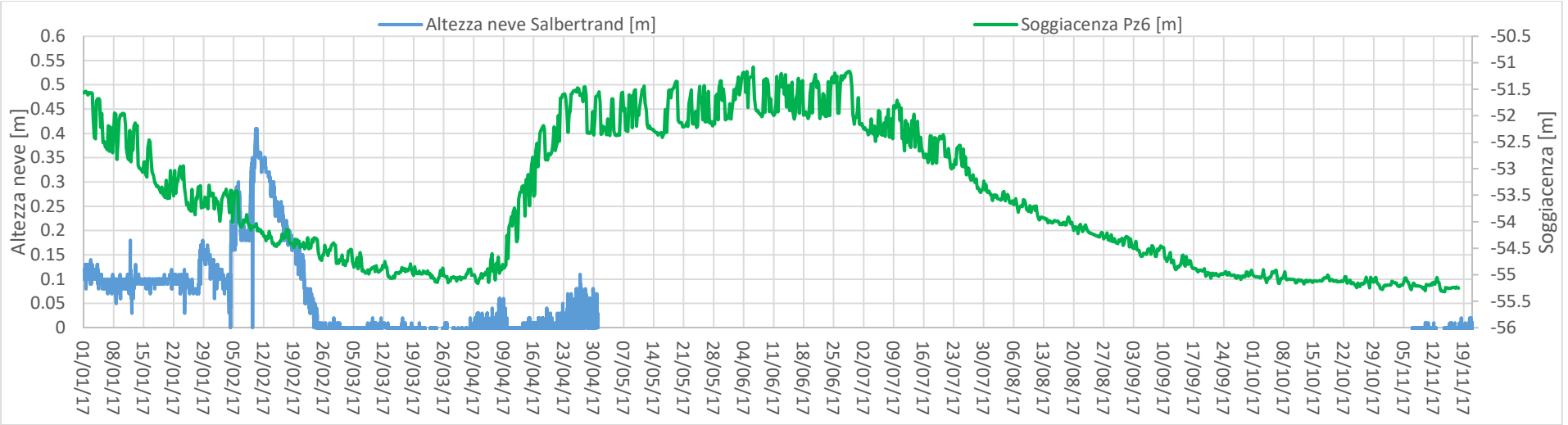


GRAFICO 8.75-PRECIPITAZIONI LIQUIDE DI PL1 VS PORTATA DI Q3, ANNO 2017 (PERIODO 18/05/17-20/10/17)

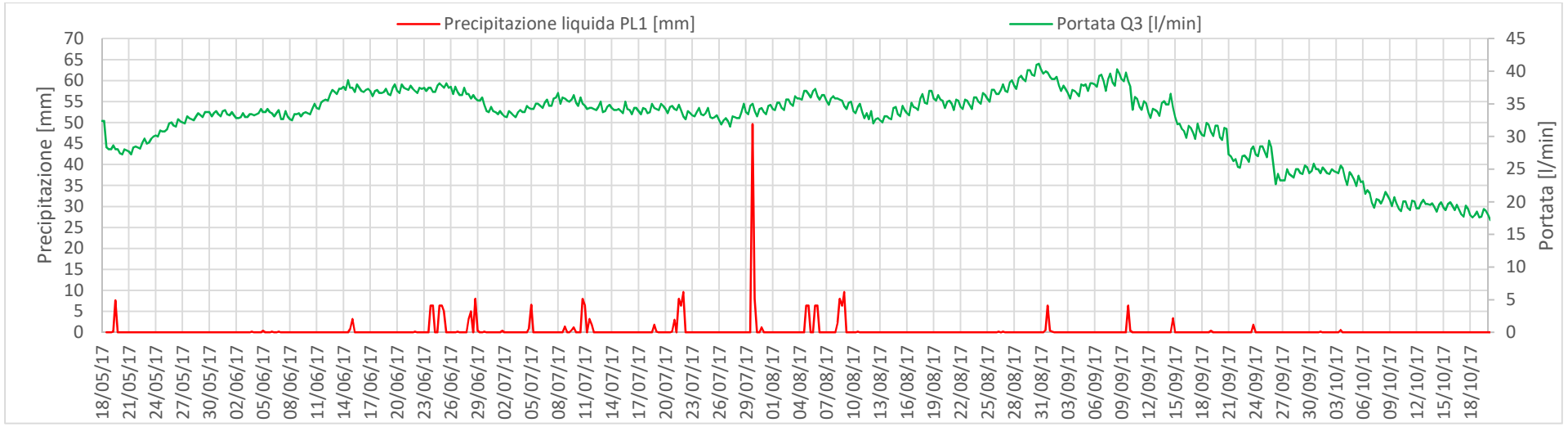


GRAFICO 8.76-PRECIPITAZIONI LIQUIDE DI PL1 VS SOGGIACENZA DI PZS2, PZ4 E PZ6, ANNO 2017 (PERIODO 18/05/17-20/10/17)

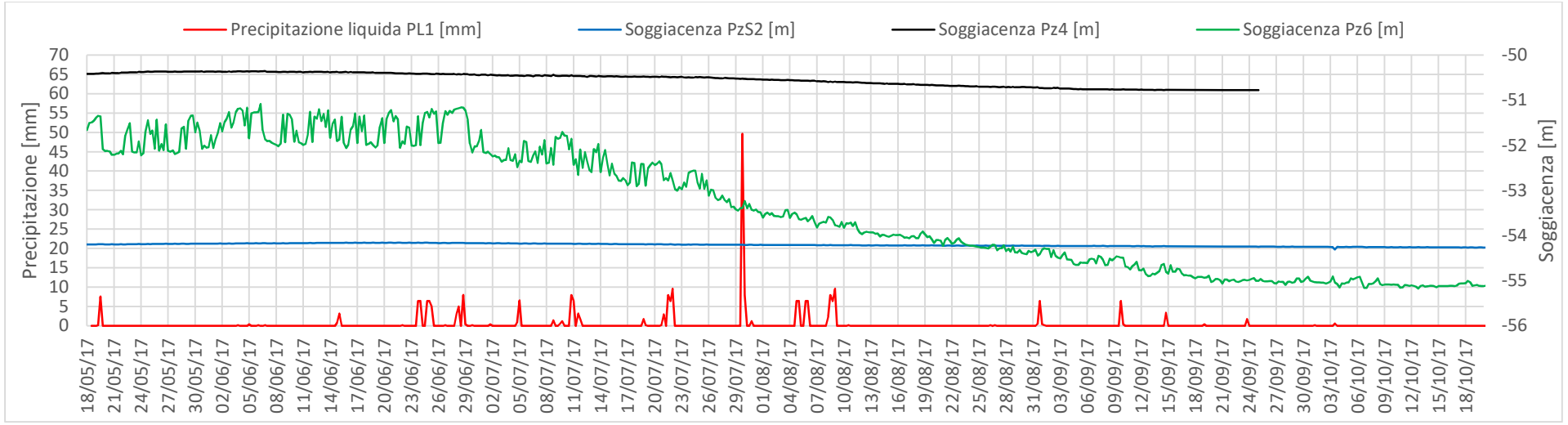


GRAFICO 8.77-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI LE SELLE VS PORTATA IN GALLERIA, ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO-NOVEMBRE)

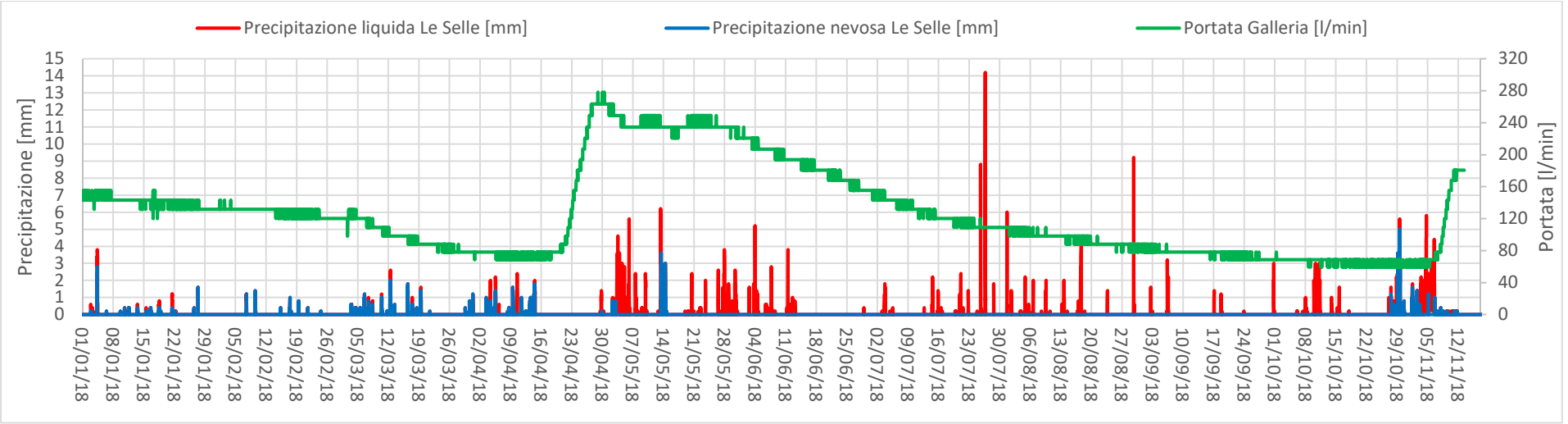


GRAFICO 8.78-ALTEZZA NEVE DI LE SELLE VS PORTATA IN GALLERIA, ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO-NOVEMBRE)

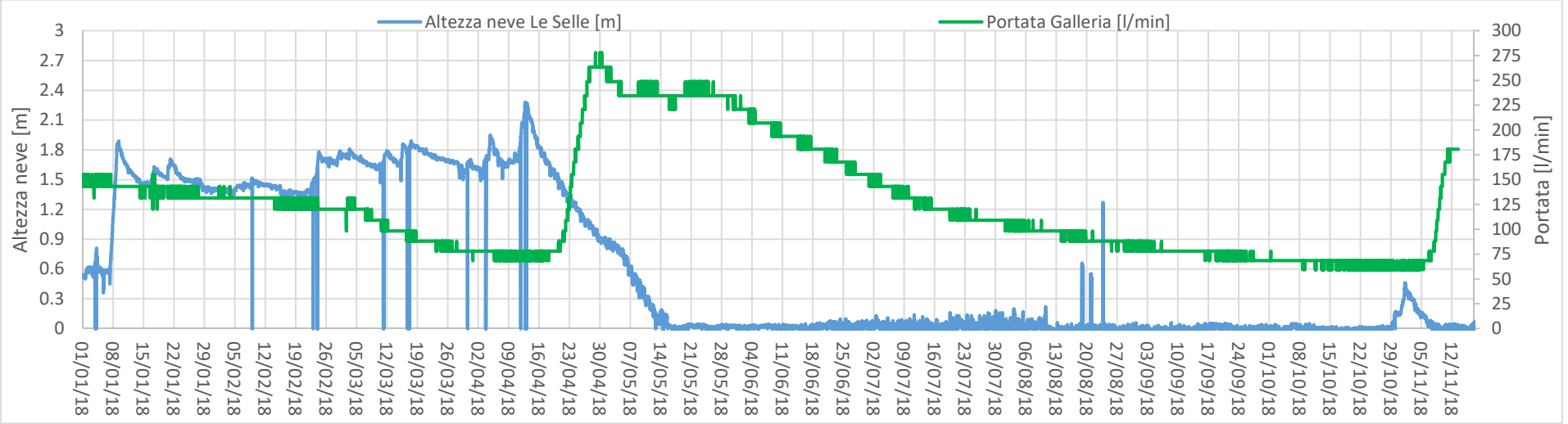


GRAFICO 8.79-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI LE SELLE VS SOGGIACENZA DI PZS2, ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO-LUGLIO)

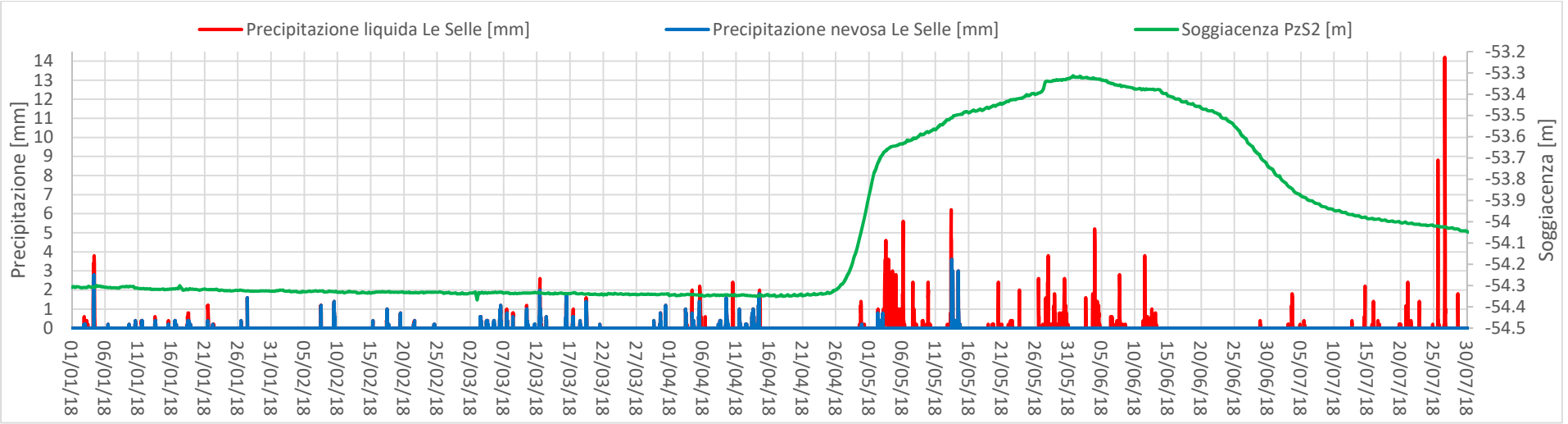


GRAFICO 8.80-ALTEZZA NEVE DI LE SELLE VS SOGGIACENZA DI PZS2, ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO-LUGLIO)

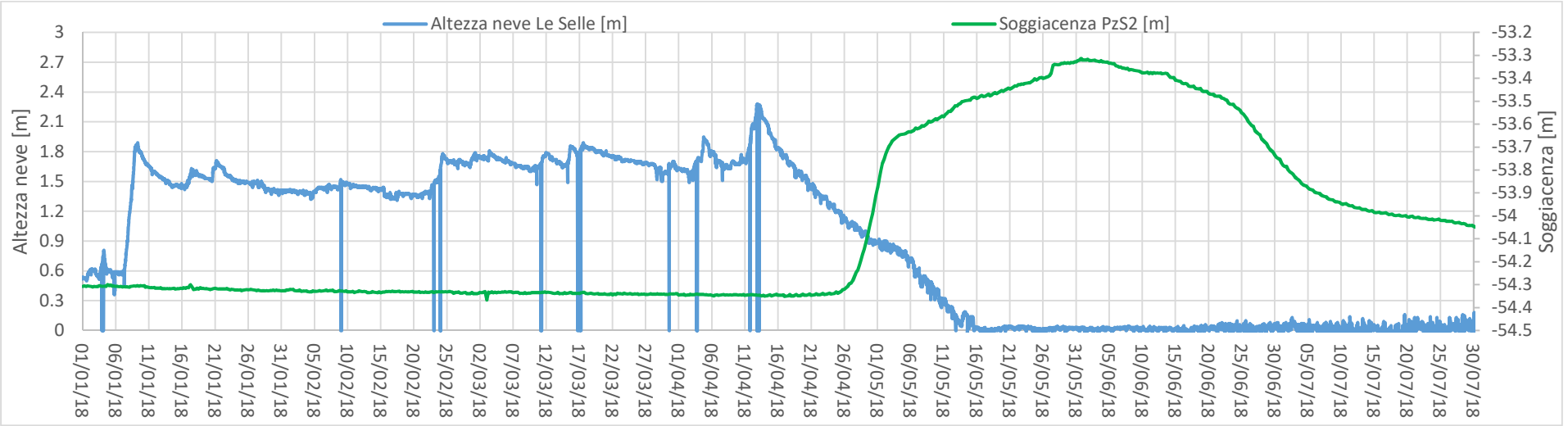


GRAFICO 8.81-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI SALBERTRAND VS PORTATA DI Q2, ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO-SETTEMBRE)

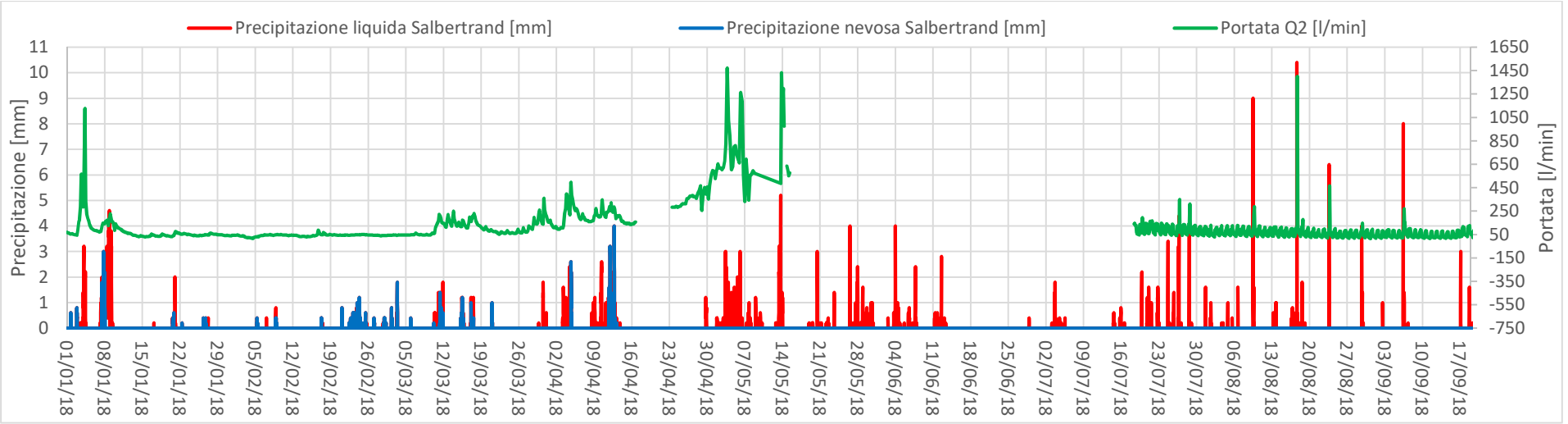


GRAFICO 8.82-ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND VS PORTATA D IQ3, ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO-SETTEMBRE)

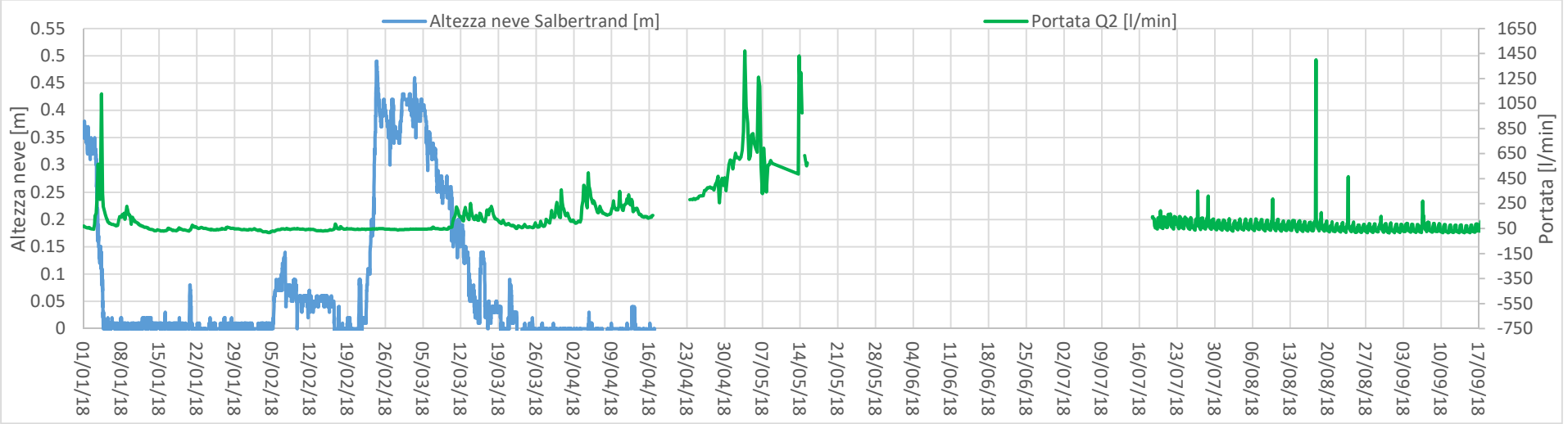


GRAFICO 8.83-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI SALBERTRAND VS PORTATA DI Q3, ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO-SETTEMBRE)

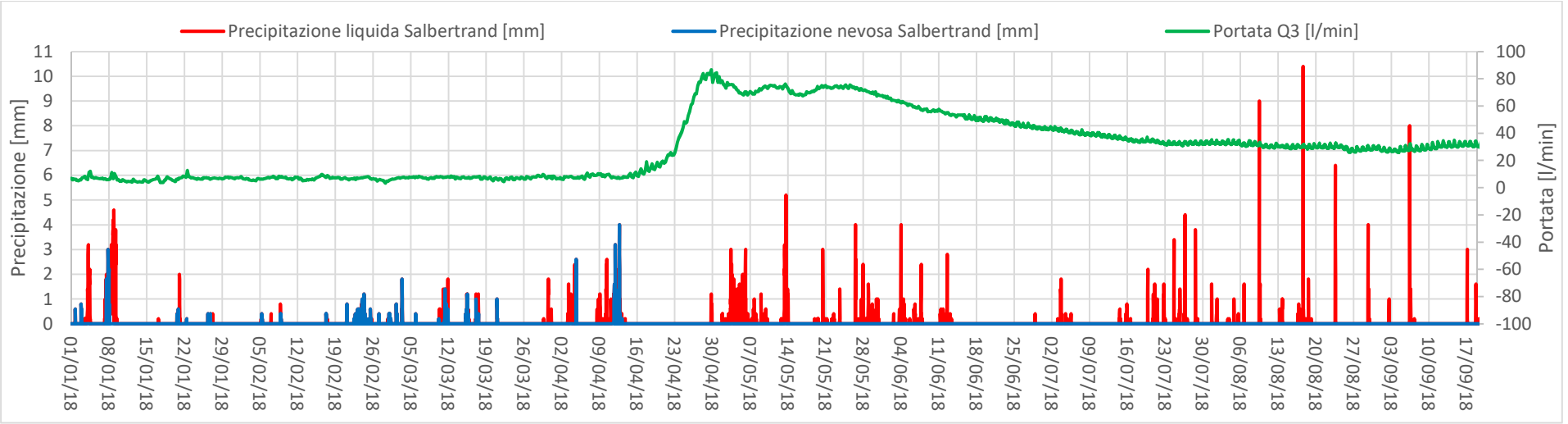


GRAFICO 8.84-ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND VS PORTATA DI Q3, ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO-SETTEMBRE)

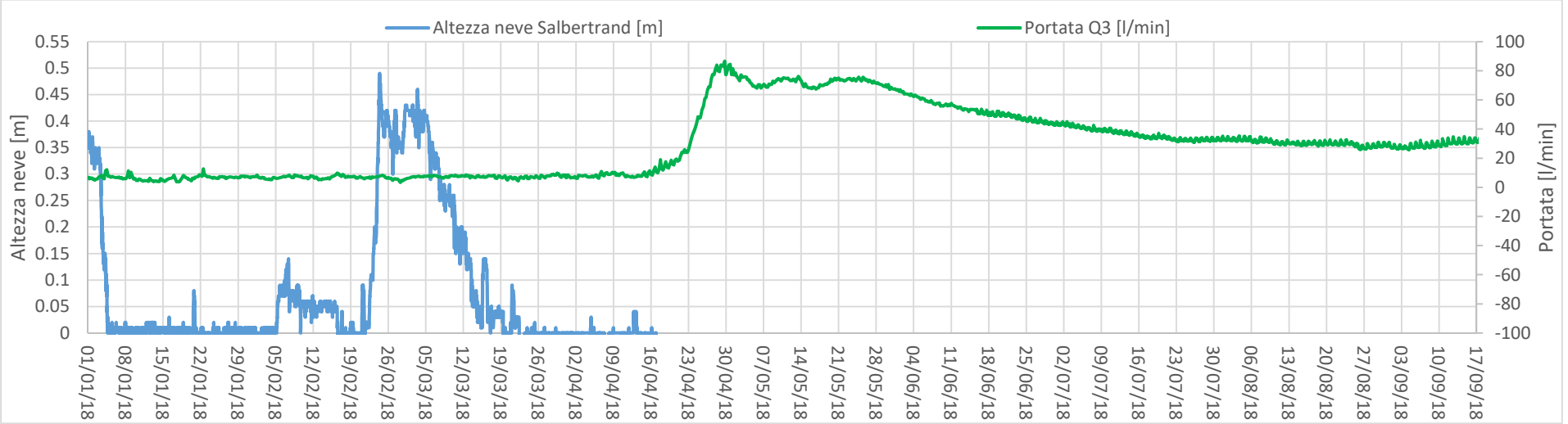


GRAFICO 8.85-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI SALBERTRAND VS SOGGIACENZA DI PZCAS2, ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO-LUGLIO)

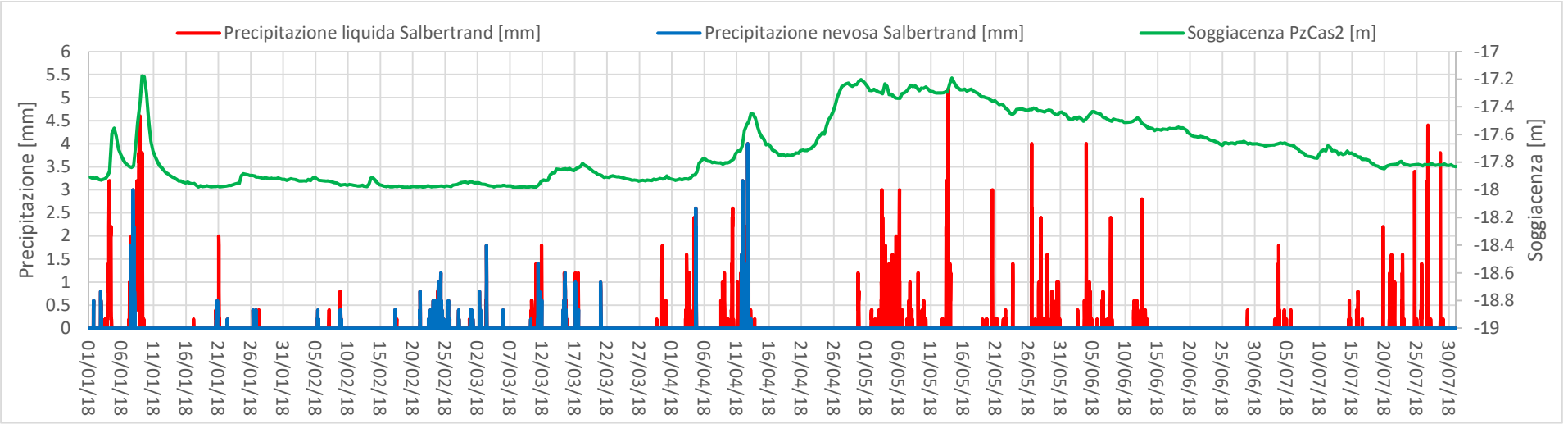


GRAFICO 8.86-ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND VS SOGGIACENZA DI PZCAS2, ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO-LUGLIO)

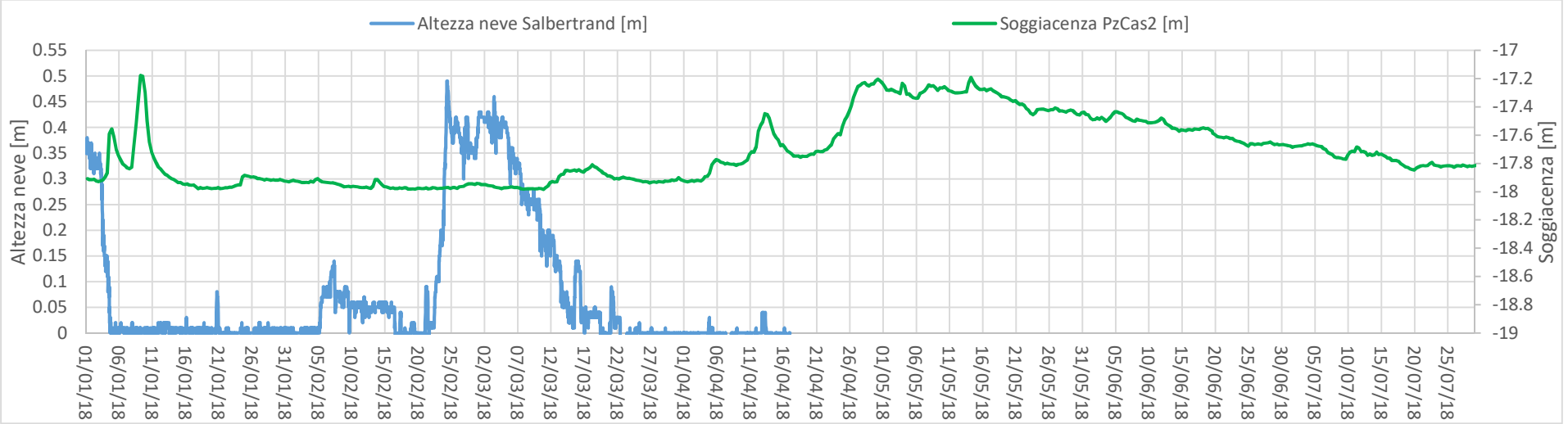


GRAFICO 8.87-PRECIPITAZIONI LIQUIDE E NEVOSE DI SALBERTRAND VS SOGGIACENZA DI PZ6, ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO-SETTEMBRE)

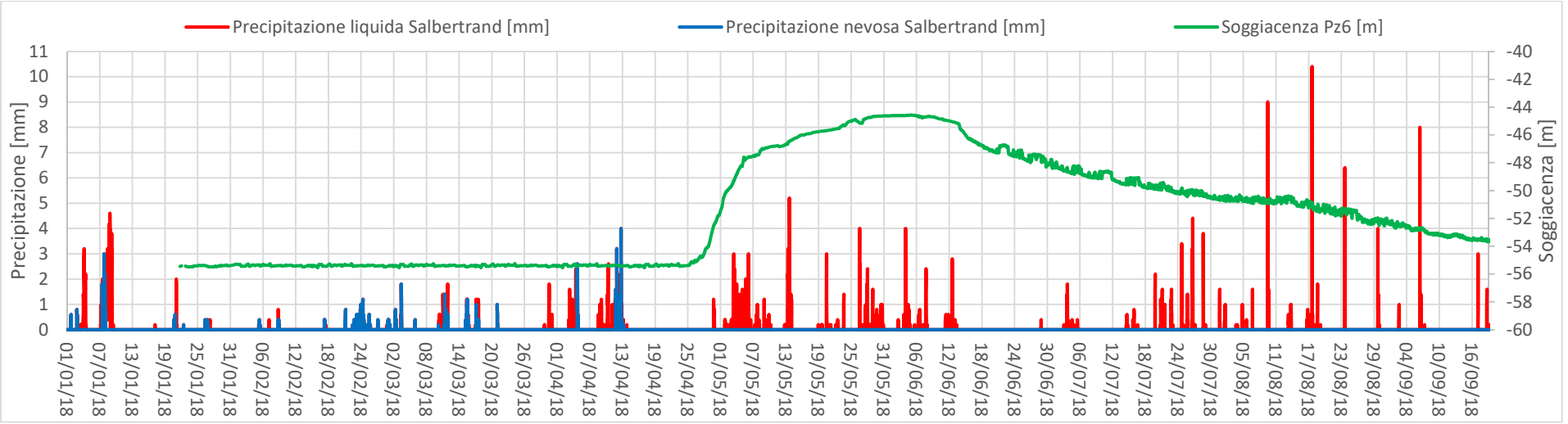
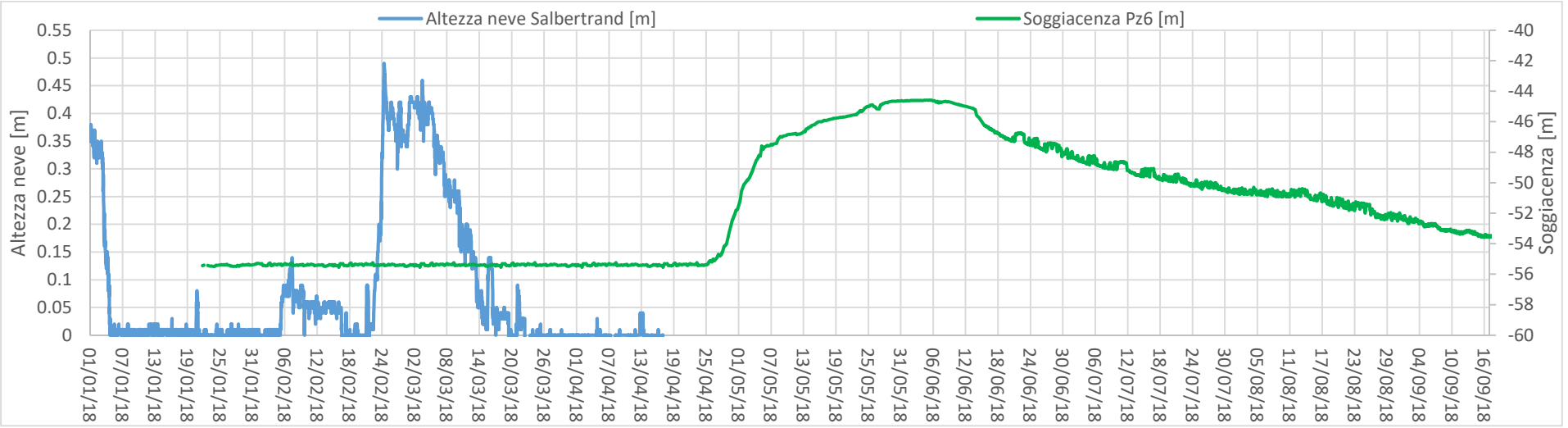


GRAFICO 8.88-ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND VS SOGGIACENZA DI PZ6, ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO-SETTEMBRE)



8.3 Allegato III: analisi dei dati inclinometrici

8.3.1 Colonna I1

GRAFICO 8.89-CURVA RISULTANTE DEGLI SPOSTAMENTI E ANGOLO DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE INTEGRALE DAL BASSO, ANNO 2014-2015, COLONNA I1, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

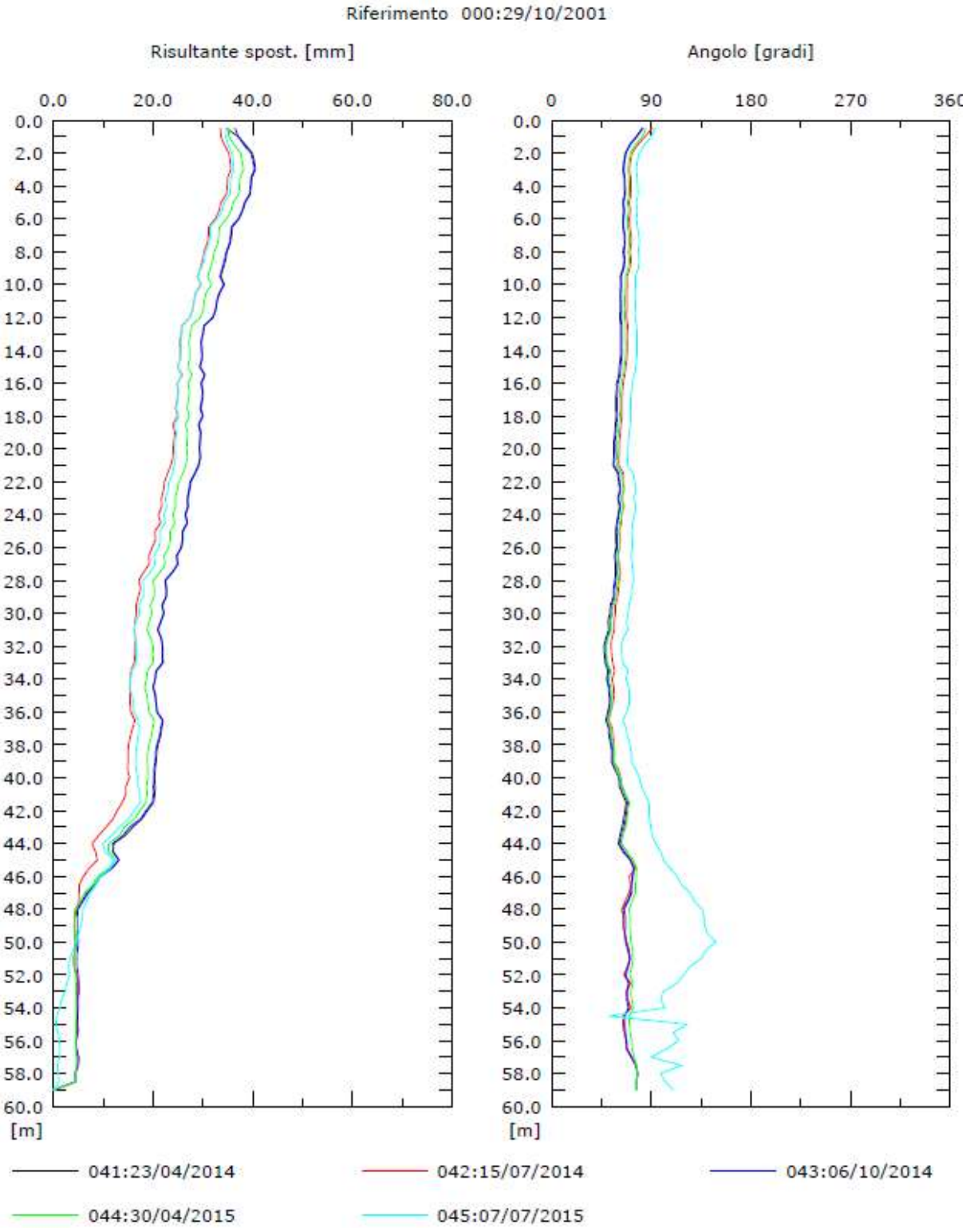


GRAFICO 8.90- CURVA RISULTANTE DEGLI SPOSTAMENTI ESPRESSA IN MILLIMETRI E ANGOLO ESPRESSO IN GRADI DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE DIFFERENZIALE LOCALE DAL BASSO, ANNO 2014-2015, COLONNA I1, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

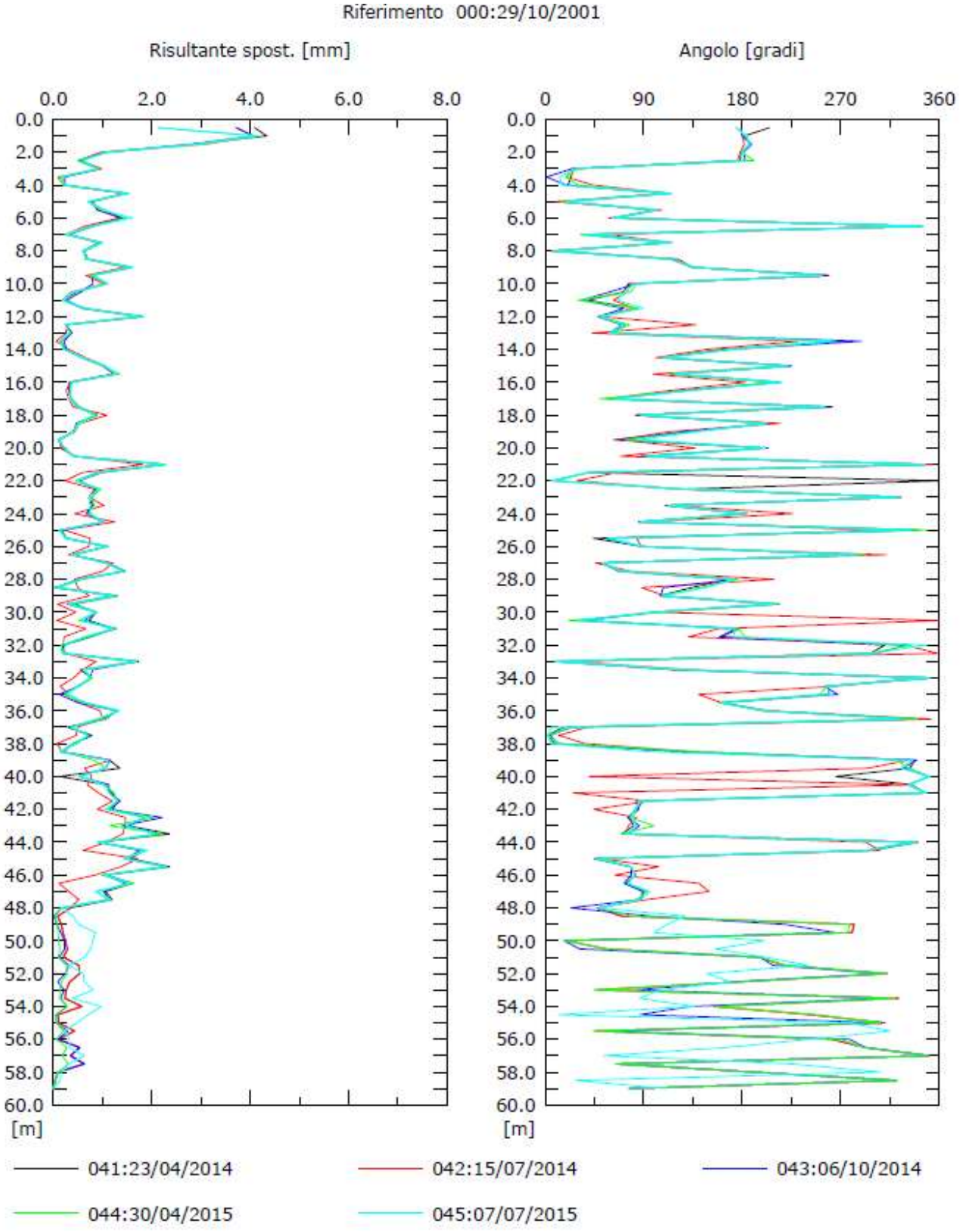


GRAFICO 8.91-DIAGRAMMA POLARE DELLA DEVIAZIONE DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE INTEGRALE DAL BASSO, ANNO 2014-2015, COLONNA I1, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

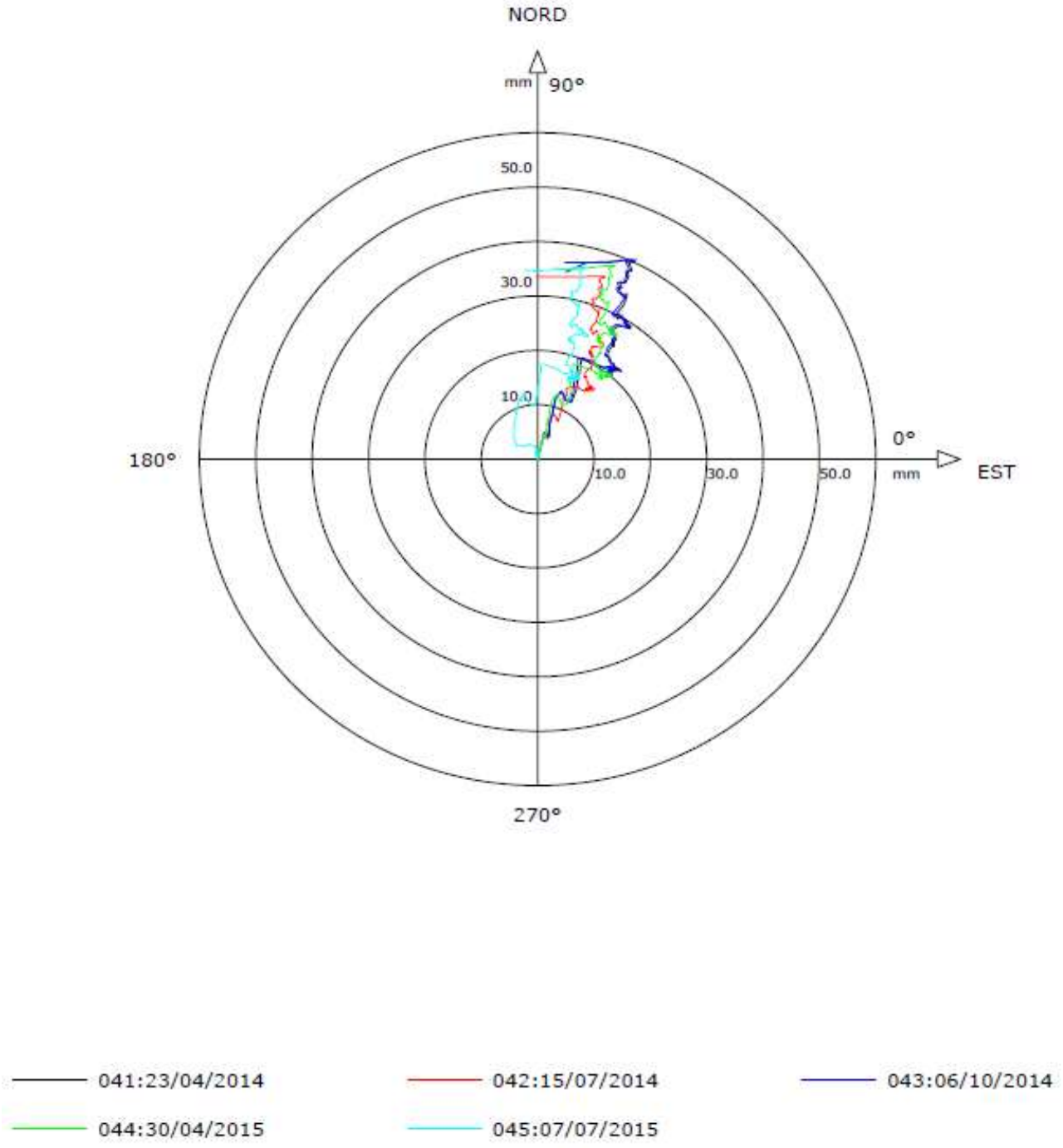


GRAFICO 8.92-CURVA RISULTANTE DEGLI SPOSTAMENTI E ANGOLO DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE INTEGRALE DAL BASSO, ANNO 2015-2017, COLONNA I1, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

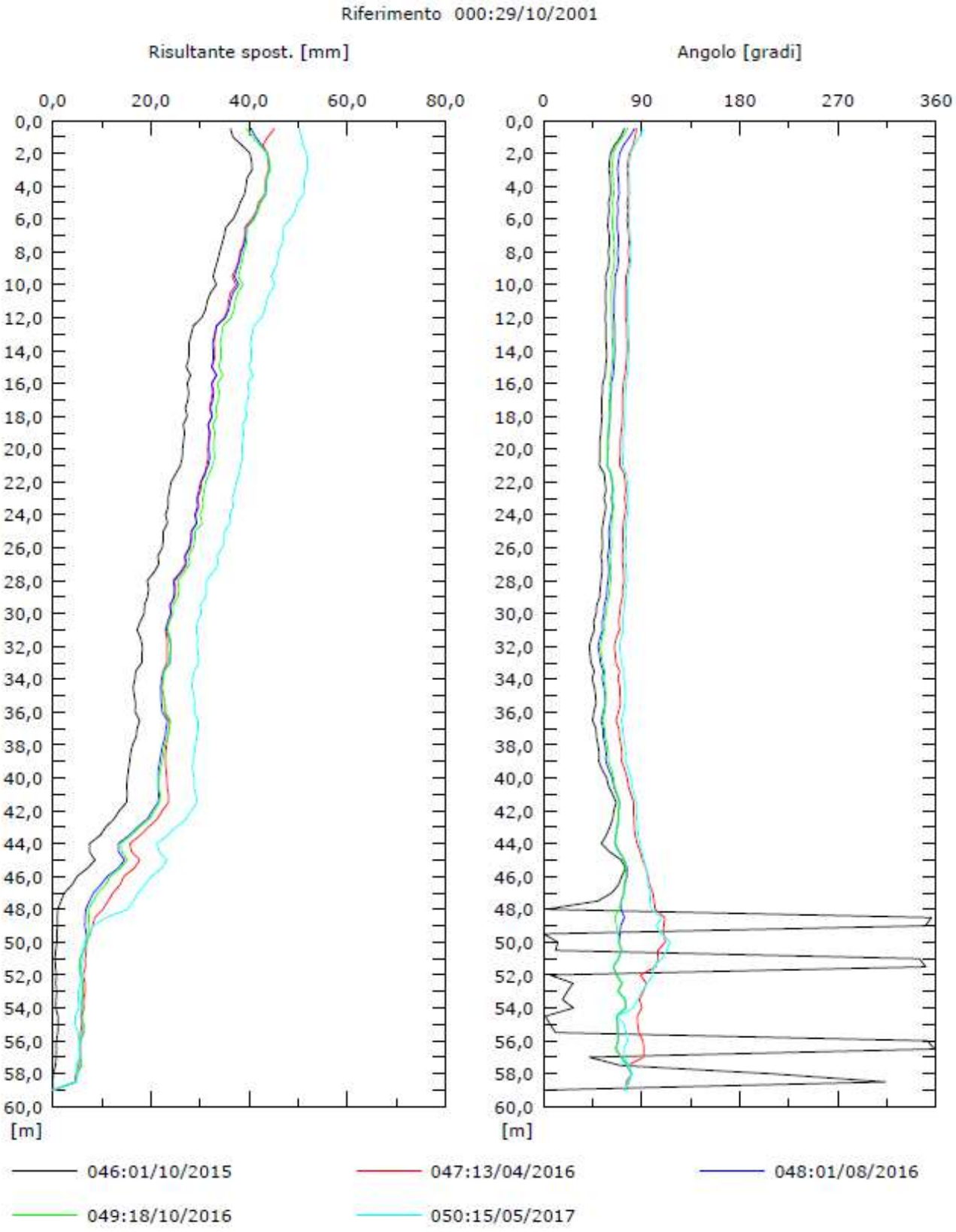


GRAFICO 8.93-CURVA RISULTANTE DEGLI SPOSTAMENTI ESPRESSA IN MILLIMETRI E ANGOLO ESPRESSO IN GRADI DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE DIFFERENZIALE LOCALE DAL BASSO, ANNO 2015-2017, COLONNA I1 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

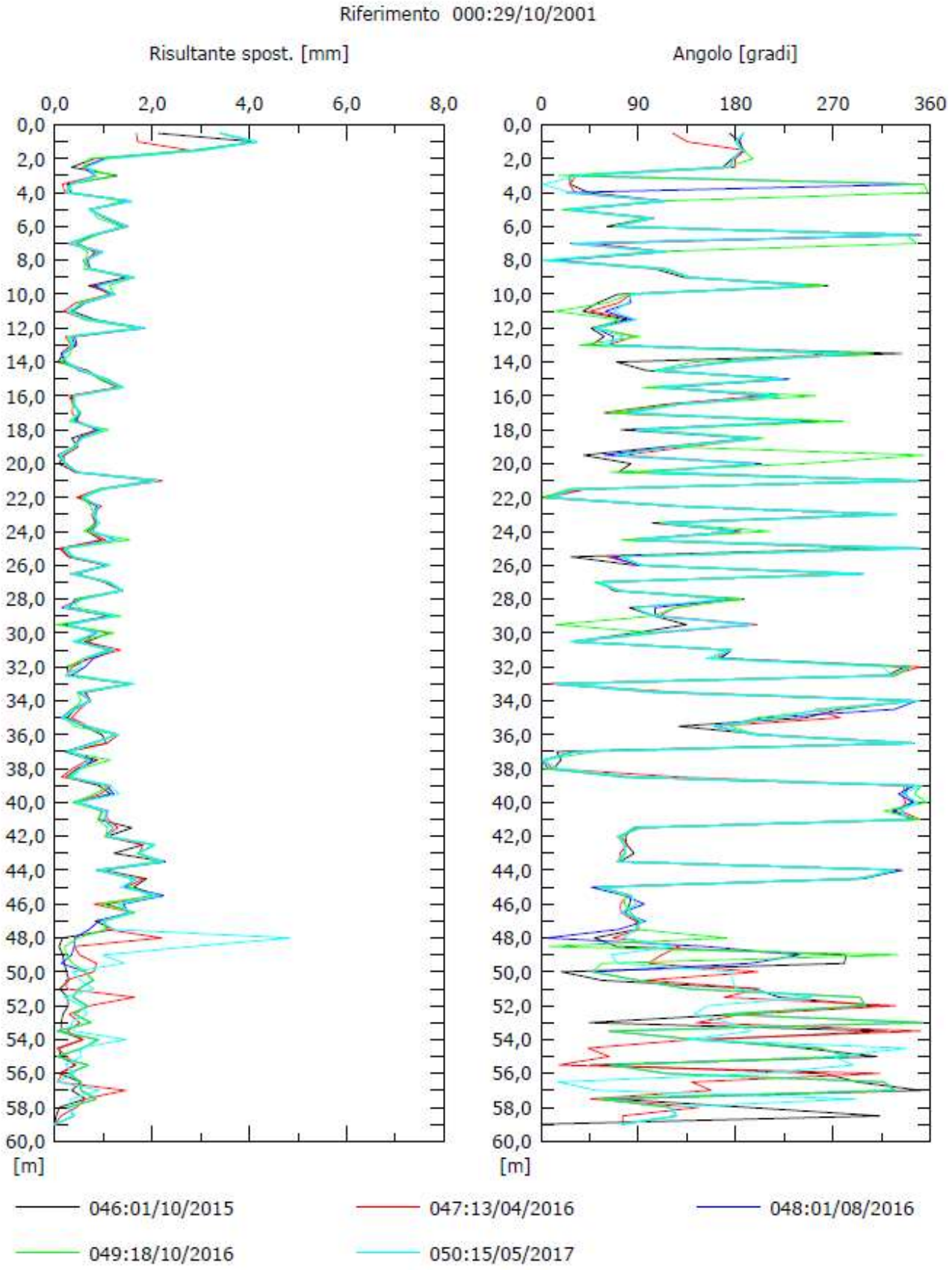


GRAFICO 8.94-DIAGRAMMA POLARE DELLA DEVIAZIONE DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE INTEGRALE DAL BASSO, ANNO 2014-2015, COLONNA I1, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

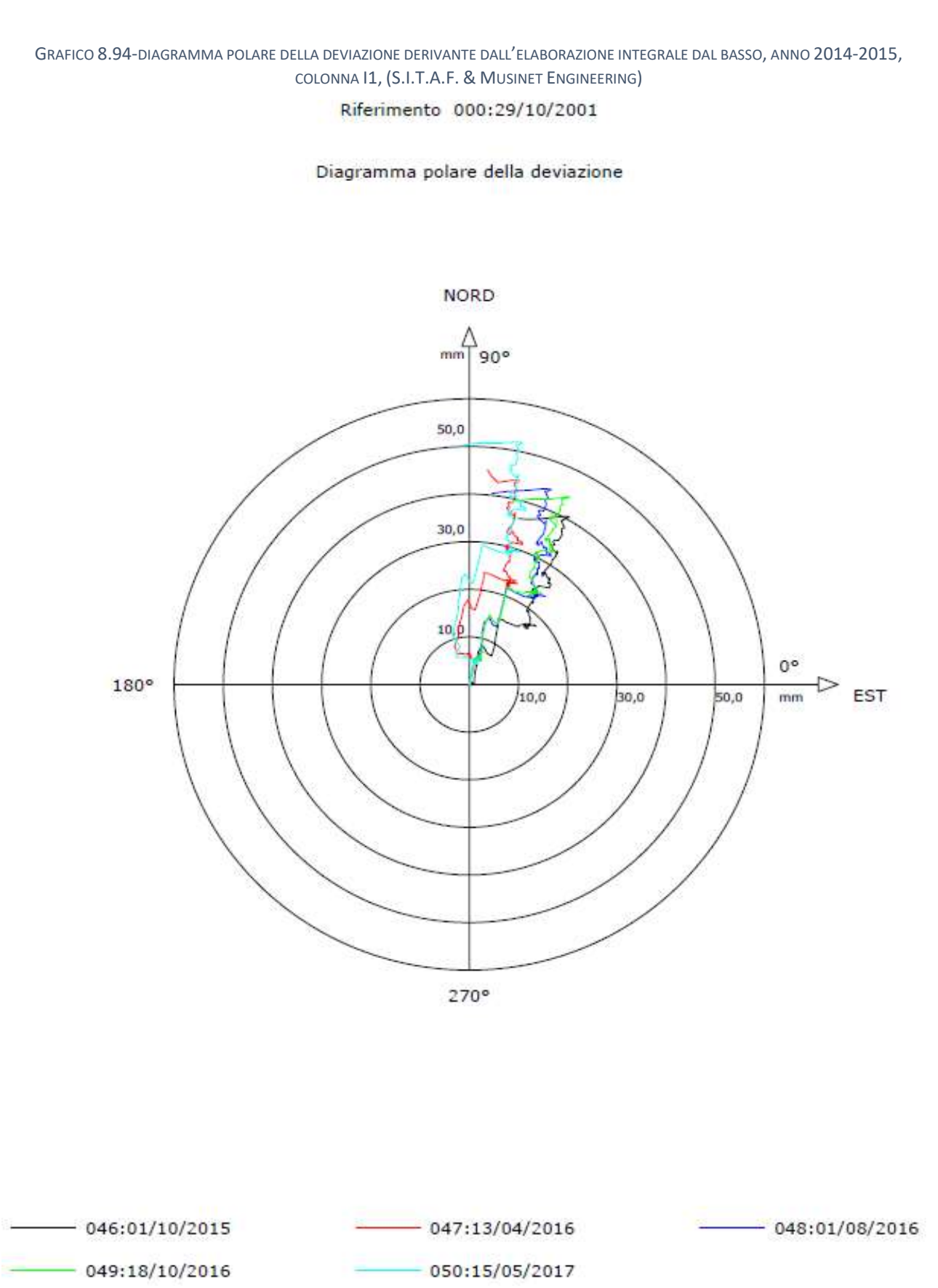


GRAFICO 8.95-CURVA RISULTANTE DEGLI SPOSTAMENTI E ANGOLO DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE INTEGRALE DAL BASSO, ANNO 2017-2018, COLONNA I1, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

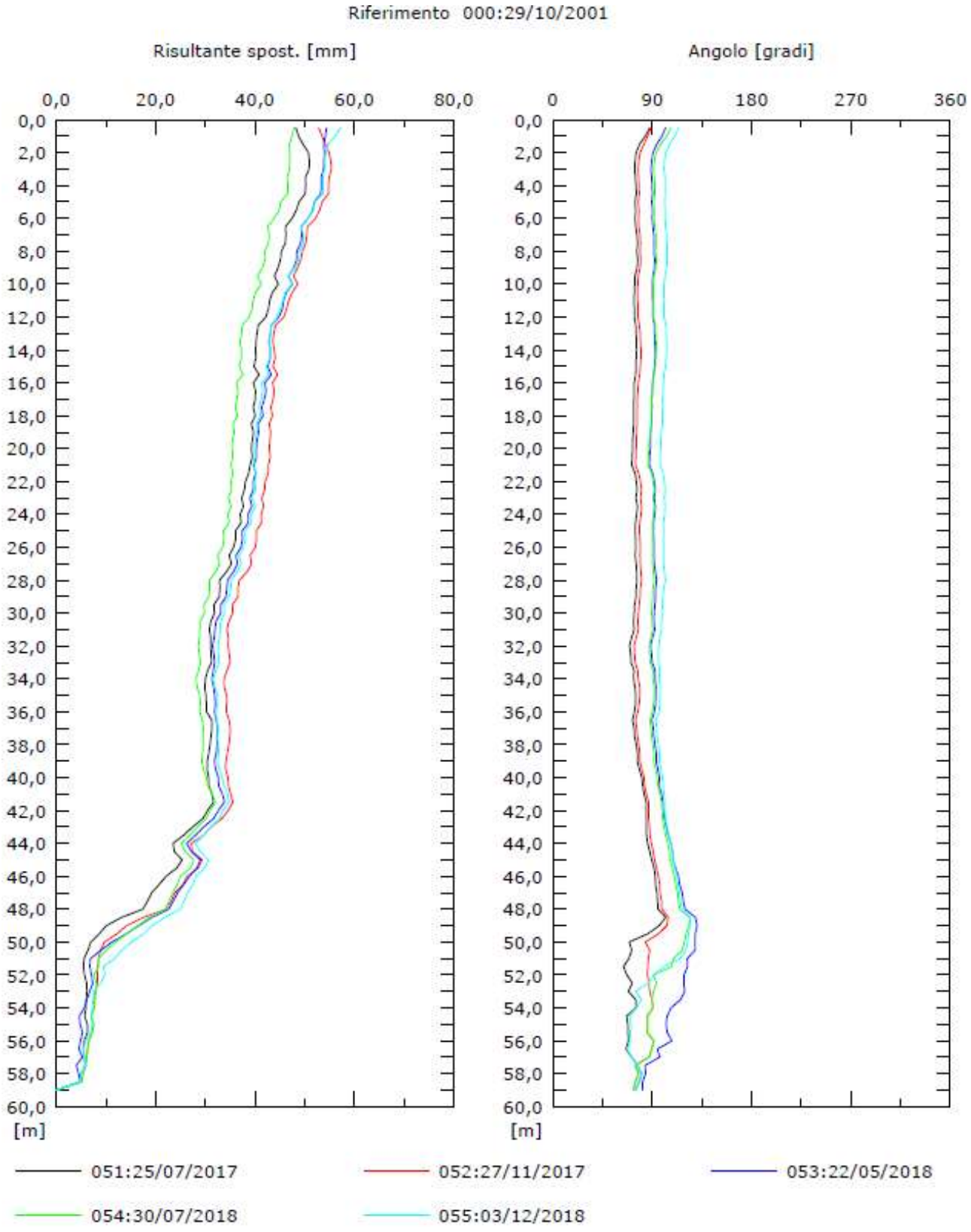


GRAFICO 8.96- CURVA RISULTANTE DEGLI SPOSTAMENTI ESPRESSA IN MILLIMETRI E ANGOLO ESPRESSO IN GRADI DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE DIFFERENZIALE LOCALE DAL BASSO, ANNO 2015-2017, COLONNA I1, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

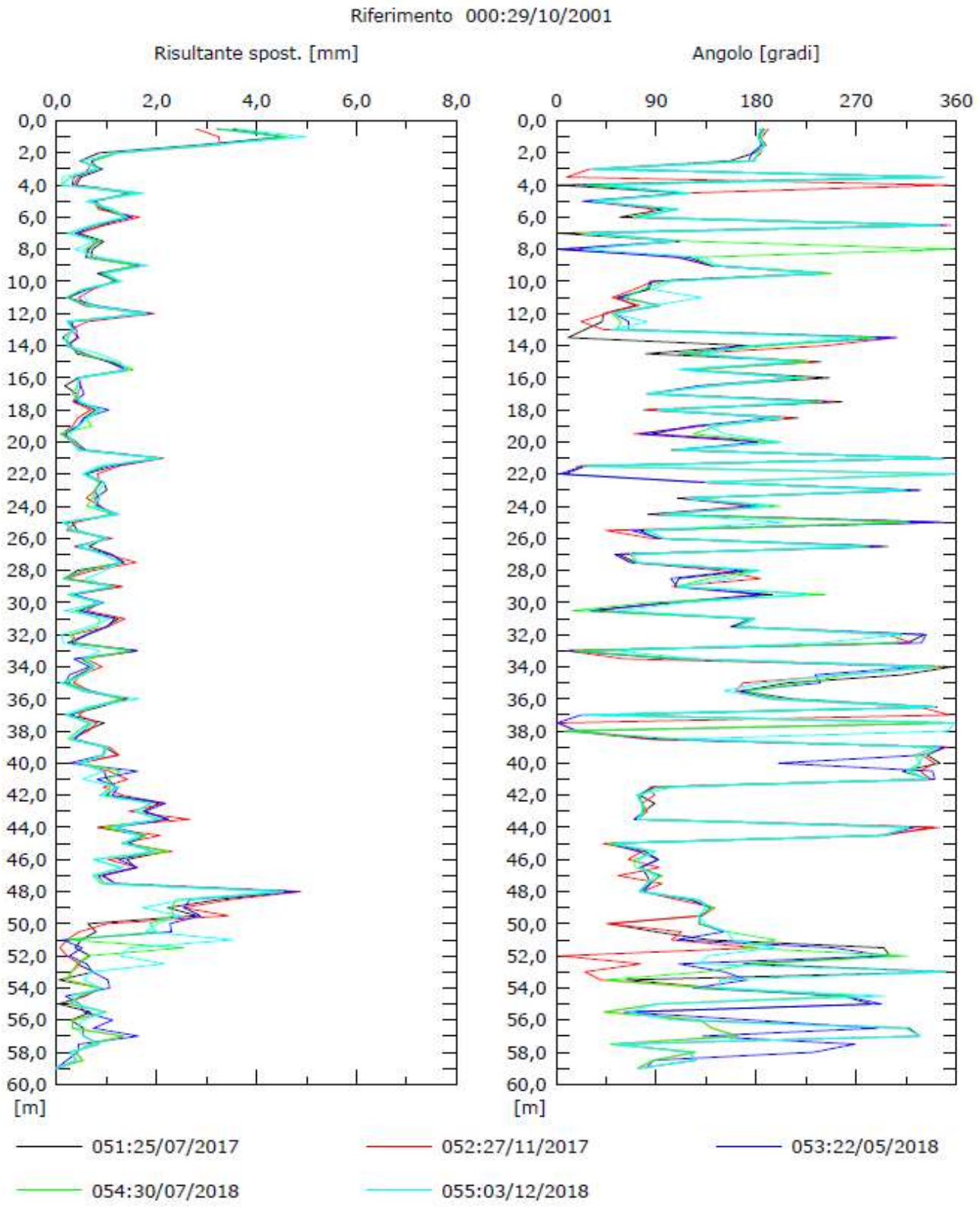
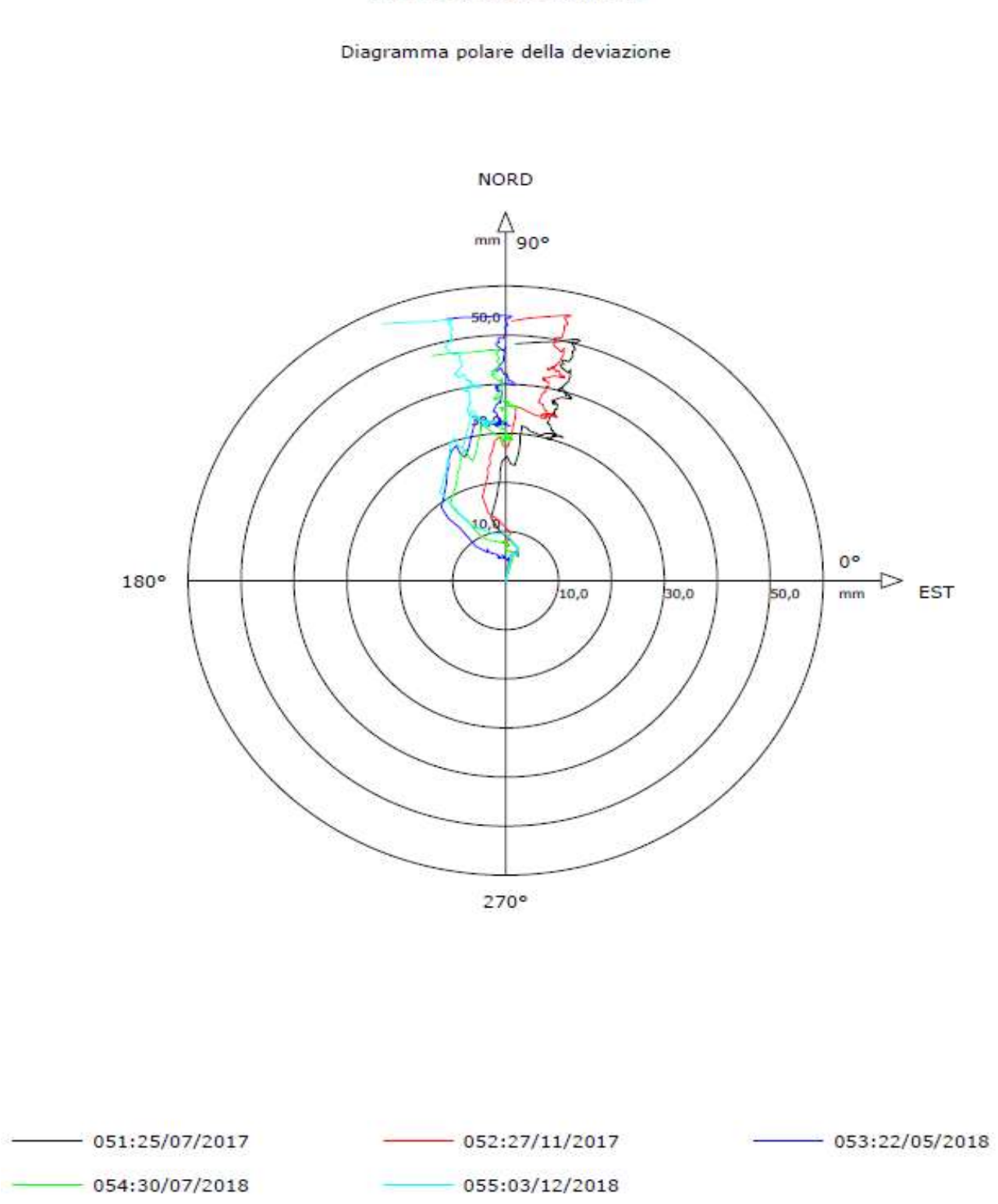


GRAFICO 8.97- DIAGRAMMA POLARE DELLA DEVIAZIONE DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE INTEGRALE DAL BASSO, ANNO 2014-2015, COLONNA I1 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)



8.3.2 Colonna I2

GRAFICO 8.98-MODULO DELLO SPOSTAMENTO CUMULATIVO DMS-I2, PERIODO 2017-2018 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

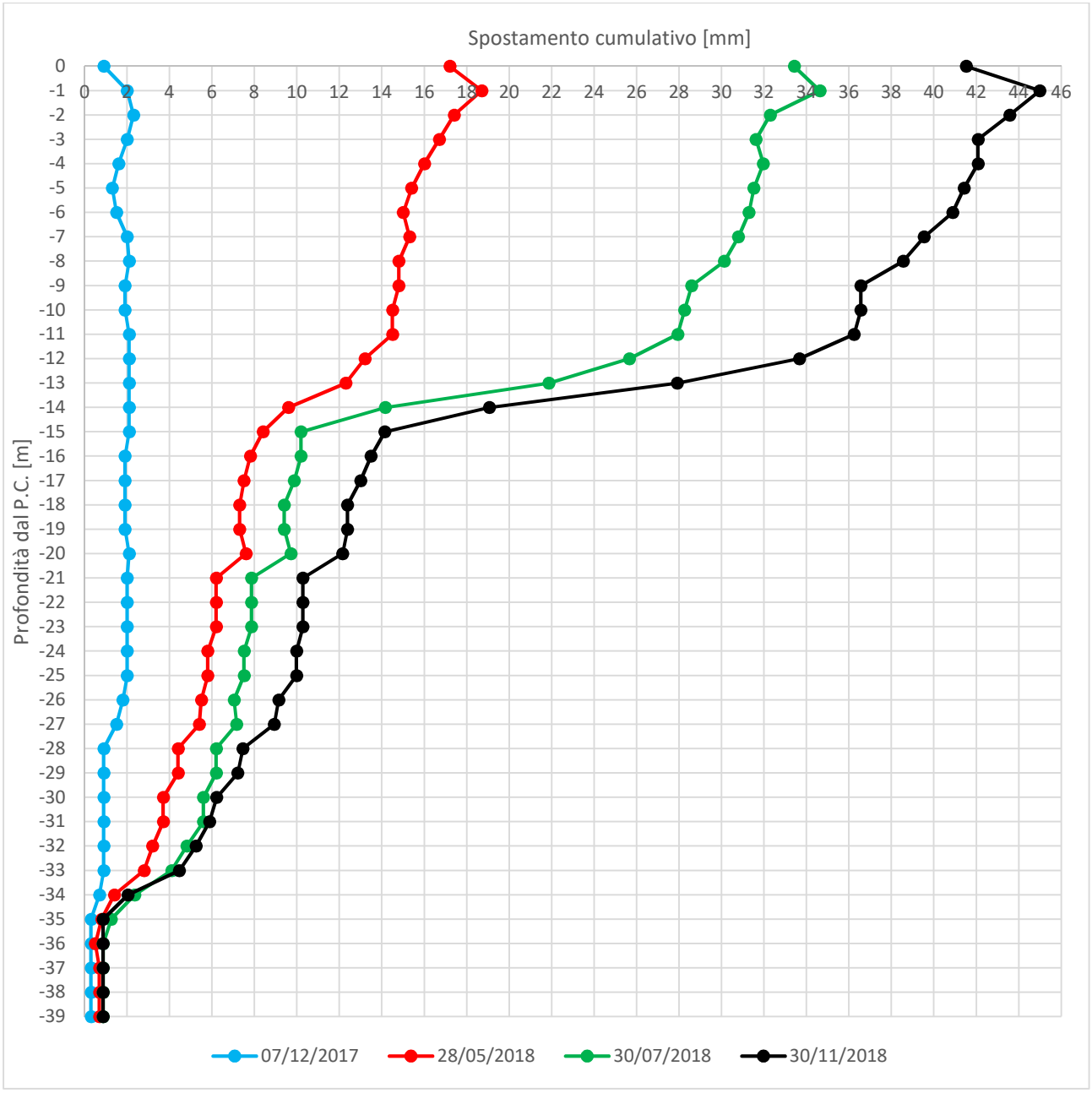


GRAFICO 8.99-MODULO DELLO SPOSTAMENTO DIFFERENZIALE DMS I2, PERIODO 2017-2018 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

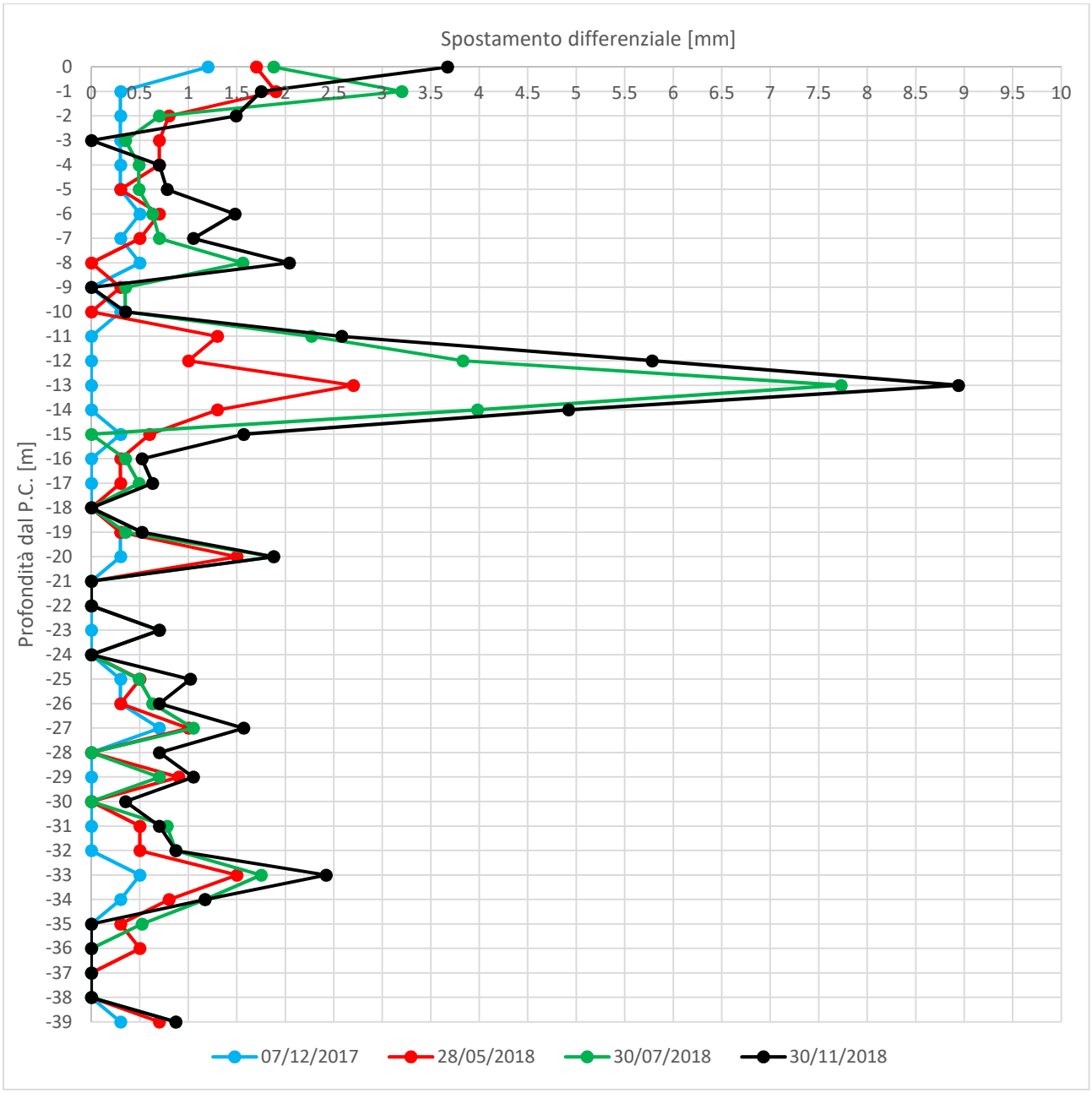


GRAFICO 8.100-DIAGRAMMA POLARE CUMULATIVO, PERIODO 2017-2018, DMS-I2 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

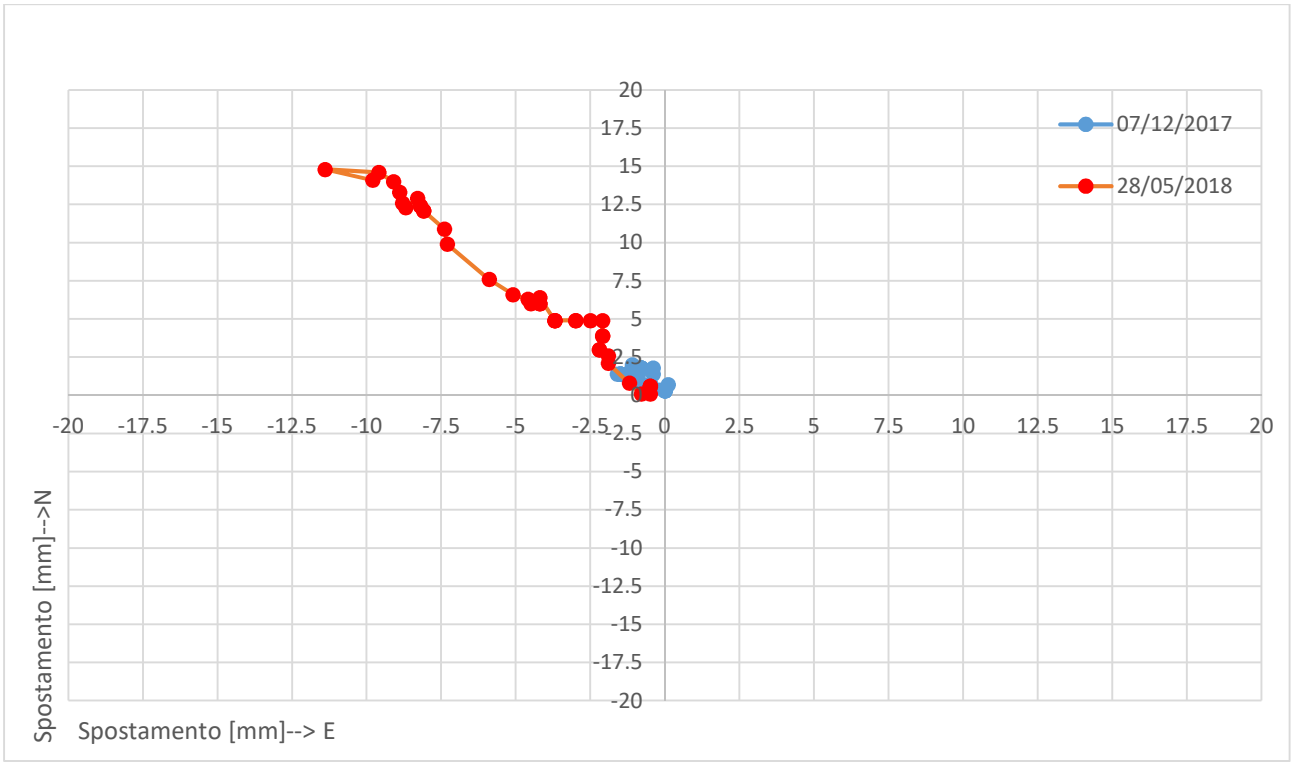
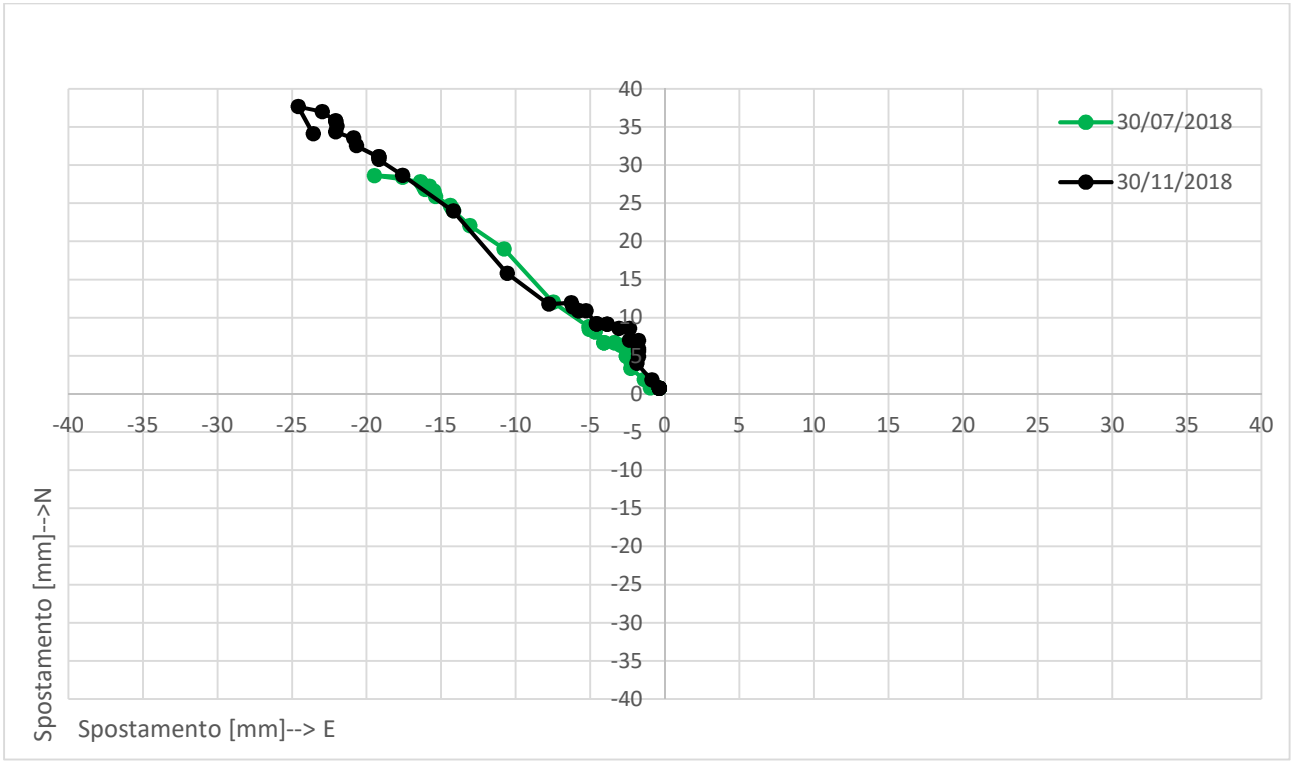


GRAFICO 8.101-DIAGRAMMA POLARE CUMULATIVO, PERIODO 2018, DMS-I2 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)



8.3.3 Colonna I3, lettura manuale

GRAFICO 8.102- CURVA RISULTANTE DEGLI SPOSTAMENTI E ANGOLO DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE INTEGRALE DAL BASSO, ANNO 2013-2014, COLONNA I3, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

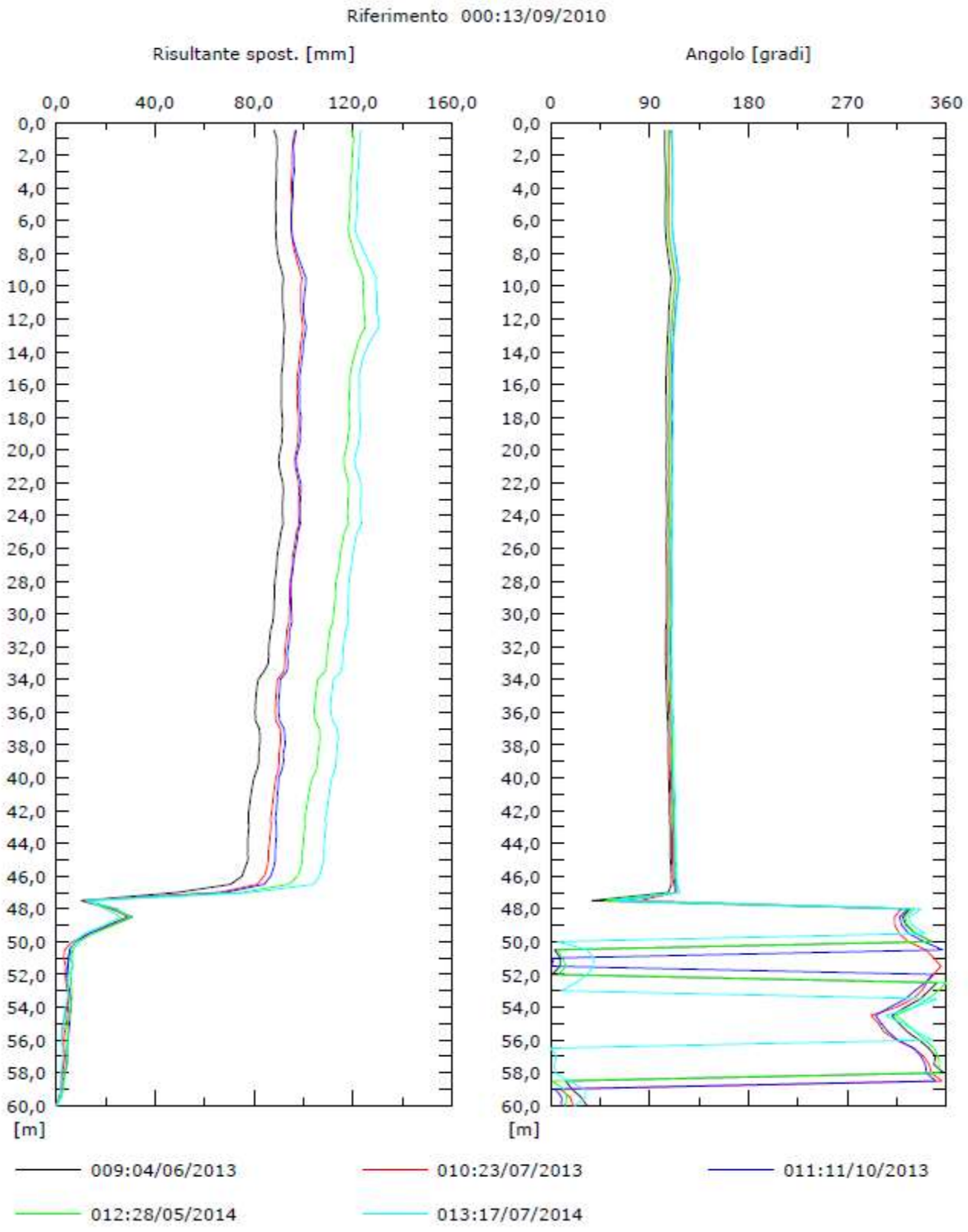


GRAFICO 8.103- CURVA RISULTANTE DEGLI SPOSTAMENTI ESPRESSA IN MILLIMETRI E ANGOLO ESPRESSO IN GRADI DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE DIFFERENZIALE LOCALE DAL BASSO, ANNO 2013-2014, COLONNA I3, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

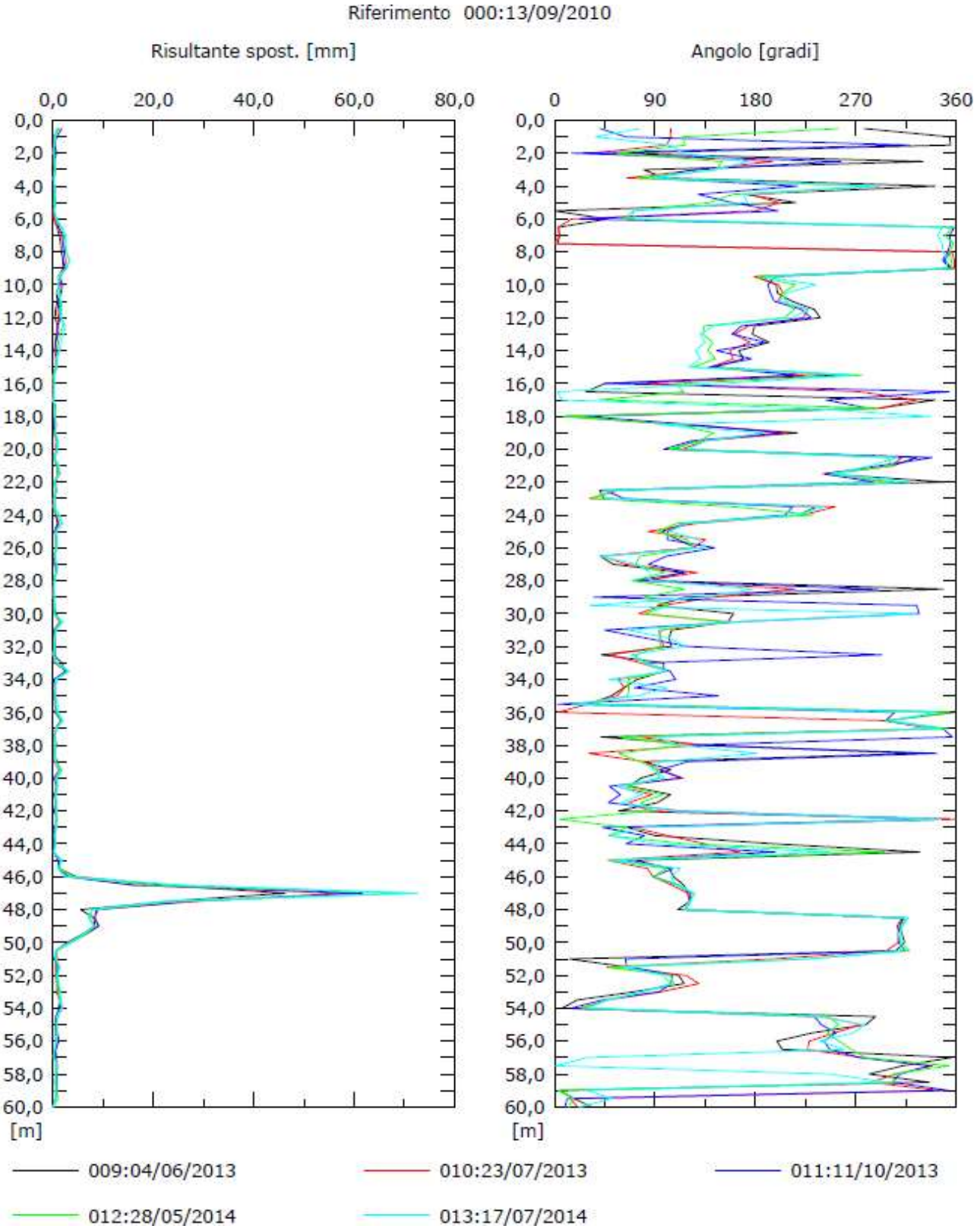
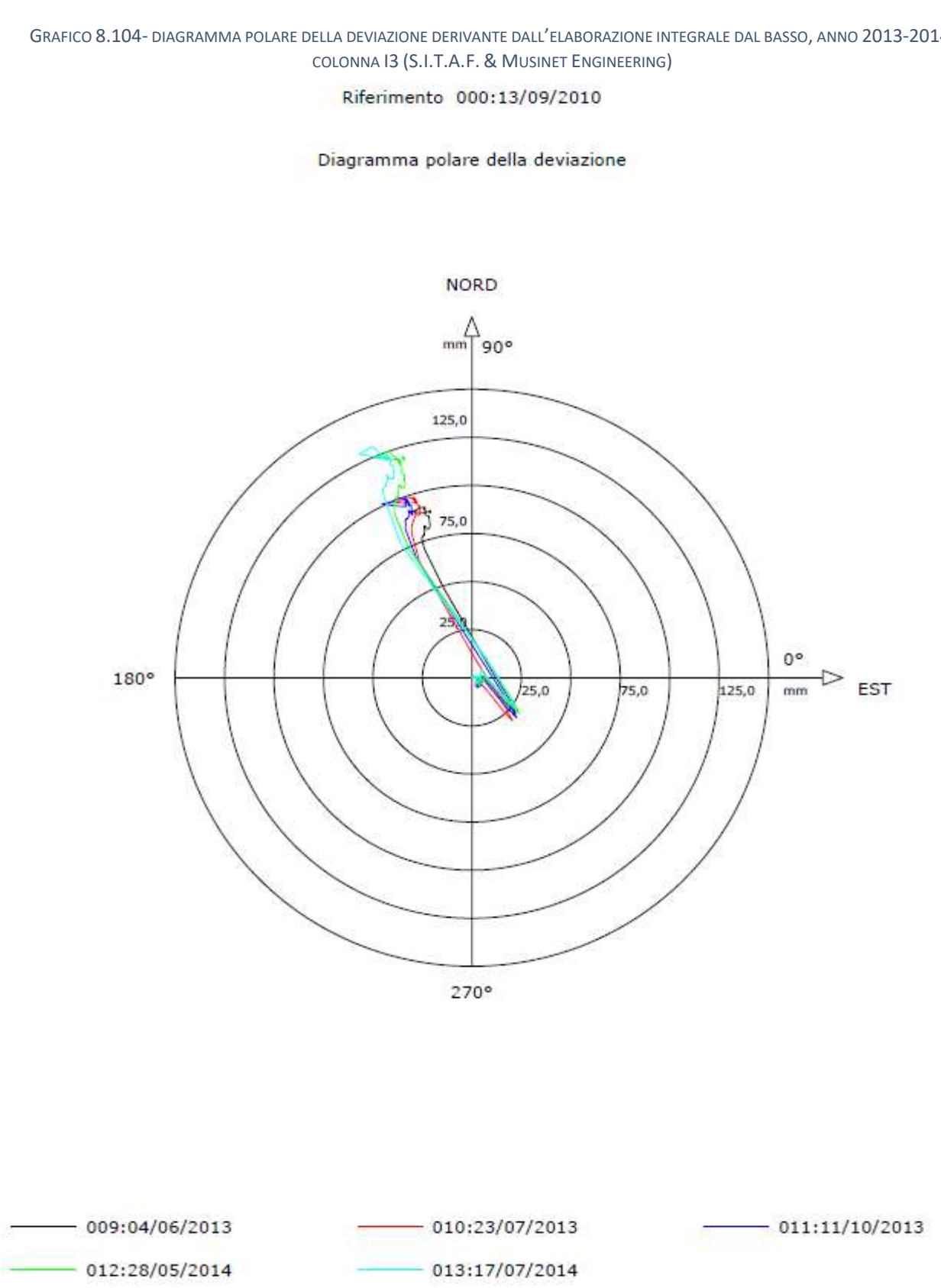


GRAFICO 8.104- DIAGRAMMA POLARE DELLA DEVIAZIONE DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE INTEGRALE DAL BASSO, ANNO 2013-2014, COLONNA I3 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)



8.3.4 Colonna I3, DMS

GRAFICO 8.105- MODULO DELLO SPOSTAMENTO DIFFERENZIALE DMS I3, PERIODO 2015-2016 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

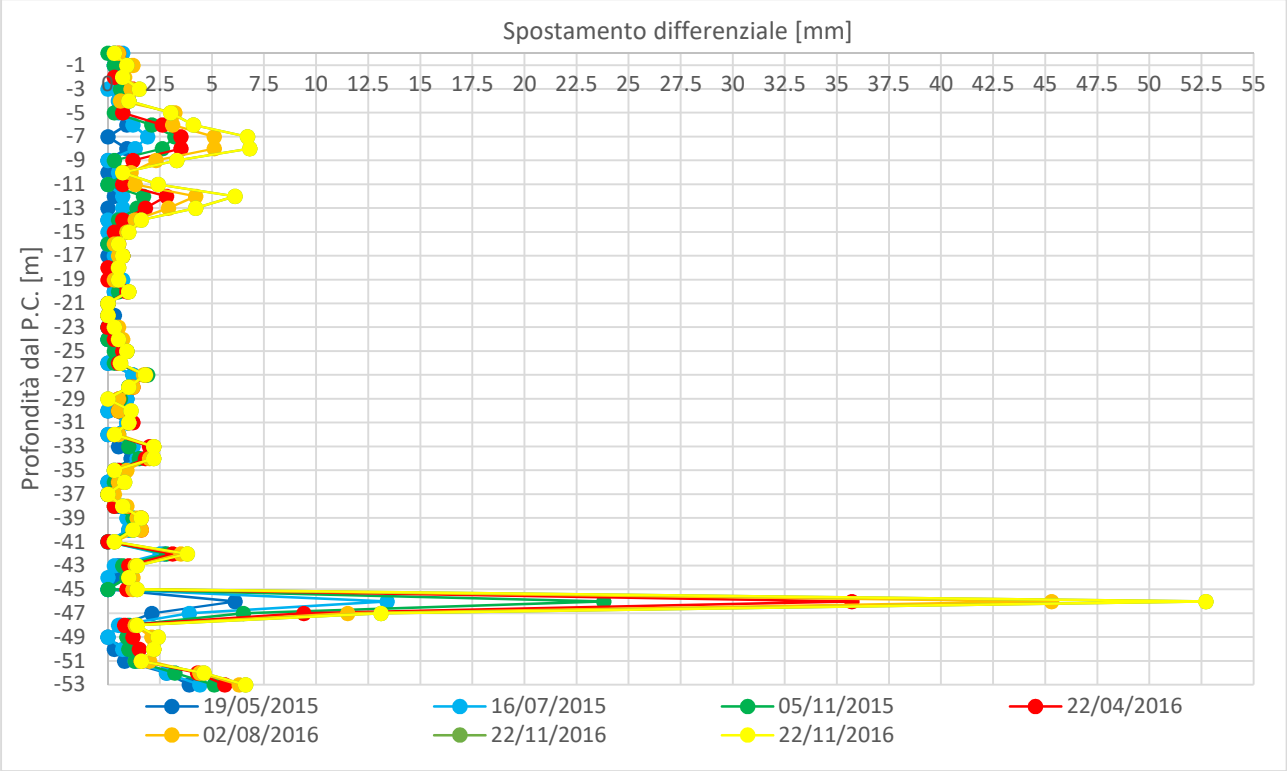


GRAFICO 8.106- MODULO DELLO SPOSTAMENTO DIFFERENZIALE DMS I3, PERIODO 2017 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

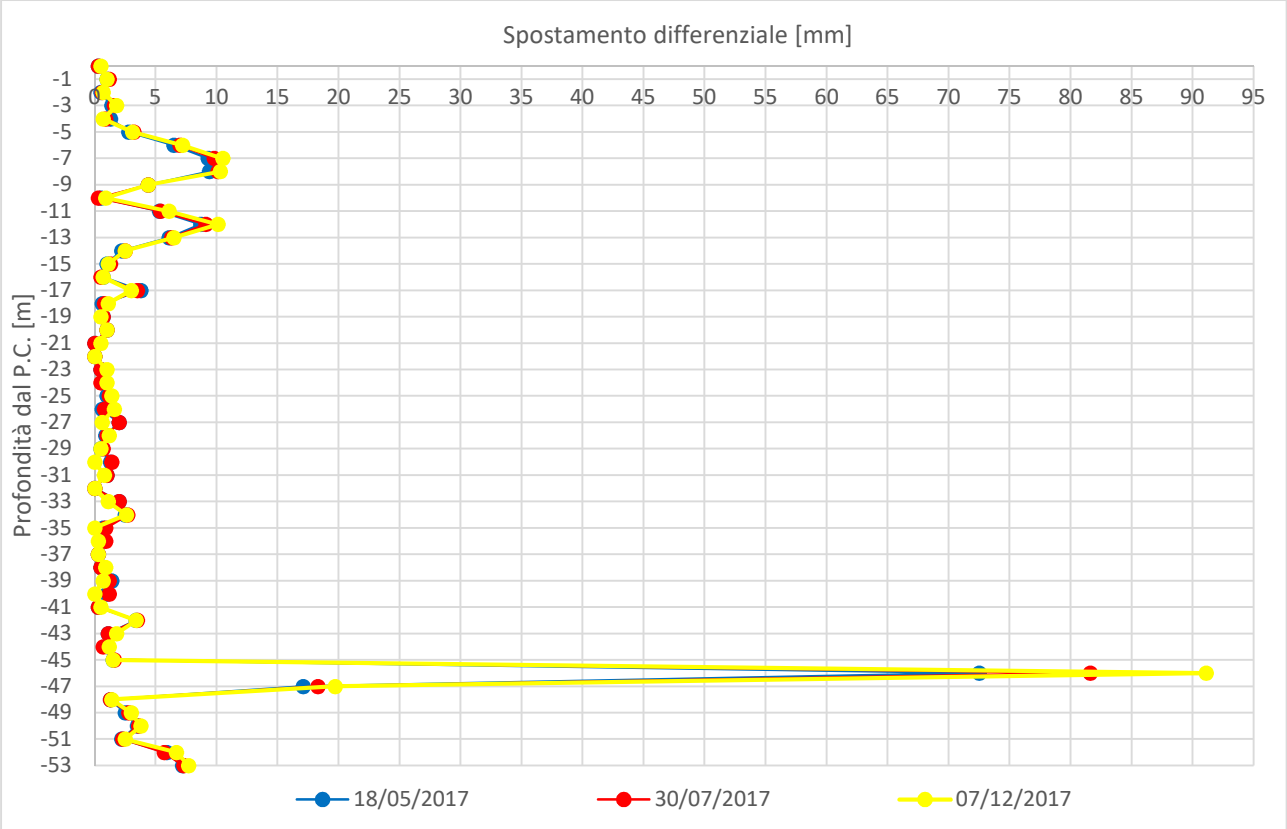


GRAFICO 8.107- MODULO DELLO SPOSTAMENTO DIFFERENZIALE DMS I3, PERIODO 2018 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

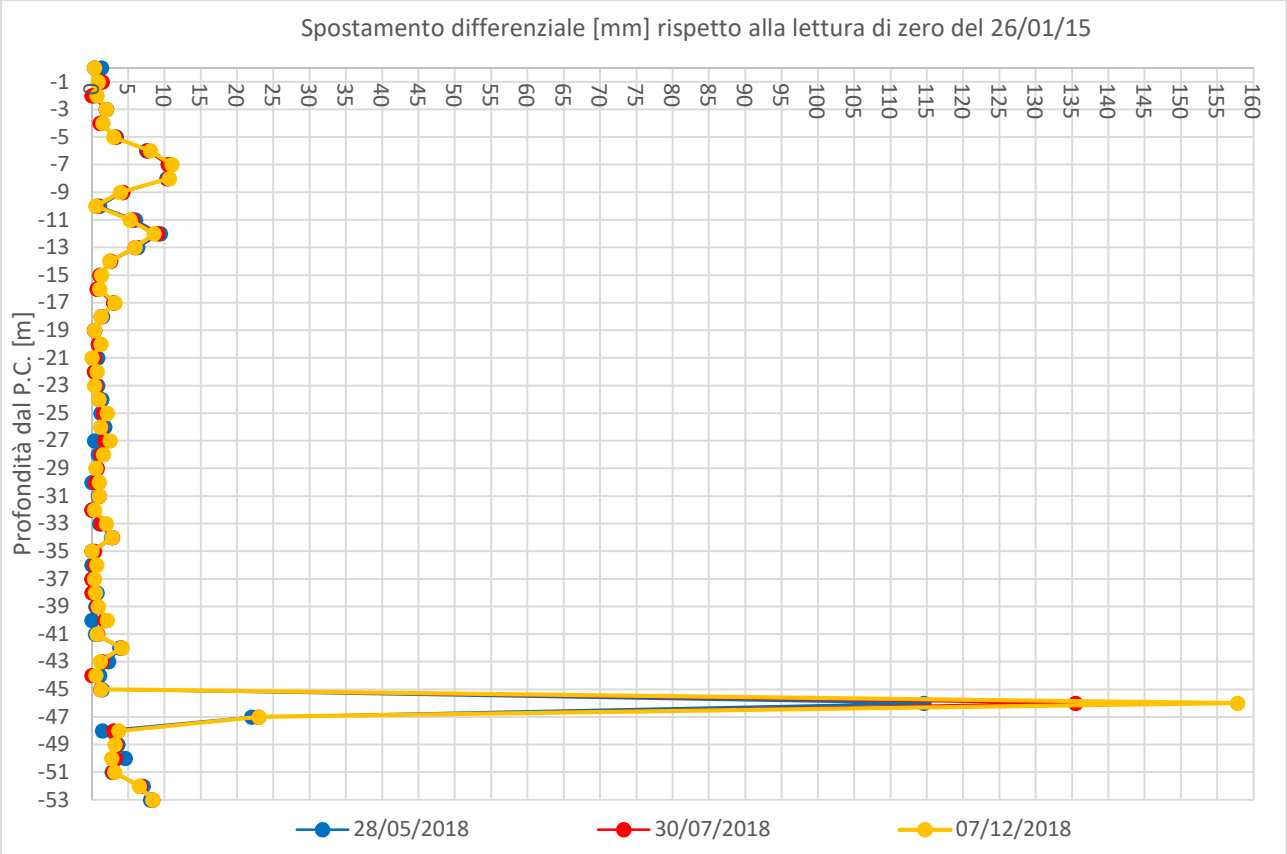


GRAFICO 8.108- DIAGRAMMA POLARE CUMULATIVO, PERIODO 2015, DMS-I3 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

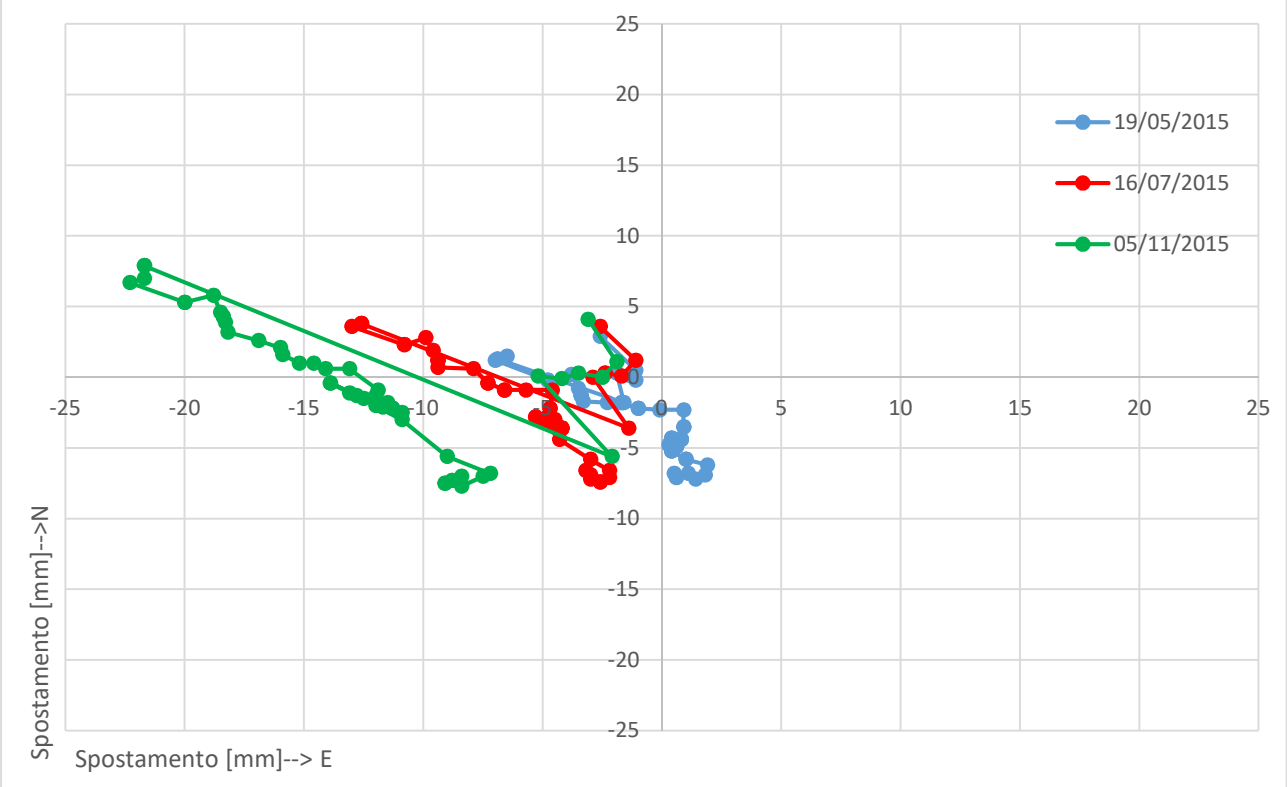


GRAFICO 8.109- DIAGRAMMA POLARE CUMULATIVO, PERIODO 2015-2016, DMS-I3 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

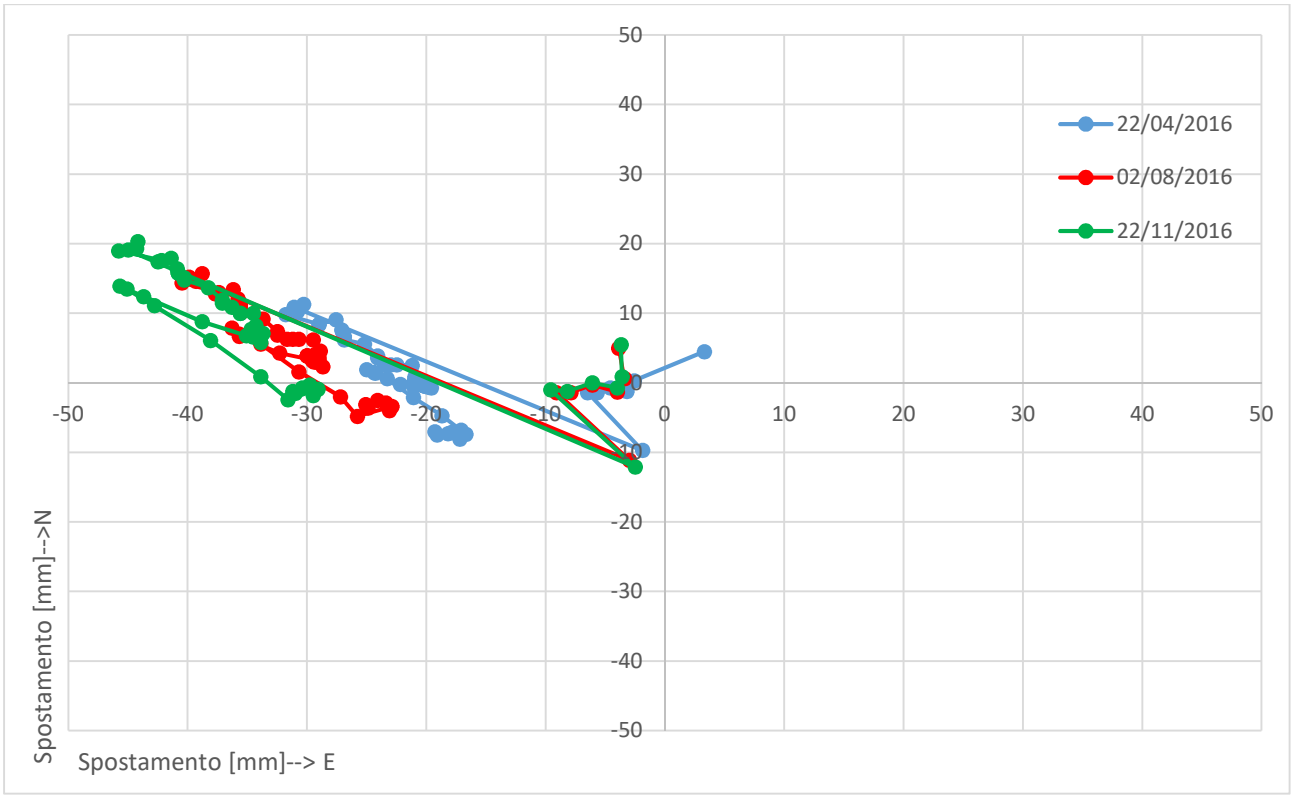


GRAFICO 8.110- DIAGRAMMA POLARE CUMULATIVO, PERIODO 2017, DMS-I3 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

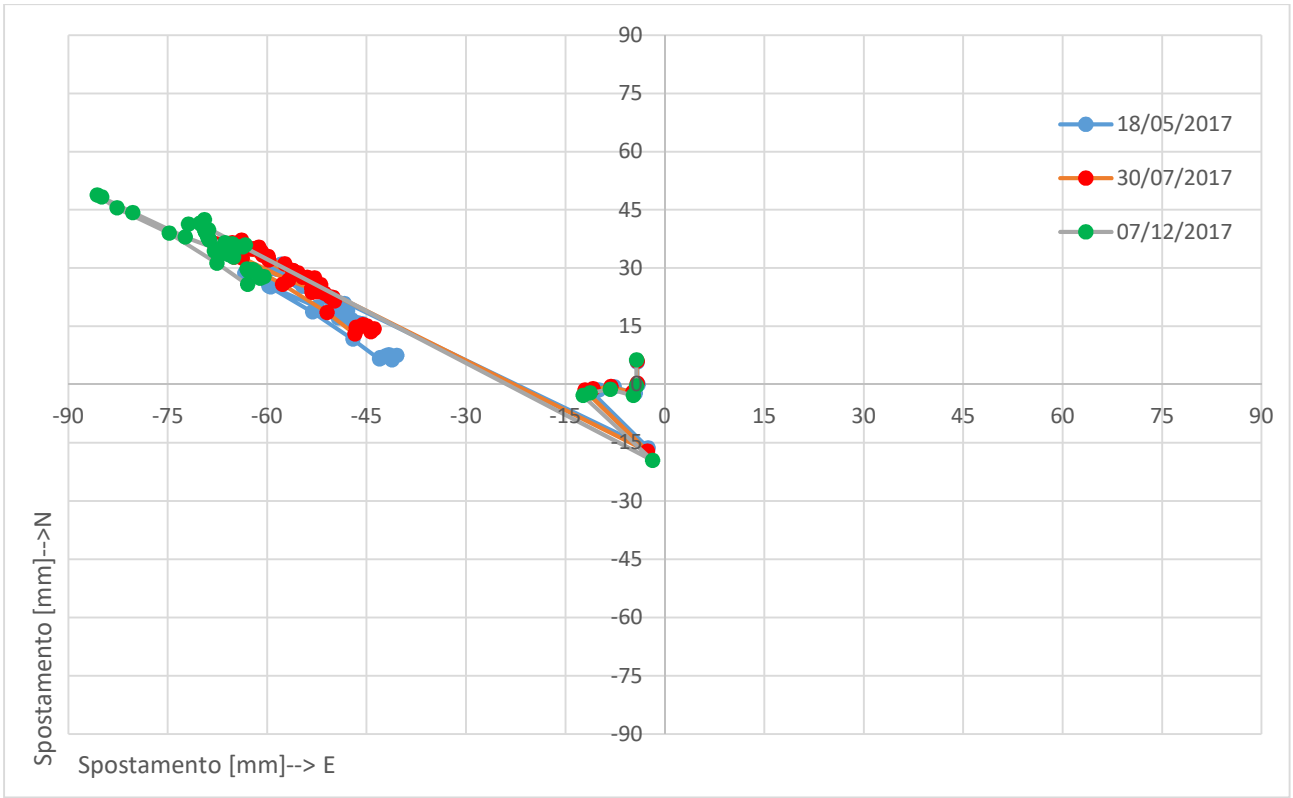
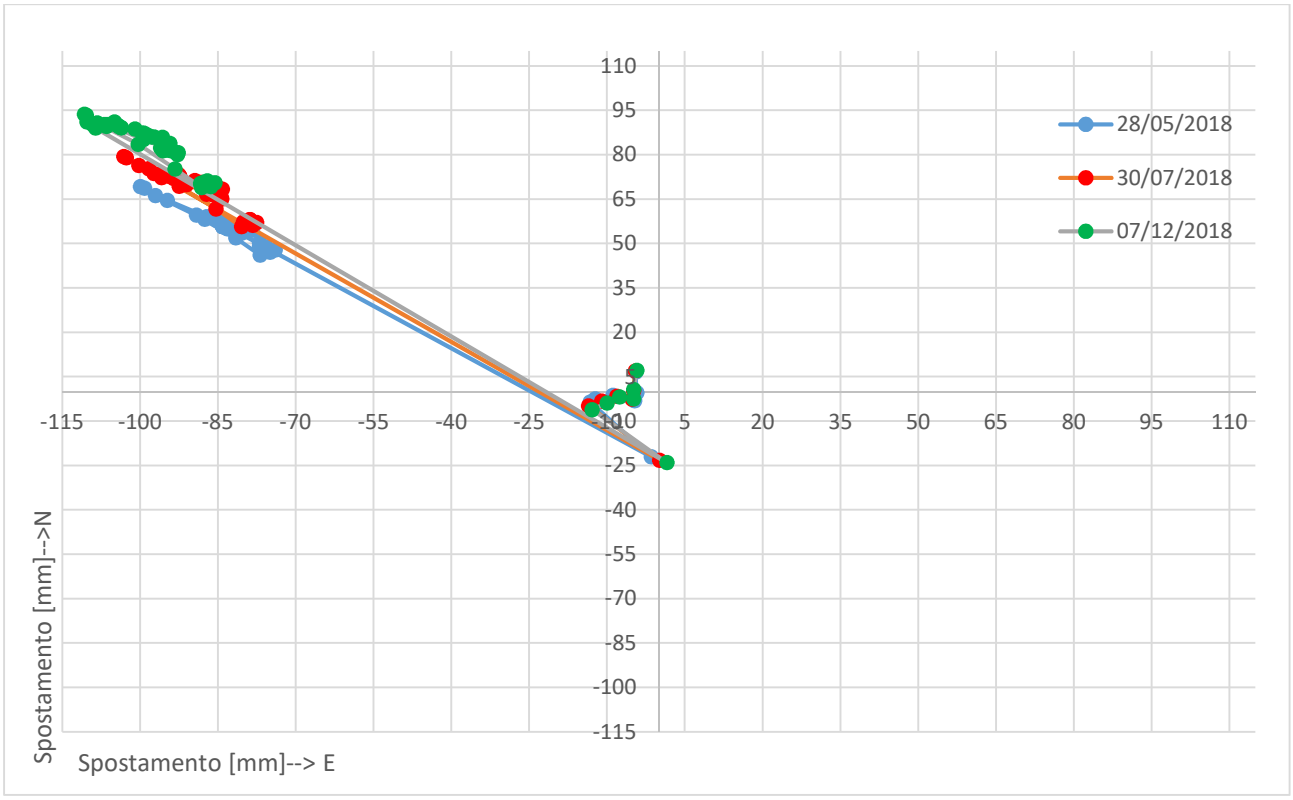


GRAFICO 8.111- DIAGRAMMA POLARE CUMULATIVO, PERIODO 2018, DMS-I3 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)



8.3.5 Colonna I4

GRAFICO 8.112- CURVA RISULTANTE DEGLI SPOSTAMENTI E ANGOLO DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE INTEGRALE DAL BASSO, ANNO 2014-2015, COLONNA I4, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

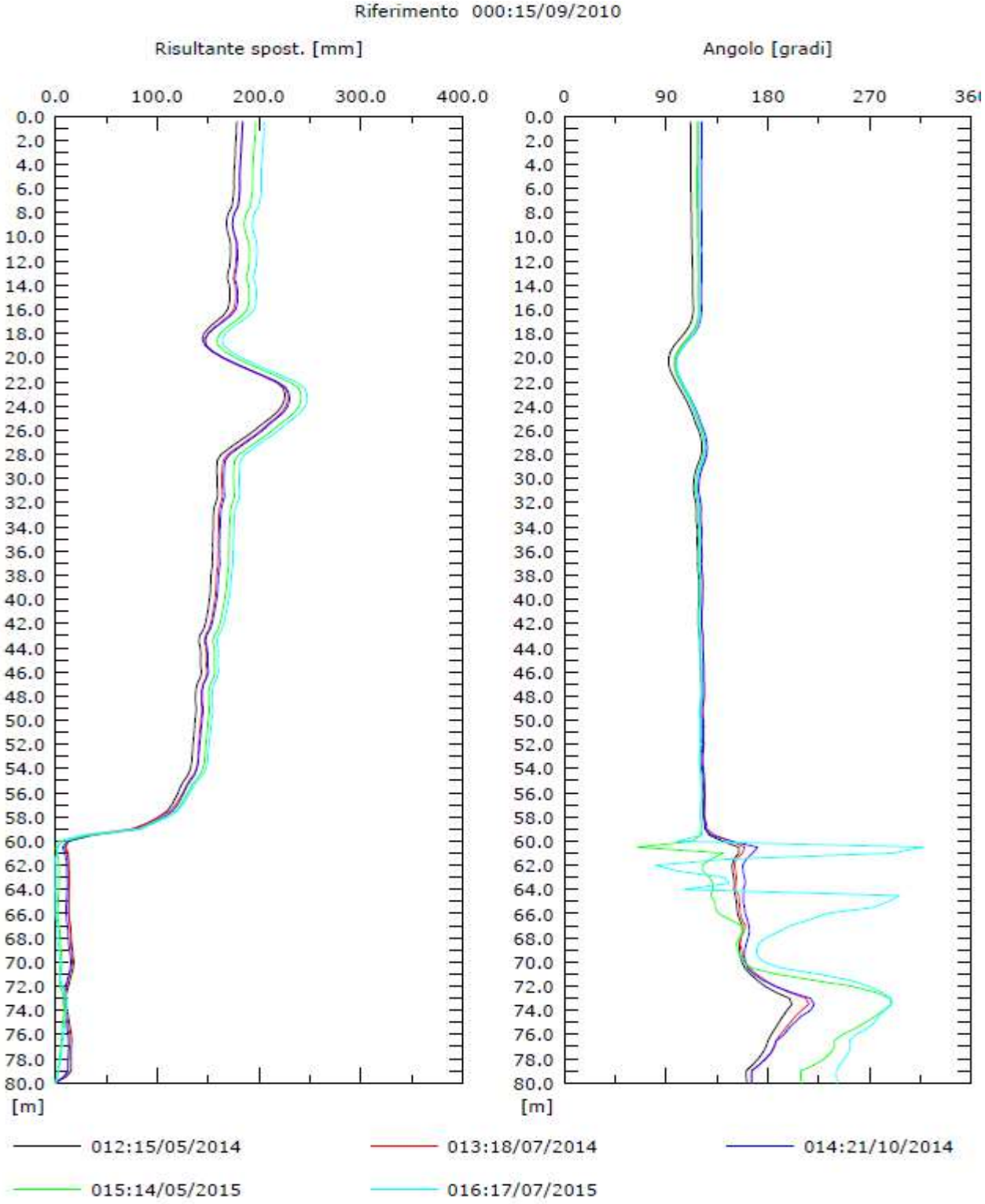


GRAFICO 8.113- CURVA RISULTANTE DEGLI SPOSTAMENTI ESPRESSA IN MILLIMETRI E ANGOLO ESPRESSO IN GRADI DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE DIFFERENZIALE LOCALE DAL BASSO, ANNO 2014-2015, COLONNA I4, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

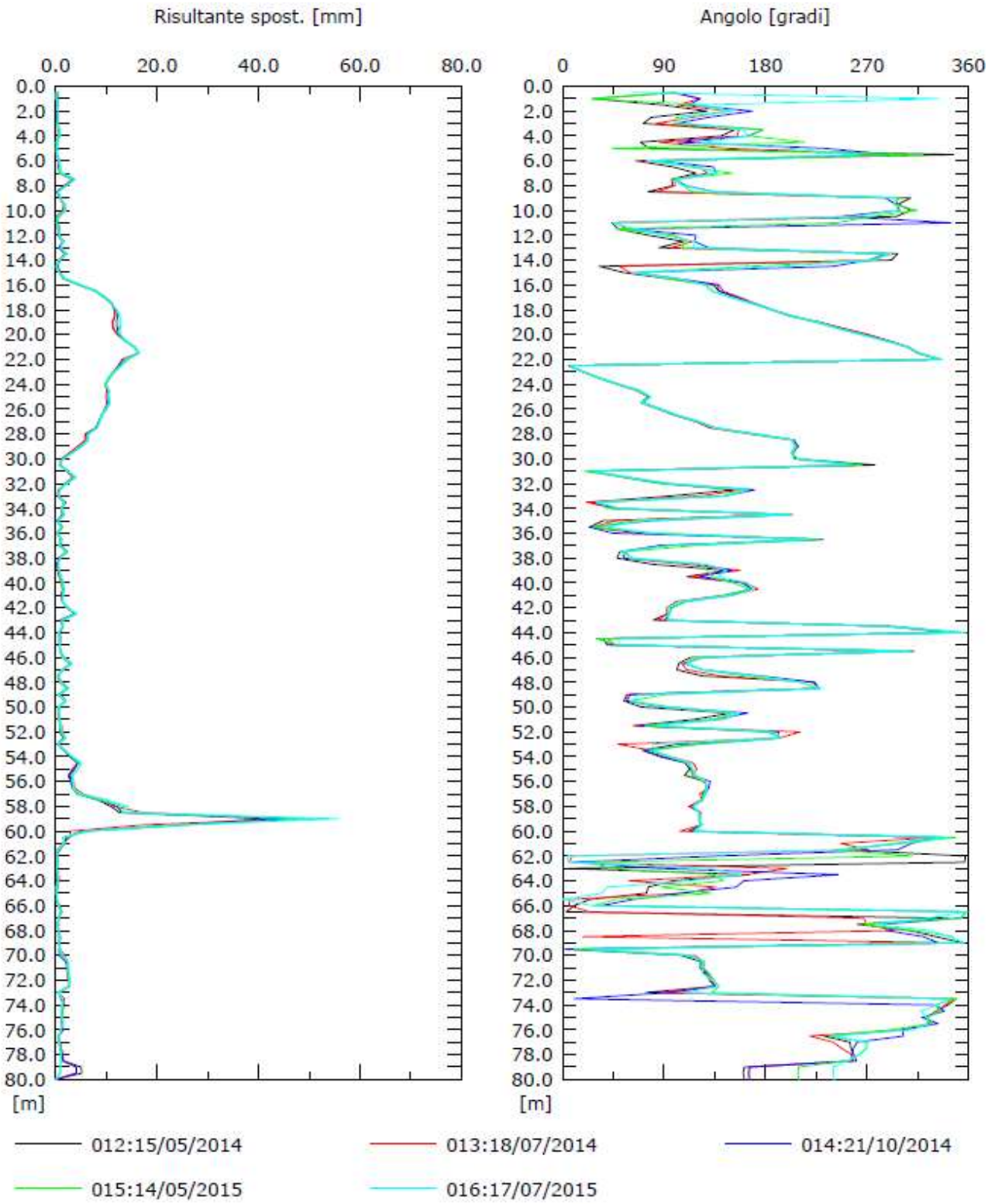


GRAFICO 8.114- DIAGRAMMA POLARE DELLA DEVIAZIONE DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE INTEGRALE DAL BASSO, ANNO 2014-2015, COLONNA I4 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

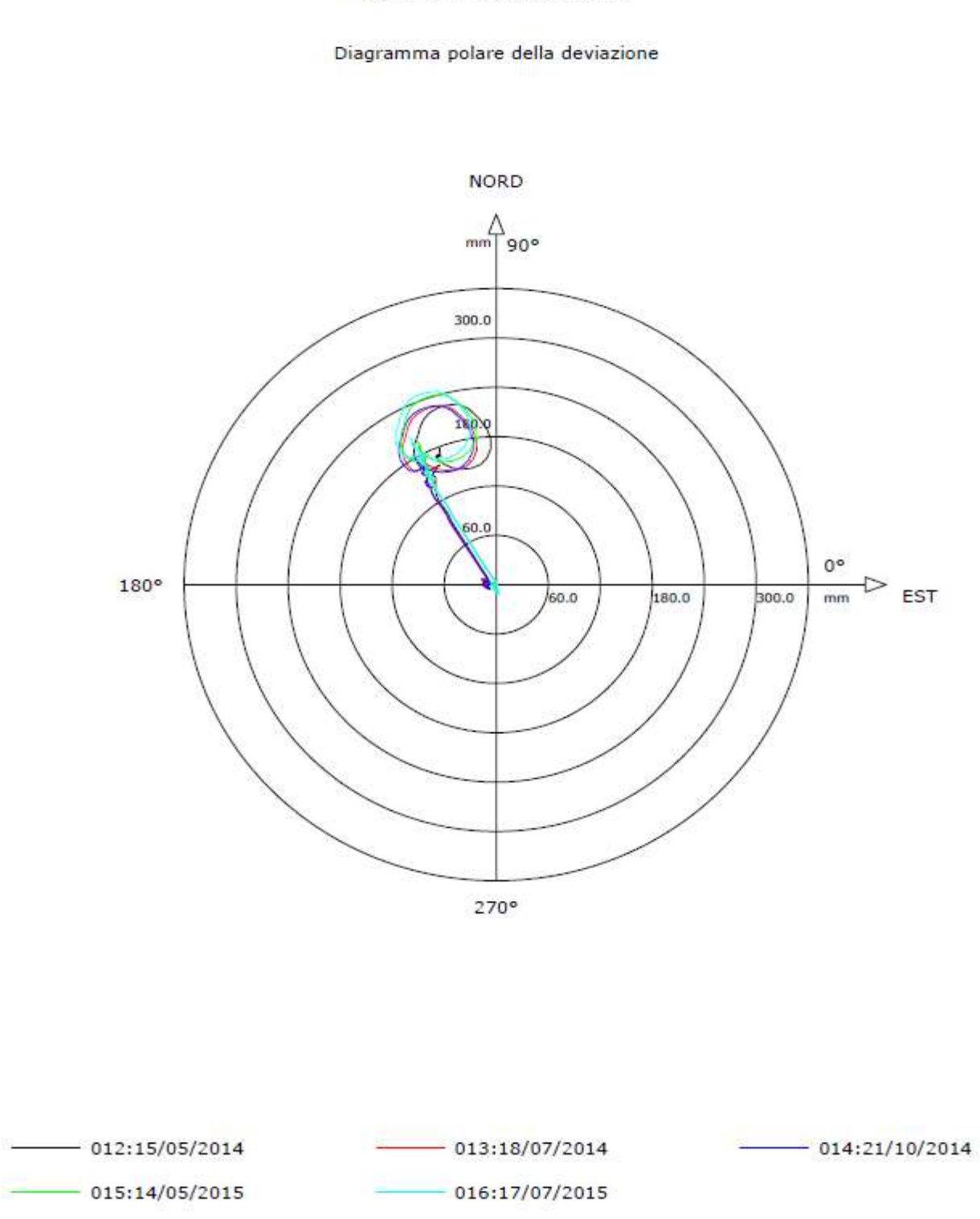


GRAFICO 8.115- CURVA RISULTANTE DEGLI SPOSTAMENTI E ANGOLO DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE INTEGRALE DAL BASSO, ANNO 2014-2015, COLONNA I4, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

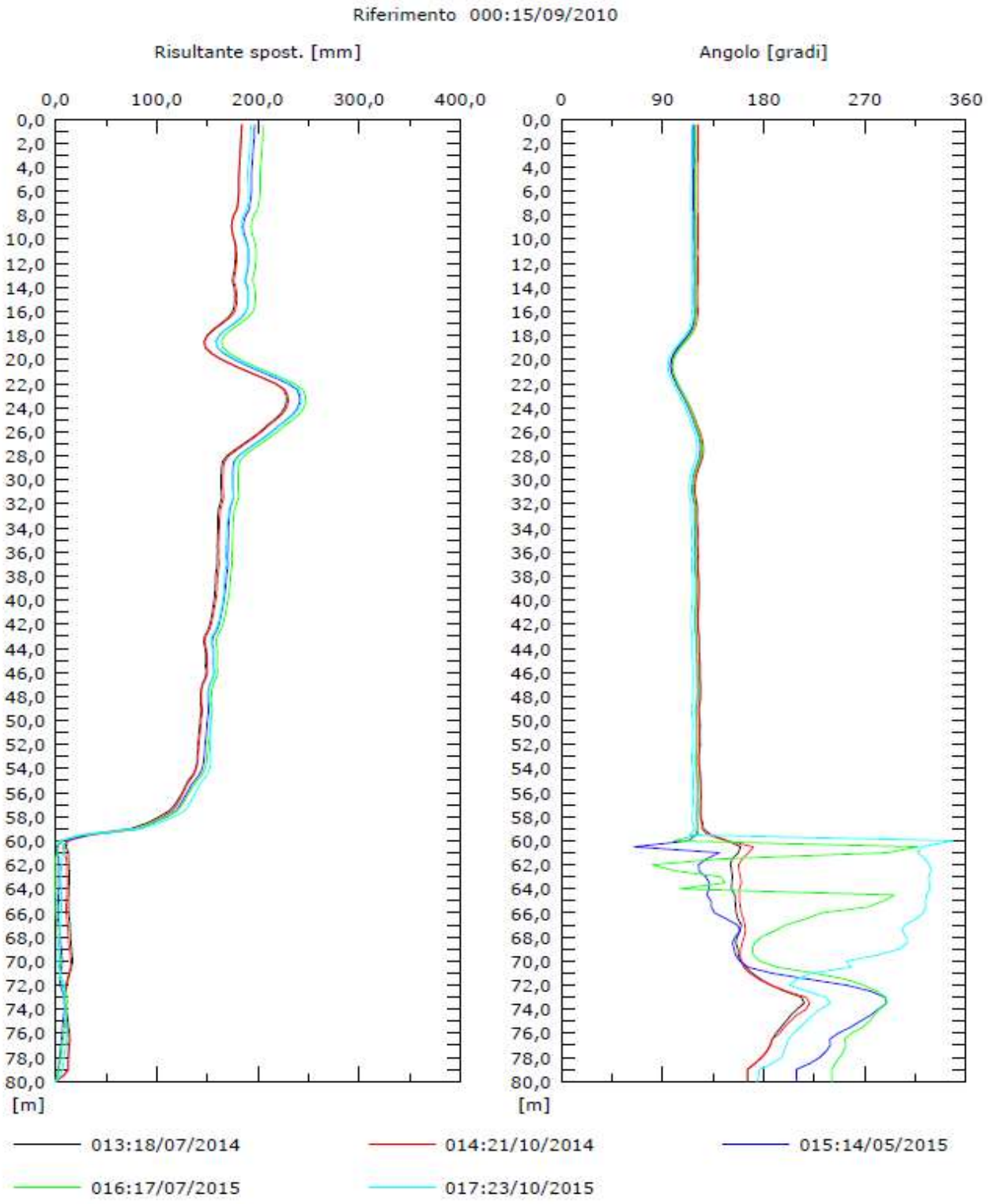


GRAFICO 8.116- CURVA RISULTANTE DEGLI SPOSTAMENTI ESPRESSA IN MILLIMETRI E ANGOLO ESPRESSO IN GRADI DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE DIFFERENZIALE LOCALE DAL BASSO, ANNO 2014-2015, COLONNA I4, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

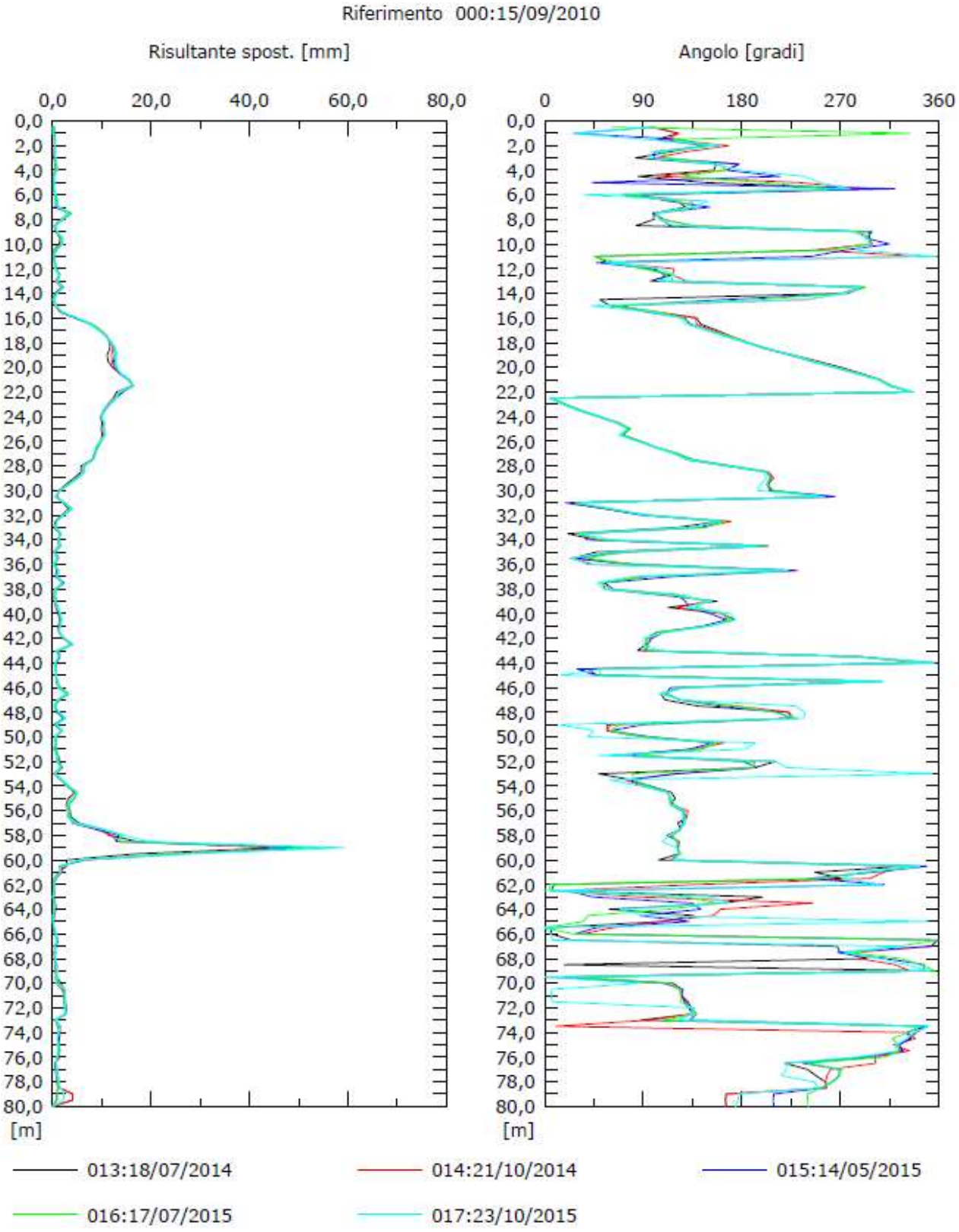
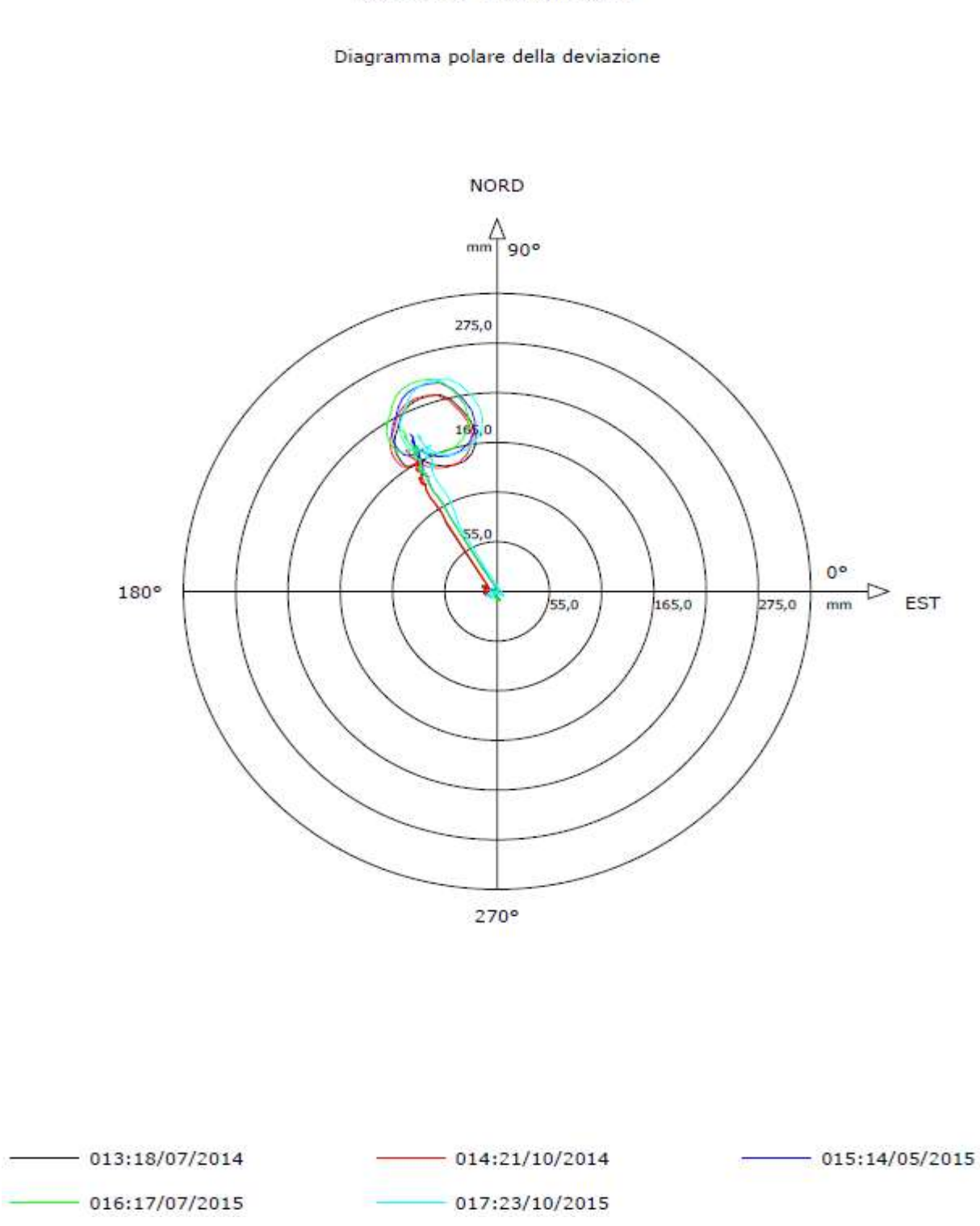


GRAFICO 8.117- DIAGRAMMA POLARE DELLA DEVIAZIONE DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE INTEGRALE DAL BASSO, ANNO 2014-2015, COLONNA I4 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)



8.3.6 Colonna I5

GRAFICO 8.118- CURVA RISULTANTE DEGLI SPOSTAMENTI E ANGOLO DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE INTEGRALE DAL BASSO, ANNO 2014-2015, COLONNA I5, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

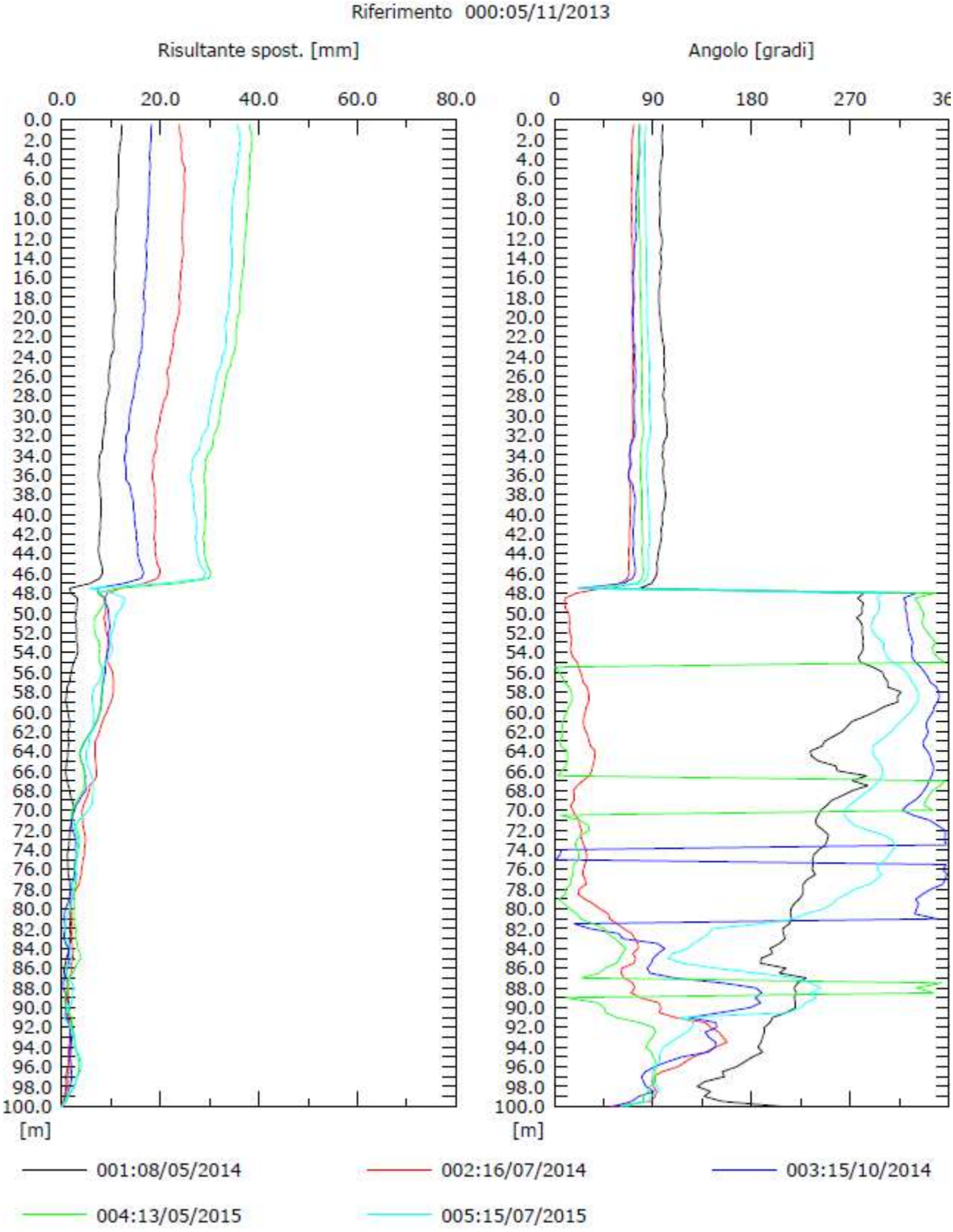


GRAFICO 8.119- CURVA RISULTANTE DEGLI SPOSTAMENTI ESPRESSA IN MILLIMETRI E ANGOLO ESPRESSO IN GRADI DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE DIFFERENZIALE LOCALE DAL BASSO, ANNO 2014-2015, COLONNA I5, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

GRAFICO 8.120- DIAGRAMMA POLARE DELLA DEVIAZIONE DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE INTEGRALE DAL BASSO, ANNO 2014-2015, COLONNA I5 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

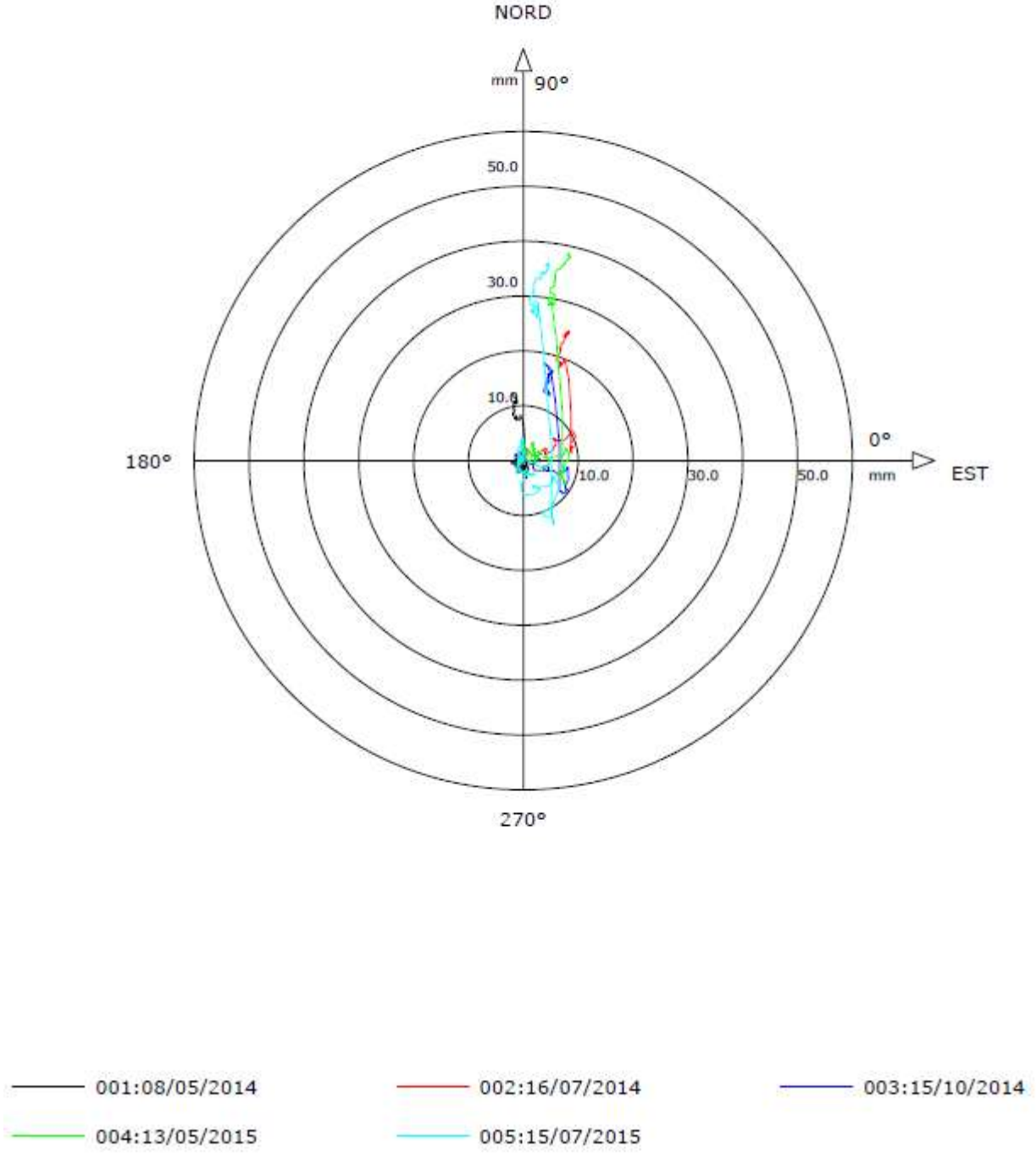


GRAFICO 8.121- CURVA RISULTANTE DEGLI SPOSTAMENTI E ANGOLO DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE INTEGRALE DAL BASSO, ANNO 2015-2017, COLONNA I5, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

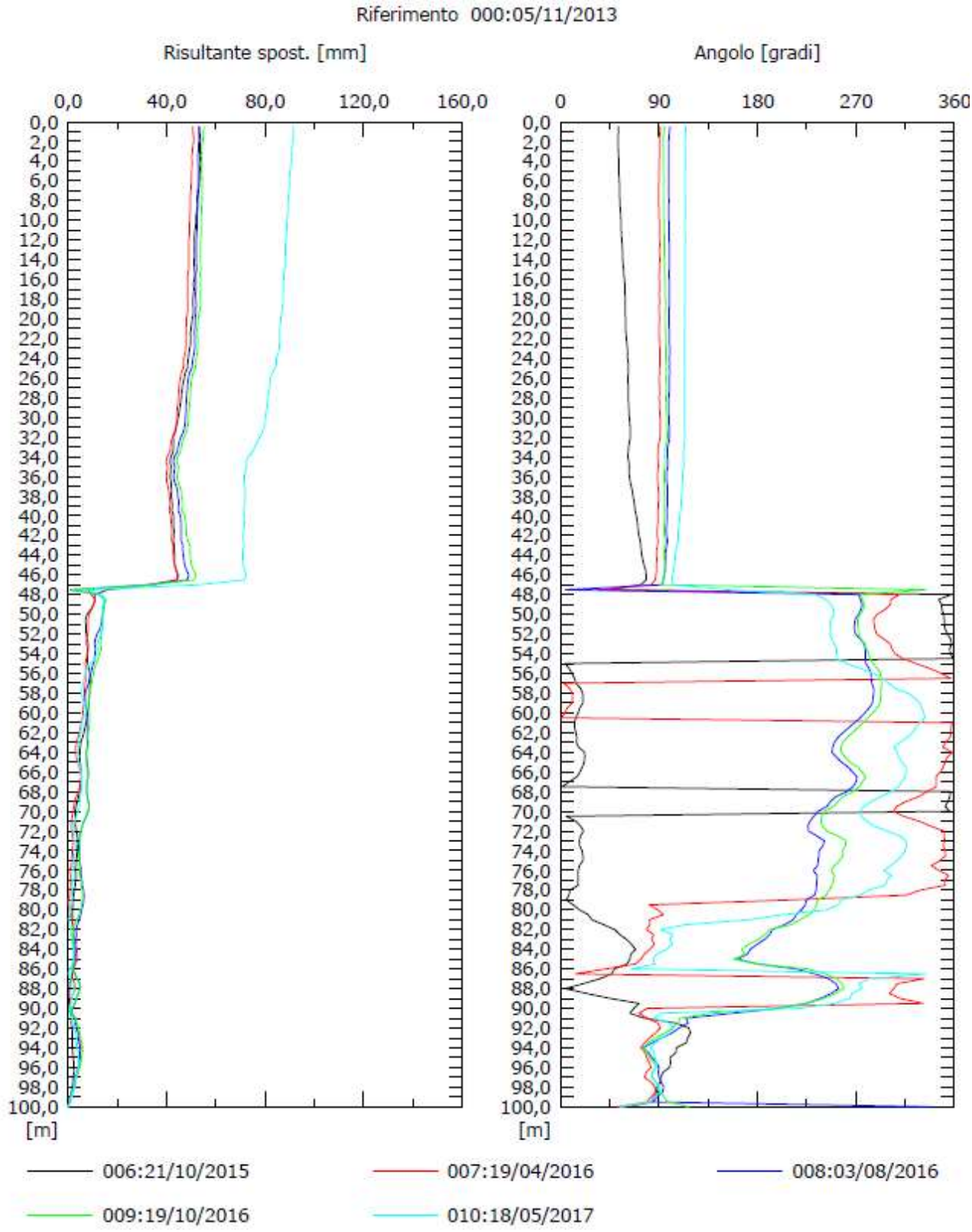


GRAFICO 8.122- CURVA RISULTANTE DEGLI SPOSTAMENTI ESPRESSA IN MILLIMETRI E ANGOLO ESPRESSO IN GRADI DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE DIFFERENZIALE LOCALE DAL BASSO, ANNO 2015-2017, COLONNA I5, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

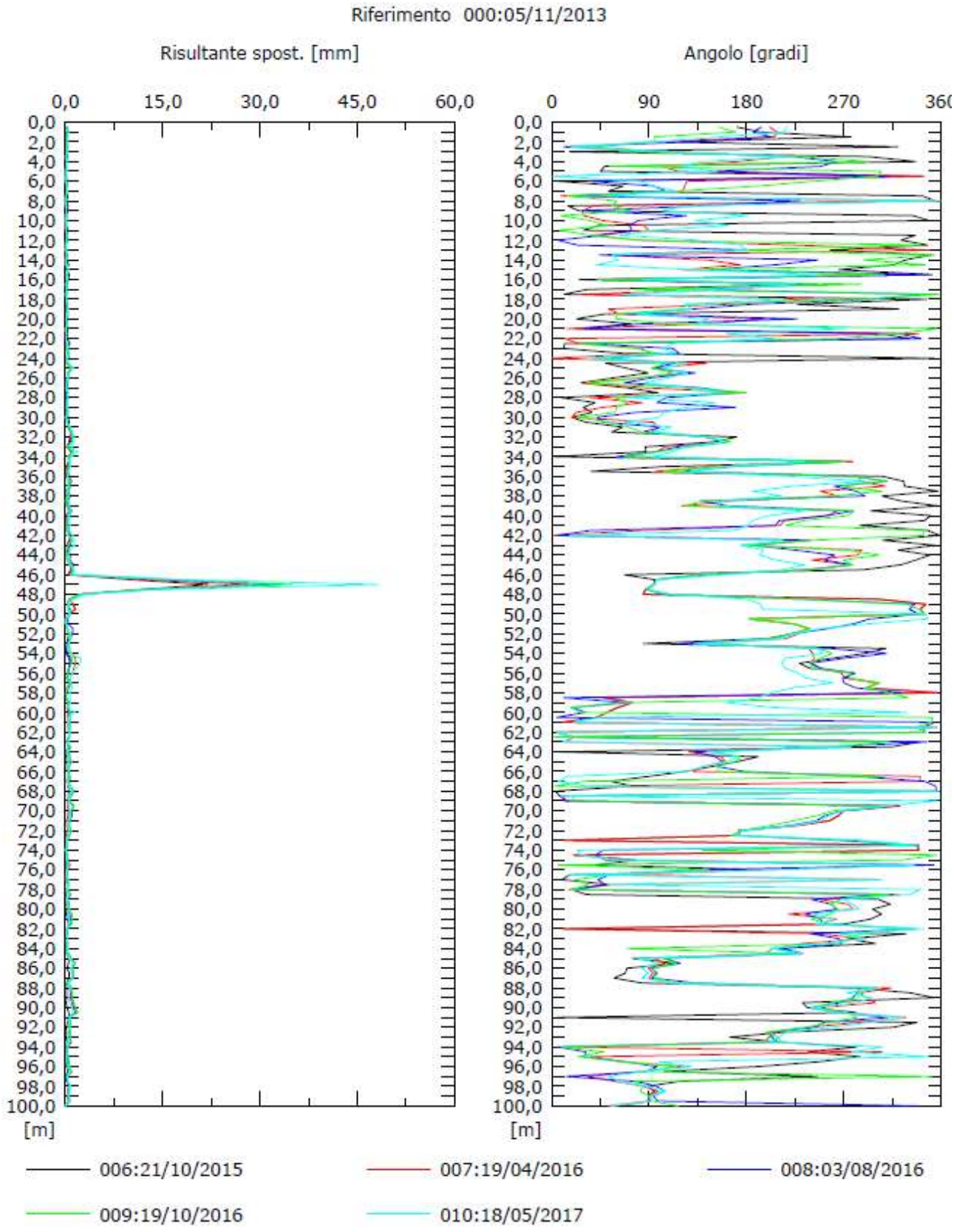


GRAFICO 8.123- DIAGRAMMA POLARE DELLA DEVIAZIONE DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE INTEGRALE DAL BASSO, ANNO 2015-2017, COLONNA I5 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

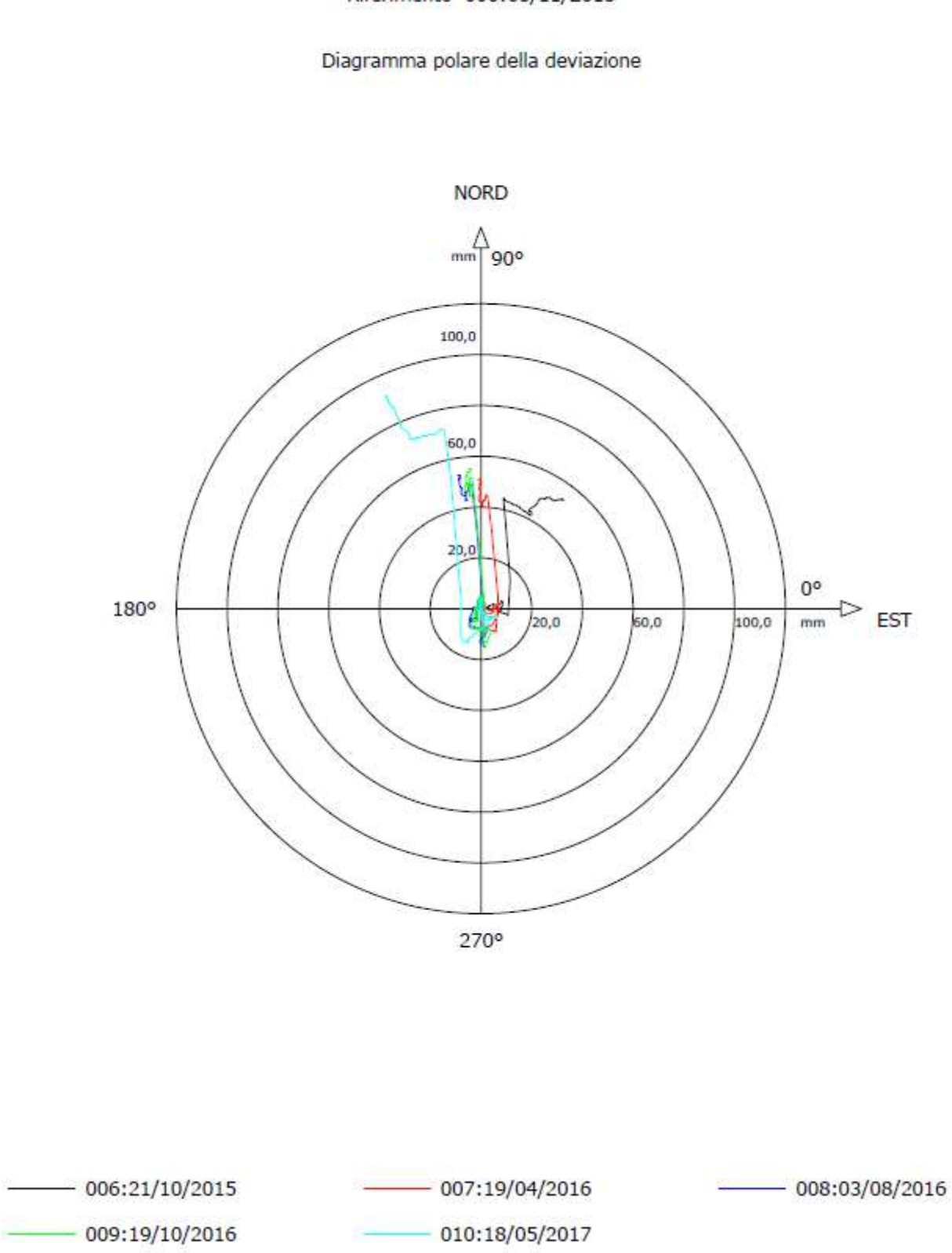


GRAFICO 8.124- CURVA RISULTANTE DEGLI SPOSTAMENTI E ANGOLO DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE INTEGRALE DAL BASSO, ANNO 2016-2018, COLONNA I5, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

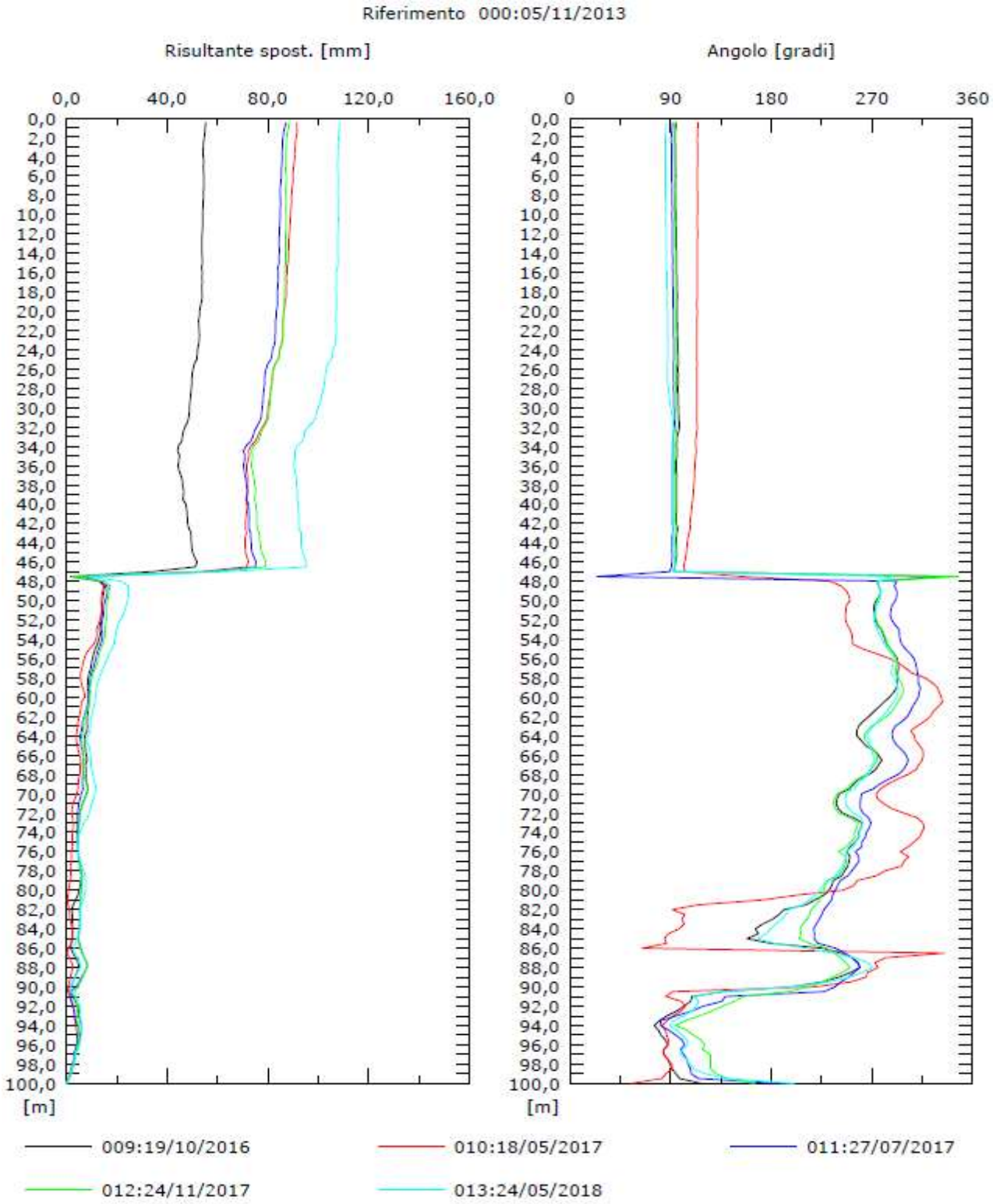


GRAFICO 8.125- CURVA RISULTANTE DEGLI SPOSTAMENTI ESPRESSA IN MILLIMETRI E ANGOLO ESPRESSO IN GRADI DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE DIFFERENZIALE LOCALE DAL BASSO, ANNO 2016-2018, COLONNA I5, (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

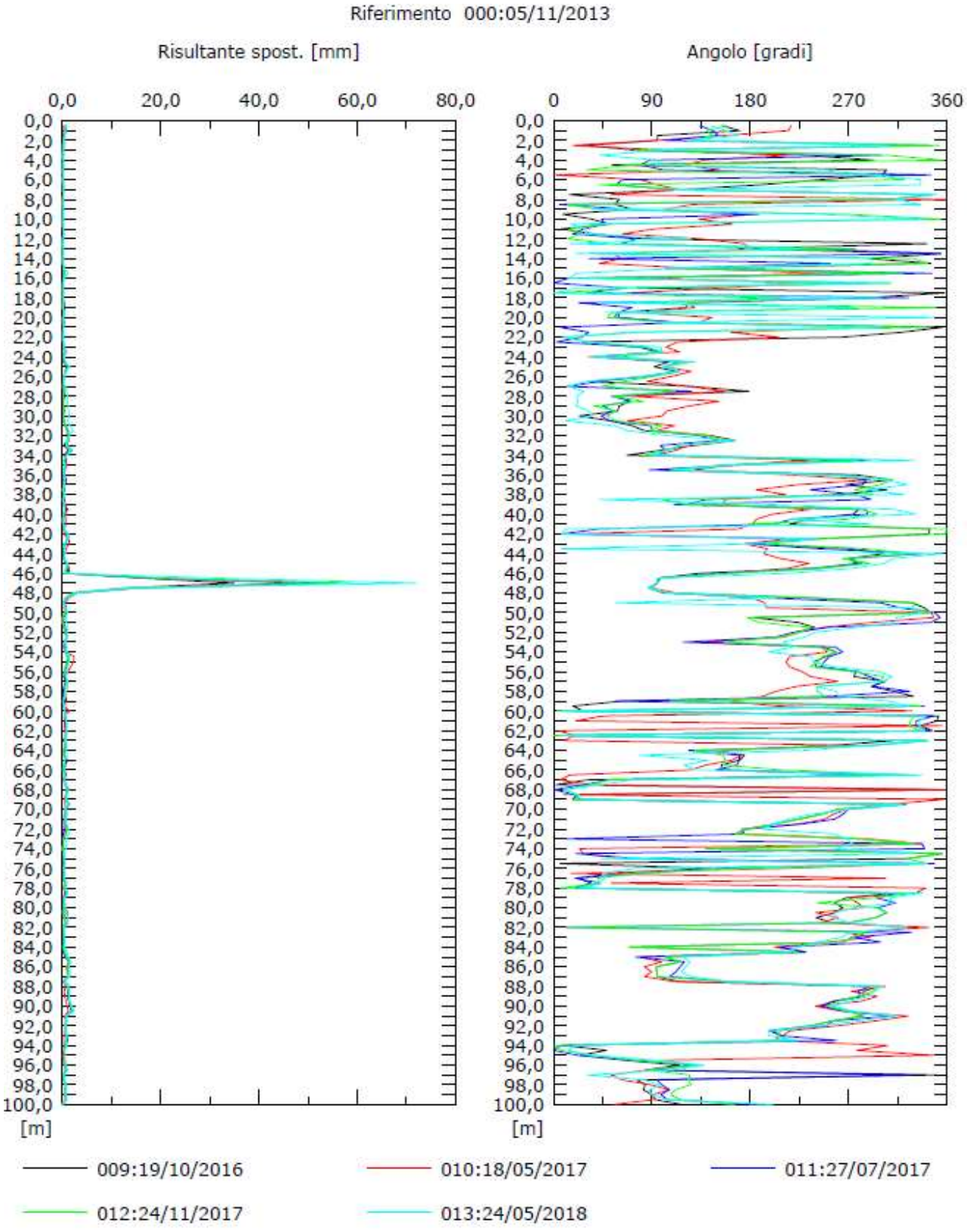
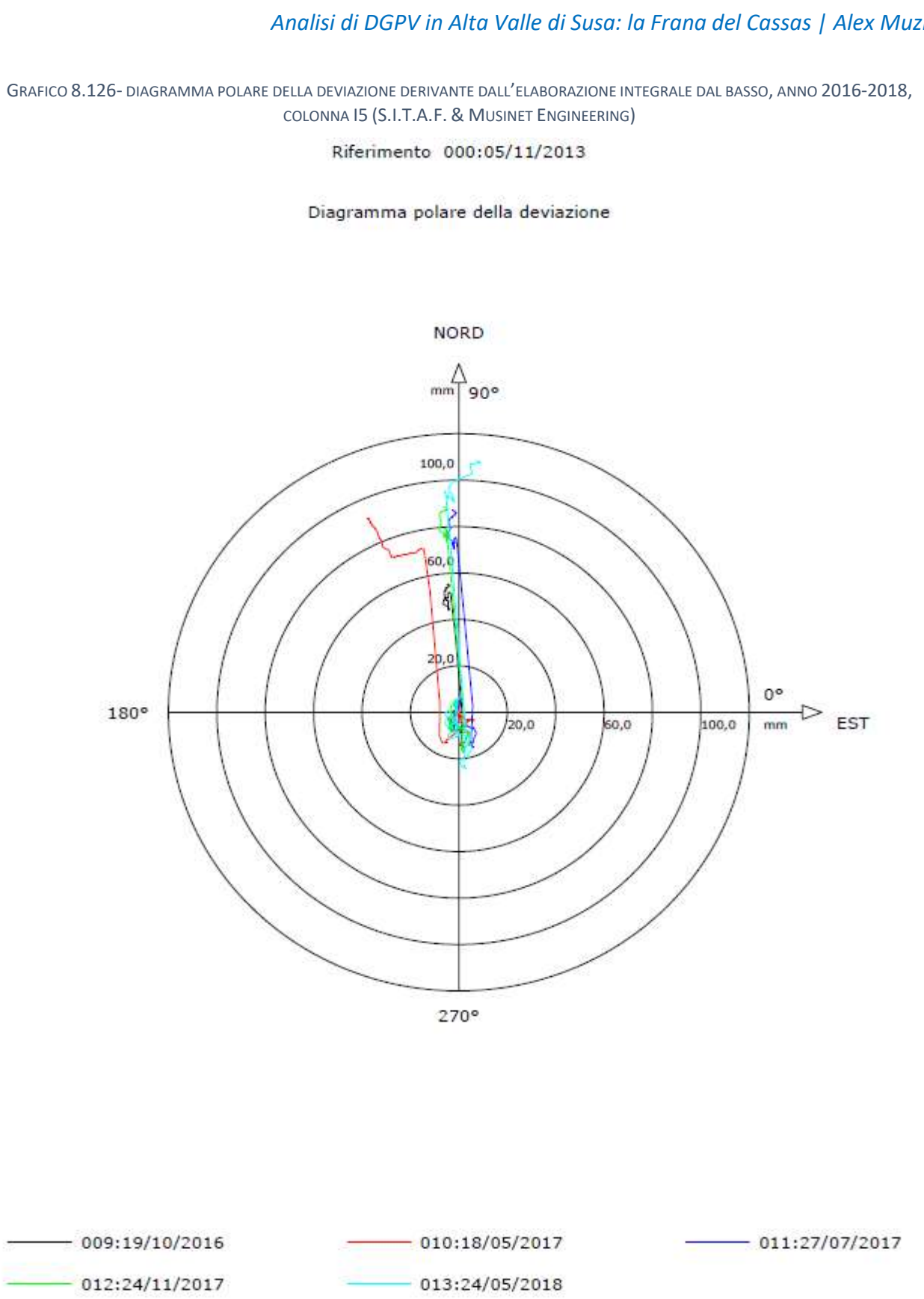


GRAFICO 8.126- DIAGRAMMA POLARE DELLA DEVIAZIONE DERIVANTE DALL'ELABORAZIONE INTEGRALE DAL BASSO, ANNO 2016-2018, COLONNA I5 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)



8.4 Allegato IV: correlazione tra dati inclinometrici e idrogeologici

8.4.1 Colonna DMS-I3, anno 2015

GRAFICO 8.127-COLONNA DMS I3, SPOSTAMENTO CUMULATO A PROFONDITÀ 46-47M, DIREZIONE 315°N, ANNO 2015 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

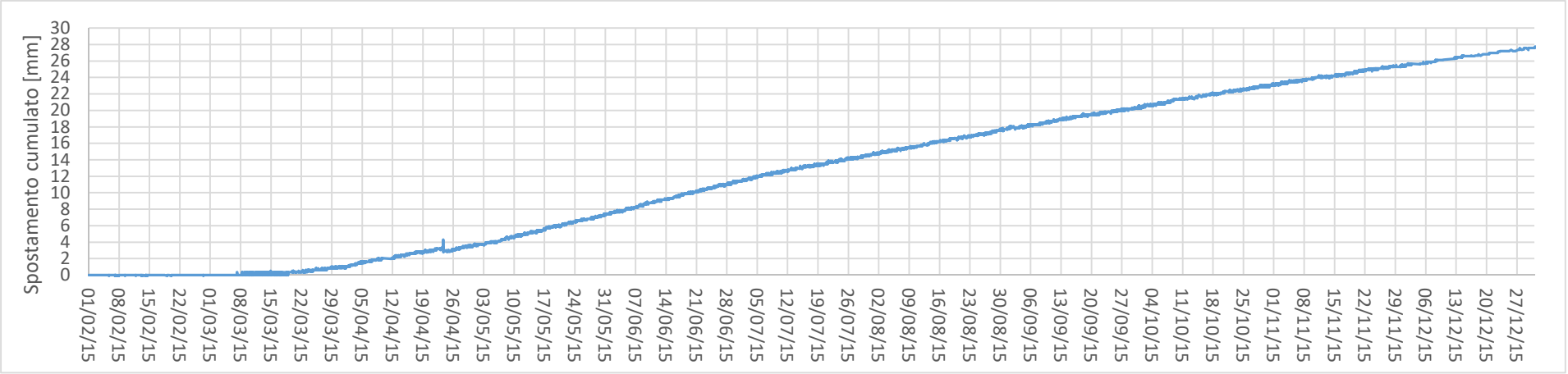


GRAFICO 8.128-COLONNA DMS I3, ANALISI DELLA CURVA DI SPOSTAMENTO CUMULATO A PROFONDITÀ 46-47M, DIREZIONE 315°N, ANNO 2015

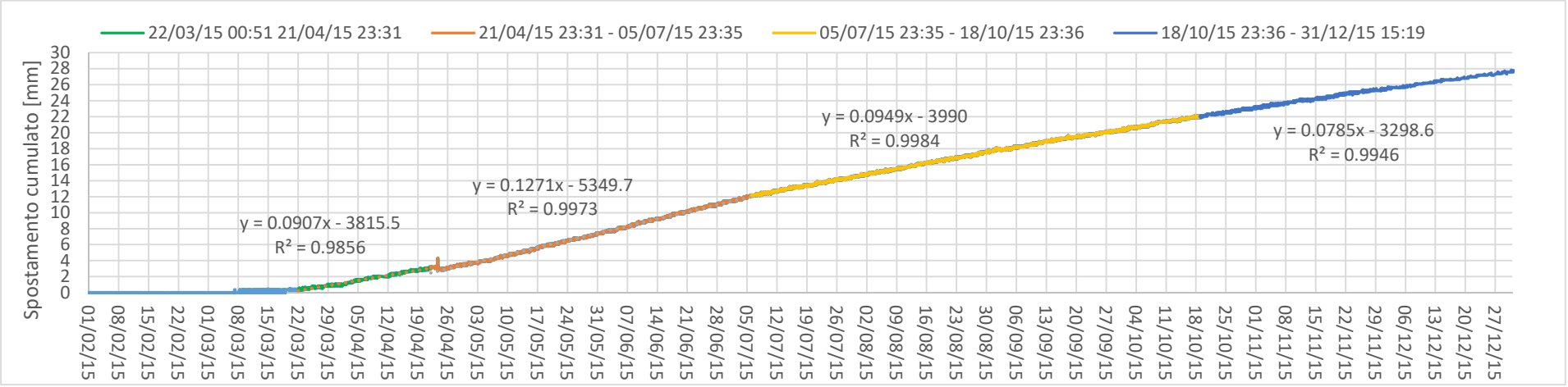


GRAFICO 8.129-SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I3 ZONA 46-47M VS SOGGIACENZA DI PZS2 ANNO 2015 (PERIODO GENNAIO – AGOSTO)

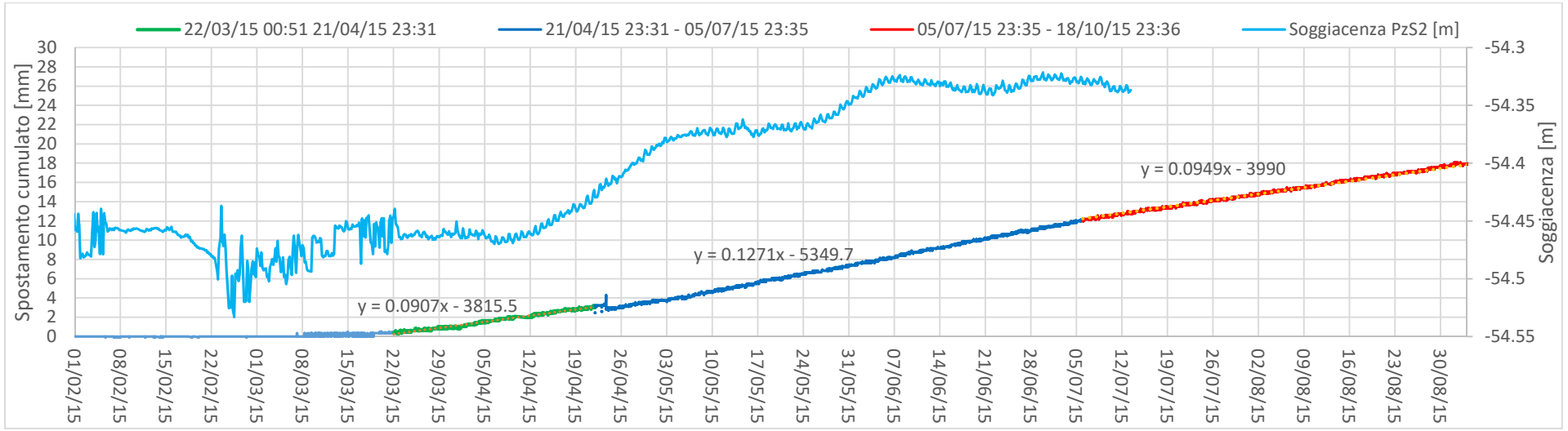


GRAFICO 8.130- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I3 ZONA 46-47M VS SOGGIACENZA DI PZ4 ANNO 2015 (PERIODO GENNAIO – LUGLIO)

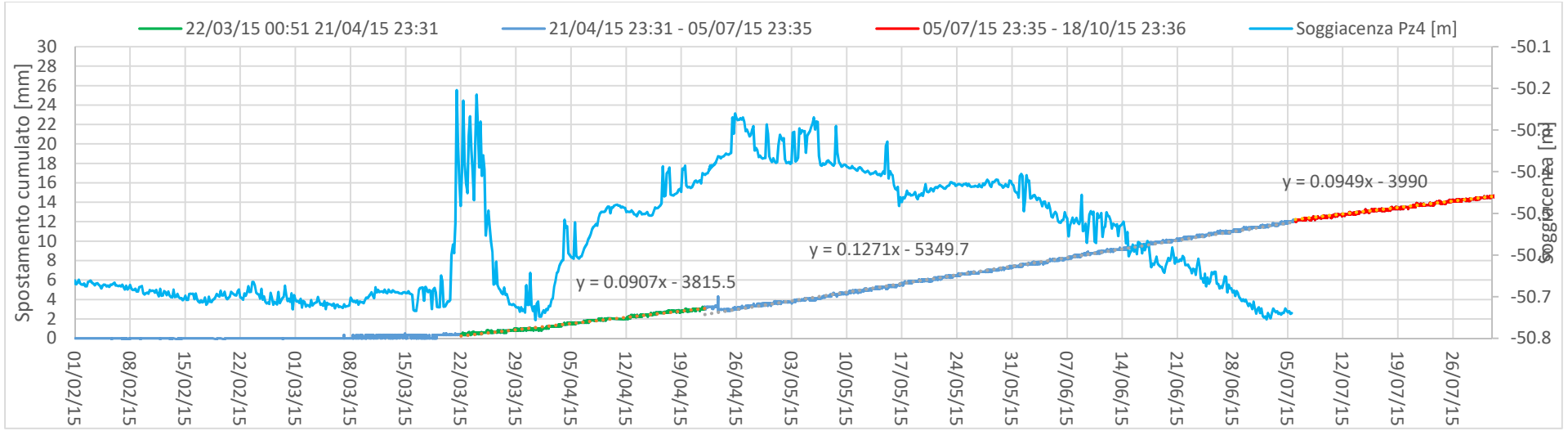


GRAFICO 8.131- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I3 ZONA 46-47M VS SOGGIACENZA DI PZ6 ANNO 2015 (PERIODO GENNAIO – LUGLIO)

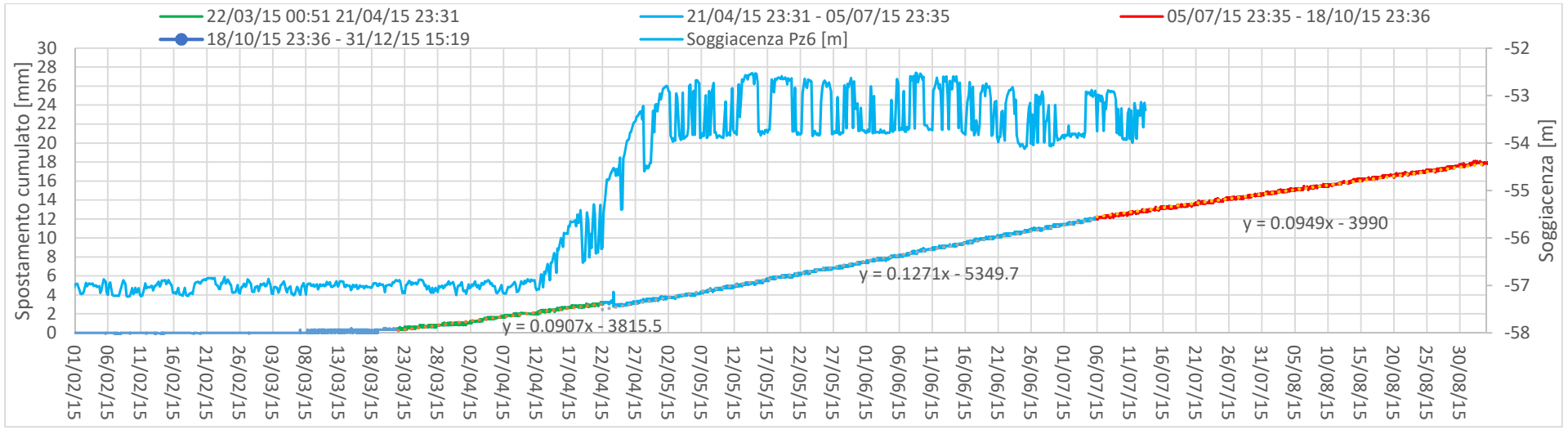
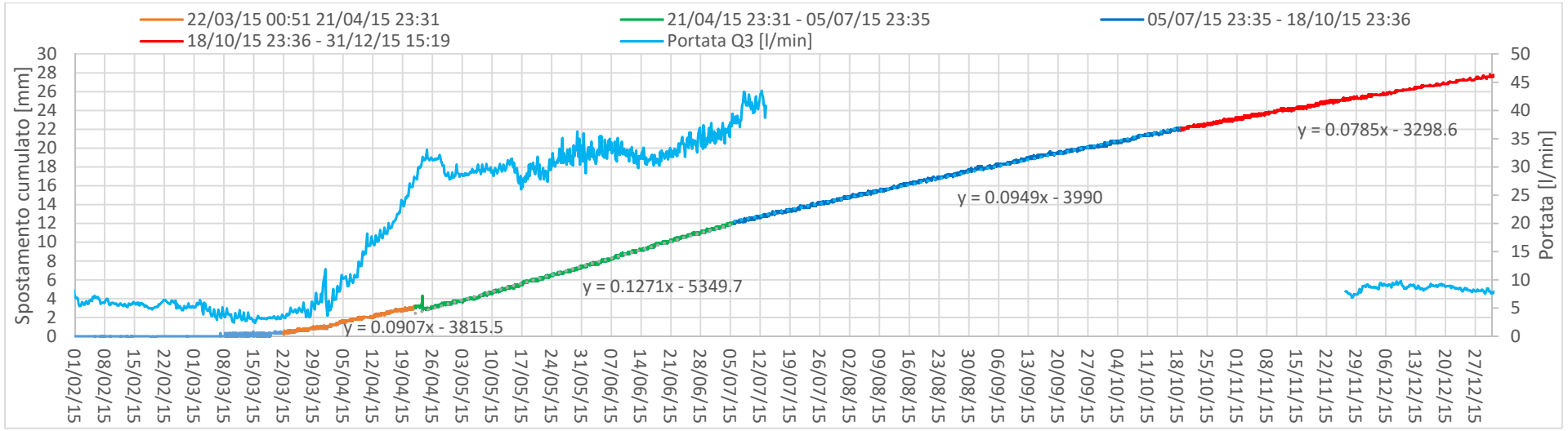


GRAFICO 8.132- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I3 ZONA 46-47M VS PORTATA DI Q3 ANNO 2015



8.4.2 Colonna DMS-I3, periodo gennaio-ottobre 2016

GRAFICO 8.133- COLONNA DMS I3, SPOSTAMENTO CUMULATO A PROFONDITÀ 46-47M, DIREZIONE 315°N, PERIODO GENNAIO – OTTOBRE 2016 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

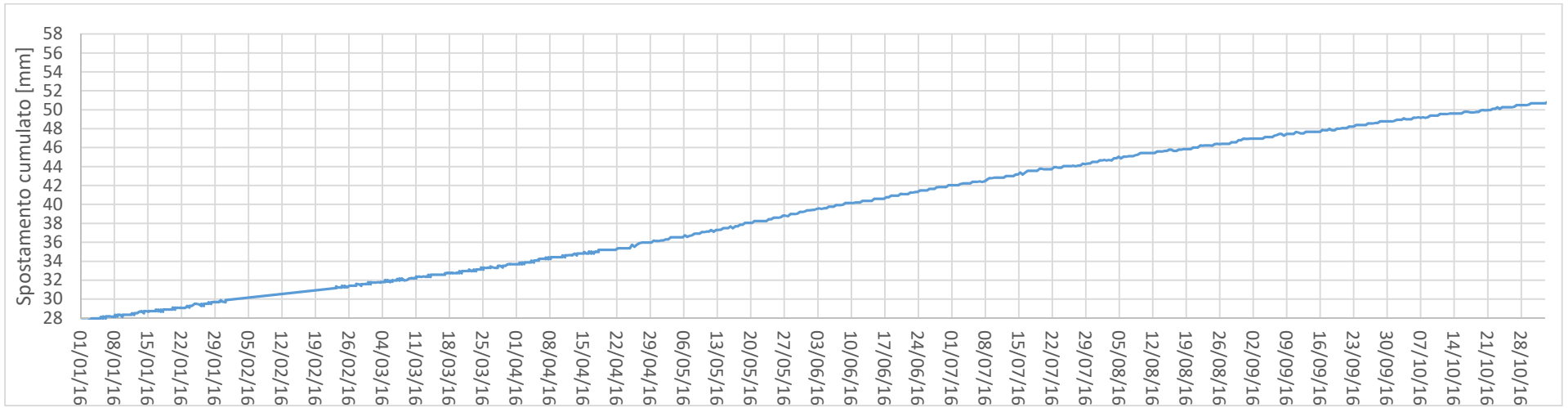


GRAFICO 8.134- COLONNA DMS I3, ANALISI DELLA CURVA DI SPOSTAMENTO CUMULATO A PROFONDITÀ 46-47M, DIREZIONE 315°N, PERIODO GENNAIO – OTTOBRE 2016

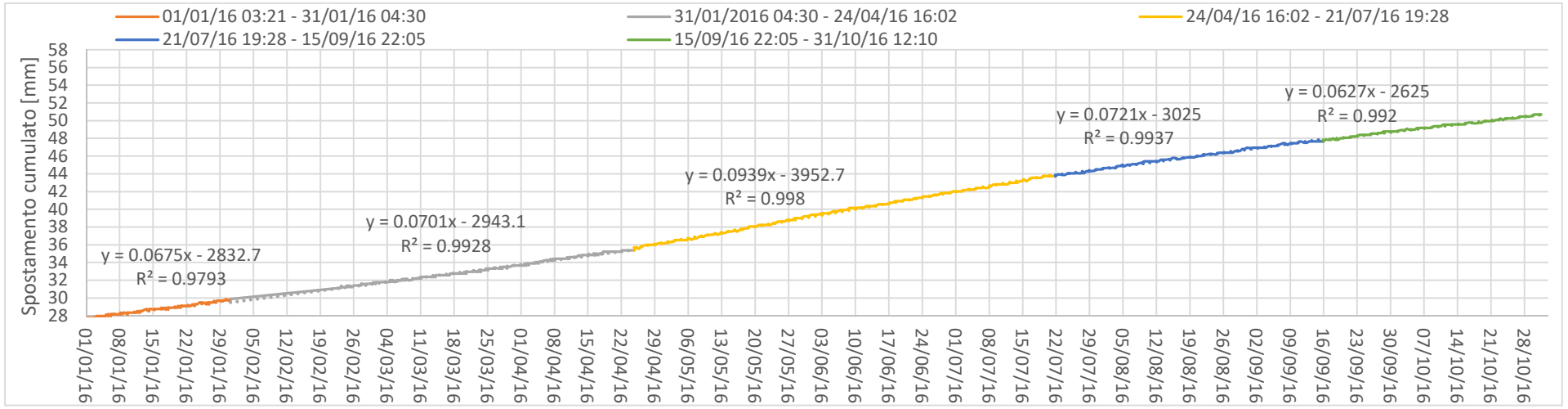


GRAFICO 8.135- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I3 ZONA 46-47M VS SOGGIACENZA DI PZS2 PERIODO APRILE-OTTOBRE 2016

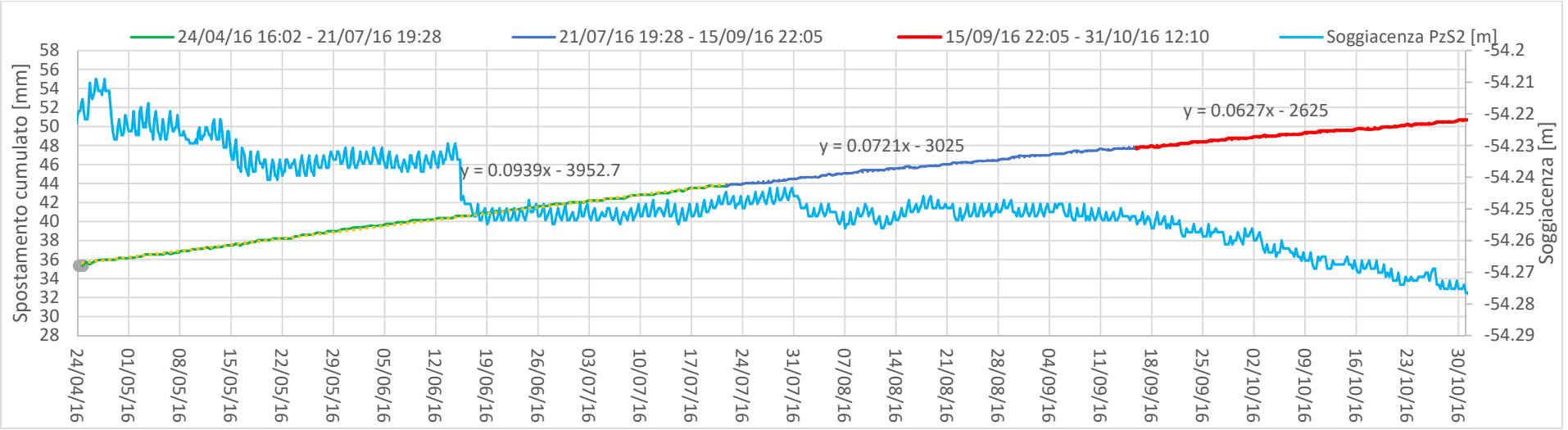


GRAFICO 8.136- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I3 ZONA 46-47M VS SOGGIACENZA DI PZ4 PERIODO APRILE – OTTOBRE 2016

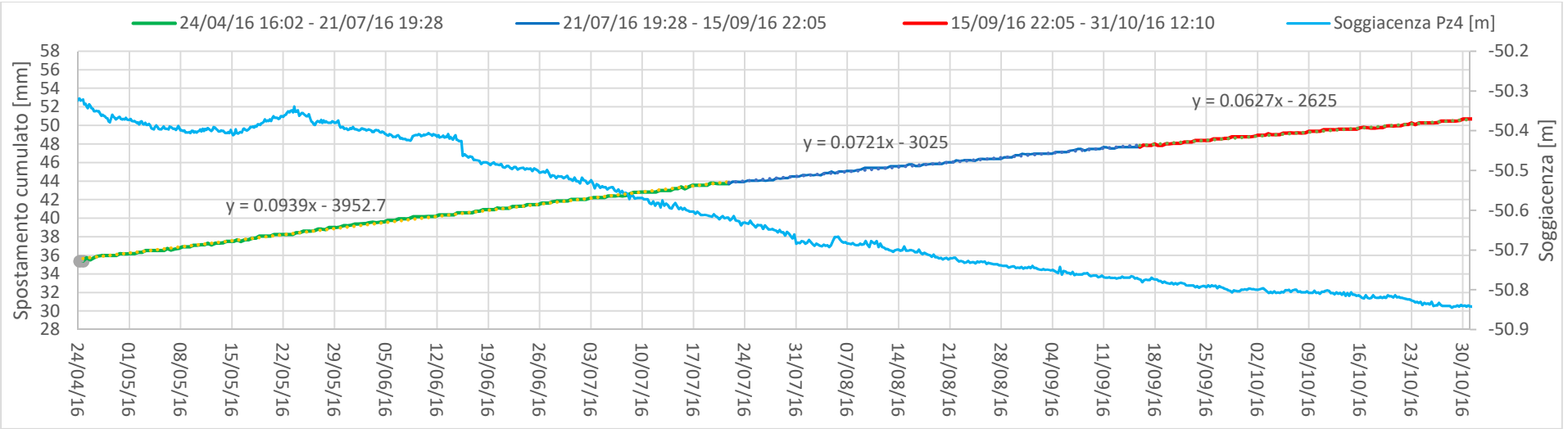


GRAFICO 8.137- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I3 ZONA 46-47M VS SOGGIACENZA DI PZS6 PERIODO APRILE-OTTOBRE 2016

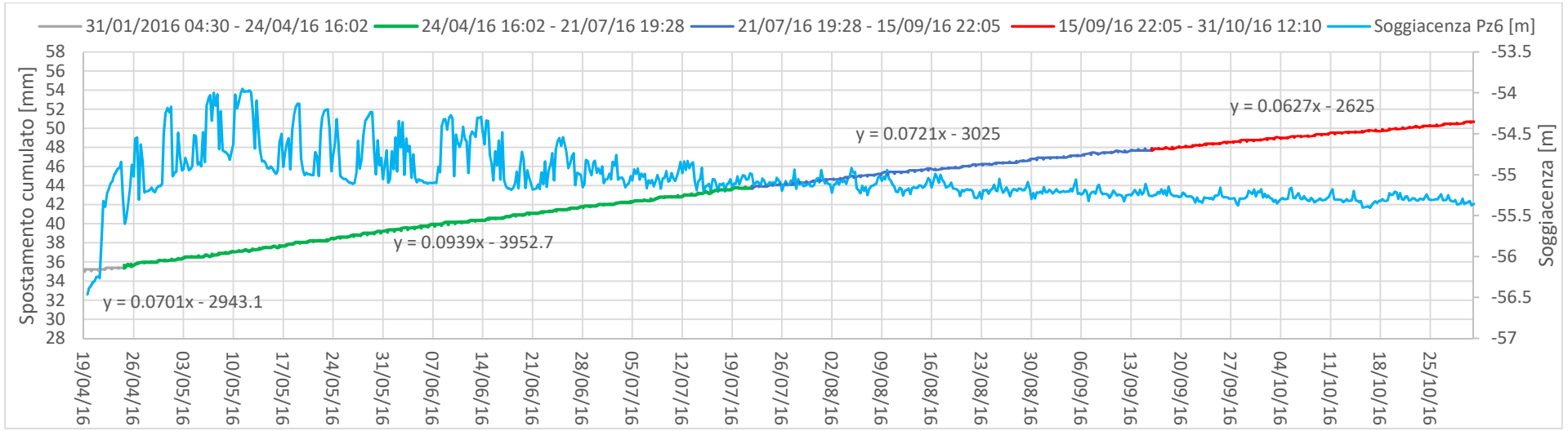
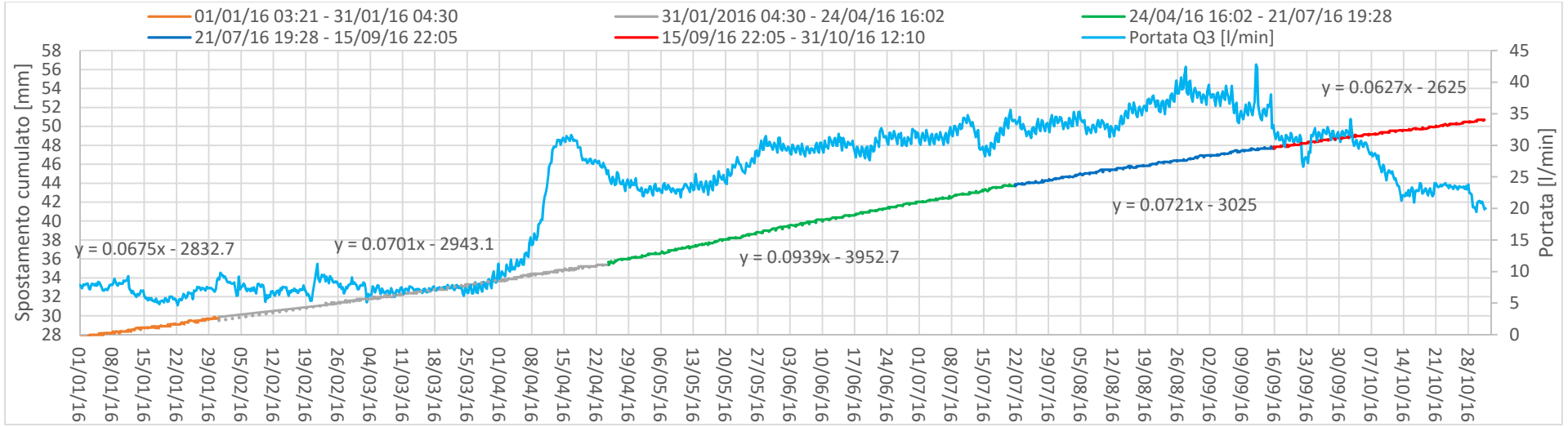


GRAFICO 8.138- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I3 ZONA 46-47M VS PORTATA DI Q3 PERIODO GENNAIO-OTTOBRE 2016



8.4.3 Colonna DMS-I3, periodo novembre 2016 - dicembre 2017

GRAFICO 8.139- COLONNA DMS I3, SPOSTAMENTO CUMULATO A PROFONDITÀ 46-47M, DIREZIONE 315°N, PERIODO NOVEMBRE 2016 – DICEMBRE 2017 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

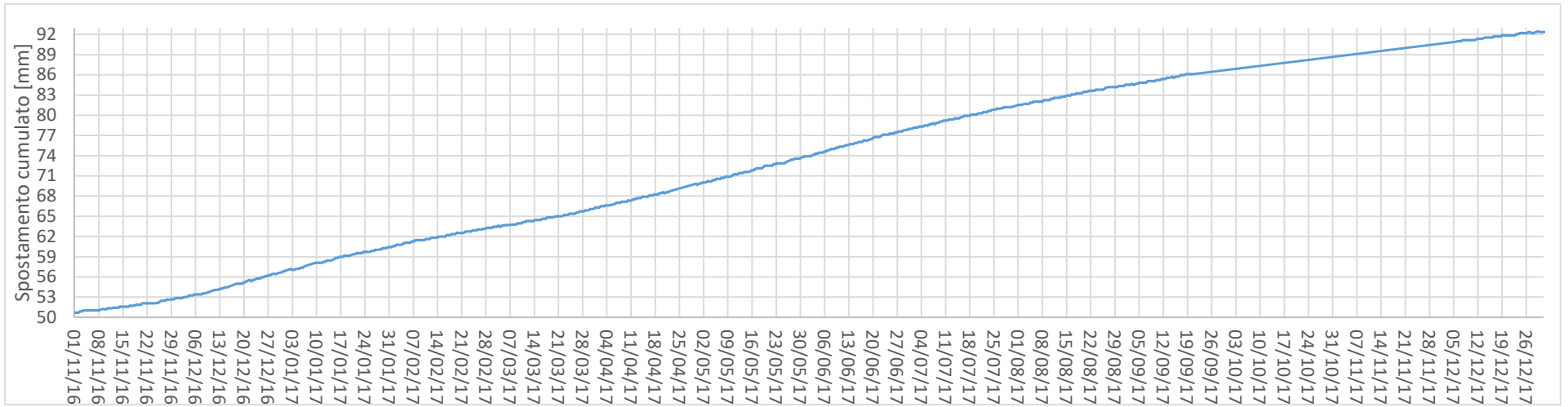


GRAFICO 8.140- COLONNA DMS I3, ANALISI DELLA CURVA DI SPOSTAMENTO CUMULATO A PROFONDITÀ 46-47M, DIREZIONE 315°N, PERIODO NOVEMBRE 2016 – DICEMBRE 2017

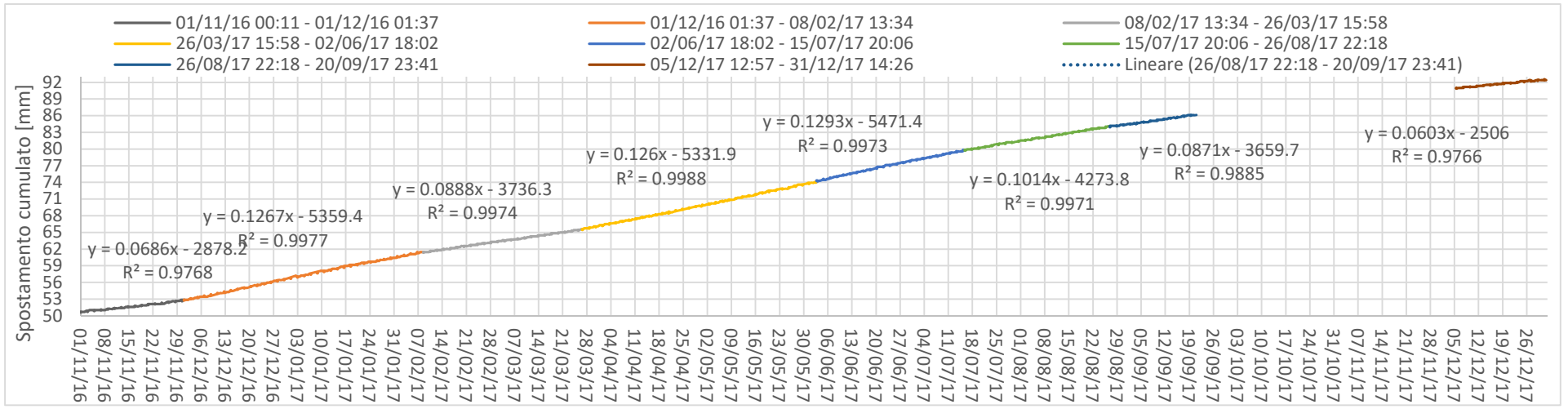


GRAFICO 8.141- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I3 ZONA 46-47M VS SOGGIACENZA DI PZS2 PERIODO NOVEMBRE 2016 DICEMBRE 2017

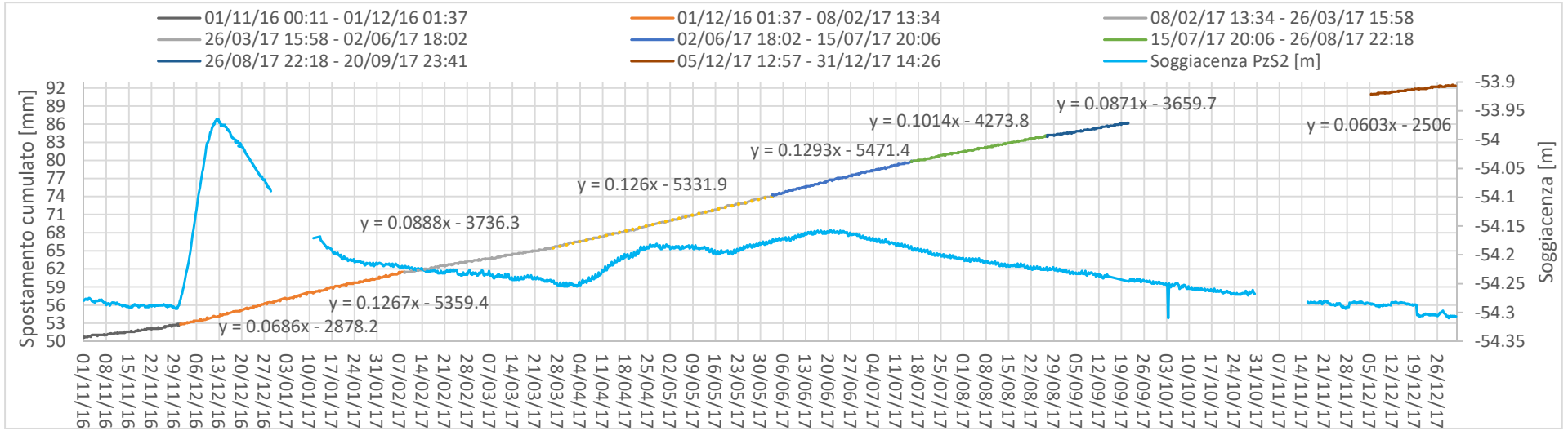


GRAFICO 8.142- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I3 ZONA 46-47M VS SOGGIACENZA DI PZ4 PERIODO NOVEMBRE 2016 DICEMBRE 2017

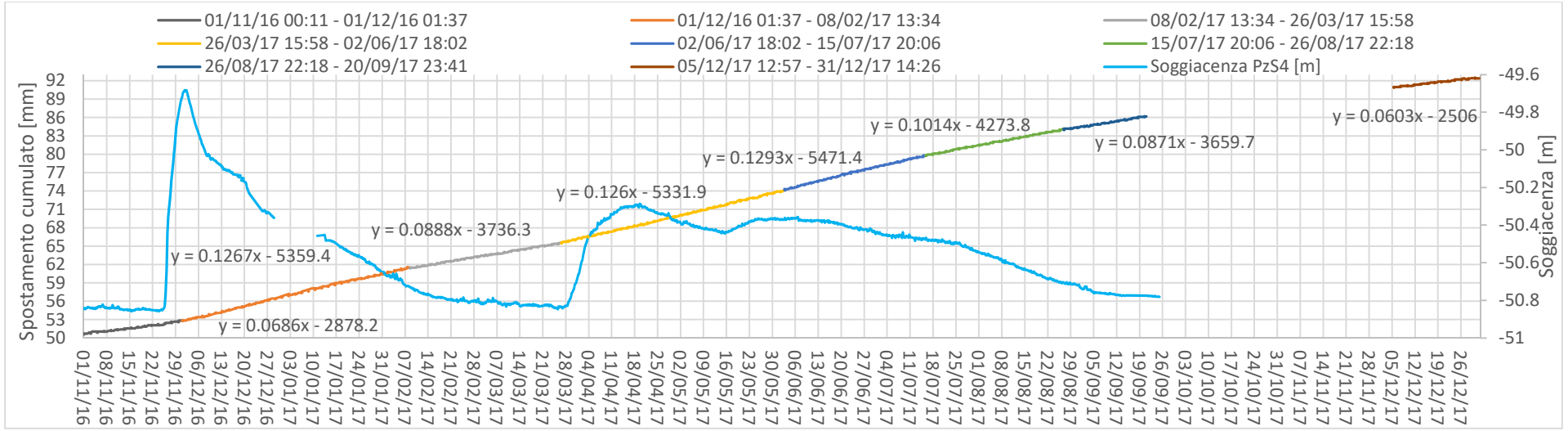


GRAFICO 8.143- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I3 ZONA 46-47M VS SOGGIACENZA DI PZ6 PERIODO NOVEMBRE 2016 DICEMBRE 2017

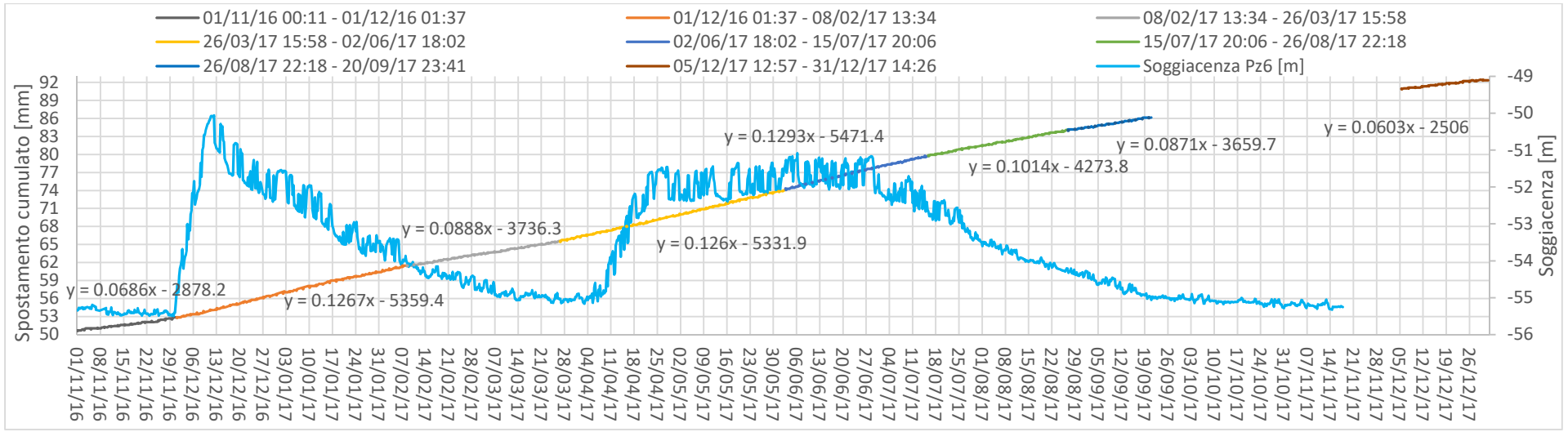
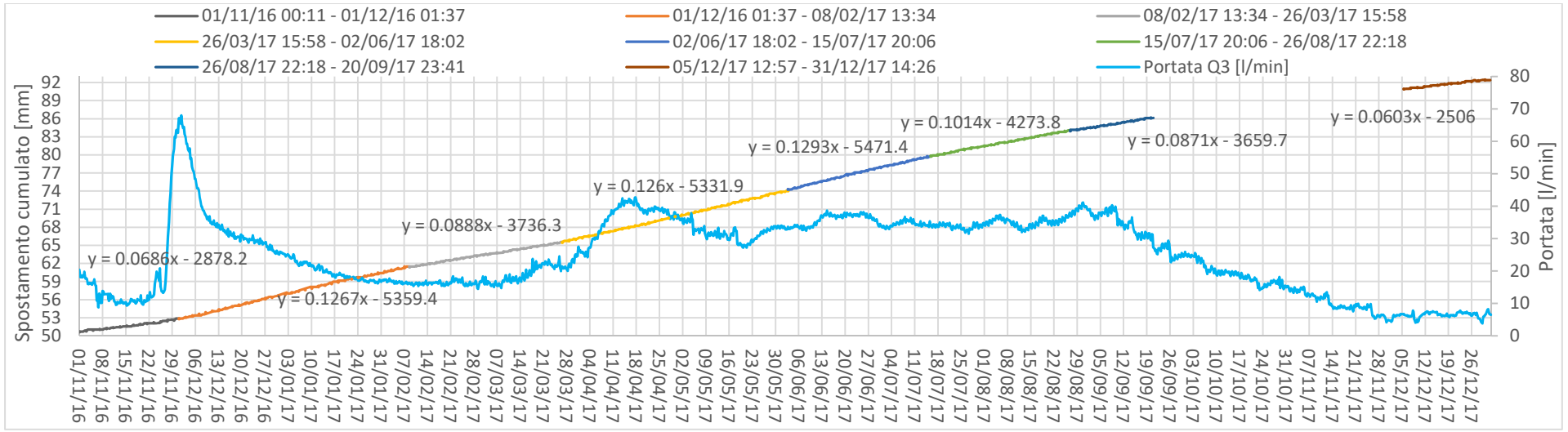


GRAFICO 8.144- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I3 ZONA 46-47M VS PORTATA DI Q3 PERIODO NOVEMBRE 2016 DICEMBRE 2017



8.4.4 Colonna DMS-I3, anno 2018

GRAFICO 8.145- COLONNA DMS I3, SPOSTAMENTO CUMULATO A PROFONDITÀ 46-47M, DIREZIONE 315°N, ANNO 2018 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

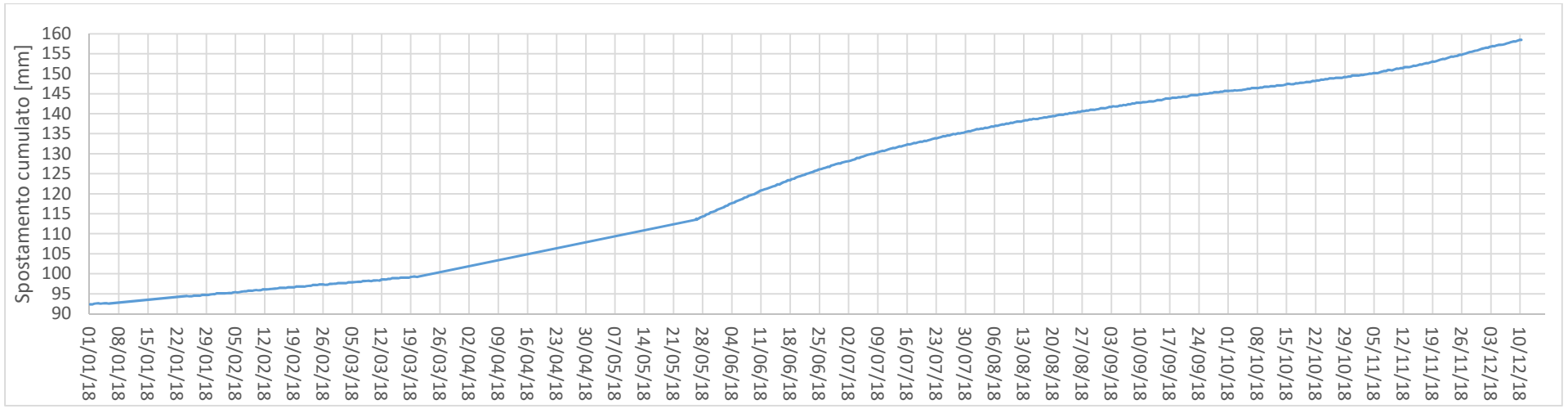


GRAFICO 8.146- COLONNA DMS I3, ANALISI DELLA CURVA DI SPOSTAMENTO CUMULATO A PROFONDITÀ 46-47M, DIREZIONE 315°N, ANNO 2018

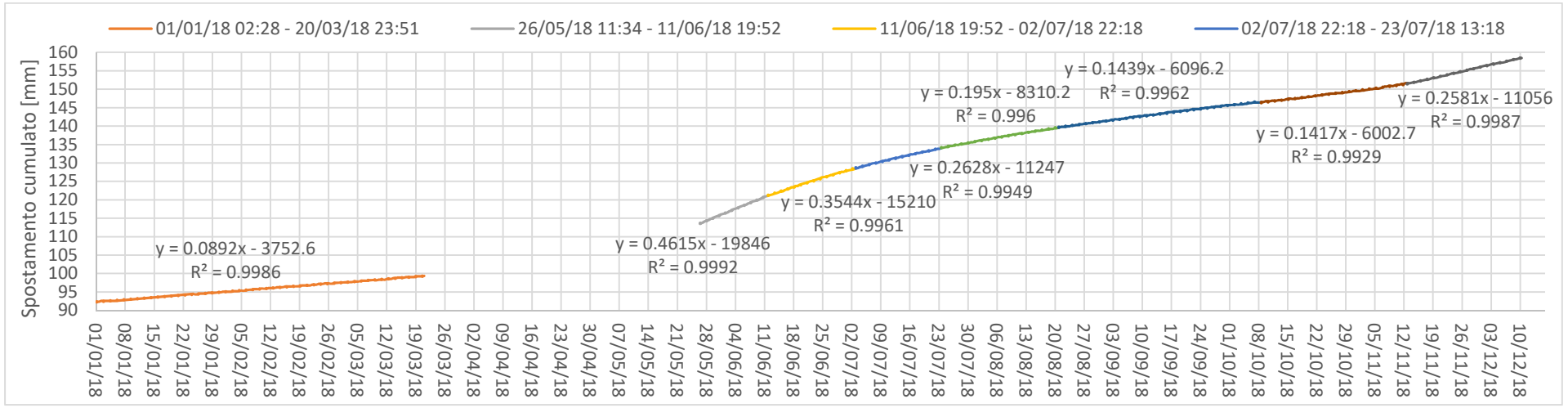


GRAFICO 8.147- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I3 ZONA 46-47M VS SOGGIACENZA DI PZS2, ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO – SETTEMBRE)

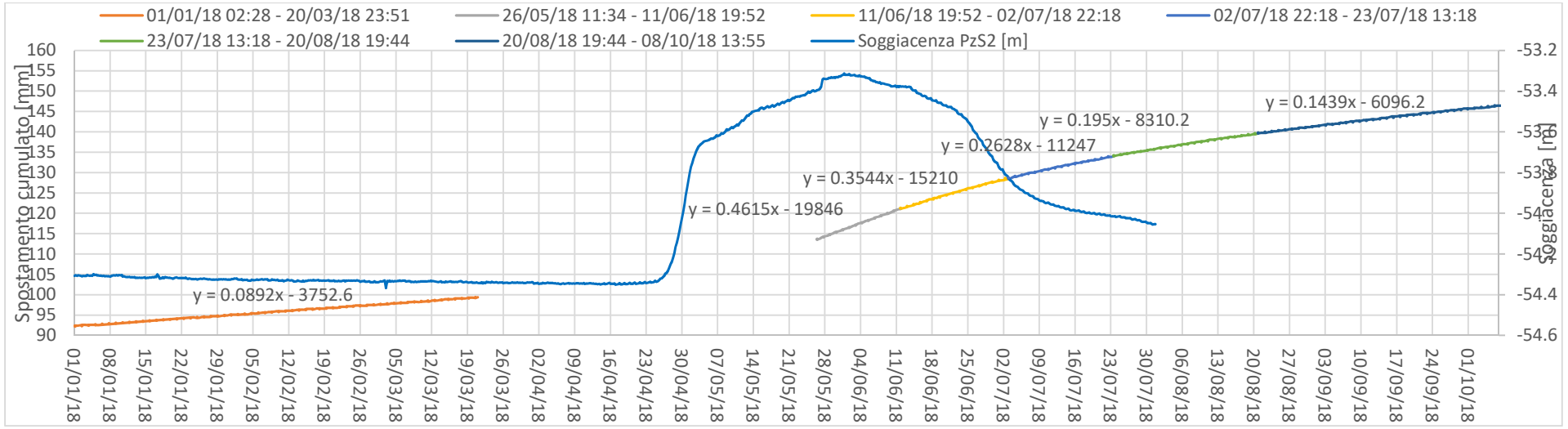


GRAFICO 8.148- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I3 ZONA 46-47M VS SOGGIACENZA DI PZ6 ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO – OTTOBRE)

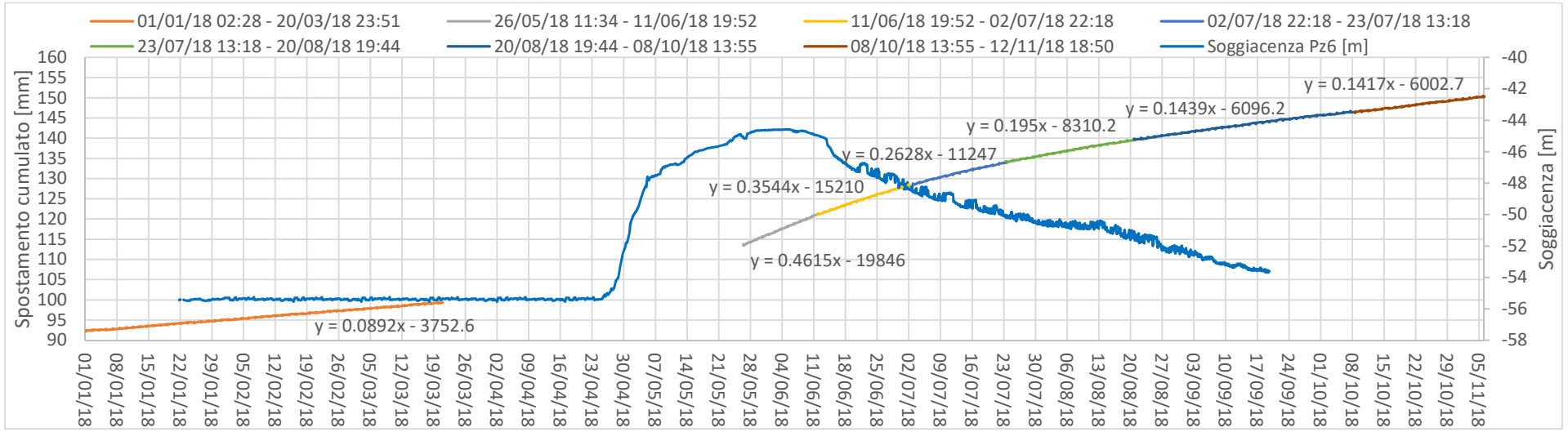


GRAFICO 8.149- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I3 ZONA 46-47M VS PORTATA DI Q3 ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO – OTTOBRE)

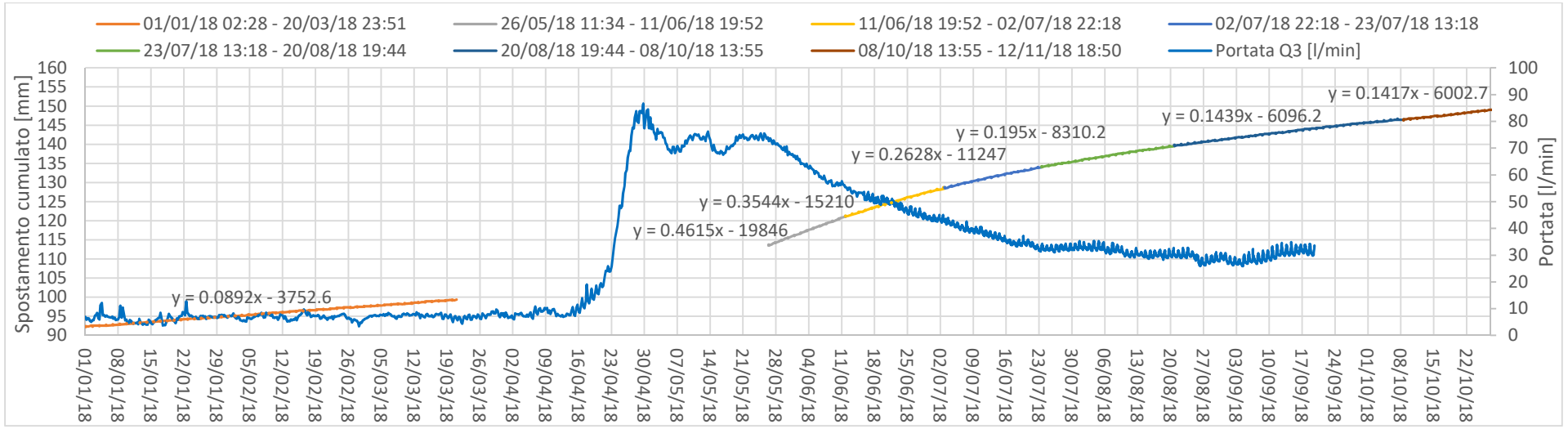
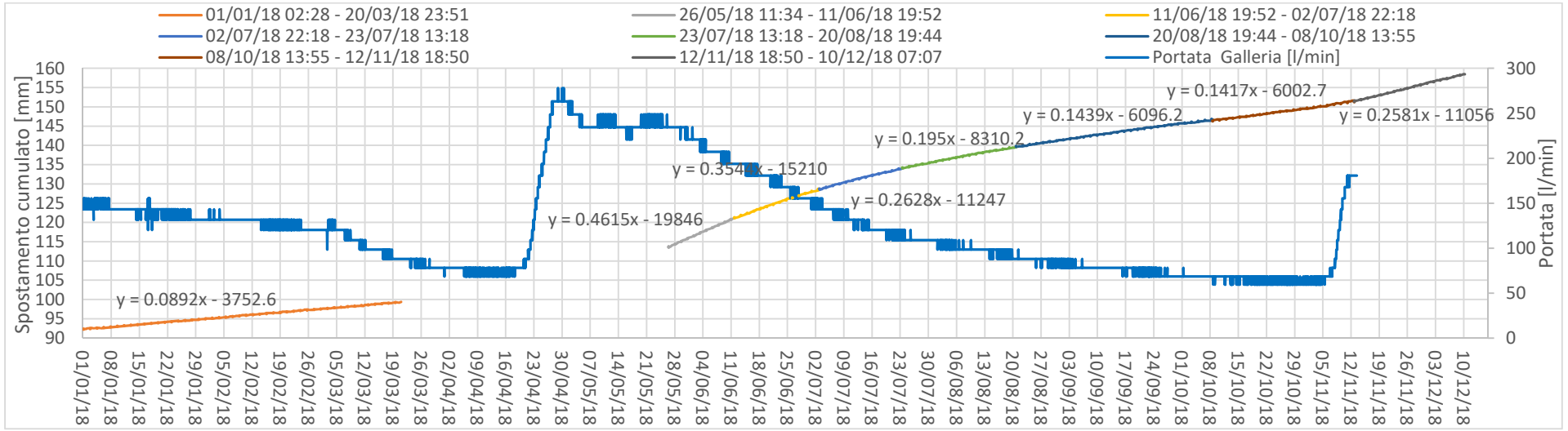


GRAFICO 8.150- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I3 ZONA 46-47M VS PORTATA IN GALLERIA ANNO 2018



8.4.5 Colonna DMS-I2, anno 2018

GRAFICO 8.151- COLONNA DMS I2, SPOSTAMENTO CUMULATO A PROFONDITÀ 11-16M, DIREZIONE 330°N, ANNO 2018 (S.I.T.A.F. & MUSINET ENGINEERING)

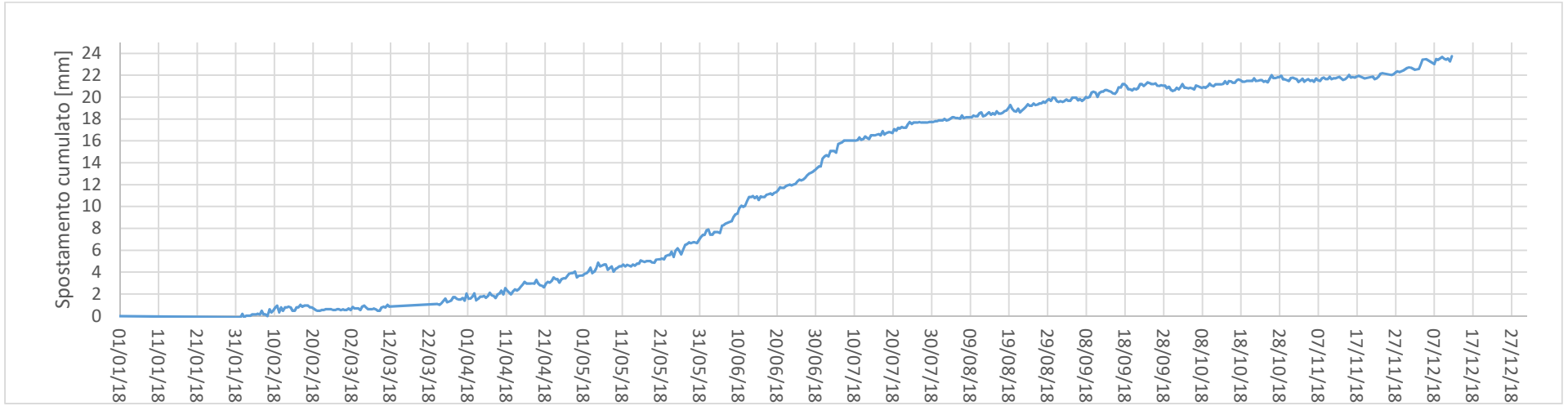


GRAFICO 8.152- COLONNA DMS I2, ANALISI DELLA CURVA DI SPOSTAMENTO CUMULATO A PROFONDITÀ 11-16M, DIREZIONE 330°N, ANNO 2018

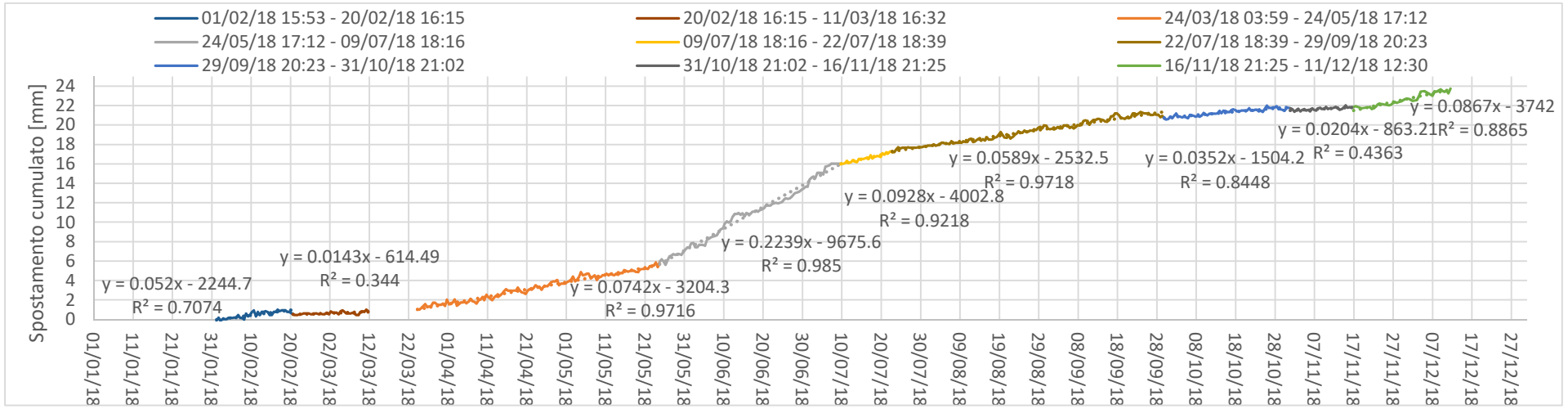


GRAFICO 8.153- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I2 ZONA 11-16M VS SOGGIACENZA DI PZCAS2 ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO – OTTOBRE)

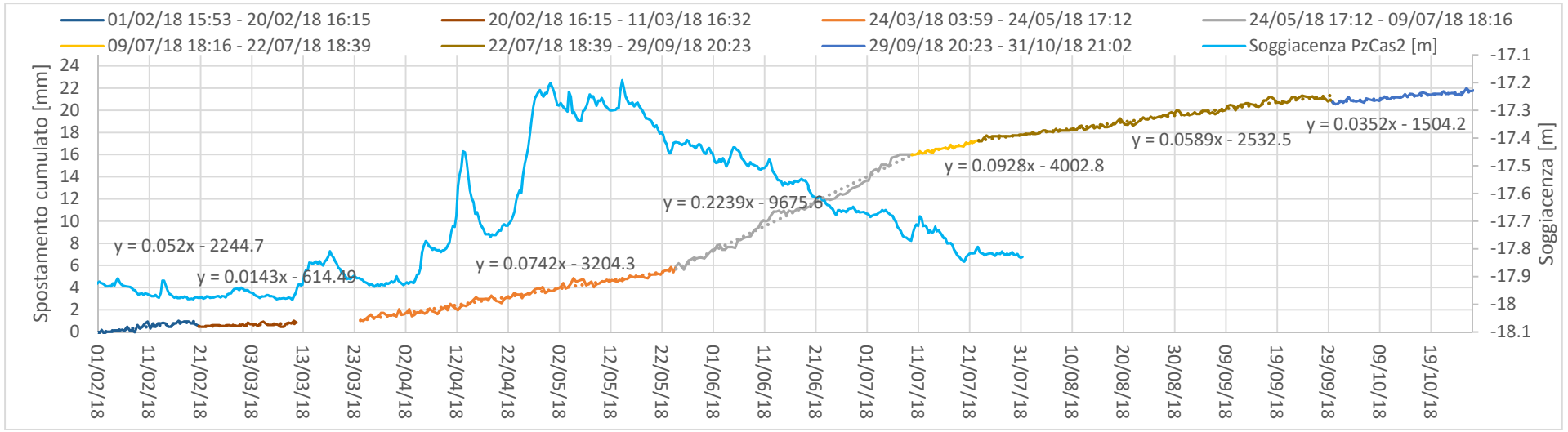


GRAFICO 8.154- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I2 ZONA 11-16M VS SOGGIACENZA DI PZ6 ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO – OTTOBRE)

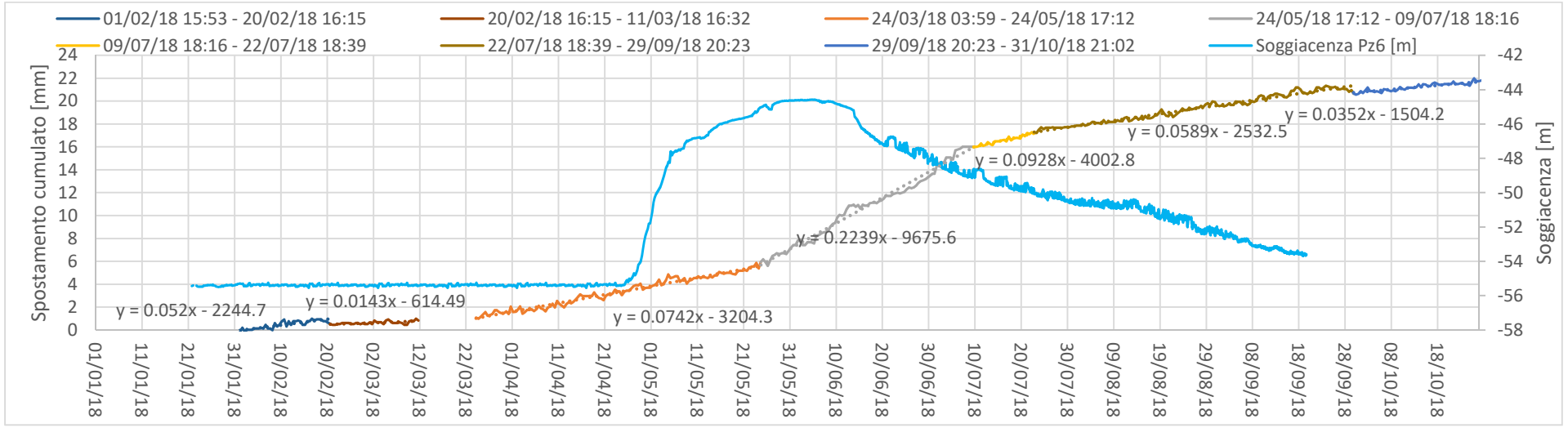


GRAFICO 8.155- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I2 ZONA 11-16M VS PORTATA DI Q3 ANNO 2018 (PERIODO GENNAIO – OTTOBRE)

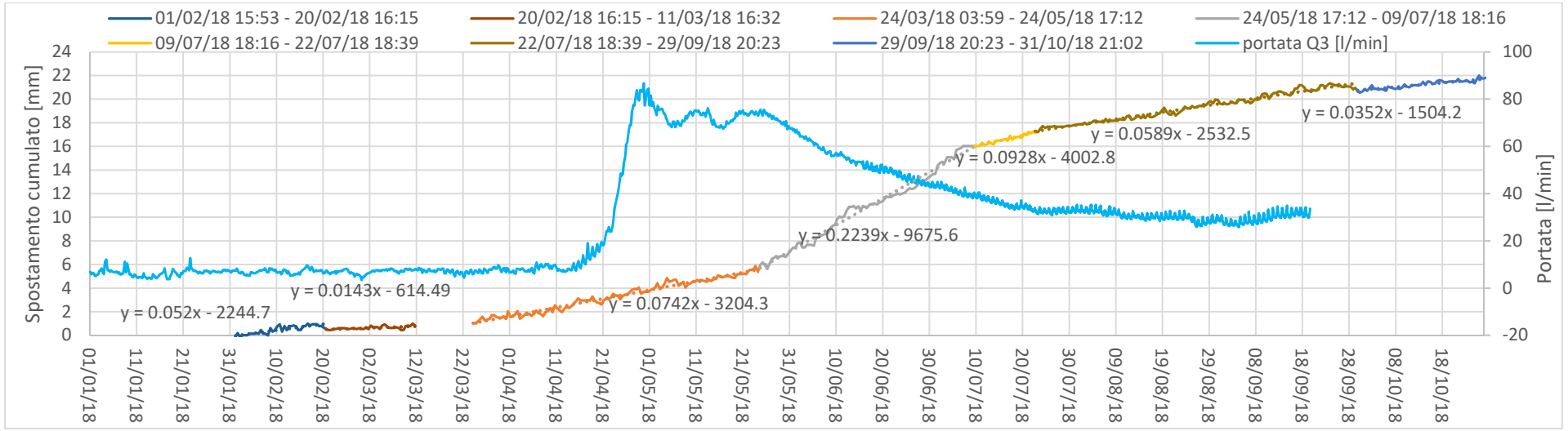
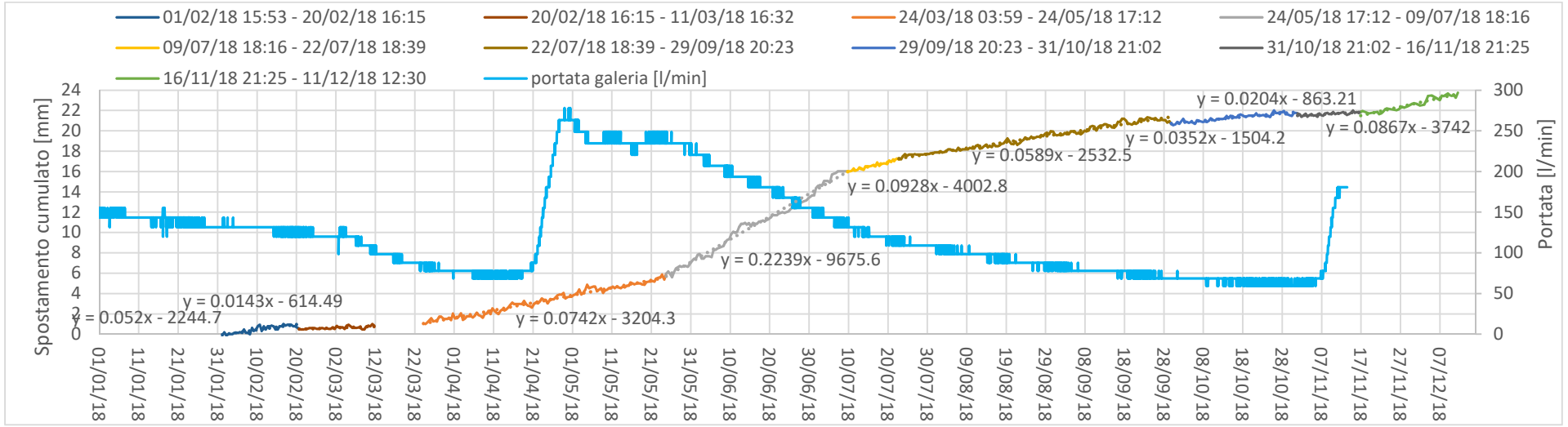


GRAFICO 8.156- SPOSTAMENTO CUMULATO DMS-I2 ZONA 11-16M VS PORTATA IN GALLERIA ANNO 2018



8.5 Allegato V: correlazione tra dati meteorologici-idrogeologici con la conducibilità elettrica specifica e la temperatura delle acque

GRAFICO 8.157-PORTATA DI Q2 VS TEMPERATURA DELL'ACQUA DI Q2, PERIODO APRILE 2016- SETTEMBRE 2018

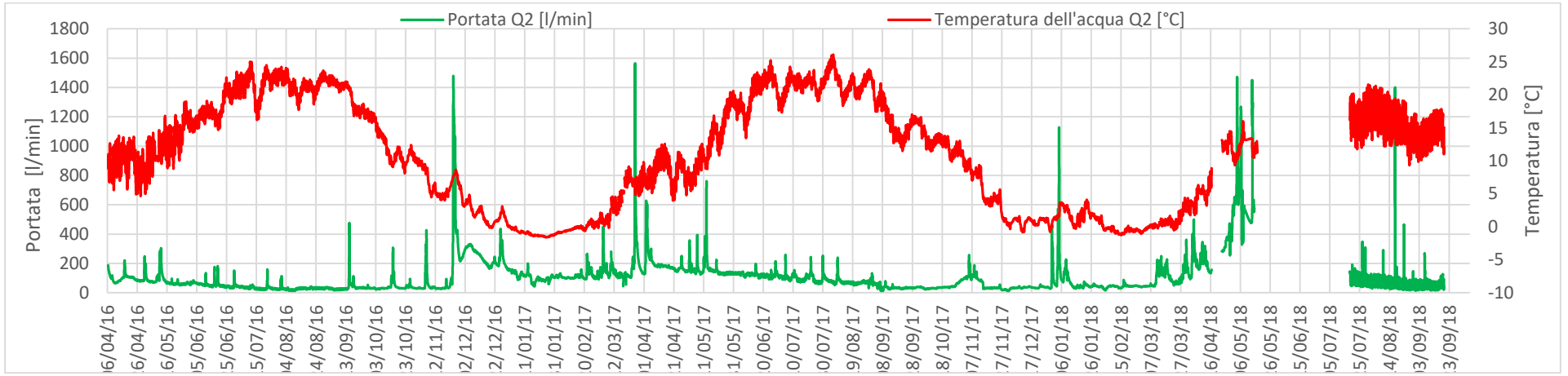


GRAFICO 8.158-PORTATA DI Q2 VS ALTEZZA NEVE AL SUOLO DI SALBERTRAND, PERIODO APRILE 2016 – SETTEMBRE 2018

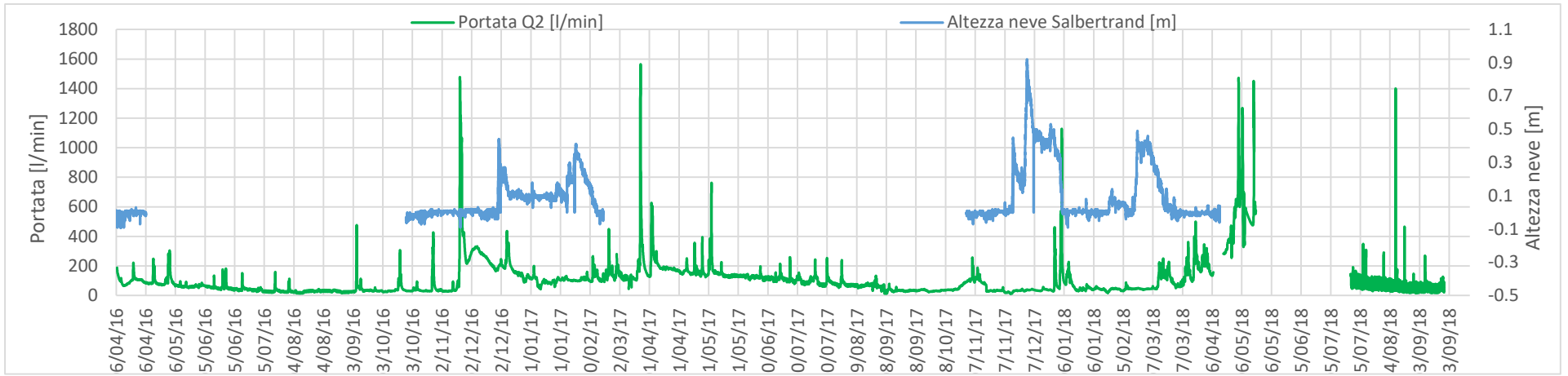


GRAFICO 8.159-PORTATA DI Q3 VS TEMPERATURA DELL'ACQUA DI Q3, PERIODO LUGLIO 2016 – SETTEMBRE 2018

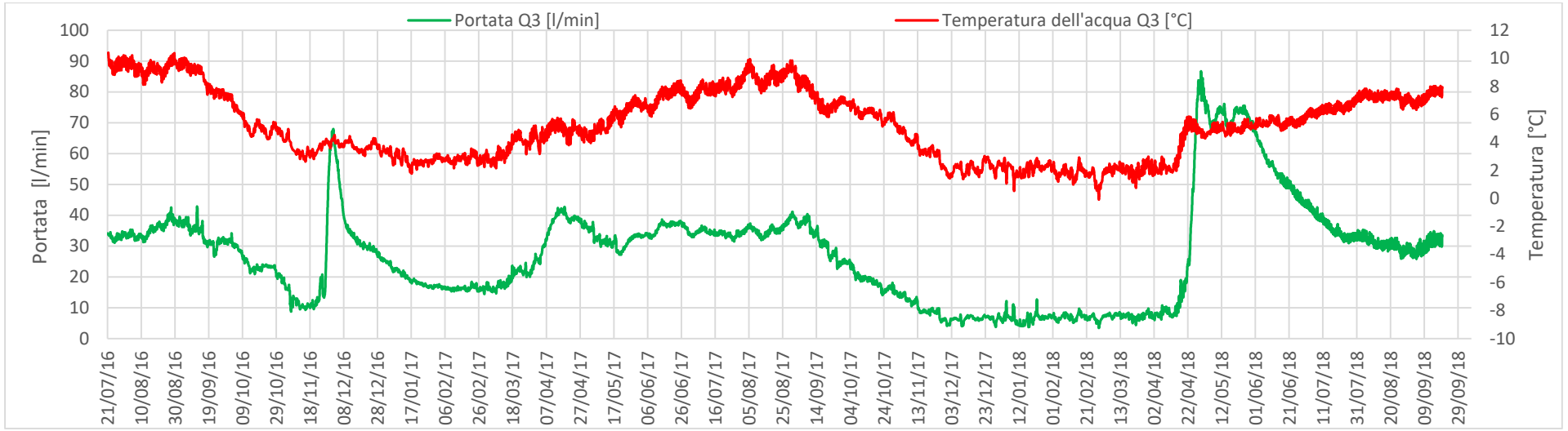


GRAFICO 8.160- PORTATA DI Q3 VS ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND, PERIODO LUGLIO 2016 –SETTEMBRE 2018

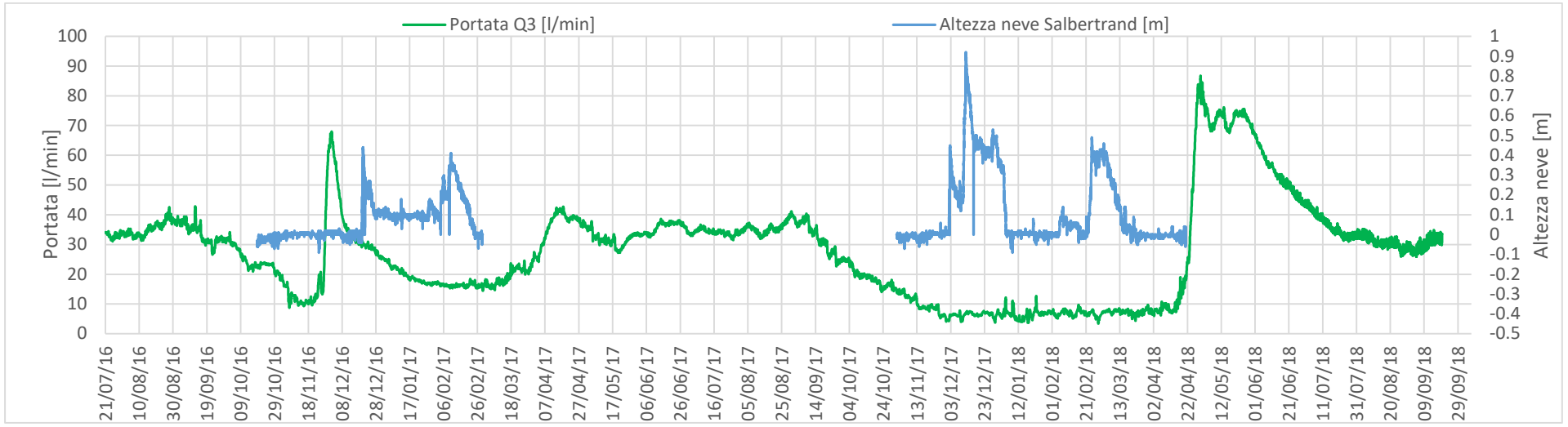


GRAFICO 8.161-PORTATA DI Q2 VS TEMPERATURA DELL'ACQUA DI Q2, PERIODO 01/11/16 – 10/04/17

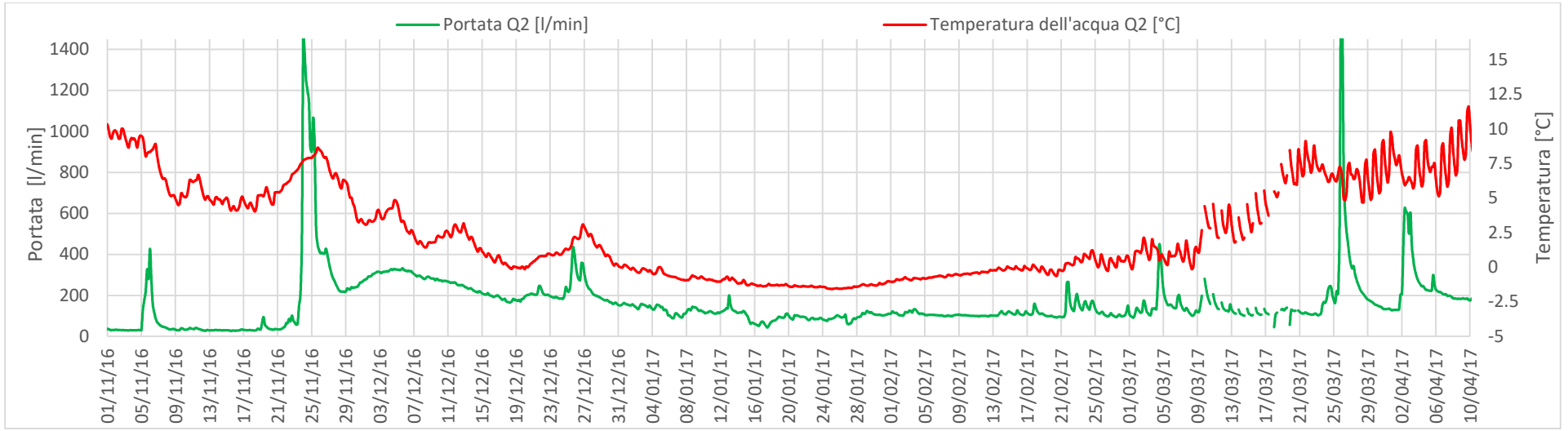


GRAFICO 8.162-PORTATA DI Q2 VS ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND, PERIODO 01/11/16 – 10/04/17

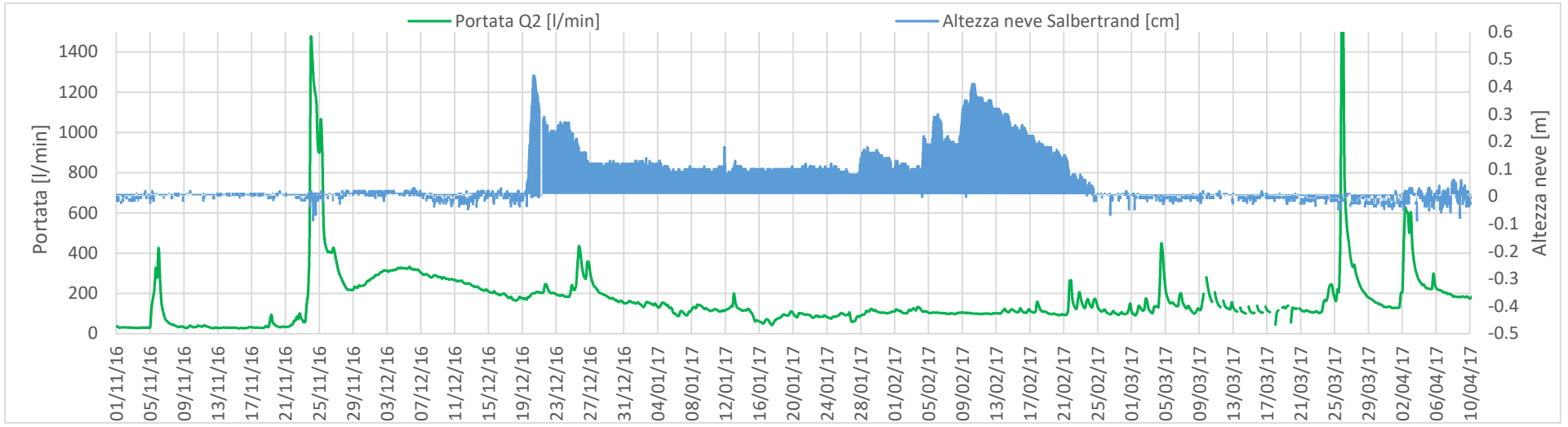


GRAFICO 8.163-PORTATA DI Q2 VS TEMPERATURA DELL'ACQUA DI Q2, PERIODO 11/12/17 – 09/02/18

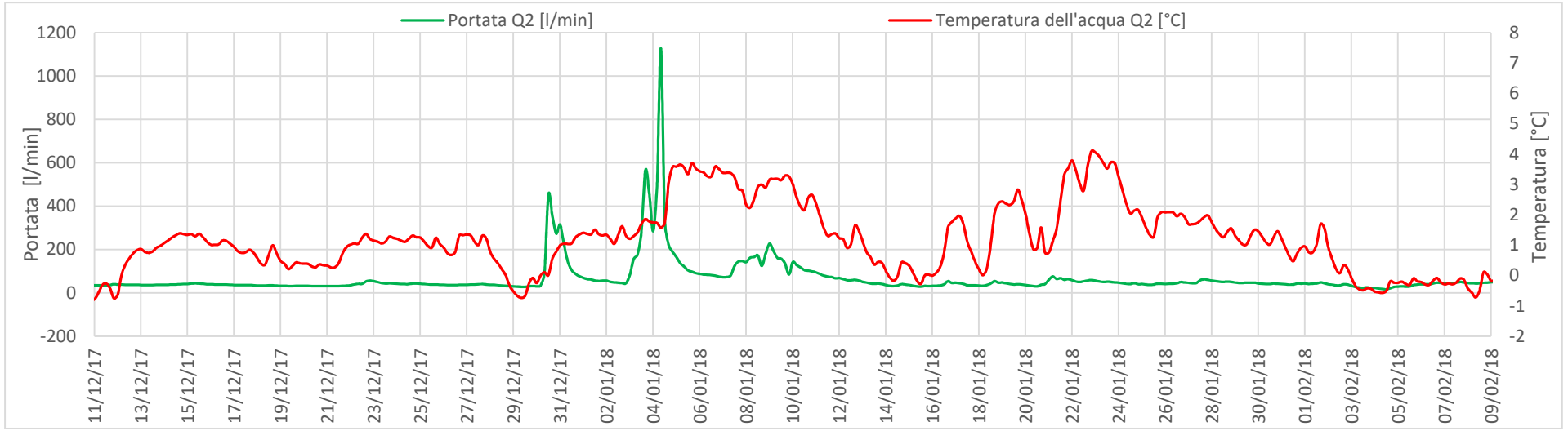


GRAFICO 8.164-PORTATA DI Q2 VS ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND, PERIODO 11/12/17 – 09/02/18

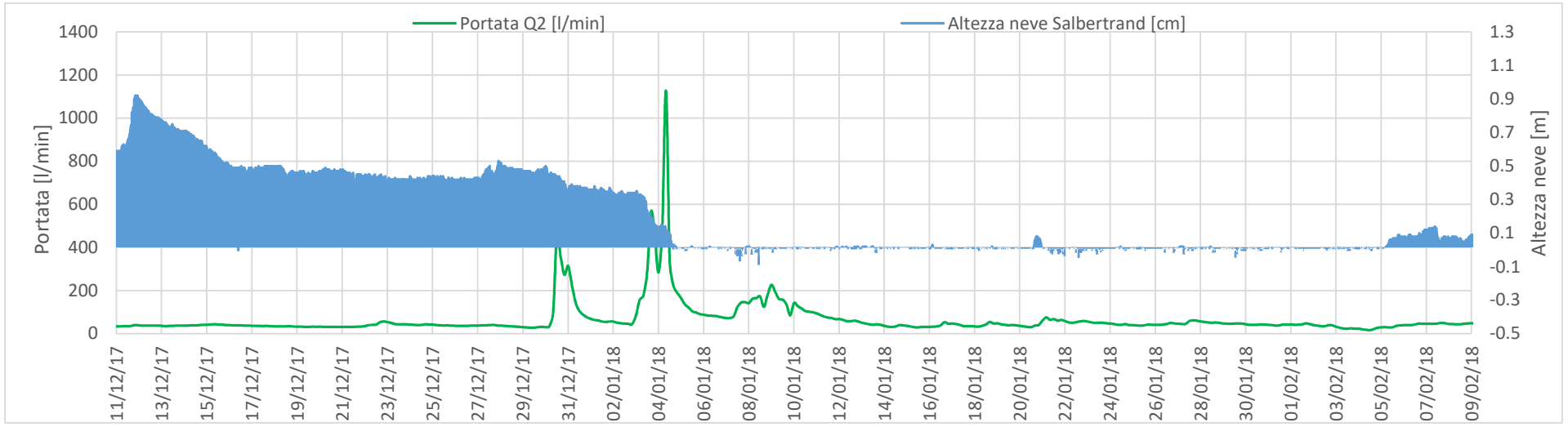


GRAFICO 8.165-PORTATA DI Q2 VS TEMPERATURA DELL'ACQUA DI Q2, PERIODO 01/03/18 -20/05/18

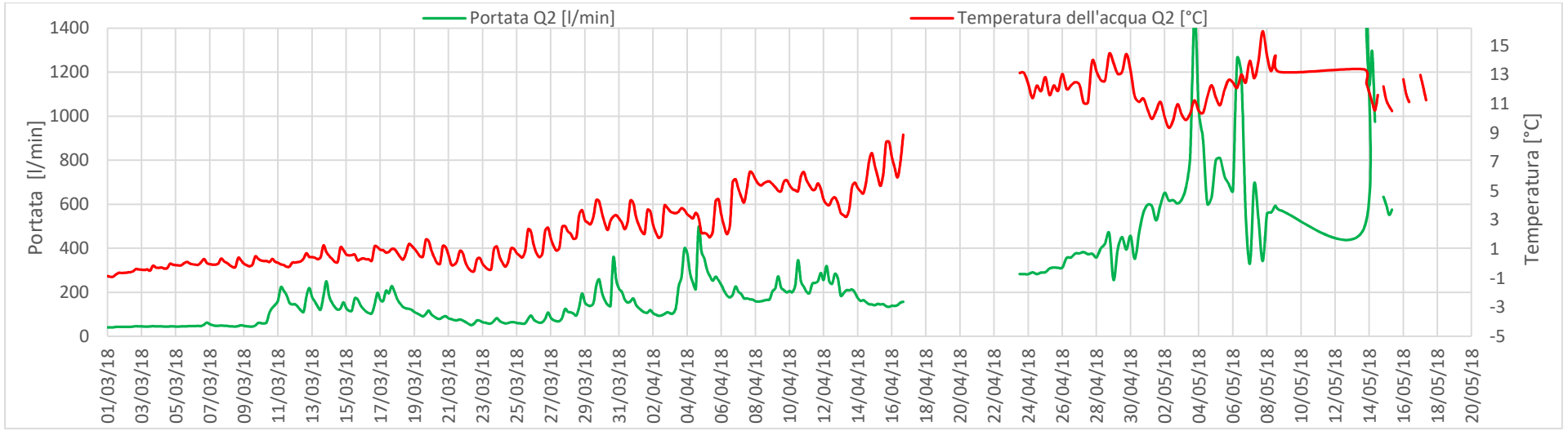


GRAFICO 8.166-PORTATA DI Q2 VS ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND, PERIODO 01/03/18 – 20/05/18

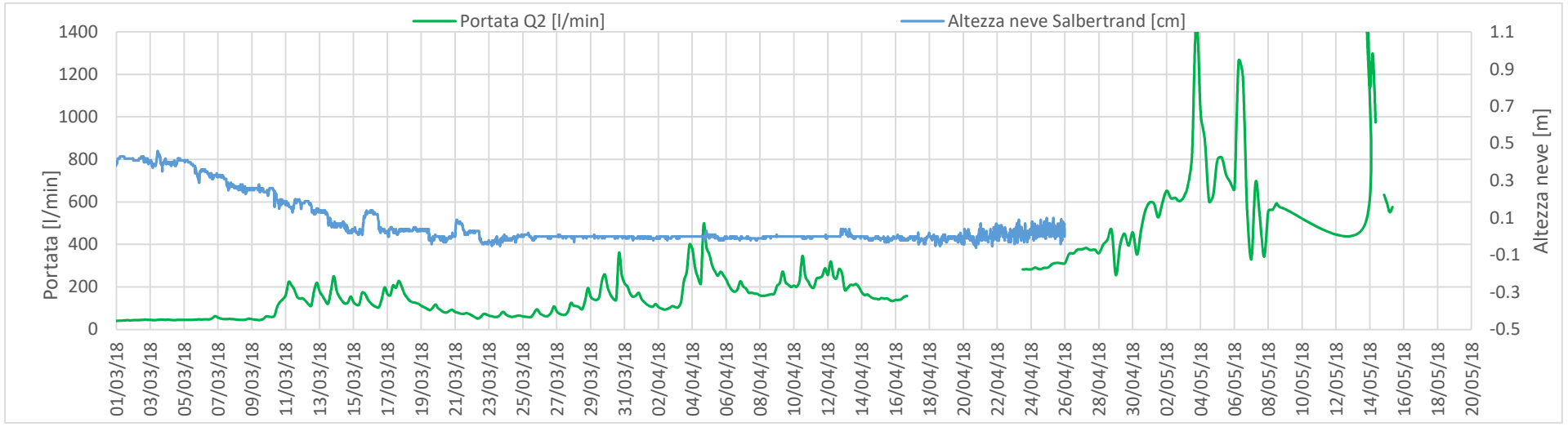


GRAFICO 8.167-PORTATA DI Q2 VS TEMPERATURA DELL'ACQUA DI Q2, PERIODO

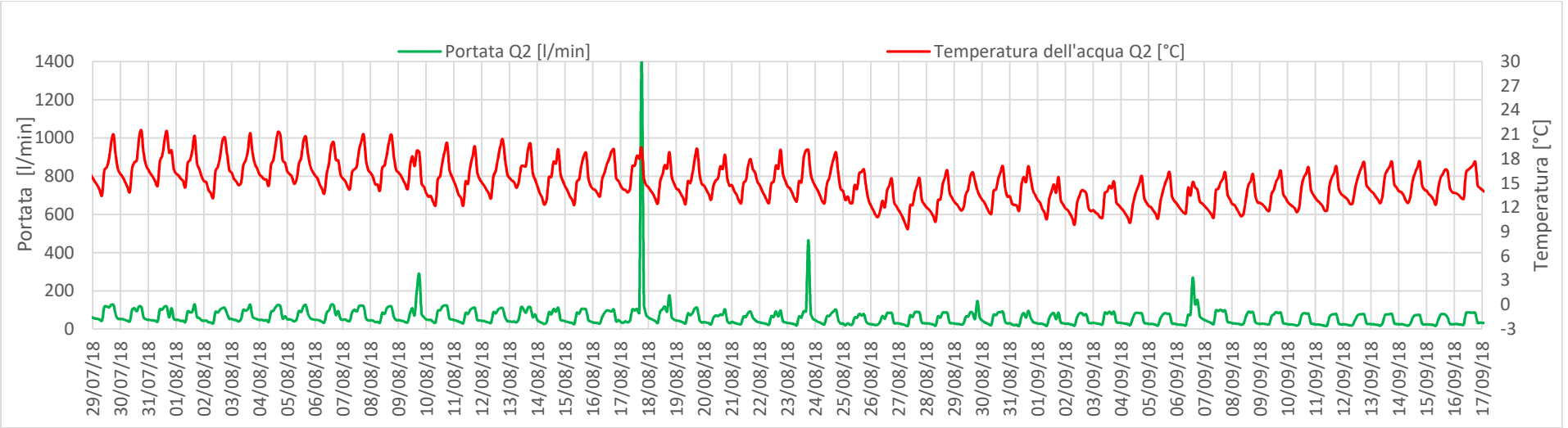


GRAFICO 8.168-POTATA DI Q3 VS TEMPERATURA DELL'ACQUA DI Q3, PERIODO 27/10/16 – 04/02/17

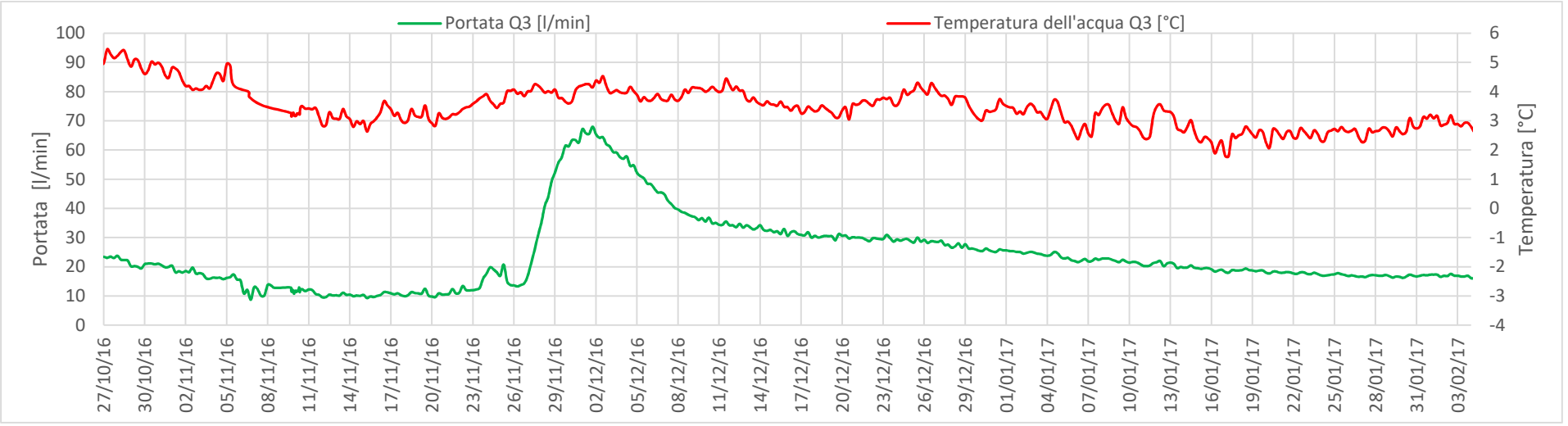


GRAFICO 8.169-PORTATA DI Q3 VS ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND, PERIODO 27/10/16 – 04/02/17

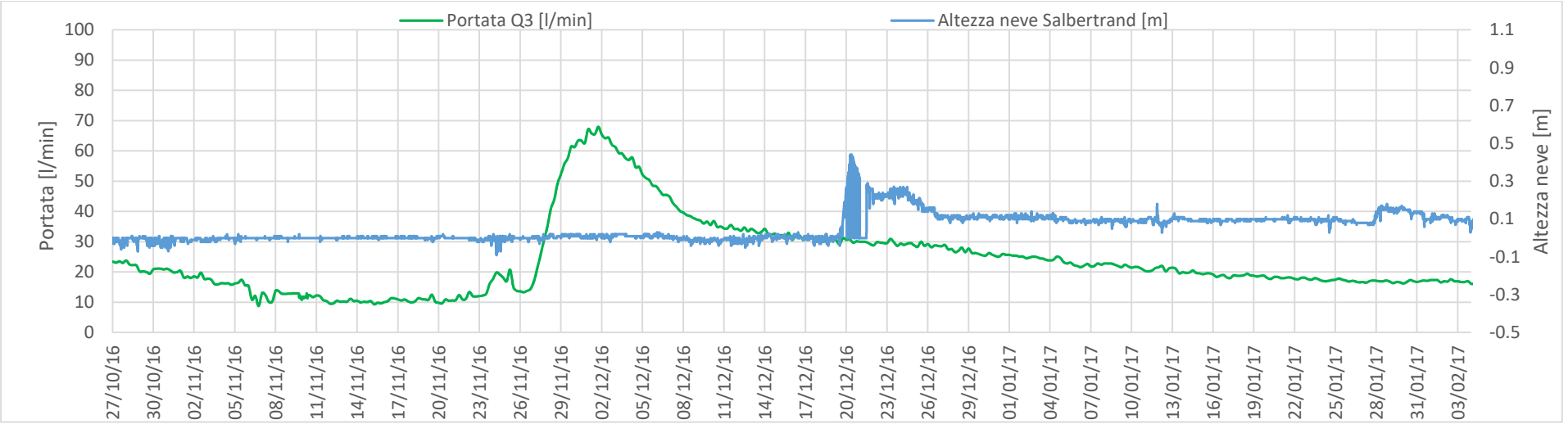


GRAFICO 8.170-PORTATA DI Q3 VS TEMPERATURA DELL'ACQUA DI Q3, PERIODO 24/02/18 -07/09/18

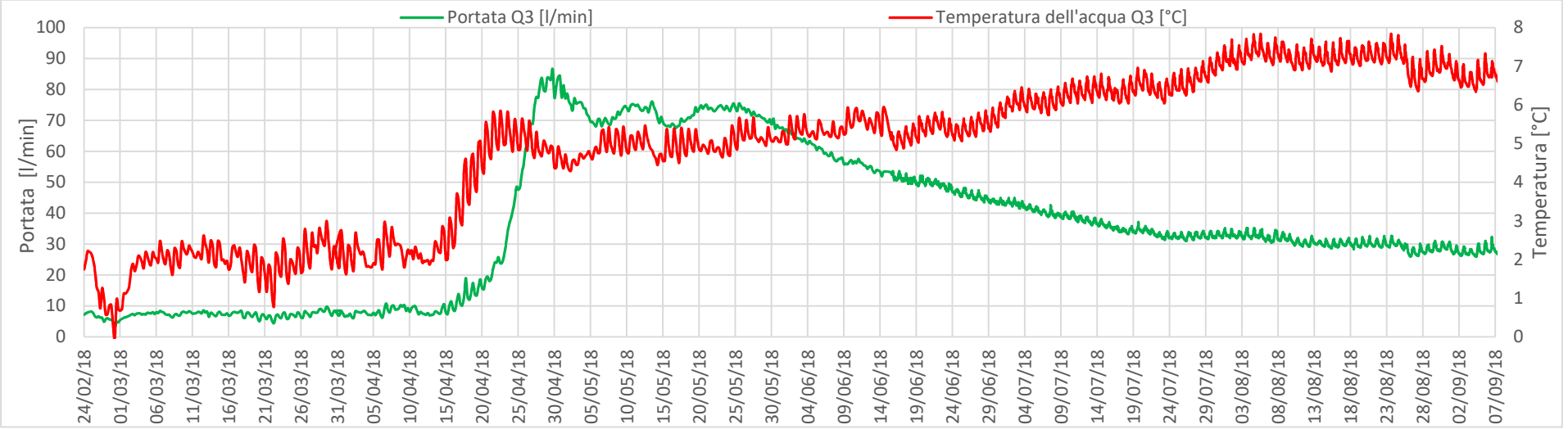
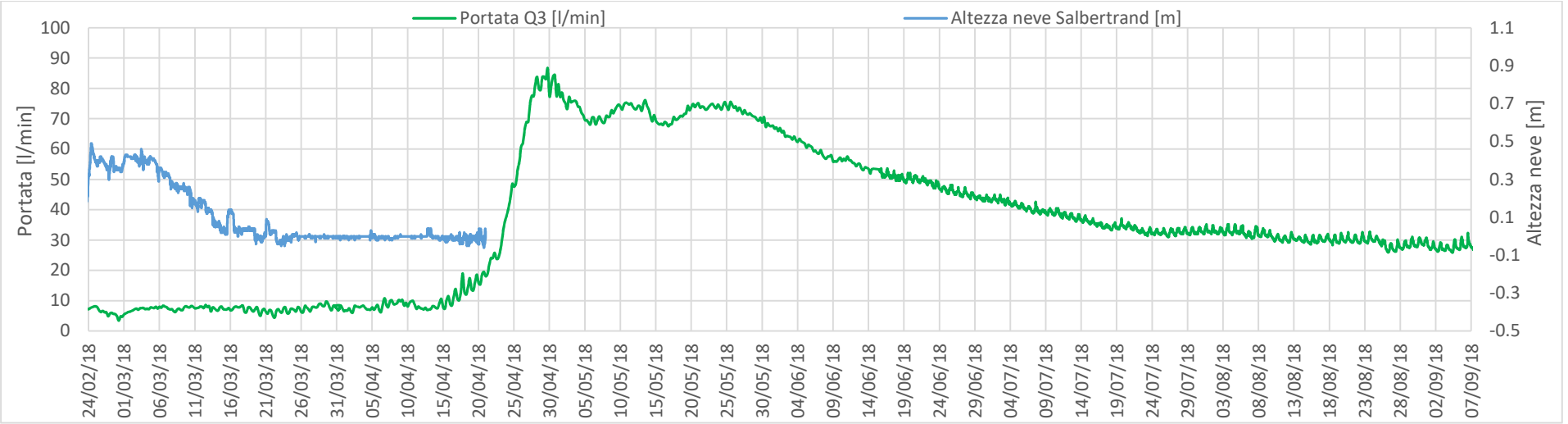


GRAFICO 8.171-PORTATA DI Q3 VS ALTEZZA NEVE DI SALBERTRAND, PERIODO 24/02/18 – 07/09/18



8.6 Allegato VI: dati Prove SPT

8.6.1 Perforazione 101071

TABELLA 8.1-CARATTERISTICHE GENERALI, PERFORAZIONE 101071

Codice perforazione	101071
Nome perforazione	S2
Comune	Salbertrand
Codice ISTAT	1232
Provincia	TO
Località	Km 72 S. St 24, Salbertrand
Codice CTR	153110
Nome CTR	Salbertrand
Data inizio	-
Data fine	-
Cantiere	Viabilità-Collegamento tra Bardonecchia e Torino (tang. Nord-Rivoli) II tronco

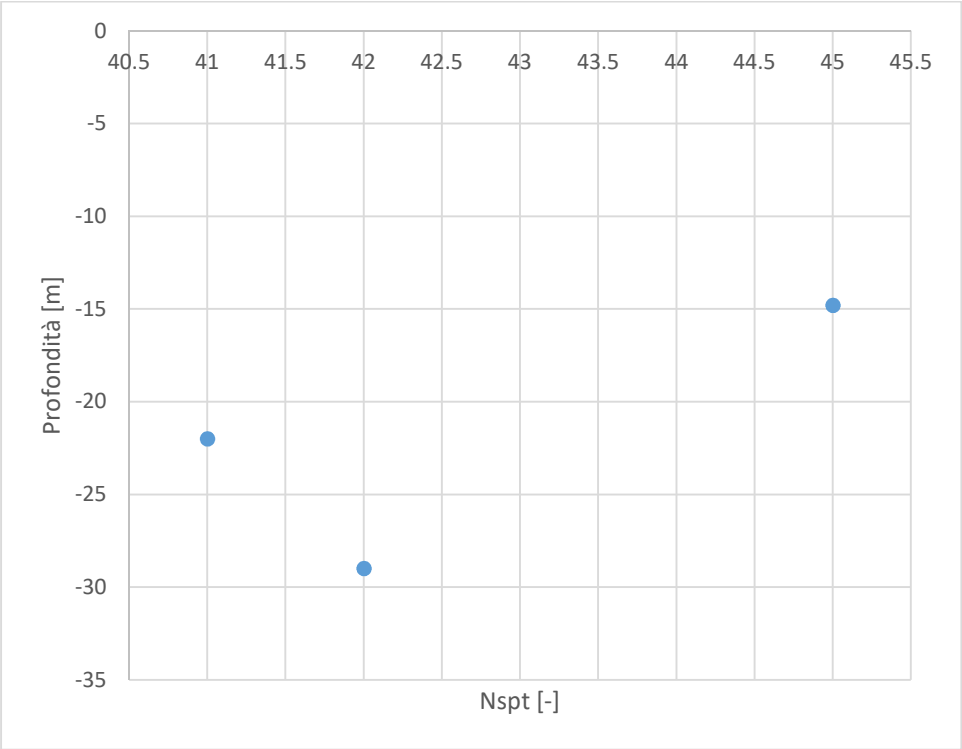
TABELLA 8.2-CARATTERISTICHE GEOLOGICHE, PERFORAZIONE 101071

Formazione geologica	Depositi glaciali (quaternario)
Quota piano campagna (m slm)	1002
Profondità sondaggio (m)	29
Livello falda freatica (m p.c.)	2.3
Inclinazione (°)	0
Tecnica di perforazione	rotazione a carotaggio continuo
Tipo materiale	terreno
Tipo perforazione	sondaggio
Tipo sonda	ATLAS COPCO B 31
Utensile	carotiere semplice o doppio

TABELLA 8.3-STRATIGRAFIA INTERCETTATA, PERFORAZIONE 101071

Profondità (m)	Potenza (m)	Descrizione
1	1	terreno vegetale terroso
2.6	1.6	limo sabbioso debolmente argilloso plastico
5.5	2.9	limo plastico sabbioso fine
5.9	0.4	livello in frammenti in scarsa matrice sabbiosa
21	15.1	ghiaia medio fine in abbondante matrice argilloso sabbiosa a tratti limosa
24.5	3.5	ghiaia medio fine in abbondante matrice sabbiosa fine a tratti sabbioso argillosa debolmente limosa
29	4.5	ghiaia medio grossa in matrice argilloso sabbiosa

GRAFICO 8.172-ANDAMENTO DELL'NSPT CON LA PROFONDITÀ, PERFORAZIONE 101071



8.6.2 Perforazione 101072

TABELLA 8.4-CARATTERISTICHE GENERALI, PERFORAZIONE 101072

Codice perforazione	101072
Nome perforazione	S3
Comune	Salbertrand
Codice ISTAT	1232
Provincia	TO
Località	Km 72 S. St. 24 nel comune di Salbertrand
Codice CTR	153110
Nome CTR	Salbertrand
Data inizio	-
Data fine	-
Cantiere	Viabilità-collegamento tra Bardonecchia e Torino (tang. Nord-Rivoli) II tronco

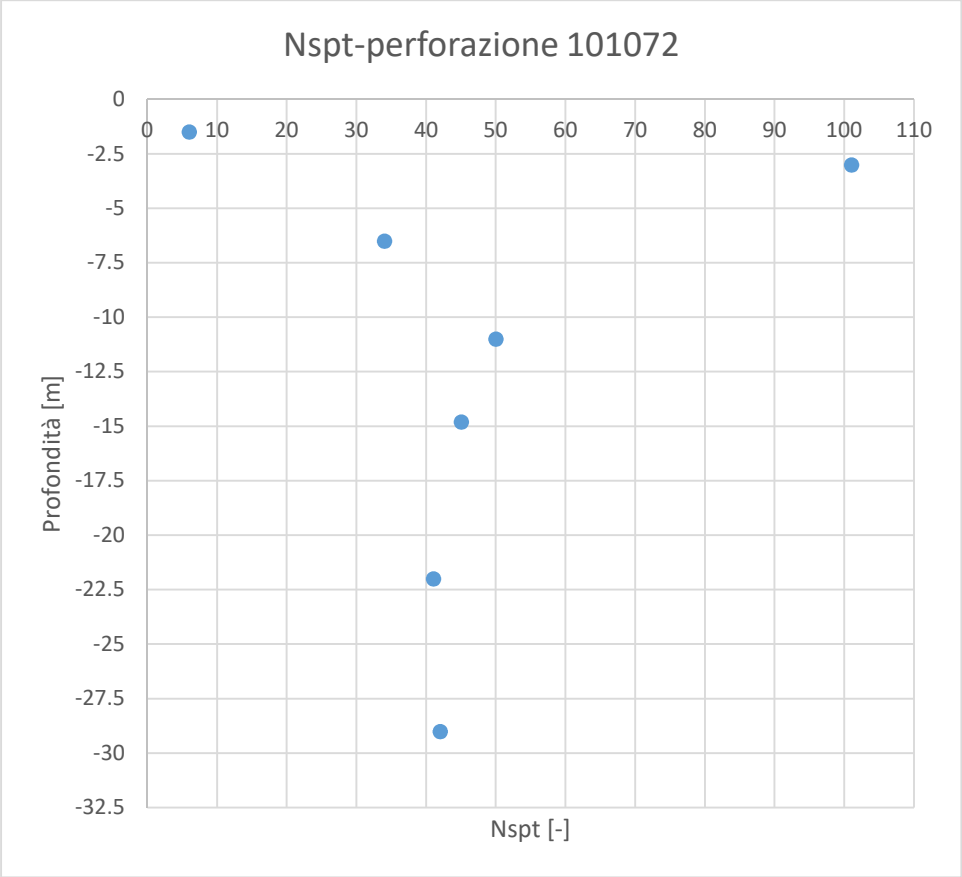
TABELLA 8.5-CARATTERISTICHE GEOLOGICHE, PERFORAZIONE 101072

Formazione geologica	Depositi glaciali (quaternario)
Quota piano campagna (m slm)	1002
Profondità sondaggio (m)	28
Livello falda freatica (m p.c.)	1.8
Inclinazione (°)	0
Tecnica di perforazione	rotazione a carotaggio continuo
Tipo materiale	terreno
Tipo perforazione	sondaggio
Tipo sonda	ATLAS COPCO B 31
Utensile	carotiere semplice o doppio

TABELLA 8.6-STRATIGRAFIA INTERCETTATA, PERFORAZIONE 101072

Profondità (m)	Potenza (m)	Descrizione
1.4	1.4	terreno vegetale sabbioso terroso
2	0.6	sabbia fine limosa
6	4	limo plastico sabbioso fine debolmente argilloso con intercalazioni di ghiaia piccola
6.5	0.5	livello con frammenti di roccia in scarsa matrice sabbiosa
7.7	1.2	ghiaia medio grossa in abbondante matrice argilloso limosa debolmente sabbiosa fine
18	10.3	ghiaia media in abbondante matrice sabbiosa fine debolmente argilloso limosa con livelli sabbioso limosi plastici
25.3	7.3	ghiaia ciottoli con trovanti
28	2.7	ghiaia media in abbondante matrice sabbiosa fine

GRAFICO 8.173-ANDAMENTO DELL'NSPT CON LA PROFONDITÀ, PERFORAZIONE 101072



8.6.3 Perforazione 102503

TABELLA 8.7-CARATTERISTICHE GENERALI, PERFORAZIONE 102503

Codice perforazione	102503
Nome perforazione	F4-h41
Comune	Salbertrand
Codice ISTAT	1232
Provincia	TO
Località	Serre la Voute
Codice CTR	153110
Nome CTR	Salbertrand
Data inizio	20/11/1984
Data fine	23/11/1984
Cantiere	Movimento franoso Serre La Voute

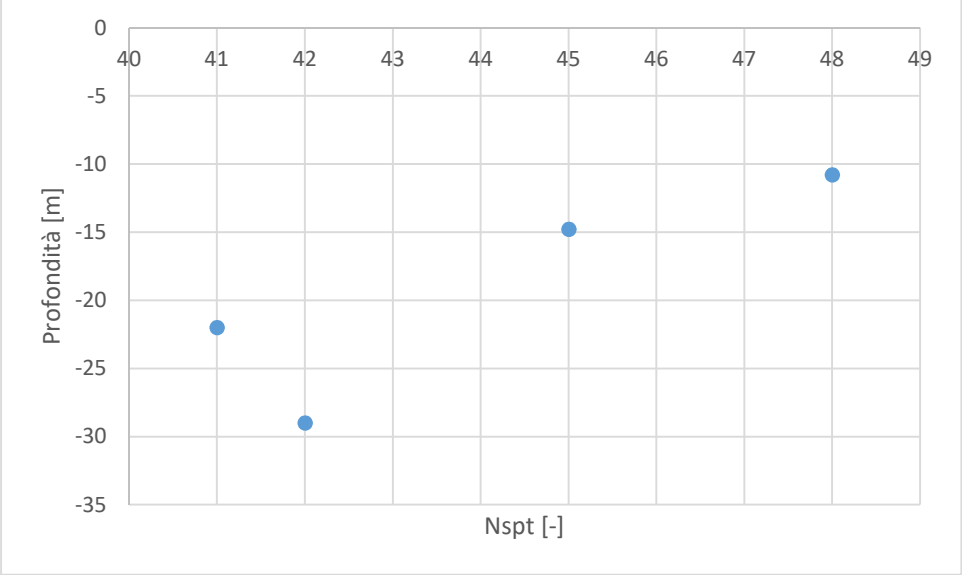
TABELLA 8.8-CARATTERISTICHE GEOLOGICHE, PERFORAZIONE 102503

Formazione geologica	Depositi glaciali (quaternario)
Quota piano campagna (m slm)	996
Profondità sondaggio (m)	30
Livello falda freatica (m p.c.)	0
Inclinazione (°)	0
Tecnica di perforazione	rotazione a carotaggio continuo
Tipo materiale	terreno
Tipo perforazione	sondaggio
Tipo sonda	Mobile Drill B 31
Utensile	carotiere semplice o doppio

TABELLA 8.9-STRATIGRAFIA INTERCETTATA, PERFORAZIONE 102503

Profondità (m)	Potenza (m)	Descrizione
3	3	ghiaia con sabbia debolmente limosa
7.9	4.9	ghiaia con sabbia limosa
8.1	0.2	limo debolmente sabbioso
10.8	2.7	alternanza di livelli di limo debolmente sabbioso e di sabbia limosa
19.5	8.7	ghiaia con sabbia limosa
19.9	0.4	limo con sabbia con tracce di ghiaia
20.3	0.4	sabbia debolmente limosa
21	0.7	ghiaia con sabbia limosa
21.4	0.4	sabbia con tracce di ghiaia
22.1	0.7	limo con sabbia con tracce di ghiaia
30	7.9	ghiaia con sabbia debolmente limosa

GRAFICO 8.174-ANDAMENTO DELL'NSPT CON LA PROFONDITÀ, PERFORAZIONE 102503



8.7 Allegato VII: determinazione parametri geotecnici da prove Nspt

8.7.1 Perforazione 101071

TABELLA 8.10-DETERMINAZIONE DELL'ANGOLO DI RESISTENZA AL TAGLIO CON RELAZIONE DI SHIOI E FUKUNI

Profondità (m)	N SPT	Livello falda (m p.c.)	φ' (Shioi e Fukini, 1982a)	φ' (Shioi e Fukini, 1982b)
-14.8	45	2.3	41.0	40.5
-22	41	2.3	39.8	39.3
-29	42	2.3	40.1	39.6

TABELLA 8.11-ATTRIBUZIONE DELLA DENSITÀ E PESO SPECIFICO ALLE STRATIGRAFIE

Stratigrafia			Densità (Terzaghi e Peck, 1967)	Peso specifico
Profondità (m)	Potenza (m)	Descrizione	ρ [Mg/m3]	γ [kN/m3]
1	1	terreno vegetale terroso	2	20
2.6	1.6	limo sabbioso debolmente argilloso plastico	2	20
5.5	2.9	limo plastico sabbioso fine	2	20
5.9	0.4	livello in frammenti in scarsa matrice sabbiosa	2	20
21	15.1	ghiaia medio fine in abbondante matrice argilloso sabbiosa a tratti limosa	2	22
24.5	3.5	ghiaia medio fine in abbondante matrice sabbiosa fine a tratti sabbioso argillosa debolmente limosa	2	22
29	4.5	ghiaia medio grossa in matrice argilloso sabbiosa	2	22

TABELLA 8.12-DETERMINAZIONE DELL'ANGOLO DI RESISTENZA AL TAGLIO CON RELAZIONE DI SCHMERTMANN

Profondità (m)	N SPT	Livello falda (m p.c.)	σ[kPa]	u [kPa]	σ' [kPa]	CN (sabbie grosse)	N1	DR [-]	φ' (Schmertmann, 1978)
-14.8	45	2.3	313.8	122.6	191.2	0.8	34.5	0.76	38.1
-22	41	2.3	472.2	193.3	278.9	0.6	25.7	0.65	38.1
-29	42	2.3	626.2	261.9	364.3	0.5	22.3	0.61	38.0

In base ai valori ottenuti si è deciso di operare una scelta cautelativa andando ad utilizzare un valore di angolo di attrito pari a 38°.

8.7.2 Perforazione 101072

TABELLA 8.13-DETERMINAZIONE DELL'ANGOLO DI RESISTENZA AL TAGLIO CON RELAZIONE DI SHIOI E FUKUNI E PROGETTAZIONE GEOTECNICA, PERFORAZIONE 101072

Profondità (m)	N SPT	Livello falda (m p.c.)	φ' (Shioi e Fukini, 1982a)	φ' (Shioi e Fukini, 1982b)	φ' (Progettaz. Geotecnica)
-1.5	6	1.8	/	/	31
-6.5	34	1.8	/	/	31
-11	50	1.8	/	/	31
-14.8	45	1.8	41.0	40.5	/
-22	41	1.8	39.8	39.3	/
-28	42	1.8	40.1	39.6	/

TABELLA 8.14-ATTRIBUZIONE DELLA DENSITÀ E PESO SPECIFICO ALLE STRATIGRAFIE, PERFORAZIONI 101072

Stratigrafia			Densità (Terzaghi e peck, 1967)	Peso specifico
Profondità (m)	Potenza (m)	Descrizione	ρ [Mg/m3] (Terzaghi e Peck, 1967)	γ [kN/m3]
1.4	1.4	terreno vegetale sabbioso terroso	2	20
2	0.6	sabbia fine limosa	2	20
6	4	limo plastico sabbioso fine debolmente argilloso con intercalazioni di ghiaia piccola	2	20
6.5	0.5	livello con frammenti di roccia in scarsa matrice sabbiosa	2	20
7.7	1.2	ghiaia medio grossa in abbondante matrice argilloso limosa debolmente sabbiosa fine	2	20
18	10.3	ghiaia media in abbondante matrice sabbiosa fine debolmente argilloso limosa con livelli sabbioso limosi plastici	2.2	22
25.3	7.3	ghiaia ciottoli con trovanti	2.2	22
28	2.7	ghiaia media in abbondante matrice sabbiosa fine	2.2	22

TABELLA 8.15-DETERMINAZIONE DELL'ANGOLO DI RESISTENZA AL TAGLIO CON RELAZIONE DI SCHMERTMANN, PERFORAZIONE 101072

Profondità (m)	N SPT	Livello falda (m p.c.)	σ[kPa]	u [kPa]	σ' [kPa]	CN (sabbie fine)	N1	DR [-]	φ' (Schmertmann, 1978)
-1.5	6	1.8	30.0	-2.9	32.9	1.5	9.0	0.39	28.1
-6.5	34	1.8	130.0	46.1	83.9	1.1	37.0	0.79	28.1
-11	50	1.8	226.6	90.3	136.3	0.8	42.3	0.84	38.1
-14.8	45	1.8	310.2	127.5	182.7	0.7	31.8	0.73	38.1
-22	41	1.8	468.6	198.2	270.4	0.5	22.1	0.61	38.0
-28	42	1.8	600.6	257.0	343.6	0.5	18.9	0.56	38.0

In base ai valori ottenuti si è fatta la scelta più cautelativa assegnando un angolo di 38° alla ghiaia in abbondante matrice sabbiosa limosa o argilloso limosa.

8.7.3 Perforazione 102503

TABELLA 8.16-DETERMINAZIONE DELL'ANGOLO DI RESISTENZA AL TAGLIO CON SHIOI E FUKUNI, PERFORAZIONE 102503

Profondità (m)	N SPT	Livello falda (m p.c.)	φ' (Shioi e Fukini, 1982a)	φ' (Shioi e Fukini, 1982b)
-10.8	48	0	41.8	41.4
-14.8	45	0	41.0	40.5
-22	41	0	39.8	39.3
-29	42	0	40.1	39.6

TABELLA 8.17-ATTRIBUZIONE DELLA DENSITÀ E DEL PESO SPECIFICO ALLA STRATIGRAFIA, PERFORAZIONE 102503

Stratigrafia			Densità (Terzaghi e peck, 1967)	Peso specifico
Profondità (m)	Potenza (m)	Descrizione	ρ [Mg/m3]	γ [kN/m3]
3	3	ghiaia con sabbia debolmente limosa	2	20
7.9	4.9	ghiaia con sabbia limosa	2	22
8.1	0.2	limo debolmente sabbioso	2	20
10.8	2.7	alternanza di livelli di limo debolmente sabbioso e di sabbia limosa	2	20
19.5	8.7	ghiaia con sabbia limosa	2	22
19.9	0.4	limo con sabbia con tracce di ghiaia	2.2	20
20.3	0.4	sabbia debolmente limosa	2.2	20
21	0.7	ghiaia con sabbia limosa	2.2	22
21.4	0.4	sabbia con tracce di ghiaia	2	20
22.1	0.7	limo con sabbia con tracce di ghiaia	2	20
30	7.9	ghiaia con sabbia debolmente limosa	2.2	22

TABELLA 8.18-DETERMINAZIONE DELL'ANGOLO DI RESISTENZA AL TAGLIO CON RELAZIONE DI SCHMERTMANN

Profondità (m)	N SPT	Livello falda (m p.c.)	σ [kPa]	u [kPa]	σ' [kPa]	CN	N1	DR [-]	φ' (Schmertmann, 1978)
-10.8	48	0	225.8	105.9	119.9	0.9	43.7	0.85	38.1
-14.8	45	0	313.8	145.2	168.6	0.8	36.6	0.78	38.1
-22	41	0	468.6	215.8	252.8	0.6	23.2	0.62	38.0
-29	42	0	622.4	284.5	337.9	0.6	23.4	0.62	38.0

Si è fatta la scelta più cautelativa utilizzando un angolo pari a 38° per la ghiaia con sabbia limosa.

8.7.4 Perforazione 101071

TABELLA 8.19-MODULO ELASTICO CON RELAZIONE DI BURLAND E BURBRIDGE, PERFORAZIONE 10171

Profondità [m]	N SPT	Emin [Mpa]	Emax [Mpa]
-14.8	45	189	283.5
-22	41	172.2	258.3
-29	42	176.4	264.6

8.7.5 Perforazione 101072

TABELLA 8.20-MODULO ELASTICO CON RELAZIONE DI BURLAND E BURBRIDGE, PERFORAZIONE 101072

Profondità [m]	N SPT	Emin [Mpa]	Emax [Mpa]
-1.5	6	9.6	14.4
-6.5	34	125.8	190.4
-11	50	210	315
-14.8	45	189	283.5
-22	41	172.2	258.3
-28	42	176.4	264.6

8.7.6 Perforazione 102503

TABELLA 8.21-MODULO ELASTICO CON RELAZIONE DI BURLAND E BURBRIDGE, PERFORAZIONE 102503

Profondità [m]	N SPT	Emin [Mpa]	Emax [Mpa]
-10.8	48	201.6	302.4
-14.8	45	189	283.5
-22	41	172.2	258.3
-29	42	176.4	264.6

9 RIFERIMENTI E FONTI

9.1 Indice delle figure

Figura 2.1-ubicazione area in frana perimetrata con un rettangolo rosso 10
Figura 2.2-cartografia IFFI dell'area oggetto di studio con indicazione degli elementi a rischio 12
Figura 2.3- Frana del Cassas: vista panoramica del 1965, alla fine della fase parossistica iniziata con l'alluvione del giugno 1957 (foto di G.V. Dal Piaz in: Brovero et al. 1996a) 15
Figura 2.4-Evoluzione della frana del Cassas (1965 e 1982: Brovero et al., 1996a; 2002:fotografia di L.Paro) 15
Figura 2.5-elementi morfologici dell'area in frana, SIFRAP 2018 17
Figura 2.6-Trincee a monte del settore di coronamento (SIFRAP, 2018) 18
Figura 2.7-Apertura metrica dei giunti nel settore di coronamento (Forlati et al., 2004) 18
Figura 2.8-settore centrale ed il piede della frana in una ripresa dall'alto verso il basso. al fondo la piana di Salbertrand con il collegamento autostradale Torino-Modane (Programma Interreg I Italia-Francia, 1996) 18
Figura 2.9-tipo di movimento e stato di attività (SIFRAP, 2018) 19
Figura 2.10-Vista del pendio destro della Valle di Susa, da Salbertrand a Serre la Voute, con indicazioni dei principali elementi morfologici (Forlati et al., 2004) 21
Figura 2.11-Mappa s scala 1:25 000 (IGM sheet n.54, II SE, Oulx). Le zone in ombra indicano le principali caratteristiche d'instabilità 22
Figura 2.12-Mappa geomorfologica basata sulle fotografie aeree datate Luglio 1954 (Forlati et al., 2004) 22
Figura 2.13- Rappresentazione sintetica dei principali elementi morfologici sulla frana del Cassas (da foto aeree 1963-2001) (Forlati et al., 2004) 24
Figura 2.14-Schema geologico strutturale dell'alta Valle di Susa. Legenda: 1) complesso dei calcescisti con pietre verdi; 2) massiccio cristallino dell'Ambin e sua copertura normale; 3) traccia delle lineazioni principali; 4) Ubicazione dei principali movimenti gravitativi di cui quello ricerchiato in rosso è la frana del Cassas (Ramasco & Susella, 1979) 25
Figura 2.15-mappa geologica strutturale del foglio di Bardonecchia 153 del CGI e legende delle unità tettonico stratigrafiche; ricerchiato in blu: frana del Cassas (Carta Geologica d'Italia, 2002) 26
Figura 2.16-A) Reticolo stereografico e sistema di discontinuità; B) Allineamenti morfologici osservati nella parte superiore della frana del Cassas. S1 e S2 sono piani di scistosità; K1, K2, K3, K4 e K sono sistemi di giunti (Brovero et al., 1996a) 28
Figura 2.17-Porzione della mappa geologica del foglio di Bardonecchia; il cerchio blu indica la posizione dell'area in frana del Cassas (Forlati et al., 2004) 31
Figura 2.18-sopra:profilo topografico e risultati della sismica a rifrazione; sotto: sondaggi stratigrafici (Brovero et al., 1996 a) 34
Figura 2.19-Suddivisione della frana del Cassas per l'identificazione dei pericoli (Forlati et al., 2004) 35
Figura 2.20-Schema longitudinale della frana: A) Situazione attuale; B) ipotesi di evoluzione (Forlati et al., 2004) 36
Figura 2.21-Elementi a rischio vicino alla frana del Cassas (Forlati et al., 2004) 39
Figura 2.22-Rischio fisico (Forlati et al., 2004) 40
Figura 2.23-Rischio economico (Forlati et al., 2004) 41
Figura 2.24-Rischio ambientale (Forlati et al., 2004) 41
Figura 2.25-Rischio sociale (Forlati et al., 2004) 42
Figura 3.1-Rappresentazione schematica dell'impianto di monitoraggio della frana del Cassas 44
Figura 3.2-Ricostruzione della posizione degli strumenti di monitoraggio tramite QGIS 46
Figura 3.3- Stazione Le Selle (sitoweb A.R.P.A. Piemonte) 47
Figura 3.4-Stazione Salbertrand (sitoweb A.R.P.A. Piemonte) 47
Figura 3.5-particolare del pluviometro installato sul tetto del Museo Craveri di Bra (CN) (sitoweb A.R.P.A. Piemonte) 48
Figura 3.6-Particolare del termoigrometro installato presso la stazione di Caselle (TO) (Sito web A.R.P.A. Piemonte) 49
Figura 3.7-Nivometro della stazione di Pragelato (TO) (Sito web A.R.P.A. Piemonte) 50

Figura 3.8-coronamento. Ubicazione schematica della strumentazione e data di ripristino dei sensori. R:strumento rimosso; Es: estensimetro a filo; Mg: fessurimetro; Cl: clinometro monoassiale (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering, 2018) 53
Figura 3.9-sperone roccioso occidentale. Vista panoramica e ubicazione posizioni di monitoraggio (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering, 2018) 53
Figura 3.10-sperone roccioso occidentale. Ubicazione sistematica della strumentazione (S.I.T.A.F. & musinet engineering, 2018) 54
Figura 3.11-ubicazione stazioni totali (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering, 2017) 54
Figura 3.12-Ubicazione della strumentazione: nell'immagine di sinistra è rappresentata la strumentazione nella parte sommitale dell'area in frana mentre nell'immagine di destra è rappresentata la strumentazione nella parte inferiore dell'area in frana; in rosso: strumentazione dismessa; in verde e azzurro: strumentazione funzionante); (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering, 2018;) 56
Figura 3.13-Minilog, sistema di acquisizione dati (Sito web SIM strumenti) 59
Figura 3.14-Trasduttore con datalogger DL/N70 (Sito web STS Italia) 59
Figura 3.15-trasduttore ATM/N (Sito web STS Italia) 59
Figura 3.16-Trasduttore ATM/N/T (Sito web STS Italia) 59
Figura 3.17-Misuratore livello ad ultrasuoni (Sito web OTR) 60
Figura 3.18-OTR Sonde di temperatura (Sito web OTR) 60
Figura 3.19-a destra si ha la sezione trasversale del tubo inclinometrico con sonda inserita; a sinistra la foto dimostrativa (Materiale didattico del corso di stabilità dei pendii, Pirulli 2018) 61
Figura 3.20- metodo per ottenere il modulo di spostamento (Materiale didattico del corso di stabilità dei pendii, Pirulli M., 2018) 61
Figura 3.21-Elaborazione delle misure inclinometriche (Materiale didattico del corso di stabilità dei pendii, Pirulli M., 2018) 62
Figura 3.22-A sinistra si ha la testa di un tubo inclinometrico attrezzato con sonde fisse; a destra lo schema di sonda inclinometrica biassiale, per il controllo dei movimenti profondi (Materiale didattico del corso di stabilità dei pendi, Pirulli M., 2018) 62
Figura 3.23-Colonna DMS: a sinistra lo schema di installazione nel terreno; al centro il comportamento a seguito di traslazione coperture (frana); a destra il metodo per ottenere il modulo dello spostamento (materiale didattico corso di stabilità dei pendii, Pirulli m., 2018) 63
Figura 3.24-Rete inclinometrica (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering, 2018) 64
Figura 3.25-Ubicazione Imbocco della galleria (Sito web Musinet Engineering) 68
Figura 3.26-Imbocco della galleria con realizzazione di diaframma in calcestruzzo con tiranti attivi (cortesia Prof. Vigna) 68
Figura 3.27-A)fotografia dell'interno della galleria; B)rinforzo interno della galleria drenante (Cortesia Prof. Vigna) ... 68
Figura 3.28- dreni sub orizzontali al termine dello scavo della galleria drenante (cortesia Prof. Vigna) 69
Figura 3.29- vasca in cemento armato munita di stramazzo sfioratore a sezione controllata per la misurazione delle portate (Cortesia Prof. Vigna) 69
Figura 3.30- materiale circostante l'imbocco della galleria drenante (Cortesia Prof. Vigna) 69
Figura 5.1-caratteristiche strumento I1: orientazione e particolare fotografico (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering 89
Figura 5.2- caratteristiche strumento I3: orientazione e particolare fotografico (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 91
Figura 5.3- caratteristiche strumento I4: orientazione e particolare fotografico (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 94
Figura 5.4- caratteristiche strumento I5: orientazione e particolare fotografico (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 95
Figura 5.5-profilo geologico attraverso il sinkhole di Villenueve (Alberto et al.) 116
Figura 5.6-Sinkhole presso Chiomonte (Alberto et al.) 116
Figura 6.1-sezione di studio ricavata dal software QGIS 119
Figura 6.2-inserimento dei sondaggi stratigrafici e della sismica a rifrazione all'interno della sezione di studio 121
Figura 6.3-Sezione schematica mostrante i più rilevanti strumenti di monitoraggio e risultati ottenuti (Forlati et al., 2004) 124
Figura 6.4-sezione geologico-tecnica con posizione degli inclinometri e ricostruzione della posizione delle superfici di scivolamento dall'analisi di monitoraggio degli inclinometri 125
Figura 6.5-sezione geologico-tecnica con posizione della falda media nel periodo 2012-2018 126

Figura 6.6-sezione geologico-tecnica e ricostruzione delle superfici di scivolamento dall'analisi di monitoraggio degli inclinometri *127*
Figura 6.7- metodo dell'equilibrio limite nel caso di scivolamento piano, (Materiale didattico del corso di Stabilità dei pendii, Pirulli 2018) *137*
Figura 6.8-metodi di analisi in campo continuo (Materiale didattico del corso di Stabilità dei pendii, Pirulli 2018) *137*
Figura 6.9-Differential Methods e Integral Methods (Materiale didattico del corso di Numerical Methods for Geotechnical Engineering, Barla 2018) *138*
Figura 6.10-stage 1, modello scatolare *140*
Figura 6.11-stage 2, prima fase di scarico *140*
Figura 6.12-stage 3, seconda fase di scarico *141*
Figura 6.13-stage 4 terza e ultima fase di scarico *141*
Figura 6.14-stage 5, passaggio alla legge elasto plastica perfetta *142*
Figura 6.15-stage 6, inserimento della falda *142*
Figura 6.16-A)Massime deformazioni di taglio, falda media, SRF=1; B) zoom nella porzione di interesse *145*
Figura 6.17-A)Massime deformazioni di taglio, falda media Critical SRF=1.14; B) zoom nella porzione di interesse con indicazione della posizione delle superfici di scivolamento *146*
Figura 6.18- A)Massime deformazioni di taglio, falda massima Critical SRF=1.11; B) zoom nella porzione di interesse con indicazione della posizione delle superfici di scivolamento *150*

9.2 Indice delle tabelle

Tabella 2.1-caratteristiche frana Cassas (I.S.P.R.A., 2016) 10
Tabella 2.2-Descrizione delle classi di qualità dell'ammasso roccioso (Romana, 1990) 32
Tabella 2.3-Probabilità di occorrenza (Forlati et al., 2004) 38
Tabella 3.1-Ubicazioni stazioni meteorologiche A.R.P.A. Piemonte 45
Tabella 3.2-Ubicazione strumenti di monitoraggio S.I.T.A.F. 45
Tabella 3.3-Descrizione dei sensori delle stazioni AR.P.A. Piemonte 48
Tabella 3.4-Caratteristiche del pluviometro A.R.P.A. Piemonte (Sito web A.R.P.A. Piemonte) 49
Tabella 3.5-Caratteristiche del Termoigrometro (A.R.P.A. Piemonte) 50
Tabella 3.6-Caratteristiche del nivometro ad ultrasuoni (A.R.P.A. Piemonte) 51
Tabella 3.7-Ubicazione misuratori di portata e dei piezometri 57
Tabella 3.8-Caratteristiche strumentazione idrogeologica (S.I.T.A.F. & Musinet engineering 2018) 57
Tabella 3.9-Caratteristiche della strumentazione piezometrica in foro (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering 2018) 58
Tabella 3.10-Caratteristiche strumentazione costituente l'impianto (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering, 2018) 65
Tabella 3.11-Descrizione delle sonde e centraline utilizzate (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering, 2018) 66
Tabella 4.1-Esito analisi di dati nel coronamento 71
Tabella 4.2-analisi dati sperone roccioso occidentale 71
Tabella 4.3-Misuratori di portata: periodo di osservazione e analisi dati (S.I.T.A.F. & Musinet engineering, 2018; B. Vigna, Gruppo di Idrogeologia Applicata del D.I.A.T.I.) 73
Tabella 4.4-Misuratori del livello di soggiacenza della falda: periodo di osservazione (S.I.T.A.F. & Musinet engineering, 2018) 73
Tabella 4.5-Misuratori del livello di soggiacenza della falda: analisi dei dati (S.I.T.A.F. & Musinet engineering, 2018) .. 74
Tabella 4.6-Sintesi dei risultati (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering, 2018) 76
Tabella 5.1-Sintesi delle letture inclinometriche manuali della colonna inclinometrica I1 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 89
Tabella 5.2-riassunto letture quadrimestrale DMS-I3, periodo 2015-2018, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 91
Tabella 5.3-sintensi delle letture inclinometriche manuali eseguite sulla colonna I4 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 94
Tabella 5.4-sintesi delle letture inclinometriche manuali della colonna I5 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 95
Tabella 5.5-Colonna inclinometrica I5, inclinazione assoluta per le sonde fisse S1 e S2 (lettura di zero), (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 105
Tabella 6.1-semplificazione dei sondaggi stratigrafici forniti dall'A.R.P.A. Piemonte 123
Tabella 6.2-riassunto delle proprietà dei materiali da prove in sito 130
Tabella 6.3- definizione del punteggio da attribuire alla resistenza a compressione monoassiale (Materiale didattico del corso di Meccanica delle Rocce, Scavia C. e & Barbero M., 2017) 133
Tabella 6.4-definizione del punteggio da attribuire al RQD (Materiale didattico del corso di Meccanica delle Rocce, Scavia C. & Barbero M., 2017) 133
Tabella 6.5- definizione del punteggio da attribuire alla spaziatura media delle discontinuità (Materiale didattico del corso di Meccanica delle Rocce, Scavia C. & Barbero M., 2017) 134
Tabella 6.6- definizione del punteggio da attribuire alla condizione generale delle discontinuità (Materiale didattico del corso di Meccanica delle Rocce, Scavia C. & Barbero M., 2017) 134
Tabella 6.7-riassunto dei punteggi assegnati e calcolo dell'indice GSI per gli strati caratterizzanti l'ammasso roccioso in calcescisti 134
Tabella 6.8- definizione del punteggio da attribuire alle venute d'acqua (Materiale didattico del corso di Meccanica delle Rocce, Scavia C. & Barbero M., 2017) 135
Tabella 6.9-punteggi assegnati ai vari parametri e calcolo dell'RMR di base 135
Tabella 6.10-valori del modulo elastico ottenuti per i vari strati con cui è stato schematizzato l'ammasso roccioso ... 136
Tabella 6.11-valori dei parametri utilizzati nel criterio generalizzato di Hoek &Brown per i tre strati con cui si è suddiviso l'ammasso roccioso 136
Tabella 6.12-riduzione dei parametri di resistenza, analisi 1, falda media 144
Tabella 6.13-Differenza di spostamento ottenuta tra posizione massima della falda e posizione media della falda, mediante simulazione numerica 153

Tabella 8.1-caratteristiche generali, perforazione 101071 ..... *258*
Tabella 8.2-caratteristiche geologiche, perforazione 101071 ..... *258*
Tabella 8.3-stratigrafia intercettata, perforazione 101071 ..... *259*
Tabella 8.4-caratteristiche generali, perforazione 101072 ..... *260*
Tabella 8.5-caratteristiche geologiche, perforazione 101072 ..... *260*
Tabella 8.6-stratigrafia intercettata, perforazione 101072 ..... *260*
Tabella 8.7-caratteristiche generali, perforazione 102503 ..... *261*
Tabella 8.8-caratteristiche geologiche, perforazione 102503 ..... *262*
Tabella 8.9-stratigrafia intercettata, perforazione 102503 ..... *262*
Tabella 8.10-Determinazione dell'angolo di resistenza al taglio con relazione di Shioi e Fukuni *263*
Tabella 8.11-attribuzione della densità e peso specifico alle stratigrafie *263*
Tabella 8.12-determinazione dell'angolo di resistenza al taglio con relazione di Schmertmann *263*
Tabella 8.13-determinazione dell'angolo di resistenza al taglio con relazione di Shioi e Fukuni e Progettazione Geotecnica, perforazione 101072 ..... *264*
Tabella 8.14-attribuzione della densità e peso specifico alle stratigrafie, perforazioni 101072 ..... *264*
Tabella 8.15-determinazione dell'angolo di resistenza al taglio con relazione di Schmertmann, perforazione 101072 *264*
Tabella 8.16-Determinazione dell'angolo di resistenza al taglio con Shioi e Fukuni, perforazione 102503 ..... *265*
Tabella 8.17-attribuzione della densità e del peso specifico alla stratigrafia, perforazione 102503 ..... *265*
Tabella 8.18-determinazione dell'angolo di resistenza al taglio con relazione di Schmertmann *265*
Tabella 8.19-modulo elastico con relazione di Burland e Burbridge, perforazione 10171 ..... *266*
Tabella 8.20-modulo elastico con relazione di Burland e Burbridge, perforazione 101072 ..... *266*
Tabella 8.21-modulo elastico con relazione di Burland e Burbridge, perforazione 102503 ..... *266*

9.3 Indice dei grafici

Grafico 2.1- Dati geomeccanici in alcuni siti nell'area circostante la frana del Cassas (Lapenta & Trombetta, 1996)..... 32
Grafico 5.1-stazione Le Selle: precipitazioni e altezza neve, ANNO 2014 80
Grafico 5.2-stazione le Selle: precipitazioni e temperatura dell'aria, anno 2014 80
Grafico 5.3-Stazione Le Selle: precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e altezza neve, anno 2014 81
Grafico 5.4-stazione Le Selle: precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e temperatura dell'aria, anno 2014 81
Grafico 5.5-precipitazioni liquide e nevose di Salbertrand Vs portata di Q3, anno 2018 (periodo gennaio-settembre) .. 84
Grafico 5.6-altezza neve di Salbertrand Vs portata di Q3, anno 2018 (periodo gennaio-settembre) 84
Grafico 5.7-precipitazioni liquide e nevose di Salbertrand Vs soggiacenza di Pz6, anno 2018 (periodo gennaio-settembre) 85
Grafico 5.8-altezza neve di Salbertrand Vs soggiacenza di Pz6, anno 2018 (periodo gennaio-settembre)..... 85
Grafico 5.9-precipitazioni di Salbertrand Vs soggiacenza di PzS2, Pz6 e PzCas2, anno 2018 (periodo gennaio-luglio) ... 87
Grafico 5.10-precipitazioni di Salbertrand Vs portata di Q2, Q3 e Galleria, anno 2017-2018..... 87
Grafico 5.11-Modulo dello spostamento cumulativo DMS-I2, periodo 2017-2018 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) ... 90
Grafico 5.12- Modulo dello spostamento cumulativo DMS-I3, periodo 2015-2018 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) .. 92
Grafico 5.13-Spostamento cumulato e differenziale colonna DMS-I3, del 28/05/18 23:45 rispetto al 20/03/18 11:51 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 93
Grafico 5.14- Colonna DMS I3, spostamento cumulato a profondità 46-47m, direzione 315°N, periodo novembre 2016 – dicembre 2017 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 98
Grafico 5.15- Colonna DMS I3, analisi della curva di spostamento cumulato a profondità 46-47m, direzione 315°N, periodo novembre 2016 – dicembre 2017 98
Grafico 5.16- spostamento cumulato DMS-I3 zona 46-47m Vs soggiacenza di Pz6 periodo novembre 2016 dicembre 2017 99
Grafico 5.17- spostamento cumulato DMS-I3 zona 46-47m Vs portata di Q3 periodo novembre 2016 dicembre 2017 . 99
Grafico 5.18- curva risultante degli spostamenti e angolo derivante dall'elaborazione integrale dal basso, periodo 2016-2018, colonna I5, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 101
Grafico 5.19- curva risultante degli spostamenti espressa in millimetri e angolo espresso in gradi derivante dall'elaborazione differenziale locale dal basso, periodo 2016-2018, colonna I5, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering).. 102
Grafico 5.20- spostamento cumulato DMS-I2 zona 11-16m Vs soggiacenza di Pz6 anno 2018 (periodo gennaio – ottobre)..... 104
Grafico 5.21- spostamento cumulato DMS-I2 zona 11-16m Vs portata di Q3 anno 2018 (periodo gennaio – ottobre) 104
Grafico 5.22-colonna I5, sonda fissa S1, inclinazione assoluta, anno 2018, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering)..... 105
Grafico 5.23-sonda fissa S2, inclinazione assoluta, anno 2018 (periodo giugno-settembre), (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering)..... 106
Grafico 5.24-colonna I5, sonde fisse S1 e S2, confronto tra i moduli di spostamento, anno 2018 (periodo giugno-settembre) 106
Grafico 5.25-colonna I5, sonda S1, modulo dello spostamento Vs soggiacenza di Pz6, anno 2018 (periodo giugno-settembre) 107
Grafico 5.26-colonna I5, sonda S1, deviazione angolare verticale Vs piezometria, anno 2018 (periodo giugno-agosto). In verde la quota del piano di scivolamento, in rosso l'evoluzione dell'inclinazione relativa e in blu l'evoluzione della soggiacenza della falda (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering)..... 108
Grafico 5.27- galleria drenante: portata Vs conducibilità elettrica specifica dell'acqua, anno 2018 110
Grafico 5.28-galleria drenante: portata Vs temperatura dell'acqua, anno 2018..... 110
Grafico 5.29-altezza di neve al suolo Vs portata in galleria Vs soggiacenza di Pz6, anno 2018..... 111
Grafico 5.30-precipitazioni liquide e nevose di Le Selle Vs portata in galleria, anno 2018..... 111
Grafico 5.31- analisi chimica delle acque, concentrazione ioni positivi [Mg/l]..... 113
Grafico 5.32-analisi chimica delle acque, concentrazione ioni negativi Mg/l] 113
Grafico 5.33- analisi chimica delle acque, conducibilità elettrica specifica a 25°C..... 114
Grafico 5.34-analisi chimica delle acque, rapporto Ca/Mg 115
Grafico 6.1-massime deformazioni a taglio ottenute da simulazioni numeriche colonne I2e I4, posizione media della falda, SRF=FS=1.14..... 148

Grafico 6.2- massime deformazioni a taglio ottenute da simulazioni numeriche colonne I1e I3, posizione media della falda, SRF=FS=1.14 149
Grafico 6.3-confronto tra massime deformazioni a taglio ottenute da simulazioni numeriche colonne I2 e I4 con posizione media e massima della falda 151
Grafico 6.4-passaggio da valore medio a valore massimo piezometro PzS2 152
Grafico 6.5- passaggio da valore medio a valore massimo piezometro Pz6 152
Grafico 6.6-DMS-I2 zona 11-16m, innalzamento falda dal valore medio al valore massimo 153
Grafico 8.1- stazione Le Selle: precipitazioni liquide, precipitazione nevose e altezza neve, anno 2015 157
Grafico 8.2-stazione Le Selle: precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e altezza neve, anno 2015 157
Grafico 8.3-stazione Le Selle: precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e altezza neve, anno 2016 158
Grafico 8.4-stazione Le Selle: precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e temperatura dell'aria, anno 2016 158
Grafico 8.5-stazione Le Selle: precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e altezza neve, anno 2017 159
Grafico 8.6-stazione Le Selle: precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e temperatura dell'aria, anno 2017 159
Grafico 8.7-stazione Le Selle: precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e altezza neve, anno 2018 160
Grafico 8.8-stazione Le Selle: precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e temperatura dell'aria, anno 2018 160
Grafico 8.9-stazione Salbertrand: precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e altezza neve, anno 2014 161
Grafico 8.10-stazione Salbertrand: precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e temperatura dell'aria, anno 2014 .. 161
Grafico 8.11-stazione Salbertrand: precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e altezza neve, anno 2015 162
Grafico 8.12-stazione Salbertrand: precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e temperatura dell'aria, anno 2015 .. 162
Grafico 8.13-stazione Salbertrand: precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e altezza neve, anno 2016 163
Grafico 8.14-stazione Salbertrand: precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e temperatura dell'aria, anno 2016 .. 163
Grafico 8.15-stazione Salbertrand: precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e altezza neve, anno 2017 164
Grafico 8.16-stazione Salbertrand: precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e temperatura dell'aria, anno 2017 .. 164
Grafico 8.17-stazione Salbertrand: precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e altezza neve, anno 2018 165
Grafico 8.18-stazione Salbertrand: precipitazioni liquide, precipitazione nevose e temperatura dell'aria, anno 2018 . 165
Grafico 8.19-strumenti PL1 e T1: precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e temperatura dell'aria, anno 2014-2015(periodo 20/05/14-13/07/15) 166
Grafico 8.20-strumenti PL1 e T1: precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e temperatura dell'aria, anno 2017 (periodo 18/05/17-20/10/17) 166
Grafico 8.21-precipitazioni liquide e nevose di Le Selle Vs soggiacenza di PzS2, anno 2014 167
Grafico 8.22-altezza neve di Le Selle Vs soggiacenza di PzS2, anno 2014 167
Grafico 8.23-precipitazioni liquide e nevose di Le Selle Vs soggiacenza di Pz4, anno 2014 168
Grafico 8.24-altezza neve di Le Selle Vs soggiacenza di Pz4, anno 2014 168
Grafico 8.25-precipitazioni liquide e nevose di Salbertrand Vs portata di Q2, anno 2014 169
Grafico 8.26-precipitazioni liquide e nevose di Salbertrand Vs portata di Q3, anno 2014 169
Grafico 8.27-precipitazioni liquide e nevose Vs soggiacenza di PzS2, anno 2014 170
Grafico 8.28-altezza neve di Salbertrand Vs soggiacenza di PzCas2, anno 2014 170
Grafico 8.29-precipitazioni liquide e nevose di Salbertrand Vs soggiacenza di Pz6, anno 2014 171
Grafico 8.30-altezza neve di Salbertrand Vs soggiacenza di Pz6, anno 2014 171
Grafico 8.31-precipitazioni liquide e nevose di Le Selle Vs soggiacenza di PzS2, anno 2015 (periodo gennaio-luglio) .. 172
Grafico 8.32-altezza neve di Le Selle Vs soggiacenza di PzS2, anno 2015 (periodo gennaio-luglio) 172
Grafico 8.33-precipitazioni liquide e nevose di Le Selle Vs soggiacenza di Pz4, anno 2015 (periodo gennaio-luglio) 173
Grafico 8.34-altezza neve di Le Selle Vs soggiacenza di Pz4, ANNO 2015 (periodo gennaio-luglio) 173
Grafico 8.35-precipitazioni liquide e nevose di Salbertrand Vs portata di Q2, anno 2015 174
Grafico 8.36-altezza neve di Salbertrand Vs portata di Q2, anno 2015 174
Grafico 8.37-precipitazioni liquide e nevose di Salbertrand Vs portata di Q3, anno 2015 (periodo gennaio-luglio) 175
Grafico 8.38-altezza neve di Salbertrand Vs portata di Q3, anno 2015 (periodo gennaio-luglio) 175
Grafico 8.39-precipitazioni liquide e nevose di Salbertrand Vs soggiacenza di PzCas2, anno 2015 176
Grafico 8.40-altezza neve di Salbertrand Vs soggiacenza di PzCas2, anno 2015 176
Grafico 8.41-precipitazioni liquide e nevose di Salbertrand Vs soggiacenza di Pz6, anno 2015 177
Grafico 8.42-altezza neve di Salbertrand Vs soggiacenza di Pz6, anno 2015 177

Grafico 8.43-precipitazioni liquide e nevose di PL1-T1 Vs portata di Q3, anno 2014-2015 (periodo 20/05/14-13/07/15) 178
Grafico 8.44-precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e temperatura dell'aria di PL1-T1, anno 2014-2015 (periodo 20/05/14-13/07/15) 178
Grafico 8.45-precipitazioni liquide e nevose di PL1-T1 Vs soggiacenza di PzS2, anno 2014-2015 (periodo 20/05/14-13/07/15) 179
Grafico 8.46-precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e temperatura dell'aria di PL1-T1, anno 2014-2015 (periodo 20/05/14-13/07/15) 179
Grafico 8.47-precipitazioni liquide e nevose di PL1-T1 Vs soggiacenza di Pz4, anno 2014-2015 (periodo 20/05/14-13/07/15) 180
Grafico 8.48-precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e temperatura dell'aria di PL1-T1, anno 2014-2015 (periodo 20/05/14-13/07/15) 180
Grafico 8.49-precipitazioni liquide e nevose di PL1-T1 Vs soggiacenza di Pz6, anno 2014-2015 (periodo 20/05/14-13/07/15) 181
Grafico 8.50-precipitazioni liquide, precipitazioni nevose e temperatura dell'aria di PL1-T1, anno 2014-2015 (periodo 20/05/14-13/07/15) 181
Grafico 8.51-precipitazioni liquide e nevose di Le Selle Vs soggiacenza di PzS2, anno 2016 (periodo aprile-dicembre) 182
Grafico 8.52-altezza neve di Le Selle Vs soggiacenza di PzS2, anno 2016 (periodo aprile-dicembre) 182
Grafico 8.53-precipitazioni liquide e nevose di Le Selle Vs soggiacenza di Pz4, anno 2016 (periodo aprile-ottobre)..... 183
Grafico 8.54-altezza neve di Le Selle Vs soggiacenza di Pz4, anno 2016 (periodo aprile-ottobre) 183
Grafico 8.55-precipitazioni liquide e nevose di Salbertrand Vs portata di Q2, anno 2016 (periodo aprile-dicembre) ... 184
Grafico 8.56-altezza neve di Salbertrand Vs portata di Q2, anno 2016 (periodo aprile-dicembre)..... 184
Grafico 8.57-precipitazioni liquide e nevose di Salbertrand Vs portata di Q3, anno 2016 185
Grafico 8.58-altezza neve di Salbertrand Vs portata di Q3, anno 2016..... 185
Grafico 8.59-precipitazioni liquide e nevose di Salbertrand Vs soggiacenza di PzCas2, anno 2016 186
Grafico 8.60-altezza neve di Salbertrand Vs soggiacenza di PzCas2, anno 2016 186
Grafico 8.61-precipitazioni liquide e nevose di Salbertrand Vs soggiacenza di Pz6, anno 2016..... 187
Grafico 8.62-altezza neve di Salbertrand Vs soggiacenza di Pz6, anno 2016..... 187
Grafico 8.63-precipitazioni liquide e nevose di Le Selle Vs soggiacenza di PzS2, anno 2017..... 188
Grafico 8.64-altezza neve di Le Selle Vs soggiacenza di PzS2, anno 2017 188
Grafico 8.65-precipitazioni liquide e nevose di Le Selle Vs soggiacenza di Pz4, anno 2017..... 189
Grafico 8.66-altezza neve di Le Selle Vs soggiacenza di Pz4, anno 2017 189
Grafico 8.67-precipitazioni liquide e nevose di Salbertrand Vs portata di Q2, anno 2017 190
Grafico 8.68-altezza neve di Salbertrand Vs portata di Q2, anno 2017..... 190
Grafico 8.69-precipitazioni liquide e nevose di Salbertrand Vs portata di Q3, anno 2017 191
Grafico 8.70-altezza neve di Salbertrand Vs portata di Q3, anno 2017..... 191
Grafico 8.71-precipitazioni liquide e nevose di Salbertrand Vs soggiacenza di PzS2, anno 2017..... 192
Grafico 8.72-altezza neve di Salbertrand Vs soggiacenza di PzS2, anno 2017 192
Grafico 8.73-precipitazioni liquide e nevose Vs soggiacenza di Pz6, anno 2017 193
Grafico 8.74-altezza neve di Salbertrand Vs soggiacenza di Pz6, anno 2017..... 193
Grafico 8.75-precipitazioni liquide di PL1 Vs portata di Q3, anno 2017 (periodo 18/05/17-20/10/17) 194
Grafico 8.76-precipitazioni liquide di PL1 Vs soggiacenza di PzS2, Pz4 e Pz6, anno 2017 (periodo 18/05/17-20/10/17) 194
Grafico 8.77-precipitazioni liquide e nevose di Le Selle Vs portata in galleria, anno 2018 (periodo gennaio-novembre) 195
Grafico 8.78-altezza neve di Le Selle Vs portata in galleria, anno 2018 (periodo gennaio-novembre) 195
Grafico 8.79-precipitazioni liquide e nevose di Le Selle Vs soggiacenza di PzS2, anno 2018 (periodo gennaio-luglio) .. 196
Grafico 8.80-altezza neve di Le Selle Vs soggiacenza di PzS2, anno 2018 (periodo gennaio-luglio)..... 196
Grafico 8.81-precipitazioni liquide e nevose di Salbertrand Vs portata di Q2, anno 2018 (periodo gennaio-settembre) 197
Grafico 8.82-altezza neve di Salbertrand Vs portata d iQ3, anno 2018 (periodo gennaio-settembre) 197

Grafico 8.83-precipitazioni liquide e nevose di Salbertrand Vs portata di Q3, anno 2018 (periodo gennaio-settembre) 198
Grafico 8.84-altezza neve di Salbertrand Vs portata di Q3, anno 2018 (periodo gennaio-settembre) 198
Grafico 8.85-precipitazioni liquide e nevose di Salbertrand Vs soggiacenza di PzCas2, anno 2018 (periodo gennaio-luglio) 199
Grafico 8.86-altezza neve di Salbertrand Vs soggiacenza di PzCas2, anno 2018 (periodo gennaio-luglio) 199
Grafico 8.87-precipitazioni liquide e nevose di Salbertrand Vs soggiacenza di Pz6, anno 2018 (periodo gennaio-settembre) 200
Grafico 8.88-altezza neve di Salbertrand Vs soggiacenza di Pz6, anno 2018 (periodo gennaio-settembre) 200
Grafico 8.89-curva risultante degli spostamenti e angolo derivante dall'elaborazione integrale dal basso, anno 2014-2015, colonna I1, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 201
Grafico 8.90- curva risultante degli spostamenti espressa in millimetri e angolo espresso in gradi derivante dall'elaborazione differenziale locale dal basso, anno 2014-2015, colonna I1, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 202
Grafico 8.91-diagramma polare della deviazione derivante dall'elaborazione integrale dal basso, anno 2014-2015, colonna I1, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 203
Grafico 8.92-curva risultante degli spostamenti e angolo derivante dall'elaborazione integrale dal basso, anno 2015-2017, colonna I1, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 204
Grafico 8.93-curva risultante degli spostamenti espressa in millimetri e angolo espresso in gradi derivante dall'elaborazione differenziale locale dal basso, anno 2015-2017, colonna I1 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 205
Grafico 8.94-diagramma polare della deviazione derivante dall'elaborazione integrale dal basso, anno 2014-2015, colonna I1, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 206
Grafico 8.95-curva risultante degli spostamenti e angolo derivante dall'elaborazione integrale dal basso, anno 2017-2018, colonna I1, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 207
Grafico 8.96- curva risultante degli spostamenti espressa in millimetri e angolo espresso in gradi derivante dall'elaborazione differenziale locale dal basso, anno 2015-2017, colonna I1, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 208
Grafico 8.97- diagramma polare della deviazione derivante dall'elaborazione integrale dal basso, anno 2014-2015, colonna I1 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 209
Grafico 8.98-Modulo dello spostamento cumulativo DMS-I2, periodo 2017-2018 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) . 210
Grafico 8.99-Modulo dello spostamento differenziale DMS I2, periodo 2017-2018 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 211
Grafico 8.100-diagramma polare cumulativo, periodo 2017-2018, DMS-I2 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 212
Grafico 8.101-diagramma polare cumulativo, periodo 2018, DMS-I2 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 212
Grafico 8.102- curva risultante degli spostamenti e angolo derivante dall'elaborazione integrale dal basso, anno 2013-2014, colonna I3, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 213
Grafico 8.103- curva risultante degli spostamenti espressa in millimetri e angolo espresso in gradi derivante dall'elaborazione differenziale locale dal basso, anno 2013-2014, colonna I3, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 214
Grafico 8.104- diagramma polare della deviazione derivante dall'elaborazione integrale dal basso, anno 2013-2014, colonna I3 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 215
Grafico 8.105- Modulo dello spostamento differenziale DMS I3, periodo 2015-2016 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 216
Grafico 8.106- Modulo dello spostamento differenziale DMS I3, periodo 2017 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 216
Grafico 8.107- Modulo dello spostamento differenziale DMS I3, periodo 2018 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 217
Grafico 8.108- diagramma polare cumulativo, periodo 2015, DMS-I3 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 217
Grafico 8.109- diagramma polare cumulativo, periodo 2015-2016, DMS-I3 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 218
Grafico 8.110- diagramma polare cumulativo, periodo 2017, DMS-I3 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 218
Grafico 8.111- diagramma polare cumulativo, periodo 2018, DMS-I3 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 219
Grafico 8.112- curva risultante degli spostamenti e angolo derivante dall'elaborazione integrale dal basso, anno 2014-2015, colonna I4, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 220
Grafico 8.113- curva risultante degli spostamenti espressa in millimetri e angolo espresso in gradi derivante dall'elaborazione differenziale locale dal basso, anno 2014-2015, colonna I4, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 221
Grafico 8.114- diagramma polare della deviazione derivante dall'elaborazione integrale dal basso, anno 2014-2015, colonna I4 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 222

Grafico 8.115- curva risultante degli spostamenti e angolo derivante dall'elaborazione integrale dal basso, anno 2014-2015, colonna I4, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering)..... 223
Grafico 8.116- curva risultante degli spostamenti espressa in millimetri e angolo espresso in gradi derivante dall'elaborazione differenziale locale dal basso, anno 2014-2015, colonna I4, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering)..... 224
Grafico 8.117- diagramma polare della deviazione derivante dall'elaborazione integrale dal basso, anno 2014-2015, colonna I4 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering)..... 225
Grafico 8.118- curva risultante degli spostamenti e angolo derivante dall'elaborazione integrale dal basso, anno 2014-2015, colonna I5, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering)..... 226
Grafico 8.119- curva risultante degli spostamenti espressa in millimetri e angolo espresso in gradi derivante dall'elaborazione differenziale locale dal basso, anno 2014-2015, colonna I5, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering)..... 227
Grafico 8.120- diagramma polare della deviazione derivante dall'elaborazione integrale dal basso, anno 2014-2015, colonna I5 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering)..... 228
Grafico 8.121- curva risultante degli spostamenti e angolo derivante dall'elaborazione integrale dal basso, anno 2015-2017, colonna I5, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering)..... 229
Grafico 8.122- curva risultante degli spostamenti espressa in millimetri e angolo espresso in gradi derivante dall'elaborazione differenziale locale dal basso, anno 2015-2017, colonna I5, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering)..... 230
Grafico 8.123- diagramma polare della deviazione derivante dall'elaborazione integrale dal basso, anno 2015-2017, colonna I5 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering)..... 231
Grafico 8.124- curva risultante degli spostamenti e angolo derivante dall'elaborazione integrale dal basso, anno 2016-2018, colonna I5, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering)..... 232
Grafico 8.125- curva risultante degli spostamenti espressa in millimetri e angolo espresso in gradi derivante dall'elaborazione differenziale locale dal basso, anno 2016-2018, colonna I5, (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering)..... 233
Grafico 8.126- diagramma polare della deviazione derivante dall'elaborazione integrale dal basso, anno 2016-2018, colonna I5 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering)..... 234
Grafico 8.127-Colonna DMS I3, spostamento cumulato a profondità 46-47m, direzione 315°N, anno 2015 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering)..... 235
Grafico 8.128-Colonna DMS I3, analisi della curva di spostamento cumulato a profondità 46-47m, direzione 315°N, anno 2015..... 235
Grafico 8.129-spostamento cumulato DMS-I3 zona 46-47m Vs soggiacenza di PzS2 anno 2015 (periodo gennaio – agosto)..... 236
Grafico 8.130- spostamento cumulato DMS-I3 zona 46-47m Vs soggiacenza di Pz4 anno 2015 (periodo gennaio – luglio)..... 236
Grafico 8.131- spostamento cumulato DMS-I3 zona 46-47m Vs soggiacenza di Pz6 anno 2015 (periodo gennaio – luglio)..... 237
Grafico 8.132- spostamento cumulato DMS-I3 zona 46-47m Vs portata di Q3 anno 2015 237
Grafico 8.133- Colonna DMS I3, spostamento cumulato a profondità 46-47m, direzione 315°N, periodo gennaio – ottobre 2016 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 238
Grafico 8.134- Colonna DMS I3, analisi della curva di spostamento cumulato a profondità 46-47m, direzione 315°N, periodo gennaio – ottobre 2016..... 238
Grafico 8.135- spostamento cumulato DMS-I3 zona 46-47m Vs soggiacenza di PzS2 periodo aprile-ottobre 2016..... 239
Grafico 8.136- spostamento cumulato DMS-I3 zona 46-47m Vs soggiacenza di Pz4 periodo aprile – ottobre 2016..... 239
Grafico 8.137- spostamento cumulato DMS-I3 zona 46-47m Vs soggiacenza di PzS6 periodo aprile-ottobre 2016..... 240
Grafico 8.138- spostamento cumulato DMS-I3 zona 46-47m Vs portata di Q3 periodo gennaio-ottobre 2016 240
Grafico 8.139- Colonna DMS I3, spostamento cumulato a profondità 46-47m, direzione 315°N, periodo novembre 2016 – dicembre 2017 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering)..... 241
Grafico 8.140- Colonna DMS I3, analisi della curva di spostamento cumulato a profondità 46-47m, direzione 315°N, periodo novembre 2016 – dicembre 2017..... 241
Grafico 8.141- spostamento cumulato DMS-I3 zona 46-47m Vs soggiacenza di PzS2 periodo novembre 2016 dicembre 2017..... 242
Grafico 8.142- spostamento cumulato DMS-I3 zona 46-47m Vs soggiacenza di Pz4 periodo novembre 2016 dicembre 2017..... 242

Grafico 8.143- spostamento cumulato DMS-I3 zona 46-47m Vs soggiacenza di Pz6 periodo novembre 2016 dicembre 2017 243
Grafico 8.144- spostamento cumulato DMS-I3 zona 46-47m Vs portata di Q3 periodo novembre 2016 dicembre 2017 243
Grafico 8.145- Colonna DMS I3, spostamento cumulato a profondità 46-47m, direzione 315°N, anno 2018 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 244
Grafico 8.146- Colonna DMS I3, analisi della curva di spostamento cumulato a profondità 46-47m, direzione 315°N, anno 2018 244
Grafico 8.147- spostamento cumulato DMS-I3 zona 46-47m Vs soggiacenza di PzS2, anno 2018 (periodo gennaio – settembre) 245
Grafico 8.148- spostamento cumulato DMS-I3 zona 46-47m Vs soggiacenza di Pz6 anno 2018 (periodo gennaio – ottobre) 245
Grafico 8.149- spostamento cumulato DMS-I3 zona 46-47m Vs portata di Q3 anno 2018 (periodo gennaio – ottobre) 246
Grafico 8.150- spostamento cumulato DMS-I3 zona 46-47m Vs portata in galleria anno 2018 246
Grafico 8.151- Colonna DMS I2, spostamento cumulato a profondità 11-16m, direzione 330°N, anno 2018 (S.I.T.A.F. & Musinet Engineering) 247
Grafico 8.152- Colonna DMS I2, analisi della curva di spostamento cumulato a profondità 11-16m, direzione 330°N, anno 2018 247
Grafico 8.153- spostamento cumulato DMS-I2 zona 11-16m Vs soggiacenza di PzCas2 anno 2018 (periodo gennaio – ottobre) 248
Grafico 8.154- spostamento cumulato DMS-I2 zona 11-16m Vs soggiacenza di Pz6 anno 2018 (periodo gennaio – ottobre) 248
Grafico 8.155- spostamento cumulato DMS-I2 zona 11-16m Vs portata di Q3 anno 2018 (periodo gennaio – ottobre) 249
Grafico 8.156- spostamento cumulato DMS-I2 zona 11-16m Vs portata in galleria anno 2018 249
Grafico 8.157-portata di Q2 Vs temperatura dell'acqua di Q2, periodo aprile 2016- settembre 2018 250
Grafico 8.158-portata di Q2 Vs altezza neve al suolo di Salbertrand, periodo aprile 2016 – settembre 2018 250
Grafico 8.159-portata di Q3 Vs temperatura dell'acqua di Q3, periodo luglio 2016 – settembre 2018 251
Grafico 8.160- portata di Q3 Vs altezza neve di Salbertrand, periodo luglio 2016 –settembre 2018 251
Grafico 8.161-portata di Q2 Vs temperatura dell'acqua di Q2, periodo 01/11/16 – 10/04/17 252
Grafico 8.162-portata di Q2 Vs altezza neve di Salbertrand, periodo 01/11/16 – 10/04/17 252
Grafico 8.163-portata di Q2 Vs temperatura dell'acqua di Q2, periodo 11/12/17 – 09/02/18 253
Grafico 8.164-portata di Q2 Vs altezza neve di Salbertrand, periodo 11/12/17 – 09/02/18 253
Grafico 8.165-portata di Q2 Vs temperatura dell'acqua di Q2, periodo 01/03/18 -20/05/18 254
Grafico 8.166-portata di Q2 Vs altezza neve di Salbertrand, periodo 01/03/18 – 20/05/18 254
Grafico 8.167-portata di Q2 Vs temperatura dell'acqua di Q2, periodo 255
Grafico 8.168-potata di Q3 Vs temperatura dell'acqua di Q3, periodo 27/10/16 – 04/02/17 255
Grafico 8.169-portata di Q3 Vs altezza neve di Salbertrand, periodo 27/10/16 – 04/02/17 256
Grafico 8.170-portata di Q3 Vs temperatura dell'acqua di Q3, periodo 24/02/18 -07/09/18 256
Grafico 8.171-portata di Q3 Vs altezza neve di Salbertrand, periodo 24/02/18 – 07/09/18 257
Grafico 8.172-andamento dell'Nspt con la profondità, perforazione 101071 259
Grafico 8.173-andamento dell'Nspt con la profondità, perforazione 101072 261
Grafico 8.174-andamento dell'Nspt con la profondità, perforazione 102503 262

9.4 Bibliografia

AA.VV.,1996. *La Frana del "Cassas", Salbertrand, Val di Susa* – in Rischi Generati da Grandi Movimenti Franosi, studio comparato di 4 siti nelle Alpi franco-italiane, Testo di Raccomandazioni, Programma Interreg I Italia-Francia, U.E.; Ed. Regione Piemonte – Université J. Fourier; pp. 71÷103.

AA.VV., 2002. *Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 Foglio 132-152-153 Bardonecchia e note illustrative* – Servizio Geologico d'Italia, ente realizzatore Regione Piemonte.

Alberto, Carraro, Giardino, Martinotti, Sassone & Tiranti. *Segnalazione di Sinkholes a vari stadi di evoluzione nelle alpi occidentali* pp. 1,3,9-14.

Baretti M., 1881. *Relazione sulle condizioni geologiche del versante destro della valle della Dora Riparia tra Chiomonte e Salbertrand*. Tip. e Lit. Camilla e Bertolero, Torino.

Baretti M., 1893. *Geologia della Provincia di Torino -con atlante fuori testo di 27 carte e 8 profili geologici*. Torino.

Barton N. e Chounbey V., 1977. *"The shear strength of rock joints in theory and practice"*, Rock Mechanincs 10, pp. 1-54.

Bieniawski, Z.T., 1974. Geomechanics Classification of Rock Masses and its Application inTunneling. *Proc. 3rd Int. Congr. Rock Mech.*, ISRM, Denver U.S.A. (II A): 27-32.

Brovero, M., Campus, S., Forlati, F., Rmasco, M. & Susella, G., 1996a. La frana del "Cassas", Salbertrand, Val di Susa. In Regione Piemonte & Université J. Fourier (Eds.), *Rischi Generati da Grandi Movimenti Franosi*, Programma Interreg I Italia-Francia: 71-103.

Carraro, F., Dramis, F. & Pieruccini, U., 1979. Large-scale landslides connected with neotectonic activity in the Alpine and Apennine ranges. In *Proc. 15th Plenary Meeting of IGU-UNESCO Commission "Geomorphological Survey & Mapping", Modena, 7-15 September 1979*: 213-230.

Carta Geologica d'Italia in scala 1:50 000, 2002. *Foglio 132-152-153 Bardonecchia*. Servizio Geologico Nazionale APAT, Roma.

Consorzio forestale di Ulzio, 1955. *Capitolato di vendita di soprasuolo boschivo*, doc. inedito, Archivio Consorzio Forestale di Oulx, 13 febbraio 1955.

C.T.M. [Compagnia Torinese Monitoraggi], 2003. Impianto di monitoraggio territoriale, geotecnico e sismico della Val Susa – Frana del Cassas. Impianto di monitoraggio inclinometrico – Misura

strumentazione, Rapporto Interpretativo N°14, giugno 2003 (not published). SITAF (Soc. It.Traforo Autostradale Frejus) s.p.a., Archives Settore Progettazione Interventi Geologico-Tecnici e Sismico, ARPA-Piemonte, Torino.

Davis, G. H. & Reynolds, S.J., 1996. *Structural geology of rocks and regions*. 776 p. New York: Wiley & Sons.

Dela Pierre, F., Lozar, F. & Polino, R., 1997. L'utilizzo della tettono-stratigrafia per la rappresentazione cartografica delle successioni meta-sedimentarie nelle aree di catena. *Mem. Sci. Geol.* (49): 195-206.

Epifani, F.D., 1991. *Studio geologico e geomorfologico del versante a monte delle aree di servizio di Salbertrand* – Studio geologico Epifani – SITAF (not published), Archives Settore Progettazione Interventi Geologico-Tecnici e Sismico, ARPA-Piemonte, Torino.

Forlati F., Morelli M., Paro L., Piana F., Polino R., Susella G. & Troisi C., 2004. The Cassas landslide. In: Bonnard C., Forlati F. & Scavia C. (eds.), *Identification and mitigation of large landslide risks in Europe*, IMIRILAND Project, 45-88.

Fusetti, 2002. *Studio geologico sulle deformazioni gravitative profonde del settore ossolano tra Crodo, Baceno e Varzo (Verbania, Piemonte, Italia).* Geol. Insubrica, 6, n. 1, 49-57.

Giardino, M. & Polino, R., 1997. Le deformazioni di versante dell'alta valle di Susa: risposta pellicolare dell'evoluzione tettonica recente. *Il quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences* (10-2): 293-298.

Giardino, 1995. *Analisi di deformazioni superficiali: metodologie di ricerca ed esempi di studio nella media Valle d'Aosta*. Consorzio Universitario Cagliari, Genova, Torino. Università di Torino, Tesi di dottorato di ricerca. 240 pp.

I.S.P.R.A. [Istituto Superiore Per la Ricerca Ambientale], 2016. Frana 001-00870-02, *Cartografia online I.F.F.I. (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia).*

Lancellotta, 2012. *Geotecnica,* Zanichelli IV edizione: 440-441.

Lapenta, M.C. & Trombetta, A.,1996. Caratterizzazione geomeccanica dei versanti rocciosi dell'alta Valle di Susa (Piemonte) in relazione ai problemi di stabilità. GEAM (*Associazione Georisorse & Ambiente*) (91): 31-39.

Morelli M., Paro L. & Piana F., 2005. Multidisciplinary approach to hazard and risk analysis: the case of Cassas landslide (Susa Valley, NW Italy). *Proc. Intern. Conf. Geoline 2005: Geology and linear infrastructures, Lyon (France), 23-25 May 2005*, BRGM Edition.

Mortara, G & Sorzana, P.F., 1987. Fenomeni di deformazione gravitativa profonda nell'arco alpino occidentale italiano. Considerazioni lito-strutturali e morfologiche. *Boll. Soc. Geol. It*. (106): 303-314.

Peretti, L., 1967. Collegamento autostradale del traforo del Frejus con Torino. *La rivista della strada* (36, 310).

Paro, L., 1997. *Ricostruzione dell'evoluzione geologica quaternaria del versante destro della Valle di Susa nel tratto compreso tra Salbertrand ed Exilles*. Thesis in Geological Science, University of Torino; 4 maps published by Regione Piemonte.

Polino, R., Dela Pierre, F., Borghi, A., Carraro, F., Fioraso, G & Giardino, M., 2002. *Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50 000 – foglio 132-152-153 Bardonecchia*. Servizio Geologico Nazionale APAT, Roma.

Programma Interreg I Italia-Francia, 1996, Rischi generati da grandi fenomeni franosi. Regione Piemonte. pp. 71-103

Programma Interreg IVa Risknat, 2012. Schede di III livello SIFRAP Provincia di Torino. *Grandi frane Permanenti Complesse*, Rischi idrogeologici e da fenomeni gravitativi. Regione Piemonte. Frana del Cassas.

Puma, F., Ramasco, M., Stoppa, T & Susella, G., 1984. Carta dei movimenti di massa nelle alte valli del Chisone e di Susa.- in Compagnoni et al., *Geotraversa della Zona Piemontese nella Valle di Susa, escursione pre-congresso (10-11/9/1984) 72° Congresso Soc. Geol. It., Serv. Geol. Reg. Piemonte*.

Puma, F., Ramasco, M., Stoppa, T & Susella, G., 1989. Movimenti di massa nelle alte valli di Susa e Chisone. *Boll. Soc. Geol. It*. 108, 391-399.

Romana, M., 1990. Practice of SMR Classification for Slope Appraisal. *Proc. 5th Int. Symp. On Landslides, Lausanne, Switzerland*, Vol. 2: 1227-1231. Rotterdam: Balkema.

Sacco, F., 1898. *La geologia e le linee ferroviarie in Piemonte*. Torino.

SIFRAP, 2018. *Schede di II livello Cassas*. A.R.P.A. Piemonte.

S.I.T.A.F. [Società Italiana Traforo Autostradale del Frejus] & Musinet Engineering. *Rapporto interpretativo impianto di monitoraggio della Frana del Cassas*.

Vialon, P., Ruhland, M. & Grolier, J., 1976. *Eléments de tectonique analytique*. P. 118 Paris: Masson.

9.5 Sitografia

SIM strumenti. http://www.simstrumenti.com

Geoportale Regione Piemonte http://www.geoportale.piemonte.it

A.R.P.A. Piemonte http://www.arpa.piemonte.it/

A.R.P.A. Piemonte tematica Geologia e Dissesto

http://webgis.arpa.piemonte.it/geoportale/index.php/tematiche/geologia-e-dissesto

STS Italia. http://www.sts-italia.it

OTR. http://www.otr-geo.it

Musinet Engineering. http://www.musinet.it

9.6 Dati forniti dal D.I.A.T.I. del Politecnico di Torino

Dati di portata, conducibilità elettrica specifica e temperatura nell'anno 2018 dello strumento posto all'interno della galleria drenante del Cassas (Prof. B. Vigna, Dipartimento di Idrogeologia Applicata del D.I.A.T.I.)

Dati di analisi chimica delle acque delle sorgenti periodo 2017-2018 (Prof. A. Fiorucci, Gruppo di Idrogeologia Applicata del D.I.A.T.I.)

9.7 Materiale didattico utilizzato

Materiale didattico del corso di Stabilità dei Pendii (Prof.ssa M. Pirulli Marina, Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica, anno accademico 2017-2018).

Materiale didattico del corso di Meccanica delle Rocce (Prof.ssa Monica Barbero e Prof. Claudio Scavia, Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica, anno accademico 2016-2017).

Materiale didattico del corso di Geologia e Protezione Civile (Prof. Bartolomeo Vigna, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente del Territorio e delle Infrastrutture, anno accademico 2014-2015).

Materiale didattico del corso di Metodi numerici per l'ingegneria Geotecnica, (Prof. Marco Barla, Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica, anno accademico 2017-2018).

9.8 Dati forniti dall'A.R.P.A. Piemonte

Dati di altezza neve al suolo, di temperatura dell'aria e di precipitazione delle stazioni meteorologiche di Le Selle e Salbertrand nel periodo 2014-2018.

9.9 Report S.I.T.A.F. & Musinet Engineering forniti

Elenco report su impianto di monitoraggio idrogeologico della frana del Cassas:

- ✓ 2014-01
- ✓ 2014-02
- ✓ 2015-01
- ✓ 2015-02
- ✓ 2016-01
- ✓ 2016-02
- ✓ 2017-01
- ✓ 2017-02
- ✓ 2018-01
- ✓ 2018-02

Elenco report su impianto di monitoraggio inclinometrico della frana del Cassas:

- ✓ 2014-01
- ✓ 2014-02
- ✓ 2014-03
- ✓ 2015-01
- ✓ 2015-02
- ✓ 2015-03
- ✓ 2016-01
- ✓ 2016-02
- ✓ 2016-03
- ✓ 2017-01
- ✓ 2017-02
- ✓ 2017-03
- ✓ 2018-01
- ✓ 2018-02
- ✓ 2018-03

Elenco report su impianto di monitoraggio geotecnico della frana del Cassas:

- ✓ 2017-01
- ✓ 2017-02
- ✓ 2018-01

Elenco report su impianto di monitoraggio topografico della frana del Cassas:

- ✓ 2017-01
- ✓ 2017-02