

# Le frane di Niscemi del gennaio 2026

Rapporto n.3

Monitoraggio, verifica del rischio residuo e criteri di intervento per la riduzione del rischio



Per conto di: Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri

Firenze, 20 aprile 2026

## Responsabili del progetto

Prof. Nicola CASAGLI - [nicola.casagli@unifi.it](mailto:nicola.casagli@unifi.it)

Presidente del Centro per la Protezione Civile dell'Università degli Studi di Firenze (CPC-UNIFI)

Prof. Luca FERRARIS - [luca.ferraris@cimafoundation.org](mailto:luca.ferraris@cimafoundation.org)

Presidente della Fondazione CIMA

Dott. Riccardo LANARI - [lanari.r@irea.cnr.it](mailto:lanari.r@irea.cnr.it)

CNR Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA)

## Gruppo di lavoro CPC-UNIFI

Silvia BIANCHINI, Giovanni GIGLI, Veronica PAZZI, Federico RASPINI, Francesco BECATTINI, Tommaso BENI, Tommaso CARLÀ, Pierluigi CONFUORTO, Matteo DEL SOLDATO, Gabriele FIBBI, Agnese INNOCENTI, Camilla MEDICI, Olga NARDINI, Massimiliano NOCENTINI, Teresa NOLESINI, Aldo PIOMBINO, Francesco POGGI

## Gruppo di lavoro Fondazione CIMA

Simone GABELLANI, Umberto MORRA DI CELLA, Flavio PIGNONE, Roberto TIRASSO, Lorenzo CAMPO, Lorenzo ALFIERI, Andrea LIBERTINO

## Gruppo di lavoro CNR IREA

Manuela BONANO, Francesco CASU, Claudio DE LUCA, Michele MANUNTA, Giovanni ONORATO, Yenni ROA, Pasquale STRIANO, Ivana ZINNO

## Con la collaborazione di:

### Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - OGS

Flavio ACCAINO, Luca BARADELLO, Francesca BEARZOT, Antonio BRATUS, Federico DA COL, Edy FORLIN, Massimo GIORGI, Luigi LUCERNA, Stefano MAFFIONE, Fabio MENEGHINI, Stefano PICOTTI, Matthia Ugo POTLECA, Michele POTLECA, Oziel SOUZA DE ARAUJO, Gaia TRAVAN

### Studio INGEO

Paolo BARSOTTI, Marco DEL CARLO, Giuseppe DI STASIO, Enrico FAVILLA, Marianna GENOVESI, Simone GIAMBELLI, Luigi GIAMMATTEI, Leonardo LOTTINI, Simone MARTINELLI, Luca MARTINI, Paolo TOSCHI

### TRE Altamira s.r.l.

Alessandro FERRETTI, Jacopo ALLIEVI, Alfio FUMAGALLI, Chiara GIANNICO, Xhenis LAZRI, Mattia RUSSO, Andrea UTTINI

## CRONOLOGIA DELLE VERSIONI

### **Rapporto n.3 del 20/04/2026**

- Aggiornamento e riorganizzazione sezione 1 *Introduzione*
- Integrazione sezione 3.3.2 *Meccanismo di movimento*
- Integrazione sezione 3.4.1 *Assetto litologico e contrasto di permeabilità e di competenza*
- Aggiornamento sezione 4.5 *Analisi post-evento*
- Aggiornamento sezione 6.2.3 *Risultati: tomografia dei primi arrivi*
- Aggiornamento sezione 6.3 *Integrazione indagine geoelettrica e sismica*
- Nuova sezione 8 *Caratterizzazione e modellazione idrologico-idraulica*
- Aggiornamento sezione 9 *Valutazione del rischio residuo nel centro abitato*
- Riorganizzazione e aggiornamento della sezione 10 *Scenari di rischio e strategie per la definizione delle proposte di intervento*
- Riorganizzazione sostanziale della sezione 11 *Proposte per il programma degli interventi della fase iniziale*
- Aggiornamento sezione 12 *Conclusioni*
- Correzione refusi vari

### **Rapporto n.2 del 09/03/2026**

- Aggiornamento sezione 1 *Introduzione*
- Aggiornamento sezione 2.2 *Inquadramento geomorfologico*
- Inserimento sezione 3.4.2 *Disboscamento ed erosione superficiale*
- Aggiornamento sezione 3.4.6 *Presenza di litotipi evaporitici*
- Aggiornamento sezione 4.5 *Analisi post-evento*
- Aggiornamento sezione 5 *Analisi dei dati satellitari ottici*
- Aggiornamento sezione 6.3 *Integrazione indagine geoelettrica e sismica*
- Inserimento sezione 8.4 *Gestione del rischio residuo a breve termine nel centro abitato*
- Inserimento sezione 8.5 *Aggiornamento della fascia di interdizione*
- Riorganizzazione e integrazione della sezione 9 *Criteri di intervento per la riduzione del rischio*
- Aggiornamento sezione 10 *Conclusioni*
- Correzione refusi vari

### **Rapporto n.1 del 26/02/2026**

- Prima versione del rapporto

# SOMMARIO

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>7</b>
1.1	QUADRO ISTITUZIONALE E OPERATIVO	7
1.2	STRUTTURA DEL RAPPORTO E SINTESI DEI CONTENUTI	8
<b>2</b>	<b>INQUADRAMENTO DELL'AREA</b>	<b>11</b>
2.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	11
2.2	INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO	14
<b>3</b>	<b>LE FRANE DI NISCEMI</b>	<b>17</b>
3.1	LA FRANA DEL 1790	17
3.2	LA FRANA DEL 1997	18
3.3	GLI EVENTI FRANOSI DEL 2026	20
3.3.1	Perimetrazione ed evoluzione	20
3.3.2	Meccanismo di movimento	27
3.3.3	Morfometria	29
3.4	CAUSE PREDISPONENTI E DI INNESCO	30
3.4.1	Assetto litologico e contrasto di permeabilità e di competenza	30
3.4.2	Disboscamento ed erosione superficiale	32
3.4.3	Processi erosivi delle acque incanalate	33
3.4.4	Precipitazioni	33
3.4.5	Sismicità	34
3.4.6	Presenza di litotipi evaporitici	35
3.4.7	Controllo tettonico	35
3.4.8	Concomitanza di cause	36
<b>4</b>	<b>ANALISI DEI DATI SATELLITARI RADAR INTERFEROMETRICI</b>	<b>37</b>
4.1	DESCRIZIONE DELLE TECNICHE IMPIEGATE	38
4.1.1	Interferometria radar satellitare differenziale - DInSAR	39
4.1.2	Elaborazione SBAS	39
4.1.3	Elaborazione SqueeSAR	41
4.1.4	Elaborazione <i>Pixel Offset Tracking</i>	44
4.1.5	Dynamic InSAR	44
4.2	SATELLITI UTILIZZATI	45
4.2.1	Sentinel-1	45
4.2.2	COSMO-SkyMed	46
4.2.3	SAOCOM	46
4.2.4	Capella <i>Space</i>	46
4.2.5	TerraSAR-X	47
4.3	ANALISI PRE-EVENTO	48
4.3.1	Sentinel-1 - elaborazione con tecnica SBAS	48
4.3.2	COSMO-SkyMed - elaborazione con tecnica SBAS	53
4.3.3	COSMO-SkyMed - elaborazione con tecnica SqueeSAR	58
4.4	ANALISI CO-EVENTO	64
4.4.1	COSMO-SkyMed - elaborazione con tecnica DInSAR	64
4.4.2	COSMO-SkyMed e SAOCOM - elaborazione con tecnica <i>Pixel Offset Tracking</i>	65
4.5	ANALISI POST-EVENTO	67
4.5.1	Capella <i>Space</i> - elaborazione con tecnica DInSAR	67
4.5.2	TerraSAR-X - elaborazione con tecnica DInSAR	68
4.5.3	Sentinel-1 - elaborazione con tecnica SBAS	69
4.5.4	COSMO-SkyMed - elaborazione con tecnica SBAS	74
4.5.5	Sentinel-1 - elaborazione con tecnica SqueeSAR	78
4.5.6	COSMO-SkyMed - elaborazione con tecnica SqueeSAR	84
4.5.7	Sentinel-1 - elaborazione con tecnica Dynamic InSAR	89
4.5.8	Sintesi delle evidenze radar satellitari	93
4.5.9	Programmazione delle acquisizioni radar satellitari	94
<b>5</b>	<b>ANALISI DEI DATI SATELLITARI OTTICI</b>	<b>95</b>
5.1	TECNICHE DI ELABORAZIONE	95
5.1.1	COSI-Corr	95
5.1.2	Particle Image Velocimetry (PIV)	96
5.2	SATELLITI UTILIZZATI	97
5.2.1	PlanetScope (alta risoluzione)	97
5.2.2	Pléiades Neo e WorldView Legion (altissima risoluzione)	98
5.3	RISULTATI	99

5.3.1	Confronto delle immagini PlanetScope.....	99
5.3.2	Confronto delle immagini Pléiades Neo e WorldView Legion.....	103
<b>6</b>	<b>INDAGINI GEOFISICHE.....</b>	<b>108</b>
6.1	INDAGINE GEOELETRICA .....	108
6.1.1	Tomografie elettriche 3D con <i>Fullwaver</i> .....	108
6.1.2	Campagna di acquisizione .....	110
6.1.3	Risultati .....	112
6.2	INDAGINE SISMICA AD ALTA RISOLUZIONE IN ONDE P E SH.....	119
6.2.1	I metodi di sismica attiva.....	119
6.2.2	Campagna di acquisizione.....	120
6.2.3	Risultati: tomografia dei primi arrivi .....	125
6.2.4	Risultati: <i>imaging</i> a riflessione .....	128
6.2.5	Risultati: onde di superficie.....	131
6.3	INTEGRAZIONE INDAGINE GEOELETRICA E SISMICA .....	136
<b>7</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE GEOTECNICA .....</b>	<b>143</b>
7.1	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA .....	143
7.1.1	Stratigrafia.....	143
7.1.2	Proprietà geotecniche.....	143
7.1.3	Inclinometri.....	144
7.1.4	Piezometria .....	147
7.2	MODELLAZIONE NUMERICA.....	148
7.2.1	Modello con saturazione totale delle argille.....	150
7.2.2	Modello con saturazione parziale delle argille.....	152
<b>8</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE IDROLOGICO-IDRAULICA .....</b>	<b>157</b>
8.1	RILIEVO UAV ED ELABORAZIONE DTM .....	157
8.1.1	Rilievo UAV.....	157
8.1.2	Restituzione Prodotti .....	164
8.2	ANALISI IDROLOGICA DEL BACINO DEL TORRENTE BENEFIZIO.....	170
8.2.1	Analisi del drenaggio superficiale e definizione dei bacini idrografici.....	170
8.2.2	Caratterizzazione idrologica mediante <i>Curve Number</i> (SCS-CN).....	173
8.3	ANALISI DELLE PRECIPITAZIONI ESTREME.....	175
8.3.1	Analisi regionale delle precipitazioni estreme e modellazione statistica.....	175
8.3.2	Confronto con altri studi disponibili.....	180
8.4	DEFINIZIONE DEI MASSIMI ANNUALI DI PORTATA PER IL TORRENTE BENEFIZIO.....	182
8.5	ANALISI DELLE PRECIPITAZIONI DEGLI EVENTI FRANOSI DEL GENNAIO 2026.....	186
<b>9</b>	<b>VALUTAZIONE DEL RISCHIO RESIDUO NEL CENTRO ABITATO .....</b>	<b>189</b>
9.1	MODELLO DI ARRETRAMENTO DELLA SCARPATA PRINCIPALE .....	189
9.2	EVIDENZE DI ARRETRAMENTO DAL CONFRONTO TRA RILIEVI TOPOGRAFICI.....	190
9.3	SCENARI DI ARRETRAMENTO IN FUNZIONE DEL FATTORE DI SICUREZZA .....	194
9.4	MONITORAGGIO DEI MOVIMENTI NELLA FASCIA DI INTERDIZIONE .....	199
9.5	GESTIONE DEL RISCHIO RESIDUO A BREVE TERMINE NEL CENTRO ABITATO.....	204
9.6	AGGIORNAMENTO DELLA FASCIA DI INTERDIZIONE .....	204
<b>10</b>	<b>SCENARI DI RISCHIO E STRATEGIE DI RIDUZIONE DEL RISCHIO .....</b>	<b>206</b>
10.1	SCENARI DI RISCHIO.....	206
10.1.1	Arretramento della scarpata di neoformazione.....	206
10.1.2	Riattivazione del fenomeno profondo .....	207
10.2	STRATEGIE DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO.....	207
10.2.1	Strategie di mitigazione nel medio periodo .....	207
10.2.2	Strategie di mitigazione nel lungo periodo .....	208
10.3	STRATEGIE DI PREVENZIONE DEL RISCHIO: INTERVENTI NON STRUTTURALI.....	208
10.3.1	Gestione adattiva del rischio.....	209
10.3.2	Monitoraggio e sistemi di allerta .....	209
10.4	STRATEGIE DI PREVENZIONE DEL RISCHIO: INTERVENTI STRUTTURALI.....	210
10.4.1	Fase iniziale .....	211
10.4.2	Fase di completamento.....	211
<b>11</b>	<b>PROPOSTE PER IL PROGRAMMA DEGLI INTERVENTI STRUTTURALI DI RIDUZIONE DEL RISCHIO .....</b>	<b>212</b>
11.1	QUADRO GENERALE .....	212
11.2	INTERVENTI SULLA FRANA NORD (FN) .....	215
11.2.1	Intervento FN.1 - Galleria drenante, L $\approx$ 1500 m.....	215
11.2.2	Intervento FN.2 - Riprofilatura pendii .....	219
11.2.3	Intervento FN.3 - Interventi diffusi per la sutura delle lesioni e il ripristino del reticolo idraulico .....	222
11.2.4	Intervento FN.4 - Regimazione acque superficiali con canali di gronda .....	225

11.3	INTERVENTI SULLA FRANA CENTRALE (FC).....	227
11.3.1	Intervento FC.1 - Galleria drenante, L ≈ 700 m .....	227
11.3.2	Intervento FC.2 - Galleria drenante, L ≈ 900 m .....	230
11.3.3	Intervento FC.3 - Realizzazione pozzi per il monitoraggio della piezometrica.....	233
11.3.4	Intervento FC.4 - Riqualificazione recapiti di valle .....	236
11.3.5	Intervento FC.5 - Riprofilatura pendii.....	239
11.3.6	Intervento FC.6 - Interventi diffusi per la sutura delle lesioni ed il ripristino del reticolo idraulico.....	241
11.4	INTERVENTI SULLA FRANA SUD (FS).....	244
11.4.1	Intervento FS.1 - Ripristino Strada Provinciale SP10.....	244
11.4.2	Intervento FS.2 - Ripristino reticolo idrografico e realizzazione drenaggi profondi.....	247
11.4.3	Intervento FS.3 - Riprofilatura pendii.....	250
11.4.4	Intervento FS.4 - Interventi diffusi per la sutura delle lesioni .....	254
11.5	INTERVENTI SUL TORRENTE BENEFIZIO .....	258
11.5.1	Intervento BE.1 - Ripristino della quota di fondo, sistemazione spondale e del tratto di monte.....	258
11.5.2	Intervento BE.2 - Ripristino delle zone limitrofe in destra idraulica al torrente Benefizio.....	266
11.5.3	Intervento BE.3 - Ripristino delle zone limitrofe in sinistra idraulica al torrente Benefizio .....	269
11.6	INTERVENTI NEL CENTRO ABITATO (AB) .....	272
11.6.1	Intervento AB.1 - Adeguamento del sistema fognario.....	272
11.6.2	Intervento AB.2 - Adeguamento rete acquedottistica .....	273
11.7	SISTEMA DI MONITORAGGIO FINALIZZATO AGLI INTERVENTI .....	274
11.8	QUADRO ECONOMICO COMPLESSIVO DEGLI INTERVENTI.....	277
11.9	SCALA DI PRIORITÀ .....	278
<b>12</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>279</b>
<b>13</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>285</b>

# 1 Introduzione

## 1.1 Quadro istituzionale e operativo

Nel mese di gennaio 2026 il territorio comunale di Niscemi, in provincia di Caltanissetta, è stato interessato da un fenomeno franoso complesso in rapida evoluzione. Una prima fase significativa è stata registrata tra il 15 e il 16 gennaio 2026 e una successiva riattivazione tra il 25 e il 26 gennaio 2026.

Durante la prima attivazione si è assistito al cedimento della Strada Provinciale SP12, mentre il secondo evento ha coinvolto il settore urbano del quartiere Sante Croci - Belvedere, l'area del torrente Benefizio e la Strada Provinciale SP10.

A seguito dell'evento, il Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri (di seguito DPC), in accordo con la Regione Siciliana, ha attivato, in data 26 gennaio 2026, il Centro di Competenza dell'Università degli Studi di Firenze (di seguito CPC-UNIFI) per un supporto tecnico finalizzato alle attività di monitoraggio del fronte di frana e alla verifica del rischio residuo per il territorio interessato.

In data 27 gennaio 2026 è stato effettuato un sopralluogo nel corso del quale è stato eseguito un volo con l'elicottero dei Vigili del Fuoco, finalizzato ad acquisire una visione complessiva delle aree interessate dal dissesto. Il sopralluogo si è poi concentrato sulla porzione di centro abitato delimitata come zona rossa, che alla data comprendeva una fascia di 150 m dalla scarpata di frana verso l'interno dell'abitato, successivamente formalizzata con l'Ordinanza sindacale n. 12 del 28 gennaio 2026. L'attività sul campo è stata volta alla verifica dell'eventuale presenza di fratture e di segnali di instabilità sia al suolo sia sui manufatti. Il totale complessivo degli evacuati in tutto il territorio coinvolto (cosiddetta "zona rossa" + aree limitrofe di sicurezza) ammontava a circa 1.500 persone.

In data 3 febbraio 2026 il CPC-UNIFI ha consegnato al DPC un primo rapporto preliminare con un modello speditivo di arretramento della scarpata di frana allo scopo di verificare ed eventualmente rivedere i limiti della zona rossa.

In data 5 febbraio 2026 il Dipartimento della Protezione Civile ha attivato il centro di competenza CNR IREA (Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente) per l'elaborazione di dati radar satellitari per il monitoraggio degli spostamenti del suolo nelle aree interessate dal dissesto idrogeologico, finalizzato al monitoraggio del movimento franoso e alla valutazione del rischio residuo, di concerto con la Regione Siciliana e il CPC-UNIFI.

In data 26 febbraio 2026 il CPC-UNIFI, avvalendosi della collaborazione del CNR-IREA, ha redatto un primo rapporto tecnico-scientifico (Rapporto n.1) che rappresenta una sintesi di tutti i dati raccolti a quella data, fornendo un modello interpretativo delle frane, i risultati del monitoraggio prima e dopo le recenti riattivazioni, la valutazione del rischio residuo e le prime indicazioni sugli interventi di monitoraggio e di riduzione dello stesso.

Successivamente alla nomina del Commissario straordinario ai sensi del decreto-legge 27 febbraio 2025, n. 25, e a seguito dell'evolversi dello scenario, si è proceduto a una revisione delle misure di salvaguardia. Sulla base delle risultanze tecniche del monitoraggio in corso e di un ulteriore sopralluogo effettuato in data 28 febbraio, la fascia di interdizione è stata rimodulata nel centro abitato in corrispondenza della frana centrale, passando dai 150 m iniziali a 100 m dal ciglio della scarpata con l'Ordinanza sindacale n.19 del 28 febbraio 2026.

In data 9 marzo 2026 il CPC-UNIFI, in collaborazione con CNR-IREA e altri soggetti, ha redatto il Rapporto n.2, che aggiorna, integra e sostituisce integralmente il precedente documento del 26 febbraio. Il nuovo rapporto, oltre a un significativo rafforzamento del quadro conoscitivo, presenta una proposta più articolata dei criteri di intervento per la riduzione del rischio.

In data 16 marzo 2026 il Dipartimento della Protezione Civile ha attivato il centro di competenza Fondazione CIMA per fornire supporto tecnico-scientifico per la predisposizione dei programmi per interventi di prevenzione strutturale e per la riduzione del rischio idraulico e idrogeologico nel territorio del Comune di Niscemi di cui all'art. 15 del decreto-legge 27 febbraio 2025, n. 25. In particolare, è stato richiesto a

Fondazione CIMA di elaborare, in stretto raccordo con il CPC-UNIFI, uno studio idrogeologico-idraulico, volto all'aggiornamento degli strumenti vigenti di pianificazione e alla programmazione degli interventi di riduzione e monitoraggio del rischio residuo nel territorio comunale.

A tal fine sono stati eseguiti sopralluoghi congiunti a Niscemi nella settimana fra il 30 marzo e il 3 aprile, con il supporto di un nuovo rilievo da drone effettuato da Fondazione CIMA.

Il presente Rapporto n.3 integra, aggiorna e sostituisce integralmente le versioni precedenti, attraverso un ulteriore approfondimento del quadro conoscitivo e l'aggiornamento delle attività di monitoraggio. Esso fornisce inoltre le indicazioni tecnico-scientifiche a supporto della predisposizione, da parte del Commissario straordinario, dei programmi di intervento per la prevenzione strutturale e la riduzione del rischio idraulico e idrogeologico, ai sensi dell'art. 15 del decreto-legge 27 febbraio 2025, n. 25.

## 1.2 Struttura del rapporto e sintesi dei contenuti

L'area di Niscemi è caratterizzata da una spiccata predisposizione ai fenomeni di instabilità gravitativa, legata alla combinazione di fattori geologici, geomorfologici, idrogeologici e strutturali. L'assetto litostratigrafico locale, contraddistinto dall'alternanza di livelli sabbioso-arenacei permeabili e di unità argilloso-marnose poco permeabili e a comportamento meccanico più debole, determina condizioni favorevoli all'insorgere e alla riattivazione di scivolamenti profondi, specialmente in presenza di pressioni interstiziali elevate e di processi erosivi al piede dei versanti.

Tali caratteristiche, unite al controllo esercitato dalle strutture tettoniche connesse al fronte della Falda di Gela, configurano un contesto morfostrutturale complesso, nel quale i movimenti gravitativi assumono talora dimensioni rilevanti e carattere policiclico.

Al fine di caratterizzare la frana in oggetto, sono stati analizzati i prodotti dei rilievi topografici ad alta risoluzione acquisiti dal Comune di Niscemi e dalla Regione Siciliana nei giorni successivi all'evento. Ciò ha consentito di perimetrare il dissesto, di discriminare i versanti in frana in tre movimenti coalescenti e cinematicamente distinti e di definirne il meccanismo di movimento.

Per quanto riguarda l'attività di monitoraggio radar satellitare, sono stati analizzati dati pre-evento, co-evento e post-evento, che hanno consentito di misurare le deformazioni superficiali pregresse e in atto nel paese di Niscemi e nei versanti circostanti. Nello specifico, sono stati impiegati dati acquisiti dai satelliti Sentinel-1, COSMO-SkyMed, SAOCOM, Capella Space e TerraSAR-X. Le immagini SAR sono state elaborate mediante tecniche di interferometria differenziale (DInSAR) e multi-temporale, adottando gli approcci SqueeSAR e SBAS (*Small BAseline Subset*) per effettuare valutazioni differenti a seconda della fase di attività. A integrazione delle tecniche consolidate, è stato impiegato l'approccio *Dynamic InSAR*, che combina l'elaborazione SqueeSAR con tecniche di *Change Detection* e *Rapid Motion Tracking* (RMT). Tale metodologia ha permesso di monitorare le deformazioni rapide e di ottenere dati anche in aree caratterizzate da una perdita temporanea di coerenza del segnale radar. È stata altresì effettuata un'elaborazione basata sulle variazioni di ampiezza del segnale elettromagnetico chiamata *Pixel Offset Tracking*.

È stata svolta un'attività di monitoraggio ottico satellitare analizzando coppie di immagini ad alta risoluzione (PlanetScope) e ad altissima risoluzione (*Pléiades Neo* e *WorldView Legion*) con lo scopo di caratterizzare l'evoluzione spaziale e temporale degli spostamenti durante e dopo le fasi principali dei dissesti.

Per la ricostruzione del modello 3D del sottosuolo sono state effettuate dall'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - OGS prospezioni geoelettriche e sismiche ad alta risoluzione in onde P e SH, che hanno permesso di ricostruire un modello geofisico 3D del sottosuolo nel centro abitato a ridosso della scarpata di frana.

Sono stati raccolti e analizzati i dati geotecnici disponibili che hanno permesso di ricostruire la stratigrafia dell'area, definendo spessori, assetto giaciturale e parametri di resistenza al taglio dei principali litotipi, con particolare attenzione al contrasto tra sabbie e argille. I dati strumentali sono stati utilizzati per inquadrare le condizioni di deformazione e il regime delle pressioni interstiziali. Sulla base di tali informazioni è stata impostata una modellazione numerica bidimensionale alle differenze finite, finalizzata alla verifica del

modello geologico e alla simulazione del comportamento meccanico del versante in differenti condizioni idrauliche.

In questo quadro, un contributo rilevante è fornito dalla caratterizzazione e modellazione idrologico-idraulica del sistema, sviluppata attraverso rilievi UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) e successive elaborazioni di modelli digitali del terreno (DSM - *Digital Surface Model* e DTM - *Digital Terrain Model*). In particolare, è stato ricostruito con elevato dettaglio l'assetto altimetrico del suolo mediante un DSM con risoluzione di 25 cm, che ha consentito di analizzare la morfologia superficiale e individuare i principali percorsi di drenaggio delle acque. Tali analisi sono state integrate con lo studio statistico delle precipitazioni e delle portate massime annue, con la caratterizzazione degli eventi intensi nel territorio di Niscemi - anche mediante confronto con gli scenari di riferimento del Piano per l'Assetto Idrogeologico (PAI) - e con la ricostruzione dei massimi annuali di portata del torrente Benefizio. Particolare attenzione è stata dedicata alle precipitazioni antecedenti gli eventi franosi del gennaio 2026, al fine di definire il ruolo delle condizioni di saturazione progressiva del versante e dei fenomeni di risposta idrologica ritardata nell'innescarsi dei dissesti.

Al fine di valutare il rischio residuo per il centro abitato è stato elaborato un modello speditivo di arretramento della scarpata principale che lambisce l'abitato in località Sante Croci. Tale modello ha fornito un supporto tecnico alla definizione di una fascia di interdizione e rispetto più oggettiva rispetto a quella di 150 m individuata nella fase di prima emergenza, stabilita in assenza del supporto dei dati che sono stati successivamente acquisiti.

Per la predisposizione dei programmi di intervento finalizzati alla prevenzione strutturale e alla riduzione del rischio idraulico e idrogeologico nel territorio comunale, è stato condotto uno studio che ha analizzato la statistica delle precipitazioni e delle portate massime annue, ricostruito con elevato dettaglio l'altimetria del suolo mediante un DSM a 25 cm e individuato i percorsi di drenaggio delle acque superficiali.

Sulla base della sintesi di tutti i dati raccolti vengono proposte indicazioni per una strategia organica di mitigazione e gestione del rischio residuo associato al complesso franoso. Tali indicazioni intendono fornire un quadro di riferimento tecnico-scientifico a supporto delle successive fasi di pianificazione, progettazione e programmazione degli interventi. Le proposte riguardano, da un lato, le misure strutturali e non strutturali orientate alla riduzione dei fattori predisponenti e innescanti, con particolare attenzione al controllo delle infiltrazioni, alla regimazione delle acque superficiali e alla protezione dall'erosione al piede del versante; dall'altro, le azioni volte alla gestione del rischio residuo, attraverso la regolamentazione dell'uso del suolo, l'eventuale delocalizzazione degli elementi maggiormente esposti e la definizione di adeguate fasce di rispetto.

Particolare rilievo è attribuito al sistema di monitoraggio, inteso come strumento essenziale per la sorveglianza dell'evoluzione del fenomeno, la valutazione dell'efficacia degli interventi e l'eventuale attivazione di misure di protezione civile. In tale ambito si evidenzia la necessità di integrare osservazioni geomorfologiche, strumentazione in sito e tecniche di telerilevamento, al fine di garantire un controllo continuo e aggiornato delle condizioni di stabilità.

L'insieme delle indicazioni proposte si inserisce in un approccio di gestione adattiva del rischio, fondato sull'aggiornamento progressivo delle conoscenze e sulla modulazione degli interventi in funzione dell'evoluzione del quadro morfologico e idrogeologico.

Una specifica sezione è dedicata alla definizione di un programma di interventi per la fase iniziale, articolato secondo priorità operative, finalizzato alla messa in sicurezza delle aree più critiche e alla riduzione immediata delle condizioni di pericolosità. Questo programma costituisce il primo livello attuativo della strategia complessiva, in attesa della progettazione e degli interventi strutturali di più ampia scala.

In particolare, il programma prevede azioni integrate di regimazione delle acque superficiali e profonde e di controllo dei deflussi lungo i principali impluvi, mediante opere di drenaggio e interventi puntuali di stabilizzazione nei settori più instabili. Elemento centrale della strategia è la realizzazione di gallerie drenanti, quale principale intervento strutturale di riduzione del rischio, finalizzate al drenaggio profondo del versante e alla diminuzione delle pressioni interstiziali nei livelli argillosi, con effetti diretti sulla stabilità complessiva e sui meccanismi di riattivazione dei movimenti franosi.

Sono inoltre previste opere idrauliche nel reticolo del torrente Benefizio, per la riduzione dell'erosione al piede, insieme alla manutenzione e all'adeguamento delle infrastrutture esistenti. Il quadro degli interventi è completato da azioni locali di sistemazione superficiale, anche con tecniche di ingegneria naturalistica, rimozione di accumuli instabili, in una logica di progressiva riduzione della pericolosità e controllo dell'erosione.

## 2 Inquadramento dell'area

### 2.1 Inquadramento geologico

L'abitato di Niscemi sorge su un pianoro di terreni sabbioso-arenacei che domina la Piana di Gela, a una quota media di circa 320-340 m s.l.m., caratterizzato da una morfologia prevalentemente tabulare. Il pianoro raggiunge la quota massima di circa 608 m verso nord-est, in direzione di Caltagirone (Figura 1), e degrada progressivamente da nord-est verso sud-ovest fino alla valle del torrente Maroglio, affluente in sinistra idrografica del Fiume Gela, dove si registrano quote prossime ai 40 m s.l.m.

Dal punto di vista geologico-strutturale, l'area ricade nel settore sud-orientale dell'Avanfossa Gela-Catania, in prossimità del limite con l'altopiano Ibleo, ubicato verso sud-est, che costituisce il dominio di avampaese del sistema (Castiglione *et al.*, 2000; Relazione Geologica della Regione Siciliana, 2019).

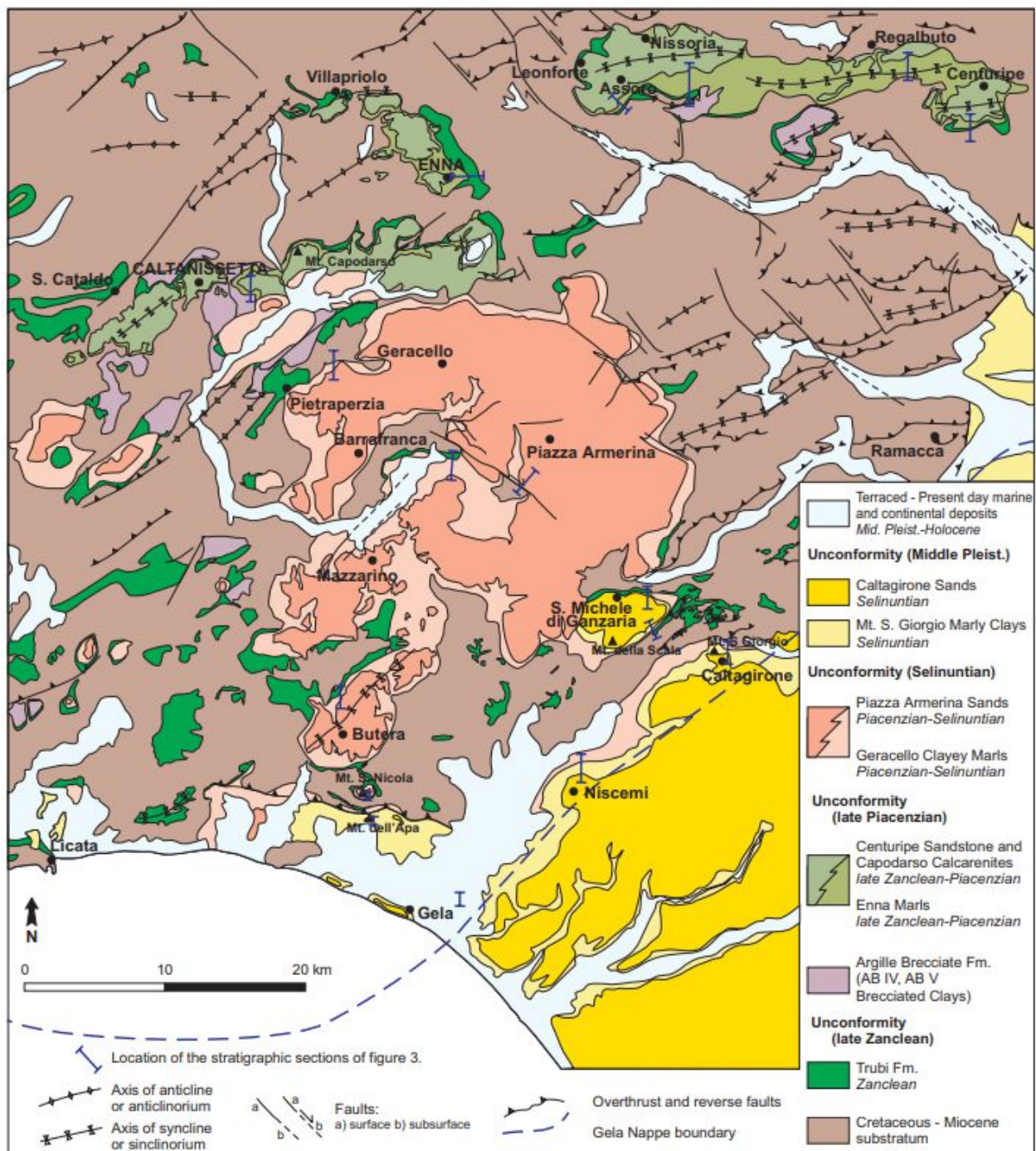


Figura 1 - Carta geologica schematica delle unità litostratigrafiche plio-pleistoceniche dell'area in esame (Fonte: Di Grande e Giandinoto, 2001).

I terreni su cui insiste l'abitato sono impostati secondo una monoclinale a giacitura sub-orizzontale, con lieve immersione verso sud e sud-est. Il margine dell'abitato è in gran parte delimitato da scarpate a pendenza variabile, localmente sub-verticali, alte fino ad alcune decine di metri, sviluppate con andamento prevalente nord-sud sul lato occidentale, est-ovest nel settore meridionale e nuovamente nord-sud in direzione di Gela, tra le Strade Provinciali SP10 e SP11.

Alla base delle scarpate si impostano pendii a bassa inclinazione (circa 10°), intensamente incisi da calanchi e solchi erosivi prodotti dal ruscellamento superficiale non regimato proveniente dal pianoro e dalle emergenze sorgive locali. L'assetto morfologico attuale è riconducibile ai sollevamenti tettonici regionali, cui è seguita un'intensa fase di modellamento subaereo responsabile delle profonde incisioni che caratterizzano il settore vallivo.

Dal punto di vista geologico, l'area è interessata dall'affioramento di una successione lito-stratigrafica compresa tra il Pliocene medio e il Pleistocene inferiore, che ricopre in discordanza angolare i depositi del Bacino Terziario di Caltanissetta riferibili alla Falda di Gela (Figura 2), non affioranti nell'area urbana.

A pochi chilometri a est dell'abitato si rinviene il settore orientale del sovrascorrimento della Falda di Gela sull'Avampese Ibleo, con andamento sud-ovest/nord-est (Figura 1), elemento strutturale che ha condizionato l'evoluzione morfologica regionale. Il fronte della Falda di Gela è caratterizzato da strutture compressive (sovrascorrimenti, pieghe, *pop-up*, *triangle zone*) che hanno condizionato la morfologia e la distribuzione dei sedimenti più recenti (Rizzo, 2004).

La serie stratigrafica locale, descritta dall'alto verso il basso, è così articolata (Castiglione *et al.*, 2000; Relazione Geologica della Regione Siciliana, 2019):

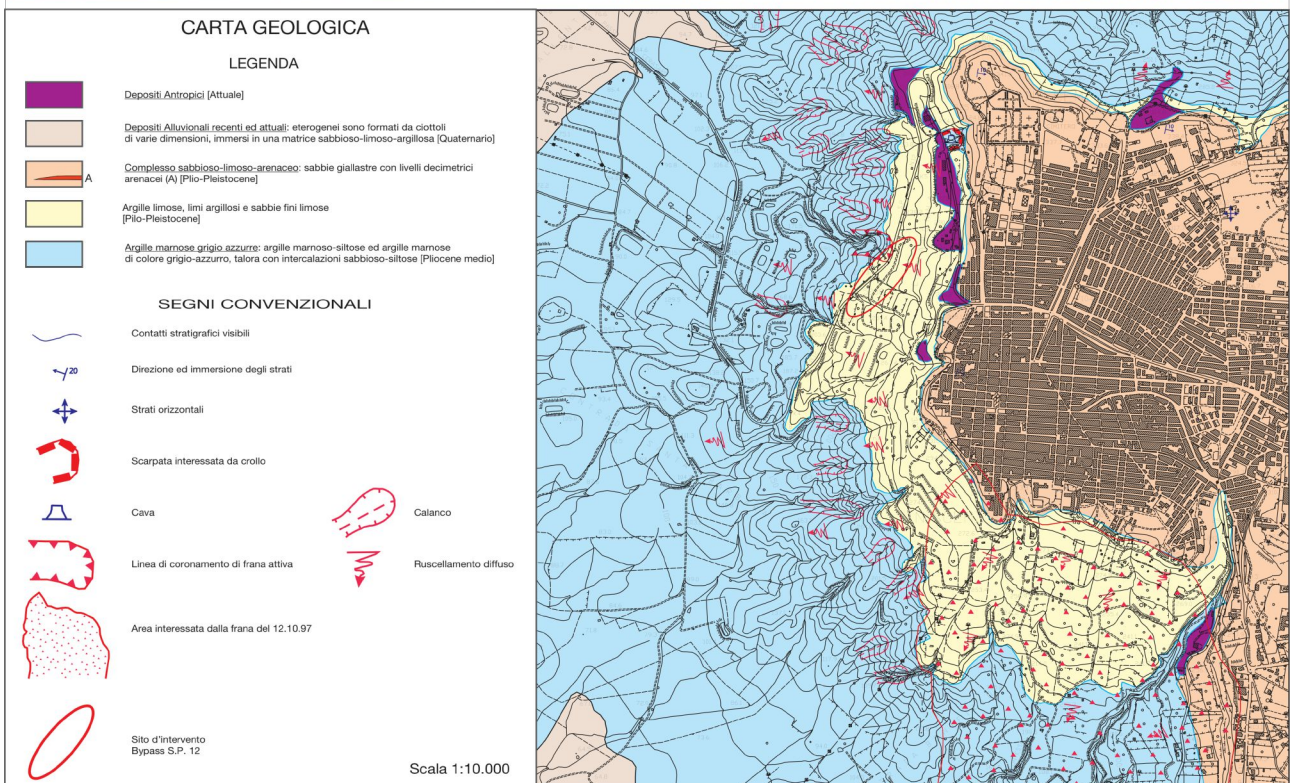
- **depositi alluvionali recenti e attuali (Olocene):** sedimenti connessi all'attività deposizionale del torrente Maroglio e dei corsi d'acqua tributari, affioranti lungo le aste torrentizie e localmente terrazzati; costituiti da ciottoli poligenici immersi in matrice sabbioso-limoso-argillosa, da scarsamente cementati a sciolti;
- **sabbie con livelli arenacei (Plio-Pleistocene):** formazione prevalente nel sottosuolo dell'abitato, costituita da sabbie medio-fini a componente prevalentemente quarzosa, subordinate litiche, mediamente addensate, di colore giallastro con locali tonalità bruno-rossastre superficiali dovute a fenomeni di ossidazione; si presentano ben stratificate e alternano a livelli arenacei e calcarenitici a cemento prevalentemente carbonatico (più raramente siliceo), talora fossiliferi, con giacitura sub-orizzontale e lieve immersione verso sud. Sono presenti lenti e livelli di limi sabbiosi talora argillosi, con spessori variabili da pochi decimetri fino a 9-10 m e discreta continuità laterale. Lo spessore complessivo della formazione sabbioso-arenacea, sulla base di dati di sondaggio ubicati a est e sud-est dell'abitato, varia tra 30 e 60 m;
- **limi sabbiosi e limi argillosi (Plio-Pleistocene):** sottostanti alla formazione sabbiosa, con spessore medio di circa 10 m, costituiti da limo con frazione argillosa variabile, con scheletro sabbioso più evidente nella parte sommitale; colore dal grigio-giallastro al grigio-azzurro con l'aumentare della profondità; tessitura compatta al taglio fresco e giacitura sub-orizzontale con lieve immersione verso sud;
- **argille marnose azzurre (Pliocene medio):** costituiscono il substrato impermeabile della successione; si tratta di un'alternanza di argille marnose e marne argillose grigio-azzurre, passanti verso l'alto a livelli più sabbiosi grigio-beige; presentano spessore di alcune centinaia di metri ed elevata continuità laterale. Poggiano trasgressivamente sulle formazioni del Bacino di Caltanissetta e non affiorano nell'area sommitale del pianoro, ma sono note attraverso i dati di sondaggio.

L'assetto idrogeologico è strettamente controllato dalle caratteristiche di permeabilità delle litologie. Le sabbie e i livelli arenacei presentano buona permeabilità primaria per porosità e consentono l'infiltrazione delle acque meteoriche fino al contatto con il substrato argilloso impermeabile, dove si imposta una falda acquifera di tipo freatico.

Ulteriori condizioni di accumulo idrico possono localmente determinarsi in corrispondenza di lenti limose intercalate nella formazione sabbioso-arenacea, dando luogo a modeste falde sospese. Le emergenze sorgive lungo le scarpate risultano generalmente correlate a tali contatti litologici.

I depositi sabbioso-arenacei, debolmente cementati, risultano facilmente aggredibili dalle acque superficiali; il ruscellamento concentrato e non regimato determina incisioni profonde, morfologie calanchive e un progressivo arretramento delle scarpate.

Sono evidenti fenomeni di instabilità localizzata e distacchi, in particolare alla base dei versanti, dove l'azione combinata dell'erosione superficiale e della circolazione idrica al contatto sabbie-argille favorisce condizioni di instabilità (Castiglione *et al.*, 2000; Relazione Geologica della Regione Siciliana, 2019).



**Figura 2 - In alto è riportata la vista satellitare ortogonale dell'area di Niscemi; in basso la carta geologica del settore occidentale dell'abitato di Niscemi (modificata da Relazione Geologica della Regione Siciliana, 2019).**

## 2.2 Inquadramento geomorfologico

Il territorio di Niscemi si colloca nel settore meridionale del Bacino di Caltanissetta, lungo il margine settentrionale della Piana di Gela, in un contesto morfostrutturale strettamente connesso all'evoluzione compressiva plio-pleistocenica del fronte della Falda di Gela. Tale fronte, con direzione prevalente sudovest-nord est e ubicato a breve distanza dall'abitato, ha esercitato un controllo significativo sia sull'assetto strutturale sia sull'organizzazione del rilievo, influenzando in modo diretto la morfologia attuale dei versanti.

Il centro abitato di Niscemi sorge e si sviluppa su un rilievo a morfologia sub-tabulare (Figura 3b), tra le quote di 320 e 340 m s.l.m., interpretabile come residuo di una superficie terrazzata marina di abrasione, successivamente sollevata e debolmente inclinata verso sud-est, progressivamente incisa in fasi successive dai processi di erosione subaerea. Questa superficie sommitale, caratterizzata da sabbie e arenarie a giacitura sub-orizzontale, rappresenta l'elemento morfologico dominante e costituisce un pianoro strutturale (*plateau*) che domina la sottostante Piana di Gela.

I margini occidentale e meridionale del pianoro sono caratterizzati da scarpate morfologiche nette e continue, che segnano il passaggio a versanti meno acclivi degradanti verso la pianura. L'andamento planimetrico di tali orli, spesso rettilineo e persistente lungo direzioni preferenziali, suggerisce un controllo morfostrutturale riconducibile a discontinuità tettoniche profonde, in relazione alla dinamica compressiva della Falda di Gela e a fasi tettoniche più recenti che hanno determinato il sollevamento e il basculamento della superficie terrazzata (Rizzo, 2004).

Al di sotto delle scarpate si sviluppa una fascia di raccordo che prograda verso la piana, articolata in un sistema di versanti incisi da una rete idrografica a carattere torrentizio (Figura 3a). Il reticolo idrografico, composto dai corsi d'acqua principali quali il Fiume Maroglio e i Torrenti Grilluzzo, Benefizio e Giaracco, svolge un ruolo fondamentale nel modellamento del paesaggio. L'azione erosiva, particolarmente efficace durante gli eventi meteorici intensi, ha determinato lo sviluppo di incisioni profonde, a sezione stretta e con versanti acclivi, nelle quali sono evidenti fenomeni di erosione di fondo e laterale.

In particolare, il torrente Benefizio, situato nel settore sudest di Niscemi, trae origine dalla sommità del pianoro, tra le SP10 e SP11, e presenta il maggior grado di incisione. Nel tempo, nell'asta del torrente Benefizio sono stati convogliati gli scarichi delle acque bianche e nere di buona parte del paese, con portate di piena fino a 40 m<sup>3</sup>/s, aggravando l'approfondimento dell'alveo e i fenomeni di erosione del fondo.

L'approfondimento progressivo di tali incisioni induce fenomeni di erosione regressiva che si propagano verso monte, causando un arretramento dei cigli del pianoro e un progressivo indebolimento del piede dei versanti. Quando le incisioni si sviluppano nei terreni argillosi, si osserva un'intensa attività erosiva (di fondo e laterale), nonché fenomeni di dissesto a partire dalle sponde. Questo meccanismo rappresenta uno dei principali fattori predisponenti l'insorgere di fenomeni gravitativi di instabilità, spesso con carattere retrogressivo, che interessano porzioni anche estese del pendio.

Nei settori in cui affiorano le litologie argillose, il paesaggio assume caratteristiche tipicamente calanchive (Figura 3c). In queste aree si osservano fossi profondamente incisi separati da creste sottili e instabili, espressione di una dinamica di denudazione superficiale continua. Tale dinamica è fortemente controllata dall'alternanza stagionale di imbibizione e disseccamento dei terreni fini, che determina cicli di espansione e contrazione con conseguente degradazione progressiva del suolo. Queste morfologie, diffuse soprattutto nei settori meridionali e occidentali a valle del pianoro, costituiscono un indicatore diretto dell'elevata erodibilità dei terreni e della persistente instabilità superficiale.

Il comportamento geomorfologico dell'area è ulteriormente condizionato dalla configurazione litostratigrafica, caratterizzata dalla sovrapposizione di livelli sabbiosi e calcarenitici relativamente più permeabili su substrati argilloso-marnosi a comportamento meccanico più debole. Le differenze di permeabilità e resistenza al taglio favoriscono la concentrazione dei flussi idrici lungo le superfici di contatto litologico, determinando condizioni di imbibizione nei livelli più permeabili e un generale decadimento delle proprietà geotecniche. In presenza di tali condizioni, si instaurano situazioni favorevoli allo sviluppo di movimenti gravitativi, sia superficiali sia profondi.

Un ulteriore fattore predisponente è rappresentato dalla presenza di livelli argillosi a bassa permeabilità, che ostacolano il drenaggio e favoriscono ristagni idrici superficiali e subsuperficiali, soprattutto durante i periodi

piovosi. Ne deriva una marcata stagionalità dei processi geomorfologici, con accelerazione dei fenomeni erosivi e gravitativi nelle fasi umide e relativa attenuazione nei periodi siccitosi. Inoltre, l'elevato spessore dei depositi argillosi impermeabili impedisce o rende difficile il percolamento delle acque provocando spesso fenomeni di ristagni superficiali.

In questo quadro si inseriscono i movimenti franosi di grande estensione che hanno interessato storicamente il versante meridionale dell'abitato. Gli eventi documentati, i principali riferiti a quelli del 1790 e del 1997, mostrano caratteristiche ricorrenti, con superfici di scivolamento impostate nei livelli argillosi pliocenici e con un marcato controllo strutturale legato alla geometria del fronte della Falda di Gela (Rizzo, 2004).

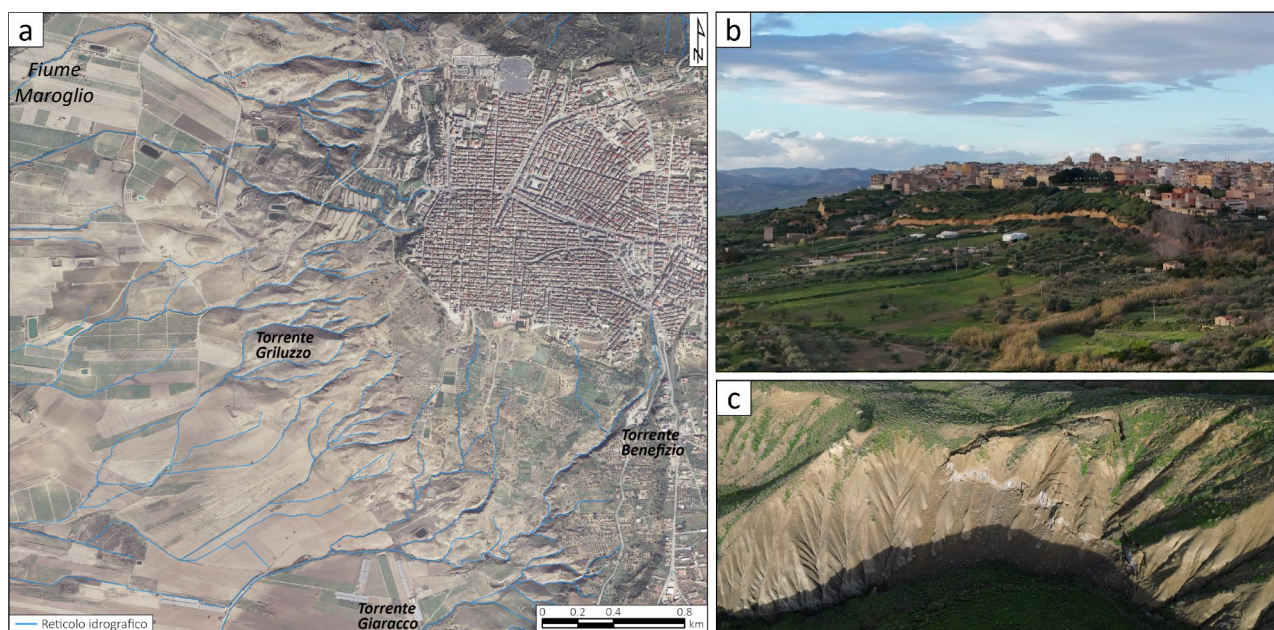
Da notare che nel rapporto sull'evento del 1790, Landolina Nava osserva "*molti cambiamenti sofferti altre volte sul costato*", facendo così ipotizzare che il versante avesse già sofferto precedentemente movimenti del genere.

Le indagini geofisiche e le ricostruzioni geologiche condotte in occasione dell'evento del 1997 evidenziano come le deformazioni superficiali siano spesso connesse a discontinuità profonde, suggerendo un coinvolgimento di porzioni significative del versante e confermando l'influenza dell'assetto morfostrutturale sull'evoluzione dei versanti.

I versanti mostrano frequentemente evidenze morfologiche riconducibili a instabilità pregresse, quali superfici terrazzate secondarie, gradonature e deformazioni distensive superficiali. Questi elementi indicano un'evoluzione policiclica dei fenomeni franosi, con riattivazioni successive nel tempo piuttosto che eventi isolati.

Le informazioni derivanti dalla cartografia ufficiale, in particolare dal PAI della Regione Siciliana e dall'Inventario IFFI di ISPRA, confermano la diffusione di corpi di frana attivi e quiescenti lungo i margini occidentali e meridionali del pianoro, delineando un quadro di instabilità diffusa coerente con le caratteristiche litostratigrafiche e morfologiche dell'area (Figura 4, Figura 5).

Nel complesso, il paesaggio di Niscemi si configura come un sistema dinamico, nel quale l'interazione tra controllo strutturale, evoluzione di superfici terrazzate, incisione fluvio-torrentizia e processi gravitativi determina un continuo rimodellamento dei versanti. La combinazione di tali fattori conferisce all'area un'elevata predisposizione ai dissesti, con tendenza alla riattivazione dei fenomeni in relazione alle condizioni idrologiche e alle modificazioni dell'equilibrio del pendio.



**Figura 3 - a) Ortofoto dell'area di Niscemi con reticolo idrografico; b) visuale panoramica della superficie sub-tabulare su cui si poggia l'abitato di Niscemi e della scarpata di frana della mattina del 25 gennaio 2026; c) dettaglio del settore calanchivo a valle del centro abitato.**

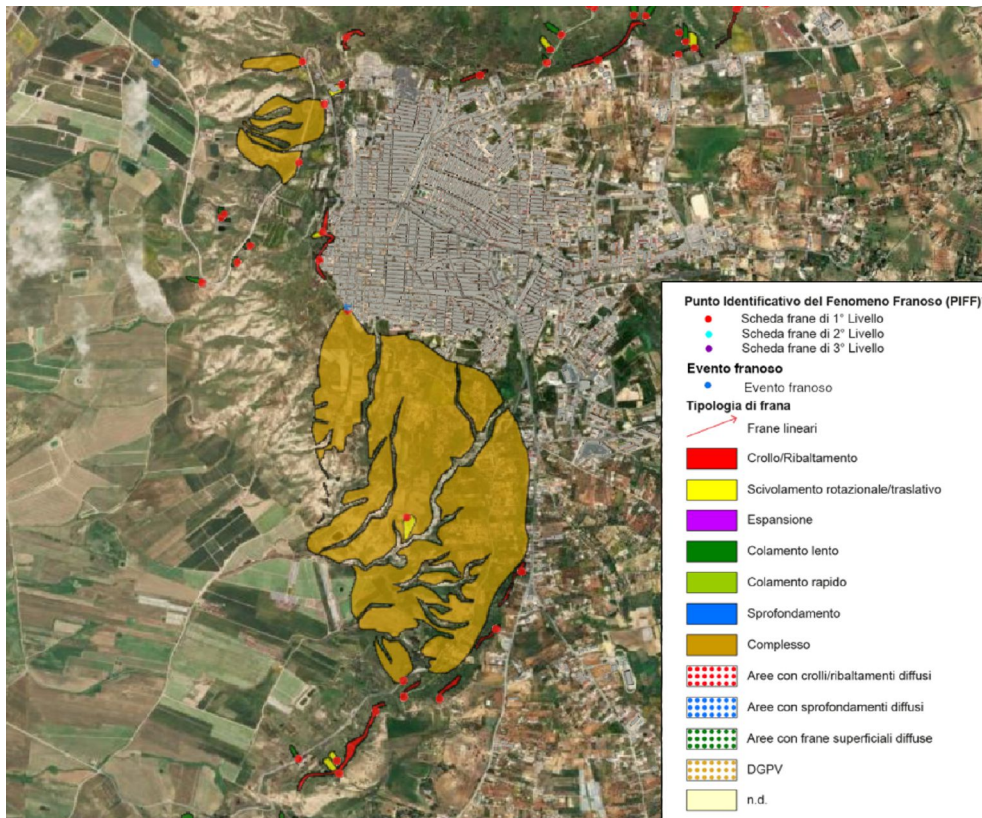


Figura 4 - Inventario dei fenomeni franosi IFFI (Fonte: ISPRA).

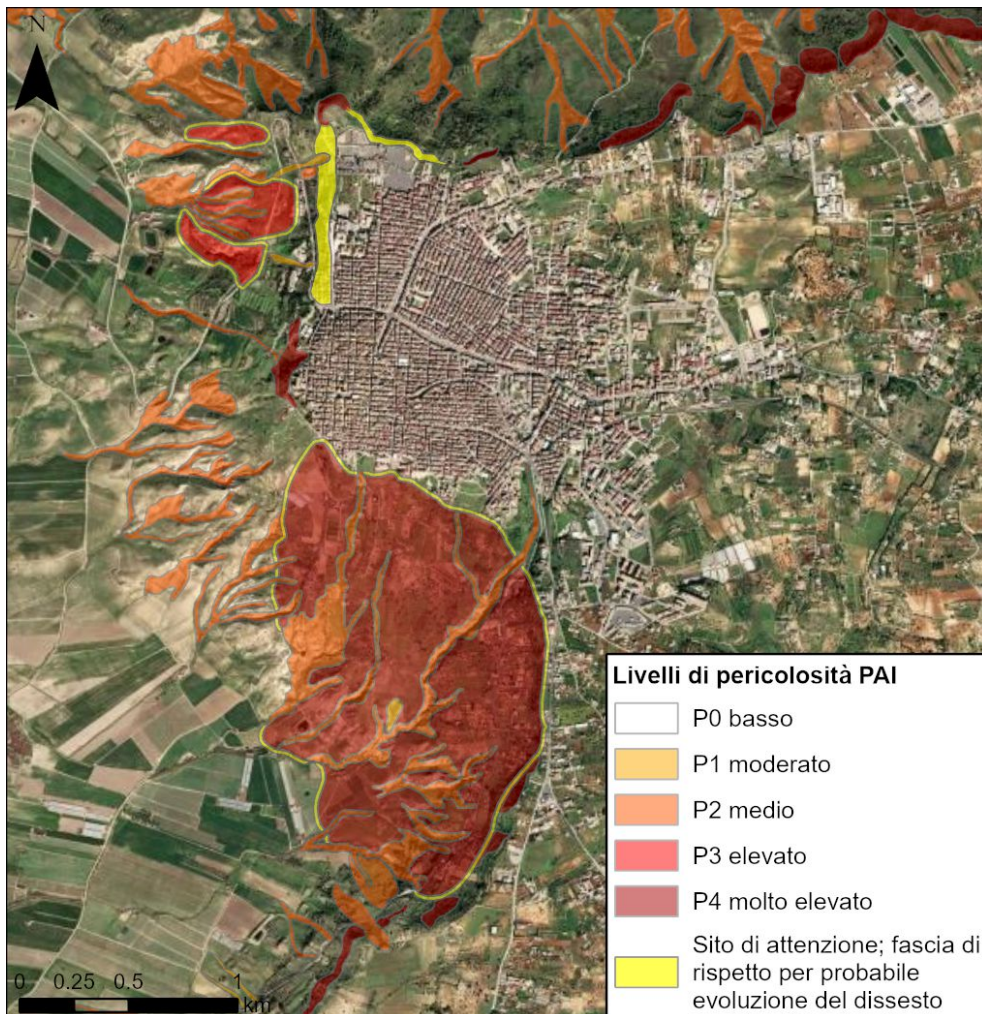


Figura 5 - Pericolosità da frana PAI (Fonte: Autorità di Bacino del Distretto Idrografico della Sicilia).

### 3 Le frane di Niscemi

L'abitato di Niscemi è stato più volte interessato da eventi franosi e risulta storicamente esposto a dissesti idrogeologici; di seguito si richiamano i principali episodi documentati dalle cronache. Tra questi si segnalano due eventi di maggiore rilievo, verificatisi nel 1790 e nel 1997, precedenti a quello avvenuto nel gennaio 2026. Il Sistema Informativo sulle Catastrofi Geologiche (SICI) del GNDCl riporta inoltre ulteriori fenomeni, di minore entità, registrati nel centro abitato nel 1992, 1993, 1997 e 1998, che hanno causato danni limitati alle infrastrutture e alle abitazioni presenti.

Nel seguito, al fine di caratterizzare le variazioni morfologiche antecedenti e conseguenti agli eventi di frana del 2026, sono stati utilizzati i seguenti *dataset* topografici:

- modello digitale del terreno (DTM) a 1 m derivante da rilievo LiDAR aereo realizzato nel 2010 nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento (PST) del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE);
- DTM a 2 m derivante da rilievo LiDAR aereo realizzato nel 2013 dalla Regione Siciliana;
- DTM ricampionato a 1 m derivante dalla nuvola di punti ad alta risoluzione acquisita fra il 18 gennaio e il 2 febbraio 2026 dal Comune di Niscemi mediante rilievo aerofotogrammetrico da drone;
- modello digitale di superficie (DSM) ricampionato a 1 m derivante dalla nuvola di punti ad alta risoluzione acquisita fra il 3 e il 7 febbraio 2026 dalla Regione Siciliana mediante rilievo aerofotogrammetrico da drone.

#### 3.1 La frana del 1790

La frana del 1790 si verificò il 19 marzo e determinò alterazioni morfologiche molto più evidenti rispetto a quelle osservate negli eventi successivi, fatta eccezione per quella del 2026. Fu accompagnata da manifestazioni termiche post-parossistiche e da fenomeni precursori che, nel loro insieme, vennero interpretati come espressione di processi endogeni profondi (Masaracchio, 1970; Maugeri, 1869).

L'episodio di dissesto fu ricordato come un evento di natura tellurica (Marsiano, 1981). Una dettagliata relazione redatta all'epoca descrisse con precisione gli effetti prodotti, distinguendoli in abbassamento del terreno, sollevamento del suolo e formazione di un nuovo "vulcano" (Nava, 1792).

Quest'ultimo consiste evidentemente in una manifestazione di vulcanismo sedimentario, ossia di un fenomeno geologico contraddistinto dalla risalita e dall'emissione in superficie di miscele di fango, acqua salmastra e gas, prevalentemente metano, che danno origine a piccoli apparati conici, comunemente definiti vulcani di fango, con altezze generalmente limitate a pochi metri. Tale fenomeno non è associato a processi magmatici, ma si sviluppa in contesti sedimentari ricchi in frazioni argillose e sostanza organica, dove l'elevata pressione dei fluidi interstiziali determina la mobilizzazione e la migrazione verso l'alto del materiale lungo discontinuità e fratture del mezzo geologico.

Lo sviluppo del movimento avvenne da est verso ovest; pare abbia avuto origine lungo le Coste del Banco ed è stato caratterizzato da una lunga nicchia principale. L'area interessata, delimitata superiormente dalla linea curvilinea che da Sante Croci raggiunge Poggio del Trappeto, e da lì la Punta del Pizzo del Banchitello, dove in alcuni punti i terreni sprofondarono fino a circa 20 m, area che coincide perfettamente con quella coinvolta dalla frana del 1997.

Il fenomeno evolse lentamente fino al tardo pomeriggio del 19 marzo, quando il taglio lungo il versante non superava 1 m; la mattina del 20 marzo raggiunse i 2 m, mentre la fase parossistica si sviluppò tra il 19 e il 20 marzo. Fu stimato che, nella sola giornata del 20, sollevamenti e abbassamenti raggiunsero valori massimi dell'ordine di 20 m, con velocità comprese tra 4 e 6 m/h.

Questo evento viene annoverato nelle cronache come quello più ingente in termini di spostamenti e velocità, ma anche per i più marcati sollevamenti al piede. La durata complessiva dell'evento pare essere stata anche più lunga rispetto agli altri.

L'area che va dalla costa di Sante Croci al Poggio del Trappeto è stata affetta da spostamenti significativi anche nel 1776, quando si registrarono fratture nel terreno di circa 3 m.

In merito al meccanismo di franamento, si ipotizza una rottura di base impostata su superfici di scivolamento profonde, localizzate al di sotto del fondovalle. I due rilievi della contrada Gebbiazza, già interessati da precedenti fenomeni di instabilità, registrarono inizialmente abbassamenti di alcuni metri, seguiti da significativi sollevamenti che ne incrementarono l'altezza dai circa 25 m originari fino a circa 50 m, con evidente rotazione al piede del corpo di frana.

Anche i terreni limitrofi del Vallone, inizialmente posti a quota inferiore rispetto al Benefizio, furono interessati da marcati sollevamenti; le acque ivi presenti si sollevarono insieme al fondo alveo, generando vortici e determinando la formazione di un piccolo invaso temporaneo.

Tra i fenomeni premonitori, il giorno precedente l'evento franoso fu segnalato, e avvertito dalla popolazione di Niscemi, un profondo muggito sotterraneo. Considerata l'estensione dell'area coinvolta e l'assenza di evidenti manifestazioni superficiali, tale segnale potrebbe essere ricondotto a uno scorrimento profondo del corpo di frana.

Il 20 marzo, al termine della fase parossistica, dalle fratture apertesi nel terreno furono osservate emissioni di calore e fuoriuscite di vapore. Al piede della frana, in località Conciara, il 19 marzo si formò, secondo le cronache probabilmente legate alle credenze popolari, un piccolo vulcano di fango dal quale fuoriuscì un getto di circa 80 cm costituito da argille di colore piombo e fluidi cerulei scuri, caratterizzati da odore di bitume e zolfo. I materiali risultavano caldi e il fenomeno si esaurì nell'arco di circa due giorni. Fu inoltre registrata la temporanea scomparsa di gran parte delle sorgenti, protrattasi per circa tre giorni.

### 3.2 La frana del 1997

La frana del 12 ottobre 1997 interessò i versanti sud-est del paese di Niscemi, in destra e in sinistra idrografica al T. Benefizio, configurandosi come un unico movimento franoso di grandi dimensioni. Essa mobilizzò, con buona coincidenza geometrica, il corpo di frana preesistente del 1790 (Rizzo, 2004), provocando significativi danni alla viabilità provinciale, all'acquedotto, a scarichi fognari, alla linea elettrica, ad abitazioni rurali e manufatti vari, nonché a una parte del centro abitato (Castiglione *et al.*, 2000).

Secondo le testimonianze, il dissesto ebbe origine sul versante sinistro del T. Benefizio, dove si registravano le pendenze maggiori, propagandosi verso nord in direzione dell'abitato, che fu interessato per ultimo; l'evento ebbe durata di alcune ore. La massa coinvolta, fortemente asimmetrica, interessò due versanti tra loro ortogonali, accomunati da un unico movimento gravitativo esteso su una superficie di circa 2 km<sup>2</sup>. La scarpata principale presentò uno sviluppo lineare di circa 2,5 km, sviluppandosi su un precedente ciglio di frana o poco più a valle di esso, con altezza inferiore a 3-4 m e valori massimi nel settore nord-ovest, cioè da località Poggio del Trappeto a località Banco (Rizzo *et al.*, 2004). Il fenomeno fu caratterizzato da una cinematica lenta e da un'entità moderata, con velocità massime stimate intorno a 1 m/h e spostamenti complessivi compresi tra 2 e 4 m.

La frana fu classificata come composta, con superficie di scivolamento sub-orizzontale alla base ed emersione sub-verticale in corrispondenza della scarpata principale. Gli spostamenti orizzontali determinarono la formazione di abbassamenti tipo *Graben* nella parte sommitale. Il movimento, di carattere regressivo, fu imputato all'azione erosiva del T. Benefizio (Castiglione *et al.*, 2000, 2000; Rizzo, 2004)

Il cinematiso dell'evento del 1997 si espresse attraverso un movimento traslativo verso sud, con un abbassamento massimo nel settore nord-est e manifestazioni di rottura gravitativa ai piedi dei versanti. Le dimensioni, la forma e la profondità del fenomeno suggerirono un rapporto diretto con la struttura geologica e tettonica dell'area.

Per valutare il ruolo delle precipitazioni nella riattivazione del fenomeno franoso, furono esaminati i dati pluviometrici giornalieri relativi all'ultimo secolo. L'analisi evidenziò che, in passato, si erano registrati numerosi eventi piovosi di intensità molto superiore rispetto a quelli immediatamente antecedenti alla frana.

Considerando l'assenza di terremoti significativi nello stesso periodo e tenendo conto che un corpo di frana di tali dimensioni non poteva essere modificato in maniera drastica da una singola precipitazione intensa, gli studi indicarono la presenza di un concorso di cause alla base della riattivazione. La frana si sviluppò, infatti, in assenza di un'evidente correlazione con fattori di innesco di particolare rilevanza e si manifestò al termine di un prolungato periodo siccitoso, a distanza di due o tre giorni da precipitazioni intense ma non eccezionali, pari a 71 mm registrati il 9 ottobre e 26 mm il 10 ottobre 1997 (Rizzo, 2004; Capilleri *et al.*, 2010).

La Commissione Tecnico Scientifica (Castiglione *et al.*, 2000) che studiò approfonditamente il fenomeno annovera tra le cause dell'evento del 12 ottobre *in primis* l'assetto geologico dell'area in esame, in secondo luogo, l'erosione torrentizia. Le profonde incisioni prodotte dal T. Benefizio, infatti, hanno reso cinematicamente possibili scivolamenti profondi. L'erosione è stata accelerata dall'immissione degli scarichi fognari e dalle acque bianche dell'abitato, che hanno aumentato significativamente la portata del torrente.

Si evidenzia inoltre come la rapidità dei processi erosivi nelle argille omogenee abbia determinato la generazione di pressioni interstiziali negative che, dissipandosi nel tempo, anche su intervalli prolungati, avrebbero comportato una progressiva riduzione del coefficiente di sicurezza fino al raggiungimento delle condizioni di rottura (Castiglione *et al.*, 2000).

È inoltre opportuno ricordare che la frana del 1997 rappresenta la riattivazione di un movimento gravitativo preesistente, già documentato nel 1790 (Figura 6).

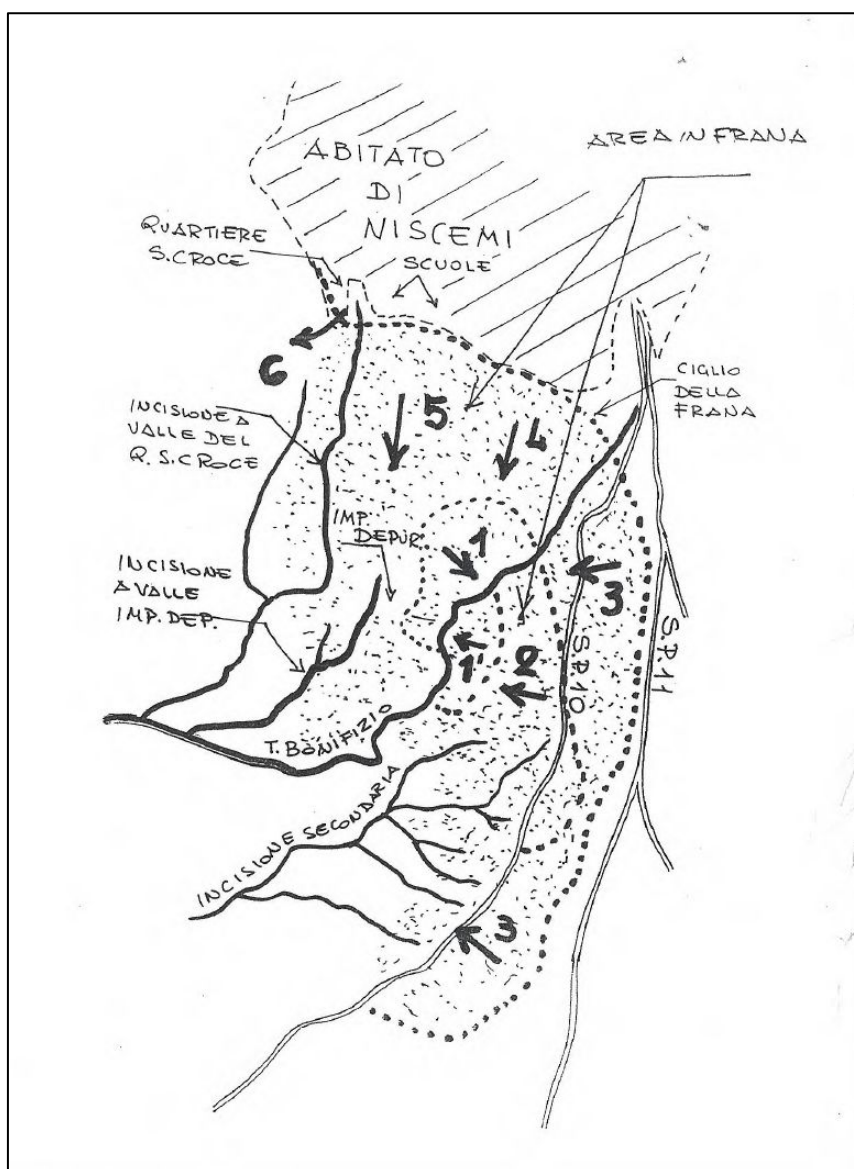


Figura 6 - Schema rappresentativo dell'evoluzione del fenomeno franoso del 12 ottobre 1997 tratto dalla relazione di Castiglione *et al.* (2000); i numeri indicano l'evoluzione del fenomeno franoso nel tempo.

### 3.3 Gli eventi franosi del 2026

#### 3.3.1 Perimetrazione ed evoluzione

Gli eventi franosi del gennaio 2026 rappresentano la riattivazione e l'ampliamento di un sistema franoso profondo noto e storicamente documentato, che interessa i margini del terrazzo su cui sorge l'abitato.

Un primo evento si è verificato tra il 15 e 16 gennaio 2026 nel versante nord-occidentale. Ad esso è seguito l'episodio principale fra il 25 e il 26 gennaio nella parte centro-meridionale del versante che poi si è propagato rapidamente verso sud.

Tale successione di eventi si inserisce in un quadro di instabilità di lungo periodo, controllato dalla stratigrafia, dall'assetto idrogeologico e dai processi di erosione legati alle acque incanalate, configurando un sistema franoso articolato in più settori cinematicamente distinti che, nel loro insieme, costituiscono la riattivazione di movimenti pregressi.

Il fronte instabile attuale si sviluppa complessivamente per circa 4,7 km lungo il margine dell'abitato, coinvolgendo il settore Sante Croci - Belvedere, l'area del torrente Benefizio e i versanti compresi tra la SP10 e la SP12.

Le scarpate di distacco presentano altezze mediamente comprese tra 25 e 30 m, con valori massimi superiori a 40 m.

L'acquisizione di rilievi topografici da drone ad alta risoluzione da parte del Comune di Niscemi e della Regione Siciliana ha consentito, mediante confronto con dati ortofotografici e topografici pregressi (Figura 7), l'accurata caratterizzazione dei movimenti superficiali in termini di entità e direzione (Figura 8 e Figura 9).

Ciò ha altresì reso possibile la distinzione dell'area di frana in tre settori principali, coalescenti nel loro sviluppo complessivo, con una possibile propaggine di ulteriore espansione della frana sud (poligono tratteggiato).

- **Frana Nord:** interessata dalla prima fase parossistica del 15-16 gennaio, caratterizzata da spostamenti di oltre 12 m diretti prevalentemente verso ovest, guidata dall'erosione del reticolo idrografico minore; ha determinato il collasso della SP12;
- **Frana Centrale:** rappresenta il corpo di frana principale coinvolto nell'evento del 25-26 gennaio, caratterizzata da spostamenti di circa 50 m diretti prevalentemente verso sud-ovest, bordata a sud-est dal T. Benefizio in forte incisione; ha generato la grande scarpata che lambisce il margine urbano;
- **Frana Sud:** formatasi in rapida successione dopo la frana centrale nell'evento del 25-26 gennaio, separata dalla frana dal T. Benefizio, ha manifestato spostamenti medi di circa 7 m in direzione ovest-sud-ovest, ha causato la parziale distruzione della SP10.

Nello specifico, i settori sono stati perimetrati in base alle evidenze ricavabili dai rilievi topografici (fratture, scarpate, etc.) e dalla mappa delle differenze di quota ricavata dal confronto fra modelli digitali del terreno pre- e post-evento (Figura 7).

Sono stati quindi individuati gli oggetti al suolo ben visibili sia in ortofoto pre-evento sia in ortofoto post-evento, determinandone approssimativamente lo spostamento (*shift*) planimetrico; queste informazioni puntuali sono state infine estese mediante interpolazione spaziale.

Sebbene il margine di errore della procedura sia dell'ordine del metro, esso rimane comunque molto inferiore rispetto all'entità dei movimenti occorsi lungo la maggior parte dei versanti (specialmente nella frana centrale). A tal proposito, non è stata considerata nell'analisi l'estremità meridionale della frana sud (Figura 9), in quanto interessata da movimenti molto più ridotti e pertanto difficilmente percettibili dall'analisi dei rilievi topografici.

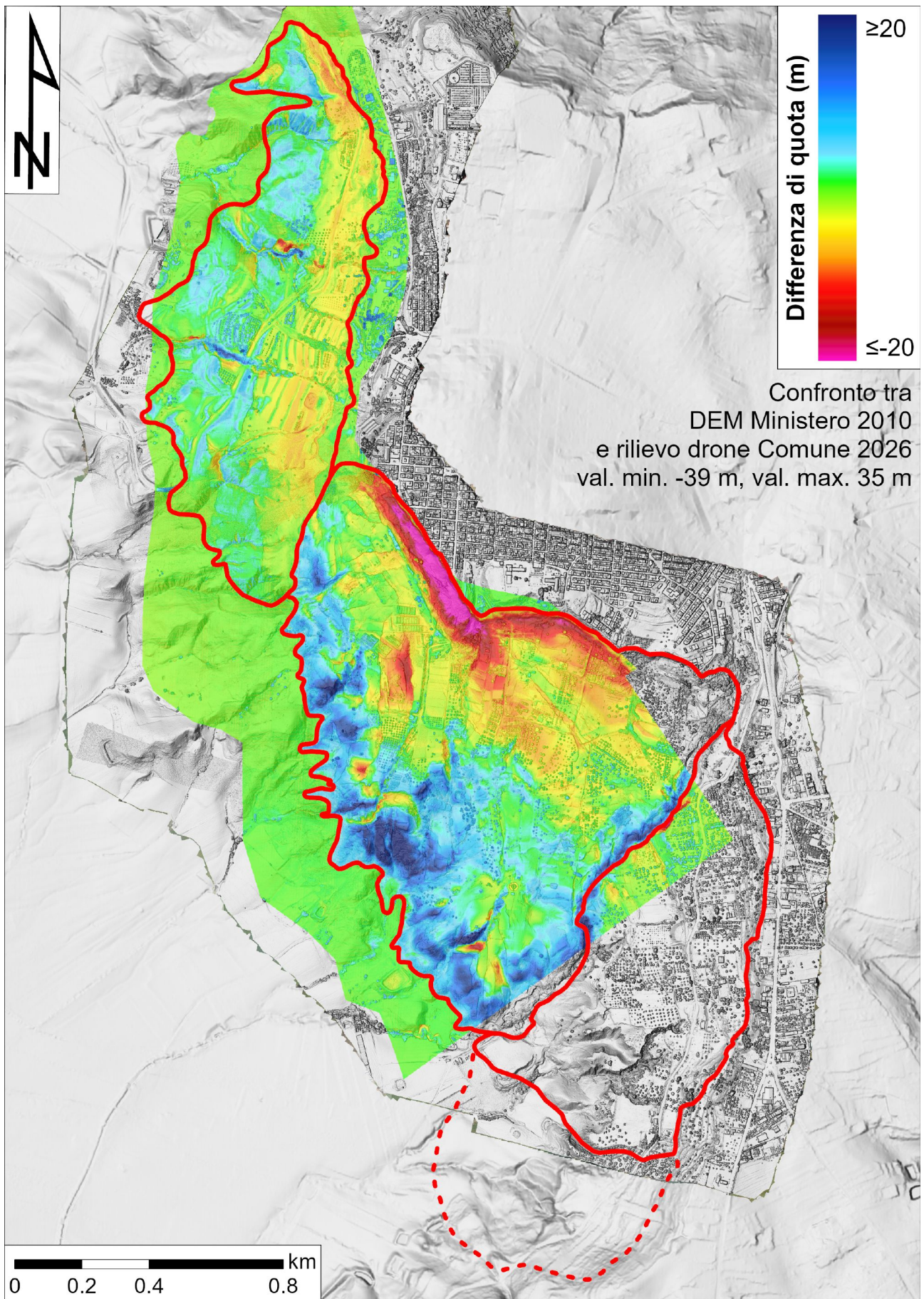


Figura 7 - Differenze di quota ricavate dal confronto del DTM 2010 (Ministero dell'Ambiente) con il DSM 2026 (Comune di Niscemi).

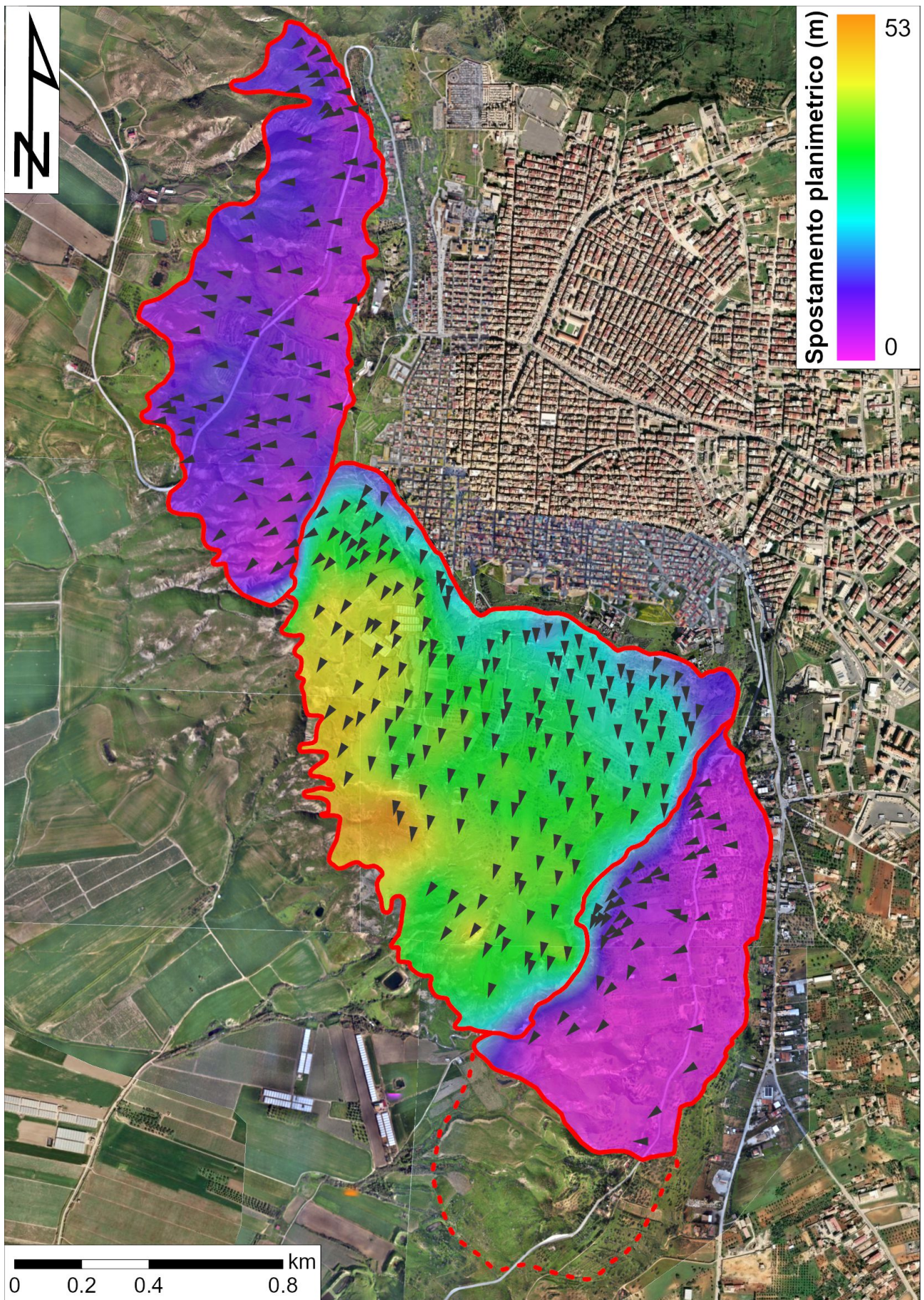


Figura 8 - Mappa degli spostamenti planimetrici ricavati dal confronto di dati ortofotografici e topografici pre- e post-evento.

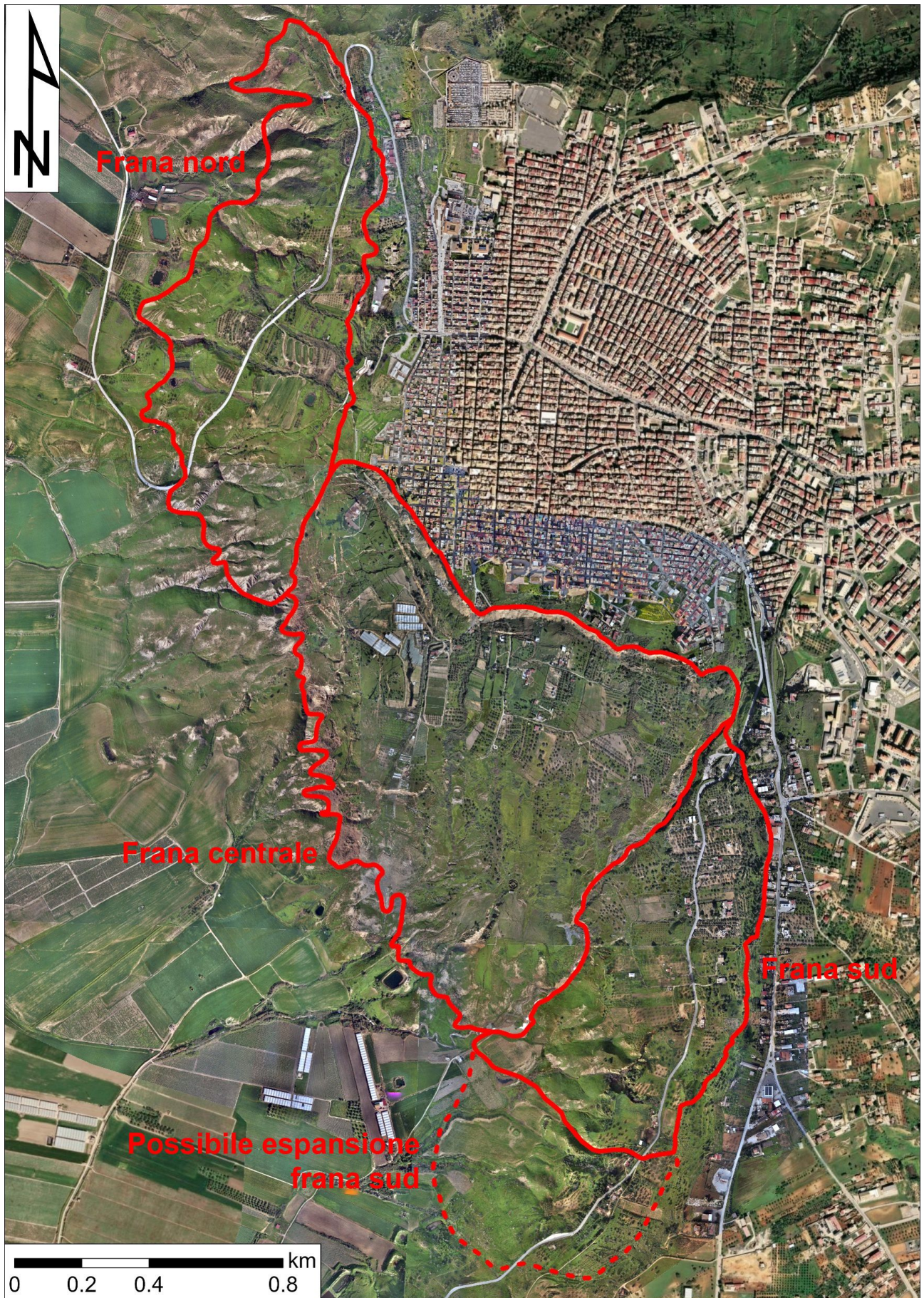


Figura 9 - Suddivisione dell'area di frana in settori cinematicamente distinti.

La Figura 10 e la Figura 11 mostrano come la frana centrale appaia cinematicamente svincolata, presentando spostamenti maggiori di quasi un ordine di grandezza e *azimuth* di spostamento all'incirca ortogonali rispetto alle altre.

Inoltre, si nota nuovamente come i limiti laterali e superiore della frana centrale siano all'incirca coincidenti con i lineamenti tettonici proposti da Rizzo (2004), facendo pertanto pensare che questi ultimi possano offrire delle superfici di svincolo preferenziale.

La mappa delle differenze di quota (Figura 11) denota una sostanziale equivalenza fra l'estensione delle zone in abbassamento e quella delle zone in innalzamento, suggerendo pertanto la prevalenza di movimenti traslativi pseudo-rigidi con sovrascorrimento al piede della superficie topografica originaria.

Quanto detto è ulteriormente supportato dalla Figura 12, che mette a confronto i profili pre- e post-evento lungo la sezione topografica utilizzata per la modellazione nella Figura 16 (longitudinale alla frana centrale).

La Figura 13 riporta infine la perimetrazione delle frane del 2026 di cui alla Figura 9 con sovrapposta la perimetrazione della frana del 1997 (Castiglione *et al.*, 2000) e la mappatura dei lineamenti gravitativi sul corpo di frana (*e.g.*, scarpate secondarie, fratture di taglio e trazione) realizzata sulla base del DSM post-frana della Regione Siciliana.

Si può notare come sussista una forte concentrazione di lineamenti gravitativi nella porzione di versante compresa fra il margine nord-ovest della frana del 1997 e il confine tra le frane del 16 e 25 gennaio 2026.

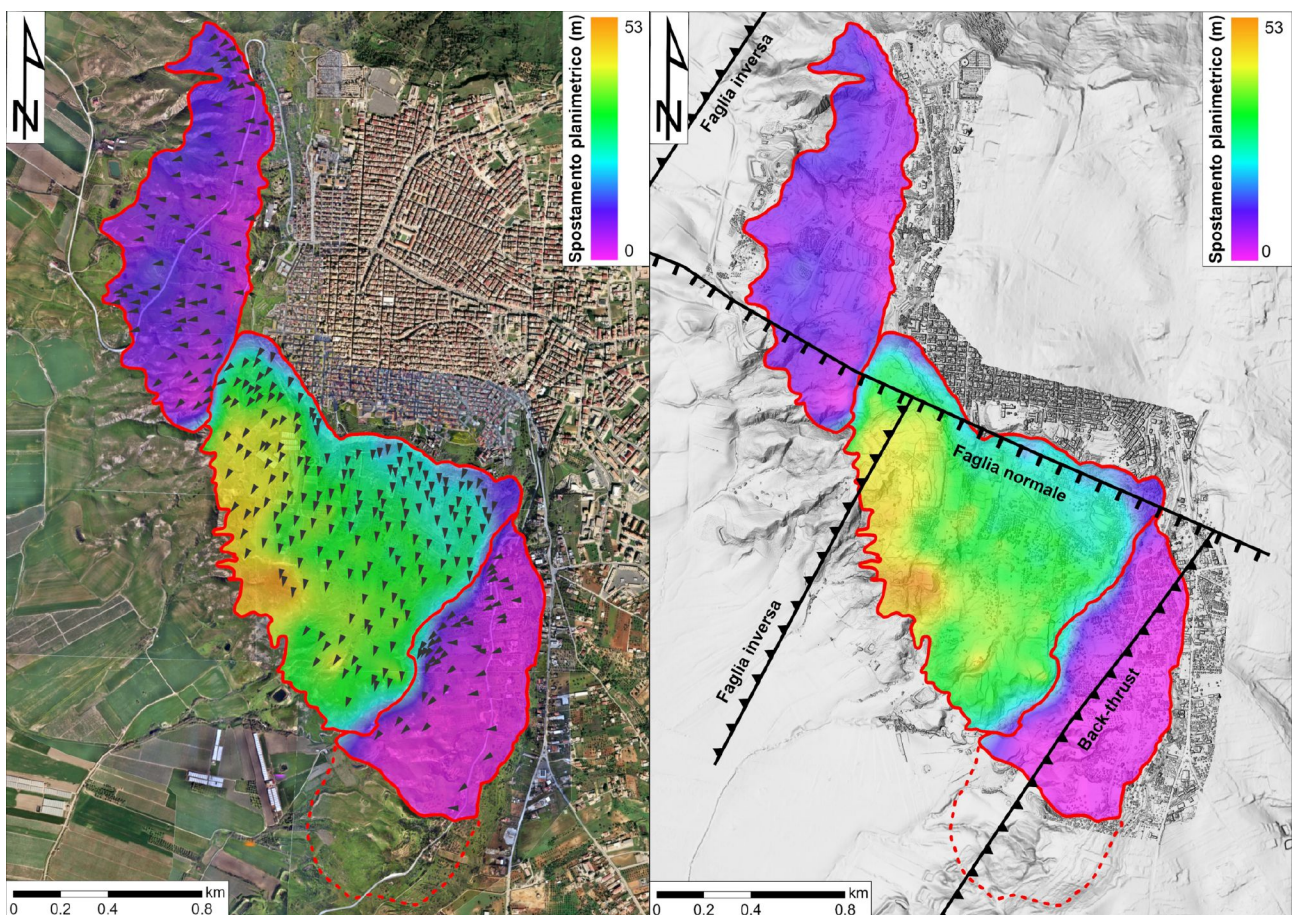


Figura 10 - Confronto fra la mappa degli spostamenti planimetrici ricavati dal confronto di dati ortofotografici e topografici pre- e post-evento (a sinistra) e l'ubicazione dei lineamenti tettonici tracciati da Rizzo (2004) (a destra).

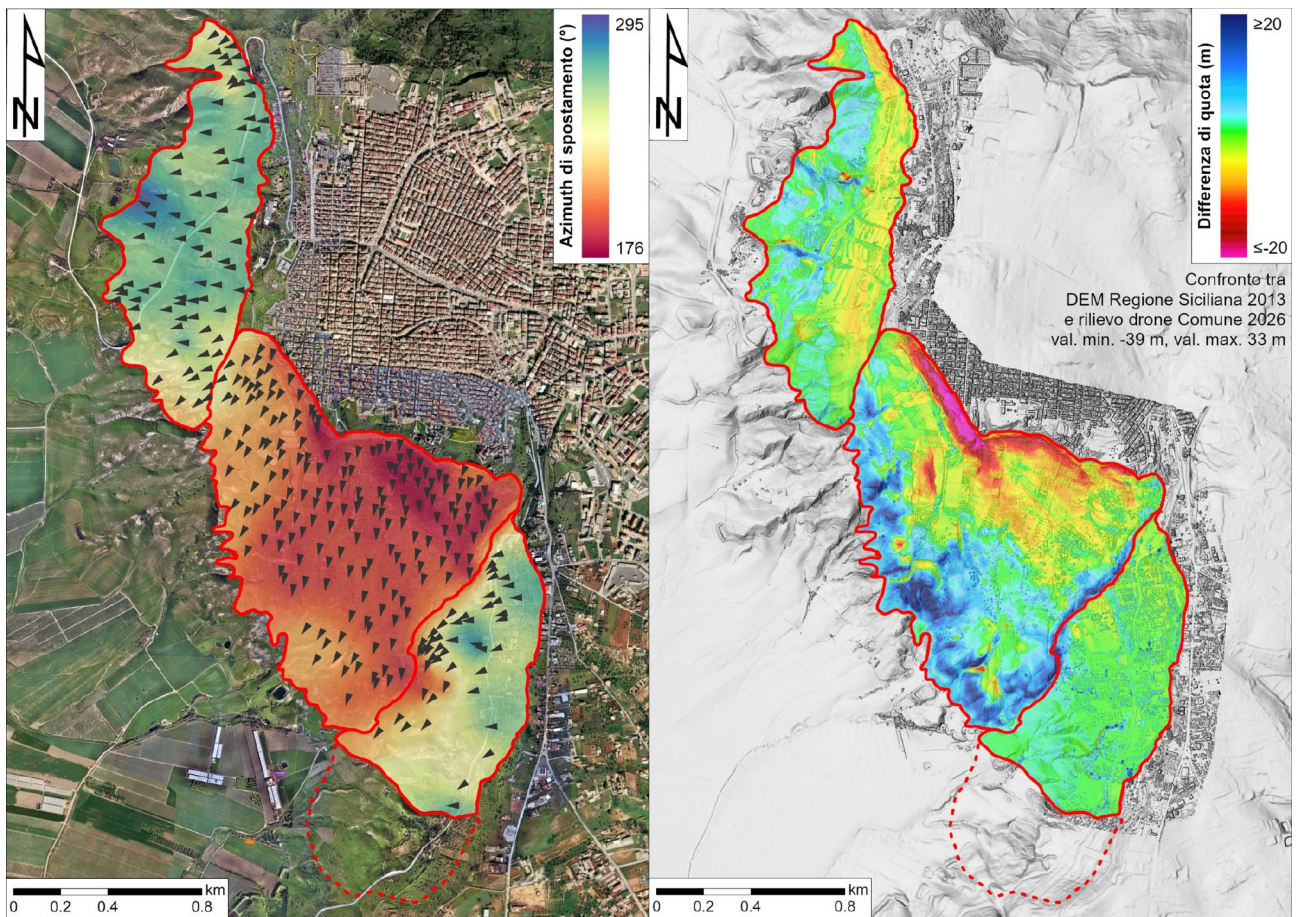


Figura 11 - Mappa degli *azimuth* di spostamento (a sinistra) e delle differenze di quota (a destra) ricavati dal confronto di dati ortofotografici e topografici pre- e post-evento.

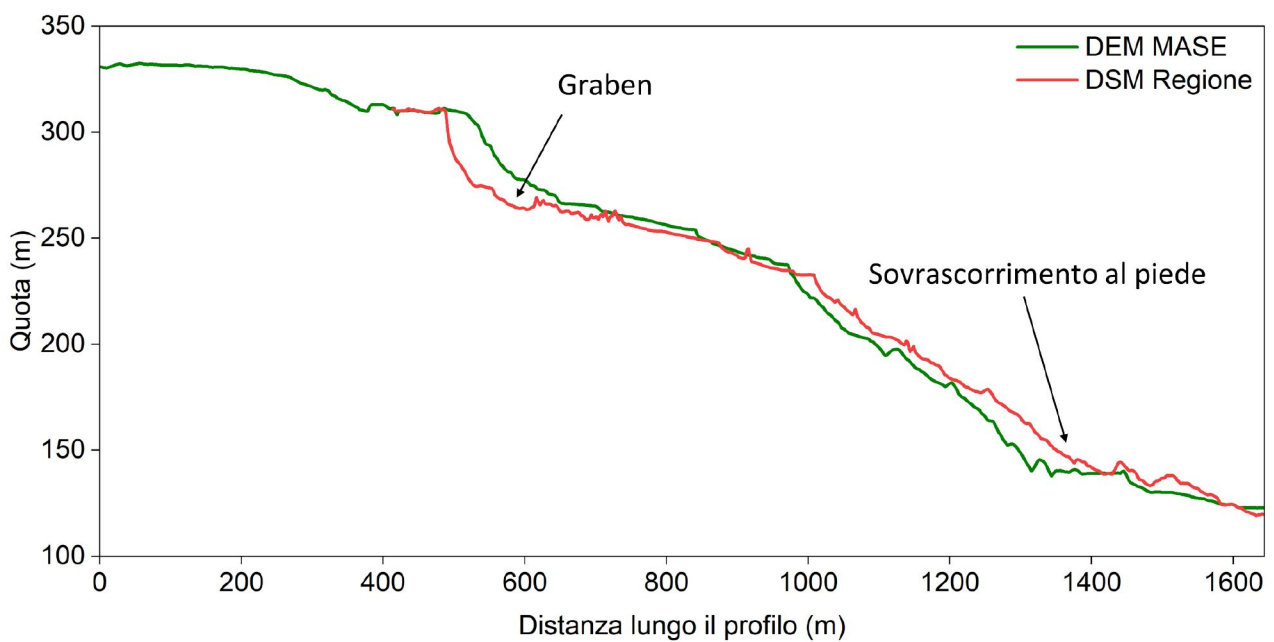


Figura 12 - Confronto tra profili topografici estratti longitudinalmente alla frana centrale dal rilievo LiDAR aereo acquisito nel 2013 dal MASE (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica) e dal DSM (Modello Digitale della Superficie) acquisito a fine gennaio 2026 dalla Regione Siciliana.

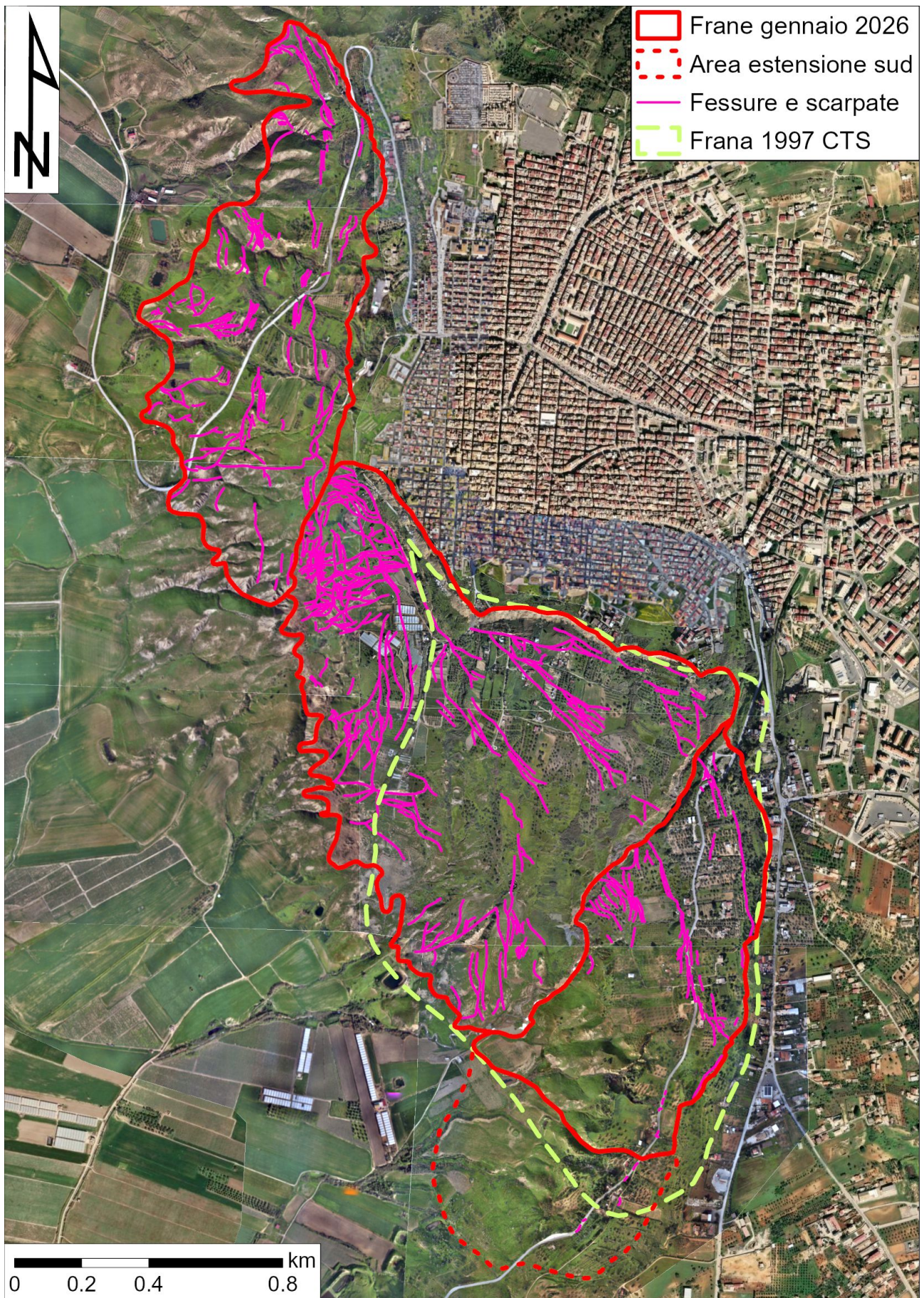


Figura 13 - Perimetrazione delle frane del 2026 (in rosso) confrontata con quella del 1997 (in giallo). In viola sono mostrate le principali fessure e scarpate causate dalle frane del 2026.

### 3.3.2 Meccanismo di movimento

Il movimento osservato della frana principale (“frana centrale” in Figura 9) è riconducibile a una frana di scivolamento composto (*compound slide* in Hutchinson, 1988) caratterizzata da una superficie di scivolamento marcatamente non circolare, costituita dalla combinazione di un segmento posteriore ripido, che può essere curvo o planare, e di una porzione basale debolmente inclinata (Figura 14).

A differenza degli scivolamenti puramente rotazionali o traslativi, nei quali il movimento iniziale può avvenire senza deformazioni interne significative del corpo in frana, gli scivolamenti composti risultano inizialmente cinematicamente vincolati dalla geometria della superficie di scivolamento e possono evolvere solo a seguito dello sviluppo di deformazioni interne e superfici di taglio che rendono cinematicamente ammissibile il movimento dell’intera massa (Hutchinson, 1988).

Tali fenomeni sono generalmente indicativi della presenza di eterogeneità litostratigrafiche nel sottosuolo, quali livelli meccanicamente più deboli o superfici di contatto tra materiali con proprietà geomeccaniche drasticamente differenti (Hutchinson, 1988).

Gli scivolamenti composti sono frequentemente innescati dallo sviluppo di superfici di taglio interne localizzate nella porzione posteriore della massa in frana, che consentono la mobilitazione del corpo instabile, spesso in un unico evento principale. La cinematica del fenomeno è fortemente influenzata dal grado di fragilità della rottura interna: in condizioni di fragilità bassa o moderata, la velocità di evoluzione del movimento è generalmente moderata (Hutchinson, 1988).

Le principali discontinuità interne sono rappresentate da una o più superfici di taglio inclinate verso monte, che si sviluppano a partire dalla zona in cui la superficie di scivolamento presenta il raggio di curvatura minimo. La porzione posteriore della massa franosa tende a subsidere tra tali superfici di taglio e la scarpata principale, spesso con rotazione retrogressiva limitata o assente, dando luogo alla formazione di una struttura tipo *Graben*, mentre la porzione centrale evolve prevalentemente mediante uno spostamento traslativo verso valle (Hutchinson, 1988).

La Figura 15 mostra una sezione schematica della frana di Niscemi nella sua porzione centrale. La superficie di scivolamento è di tipo listrico, caratterizzata da una scarpata verticale che si raccorda con una curvatura in profondità a una superficie di scivolamento a bassa inclinazione al piede. Le superfici di taglio interne nella porzione posteriore della massa si manifestano come nette scarpate in contropendenza, che danno luogo alla formazione del *Graben*.

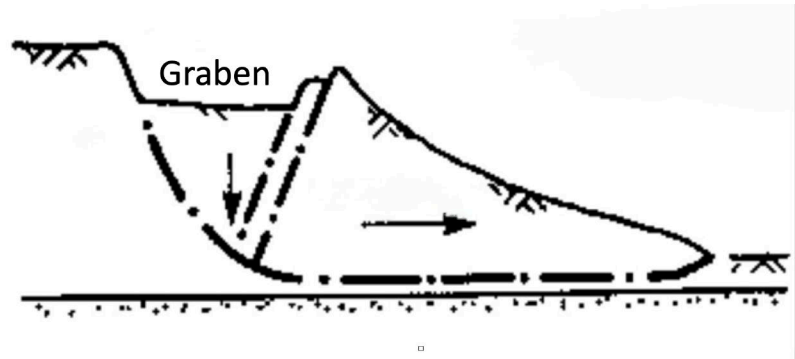
La componente traslativa del movimento risulta dominante rispetto a quella rotazionale, come confermato dalla tipica morfologia a blocchi scomposti, rialzati e ribassati (*Horst e Graben*), e dalla mancanza di significative strutture di compressione e rigonfiamento al piede. La velocità del movimento nella fase parossistica fra il 25 e il 26 gennaio è stata dell’ordine del metro all’ora, corrispondente a una velocità “moderata” secondo Cruden & Varnes (1996), tipica di scivolamenti composti in condizioni di fragilità bassa o moderata (Hutchinson, 1988).

Tale stile deformativo può essere riprodotto mediante modellazione numerica agli elementi finiti, in modo coerente con i parametri geotecnici riportati nella sezione 7.1.2 e ipotizzando la presenza di un orizzonte basale a bassa inclinazione in condizioni prossime a quelle residue (Figura 16).

Frane di questa tipologia hanno una tipica tendenza alla retrogressione: l’arretramento del ciglio di scarpata tende infatti a propagarsi progressivamente verso monte, in direzione del centro abitato, secondo un meccanismo già documentato negli eventi storici.

La frana nord e la frana sud non denotano invece lo sviluppo di una chiara morfologia a *Horst e Graben*, presumibilmente a causa degli spostamenti notevolmente inferiori rispetto alla frana centrale (Figura 10); è pertanto ipotizzabile una curvatura più graduale delle rispettive superfici di scivolamento, come esplicitato dalle sezioni schematiche nella Figura 17 e nella Figura 18.

Esse sono contraddistinte da una scarpata principale con rigetto generalmente inferiore alla decina di metri e, sempre in confronto alla frana centrale, da evidenze di sovrascorrimento al piede molto meno accentuate (specialmente nella frana sud). È altresì probabile che superfici di distacco secondarie determinino la suddivisione dei corpi di frana in blocchi successivi variamente ribassati e ruotati.



compound slide by release of internal shears in materials of moderate brittleness (Hutchinson, 1988)

Figura 14 - Scivolamento composto con attivazione di superfici di taglio interne in materiali a fragilità moderata e formazione di *Graben* (Hutchinson, 1988). A sinistra sono visibili due foto dell'ampio *Graben* formatosi sotto la scarpata principale della frana di Niscemi.

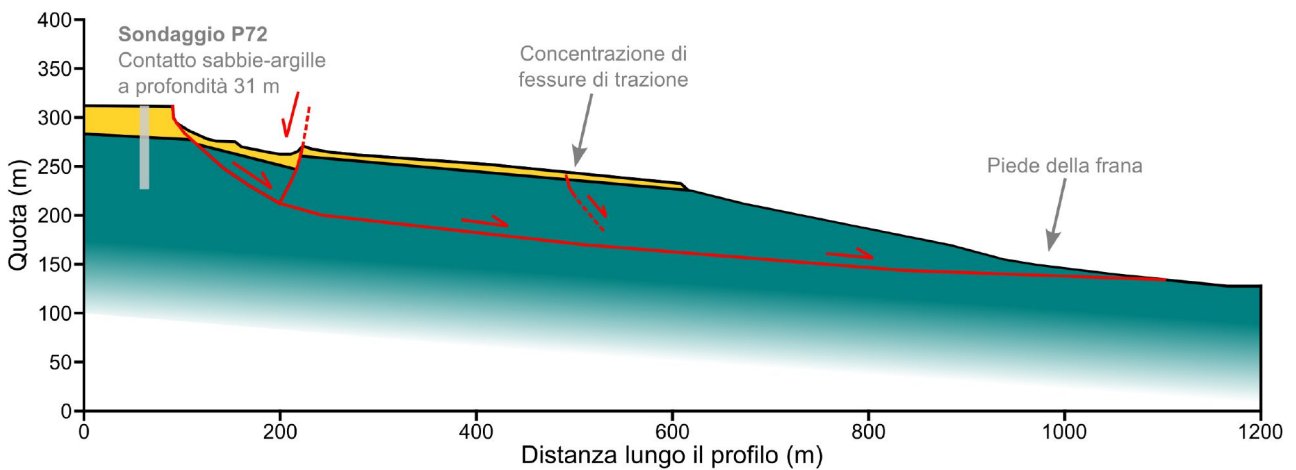


Figura 15 - Sezione schematica della frana centrale di Niscemi.

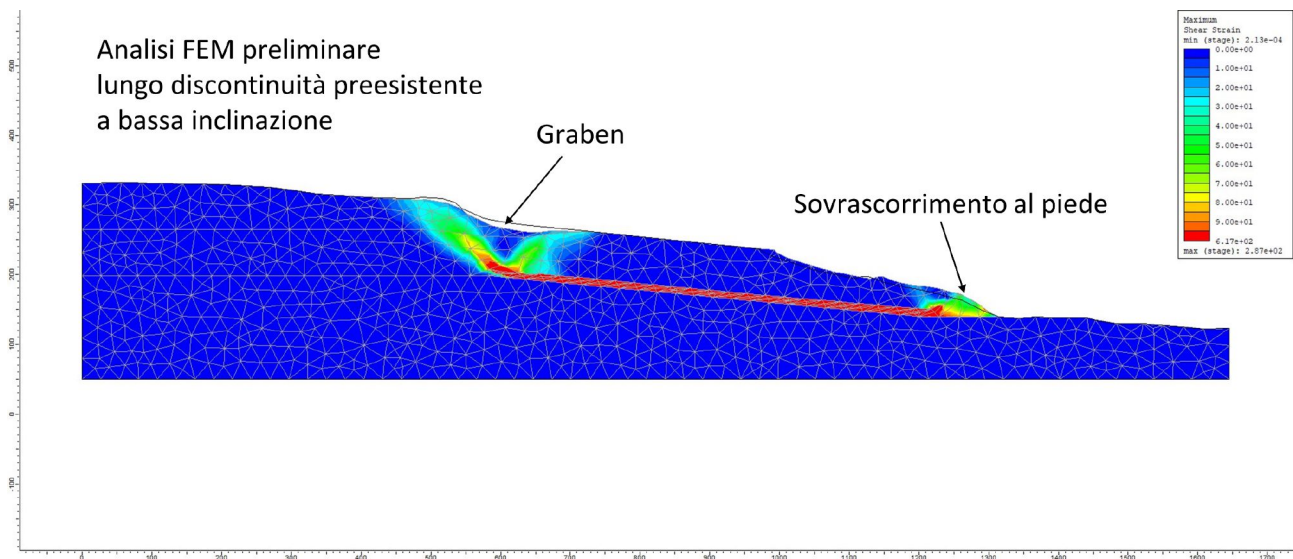


Figura 16 - Modello della frana centrale mediante analisi numerica agli elementi finiti.

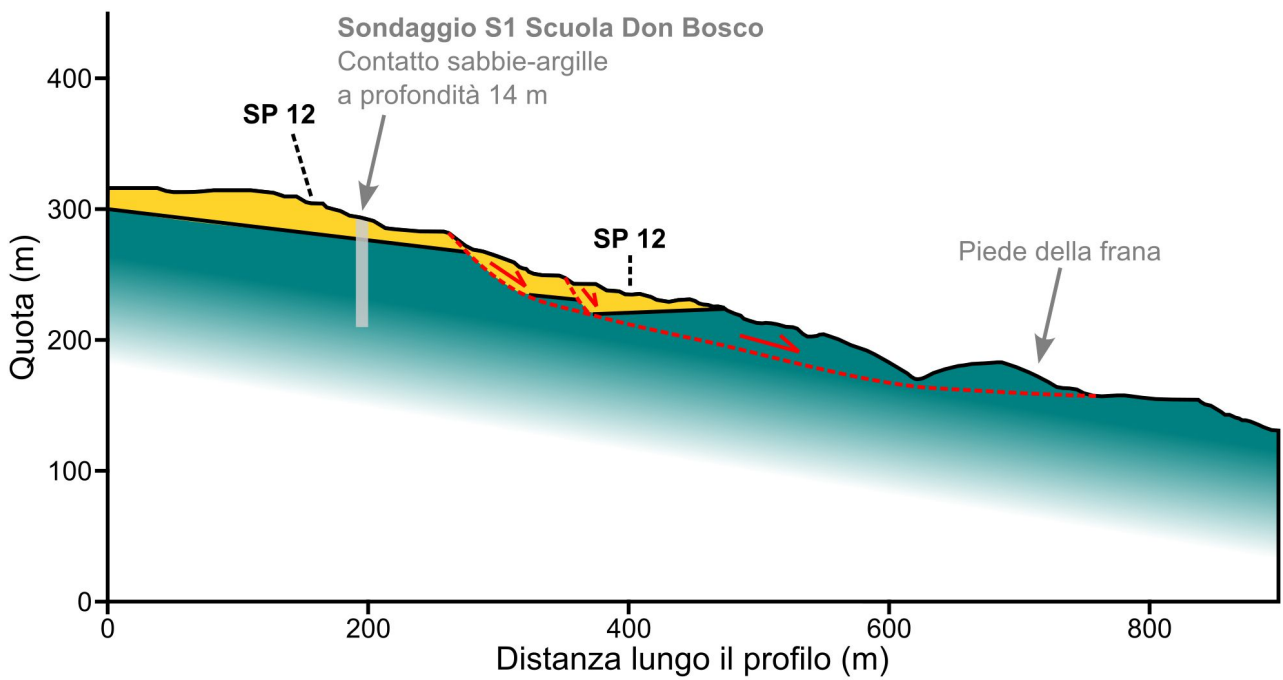


Figura 17 - Sezione schematica della frana nord di Niscemi.

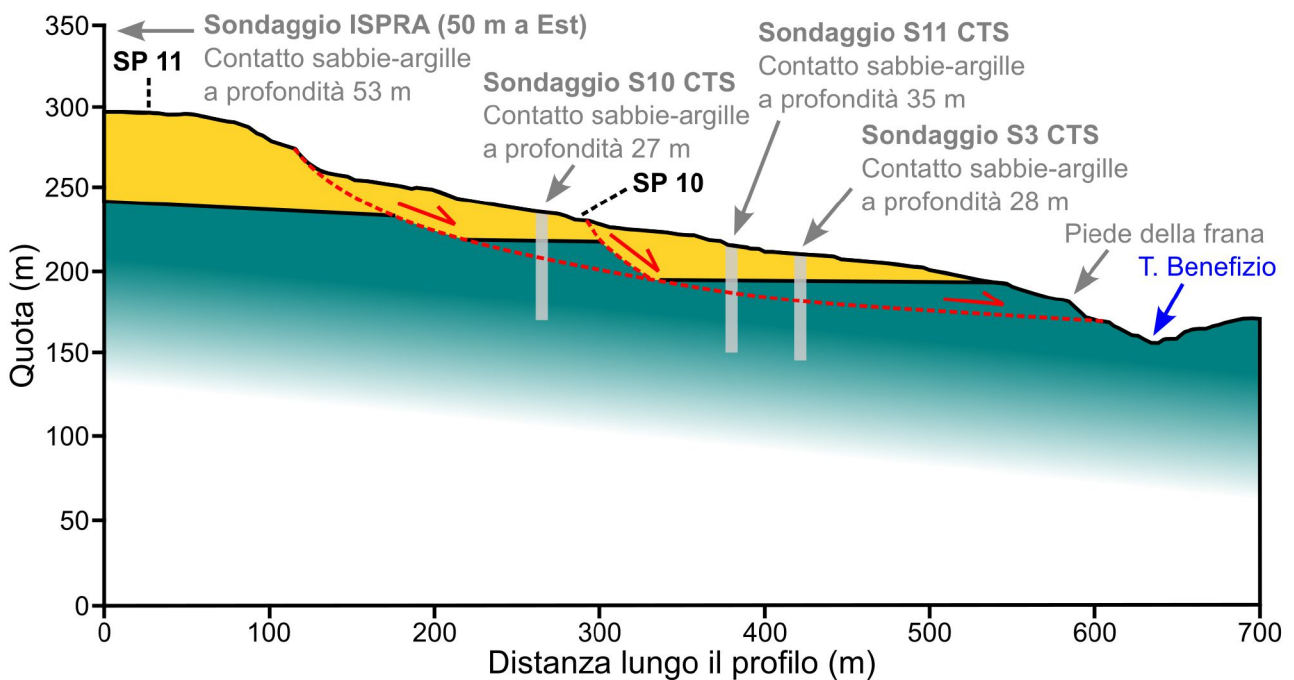


Figura 18 - Sezione schematica della frana sud di Niscemi.

### 3.3.3 Morfometria

Sulla base della perimetrazione e dell'ipotesi sul meccanismo di movimento si possono ottenere i parametri morfometrici riportati nella Tabella 1. Nel complesso il fronte di frana delle tre frane coalescenti si estende per circa 4,7 km con un volume totale di oltre 80 milioni di metri cubi.

Per quanto riguarda la mobilità della frana, l'angolo formato tra il punto sommitale della nicchia di distacco della frana e il punto più lontano raggiunto dal materiale depositato (*Fahrböschung* in Heim, 1932) risulta pari a 6,5°.

Tale valore corrisponde a un'elevatissima mobilità della frana, compatibile con una significativa riduzione della resistenza lungo la superficie di scivolamento, potenzialmente associata a condizioni prossime alla resistenza residua o a fenomeni di liquefazione statica.

Frana	Larghezza del fronte (m)	Lunghezza in direzione del movimento (m)	Profondità massima presunta (m)	Area (km <sup>2</sup> )	Volume (10 <sup>6</sup> .m <sup>3</sup> )
Nord	1700	600	60	0,67	20
Centrale	1400	1200	80	1,2	50
Sud	1200	500	40	0,54	11

Tabella 1 - Parametri morfometrici delle tre frane coalescenti del gennaio 2026 a Niscemi.

### 3.4 Cause predisponenti e di innesco

L'area oggetto di studio presenta una marcata suscettibilità ai fenomeni di instabilità gravitativa, determinata dall'interazione di fattori geologici, geomorfologici, idrogeologici e strutturali.

Queste condizioni risultano ulteriormente influenzate dall'assetto tettonico regionale, connesso alla presenza del fronte della Falda di Gela, che contribuisce a definire un contesto morfostrutturale articolato e dinamicamente evolutivo, entro il quale i fenomeni di instabilità gravitativa possono manifestarsi con estensione significativa e con carattere policiclico, attraverso successive fasi di riattivazione.

#### 3.4.1 Assetto litologico e contrasto di permeabilità e di competenza

L'assetto litologico su cui sorge l'abitato di Niscemi determina un marcato contrasto nelle proprietà idrogeologiche e geotecniche dei terreni. Le sabbie superficiali favoriscono l'infiltrazione delle acque meteoriche, che si accumulano al contatto con i livelli argillosi impermeabili, dando luogo a falde impostate al letto della formazione sabbioso-arenacea e a falde sospese in corrispondenza di livelli limosi intercalati.

L'innalzamento delle pressioni interstiziali lungo tali superfici riduce la resistenza al taglio dei materiali e favorisce la riattivazione di superfici di scivolamento profonde. Nelle immediatezze della frana del 25-26 gennaio, erano infatti evidenti copiose venute d'acqua in regime turbolento lungo la scarpata, al contatto fra le sabbie e le argille sottostanti (Figura 19).



Figura 19 - Venute d'acqua lungo la scarpata della frana del 25-26 gennaio, al contatto fra le sabbie e le argille.

Tali manifestazioni idriche sono ben spiegate dall'andamento del contatto sabbie-argille in corrispondenza dell'altopiano di Niscemi, per la cui ricostruzione sono state acquisite le colonne stratigrafiche ricavate nell'ambito delle indagini di microzonazione sismica del Comune di Niscemi e di studi geologici commissionati da privati (comunicazione personale del Dott. Carmelo Iudica).

La Figura 20 mostra la mappa delle isobate del contatto, derivata interpolando le informazioni puntuali dei sondaggi. Si evince come esso immerga generalmente da nord-est verso sud-ovest; in altre parole, secondo tale rappresentazione, gran parte delle acque di infiltrazione sull'altopiano di Niscemi drenerebbe in direzione della scarpata della frana centrale e quindi del torrente Benefizio, con una quota minoritaria convogliata anche verso la scarpata della frana nord.

L'eventuale presenza di fratture o linee di debolezza sub-verticali, ad esempio di origine tettonica o associate a fenomeni gravitativi pregressi, consentirebbe pertanto all'acqua di percolare più in profondità e raggiungere eventuali letti limoso-sabbiosi profondi intercalati alle argille, potenzialmente causando un incremento repentino delle pressioni interstiziali.

La Figura 21 mostra una vista panoramica del modello 3D del sottosuolo generato dall'interpolazione dei sondaggi sopracitati in aggiunta a quelli effettuati sul corpo di frana del 1997 (Castiglione *et al.*, 2000). Si riporta inoltre una mappa dello spessore dello strato sabbioso superficiale; si sottolinea come questa sia da intendersi come una sommaria approssimazione di informazioni puntuali spazialmente e temporalmente discontinue, alcune delle quali oblitrate dai dissesti recenti, e che pertanto non rifletta necessariamente il reale assetto stratigrafico locale.

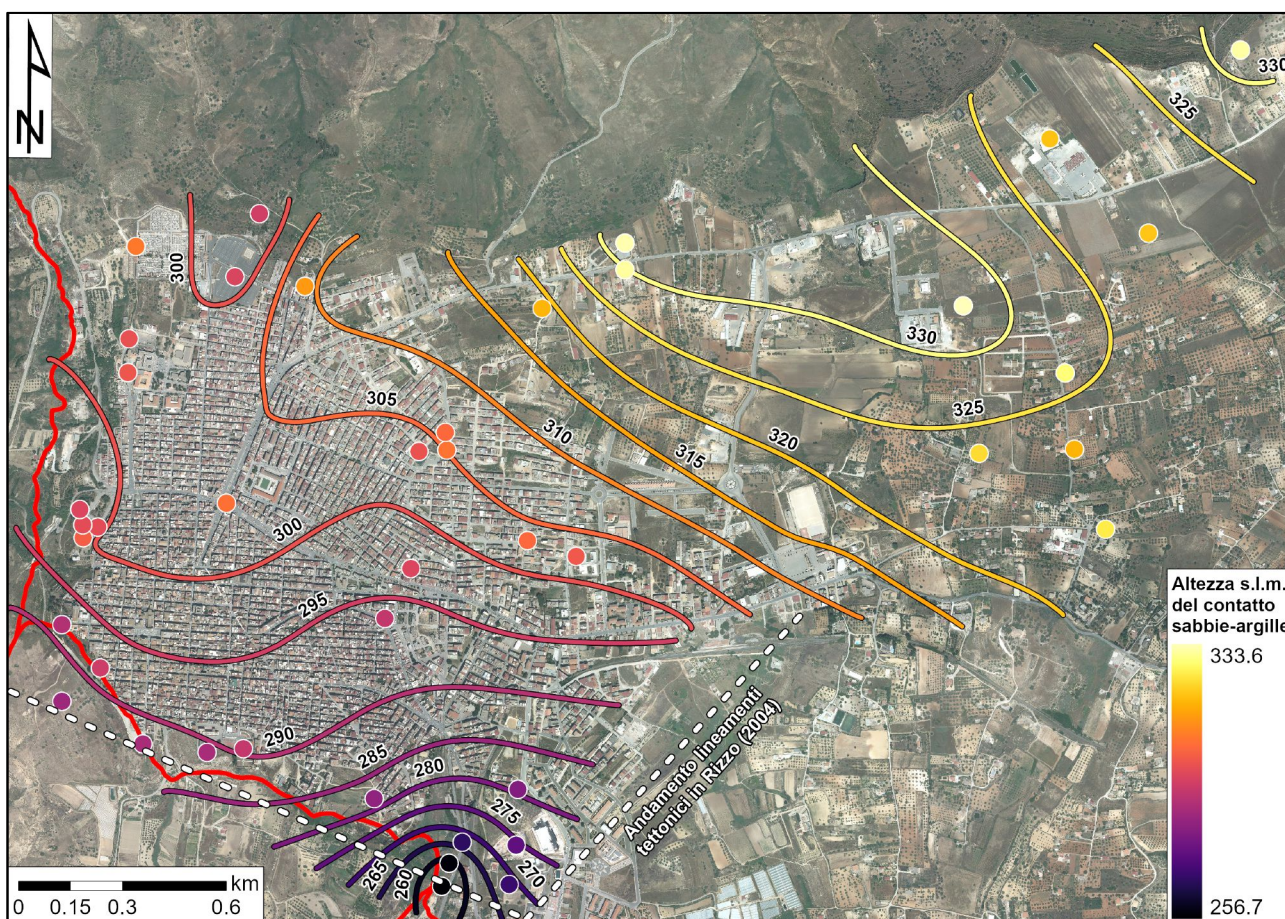


Figura 20 - Mappa delle isobate del contatto sabbie-argille, ricostruita a partire dai sondaggi disponibili.

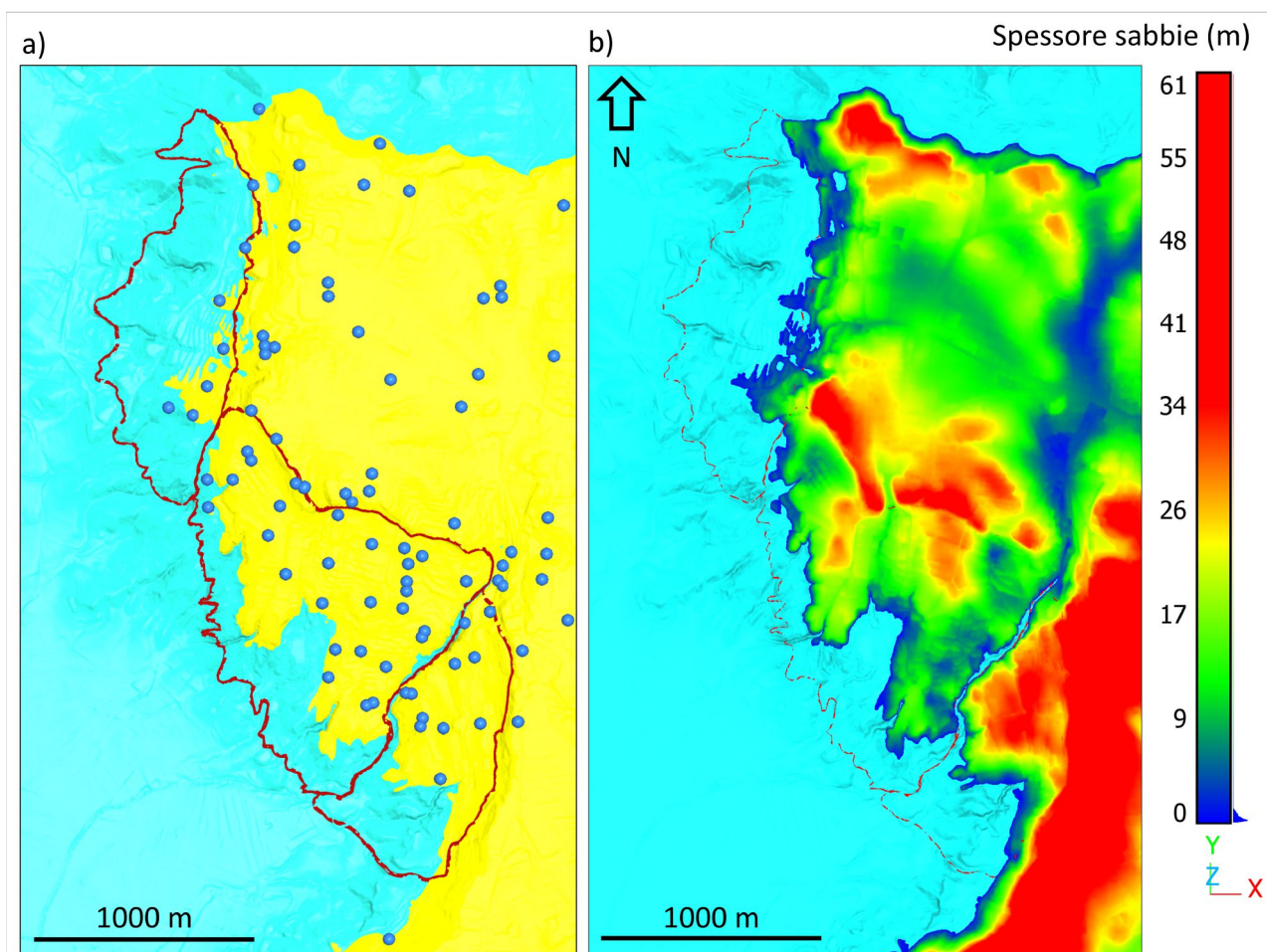


Figura 21 - Modello 2D del sottosuolo generato dall'interpolazione dei sondaggi effettuati nell'area di Niscemi, con in azzurro le argille e in giallo le sabbie (a); mappa 3D dello spessore delle sabbie (b).

### 3.4.2 Disboscamento ed erosione superficiale

Il disboscamento rappresenta una causa storica determinante dell'instabilità dei versanti nel territorio di Niscemi.

L'area, caratterizzata da terreni argillosi e sabbioso-argillosi facilmente erodibili, era in origine coperta da un'estesa sughereta, relitto della più ampia foresta della Sicilia centro-meridionale.

Già il toponimo rimanda a questo paesaggio boschivo: l'antico nome arabo *Fata-nascim*, poi *Nasciam*, è traducibile come "passo dell'olmo", richiamando la presenza di vegetazione arborea diffusa. Secondo la tradizione, nel 1599 un pastore avrebbe ritrovato nel bosco un'icona mariana presso una fonte d'acqua, evento che portò alla costruzione del santuario di Maria SS. della Grazia e consolidò il legame identitario tra comunità e foresta.

A partire dal XVII secolo, con la concessione feudale ai Branciforti, il taglio del legname divenne progressivamente intensivo. Già nel 1718 furono emanate disposizioni per limitarne lo sfruttamento, segno di un equilibrio ambientale compromesso.

Nel XIX secolo, l'assegnazione di ampie porzioni di demanio boschivo ai contadini accelerò la frammentazione della copertura forestale. La rimozione del bosco ridusse drasticamente la protezione del suolo: venne meno l'azione consolidante delle radici e la capacità di intercettazione delle piogge. Sui terreni argillosi ciò favorì l'erosione superficiale e la formazione dei calanchi, morfologie incise da solchi profondi e creste affilate.

I calanchi, esito dell'erosione accelerata, costituiscono al tempo stesso esito e motore dell'instabilità. Essi indicano un versante in equilibrio precario, dove il dilavamento rimuove il suolo e prepara condizioni

favorevoli a scivolamenti, colate di fango e riattivazione di frane antiche. Non a caso, il termine “calanco” richiama etimologicamente l’idea del cadere.

In questo contesto, il disboscamento storico si configura come l’origine strutturale del dissesto idrogeologico che caratterizza il territorio di Niscemi.

### 3.4.3 Processi erosivi delle acque incanalate

All’assetto geologico locale, già di per sé fortemente predisponente per la presenza di argille plio-pleistoceniche alla base e di livelli sabbiosi poco cementati in copertura, si associa un ruolo determinante dei processi erosivi attivi nelle incisioni che solcano il versante a sud dell’abitato di Niscemi. L’analisi geomorfologica dell’area mostra come i dissesti siano strettamente connessi alla rete di incisioni, profonde anche alcune decine di metri, in particolare lungo il torrente Benefizio e i suoi affluenti.

L’erosione fluviale agisce in primo luogo attraverso lo scalzamento al piede dei versanti. Lungo le incisioni principali, soprattutto nei tratti soggetti a maggiore concentrazione di deflusso, si osservano fenomeni di arretramento delle sponde e di approfondimento dell’alveo. Questo arretramento comporta la progressiva rimozione del sostegno alla base dei pendii argillosi, modificando le condizioni di equilibrio limite e rendendo cinematicamente possibili scivolamenti profondi. Le incisioni costituiscono quindi elementi di debolezza strutturale e morfologica che favoriscono l’innesco di movimenti gravitativi, inizialmente localizzati ma suscettibili di evoluzione verso forme più estese.

Dal punto di vista meccanico, l’approfondimento delle incisioni determina una redistribuzione dello stato tensionale nei terreni di base e una riduzione delle tensioni efficaci al piede del versante. In presenza di argille a bassa permeabilità, le variazioni di carico e di confinamento indotte dall’erosione possono generare condizioni di sovrappressione interstiziale e una progressiva diminuzione del coefficiente di sicurezza. Si configura così un quadro di instabilità differita, in cui l’erosione rappresenta la causa predisponente e il dissesto costituisce la risposta meccanica, anche a distanza di tempo rispetto alla fase di massimo approfondimento dell’alveo.

Il carattere retrogressivo dei movimenti osservati trova spiegazione proprio in questo meccanismo: l’erosione al piede innesca scivolamenti nelle porzioni più basse del versante, che determinano un arretramento progressivo della superficie di rottura verso monte. Il risultato è l’evoluzione da fenomeni puntuali a un complesso franoso articolato, con superfici di scivolamento profonde impostate nelle argille di base e manifestazioni superficiali quali ribassamenti a gradoni, fratture sub-parallele e abbassamenti differenziali.

Alla luce delle condizioni attuali, caratterizzate da eventi meteorici più intensi e concentrati nel tempo, l’azione erosiva lungo gli impluvi può risultare ulteriormente amplificata. L’incremento dei picchi di deflusso superficiale, associato alla possibile impermeabilizzazione di porzioni del territorio e alla presenza di scarichi concentrati, contribuisce ad accelerare i processi di incisione e di scalzamento. In questo contesto, il controllo dell’erosione, la regimazione delle acque superficiali e la limitazione degli apporti idrici concentrati assumono un ruolo centrale nella prevenzione della riattivazione o dell’evoluzione dei fenomeni franosi.

### 3.4.4 Precipitazioni

Le piogge cadute nelle settimane precedenti all’evento (120 mm da inizio dicembre alla stazione di Niscemi), sommate a quelle dei mesi antecedenti, possono aver agito come ulteriore fattore predisponente all’instabilità. Comunque si tratta di valori pluviometrici di poco superiori a quelli ordinari.

La situazione meteorologica antecedente alla frana è illustrata nella seguente comunicazione personale inviata al Prof. Casagli dal Dott. Luigi Pasotti del Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano (SIAS):

*La stazione SIAS Gela di C.da Badia Collegio, ubicata a circa 8 km dall’abitato di Niscemi, è la più vicina stazione pluviometrica per Niscemi ad avere una serie completa per gli ultimi anni e per gli ultimi mesi. Le precipitazioni totali registrate dalla stazione in occasione del ciclone Harry, tra 20 e 21 gennaio 2026, sono state relativamente modeste, arrivando ad un accumulo nei due giorni di 35,2 mm.*

Analizzando la serie degli ultimi mesi, non risultano accumuli totali particolarmente anomali. L'accumulo pluviometrico complessivo di 365 mm dal 01/09/2025 al 21/01/2026 (Figura 22) è sì superiore alla norma della serie 2003-2025, pari a 265 mm; tuttavia, sono stati registrati negli anni scorsi, nello stesso periodo, accumuli superiori, come ad esempio era avvenuto nel 2019.

Un'anomalia importante è stata la registrazione il giorno 31 ottobre 2025 dell'intensità massima oraria dell'intera serie SIAS dal 2002: 56,6 mm/ora (54,2 in 30 minuti), un valore non eccezionale se comparato alle massime intensità orarie che si registrano spesso presso altre stazioni. Le immagini radar mostrano l'abitato di Niscemi interessato quel giorno dalla stessa linea temporalesca, di intensità probabilmente analoga a quella registrata dalla stazione SIAS.

Una relativa anomalia è anche quella che interessa il numero di giorni piovosi: dal 01/09/2025 al 21/01/2026 sono stati ben 35 i giorni piovosi, mentre la norma è di 30,5 giorni. Tuttavia, in passato sono stati registrati numeri ancora maggiori, ad esempio 40 giorni piovosi nel 2021. Un'osservazione certamente interessante è infine l'occorrenza di eventi piovosi in tutte le decadi a partire dall'ultima decade di ottobre.

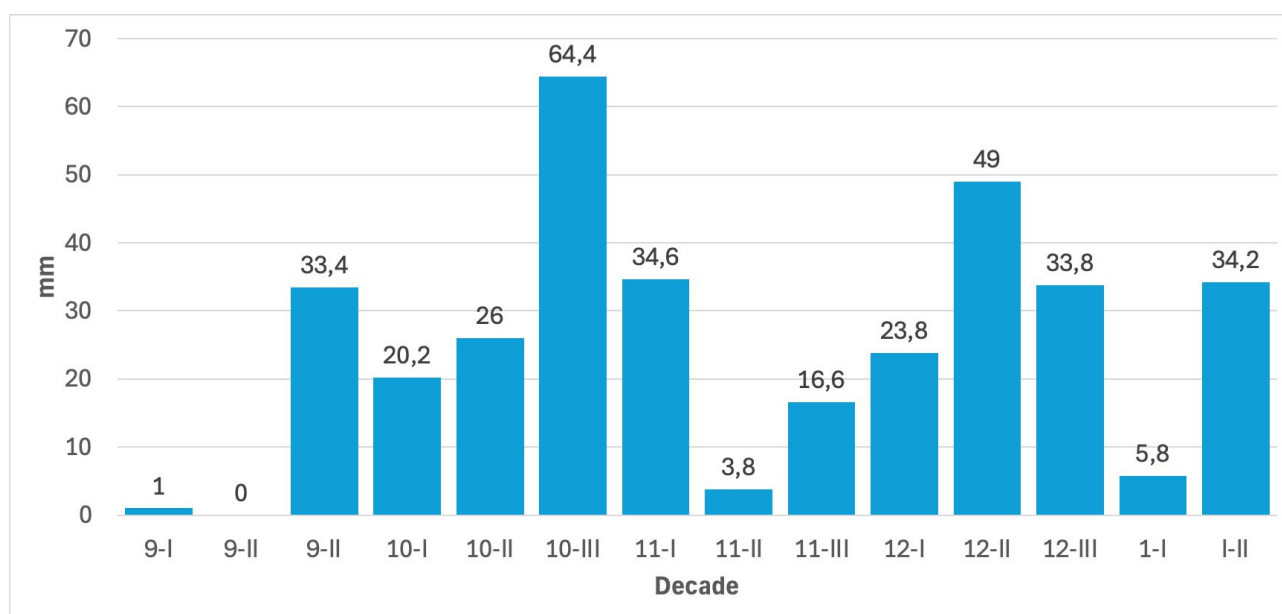


Figura 22 - Precipitazioni totali decadali registrate alla stazione SIAS Gela di C.da Badia Collegio dal 1/9/2025 al 20/1/2026 (gentile concessione Dott. Luigi Pasotti, SIAS).

### 3.4.5 Sismicità

Per quanto concerne la sismicità in prossimità del periodo dell'innescò della frana di Niscemi, il contesto regionale è stato caratterizzato dal verificarsi di eventi sismici di moderata magnitudo, localizzati prevalentemente lungo il margine ionico della Calabria e nel settore nord-orientale della Sicilia:

- il 10 gennaio 2026 si è verificato un terremoto di magnitudo  $M_w$  5.1 al largo della costa calabra sud-orientale (provincia di Reggio Calabria), ampiamente risentito in Sicilia orientale, Calabria meridionale e Puglia; l'analisi della distribuzione della radiazione sismica evidenzia come l'area di Niscemi ricada in una zona interessata da significativa propagazione dell'energia sismica, con conseguente possibile sollecitazione dinamica dei versanti;
- il 15 gennaio 2026 un evento di magnitudo  $M_b$  4.3 è stato registrato nel Mar Ionio settentrionale, a circa 100 km dalla costa calabrese (provincia di Crotone), seguito nelle ore successive da tre eventi di magnitudo compresa tra 3.4 e 3.8, indicativi di una fase di rilascio di energia sismica nella medesima area;
- il 18 gennaio 2026, nei pressi di Militello Rosmarino (provincia di Messina), è stato registrato un evento di magnitudo  $M_w$  4.1 a una profondità di circa 8 km, inserito in una sequenza sismica più

ampia che, nel corso del mese di gennaio, ha prodotto circa cento eventi, tra cui due terremoti di magnitudo  $M_w$  3.8 e  $M_L$  3.7 avvenuti il 19 gennaio 2026.

Sebbene tali eventi siano localizzati a distanze considerevoli dall'area di Niscemi, la loro magnitudo e la conseguente propagazione delle onde sismiche su scala regionale potrebbero forse aver determinato sollecitazioni dinamiche diffuse ancorché modeste, contribuendo, in via indiretta, alla perturbazione delle condizioni di equilibrio del versante già in stato di criticità, in concomitanza con altri fattori predisponenti.

Tale possibile influenza delle sollecitazioni dinamiche rappresenta un aspetto che richiede ulteriori approfondimenti mediante analisi specifiche, finalizzate a valutarne il potenziale ruolo come fattore predisponente o concausale.

#### 3.4.6 Presenza di litotipi evaporitici

Un ulteriore elemento di interesse, meritevole di specifici approfondimenti, è rappresentato dalla presenza, al di sotto delle unità argillose, dei litotipi evaporitici, quali la formazione dei Gessi del Messiniano che affiora estesamente pochi chilometri a nord dell'abitato in corrispondenza del Monte Ursitto.

È noto come i gessi e, più in generale, le successioni evaporitiche siano suscettibili a fenomeni di instabilità quali diapirismo, deformazioni plastiche e processi carsici, legati alla loro peculiare risposta meccanica e alla loro elevata solubilità.

Tali processi, pur sviluppandosi spesso a profondità di alcune centinaia di metri, possono indurre modificazioni significative nell'assetto geomeccanico dei terreni sovrastanti, determinando redistribuzioni degli stati tensionali, sviluppo di discontinuità e variazioni delle condizioni idrogeologiche, con possibili ripercussioni sulla stabilità dei versanti e manifestazioni anche a scala superficiale.

L'effettiva profondità dei gessi nell'area di Niscemi è in corso di accertamento. Il rapporto del Consiglio Nazionale dei Geologi (2026) riporta la stratigrafia del pozzo AGIP Rabbito 1 ubicato a circa 2,5 km a sud-est di Niscemi nel quale le rocce del Messiniano evaporitico-carbonatico sono state individuate a profondità comprese fra 325 e 600 m dal piano di campagna.

Si ritiene che tale ubicazione sia errata per incongruenze toponomastiche e stratigrafiche. In quell'area la cartografia IGMI non riporta alcuna località Rabbito, mentre il database ViDEPI (<https://www.videpi.com>) indica un pozzo Rabbito 1 in località Roccazzelle, nel territorio di Gela, presso l'alveo del torrente Rabbito. Le coordinate differiscono nettamente e le caratteristiche stratigrafiche e tettoniche descritte sono compatibili con la Falda di Gela, non con l'avampaese ibleo a sud-est di Niscemi. Il pozzo va quindi ubicato circa 23 km più a WSW, nella posizione indicata dal ViDEPI.

#### 3.4.7 Controllo tettonico

L'interpretazione proposta da Rizzo (2004) per la frana del 1997 evidenzia che le dimensioni del movimento, la sua articolata geometria e la stretta coerenza con l'assetto tettonico locale rimandano a un controllo profondo del fenomeno, riconducibile alla struttura del fronte della Falda di Gela.

Il movimento gravitativo si sviluppa infatti lungo il margine della Falda, in corrispondenza di sovrascorrimenti, strutture compressive e settori caratterizzati da configurazioni tipo *triangle zone* e *pop-up*. In questa prospettiva, le superfici di scivolamento non sono generate esclusivamente da processi gravitativi recenti, ma coincidono in parte con piani strutturali già impostati dalla deformazione compressiva. L'assetto tettonico ha quindi predisposto il versante all'instabilità, mentre la deformazione gravitativa si sovrappone a un quadro strutturale attivo o comunque recente.

Nel modello evolutivo proposto da Rizzo (2004), la tettonica compressiva ha determinato la formazione di un rilievo strutturalmente instabile, con pendenze accentuate e livelli argillosi intensamente deformati. Le argille plioceniche, caratterizzate da plasticità, costituiscono un livello meccanicamente debole. Le variazioni del livello piezometrico e l'incremento delle pressioni interstiziali riducono ulteriormente la resistenza al taglio, favorendo la riattivazione del movimento. Gli eventi del 1790 e del 1997 vengono pertanto interpretati

come fasi di riattivazione innescate da condizioni idrologiche critiche, ma su un sistema già strutturalmente predisposto alla deformazione.

Nel complesso, il fenomeno è interpretato come un grande movimento gravitativo profondo, strettamente connesso alla dinamica della Falda di Gela. La frana non rappresenta dunque un episodio isolato, bensì l'espressione morfologica di un'interazione tra tettonica compressiva e processi gravitativi, in cui la struttura guida la geometria e l'evoluzione del movimento.

#### 3.4.8 Concomitanza di cause

Alla luce delle evidenze attualmente disponibili, anche per l'evento franoso del 2026 possono ritenersi sostanzialmente valide le considerazioni formulate per la riattivazione del 1997 in merito ai fattori predisponenti e ai meccanismi di innesco. In particolare, l'evoluzione del fenomeno sembra riconducibile al concorso di più cause, piuttosto che all'azione di un singolo fattore scatenante chiaramente identificabile.

Analogamente a quanto osservato in occasione dell'evento del 1997, la riattivazione si è verificata in assenza di precipitazioni eccezionali immediatamente antecedenti e senza una correlazione univoca con eventi sismici locali di rilievo, suggerendo l'importanza di condizioni predisponenti sviluppatasi nel lungo periodo.

Tra queste, un ruolo primario è attribuibile all'assetto geologico e geomorfologico dell'area, caratterizzato dalla presenza di potenti successioni argillose e da un'evoluzione morfologica condizionata dall'erosione al piede del versante, in particolare lungo l'incisione del torrente Benefizio. I processi erosivi, nel tempo accelerati anche dall'apporto di acque superficiali e reflue provenienti dall'area urbanizzata, hanno progressivamente ridotto le condizioni di confinamento al piede del versante, rendendo cinematicamente possibili movimenti gravitativi profondi.

Inoltre, la dinamica evolutiva dei terreni argillosi, soggetti a variazioni delle pressioni interstiziali anche su tempi lunghi, può aver determinato una progressiva riduzione della resistenza al taglio e, conseguentemente, del coefficiente di sicurezza, fino al raggiungimento delle condizioni critiche di instabilità.

In tale contesto, l'evento del 2026 appare configurarsi come un'ulteriore riattivazione e ampliamento di un sistema franoso complesso e persistente, la cui attività è documentata storicamente e che ha già manifestato fasi di riattivazione significativa, tra cui quella del 1997, a sua volta riconducibile a un movimento gravitativo preesistente almeno dal 1790.

## 4 Analisi dei dati satellitari radar interferometrici

Il CPC-UNIFI ha effettuato l'analisi dei dati satellitari radar acquisiti da diversi sensori sull'area di interesse ed elaborati con diverse tecniche, per stimare gli spostamenti superficiali pregressi e in atto sul paese di Niscemi a seguito dei dissesti. In particolare, sono state analizzate immagini satellitari radar SAR (acronimo dell'inglese *Synthetic Aperture Radar*, Radar ad Apertura Sintetica) acquisite in diverse bande delle microonde:

- satelliti Sentinel-1 equipaggiati con sensori SAR in banda C (lunghezza d'onda di circa 5,6 cm)
- satelliti COSMO-SkyMed equipaggiati con sensori SAR in banda X (lunghezza d'onda di circa 3,1 cm)
- satelliti SAOCOM con sensori SAR in banda L (lunghezza d'onda di circa 23,5 cm)
- satelliti Capella *Space*, microsattelliti che anch'essi acquisiscono in banda X.

Le immagini SAR sono state elaborate con diverse tecniche di interferometria radar differenziale (DInSAR) e multi-temporale con differenti approcci di elaborazione: *i.e.*, SBAS (*Small BAseline Subset*) e SqueeSAR, che considerano le differenze di fase del segnale in tempi successivi sulla stessa area. È stata inoltre effettuata un'elaborazione basata sulle variazioni di ampiezza del segnale elettromagnetico chiamata *Pixel Offset Tracking*.

I sistemi radar satellitari sono sensori di tipo attivo, ovvero inviano un segnale nelle frequenze d'onda delle microonde e ricevono la radiazione elettromagnetica di ritorno (*back-scattering*) riflessa dalla superficie terrestre. Essi operano con continuità, sia di giorno che di notte, in ogni condizione meteorologica, anche in presenza di copertura nuvolosa. I dati radar satellitari consentono di misurare variazioni di distanza sensore-bersaglio nel tempo, attraverso particolari tecniche di interferometria. Le tecniche di interferometria radar satellitare sono tecniche di telerilevamento basate su analisi e confronto di immagini radar acquisite dal satellite sulla stessa area in tempi diversi, in modo da misurare spostamenti millimetrici del terreno e dei manufatti.

I risultati corrispondono ai prodotti delle elaborazioni interferometriche differenziali (interferogrammi) e multi-temporali (mappe e serie temporali di spostamento).

Per ogni punto di misura si dispone della velocità media annua nell'intervallo di osservazione satellitare misurata lungo la LOS e della serie temporale di spostamento che mostra per ogni data di acquisizione lo spostamento misurato.

I punti di misura sono visualizzati in funzione della velocità media annua registrata nel periodo coperto dalle acquisizioni satellitari, mediante l'uso della scala di colori graduati, centrata sul valore zero di velocità. Si definisce finestra di stabilità l'intervallo di velocità compreso tra  $-2$  e  $+2$  mm/anno, entro il quale i valori misurati non sono distinguibili dall'incertezza della tecnica interferometrica e sono pertanto considerati compatibili con condizioni di presunta stabilità.

A partire dai dati di velocità in entrambe le orbite di acquisizione del satellite, è stata effettuata la loro combinazione per ottenere la scomposizione del moto e ricostruire, attraverso l'applicazione di relazioni trigonometriche, la componente del vettore di spostamento sul piano orizzontale (est-ovest) e su quello verticale.

I risultati delle analisi interferometriche sono stati graficati in rappresentazioni territoriali delle velocità e degli spostamenti differenziali (mappe) e in grafici degli andamenti temporali di spostamento più esemplificativi. Per questi grafici sono state pertanto scelte e riportate alcune serie temporali che risultano essere affette da minor rumore del segnale radar e più rappresentative e rilevanti sull'area di interesse.

Ai fini di una migliore visualizzazione dei dati, sono state considerate due aree di attenzione corrispondenti alla zona nord e alla zona sud del centro abitato (Figura 23).

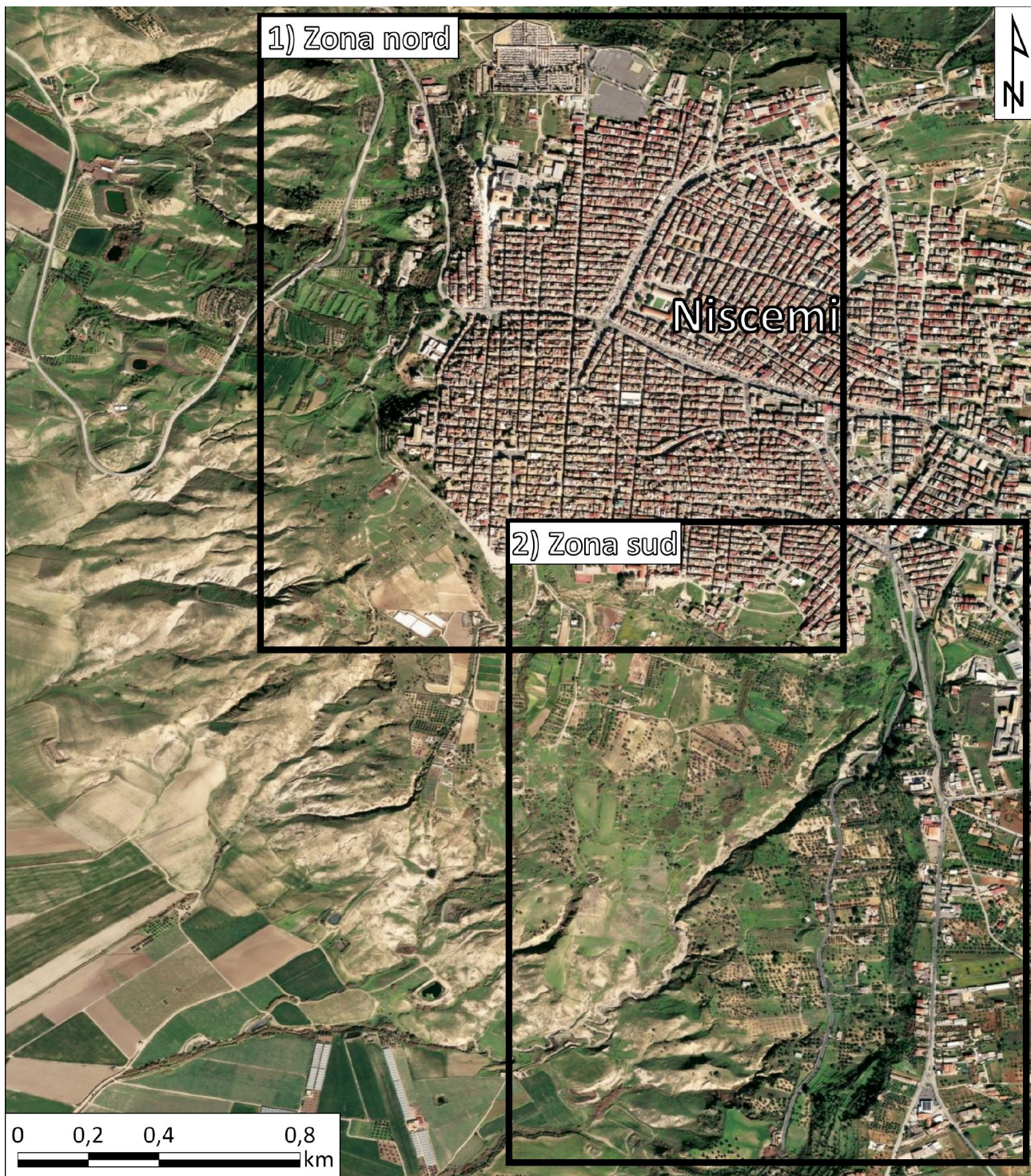


Figura 23 - Aree di attenzione individuate per le analisi di dettaglio nell'abitato di Niscemi.

#### 4.1 Descrizione delle tecniche impiegate

Le elaborazioni effettuate sono tecniche di interferometria satellitare SAR. Ad ogni acquisizione satellitare, in forma di immagine SAR, viene sostanzialmente misurata la distanza intercorrente tra il sensore e il bersaglio al suolo. Il principio alla base consiste nell'analisi delle differenze di fase tra due o più immagini SAR della stessa area, acquisite in tempi diversi, da cui si derivano informazioni sulle variazioni di distanza sensore-bersaglio e quindi sugli spostamenti superficiali del terreno, come ad esempio movimenti causati da frane, cedimenti e sollevamenti del suolo.

In Figura 24 viene illustrato in maniera schematica questo principio. Il satellite passa su un punto acquisendo un segnale la cui fase è dipendente dalla distanza sensore-bersaglio in quel dato momento. In caso di

movimento del terreno la distanza sensore bersaglio aumenta o diminuisce e di conseguenza la fase subisce una variazione misurabile e quantificabile in termini di spostamento millimetrico.

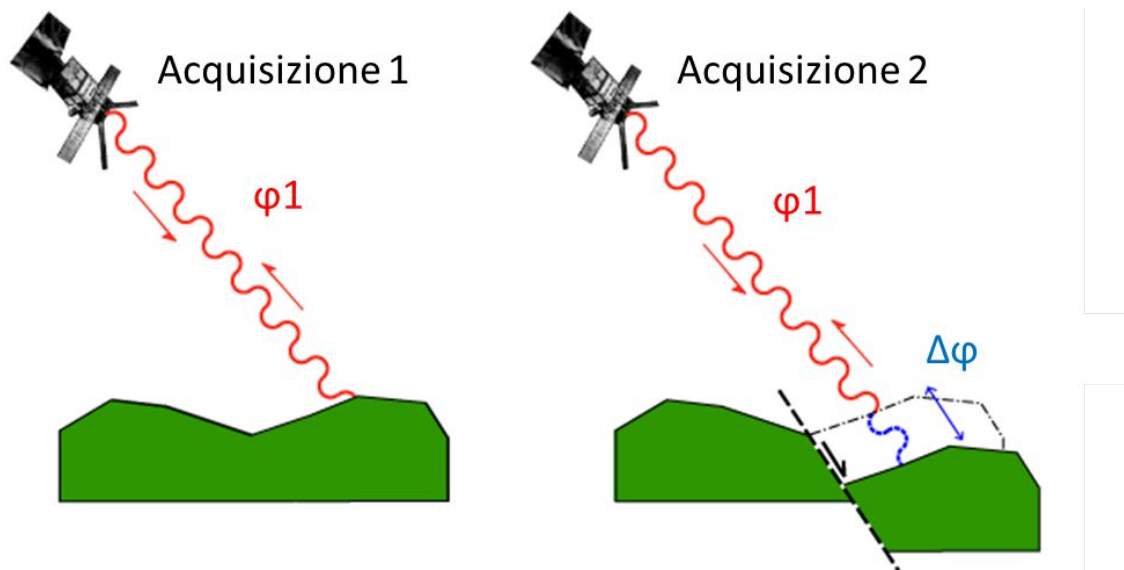


Figura 24 - Principio dell'interferometria: si misura la distanza tra il punto a terra e il sensore in successive acquisizioni. La variazione della distanza sensore-bersaglio produce una differenza di fase  $\Delta\phi$  quantificabile in spostamento.

#### 4.1.1 Interferometria radar satellitare differenziale - DInSAR

L'interferometria radar satellitare differenziale (DInSAR) si basa sul confronto di una coppia di immagini radar acquisite sulla stessa area in due momenti differenti, in modo da mettere in luce eventuali differenze riconducibili a fenomeni di deformazione avvenuti tra le due acquisizioni.

In particolare, questa tecnica si basa sulla differenza di fase tra due successive immagini SAR e permette di rilevare fenomeni di deformazione che producono una variazione di distanza della superficie del terreno osservata dal sensore SAR, misurando la proiezione dello spostamento lungo la linea di vista del radar (detta LOS, acronimo dell'inglese *Line Of Sight*). Per ottenere questi risultati si analizza la differenza di fase (interferogramma) tra le due immagini SAR relative alla scena osservata e acquisite in istanti di tempo diversi (*baseline* temporale), da posizioni orbitali differenti (*baseline* spaziale) lungo due orbite sufficientemente vicine.

La precisione della tecnica è frazione della lunghezza d'onda alla quale opera il sistema radar, ovvero dell'ordine del centimetro e, in alcuni casi, anche di qualche millimetro. La tecnica DInSAR è stata largamente usata dalla fine degli anni '80 per individuare deformazioni del suolo su vaste aree, ma risulta limitata da rumori atmosferici ed effetti di decorrelazione.

#### 4.1.2 Elaborazione SBAS

La tecnica SBAS (*Small BAseline Subset*) rappresenta una metodologia avanzata di interferometria satellitare multi-temporale messa a punto dal CNR-IREA (Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente).

Il suo principio consiste nell'utilizzare esclusivamente coppie di immagini SAR caratterizzate da piccole separazioni spaziali e temporali (*baselines*) tra le acquisizioni satellitari. Questa strategia permette di minimizzare i fenomeni di decorrelazione del segnale e di massimizzare la densità dei punti di misura analizzabili sul terreno.

Di seguito si fornisce una sintesi concisa dell'elaborazione SBAS, il cui diagramma a blocchi è illustrato in Figura 25. Una discussione dettagliata delle soluzioni algoritmiche adottate in ciascuna fase è disponibile in letteratura scientifica (Casu *et al.*, 2014; Manunta *et al.*, 2019; Lanari *et al.*, 2020; De Luca *et al.*, 2022).

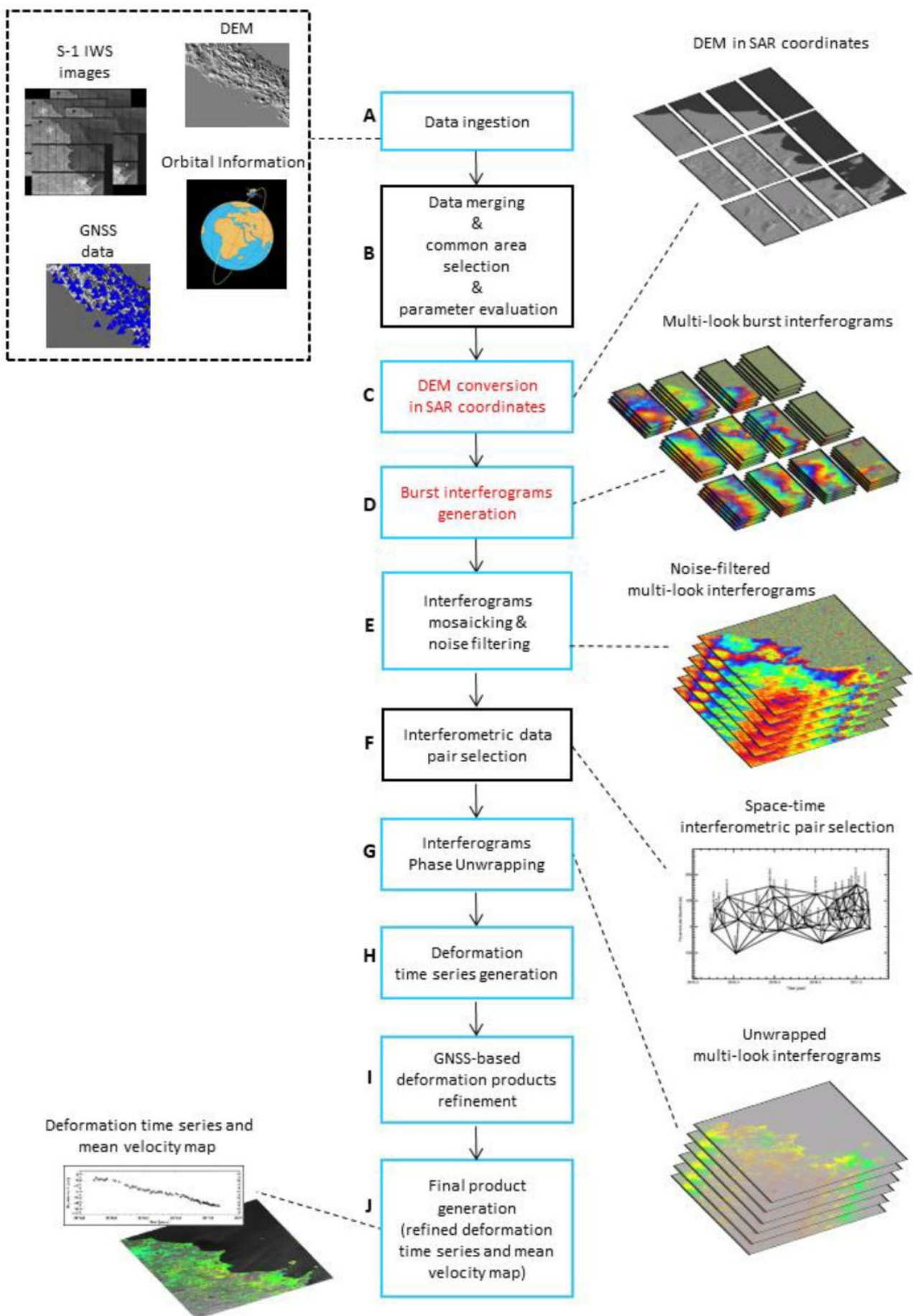


Figura 25 - Schema a blocchi della catena di elaborazione SBAS, tratto da Lanari *et al.* (2020).

Il segmento iniziale del diagramma in Figura 25, blocco A, incorpora le operazioni per la gestione e l'acquisizione dei dati di *input*, quali i *burst* delle immagini *Single-Look Complex* (SLC), le informazioni orbitali associate a ciascuna acquisizione SAR, il modello digitale di elevazione (DEM, acronimo dell'inglese *Digital Elevation Model*) e la serie temporale GNSS (*Global Navigation Satellite System*) disponibile dell'area di studio.

Successivamente, il blocco B esegue una serie di operazioni sequenziali, che includono la selezione della geometria SAR di riferimento per la registrazione dell'intero *dataset* SAR, l'identificazione dell'area specifica di interesse e dei *burst* da elaborare. Inoltre, viene generato un elenco preliminare di coppie interferometriche derivanti dalle acquisizioni SAR disponibili, che viene successivamente utilizzato nelle operazioni di generazione di interferogrammi e filtraggio del rumore (Pepe *et al.*, 2015).

Il blocco C esegue la conversione del DEM disponibile nelle coordinate radar (*azimuth* e *range*), seguita dalla stima, per ciascun *pixel* di ciascuna scena SAR, delle distanze azimutali e di distanza rispetto alla posizione orbitale di riferimento.

L'oggetto del blocco D concerne la co-registrazione di ciascun *burst* rispetto all'acquisizione di riferimento, la generazione dell'interferogramma e la successiva correzione per compensare gli effetti di eventuali errori residui di registrazione azimutale. Inoltre, viene condotta un'operazione *multi-look* spaziale per mitigare gli effetti del rumore di decorrelazione all'interno degli interferogrammi generati, riducendo così la quantità di dati che richiedono l'elaborazione.

In questa fase del processo, blocco E, gli interferogrammi *multi-look* corretti (e le corrispondenti mappe di coerenza spaziale) dei *burst* adiacenti vengono meticolosamente assemblati per generare gli interferogrammi differenziali dell'intera area studiata, qui di seguito denominata "*frame*". Successivamente, blocco F, viene eseguito il calcolo di una rete triangolare ottimizzata tra le *baseline* spaziale e temporale, in particolare, per quanto riguarda le *baseline* temporali e spaziali, viene selezionato un valore massimo di 150 giorni per le prime e di 200 metri per le seconde.

La sequenza degli interferogrammi caratterizzati da piccola *baseline* con filtro antirumore *multi-look* identificati nel fotogramma viene quindi decompressa (blocco G). In un'analisi successiva, nel blocco H, viene recuperata una stima della serie temporale della deformazione mediante l'implementazione del metodo della Decomposizione in Valori Singolari (SVD) (Berardino *et al.*, 2002). Il blocco in questione è stato meticolosamente concepito per ottimizzare il processo di compensazione dei potenziali residui di fase topografici. Inoltre, la stima e la rimozione degli artefatti atmosferici vengono facilitate dal riconoscimento della loro tipica correlazione spaziale e della loro scarsa correlazione temporale (Berardino *et al.*, 2002), nonché dallo sfruttamento della loro correlazione con la topografia.

Infine, il blocco I rappresenta un ulteriore sviluppo implementato all'interno della catena di elaborazione SBAS, che utilizza le misurazioni GNSS disponibili per identificare e filtrare possibili artefatti atmosferici residui che potrebbero influenzare le misurazioni DInSAR.

Il prodotto della tecnica di elaborazione SBAS consiste in una griglia di punti di misura (MPs - *Measurement Points*), per ognuno dei quali si dispone di posizione geografica opportunamente georiferita, velocità media annua (esprese in mm/anno) e serie temporale di spostamento.

#### 4.1.3 Elaborazione SqueeSAR

A partire dai primi anni 2000 sono state sviluppate numerose tecniche multi-interferometriche (dette PSI, *Persistent Scatterers Interferometry*), ovvero basate su un'analisi multi-temporale di una lunga serie di immagini radar relative a una stessa area, che hanno permesso di superare i limiti intrinseci dell'interferometria differenziale, poiché consentono di contenere i fenomeni di decorrelazione temporale e geometrica e stimare i contributi di fase legati ai cambiamenti subiti dall'atmosfera tra le diverse acquisizioni.

Queste tecniche si basano su analisi di tipo multi-interferogramma o multi-immagine, cioè utilizzano una lunga serie di immagini radar relative a una stessa area, all'interno delle quali vengono identificati alcuni bersagli che vengono utilizzati per la misura degli spostamenti.

Tali riflettori permanenti (PS, *Permanent Scatterers* in inglese) sono rappresentati da elementi già presenti al suolo che mantengono la stessa “firma elettromagnetica” in tutte le immagini al variare della geometria di acquisizione e delle condizioni climatiche, preservando quindi l’informazione di fase nel tempo (Ferretti *et al.*, 2001). Questi punti, essendo praticamente immuni da effetti di decorrelazione temporale e spaziale, consentono di seguire gli spostamenti intercorsi tra multiple immagini radar (Figura 26).

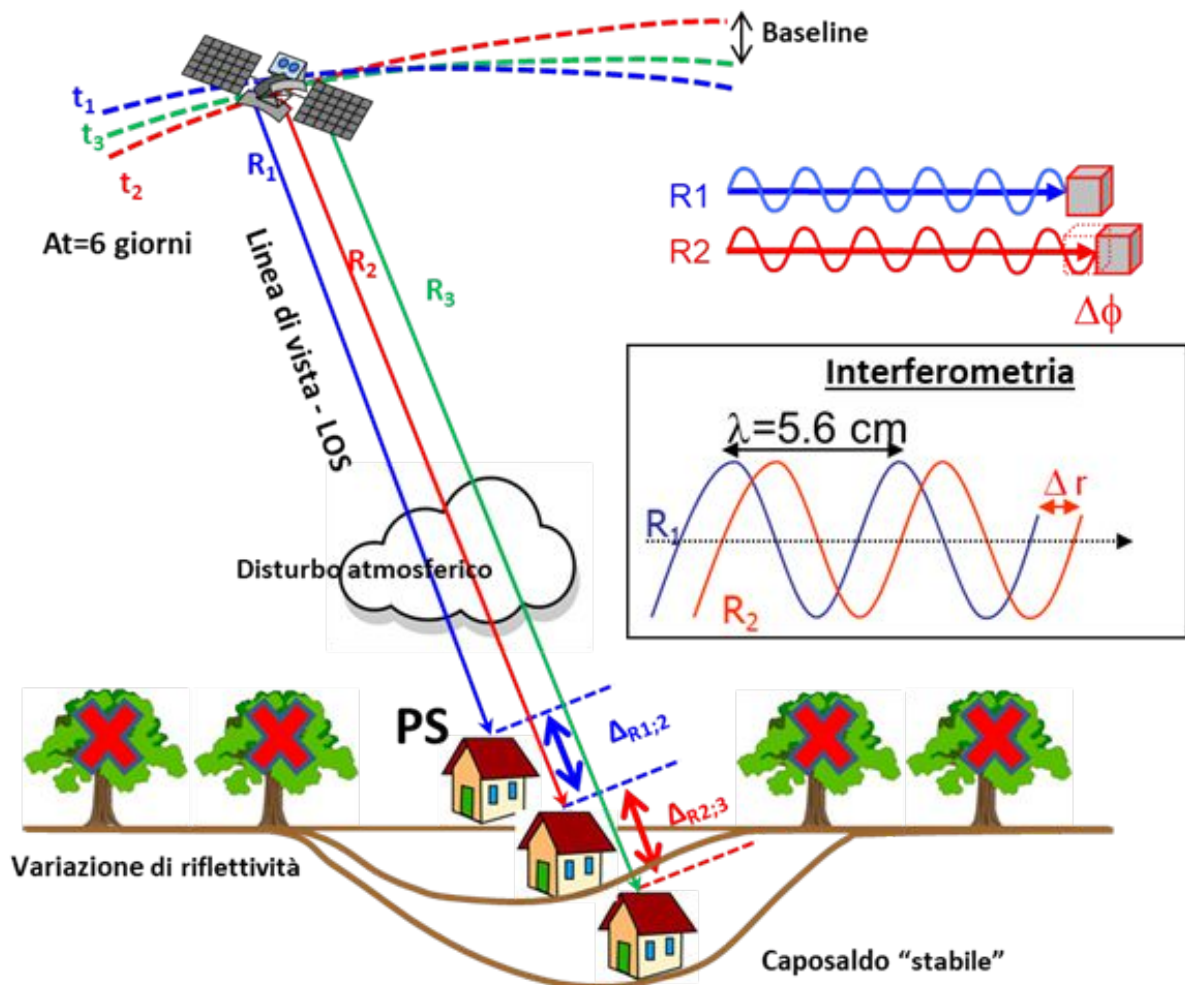


Figura 26 - Principio di funzionamento della tecnica interferometrica, basato sulla misura di variazione di distanze satellite-bersaglio a terra.

Grazie alla disponibilità di grandi archivi di dati acquisiti dalle agenzie spaziali, le tecniche multi-interferometriche permettono di ottenere risultati migliori di quelli ricavabili con analisi interferometriche convenzionali, sia per la qualità delle misure di deformazione ottenute (precisione millimetrica), sia per la capacità di seguire la loro evoluzione temporale. Infatti, mentre l’interferometria differenziale campiona il fenomeno di deformazione in esame tramite lo studio di due acquisizioni (la *master* M e la *slave* S), stimando soltanto la deformazione cumulata avvenuta tra le due acquisizioni, l’analisi multi-interferogramma è capace di fornire la descrizione completa dell’evoluzione temporale delle deformazioni.

I PS corrispondono ad elementi di origine antropica (edifici, monumenti, strade, ponti, linee ferroviarie, antenne, tralicci, elementi metallici, etc.), oppure naturali (affioramenti rocciosi, accumuli di detrito), per i quali le caratteristiche elettromagnetiche non variano sensibilmente di acquisizione in acquisizione, mentre ciò non accade ad esempio per la vegetazione che muta di continuo.

L’insieme dei PS costituisce pertanto una sorta di “rete geodetica naturale” di bersagli radar che vengono utilizzati come capisaldi di riferimento per la misura degli spostamenti millimetrici del suolo, con una densità spaziale di punti di misura variabile a seconda del sensore utilizzato per l’analisi, dell’uso del suolo e della morfologia del terreno. In generale, i PS raggiungono una densità molto elevata in corrispondenza dei centri urbani e delle aree antropizzate, mentre sono pressoché assenti nelle zone vegetate o innevate.

Lo sviluppo, nel 2011, dell'algoritmo SqueeSAR da parte di TRE-Altamira (Ferretti *et al.*, 2011) ha rappresentato un notevole passo in avanti nella capacità di analisi delle deformazioni del terreno in area extra-urbana. La tecnica SqueeSAR rappresenta una delle soluzioni più avanzate per il monitoraggio non solo delle aree urbane ma anche di quelle extra-urbane, dove la densità delle misure PS può talvolta risultare non soddisfacente. L'innovazione consiste nell'aver individuato una nuova famiglia di "bersagli" monitorabili da satellite, i cosiddetti *Distributed Scatterers* (DS), che si vanno ad aggiungere ai PS.

La tecnica SqueeSAR sfrutta quindi sia bersagli puntiformi, PS, sia bersagli cosiddetti "riflettori spazialmente distribuiti", DS. Per semplicità, tuttavia, tutti i punti di misura derivanti dalla tecnica di elaborazione SqueeSAR, che include i due tipi di bersagli, vengono genericamente chiamati PS (*Persistent Scatterers*).

A differenza di un bersaglio puntiforme, dove l'energia retro-diffusa verso il sensore risulta elevata e concentrata in un'area molto ridotta, l'intensità dell'eco radar per un *pixel* appartenente a un DS è solitamente meno forte, a causa dell'assenza di un bersaglio dominante. Su aree omogenee gli interferogrammi vengono filtrati spazialmente così da aumentare il rapporto segnale rumore: un singolo *pixel* è selezionato ed analizzato, poi i *pixel* circostanti sono analizzati per individuare eventuali vicini con firma interferometrica simile, *pixel* simili vengono classificati come "fratelli" (*brotherhood*) e viene creata una cosiddetta "famiglia" di *pixel*. A questo punto i segnali dei pixel fratelli vengono mediati per ottenere uno o più DS e il processo continua per ogni *pixel* dell'immagine radar (Figura 27).

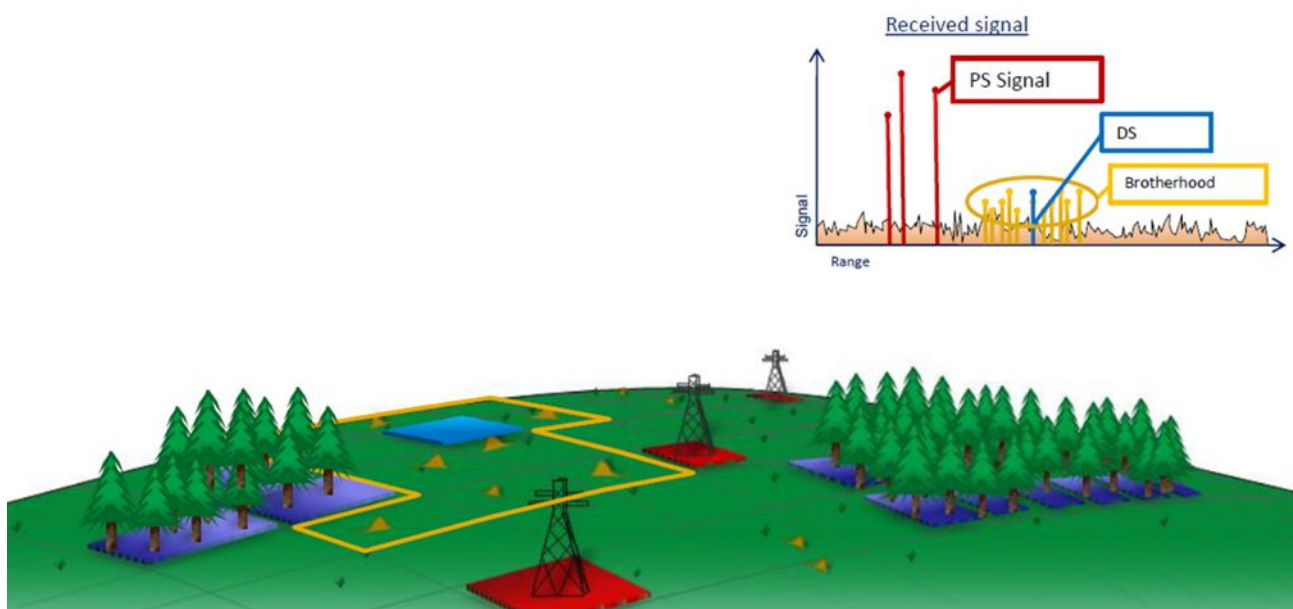


Figura 27 - Differenze tra DS (*Distributed Scatterer*) e PS (*Permanent Scatterer*).

L'utilizzo congiunto di tutti i *pixel* appartenenti al DS permette di ridurre il rumore presente nei dati, migliorando in modo significativo la qualità della stima, tanto che le serie temporali di spostamento di un DS appaiono meno rumorose. Le aree utilizzate come DS sono aree composte da punti che non hanno quindi la coerenza necessaria per diventare dei punti PS, ma sono comunque distinguibili dal rumore di fondo e i loro segnali radar riflessi, pur essendo meno forti, risultano statisticamente coerenti.

In corrispondenza di ciascun riflettore (PS o DS) individuato è possibile fare una stima del disturbo atmosferico e rimuoverlo, isolando quindi il contributo dovuto alle sole deformazioni del terreno. Più precisamente, una volta stimato il contributo atmosferico, vengono individuate tutte le componenti che costituiscono la fase interferometrica, eliminati i termini spuri ed isolato il termine che descrive la variazione di cammino ottico dell'onda elettromagnetica nelle varie acquisizioni, cioè il movimento del bersaglio nell'arco temporale tra il primo e l'ultimo dato disponibile.

#### 4.1.4 Elaborazione *Pixel Offset Tracking*

La tecnica del *Pixel Offset Tracking* (POT), nota anche come *Sub-pixel Correlation*, è una metodologia di analisi dei dati SAR fondamentale per il monitoraggio di frane caratterizzate da dinamiche rapide dove la classica interferometria fallisce a causa della perdita di coerenza del segnale.

A differenza delle tecniche interferometriche, che misurano le variazioni di fase dell'onda elettromagnetica, il *Pixel Offset Tracking* lavora sull'intensità (ampiezza) delle immagini SAR.

Il processo si basa sul confronto tra due immagini SAR acquisite in tempi diversi (coppia *master* e *slave*). Invece di cercare differenze di fase, l'algoritmo cerca di identificare lo spostamento spaziale (*offset*) degli stessi oggetti o "firme" radar tra le due acquisizioni.

L'immagine viene suddivisa in piccole finestre di ricerca (*patch*). Tramite algoritmi di correlazione statistica, viene calcolato lo spostamento che massimizza la somiglianza tra le finestre nelle due date. L'analisi POT fornisce lo spostamento bidimensionale sul piano dell'immagine in *range* (lungo la linea di vista del satellite) e in *azimuth* (lungo la direzione del volo del satellite).

Il prodotto che si ottiene dalle elaborazioni *Pixel Offset Tracking* è un campo bidimensionale di deformazione che mostra lo sfasamento lungo le direzioni di *range* e *azimuth*, che corrispondono alle direzioni planari est-ovest e nord-sud. Avendo a disposizione due geometrie di acquisizione, ascendente e discendente, è possibile ricavare anche la componente verticale dello spostamento.

Pur non raggiungendo la precisione millimetrica delle tecniche InSAR, le tecniche POT permettono di stimare spostamenti con una precisione che va da 1/10 a 1/30 della dimensione del *pixel* (nell'ordine dei centimetri o decimetri, a seconda del sensore).

#### 4.1.5 Dynamic InSAR

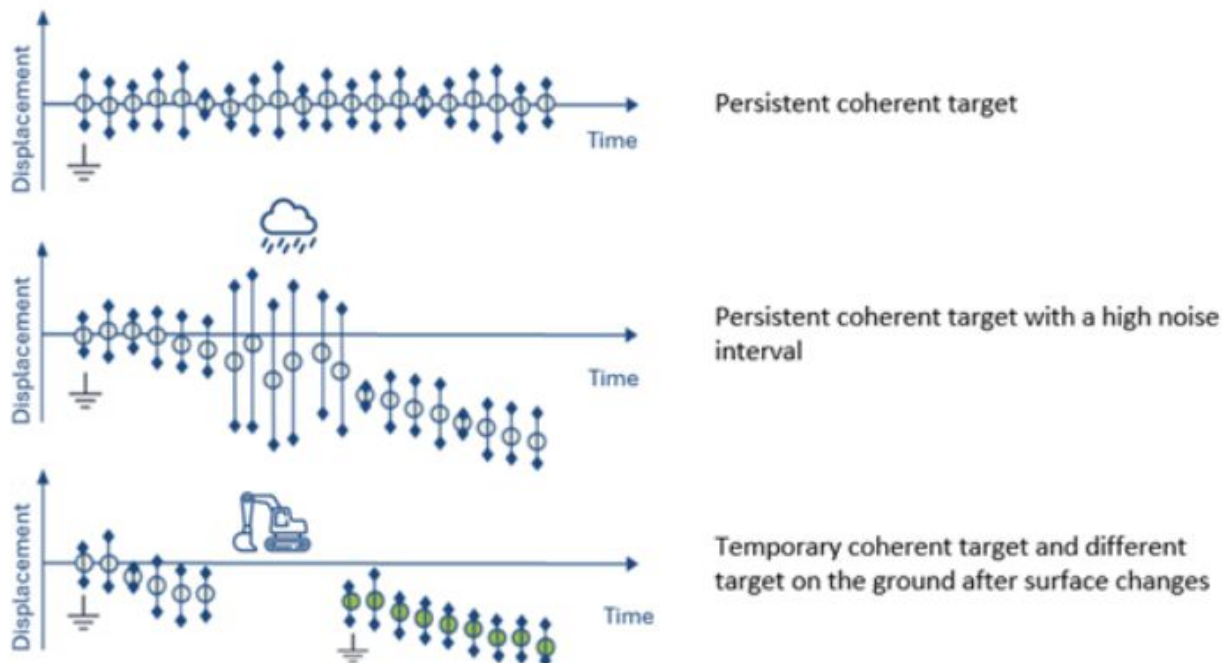
Dynamic InSAR è un recente prodotto di elaborazione InSAR concepito da TRE-Altamira, inizialmente progettato per il monitoraggio delle aree minerarie attive che subiscono frequenti cambiamenti superficiali. L'approccio Dynamic InSAR combina l'elaborazione SqueeSAR con tecniche di analisi DInSAR, *Change Detection* e RMT (*Rapid Motion Tracking*) basate sull'ampiezza per studiare deformazioni rapide del terreno (> 0,5 cm - 1,0 cm) e offrire misurazioni di spostamento ad alta risoluzione con dati temporali anche in aree con perdita temporanea di coerenza del segnale radar.

Questo approccio innovativo utilizza la fase di coppie di immagini satellitari acquisite in date diverse per generare mappe di spostamento di bersagli radar sia coerenti nel tempo sia solo "temporaneamente coerenti", ovvero caratterizzati da una coerenza del segnale radar discontinua nel tempo (Figura 28).

Unendo la precisione dell'elaborazione SqueeSAR e la copertura spaziale delle tecniche RMT, i dati Dynamic InSAR forniscono misurazioni dello spostamento sia in aree con coerenza persistente, sia in aree con cambiamenti morfologici a cinematica rapida e mancanza temporanea di coerenza in cui le tecniche PSI tradizionali incontrano difficoltà.

Dynamic InSAR permette di restituire la distribuzione spaziale delle misure di spostamento e i grafici temporali con informazioni sia sullo spostamento storico del terreno sia sulle barre di errore associate alla coerenza del segnale. L'approccio Dynamic InSAR utilizza algoritmi di *machine learning* per migliorare la copertura dei dati e potenziare il rilevamento dei cambiamenti per identificare bersagli radar e stimare le barre di errore.

I prodotti dell'elaborazione Dynamic InSAR consistono in mappe di spostamento differenziale delle ultime acquisizioni SAR satellitari e serie temporali di spostamento in cui sono distinti bersagli radar permanentemente coerenti e bersagli radar temporaneamente coerenti con perdita di informazione in specifici intervalli temporali. È inoltre indicata la precisione di ciascuna misurazione nella serie temporale tramite barre di errore che rappresentano l'incertezza associata ad ogni stima di singola acquisizione satellitare.



**Figura 28 - Esempio di bersagli radar e serie temporali di spostamento con Dynamic InSAR. Le serie temporali vengono interrotte, riavviate o visualizzate solo per una finestra temporale all'interno dell'intervallo di osservazione satellitare, a seconda dei cambiamenti del terreno.**

## 4.2 Satelliti utilizzati

In questa sezione vengono dettagliate le caratteristiche tecniche delle costellazioni satellitari impiegate. La scelta di integrare sensori operanti in diverse porzioni dello spettro delle microonde risponde alla necessità di bilanciare capacità di penetrazione del segnale, risoluzione spaziale e tempi di rivisitazione.

Nello specifico, l'analisi si è avvalsa di un *dataset* di immagini SAR acquisite in diverse bande delle microonde:

- Banda C (Sentinel-1);
- Banda X (COSMO-SkyMed, TerraSAR-X e Capella Space);
- Banda L (Saocom).

Di seguito sono riportate le specifiche tecniche per ciascuna piattaforma.

### 4.2.1 Sentinel-1

La missione Sentinel-1, progettata nell'ambito del progetto europeo *Copernicus* e finanziata dall'ESA (Agenzia Spaziale Europea), è composta da una costellazione di satelliti gemelli (inizialmente Sentinel-1A e Sentinel-1B) orbitanti su traiettorie eliosincrone ad una quota di 698 km.

Il primo satellite, Sentinel-1A, lanciato il 3 aprile 2014, è ancora operativo. Il secondo, Sentinel-1B, lanciato il 25 aprile 2016, è stato ritirato in anticipo nel 2021 in seguito ad un malfunzionamento a bordo. Nel dicembre 2024 è stato quindi lanciato un terzo satellite gemello, Sentinel-1C.

Tutti i satelliti sono equipaggiati con sensori SAR in banda C (frequenza 5.5 GHz e lunghezza d'onda di circa 5.6 cm) ed hanno tempi di rivisitazione di 12 giorni, ridotti a 6 giorni grazie alla contemporanea presenza in orbita di due satelliti posizionati a 180° di distanza angolare uno dall'altro sullo stesso piano orbitale.

La costellazione Sentinel-1, progettata per fornire informazioni sistematiche su vaste aree del pianeta per i prossimi decenni, ha aperto nuove opportunità per il monitoraggio continuo dei fenomeni di deformazione terrestre a scala regionale, grazie anche alla politica di accesso aperto e gratuito ai dati.

La costellazione di satelliti Sentinel-1 è ideata per fornire informazioni sempre aggiornate, in continuità con i dati provenienti dalle precedenti missioni ERS e ENVISAT, ma con un notevole miglioramento delle informazioni, soprattutto in termini di affidabilità e tempestività dei dati stessi.

La costellazione Sentinel-1 può acquisire in diverse modalità, con differenti risoluzioni e coperture spaziali. I dati che sono stati analizzati in questa analisi sono stati acquisiti in modalità STRIPMAP, con larghezza (*swath*) dell'immagine di 80 km e risoluzione nominale a terra di 20 x 5 m nelle direzioni di *azimuth* e *range*.

#### 4.2.2 COSMO-SkyMed

La costellazione COSMO-SkyMed (*CO*nstellat*IO*n of small *S*atellites for *M*editerranean basin *O*bservation) finanziata dall'ASI (Agenzia Spaziale Italiana) e dal Ministero della Difesa è un sistema duale, ovvero concepito come un programma per esigenze civili (ad es. monitoraggio ambientale, Protezione Civile) e militari, e include un sistema di satelliti equipaggiati con sensori radar in grado di operare in qualsiasi condizione atmosferica e di visibilità e con un'altissima frequenza di rivisitazione.

La costellazione COSMO-SkyMed iniziale (CSK) è composta da quattro satelliti SAR uguali tra loro, che orbitano ad una quota di 620 km e acquisiscono dati ad alta risoluzione in banda X, ovvero a una lunghezza d'onda di 3,1 cm, con una risoluzione al suolo di 3 x 3 m. Il tempo di rivisitazione nominale è di 16 giorni. Il primo satellite è stato lanciato nel giugno 2007, il secondo nel dicembre 2007, il terzo nell'ottobre 2008 e il quarto nel novembre 2010; tutti e quattro i satelliti sono tecnologicamente e costruttivamente identici, permettendo così l'interoperabilità delle immagini.

Il programma COSMO-SkyMed di Seconda Generazione (CSG) prevede altri quattro satelliti che affiancano i quattro di prima generazione. Attualmente, da gennaio 2021 è operativo il satellite COSMO-SkyMed CSG-FM3, pertanto la costellazione COSMO-SkyMed può vantare ad oggi cinque satelliti in orbita.

I satelliti COSMO-SkyMed possono acquisire in diverse modalità. I dati che sono stati utilizzati in questa analisi sono stati acquisiti in modalità STRIPMAP, con risoluzione nominale di 3 m. Sull'area di Niscemi, su richiesta del Dipartimento della Protezione Civile, l'Agenzia Spaziale Italiana ha reso disponibili circa 400 immagini di archivio COSMO-SkyMed, con copertura di un'area di 40 x 40 km e con una risoluzione spaziale di 3 x 3 metri, acquisite dal 2010 grazie al piano di acquisizioni *MapItaly* dedicato al monitoraggio del territorio nazionale. I dati sono stati trasferiti al Centro di Competenza individuato dal Dipartimento di Protezione Civile per l'analisi, ovvero il CPC-UNIFI.

#### 4.2.3 SAOCOM

La missione SAOCOM (*S*armiento de *A*rgentina para la *O*bservación con *M*icroondas), sviluppata dall'Agenzia spaziale argentina CONAE e composta dai satelliti gemelli SAOCOM 1A e 1B, è progettata per lavorare in sinergia con la costellazione italiana COSMO-SkyMed all'interno del sistema SIASGE (Sistema Italo-Argentino di Satelliti per la Gestione delle Emergenze).

La costellazione SAOCOM è costituita da satelliti che operano in banda L (lunghezza d'onda del segnale pari a 23,5 cm) e che quindi permettono una maggiore capacità di penetrazione attraverso la copertura vegetale e una ridotta sensibilità alla decorrelazione temporale. Tali caratteristiche permettono di mantenere un'elevata coerenza di fase anche in aree rurali o boschive e su intervalli temporali estesi, dove i sensori a lunghezza d'onda minore risultano spesso inefficaci.

La risoluzione spaziale nominale (in *azimuth* e *range*) in modalità *Stripmap* è di 10 x 5 m. Il tempo di rivisitazione sulla stessa area è di 16 giorni con singolo satellite, riducibile a 8 giorni utilizzando entrambi i satelliti.

#### 4.2.4 Capella Space

Capella *Space*, gestita da un'azienda statunitense operante nel settore aerospaziale, è una recente costellazione di satelliti SAR ad alta risoluzione. Il primo satellite di Capella è stato lanciato nel dicembre 2018.

Attualmente la costellazione Capella è composta da 36 satelliti SAR e fornisce immagini satellitari con cadenza oraria per l'intera superficie terrestre e intervalli di raccolta InSAR di 4 ore.

Ogni satellite della costellazione è equipaggiato con un radar in banda X a polarizzazione singola, in grado di acquisire immagini in modalità *stripmap*, *sliding spotlight* e *long-dwell spotlight* (Castelletti *et al.*, 2020).

I microsattelliti Capella operano in due configurazioni di acquisizione, ascendente e discendente su un'orbita inclinata a 45° rispetto alla direzione polare nord-sud, con puntamento *side-looking* (lateralmente rispetto alla direzione del volo) verso destra e capacità di rollio, ovvero di guardare anche verso sinistra. L'angolo di vista della LOS è variabile tra i 20° e i 40° e la risoluzione spaziale a terra è di 60-70 cm.

#### 4.2.5 TerraSAR-X

La missione TerraSAR-X (*Terra Synthetic Aperture Radar-X*), sviluppata dal DLR (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*) in collaborazione con Airbus Defence and Space, rappresenta uno dei sistemi SAR in banda X a più elevata risoluzione attualmente operativi per applicazioni scientifiche e commerciali. Il satellite è stato lanciato il 15 giugno 2007 ed è inserito su un'orbita eliosincrona quasi polare ad un'altitudine media di circa 514 km, con inclinazione orbitale di 97,44° e ciclo di ripetizione di 11 giorni. La configurazione orbitale è stata progettata per garantire elevata stabilità geometrica e precisione nella determinazione dell'orbita, requisito fondamentale per applicazioni interferometriche avanzate.

Il sensore SAR opera in banda X, con frequenza centrale pari a 9,65 GHz (lunghezza d'onda di circa 3,1 cm), ed è equipaggiato con un'antenna *phased array* attiva lunga 4,8 m, capace di *steering* elettronico del fascio sia in elevazione sia in azimuth. Tale configurazione consente un'elevata flessibilità di acquisizione, permettendo la selezione di differenti angoli di incidenza (compresi indicativamente tra 20° e 55°) e diverse modalità operative, in funzione del compromesso richiesto tra risoluzione spaziale e ampiezza della scena.

TerraSAR-X può acquisire dati nelle modalità Spotlight, StripMap e ScanSAR. In modalità Spotlight si raggiungono risoluzioni al suolo fino a circa 1 m (e inferiori nella modalità *High Resolution Spotlight*), su scene di estensione limitata, rendendo il sistema particolarmente idoneo ad applicazioni di dettaglio in ambito urbano e infrastrutturale. La modalità StripMap consente una copertura con *swath* dell'ordine di 30 km e risoluzione tipica di 3 m, rappresentando un buon compromesso per analisi territoriali a scala intermedia. In modalità ScanSAR, infine, è possibile coprire strisce fino a circa 100 km di ampiezza, con risoluzione più grossolana (fino a 16-18 m), per applicazioni di monitoraggio su vasta area. Un elemento distintivo della missione è l'elevata coerenza radiometrica e geometrica dei dati, resa possibile dall'accurata calibrazione interna del sistema e dalla stabilità dell'orbita. Dal 2010 TerraSAR-X opera in stretta formazione con il satellite gemello TanDEM-X, lanciato il 21 giugno 2010 e posizionato sulla stessa orbita con distanza controllata variabile dell'ordine di poche centinaia di metri.

In ambito applicativo, il sistema trova impiego nel monitoraggio delle deformazioni del suolo, nella mappatura dell'uso e della copertura del suolo, nel controllo di infrastrutture lineari (oleodotti, ferrovie), nella gestione delle emergenze e nel supporto alla pianificazione territoriale. L'elevata risoluzione spaziale e la possibilità di programmare acquisizioni mirate rendono TerraSAR-X uno strumento particolarmente adatto ad analisi di dettaglio e studi sito specifici, integrandosi efficacemente con missioni a più ampia copertura come Sentinel-1. I dati che sono stati utilizzati in questa analisi sono stati acquisiti in modalità Staring Spotlight, con risoluzione in *azimuth* da 0,6 m a 0,25 m. Tale modalità, mantenendo il puntamento dell'antenna sul medesimo bersaglio a terra per un intervallo temporale significativamente più lungo rispetto alle altre modalità, comporta un miglioramento del rapporto segnale-rumore (SNR) e quindi una maggiore risoluzione.

Congiuntamente al satellite TerraSAR-X operano, lungo il medesimo piano orbitale e con configurazione coordinata, anche i satelliti TanDEM-X e PAZ, costituendo di fatto una costellazione radar in banda X ad elevata coerenza geometrica. TanDEM-X, lanciato nel 2010 e mantenuto in formazione stretta con TerraSAR-X, consente acquisizioni bistatiche finalizzate in particolare alla generazione di modelli digitali di elevazione ad alta accuratezza. Il satellite spagnolo PAZ, operativo dal 2018 sulla stessa orbita eliosincrona, amplia ulteriormente le capacità di acquisizione, incrementando la frequenza di rivisitazione e la flessibilità operativa del sistema complessivo.

### 4.3 Analisi pre-evento

L'obiettivo principale di questa analisi è valutare l'eventuale presenza di segnali deformativi antecedenti agli eventi di gennaio 2026. A tal fine sono state utilizzate ed elaborate immagini SAR di archivio disponibili fino a date precedenti ai dissesti, interpretate in termini di velocità media annua e di serie temporali di spostamento dei punti di misura, per fornire un quadro dei movimenti del terreno pregressi nell'area di interesse.

In particolare, sono stati acquisiti *dataset* in geometria ascendente e discendente dei sensori Sentinel-1 e COSMO-SkyMed: le specifiche tecniche dei *dataset* analizzati sono riportate in Tabella 2.

Satellite	Banda	Geometria di acquisizione	Intervallo temporale	Tipo di <i>Processing</i>
Sentinel-1	C	Discendente	03/02/2021 - 14/01/2026	SBAS
Sentinel-1	C	Ascendente	02/02/2021 - 13/01/2026	SBAS
COSMO-SkyMed	X	Discendente	12/11/2022 - 07/01/2026	SBAS
COSMO-SkyMed	X	Ascendente	13/01/2022 - 16/01/2026	SBAS
COSMO-SkyMed	X	Discendente	01/09/2015 - 23/01/2026	SqueeSAR
COSMO-SkyMed	X	Ascendente	17/08/2011 - 16/01/2026	SqueeSAR

Tabella 2 - Specifiche tecniche dei *dataset* utilizzati per l'analisi pre-eventi di gennaio 2026.

#### 4.3.1 Sentinel-1 - elaborazione con tecnica SBAS

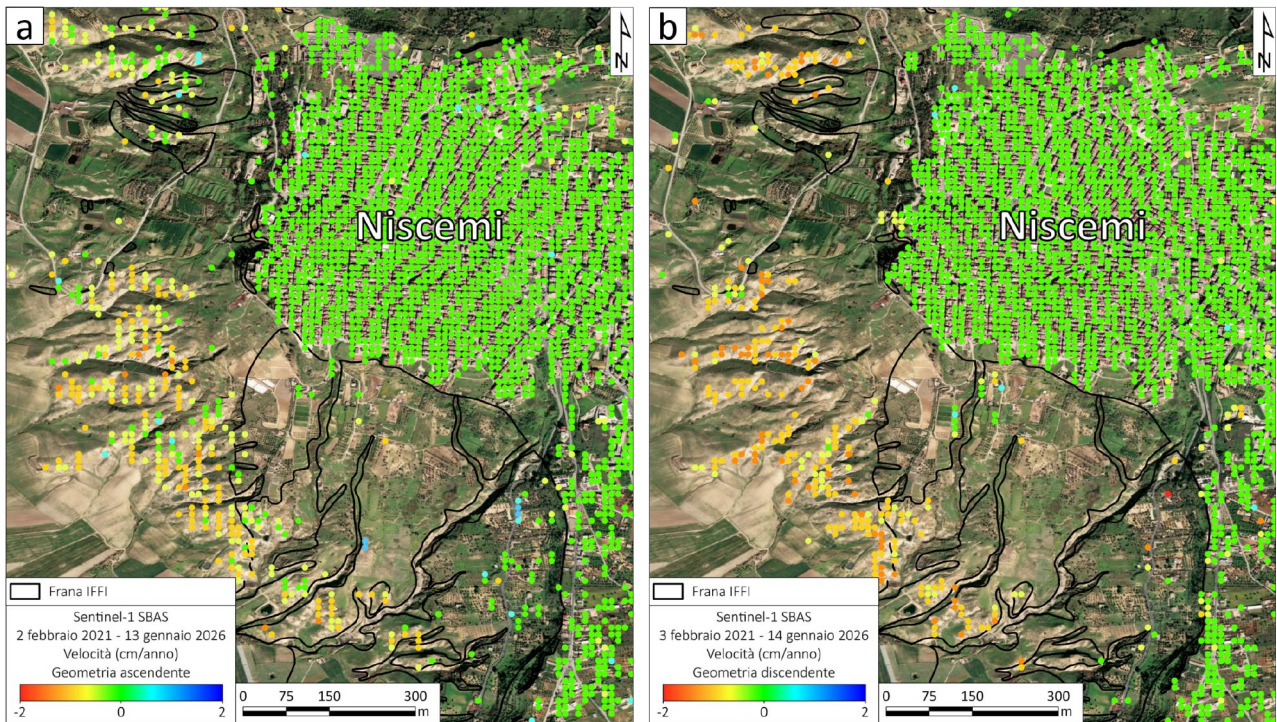
In Figura 29 sono riportate le mappe di distribuzione delle velocità dei dati radar satellitari interferometrici in geometria ascendente (a) e discendente (b) ottenuti da algoritmo SBAS, nell'intervallo temporale rispettivamente tra il 2 febbraio 2021 e il 12 gennaio 2026 e il 3 febbraio 2021 e il 13 gennaio 2026.

I punti di misura sono visualizzati in funzione della velocità media annua registrata nel periodo coperto dalle acquisizioni (2021-2026) mediante l'uso della scala di colori graduati, centrata sul valore zero di velocità. La finestra di stabilità è stata posta compresa tra -0,2 e +0,2 cm/anno tenendo conto della precisione della tecnica interferometrica e della deviazione standard dell'intero *dataset*.

Le velocità sono espresse in cm/anno e sono misurate lungo la LOS del satellite. I dati Sentinel-1 processati con l'algoritmo SBAS sono ricampionati con cella quadrata di 30 m; pertanto, un Punto di Misura (MP, *Measurement Point*) è espressione di una misura su un'area di 900 m<sup>2</sup>.

Dalla mappa si evince un quadro di sostanziale stabilità dell'area del centro abitato di Niscemi; nelle aree esterne al perimetro urbano, nei settori a nord-ovest e a sud si osservano alcuni MPs, soprattutto nelle aree calanchive, con velocità con segno positivo, con valori fino a 1,2 cm/anno. In prossimità del settore sud-orientale di Niscemi vi sono alcuni MPs con valori fino a 1,2 cm/anno.

Tutti questi punti di misura risultano in avvicinamento rispetto alla linea di vista del satellite, in accordo con la geometria ed esposizione del versante, verso ovest.



**Figura 29 -** Mappa delle velocità di deformazione dei dati Sentinel-1 nelle geometrie ascendente (a) e discendente (b) elaborati con algoritmo SBAS.

Nella zona nord del centro abitato di Niscemi, l'analisi dello scenario deformativo progressivo indica una sostanziale stabilità, sia in geometria ascendente (Figura 30) che discendente (Figura 32). In generale, le serie temporali degli MPs sia in geometria ascendente (Figura 31, punti B, C e D) che discendente (Figura 33, punti C e D), in corrispondenza degli edifici situati a ridosso della scarpata lungo il bordo occidentale e meridionale, evidenziano spostamenti trascurabili che oscillano intorno allo zero nell'intero intervallo temporale esaminato.

Per quanto riguarda il punto B in geometria discendente (Figura 33) si osserva uno spostamento negativo di circa -1 cm durante l'intervallo temporale considerato (velocità media annua di -0,2 cm/anno). Nonostante lo spostamento registrato, i valori si mantengono all'interno della finestra di stabilità.

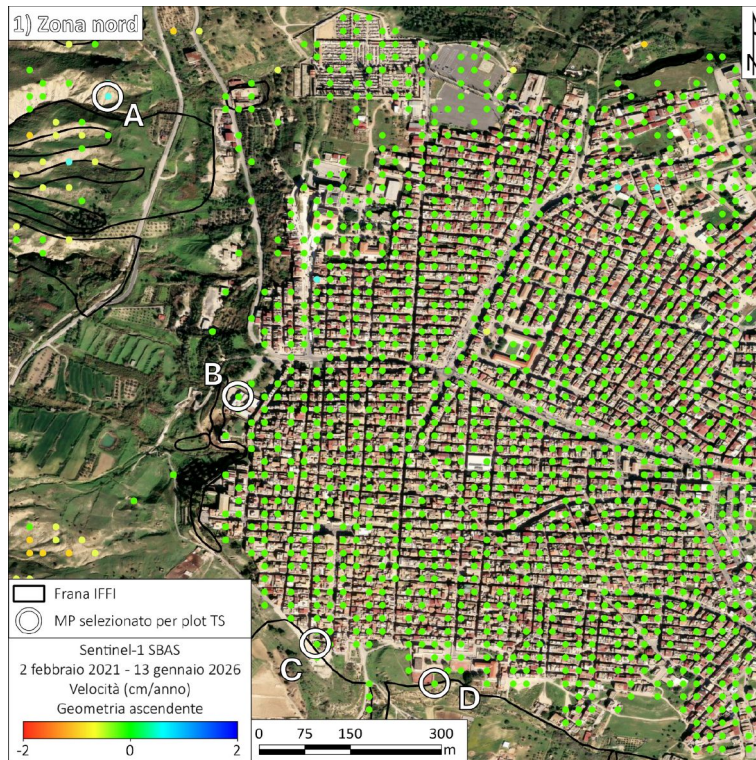


Figura 30 - Mappa delle velocità dei dati Sentinel-1 elaborati con tecnica SBAS in orbita ascendente sulla zona nord.

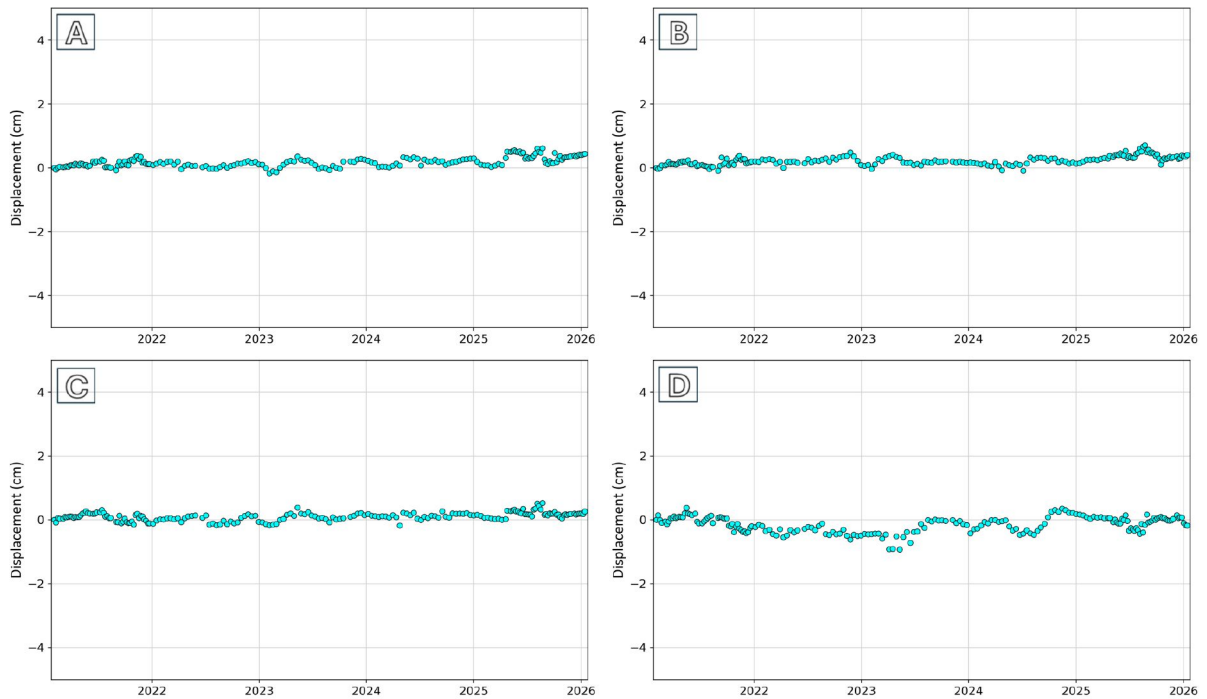


Figura 31 - Serie temporali dei punti di misura MPs localizzati in Figura 30.

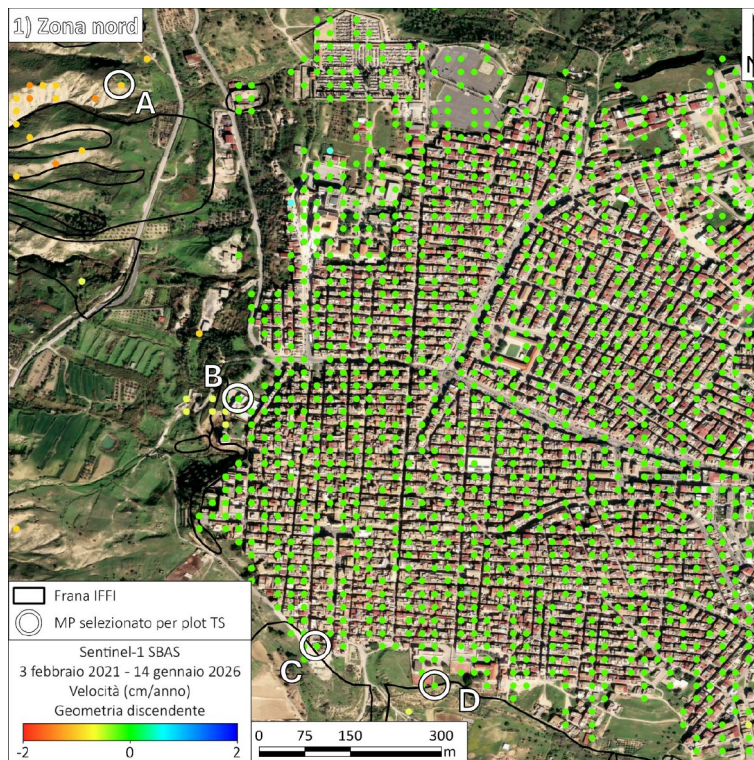


Figura 32 - Mappa delle velocità dei dati Sentinel-1 elaborati con tecnica SBAS in orbita discendente sulla zona nord.

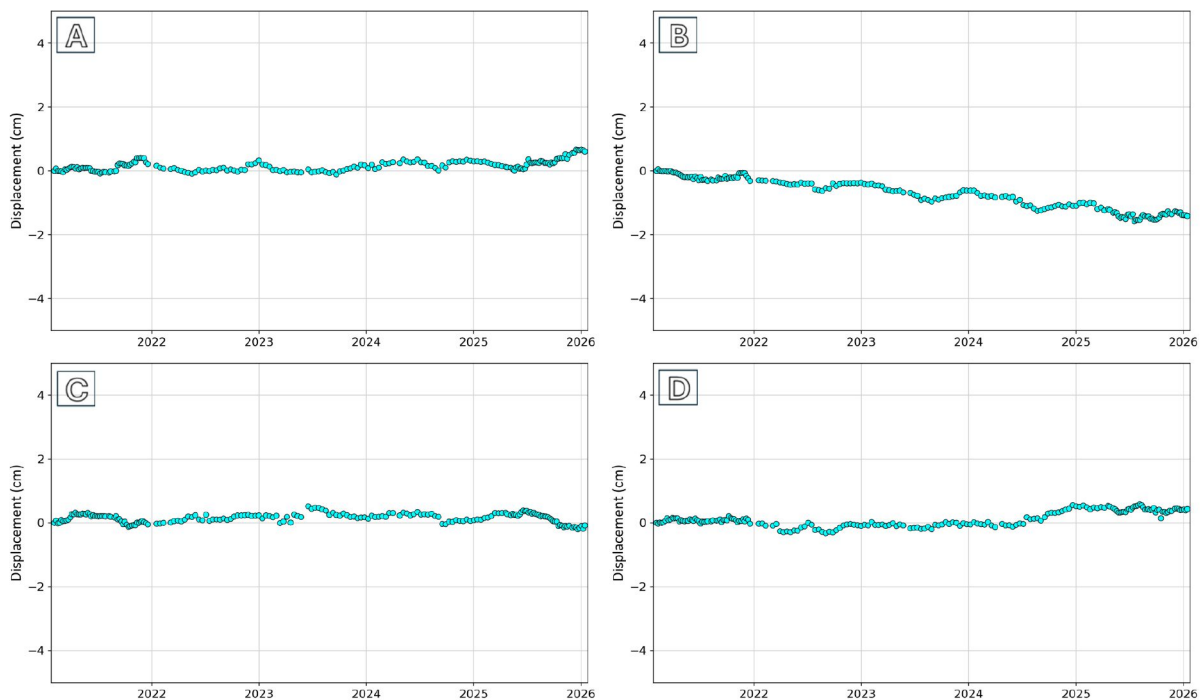


Figura 33 - Serie temporali dei punti di misura MPs localizzati in Figura 32.

Nella zona sud, l'analisi dello scenario deformativo pregresso indica valori di spostamento più elevati in corrispondenza del settore a valle del centro abitato, in particolare lungo la strada provinciale SP10, sia in geometria ascendente (Figura 34) che discendente (Figura 36).

In generale, le serie temporali degli MPs sia in geometria ascendente (Figura 35, punti E ed F) che discendente (Figura 37, punti E ed F), in corrispondenza degli edifici situati a ridosso della scarpata lungo il bordo meridionale, evidenziano spostamenti trascurabili che oscillano intorno allo zero nell'intero intervallo temporale esaminato.

Nell'area sud-est del centro abitato di Niscemi, in corrispondenza dei punti G ed H, si evidenziano spostamenti in atto sin dall'inizio della serie temporale, caratterizzati da valori cumulati che raggiungono i 3,7 cm (Figura 35, punto H) e i -2 cm (Figura 37, punti G ed H). Le altre serie temporali esaminate non evidenziano deviazioni significative né indizi di accelerazione precedenti all'evento del 26 gennaio.

Infine, si evidenzia che in geometria ascendente i dati Sentinel-1 mostrano spostamenti di entità minore rispetto alla geometria discendente in quanto presumibilmente sottostimano la deformazione, a causa dell'esposizione verso ovest del pendio opposto alla direzione della LOS ascendente.

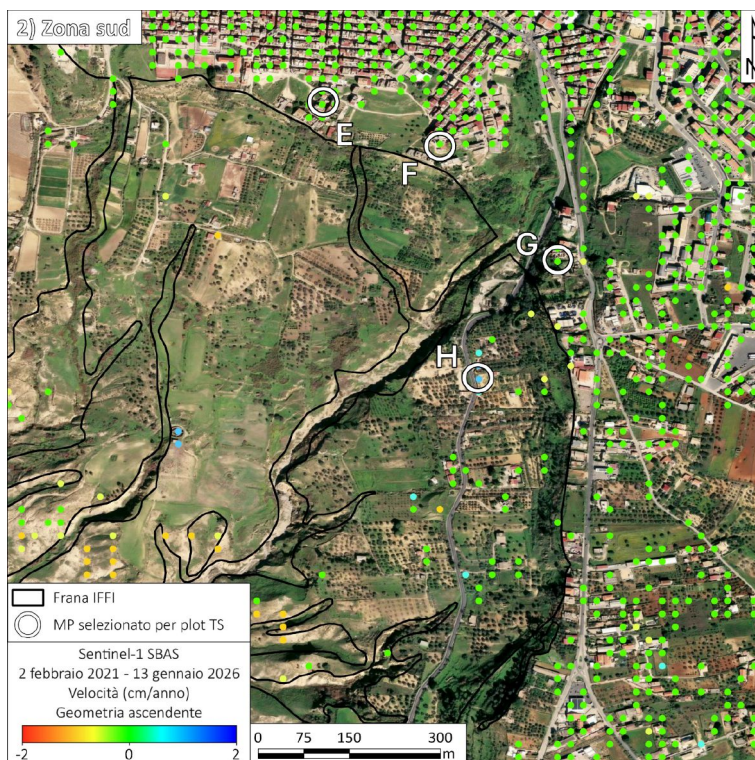


Figura 34 - Mappa delle velocità dei dati Sentinel-1 elaborati con tecnica SBAS in orbita ascendente sulla zona sud.

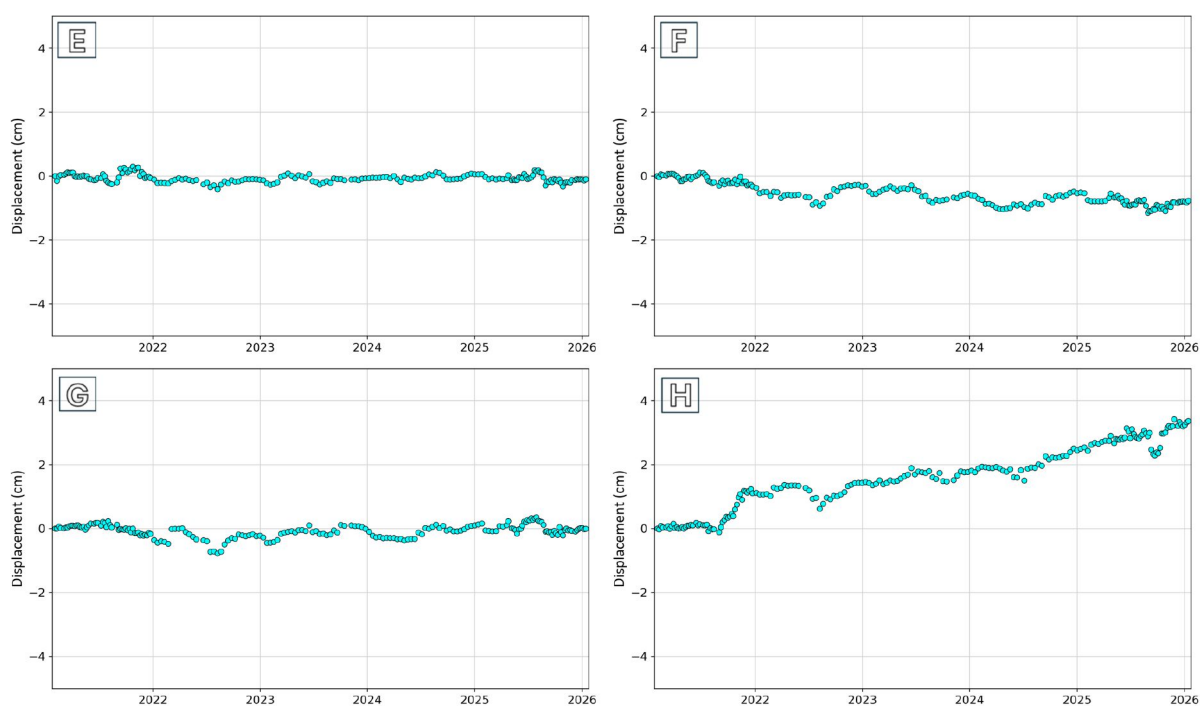


Figura 35 - Serie temporali dei punti di misura MPs localizzati in Figura 34.

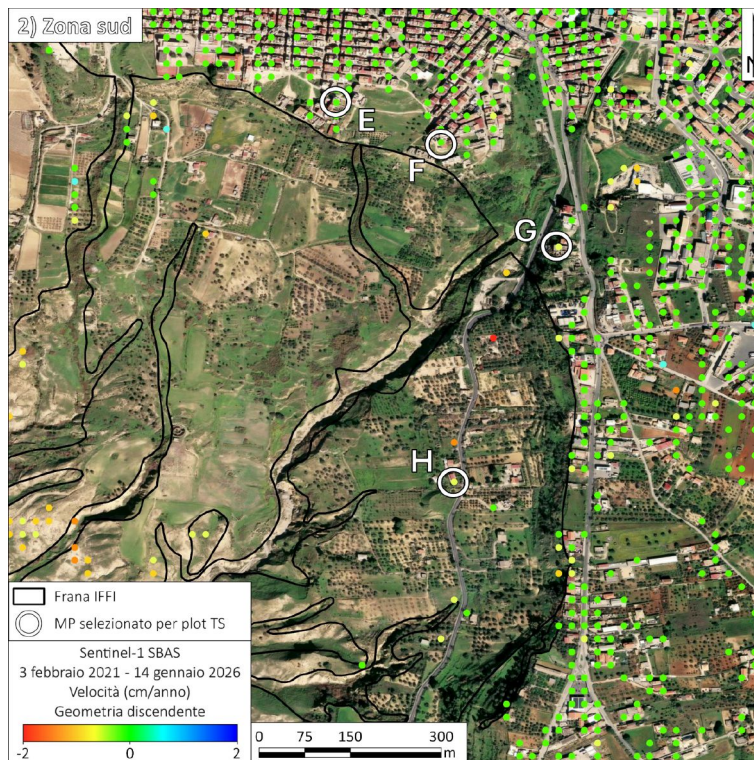


Figura 36 - Mappa delle velocità dei dati Sentinel-1 elaborati con tecnica SBAS in orbita discendente sulla zona sud.

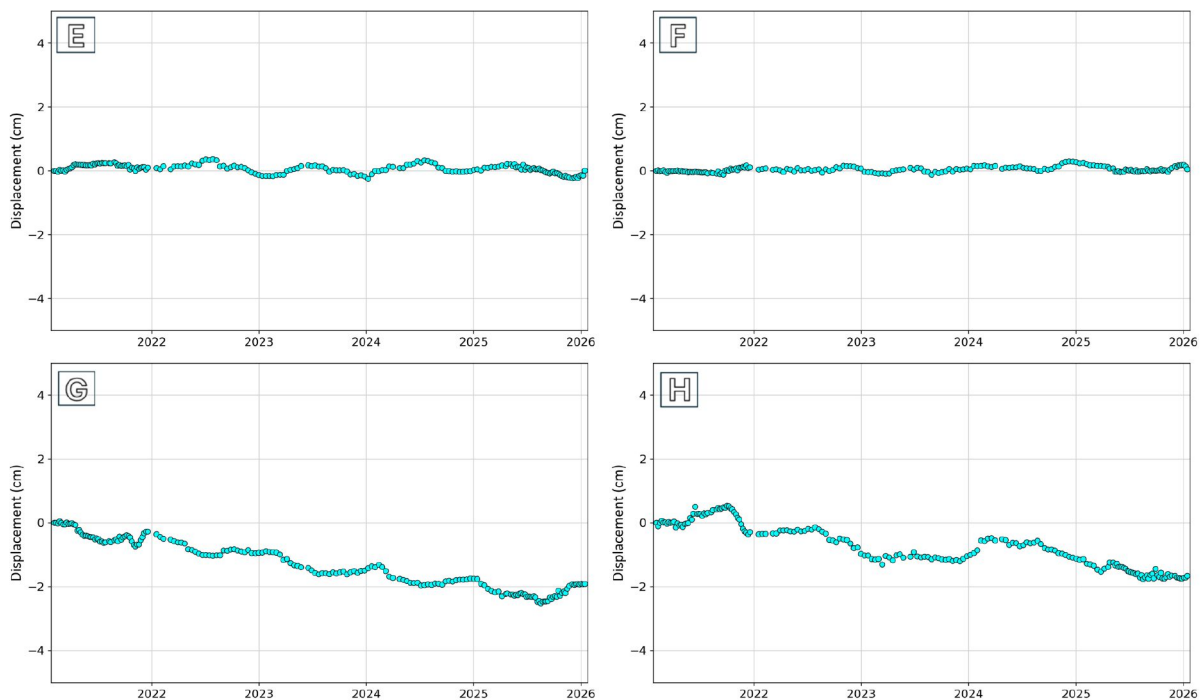


Figura 37 - Serie temporali dei punti di misura MPs localizzati in Figura 36.

#### 4.3.2 COSMO-SkyMed - elaborazione con tecnica SBAS

La Figura 38 illustra la mappa di velocità dei dati interferometrici acquisiti dalla costellazione COSMO-SkyMed Seconda Generazione e processati tramite algoritmo SBAS, nell'intervallo temporale compreso tra il 13 gennaio 2022 e il 16 gennaio 2026 per la geometria ascendente, e tra il 12 novembre 2022 e il 7 gennaio 2026 per la geometria discendente.

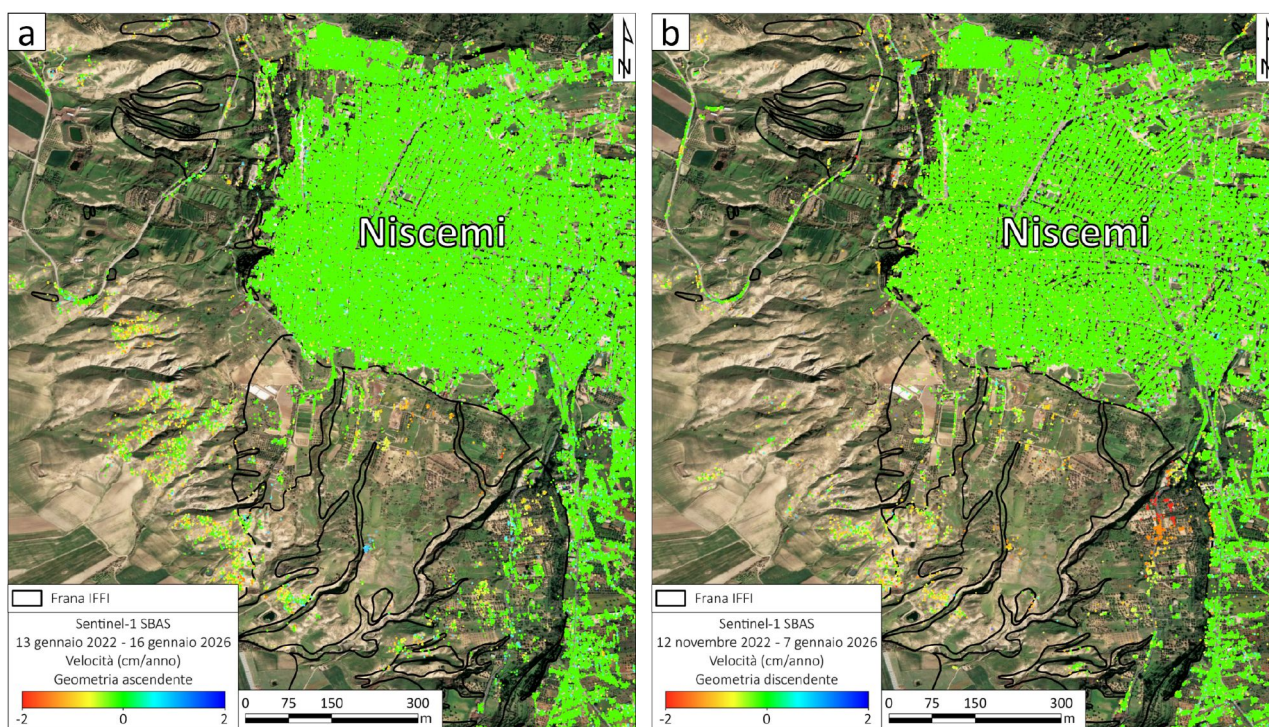
I punti di misura sono visualizzati in funzione della velocità media annua registrata nel periodo coperto dalle acquisizioni (2022-2026) mediante l'uso della scala di colori graduati, centrata sul valore zero di velocità. La

finestra di stabilità è stata posta pari a  $\pm 0,2$  cm/anno tenendo conto della precisione della tecnica interferometrica e della deviazione *standard* dell'intero *dataset* di MPs. Le velocità sono espresse in cm/anno e sono misurate lungo la LOS del satellite.

In generale, tutta l'area del centro abitato di Niscemi è caratterizzata da MPs classificati in colore verde che presentano velocità all'interno della finestra di stabilità di  $\pm 0,2$  cm/anno. Lungo la strada SP12 emergono alcuni MPs che presentano velocità negative fino a -1 cm/anno in entrambe le geometrie di acquisizione, in corrispondenza di alcuni settori interessati da frane mappate all'interno dell'inventario IFFI.

Nel settore meridionale del paese sono presenti MPs con velocità generalmente poco superiori alla finestra di stabilità, circa 0,5 cm/anno. Mentre, a valle del centro abitato, all'interno del versante esposto a sud caratterizzato dalla presenza di una frana mappata in IFFI, vi è la presenza di numerosi MPs con velocità fino a 1 cm/anno in geometria ascendente e -1,6 cm/anno in geometria discendente.

Infine, nel settore meridionale del paese lungo la SP10, con versante esposto verso ovest, si rileva una concentrazione elevata di MPs con velocità fino a -3 cm/anno in geometria discendente. Tali punti risultano in allontanamento rispetto alla linea di vista del satellite, concordante con la geometria ed esposizione del versante, verso ovest.

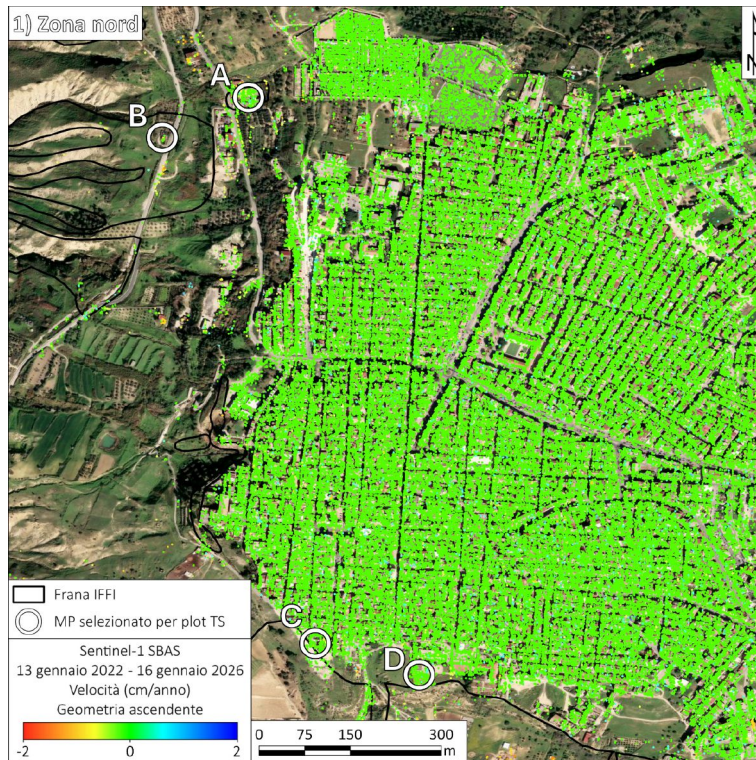


**Figura 38 - Mappa delle velocità di deformazione dei dati COSMO-SkyMed Seconda Generazione nelle geometrie ascendente (a) e discendente (b) elaborate con algoritmo SBAS.**

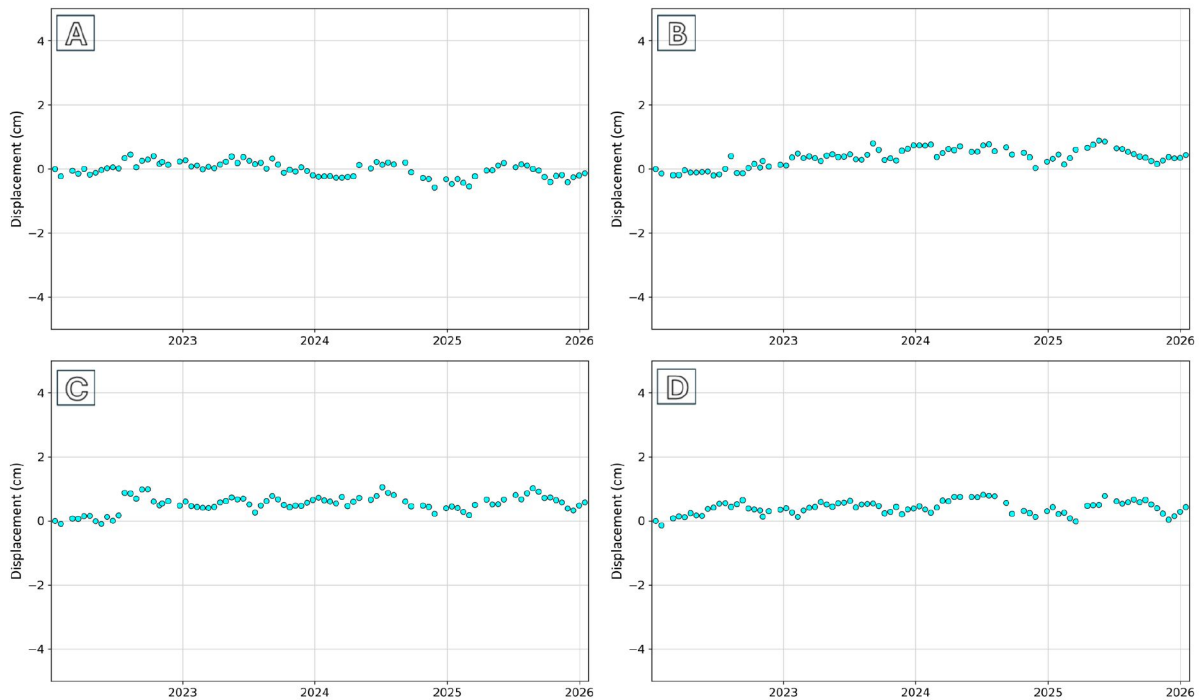
La zona nord del centro abitato di Niscemi mostra uno scenario deformativo progressivo di sostanziale stabilità, sia in geometria ascendente (Figura 39) che discendente (Figura 41). In generale, le serie temporali degli MPs in geometria ascendente e discendente in corrispondenza degli edifici situati a ridosso della scarpata lungo il bordo occidentale e meridionale (Figura 40, punti A, C, D) mostrano spostamenti che oscillano intorno allo zero in tutto l'intervallo temporale considerato.

Lungo la strada SP12, in corrispondenza di alcuni settori interessati da frane mappate all'interno dell'inventario IFFI, le serie temporali dei punti di misura mostrano movimenti lineari e costanti, coerenti con un movimento progressivo verso ovest, con uno spostamento cumulato con valori fino a -2 cm (Figura 42, punto B).

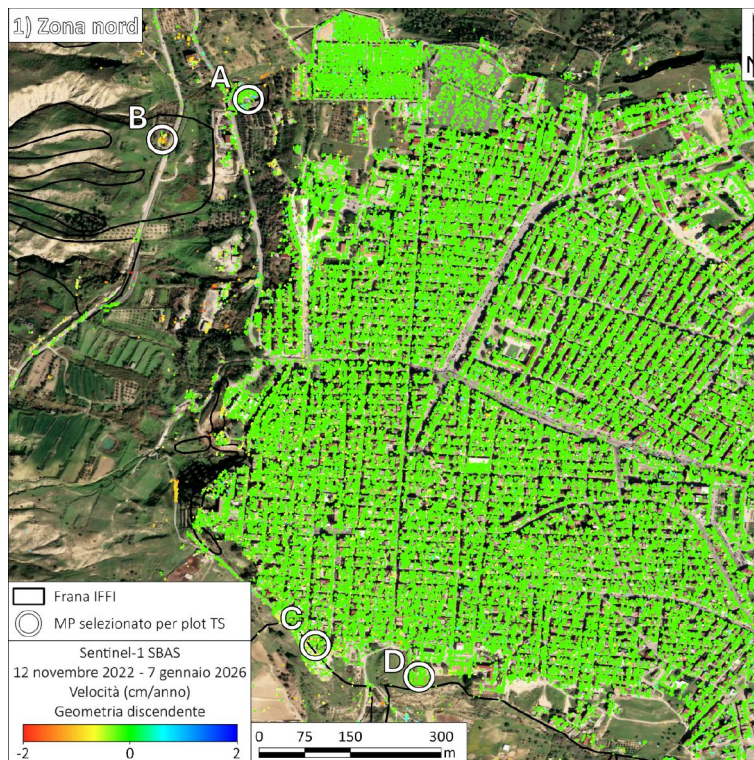
Inoltre, si evidenzia che in orbita ascendente i dati MPs mostrano movimenti di entità minore rispetto all'orbita discendente in quanto presumibilmente sottostimano la deformazione, a causa dell'esposizione verso ovest del pendio opposto alla direzione della LOS ascendente.



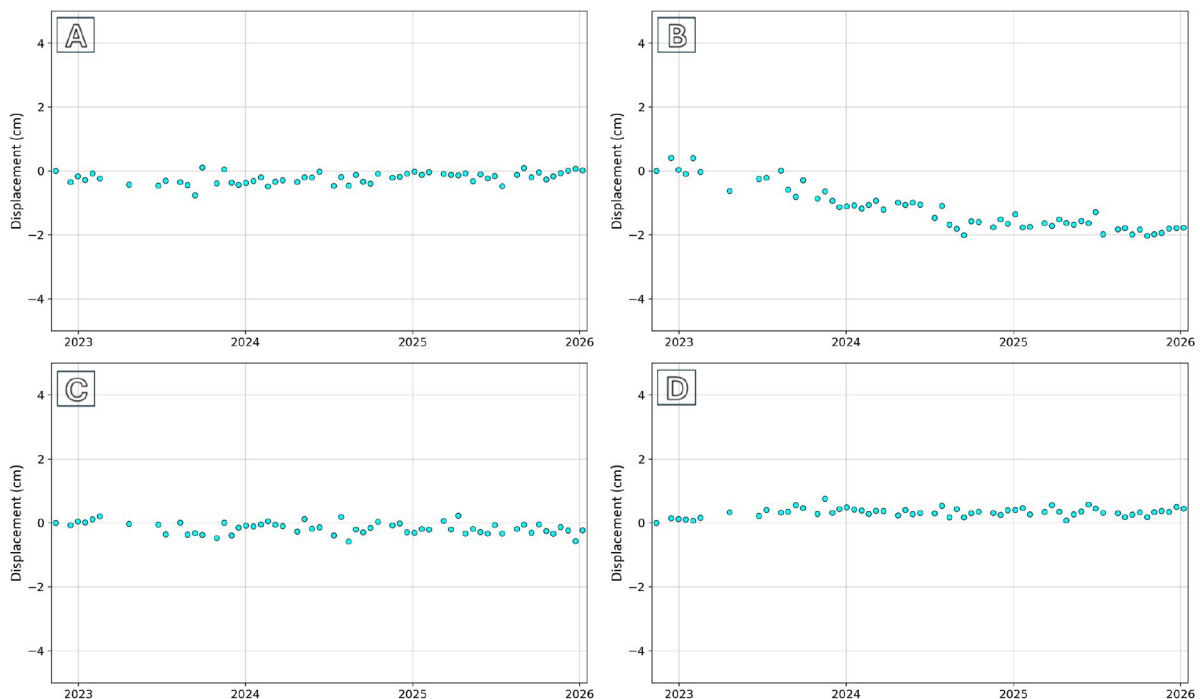
**Figura 39 -** Mappa delle velocità dei dati COSMO-SkyMed Seconda Generazione elaborati con tecnica SBAS in orbita ascendente sulla zona nord.



**Figura 40 -** Serie temporali dei punti di misura MPs localizzati in Figura 39.



**Figura 41 -** Mappa delle velocità dei dati COSMO-SkyMed Seconda Generazione elaborati con tecnica SBAS in orbita discendente sulla zona nord.



**Figura 42 -** Serie temporali dei punti di misura MPs localizzati in Figura 41.

Nella zona sud, sia nel settore meridionale del paese che a valle del centro abitato, l'analisi dello scenario deformativo pregresso indica valori di spostamento, sia in geometria ascendente (Figura 43) che in geometria discendente (Figura 45), che non mostrano deformazioni significative, né quantomeno segnali di accelerazione precedenti alla frana del 26 gennaio (Figura 44 e Figura 46, punti F, G, H). Mentre a sud del paese di Niscemi, lungo la SP10, in geometria discendente (Figura 46, punto E) si osservano i punti di misura caratterizzati dai massimi valori di spostamento cumulato.

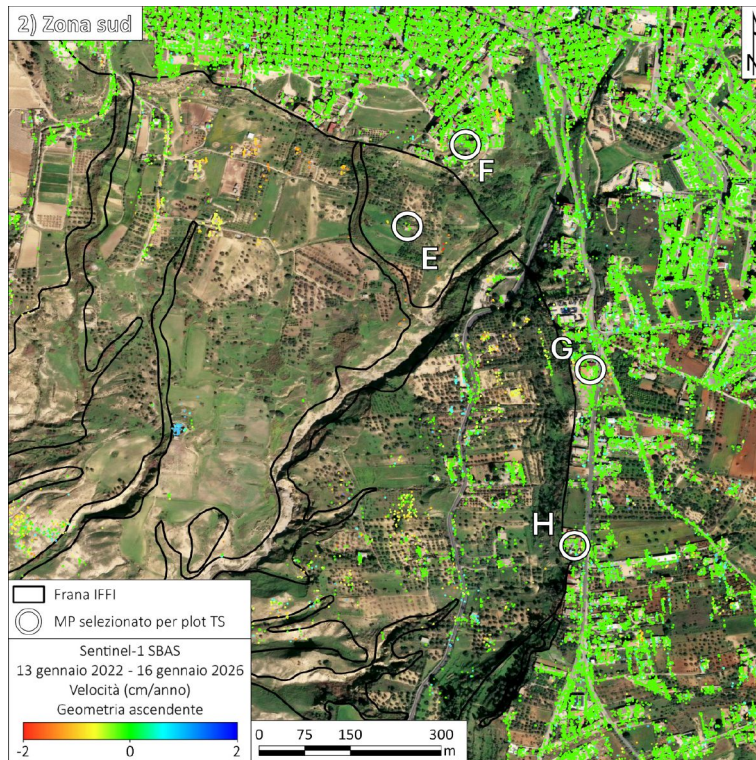


Figura 43 - Mappa delle velocità dei dati COSMO-SkyMed Seconda Generazione elaborati con tecnica SBAS in orbita ascendente sulla zona sud.

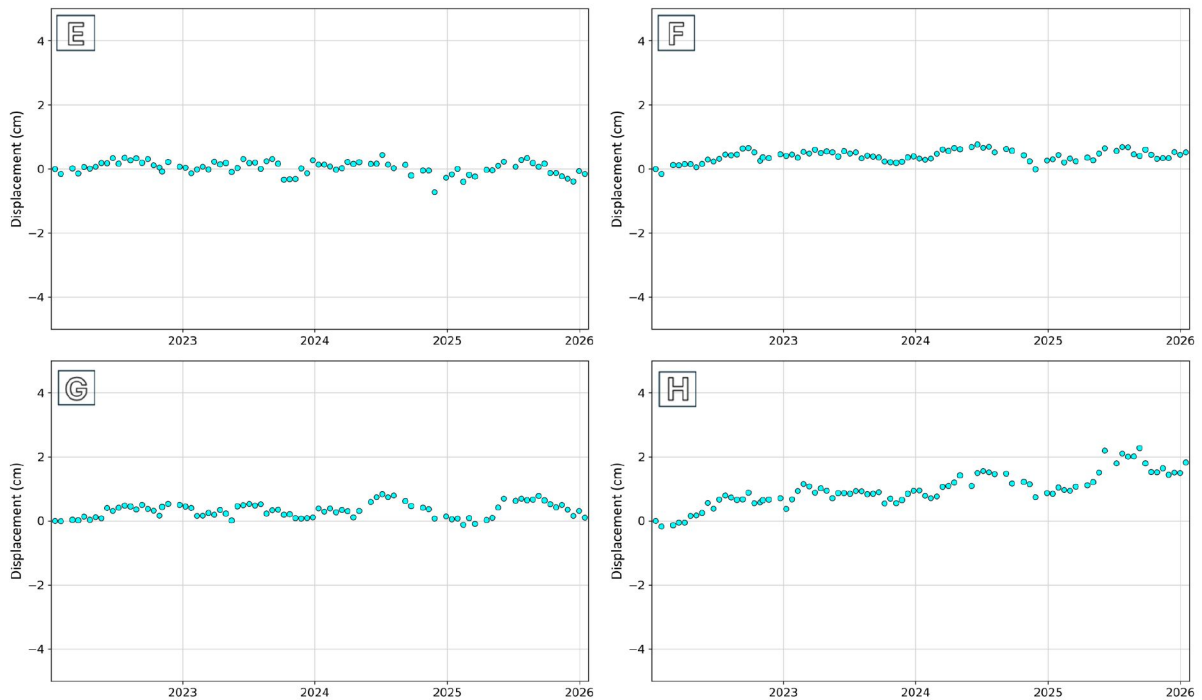


Figura 44 - Serie temporali dei punti di misura MPs localizzati in Figura 43.

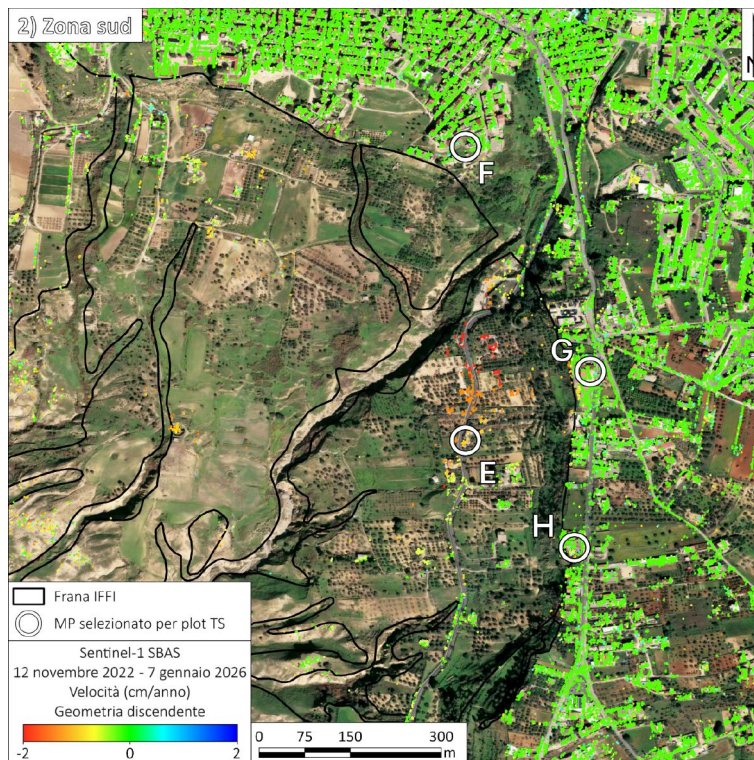


Figura 45 - Mappa delle velocità dei dati COSMO-SkyMed Seconda Generazione elaborati con tecnica SBAS in orbita discendente sulla zona sud.

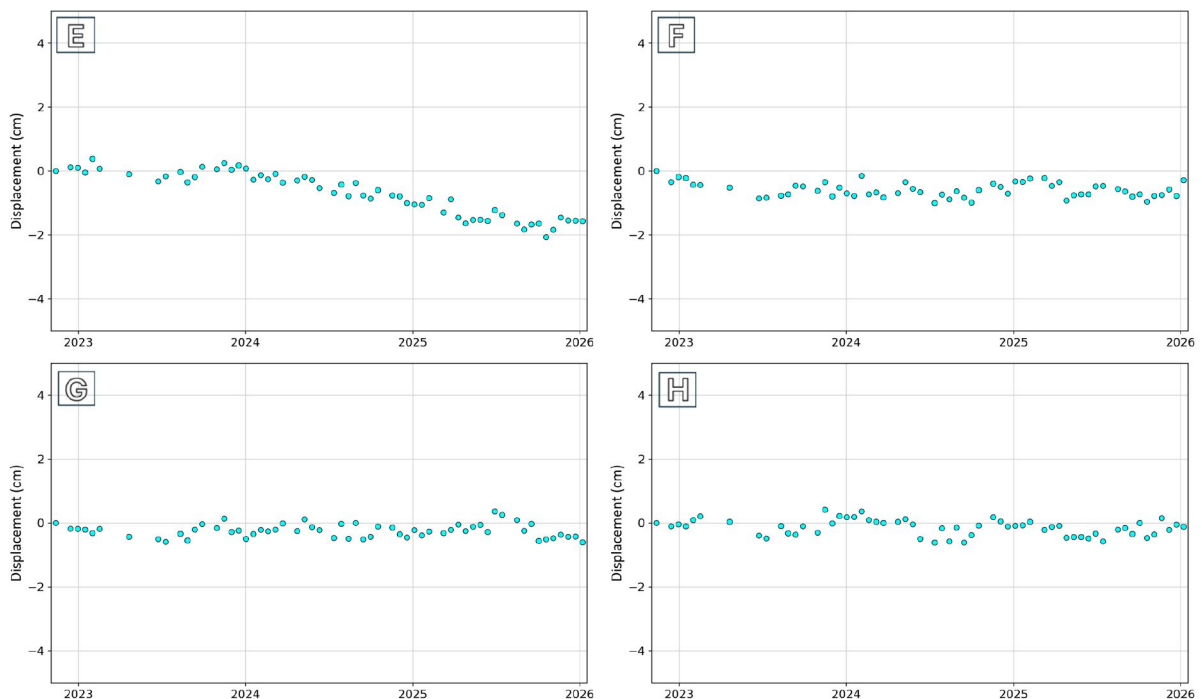


Figura 46 - Serie temporali dei punti di misura MPs localizzati in Figura 45.

#### 4.3.3 COSMO-SkyMed - elaborazione con tecnica SqueeSAR

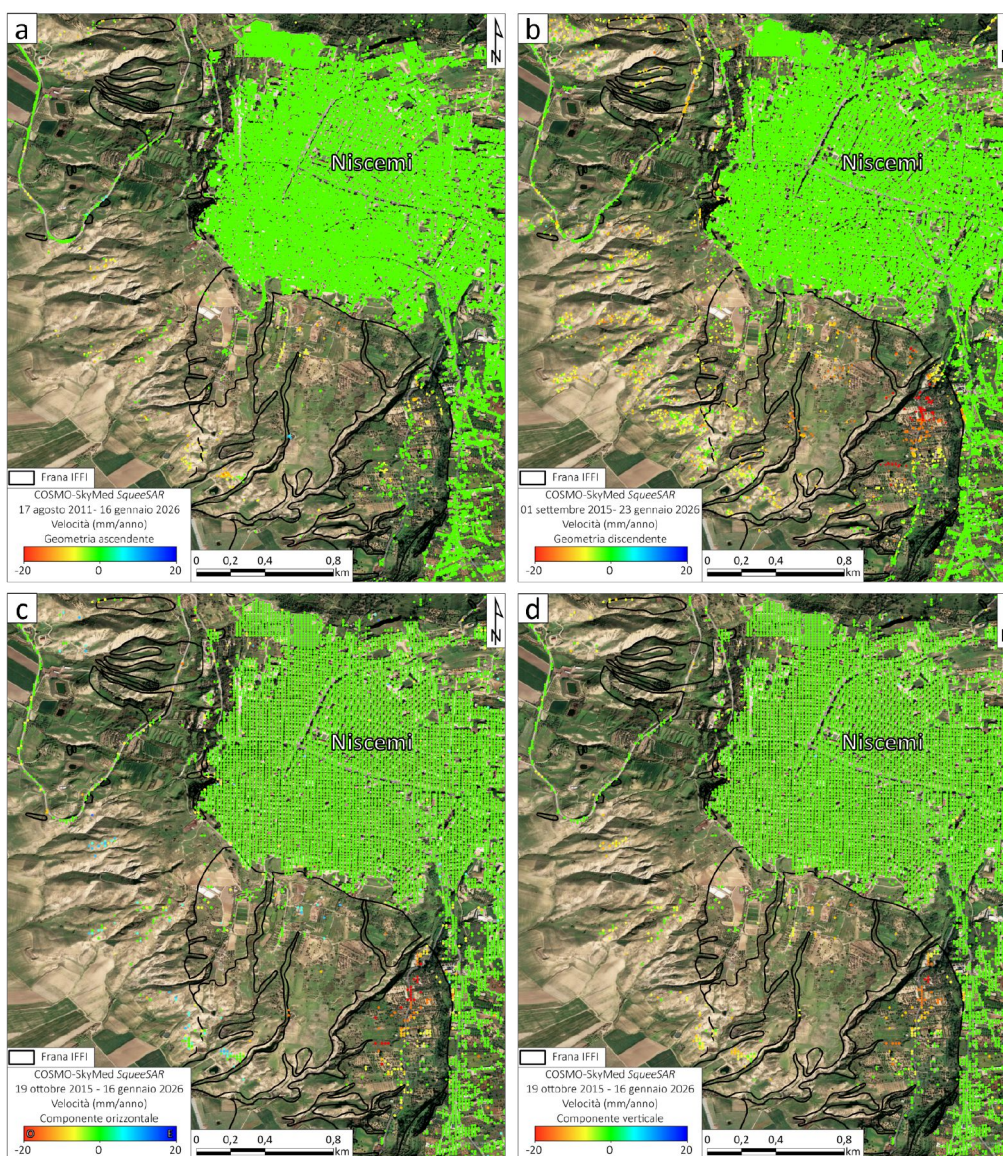
In Figura 47 sono riportate le mappe di distribuzione delle velocità dei dati radar satellitari interferometrici PS in orbita discendente e ascendente (Figura 47a,b), e lungo le direttrici orizzontale est-ovest e verticale (Figura 47c,d) elaborati tramite tecnica SqueeSAR.

I dati della velocità nelle sue componenti verticale e orizzontale est-ovest (Figura 47c,d) mostrano un numero più esiguo di bersagli stabili soprattutto nelle aree non urbanizzate, dovuto al ricampionamento dei dati ascendenti e discendenti su una griglia spaziale comune di 15 x 15 m.

L'area del centro abitato di Niscemi risulta essere stabile in tutti i *dataset*, con PS classificati in colore verde che presentano velocità medie annue all'interno della soglia di stabilità.

A valle del centro abitato, in corrispondenza del settore occidentale e del settore meridionale, dove affiorano le argille, sono presenti alcuni PS caratterizzati da velocità medie al di sopra del *range* stabile, con segno negativo in entrambe le geometrie di acquisizione, indicante un movimento progressivo di allontanamento dal sensore coerentemente con un movimento verso il basso lungo il versante.

L'area caratterizzata dai più alti tassi di deformazione risulta essere il settore sud-est che mostra velocità medie annue fino a circa 35 mm/anno in geometria discendente, e componenti del movimento sia in direzione verticale che traslativa verso ovest.



**Figura 47 -** Mappa della distribuzione delle velocità dei dati PS elaborati con tecnica SqueeSAR (a) lungo LOS in orbita ascendente, (b) lungo LOS in orbita discendente, (c) lungo la direzione orizzontale est-ovest, (d) lungo la direzione verticale.

Nella zona nord, l'analisi dello scenario deformativo progressivo mostra una sostanziale stabilità del centro abitato, in orbita ascendente (Figura 48) e discendente (Figura 50). In generale, le serie temporali dei PS in geometria ascendente in corrispondenza degli edifici situati a ridosso della scarpata lungo il bordo

occidentale e meridionale (Figura 49, punti A, B, C) mostrano spostamenti trascurabili che oscillano intorno allo zero in tutto l'intervallo temporale considerato dal 17 agosto 2011 al 16 gennaio 2026. Sono presenti alcuni punti di misura PS che mostrano un movimento in allontanamento dal sensore con un andamento lineare di movimento a partire dal 2014 (Figura 49, punto C).

Si evidenzia che in orbita ascendente i dati PS mostrano movimenti di entità minore rispetto all'orbita discendente in quanto presumibilmente sottostimano la deformazione, a causa dell'esposizione verso ovest del pendio opposto alla direzione della LOS ascendente.

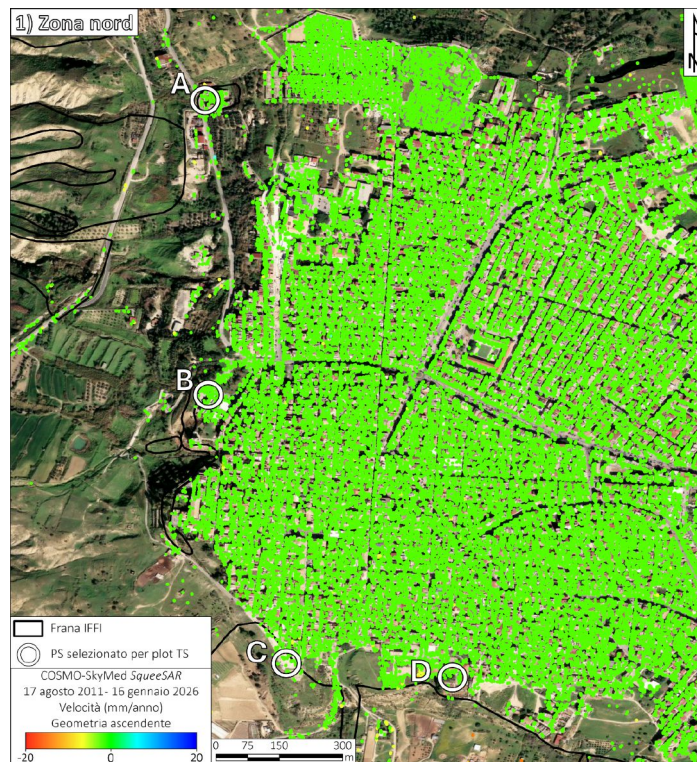


Figura 48 - Mappa delle velocità dei dati PS elaborati con tecnica SqueeSAR su immagini COSMO-SkyMed in orbita ascendente sulla zona nord.

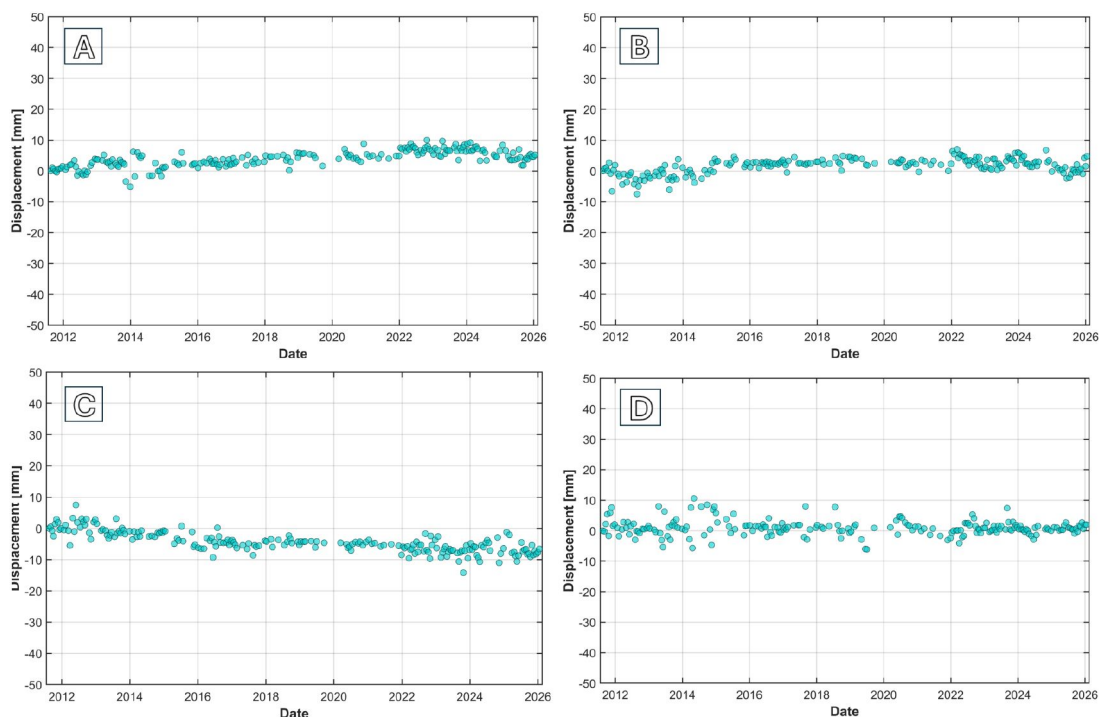


Figura 49 - Serie temporali dei punti di misura PS localizzati in Figura 48.

Sul versante occidentale a valle del centro abitato, in corrispondenza delle strade e di aree con suolo esposto dove sono rilevati i bersagli riflettenti, i dati in geometria discendente registrano tassi di velocità di deformazione più alti di quelli in orbita ascendente, in quanto la geometria di acquisizione con LOS verso ovest risulta essere più favorevole a stimare correttamente i movimenti del terreno lungo il pendio, data l'esposizione morfologica del versante. Le serie temporali dei punti di misura localizzati in quest'area lungo il versante occidentale mostrano movimenti lineari e costanti, coerenti con un movimento pregresso verso ovest e spostamento cumulato con valori fino a 50 mm (Figura 51, punto B). In corrispondenza degli edifici situati a ridosso della scarpata lungo il bordo occidentale e meridionale (Figura 51, punti A, C, D) le serie temporali dei dati PS presentano spostamenti trascurabili che oscillano intorno allo zero.

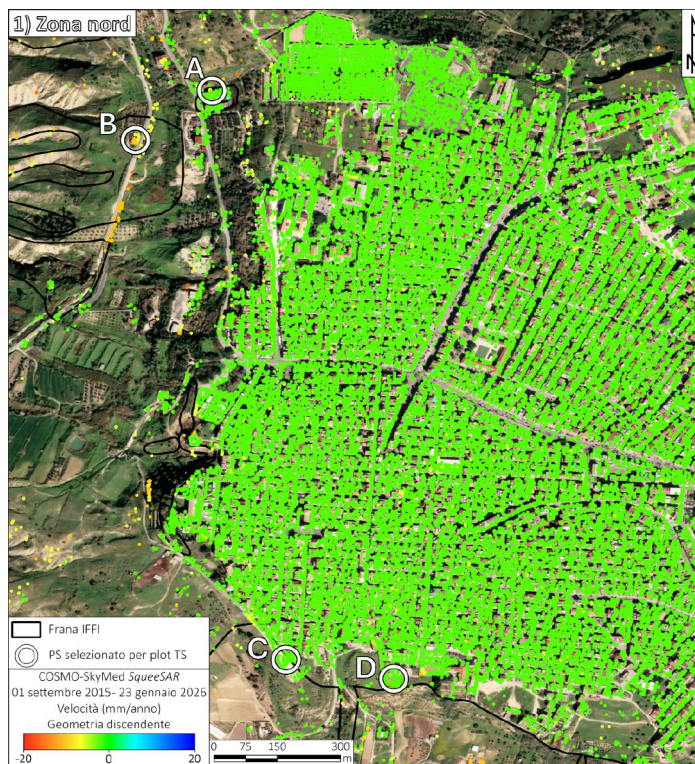


Figura 50 - Mappa delle velocità dei dati PS elaborati con tecnica SqueeSAR su immagini COSMO-SkyMed in orbita discendente sulla zona nord.

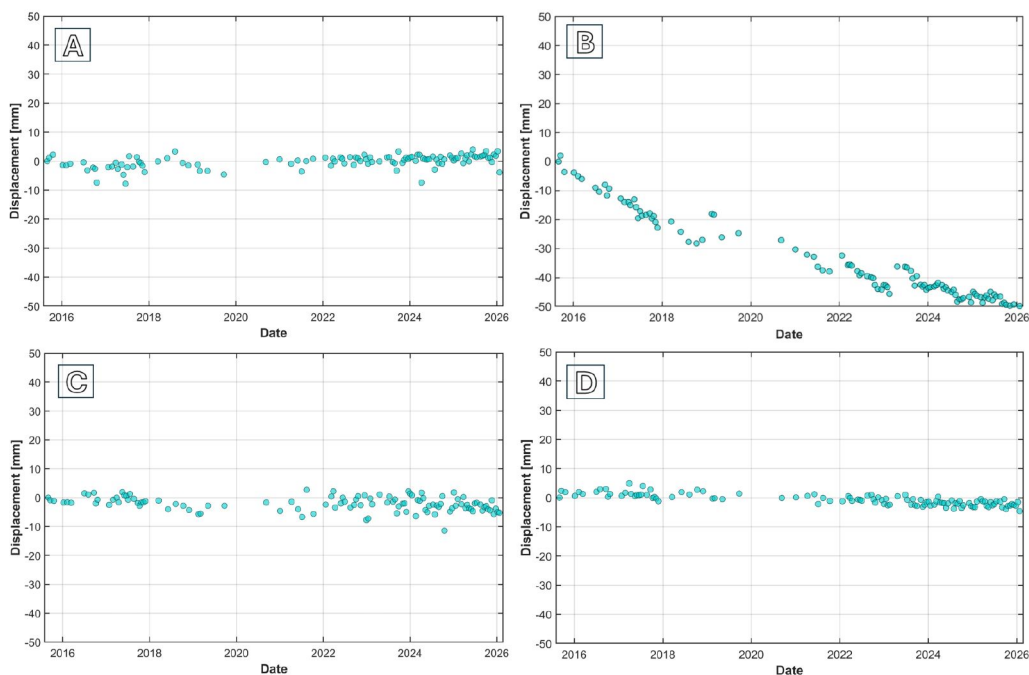
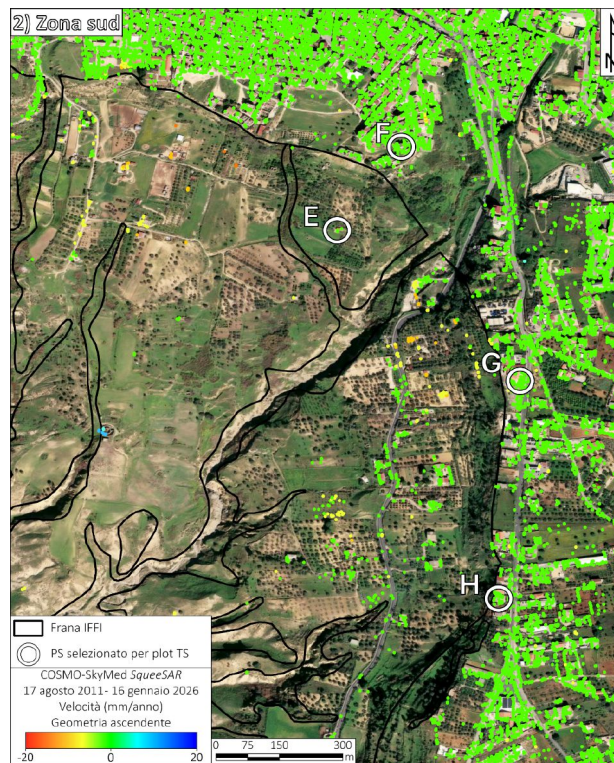


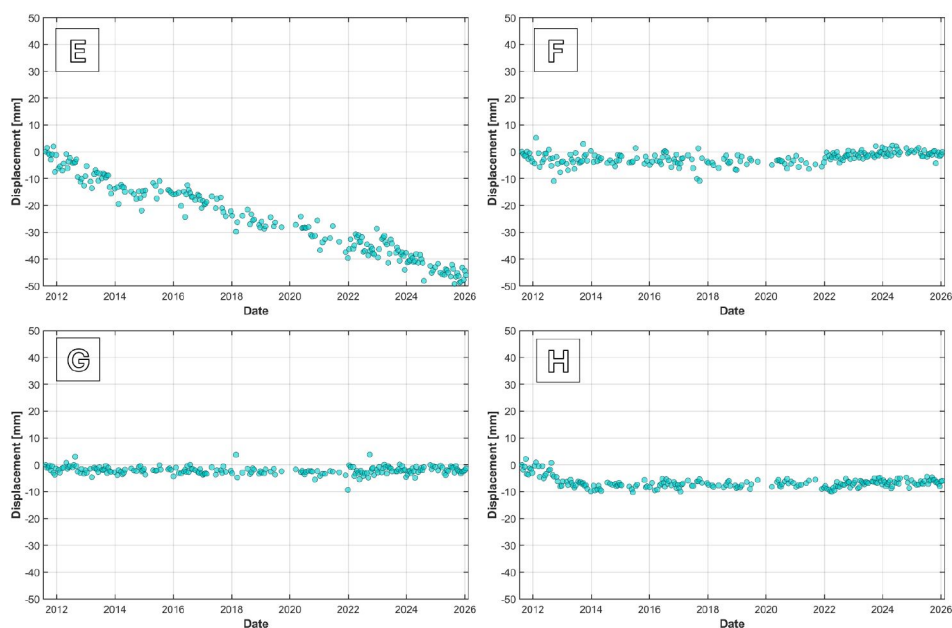
Figura 51 - Serie temporali dei punti di misura PS localizzati in Figura 50.

Nella zona sud, l'analisi dello scenario deformativo pregresso mostra i più alti tassi di velocità in corrispondenza del settore a valle del centro abitato, in particolare lungo lo sviluppo della SP10, sia in orbita ascendente (Figura 52) che discendente (Figura 54). Le velocità medie annue dei dati PS in queste aree mostrano valori elevati fino a 9 mm/anno in orbita ascendente e fino a 35 mm/anno in orbita discendente.

Le serie temporali dei PS nelle aree rurali a valle del paese presentano tendenze deformativi lineari e costanti con spostamenti cumulati dal 2011 al 2026 fino a 8-10 cm in orbita ascendente (Figura 52, punto E) e fino a valori di 30-40 cm nell'orbita discendente (Figura 54, punto E), che è l'acquisizione che meglio stima i movimenti in quest'area, data l'esposizione verso ovest del pendio. I punti di misura PS ascendenti e discendenti sull'edificato del nucleo abitato mostrano una sostanziale stabilità nel periodo di osservazione satellitare antecedente ai dissesti di gennaio 2026 (Figura 52 punti F, G, H e Figura 54 punti F, G, H).



**Figura 52 - Mappa delle velocità dei dati PS elaborati con tecnica SqueeSAR su immagini COSMO-SkyMed in orbita ascendente sulla zona sud.**



**Figura 53 - Serie temporali dei punti di misura PS localizzati in Figura 52.**

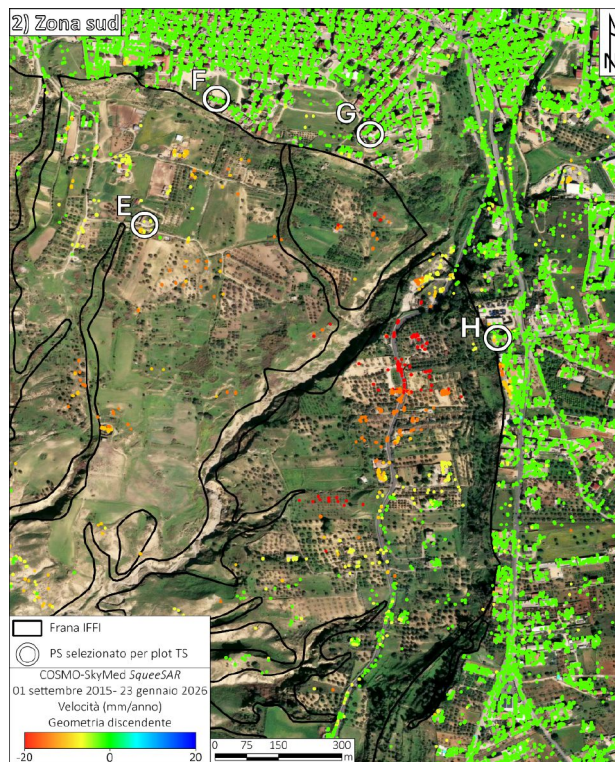


Figura 54 - Mappa delle velocità dei dati PS elaborati con tecnica SqueeSAR su immagini COSMO-SkyMed in orbita discendente sulla zona sud.

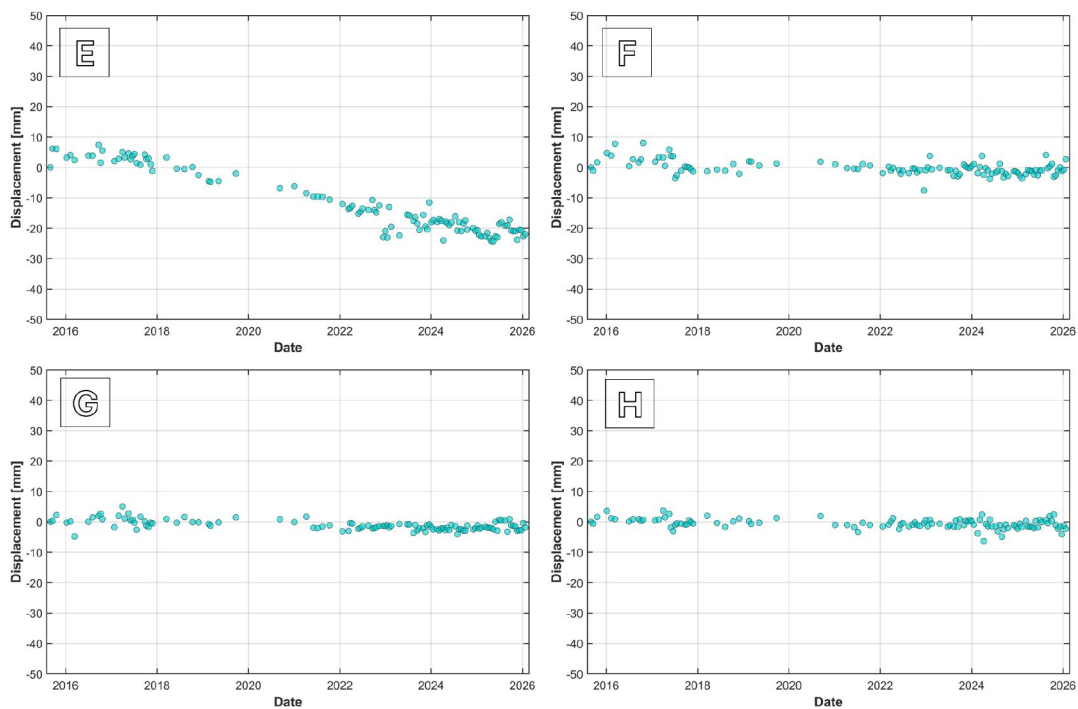


Figura 55 - Serie temporali dei punti di misura PS localizzati in Figura 54.

#### 4.4 Analisi co-evento

L'analisi co-evento si è basata, in primo luogo, sul confronto tra coppie di immagini SAR acquisite una prima e una dopo il fenomeno di frana, al fine di stimare e quantificare il campo di deformazione indotto dall'evento.

Sono stati effettuati due tipi di elaborazione: un'elaborazione DInSAR basata sul confronto della fase interferometrica (Tabella 3) e un'elaborazione *Pixel Offset Tracking* basata sull'analisi di ampiezza di coppie di immagini SAR (Tabella 4).

Satellite	Banda	Geometria di acquisizione	Data Acquisizione	Tipo di Processing
COSMO-SkyMed	X	Discendente	23/01/2026	DInSAR
COSMO-SkyMed	X	Discendente	08/02/2026	

Tabella 3 - Specifiche tecniche della coppia interferometrica utilizzata per l'analisi interferometrica DInSAR.

L'elaborazione *Pixel Offset Tracking* è stata effettuata a partire da più coppie di immagini COSMO-SkyMed e SAOCOM acquisite ad intervalli diversi, ma sempre con la prima acquisizione pre-evento e la seconda acquisizione post-evento (Tabella 4).

Satellite	Banda	Geometria di acquisizione	Intervallo temporale
COSMO-SkyMed	X	Ascendente	16/01/2026 - 01/02/2026
COSMO-SkyMed	X	Discendente	07/01/2026 - 08/02/2026
SAOCOM	L	Ascendente	05/01/2026 - 29/01/2026
SAOCOM	L	Discendente	06/01/2026 - 30/01/2026

Tabella 4 - Specifiche tecniche dei dataset utilizzati per l'analisi *Pixel Offset Tracking* degli eventi di gennaio 2026.

##### 4.4.1 COSMO-SkyMed - elaborazione con tecnica DInSAR

L'analisi co-evento si basa sul confronto tra una coppia di immagini SAR acquisite prima e dopo il fenomeno di frana. La tecnica utilizzata si configura come interferometria differenziale DInSAR basata sul confronto della fase del segnale elettromagnetico tra le due acquisizioni satellitari radar coerenti per generare un interferogramma.

L'obiettivo di questa analisi è la visualizzazione e la determinazione spaziale del campo di spostamento superficiale indotto dall'evento cinematico. Lo spostamento ottenuto nell'interferogramma è monodimensionale e rappresenta la proiezione del vettore di spostamento reale sulla LOS del satellite nelle due geometrie di acquisizione, ascendente e discendente.

Si selezionano due acquisizioni con il minor intervallo temporale (*temporal baseline*) possibile a cavallo dell'evento per massimizzare la coerenza elettromagnetica. Inoltre, è opportuno che la *baseline perpendicolare*, cioè la proiezione della distanza spaziale tra le due posizioni orbitali del satellite al momento delle due diverse acquisizioni lungo la direzione ortogonale alla LOS del sensore, sia sufficientemente piccola al fine di ottenere una buona sensibilità dell'interferogramma alla topografia e una alta qualità del segnale in termini di coerenza.

In particolare, per l'evento franoso su Niscemi verificatosi tra il 25 e il 26 gennaio 2026, è stata scelta la coppia interferometrica di immagini SAR del 23 gennaio 2026 e del 8 febbraio 2026 acquisite dal sensore COSMO-SkyMed in orbita discendente, ed è stata effettuata un'analisi interferometrica standard DInSAR a piena risoluzione. La *baseline* perpendicolare tra le due traiettorie satellitari è di 272 m.

L'interferogramma (Figura 56) mostra al bordo sud del paese di Niscemi una frangia interferometrica di deformazione, probabilmente connessa ai marcati spostamenti della frana. La frangia interferometrica

appare infatti localizzata a partire dal ciglio della scarpata meridionale verso valle, nell'area dove è avvenuta la frana del 25-26 gennaio 2026.

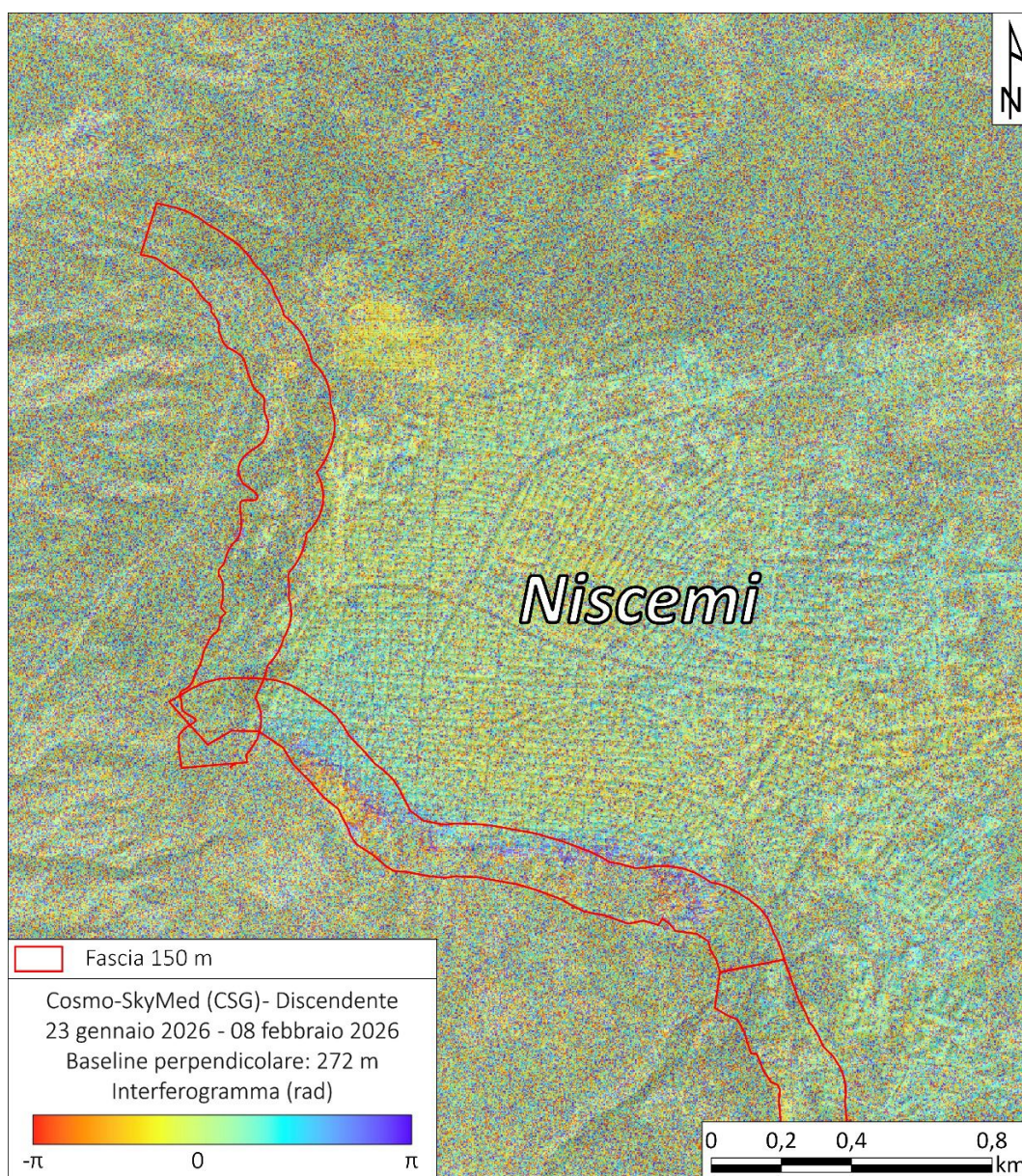


Figura 56 - Interferogramma ottenuto da due immagini SAR acquisite dal sensore COSMO-SkyMed in orbita discendente nelle date 23 gennaio 2026 e 8 febbraio 2026. Le linee rosse evidenziano la fascia di 150 m dal ciglio della scarpata.

#### 4.4.2 COSMO-SkyMed e SAOCOM - elaborazione con tecnica Pixel Offset Tracking

Le elaborazioni “Pixel Offset Tracking” sono ottenute mediante analisi di ampiezza del segnale elettromagnetico, al fine di stimare il campo di deformazione. Questo tipo di analisi si basa sull'identificare finestre mobili all'interno delle immagini SAR e guardare come i *pixel* contenuti all'interno di queste finestre mobili si muovono tra il pre- e il post-evento, al fine di quantificare lo spostamento (*l'offset*) in *range* e in *azimuth* che subisce l'immagine post-evento rispetto all'immagine pre-evento.

Il prodotto che si ottiene è un campo bidimensionale di deformazione che mostra lo sfasamento lungo le direzioni di *range* e *azimuth*, che corrispondono alle direzioni planari est-ovest e nord-sud. Avendo a disposizione due geometrie di acquisizione, ascendente e discendente, è possibile ricavare anche la componente verticale dello spostamento.

In Figura 57 si riportano i risultati in modulo dello spostamento dato dalla somma delle componenti est-ovest, nord-sud e verticale per entrambe le aree di interesse, realizzate a partire dalle immagini COSMO-SkyMed e SAOCOM. I vari segnali di ampiezza sono poi stati combinati tra loro per ottenere una ricostruzione 3D della deformazione, che copre il periodo temporale di entrambi gli eventi franosi del 15-16 gennaio e del 25-26 gennaio 2026.

Per entrambe le aree interessate dagli eventi, l'analisi *Pixel Offset Tracking* mostra una direzione chiara verso ovest della frana a nord di Niscemi, mentre la frana a sud rivela spostamenti fino a 40 m in direzione sud-ovest.

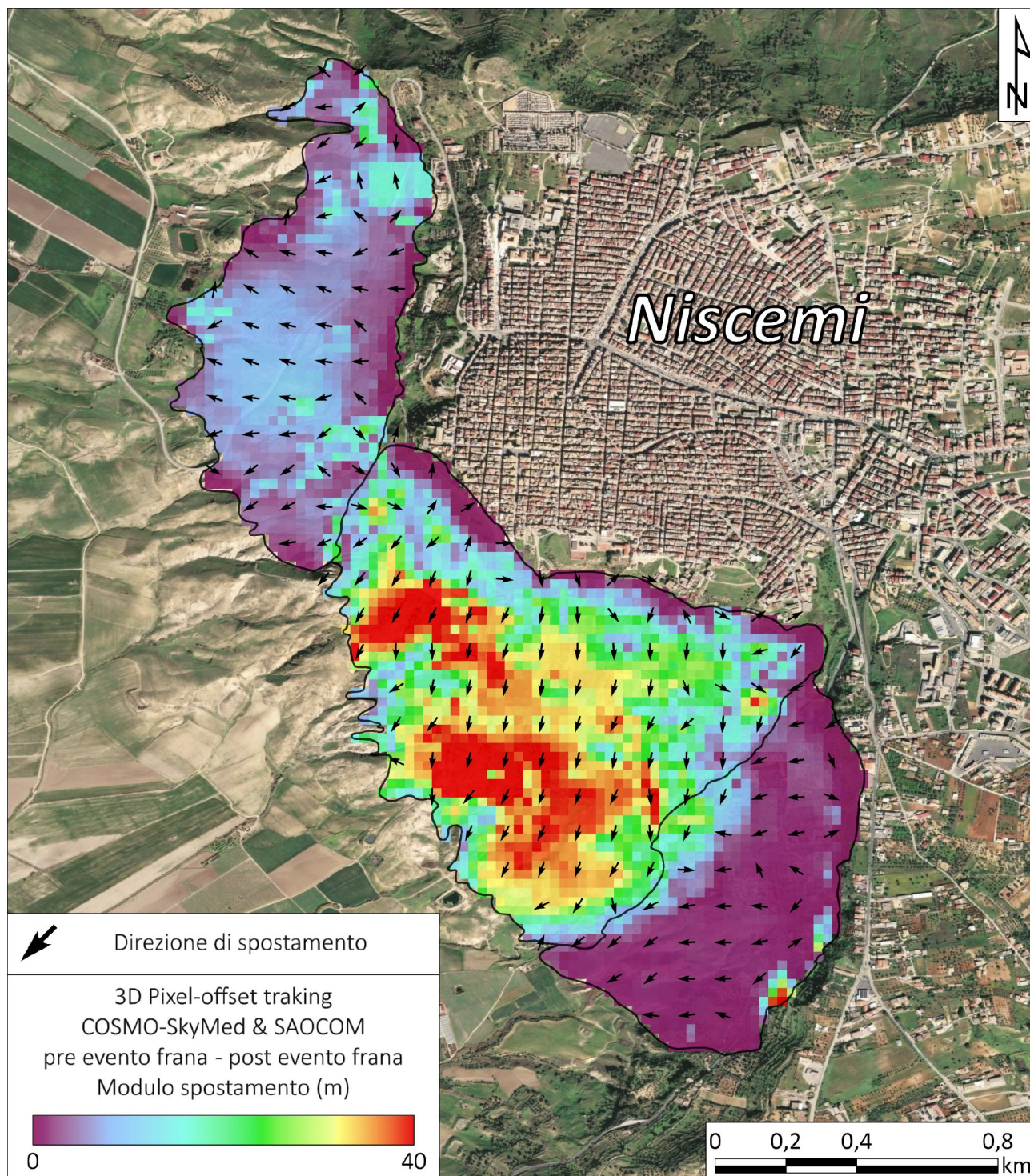


Figura 57 - Modulo dello spostamento dell'area di Niscemi ottenuto tramite l'analisi *Pixel Offset Tracking* sfruttando la combinazione di più immagini COSMO-SkyMed e SAOCOM pre- e post-evento.

## 4.5 Analisi post-evento

L'obiettivo principale di questa analisi è valutare l'eventuale presenza di segnali deformativi successivi alle frane di gennaio 2026, in particolare sul centro abitato nella fascia di interdizione.

A tal fine è stata effettuata un'elaborazione di interferometria differenziale DInSAR sulla coppia di immagini acquisite il 01 e 04 febbraio 2026 dalla missione Capella Space in geometria discendente con LOS *left-looking*. Congiuntamente, sono state effettuate le analisi multi-temporali, focalizzate esclusivamente sullo scenario post-evento, con nuove immagini post-evento acquisite dalle costellazioni Sentinel-1 e COSMO-SkyMed. In particolare, sono state utilizzate sia per Sentinel-1 che per COSMO-SkyMed la prima acquisizione post-evento del 26 gennaio 2026 e l'ultima acquisizione disponibile. Il dettaglio sulle acquisizioni utilizzate è riportato in Tabella 5.

Satellite	Banda	Geometria di acquisizione	Intervallo temporale
Capella Space	X	Discendente	01/02/2026 - 04/02/2026
TerraSAR-X	X	Discendente	11/02/2026 - 05/03/2026
Sentinel-1	C	Ascendente	31/01/2026 - 07/04/2026
Sentinel-1	C	Discendente	07/02/2026 - 08/04/2026
COSMO-SkyMed	X	Ascendente	01/02/2026 - 21/03/2026
COSMO-SkyMed	X	Discendente	08/02/2026 - 19/03/2026

Tabella 5 - Specifiche tecniche dei *dataset* utilizzati per l'analisi interferometrica post-eventi di gennaio 2026.

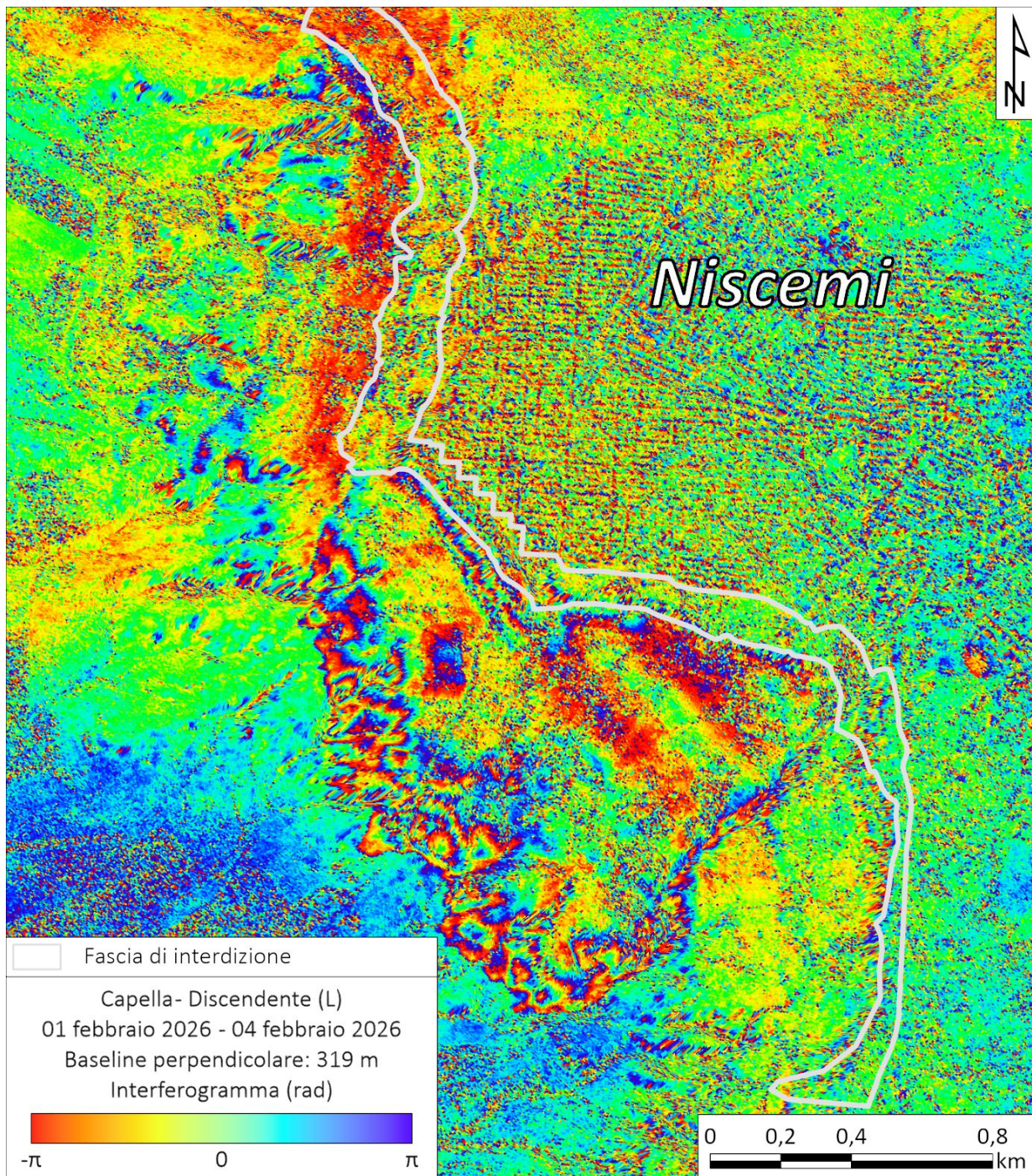
### 4.5.1 Capella Space - elaborazione con tecnica DInSAR

Ai fini di analizzare lo scenario deformativo post-evento, è stata effettuata un'analisi interferometrica standard DInSAR utilizzando coppie interferometriche da immagini SAR acquisite dalla missione Capella Space. Le acquisizioni sull'area di Niscemi sono avvenute nelle date 3, 4 e 7 febbraio 2026, due in modalità ascendente e una in discendente.

A partire da queste immagini SAR sono stati elaborati tutti i possibili interferogrammi. In Figura 58 si riporta l'interferogramma realizzato tra le acquisizioni del 1 e del 4 febbraio in orbita discendente *left-looking*. La *baseline* perpendicolare tra le due traiettorie satellitari è di 319 m.

L'interferogramma mostra al bordo sud del paese di Niscemi frange interferometriche di deformazione, localizzate a partire dal ciglio della scarpata meridionale verso valle, nell'area dove è avvenuta la frana del 25-26 gennaio 2026.

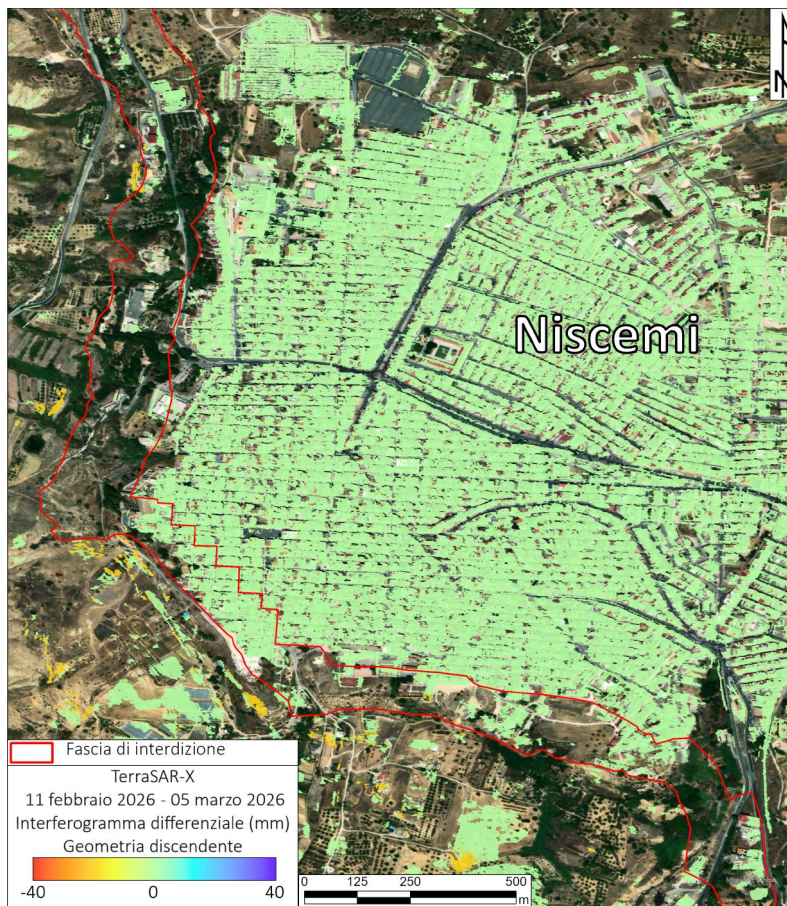
Si nota la presenza di ulteriori frange interferometriche nel settore più a sud interessato dall'evento del 25-26 gennaio 2026. Queste frange potrebbero essere dovute ad artefatti topografici legati all'utilizzo nell'elaborazione di un DEM antecedente all'evento stesso. Il centro abitato di Niscemi e la fascia di 150 m non risultano affetti da movimenti apprezzabili.



**Figura 58 - Interferogramma ottenuto dalla coppia di immagini SAR acquisite da Capella Space in orbita discendente *left-looking* nelle date del 1 febbraio e del 4 febbraio 2026. Le linee bianche evidenziano la fascia di interdizione vigente.**

#### 4.5.2 TerraSAR-X - elaborazione con tecnica DInSAR

La Figura 59 mostra un interferogramma differenziale TerraSAR-X dell'area di Niscemi (acquisito in geometria discendente) relativo al periodo 11 febbraio - 5 marzo 2026, con deformazioni espresse in millimetri lungo la linea di vista (LOS). La coppia di immagini è stata acquisita con *baseline* molto bassa, pari a 30 metri. La maggior parte del territorio urbano e agricolo presenta valori prossimi allo zero (tonalità verde), indicando assenza di deformazioni significative nel breve intervallo temporale considerato. Localmente, a valle della scarpata della frana, si osservano anomalie puntuali con gradienti cromatici giallo-rosso, riconducibili a spostamenti negativi in LOS, dell'ordine di alcuni millimetri. Tali segnali risultano comunque localizzati al di fuori della fascia di interdizione e non sul tessuto urbano di Niscemi. Nel complesso, il quadro deformativo appare stabile, con variazioni spazialmente circoscritte e prive di evidenti *pattern* areali continui.



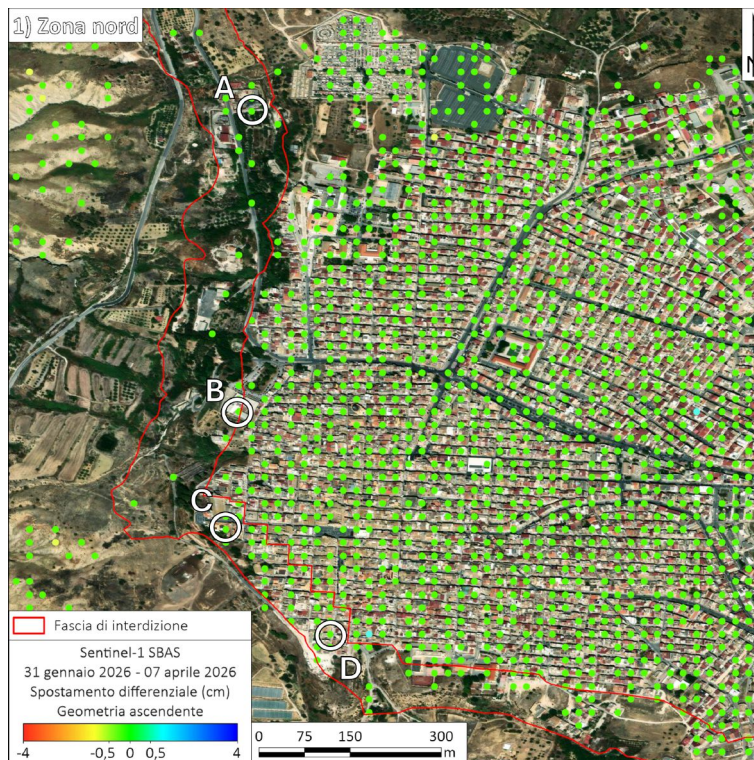
**Figura 59 - Interferogramma differenziale ottenuto da una coppia di immagini TerraSAR-X in orbita discendente, acquisite l'11 e il 5 marzo 2026. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.**

#### 4.5.3 Sentinel-1 - elaborazione con tecnica SBAS

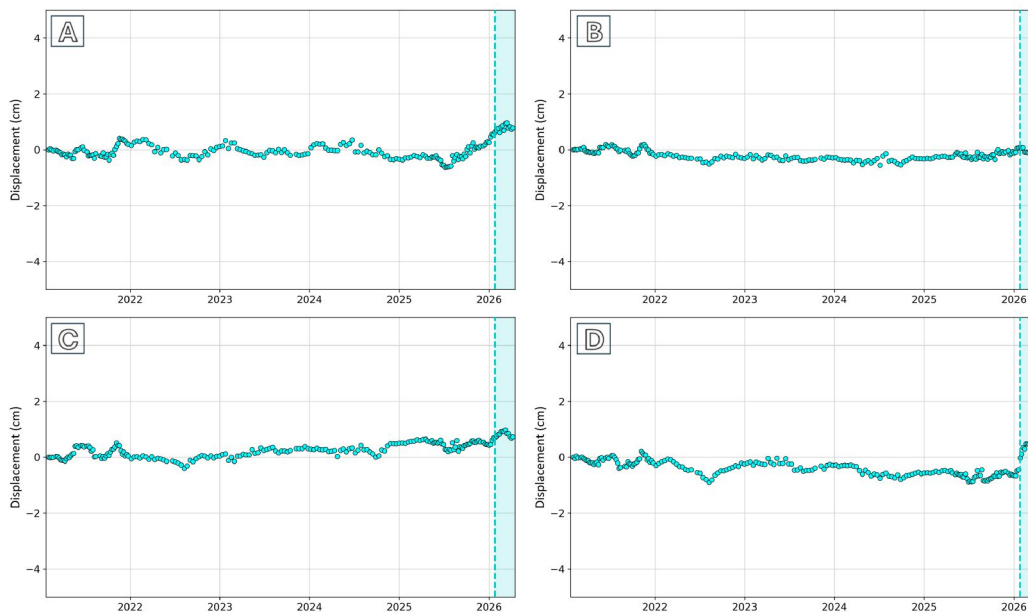
La Figura 60 illustra la mappa di spostamento, osservata dai dati interferometrici acquisiti dalla costellazione Sentinel-1 e processati tramite l'algoritmo SBAS, nell'intervallo temporale compreso tra il 31 gennaio e il 7 aprile 2026, per la geometria ascendente, nel settore nord di Niscemi. I punti di misura sono visualizzati in base allo spostamento registrato nel periodo coperto dalle acquisizioni, mediante la scala di colori graduati centrata sul valore zero di spostamento.

La finestra di stabilità è stata posta pari a  $\pm 0,5$  cm tenendo conto della precisione della tecnica interferometrica e della deviazione standard dell'intero *dataset*. Si precisa che la robustezza della stima interferometrica è strettamente correlata all'estensione temporale della serie di acquisizioni: per intervalli temporali più brevi, caratterizzati da un numero inferiore di immagini disponibili, aumenta l'incidenza del rumore residuo e, conseguentemente, la deviazione standard delle misure. In tali condizioni, la finestra di stabilità deve essere opportunamente ricalibrata, in modo coerente con il livello di incertezza associato al *dataset* considerato.

In generale, tutta l'area nord di Niscemi, incluso l'abitato all'interno della fascia di interdizione, è caratterizzata da MP classificati in colore verde che presentano valori di spostamento all'interno della finestra di stabilità di  $\pm 0,5$  cm. L'esame delle serie temporali di spostamento (Figura 61), riferite all'intero intervallo di acquisizione disponibile (2 febbraio 2021 - 7 aprile 2026) e quindi comprensive delle fasi antecedenti e successive agli eventi di gennaio 2026, mette in luce, nel punto D, una variazione brusca del segnale interferometrico in corrispondenza dell'evento, interpretabile come discontinuità tra l'ultima acquisizione pre-frana e la prima post-frana. Tuttavia, nel periodo post-evento, tale punto mostra un progressivo assestamento del segnale, con andamento tendenzialmente stabile. Il punto A evidenzia una tendenza in accelerazione, in avvicinamento al sensore, precedente agli eventi di gennaio e indipendente dagli stessi. Nella fase post-evento, il punto non registra la stessa tendenza mostrata in precedenza. I punti B e C non mostrano variazioni significative in concomitanza con gli eventi di gennaio.



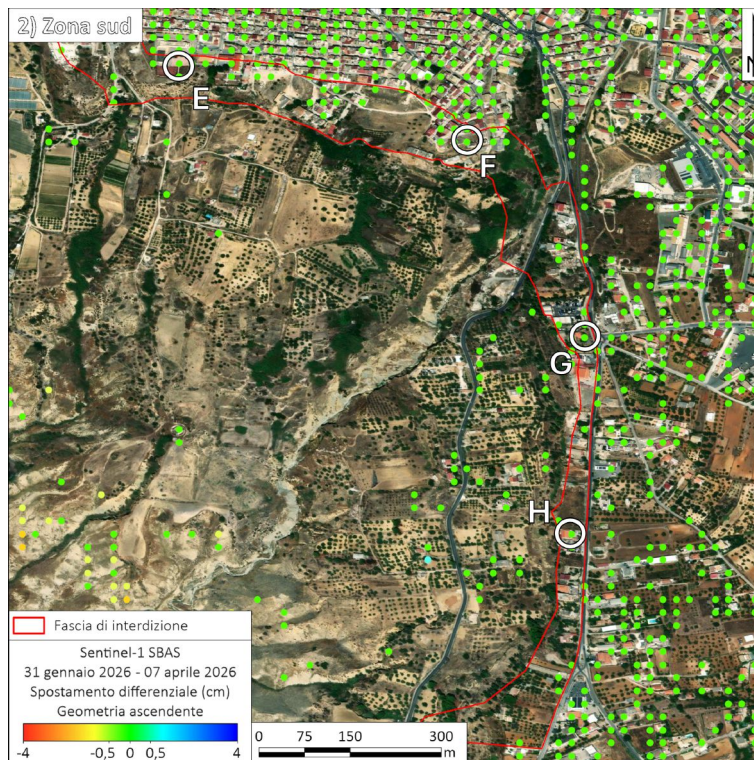
**Figura 60 -** Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1, elaborati con tecnica SBAS, nella zona nord in geometria ascendente nell'intervallo temporale 31 gennaio - 7 aprile 2026. In Figura 61 le serie temporali dei punti considerati. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.



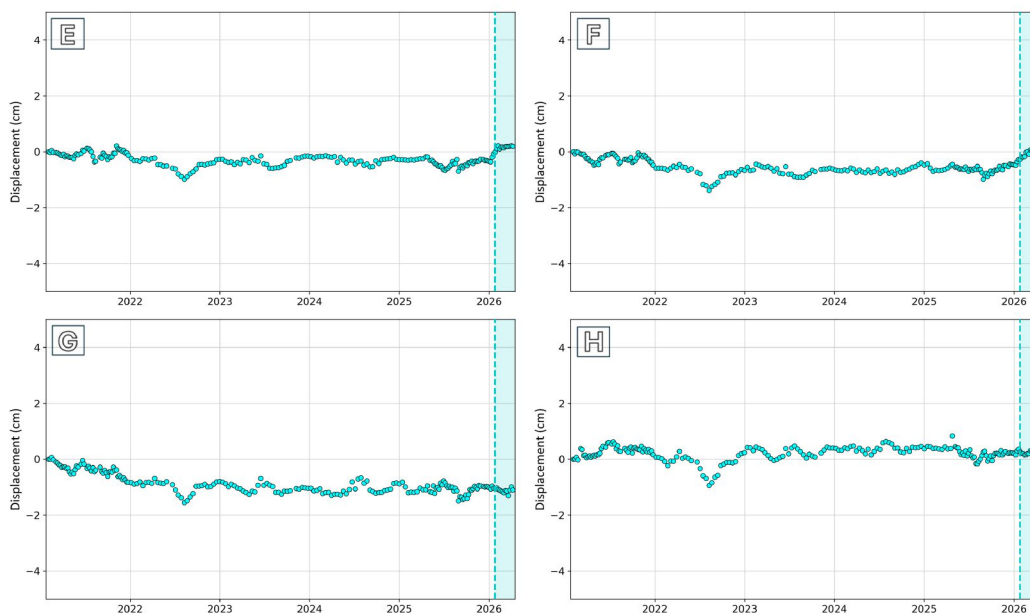
**Figura 61 -** Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 60. L'area ombreggiata azzurra indica il periodo post-frana.

In maniera speculare, tutta l'area sud di Niscemi è caratterizzata da MPs classificati in colore verde che presentano valori di spostamento all'interno della finestra di stabilità di  $\pm 0,5$  cm (Figura 62).

Le serie temporali dei punti selezionati (Figura 63), situati all'interno della fascia di interdizione vigente, mostrano nella maggior parte dei casi una tendenza stazionaria nella fase di post-evento (ultime dodici acquisizioni). Nello specifico, il punto E evidenzia un cambio brusco nella tendenza tra le acquisizioni pre- e post-evento, seguito da una fase di sostanziale stabilità. Il punto F presenta un andamento in avvicinamento al sensore nella parte terminale della serie temporale di spostamento, pur mostrando una stabilizzazione nelle ultime acquisizioni. I restanti punti non evidenziano variazioni significative in seguito all'evento.



**Figura 62 -** Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1, elaborati con tecnica SBAS, nella zona sud in geometria ascendente nell'intervallo temporale 31 gennaio - 7 aprile 2026. In Figura 63 le serie temporali dei punti considerati. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.



**Figura 63 -** Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 62. L'area ombreggiata azzurra indica il periodo post-frana.

La Figura 64 illustra la mappa di spostamento, osservata dai dati interferometrici acquisiti dalla costellazione Sentinel-1 e processati tramite l'algoritmo SBAS, nell'intervallo temporale compreso tra il 7 febbraio e l'8 aprile 2026, per la geometria discendente, nel settore nord di Niscemi. I punti di misura sono visualizzati in base allo spostamento registrato nel periodo coperto dalle acquisizioni, mediante la scala di colori graduati centrata sul valore zero di spostamento.

La finestra di stabilità è stata posta pari a  $\pm 0,5$  cm tenendo conto della precisione della tecnica interferometrica e della deviazione standard dell'intero *dataset*. Anche in questo caso, tutta l'area nord di Niscemi, incluso l'abitato all'interno della fascia di interdizione, è caratterizzata da MPs classificati in colore verde che presentano valori di spostamento all'interno della finestra di stabilità di  $\pm 0,5$  cm.

L'esame delle serie temporali di spostamento (Figura 65), riferite all'intero intervallo di acquisizione disponibile (3 febbraio 2021 - 8 aprile 2026) e quindi comprensive delle fasi precedenti e successive agli eventi di gennaio 2026, mette in luce nel punto D una variazione netta del segnale interferometrico in corrispondenza dell'evento, interpretabile come discontinuità tra l'ultima acquisizione pre-frana e la prima post-frana. Il punto A nella fase post-evento mostra una deformazione con valori di spostamento cumulato prossimi a 2 cm, tuttavia le ultime acquisizioni evidenziano una tendenza alla stabilizzazione. Nei punti B e C non si notano variazioni sulla tendenza generale.

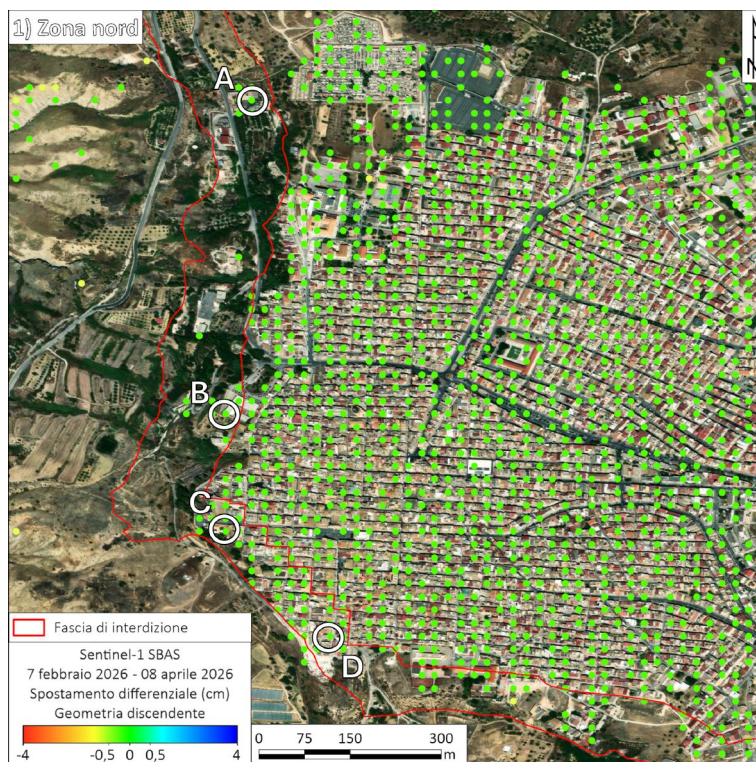


Figura 64 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1, elaborati con tecnica SBAS, nella zona nord in geometria discendente nell'intervallo temporale 7 febbraio - 8 aprile 2026. In Figura 65 le serie temporali dei punti considerati. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.

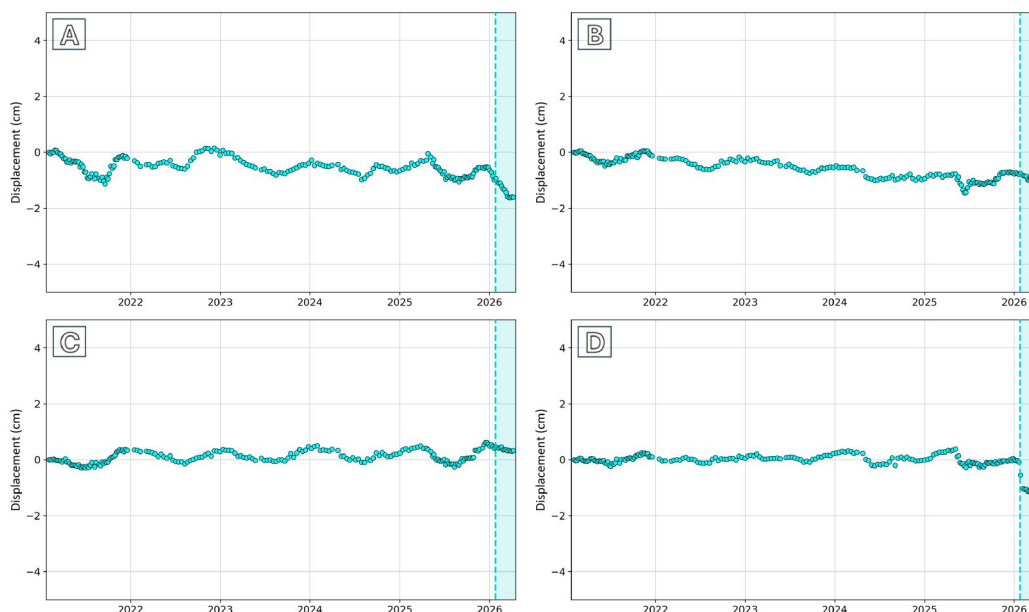
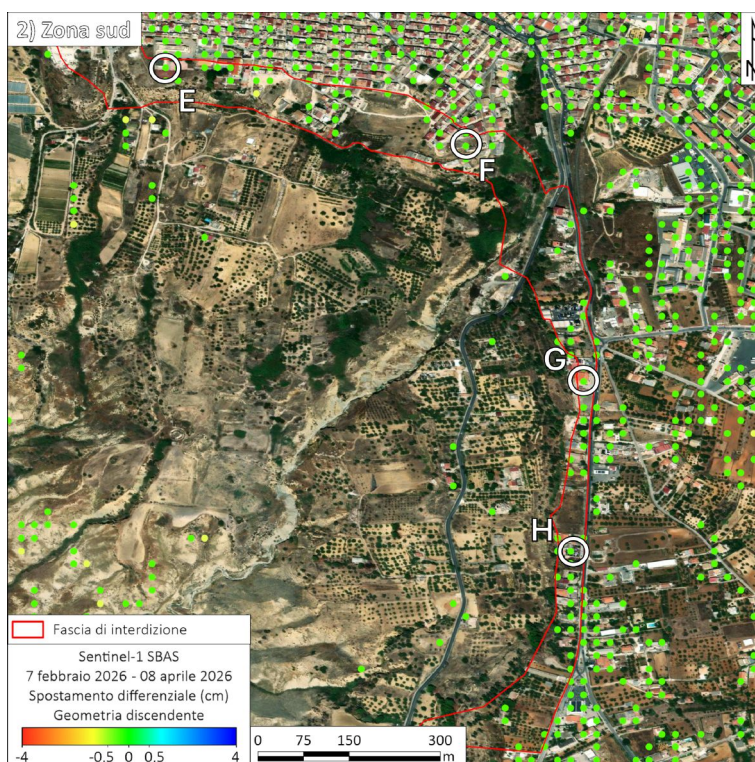


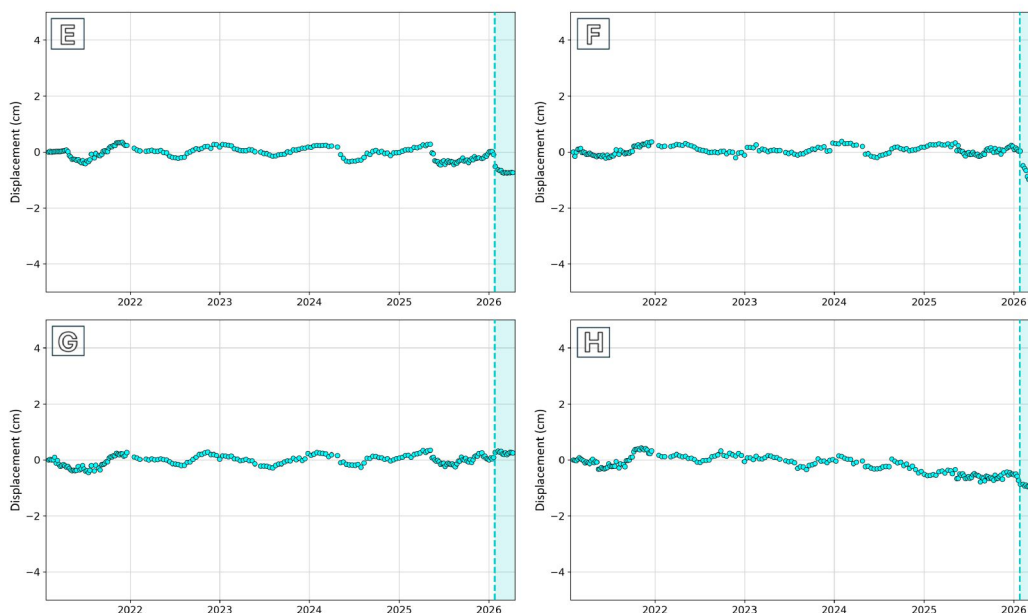
Figura 65 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 64. L'area ombreggiata azzurra indica il periodo post-frana.

Analogamente, anche per il dato discendente, tutta l'area sud di Niscemi è caratterizzata da MPs classificati in colore verde che presentano valori di spostamento all'interno della finestra di stabilità di  $\pm 0,5$  cm (Figura 66).

Le serie temporali dei punti selezionati (Figura 67), situati all'interno della fascia di interdizione, mostrano, nel caso dei punti E ed F, un cambio brusco nella tendenza tra le acquisizioni pre- e post-evento, seguito da una tendenza alla stabilizzazione nella fase post-frana. Nel caso dei punti G e H, la tendenza non sembra subire variazioni significative riconducibili agli eventi. In particolare, il punto G è caratterizzato da un andamento sostanzialmente stabile per l'intero periodo, mentre il punto H mostra una moderata tendenza all'allontanamento precedente agli eventi di gennaio 2026.



**Figura 66 -** Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1, elaborati con tecnica SBAS, nella zona sud in geometria discendente nell'intervallo temporale 7 febbraio - 27 marzo 2026. In Figura 67 le serie temporali dei punti considerati. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.



**Figura 67 -** Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 66. L'area ombreggiata azzurra indica il periodo post-frana.

#### 4.5.4 COSMO-SkyMed - elaborazione con tecnica SBAS

La Figura 68 illustra la mappa di spostamento osservata dai dati interferometrici acquisiti dalla costellazione COSMO-SkyMed Seconda Generazione e processati tramite algoritmo SBAS, nell'intervallo temporale compreso tra il 1 febbraio e il 21 marzo 2026 per la geometria ascendente, nel settore nord di Niscemi.

I punti di misura sono visualizzati in funzione dello spostamento registrato nel periodo coperto dalle acquisizioni mediante l'uso della scala di colori graduati, centrata sul valore zero di spostamento.

La finestra di stabilità è stata posta  $\pm 0,5$  cm tenendo conto della precisione della tecnica interferometrica e della deviazione standard dell'intero *dataset*. Si precisa che la robustezza della stima interferometrica è strettamente correlata all'estensione temporale della serie di acquisizioni: per intervalli temporali più brevi, caratterizzati da un numero inferiore di immagini disponibili, aumenta l'incidenza del rumore residuo e, conseguentemente, la deviazione standard delle misure. In tali condizioni, la finestra di stabilità deve essere opportunamente ricalibrata, in modo coerente con il livello di incertezza associato al *dataset* considerato.

In generale, tutta l'area nord di Niscemi è caratterizzata da MPs che presentano valori di spostamento all'interno della finestra di stabilità di  $\pm 0,5$  cm.

Le serie temporali dei punti selezionati (Figura 68), riferite all'intero intervallo di acquisizione disponibile (13 gennaio 2022 - 21 marzo 2026) e quindi comprensive delle fasi antecedenti e successive all'evento di gennaio 2026, situati all'interno della fascia di interdizione vigente, mostrano andamenti prevalentemente stabili nella fase di post-evento, seppur caratterizzati da un lieve salto nella tendenza di spostamento tra le acquisizioni pre- e post-evento.

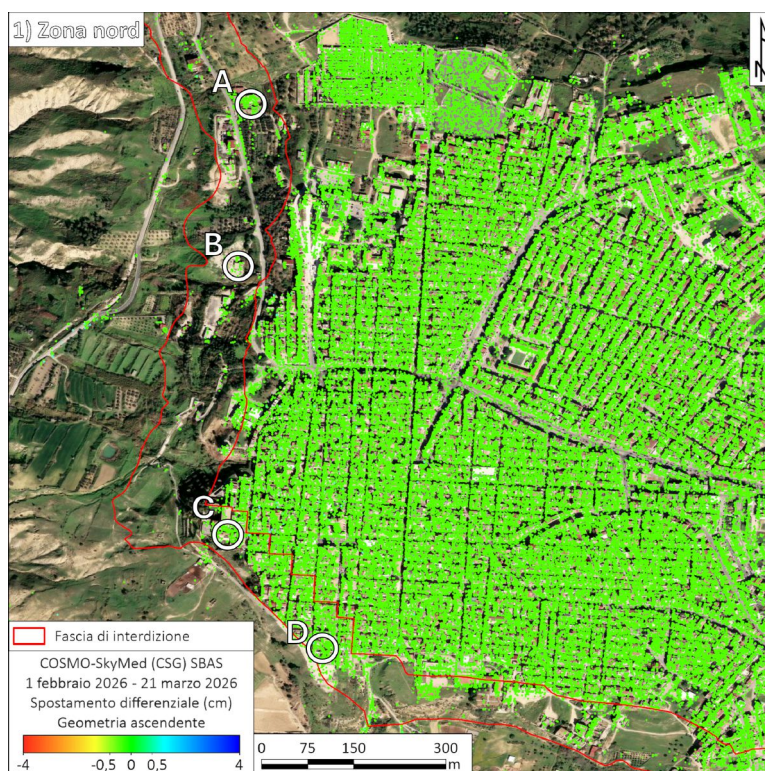
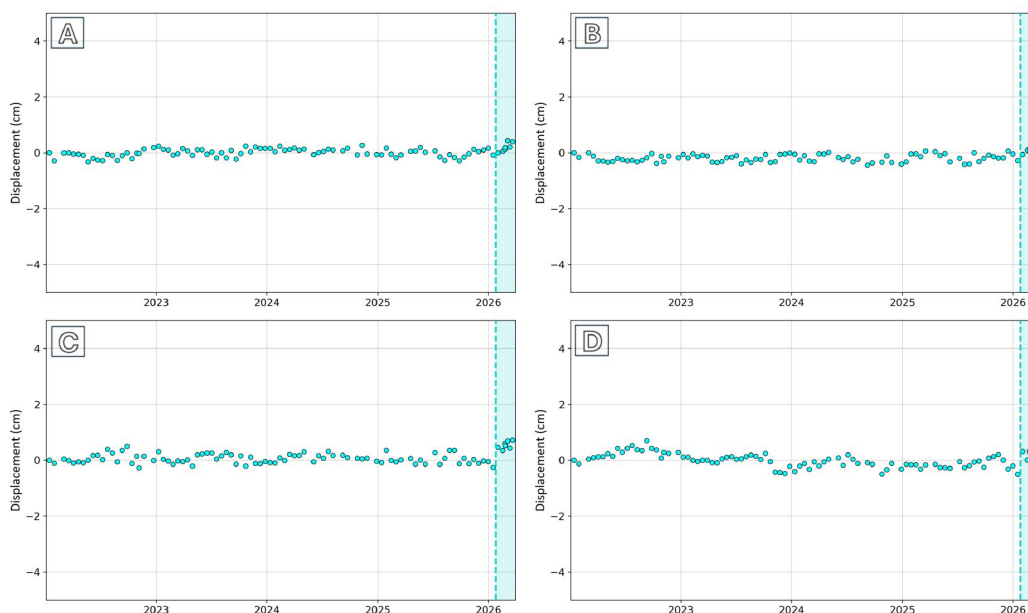


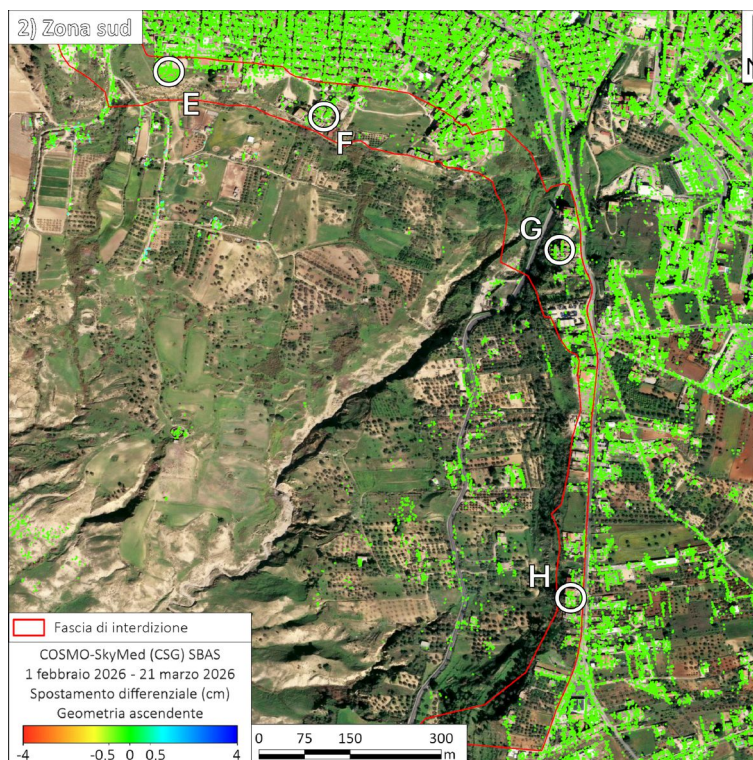
Figura 68 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati COSMO-SkyMed Seconda Generazione, elaborati con tecnica SBAS, nella zona nord in geometria ascendente nell'intervallo temporale 1 febbraio - 21 marzo 2026. In Figura 69 le serie temporali dei punti considerati. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.



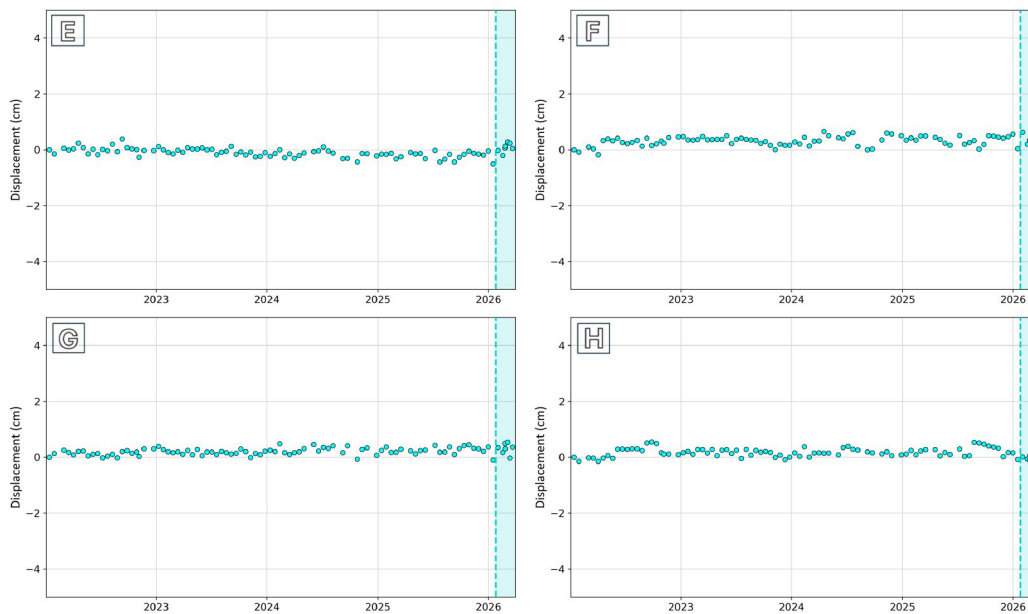
**Figura 69 - Serie temporali dei punti di misura evidenziati in Figura 68. L'area ombreggiata azzurra indica il periodo post-frana.**

Analogamente anche l'area sud del centro abitato di Niscemi è caratterizzata dalla maggioranza di MPs classificati in colore verde che presentano valori di spostamento all'interno della finestra di stabilità di  $\pm 0,5$  cm (Figura 70). Alcuni MPs classificati con colore giallo sono da considerarsi misure affette da rumore piuttosto che da misure effettive di spostamento. Gli MPs classificati in colore celeste che indicano movimento sono localizzati a sud della fascia di interdizione a valle della scarpata di frana.

Le serie temporali di spostamento dei punti di misura selezionati entro la fascia di interdizione mostrano una sostanziale stabilità nelle acquisizioni riferite all'intervallo temporale post-evento (Figura 71).



**Figura 70 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati COSMO-SkyMed Seconda Generazione, elaborati con tecnica SBAS, nella zona sud in geometria ascendente nell'intervallo temporale 1 febbraio - 21 marzo 2026. In Figura 71 le serie temporali dei punti considerati. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.**

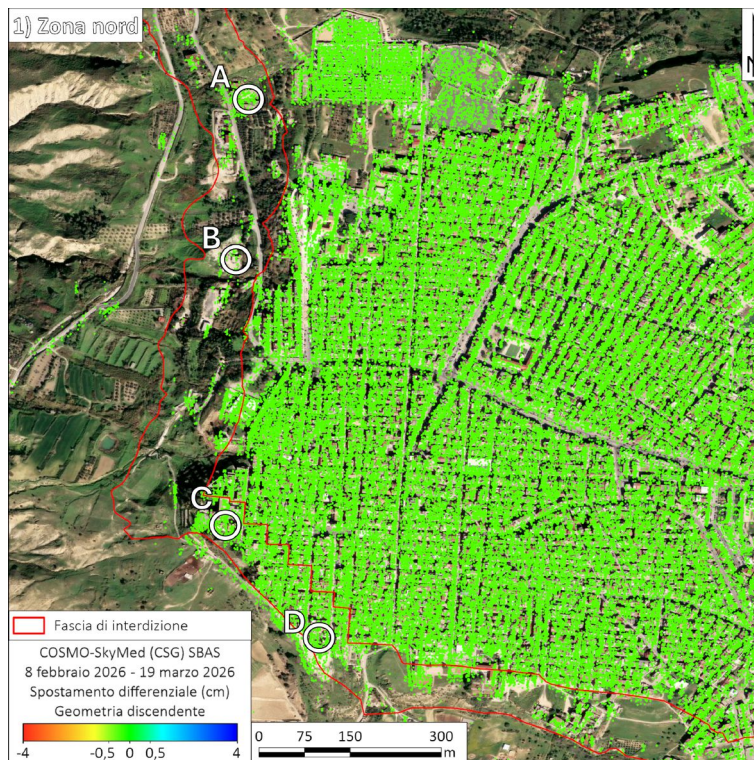


**Figura 71 - Serie temporali dei punti di misura evidenziati in Figura 70. L'area ombreggiata azzurra indica il periodo post-frana.**

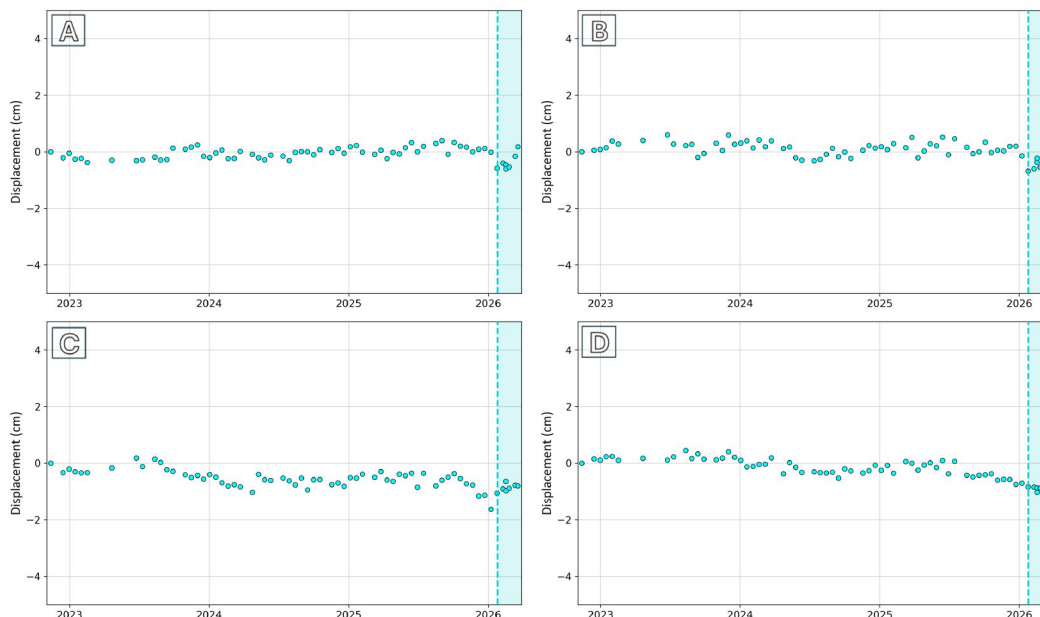
La Figura 72 illustra la mappa di spostamento osservata dai dati interferometrici acquisiti dalla costellazione COSMO-SkyMed Seconda Generazione e processati tramite l'algoritmo SBAS, nell'intervallo temporale compreso tra l'8 febbraio e il 19 marzo 2026, per la geometria discendente, nel settore nord di Niscemi.

Anche in questo caso, i punti di misura sono visualizzati in funzione dello spostamento registrato nel periodo coperto dalle acquisizioni, con finestra di stabilità posta a  $\pm 0,5$  cm. In generale, si conferma la valutazione effettuata con i dati ascendenti, cioè tutta l'area nord di Niscemi è caratterizzata da MPs classificati in colore verde che presentano valori di spostamento all'interno della finestra di stabilità di  $\pm 0,5$  cm.

Le serie temporali di spostamento dei punti di misura selezionati situati all'interno della fascia di interdizione (Figura 73) risultano generalmente stabili, seppur mostrando una lieve variazione in corrispondenza dell'evento, presumibilmente attribuibile al rumore.



**Figura 72 -** Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati COSMO-SkyMed Seconda Generazione, elaborati con tecnica SBAS, nella zona nord in geometria discendente nell'intervallo temporale 8 febbraio - 19 marzo 2026. In Figura 73 le serie temporali dei punti considerati. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.



**Figura 73 -** Serie temporali dei punti di misura evidenziati in Figura 72. L'area ombreggiata azzurra indica il periodo post-frana.

Similmente, anche l'area sud di Niscemi è caratterizzata dalla maggioranza di MPs in geometria discendente classificati in colore verde che presentano valori di spostamento all'interno della finestra di stabilità di  $\pm 0,5$  cm (Figura 74) e le serie temporali dei punti di misura (Figura 75) mostrano andamenti sostanzialmente stazionari nella fase post-evento, seppur condizionate da rumore.

Il punto F evidenzia una variazione dell'andamento in corrispondenza dell'evento, seguita da un'accelerazione verso valori di deformazione negativi.

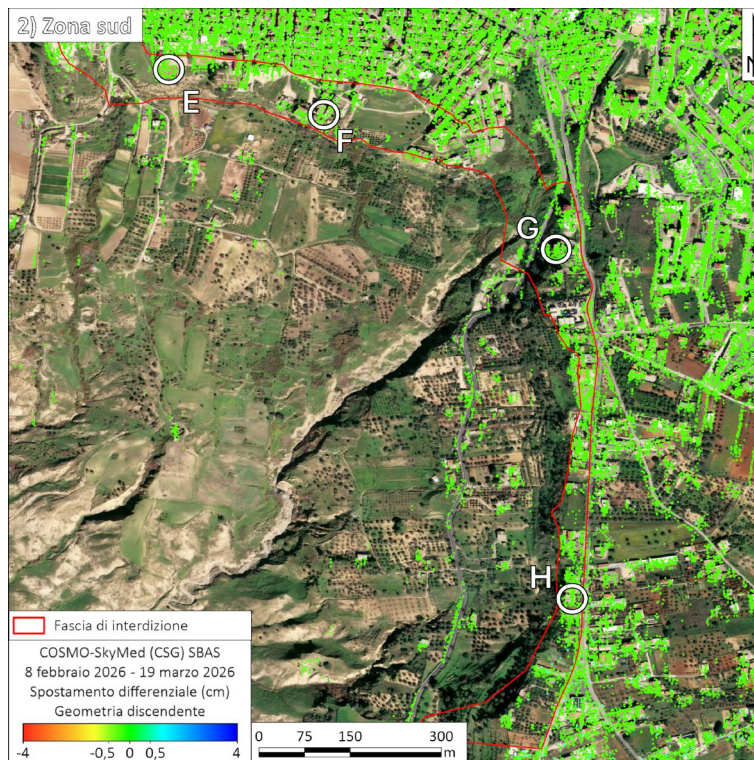


Figura 74 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati COSMO-SkyMed Seconda Generazione, elaborati con tecnica SBAS, nella zona sud in geometria discendente nell'intervallo temporale 8 febbraio - 19 marzo 2026. In Figura 75 le serie temporali dei punti considerati. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.

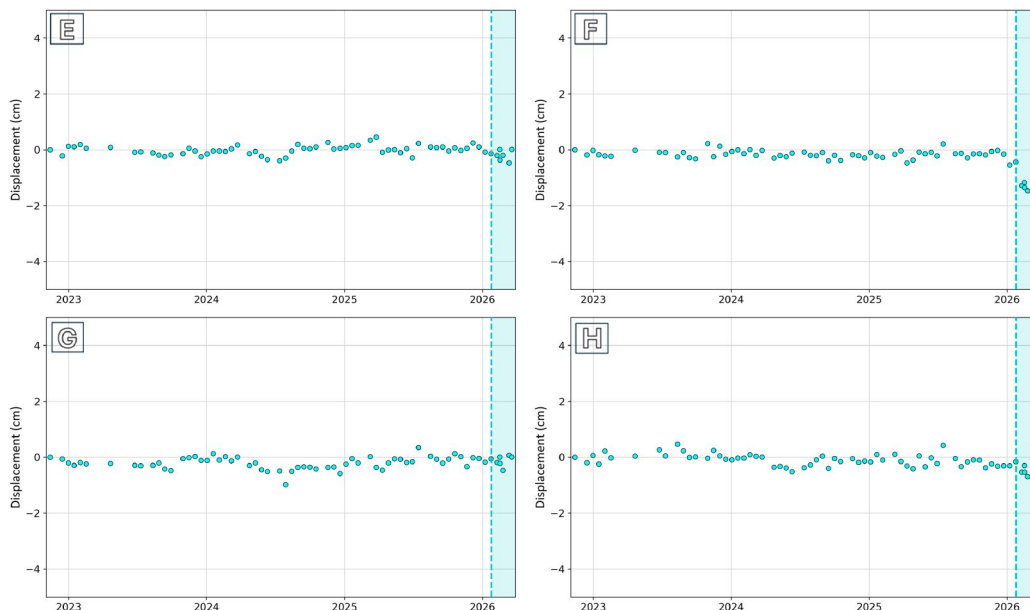


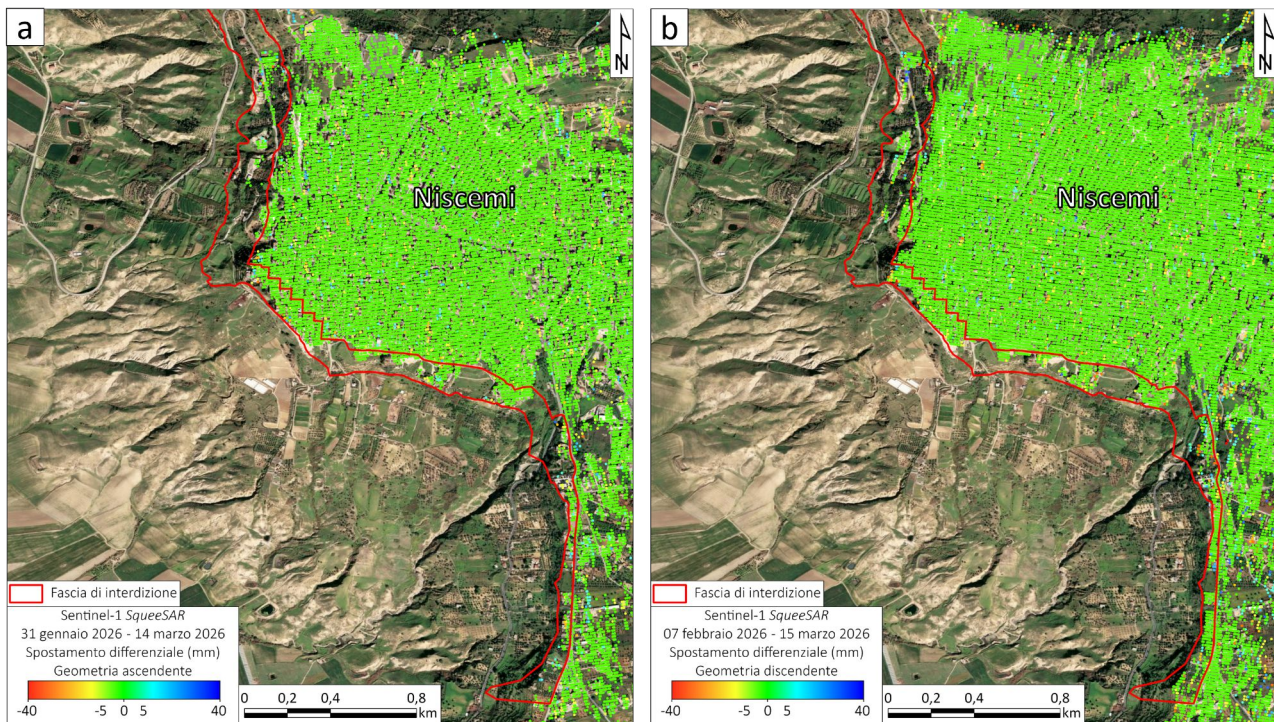
Figura 75 - Serie temporali dei punti di misura evidenziati in Figura 74. L'area ombreggiata azzurra indica il periodo post-frana.

#### 4.5.5 Sentinel-1 - elaborazione con tecnica SqueeSAR

La Figura 76 illustra la mappa di spostamento differenziale ottenuta dai dati interferometrici acquisiti dalla costellazione Sentinel-1 e processati tramite algoritmo SqueeSAR, nell'intervallo temporale compreso tra il 31 gennaio 2026 e il 14 marzo 2026 per la geometria ascendente e tra il 7 febbraio 2026 e il 15 marzo 2026 per la geometria discendente, nell'area di Niscemi.

I punti di misura sono visualizzati in funzione dello spostamento registrato nel periodo coperto dalle acquisizioni mediante l'uso della scala di colori graduati, centrata sul valore zero di spostamento.

La finestra di stabilità è stata posta pari a  $\pm 5$  mm anche per il presente *dataset*, per la serie di considerazioni menzionate precedentemente. In generale, tutta l'area di Niscemi è caratterizzata da un gran numero di PS classificati in colore verde che presentano valori di spostamento all'interno della finestra di stabilità di  $\pm 5$  m.



**Figura 76 -** Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1 nell'intervallo temporale 31 gennaio 2026 - 14 marzo 2026 in geometria ascendente (a) e nell'intervallo temporale 7 febbraio 2026 - 15 marzo 2026 in geometria discendente (b) elaborati con tecnica SqueeSAR. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.

L'analisi di dettaglio del settore settentrionale in geometria ascendente (Figura 77) evidenzia, nella fase successiva all'evento, un quadro sostanzialmente stabile all'interno della fascia di interdizione a monte della scarpata principale di frana. Sono presenti alcuni punti isolati al di fuori della finestra di stabilità, che pertanto non possono essere attribuibili a uno spostamento effettivo.

L'esame delle serie temporali di spostamento (Figura 78), relative all'intero intervallo di acquisizione disponibile (4 gennaio 2022 - 14 marzo 2026) e quindi comprensive delle fasi antecedenti e successive all'evento di gennaio 2026, mette in luce, nel caso del punto A, una tendenza caratterizzata da una significativa accelerazione, sebbene il segnale risulti parzialmente influenzato dal rumore di fondo.

Tale evidenza è coerente con l'ubicazione del punto nella fascia di interdizione a ridosso della scarpata. I punti B e C non mostrano significative variazioni di tendenza; il punto D evidenzia un'accelerazione nella porzione terminale del periodo osservato, la quale tuttavia non appare correlata temporalmente all'evento di frana di gennaio 2026.

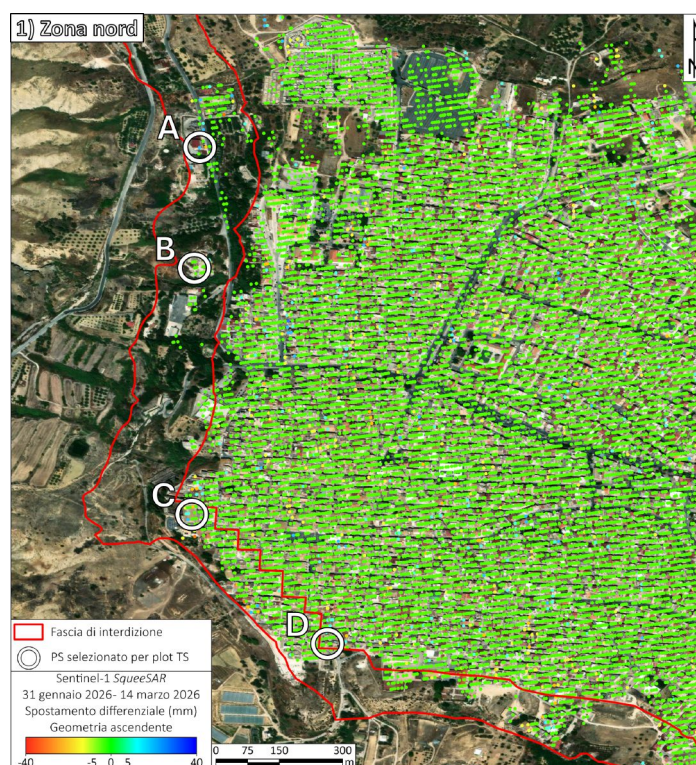


Figura 77 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1 in geometria ascendente, elaborati con tecnica SqueeSAR, nel settore nord di Niscemi. In Figura 78 le serie temporali dei PS qui evidenziati. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.

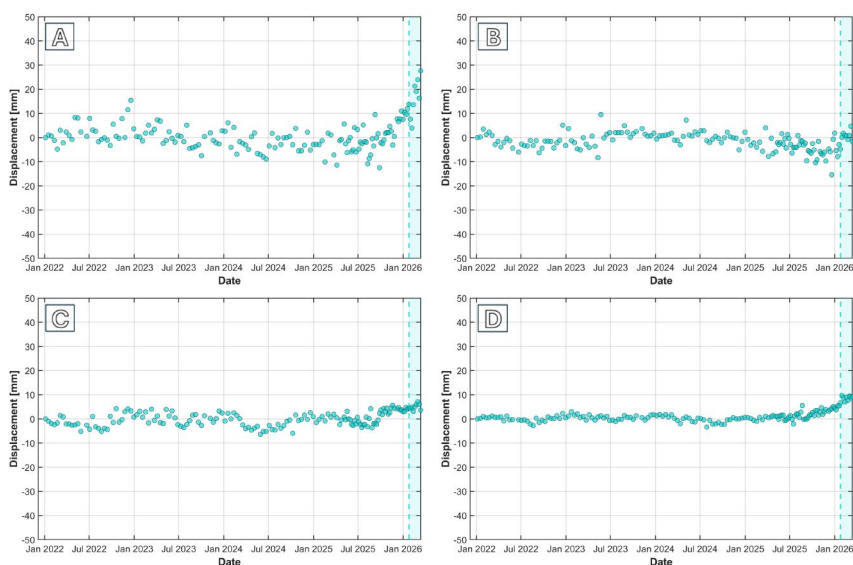


Figura 78 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 77. L'area ombreggiata azzurra indica il periodo post-frana.

L'analisi di dettaglio del settore meridionale in geometria ascendente (Figura 79) conferma che nella fase post-evento non ci siano significativi spostamenti all'interno della fascia di interdizione a monte della scarpata principale di frana. Nella zona a sud-est, lungo la SP11, si evidenziano PS con valori di spostamento al di fuori della finestra di stabilità. Tale tendenza sarà oggetto di ulteriori valutazioni mediante le successive acquisizioni.

L'esame delle serie temporali di spostamento (Figura 80), riferite all'intero intervallo di acquisizione disponibile (4 gennaio 2022 - 14 marzo 2026) e quindi comprensive delle fasi antecedenti e successive all'evento di gennaio 2026, evidenzia nei punti E ed F una lieve accelerazione a partire dalla data dell'evento di gennaio 2026. Il punto G mostra un progressivo assestamento; la serie temporale di spostamento del punto H evidenzia un andamento affetto da rumore, un'eventuale accelerazione verrà verificata con le prossime acquisizioni.

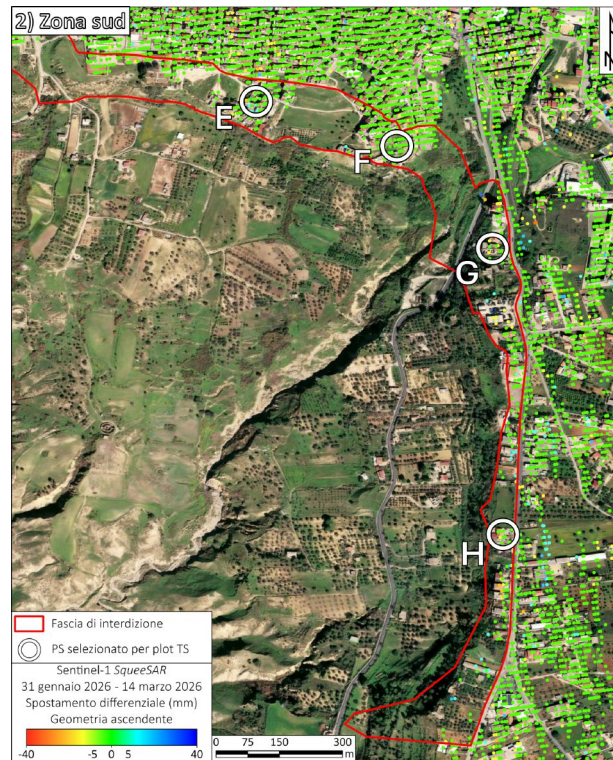


Figura 79 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1 in geometria ascendente, elaborati con tecnica SqueeSAR, nel settore sud di Niscemi. In Figura 80 le serie temporali dei PS qui evidenziati. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.

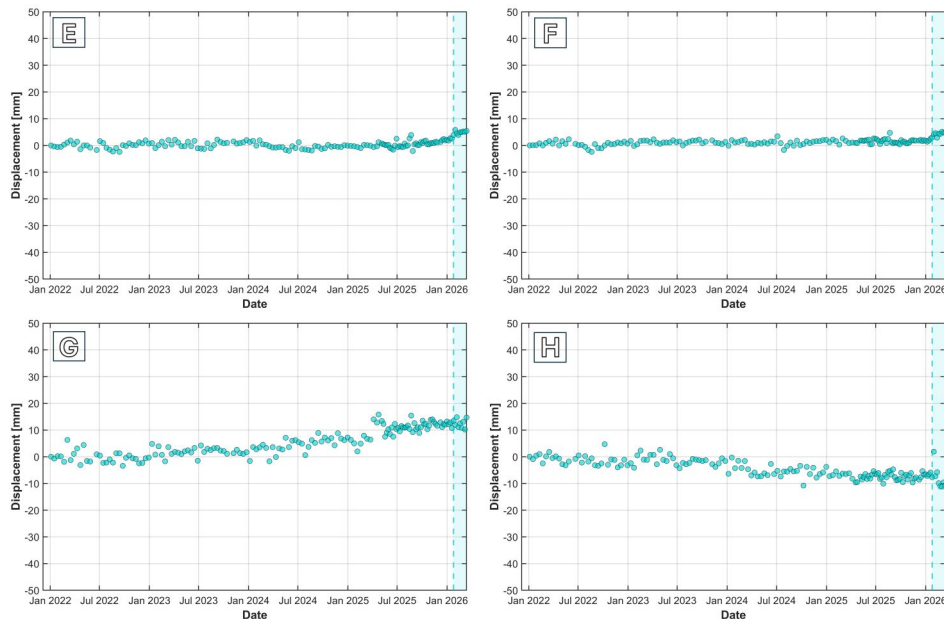
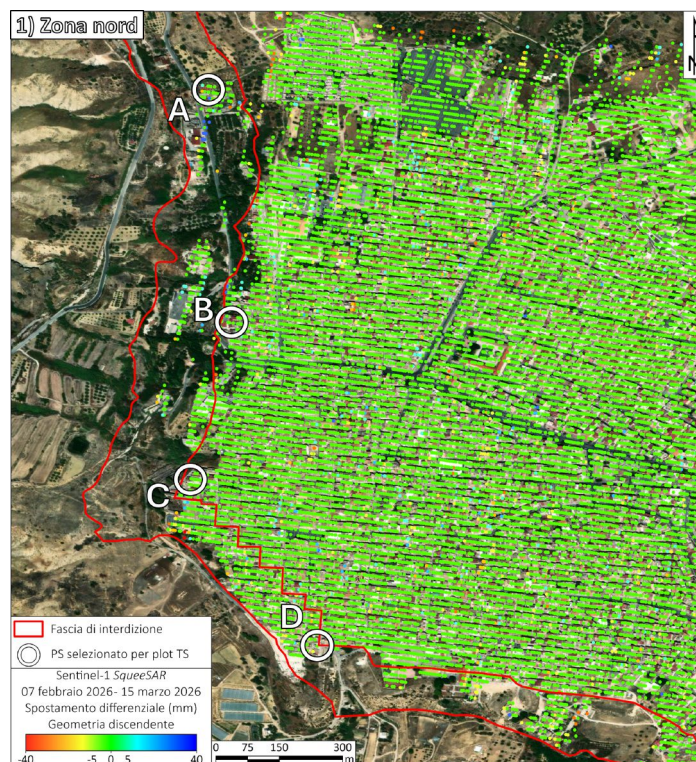


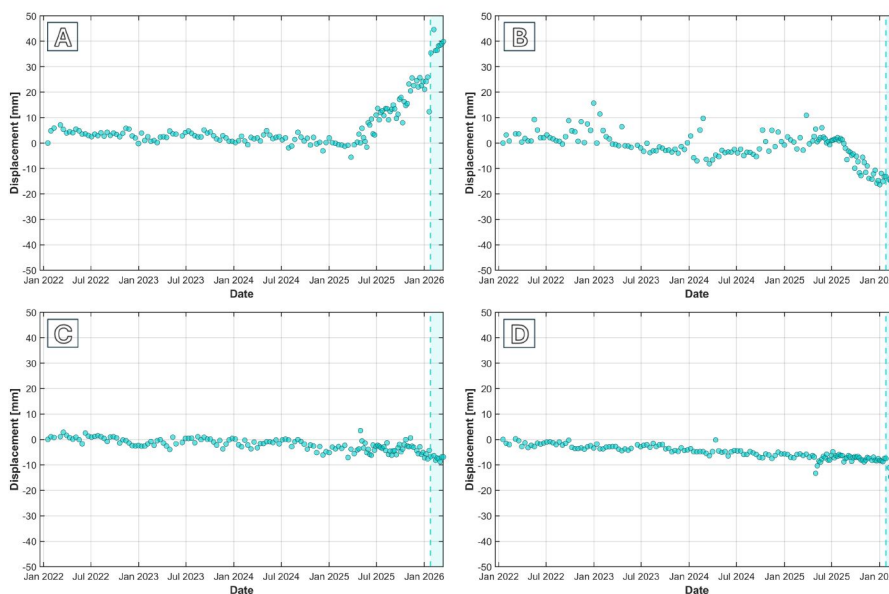
Figura 80 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 79. L'area ombreggiata azzurra indica il periodo post-frana.

L'analisi di dettaglio in geometria discendente dell'area a nord del centro abitato di Niscemi (Figura 81) conferma quanto rilevato dai dati in geometria ascendente. Si evidenzia infatti un quadro sostanzialmente stabile nella fase successiva all'evento.

Le serie temporali di spostamento (Figura 82), riferite all'intero intervallo di acquisizione disponibile (17 gennaio 2022 - 15 marzo 2026) e quindi comprensive degli eventi di gennaio 2026, non mostrano, ad esclusione del punto D, particolari deviazioni dalla tendenza generale nel periodo post-frana sebbene si registri una crescente deformazione. Nel punto D si registra un'accelerazione in corrispondenza dell'evento di frana.



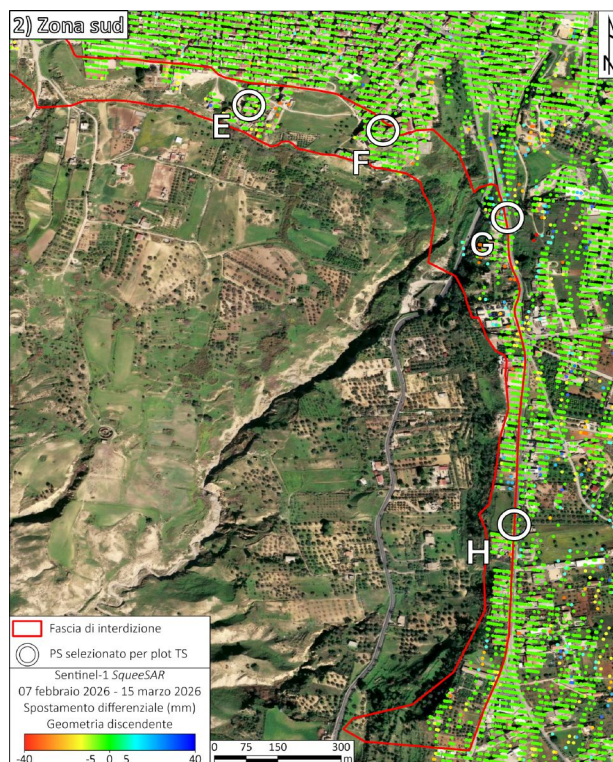
**Figura 81 -** Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1 in geometria discendente, elaborati con tecnica SqueeSAR, nel settore nord di Niscemi. In Figura 82 le serie temporali dei PS qui evidenziati. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.



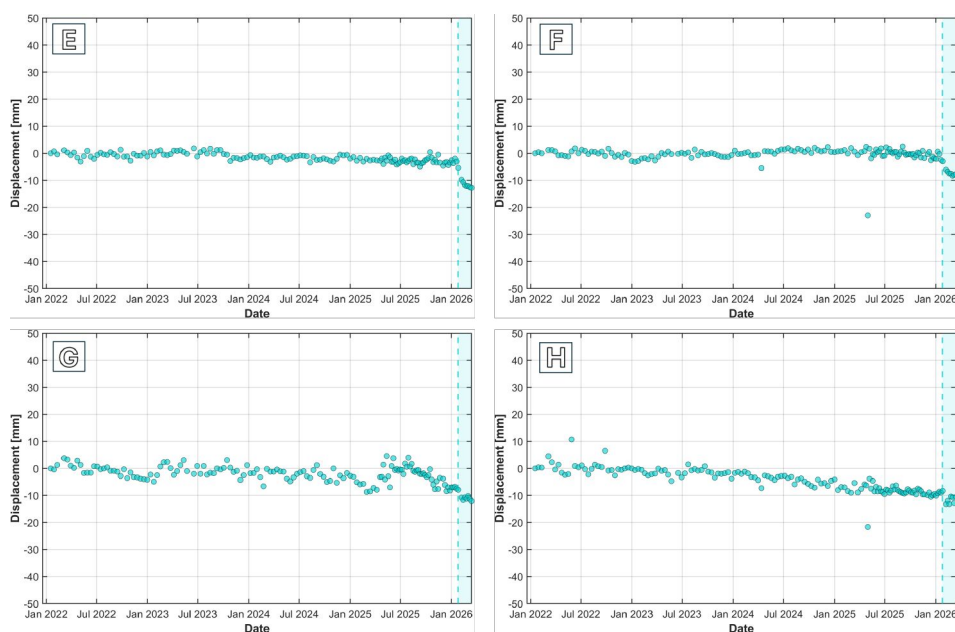
**Figura 82 -** Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 81. L'area ombreggiata azzurra indica il periodo post-frana.

In Figura 83 è riportata la mappa degli spostamenti differenziali in corrispondenza del settore meridionale del centro abitato di Niscemi. Gli spostamenti misurati tra il 7 febbraio 2026 e il 15 marzo 2026 in geometria discendente confermano l'assenza di spostamenti significativi all'interno della fascia di interdizione, con valori all'interno della finestra di stabilità.

L'esame delle serie temporali di spostamento (Figura 84), riferite all'intero intervallo di acquisizione disponibile (17 gennaio 2022 - 15 marzo 2026) e quindi comprensive delle fasi antecedenti e dell'evento stesso di gennaio 2026, mostra in alcuni punti (punti E ed F) una variazione repentina in corrispondenza dell'evento di gennaio 2026.



**Figura 83 -** Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1 in geometria discendente, elaborati con tecnica SqueeSAR, nel settore sud di Niscemi. In Figura 84 le serie temporali dei PS qui evidenziati. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.



**Figura 84 -** Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 83. L'area ombreggiata azzurra indica il periodo post-frana.

In data 27 febbraio 2026 è stato svolto un sopralluogo diretto nella zona del punto E che ha permesso di stabilire che il movimento è presumibilmente attribuibile a problemi strutturali e bassa qualità degli edifici (Figura 85). Tale ipotesi risulta confermata dall'assenza di avvallamenti e fessurazioni sul piano stradale.



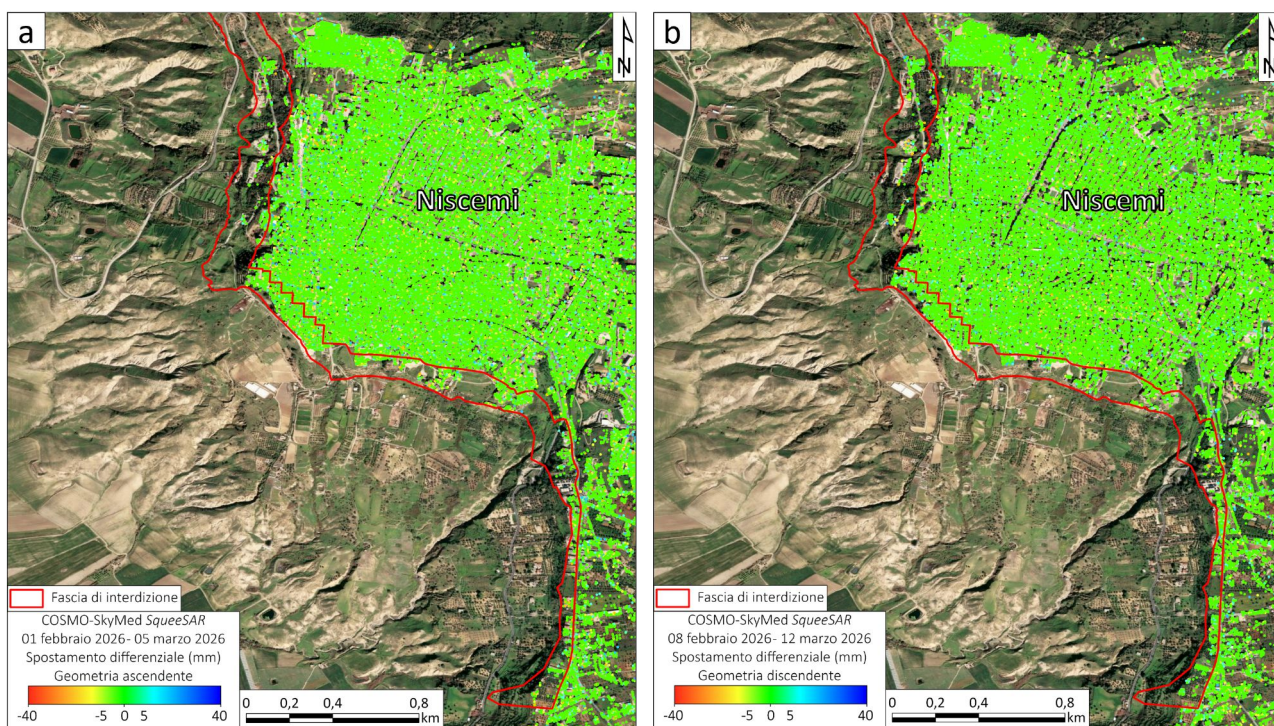
**Figura 85 - Edifici nella zona del punto E. Fabbricato in cemento armato con tamponamenti in laterizio, incompleto e privo di finiture (a); fabbricato interessato da vistose fessurazioni riconducibili a problemi strutturali e alla scarsa qualità costruttiva (b).**

#### 4.5.6 COSMO-SkyMed - elaborazione con tecnica SqueeSAR

La Figura 86 illustra le mappe di spostamento differenziale stimato dai dati radar satellitari acquisiti dalla costellazione COSMO-SkyMed Seconda Generazione e processati tramite algoritmo SqueeSAR. Lo spostamento differenziale è relativo all'intervallo temporale compreso tra il 1 febbraio e il 5 marzo 2026 in geometria ascendente e tra l'8 febbraio e il 12 marzo 2026 in geometria discendente.

I punti di misura sono visualizzati in funzione dello spostamento registrato nel periodo coperto dalle acquisizioni mediante l'uso della scala di colori graduati, centrata sul valore zero di spostamento.

La finestra di stabilità è stata posta  $\pm 5$  mm anche per il presente *dataset* elaborato con tecnica SqueeSAR, per la serie di considerazioni menzionate precedentemente. In generale, tutta l'area di Niscemi è caratterizzata da un gran numero di PS classificati in colore verde che presentano valori di spostamento all'interno della finestra di stabilità di  $\pm 5$  mm.



**Figura 86 -** Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati COSMO-SkyMed nell'intervallo temporale 1 febbraio 2026 - 5 marzo 2026 in geometria ascendente (a) e nell'intervallo temporale 8 febbraio 2026 - 12 marzo 2026 in geometria discendente (b) elaborati con tecnica SqueeSAR. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.

L'analisi di dettaglio del settore settentrionale in geometria ascendente (Figura 87) evidenzia, nella fase successiva all'evento, un quadro sostanzialmente stabile all'interno della fascia di interdizione a monte della scarpata di frana.

L'esame delle serie temporali di spostamento (Figura 88), riferite all'intero intervallo di acquisizione disponibile (17 agosto 2011 - 5 marzo 2026) e quindi comprensive delle fasi antecedenti e successive all'evento di gennaio 2026, mostra andamenti stazionari nella fase post-evento, costituita da quattro acquisizioni, anche se in alcuni casi (punti A e C) affetti da rumore. La tendenza all'accelerazione riscontrabile nel punto D sarà oggetto di valutazione mediante le prossime acquisizioni.

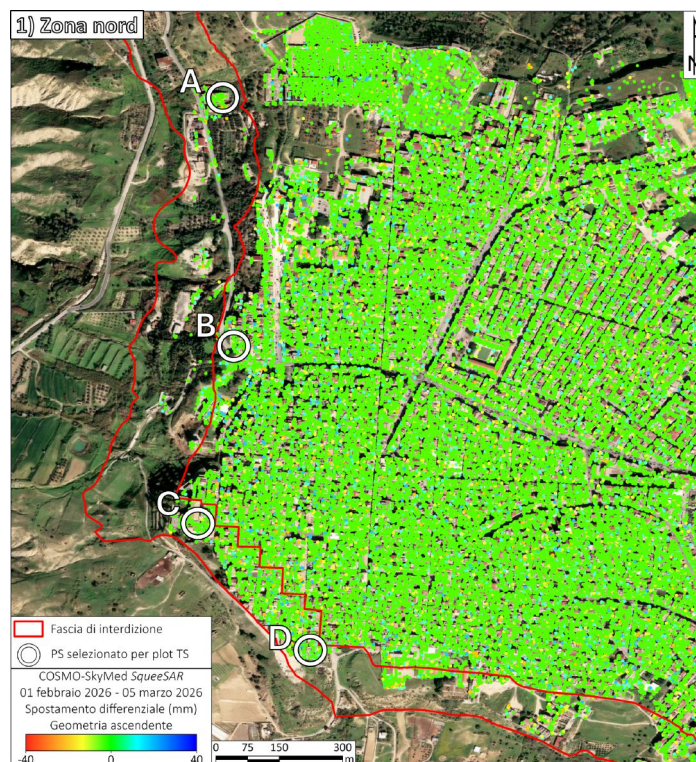


Figura 87 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati COSMO-SkyMed in geometria ascendente, elaborati con tecnica SqueeSAR, nel settore nord di Niscemi. In Figura 88 le serie temporali dei PS qui evidenziati. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.

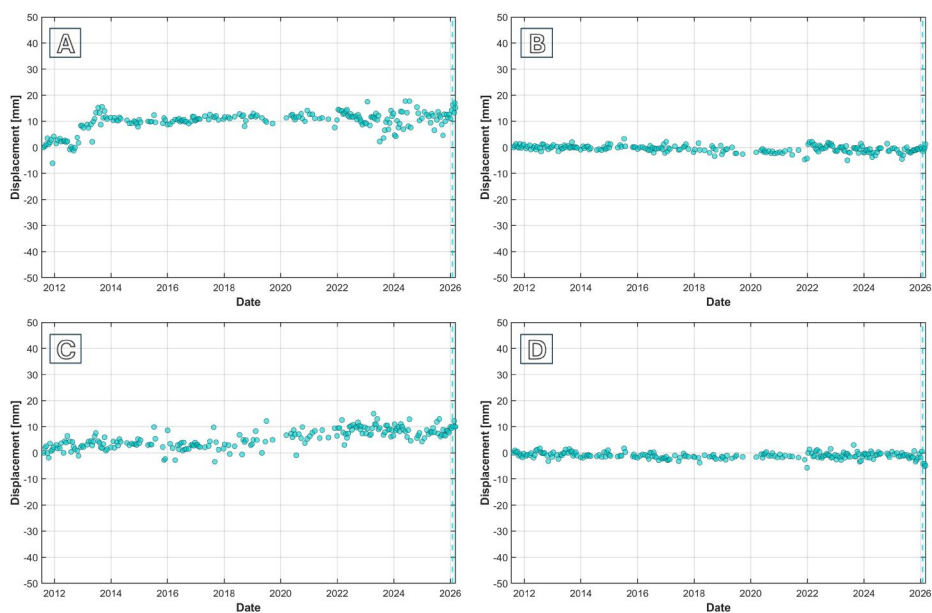


Figura 88 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 87. L'area ombreggiata azzurra indica il periodo post-frana.

Il settore meridionale in geometria ascendente mostra in generale una sostanziale stabilità nella fase post-evento (Figura 89).

Dall'analisi delle serie temporali di spostamento (Figura 90), riferite all'intero intervallo di acquisizione disponibile (17 agosto 2011 - 5 marzo 2026) e quindi comprensive delle fasi antecedenti e successive all'evento di gennaio 2026, non si notano variazioni significative di tendenza in corrispondenza e dopo l'evento di frana di gennaio 2026.

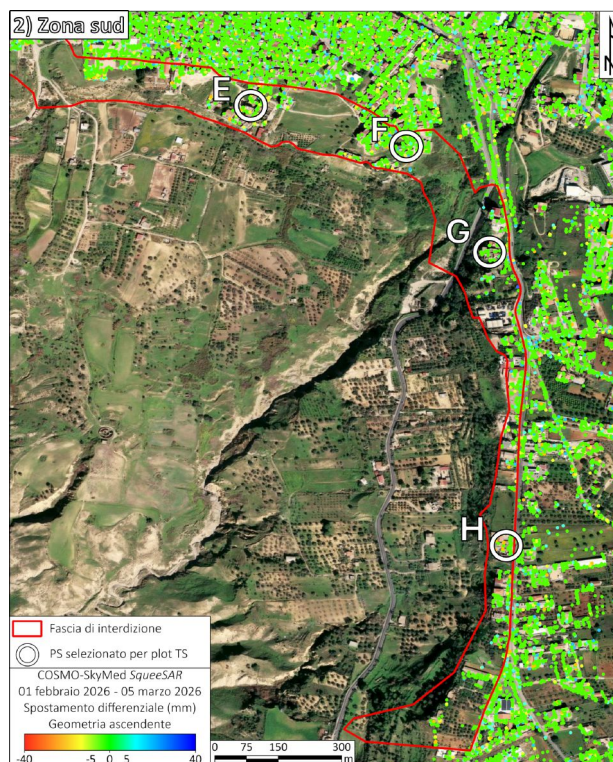


Figura 89 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati COSMO-SkyMed in geometria ascendente, elaborati con tecnica SqueeSAR, nel settore sud di Niscemi. In Figura 90 le serie temporali dei PS qui evidenziati. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.

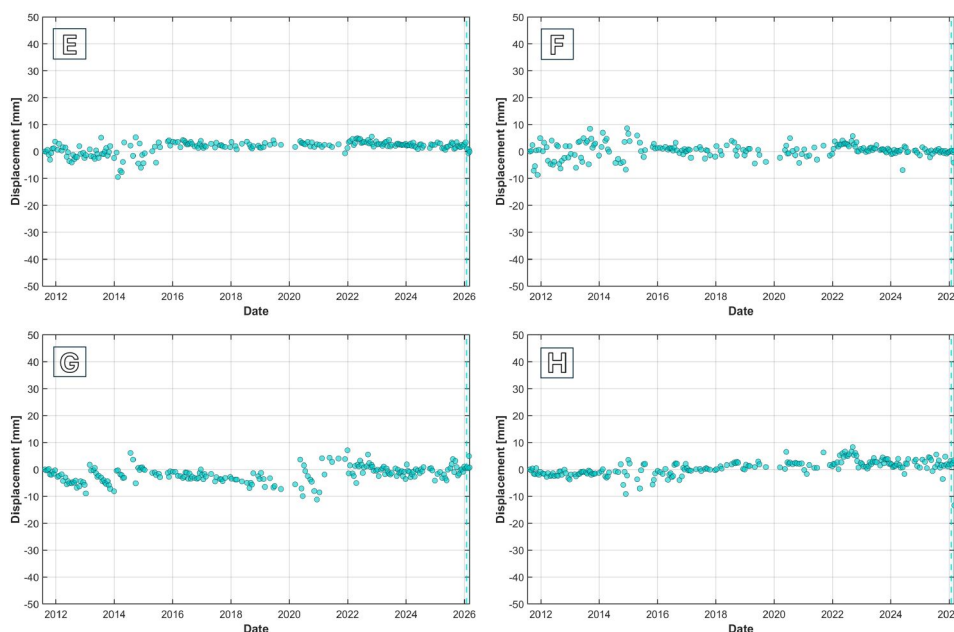


Figura 90 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 89. L'area ombreggiata azzurra indica il periodo post-frana.

L'analisi di dettaglio del settore settentrionale (Figura 91) coi dati COSMO-SkyMed discendenti conferma, nella fase successiva all'evento, una situazione di sostanziale stabilità.

Dall'esame delle serie temporali di spostamento (Figura 92), riferite all'intero intervallo di acquisizione disponibile (1 settembre 2015 - 12 marzo 2026) e quindi comprensive delle fasi antecedenti e successive all'evento di gennaio 2026, si osserva nei punti A e D una netta variazione del segnale interferometrico in corrispondenza dell'evento di frana. Tuttavia, si rende necessario il proseguimento delle acquisizioni per poter definire con maggior rigore l'evoluzione della tendenza post-evento e distinguere le reali dinamiche cinematiche dal rumore.

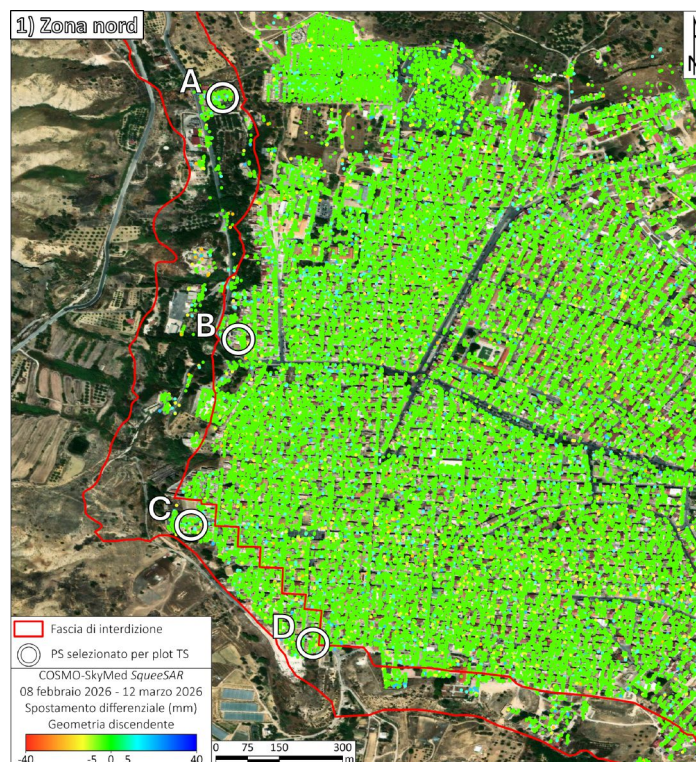


Figura 91 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati COSMO-SkyMed in geometria discendente, elaborati con tecnica SqueeSAR, nel settore nord di Niscemi. In Figura 92 le serie temporali dei PS qui evidenziati. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.

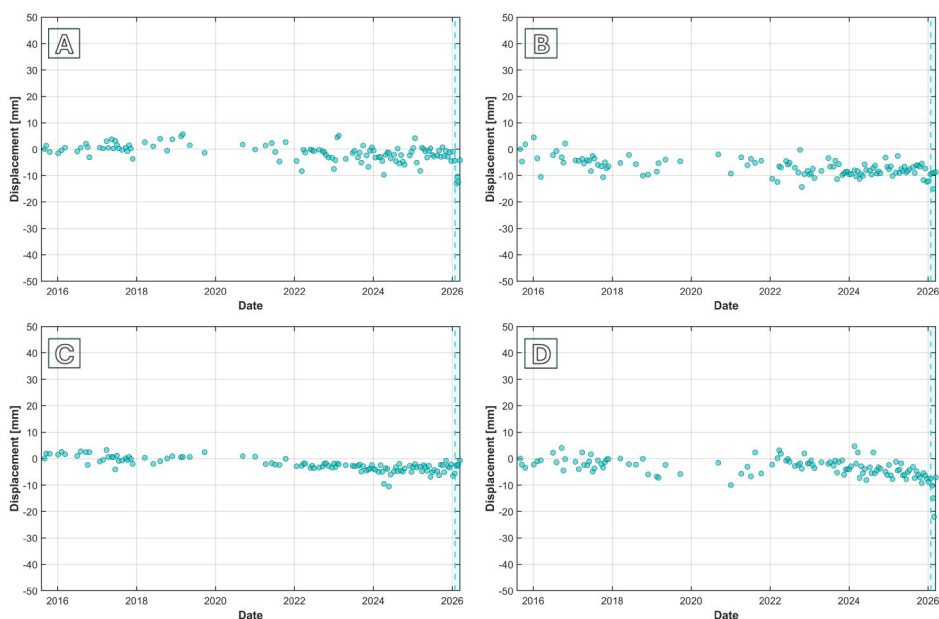


Figura 92 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 91. L'area ombreggiata azzurra indica il periodo post-frana.

L'analisi di dettaglio del settore meridionale (Figura 93) conferma che nella fase post-evento non ci siano significativi spostamenti.

L'esame delle serie temporali di spostamento (Figura 94), riferite all'intero intervallo di acquisizione disponibile (01 settembre 2015 - 12 marzo 2026) e quindi comprensive delle fasi antecedenti e successive all'evento di gennaio 2026, evidenzia nei punti E ed F una variazione della tendenza in corrispondenza dell'evento. Al contrario, i punti G ed H mantengono un andamento sostanzialmente stabile, non mostrando deviazioni significative rispetto alla tendenza pre-evento.

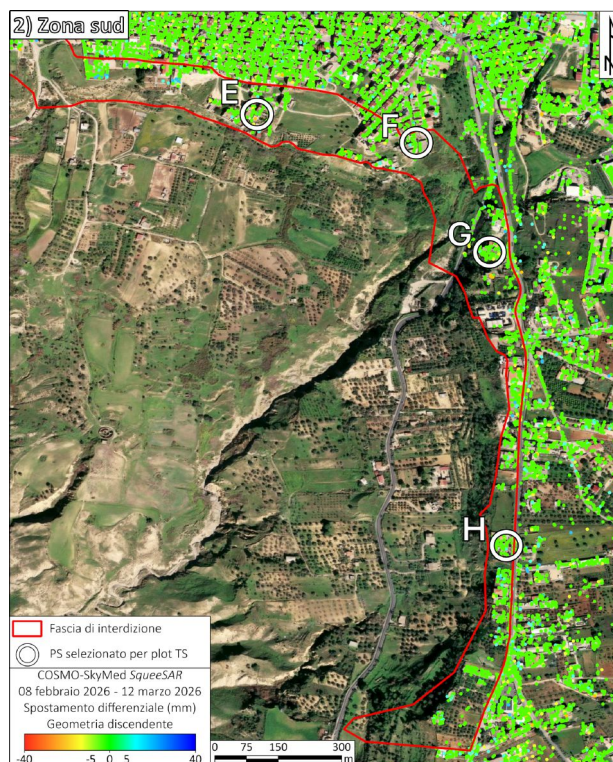


Figura 93 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati COSMO-SkyMed in geometria discendente, elaborati con tecnica SqueeSAR, nel settore sud di Niscemi. In Figura 94 le serie temporali dei PS qui evidenziati. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.

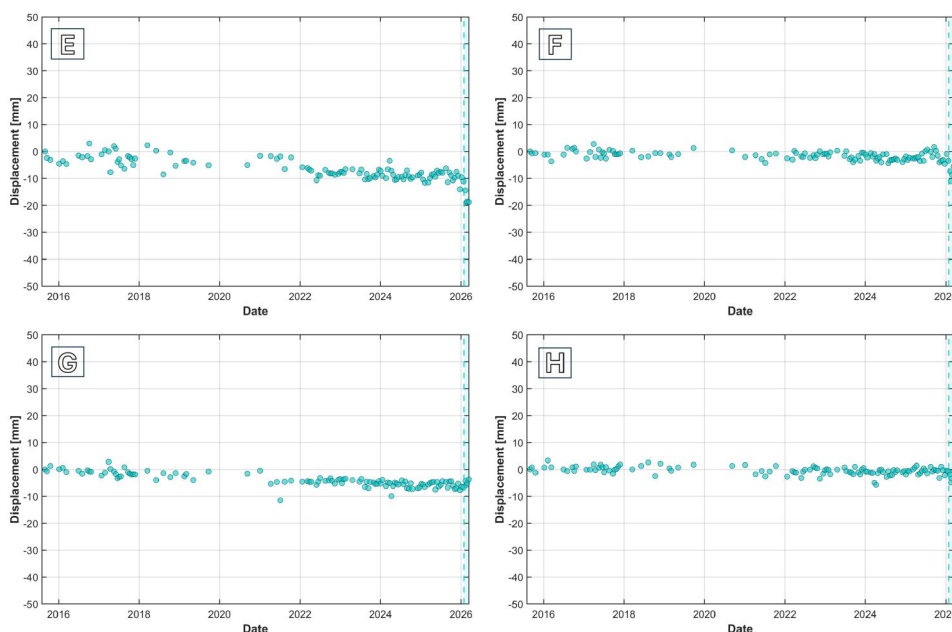


Figura 94 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 93. L'area ombreggiata azzurra indica il periodo post-frana.

#### 4.5.7 Sentinel-1 - elaborazione con tecnica Dynamic InSAR

L'analisi dei dati Sentinel-1, elaborati mediante la tecnica Dynamic InSAR, è stata focalizzata sui settori ubicati a valle del centro abitato di Niscemi, con particolare riferimento ai corpi di frana attivati nel gennaio 2026.

I punti di misura riportati in Figura 95, relativi ai dati Sentinel-1 acquisiti in geometria ascendente, evidenziano una netta differenziazione tra il settore settentrionale, caratterizzato da un quadro complessivamente stabile, e quello meridionale, dove si rilevano ancora movimenti residui distribuiti in diversi comparti del corpo di frana. I punti sono rappresentati in funzione dello spostamento registrato

nell'intervallo temporale 31 gennaio 2026 - 14 marzo 2026, attraverso una scala cromatica graduata centrata sul valore nullo di spostamento lungo la linea di vista (LOS) del satellite.

Nel dettaglio, il settore nord non mostra variazioni significative nel periodo post-evento considerato, mentre nel settore centrale si osservano valori negativi (allontanamento). Tali entità di spostamento rientrano tuttavia nell'ordine di grandezza dell'incertezza associata alla tecnica Dynamic InSAR, che in intervalli temporali brevi può raggiungere alcuni millimetri (fino a circa 5 mm).

Diversamente, il settore meridionale evidenzia aree con deformazioni ancora apprezzabili. In particolare, si riconoscono porzioni con spostamenti fino a -25 mm immediatamente a valle del quartiere Sante Croci e lungo il versante in corrispondenza di aree a morfologia calanchiva.

L'analisi delle serie temporali di spostamento (Figura 96), relative ai punti di misura selezionati, conferma per i punti A, E ed F un quadro di sostanziale stabilità, non evidenziando tendenze deformative significative nel periodo post-evento. Diversamente, il punto B, situato nella porzione sommitale in prossimità del quartiere Sante Croci, mostra una tendenza pressoché lineare in avvicinamento al sensore, con uno spostamento cumulato di circa 20 mm. I punti C e D, localizzati nel corpo di frana centrale, evidenziano una tendenza in allontanamento dal sensore, con una progressiva stabilizzazione, particolarmente evidente nel punto D in corrispondenza delle ultime acquisizioni disponibili.

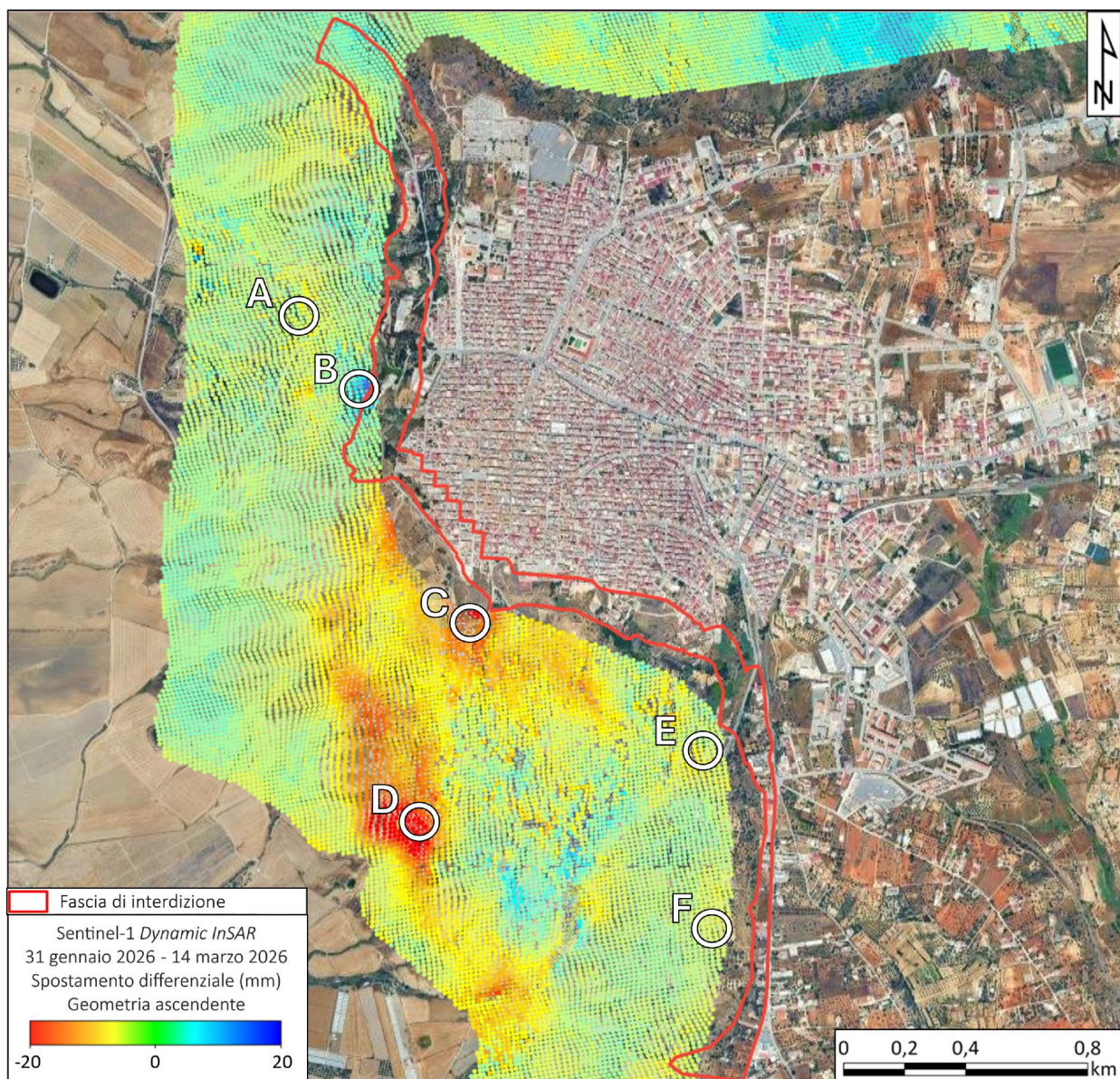
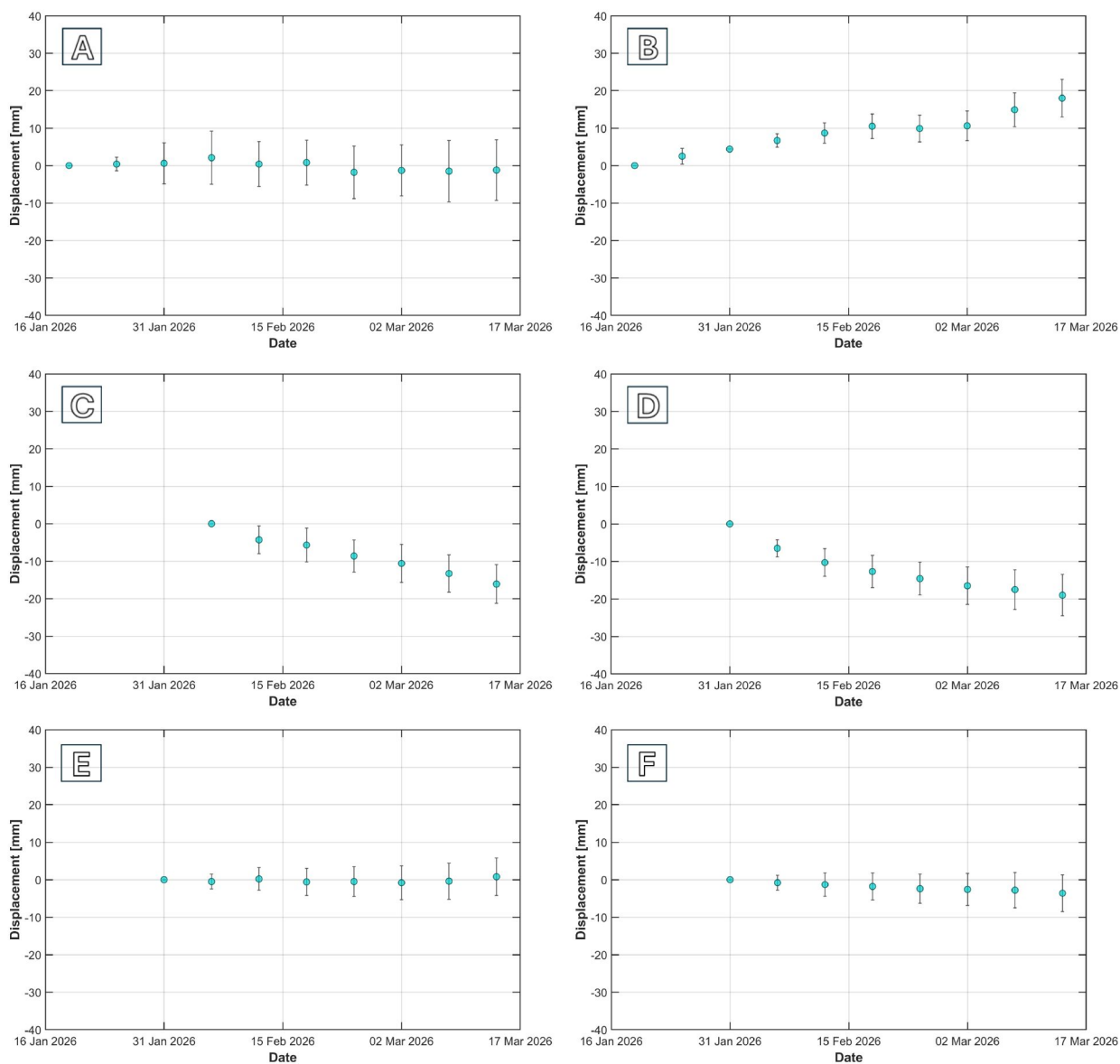


Figura 95 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1 in geometria ascendente tra il 31 gennaio e il 14 marzo 2026, elaborati con tecnica Dynamic InSAR. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.



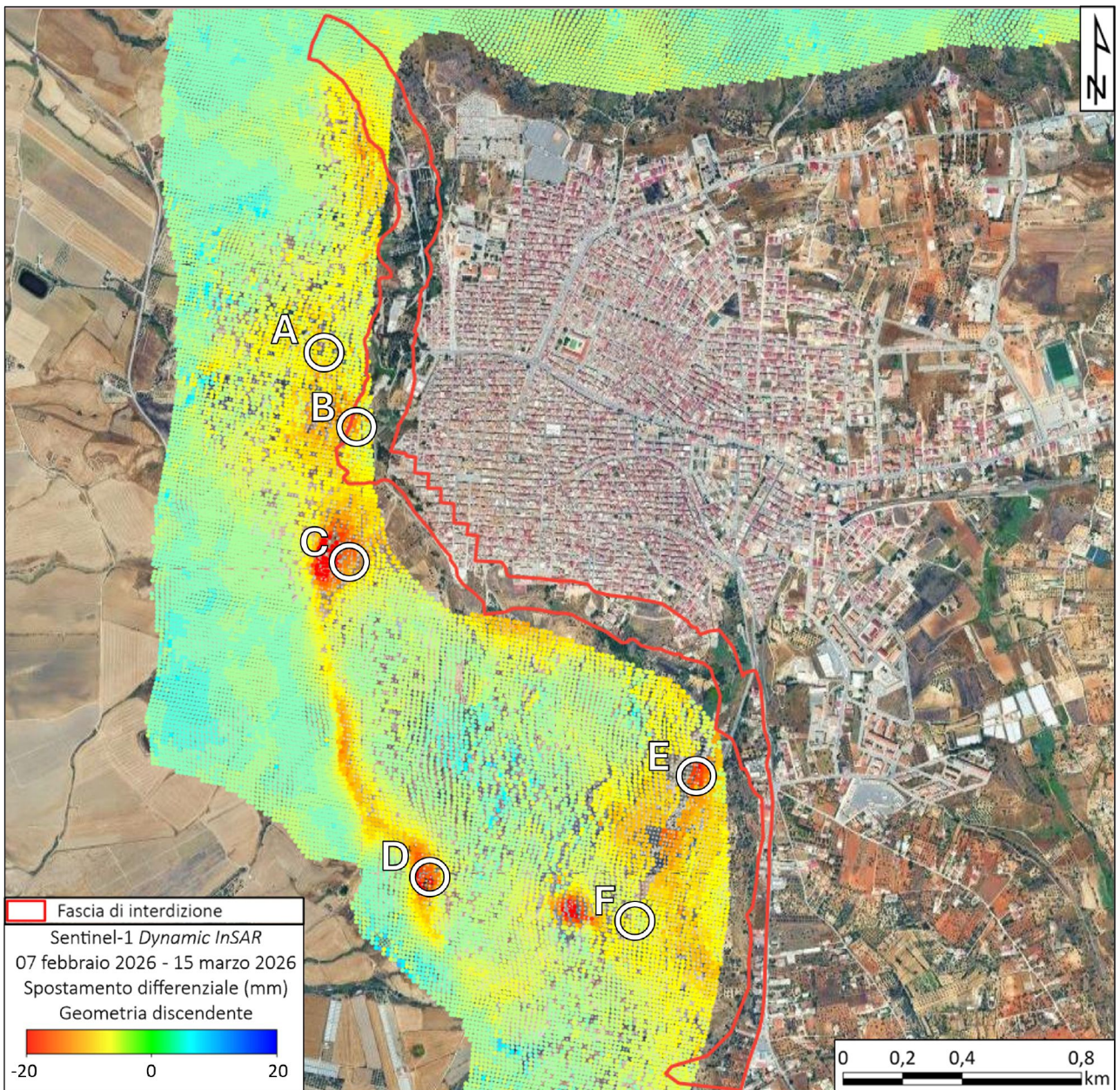
**Figura 96 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 95.**

L'analisi dei dati Sentinel-1 acquisiti in geometria discendente (7 febbraio 2026 - 15 marzo 2026) ed elaborati con tecnica Dynamic InSAR (Figura 97) conferma la presenza di settori circoscritti caratterizzati da spostamenti più marcati, prevalentemente concentrati nel settore del corpo di frana centrale.

I valori massimi di tali deformazioni sono intorno a -25 mm, coerenti con quanto osservato in geometria ascendente.

L'analisi delle serie temporali (Figura 98) permette di contestualizzare le suddette deformazioni, mostrando per tutti i punti selezionati una chiara tendenza alla stabilizzazione post-evento.

Dopo una fase di movimento più accentuata rilevata nella prima metà di febbraio, i tassi di spostamento decrescono progressivamente. In particolare, mentre i punti A, B e F si mantengono su valori di spostamento entro i -10 mm, i punti C, D ed E mostrano come, nonostante l'entità cumulativa maggiore, la tendenza sia comunque in fase di stabilizzazione.



**Figura 97 -** Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1 in geometria ascendente tra il 7 febbraio e il 15 marzo 2026, elaborati con tecnica Dynamic InSAR. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.

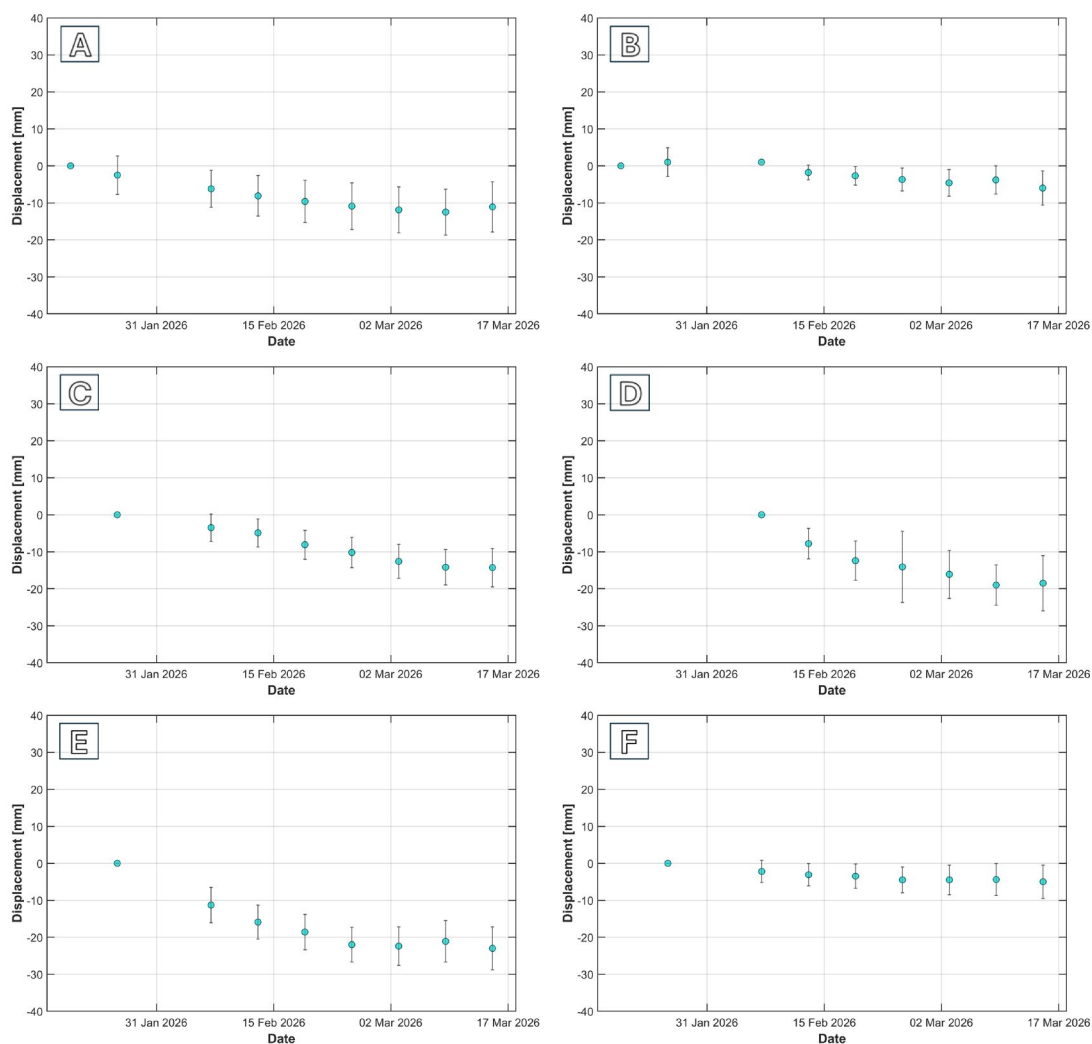


Figura 98 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 97.

#### 4.5.8 Sintesi delle evidenze radar satellitari

L'integrazione dei risultati derivanti dalle diverse piattaforme satellitari e tecniche di processamento permette di delineare un quadro deformativo completo per l'area di Niscemi. In sintesi, si evidenzia un quadro di sostanziale stabilità per l'intero centro abitato consolidato, all'interno della fascia di interdizione si individuano tuttavia specifici settori caratterizzati da una risposta cinematica differenziata.

In particolare, il settore settentrionale e il settore centrale della fascia di interdizione mostrano evidenze di movimento che risultano maggiormente definite nei dati Sentinel-1 rispetto a quanto rilevato da COSMO-SkyMed. Tale fenomenologia è riscontrabile con maggior evidenza nelle acquisizioni in orbita discendente a causa della specifica esposizione dei versanti in esame e della configurazione geometrica delle acquisizioni satellitari.

Per quanto concerne l'evoluzione temporale delle deformazioni, l'analisi delle serie temporali mostra un comportamento eterogeneo. In diversi settori si osserva una progressiva tendenza alla stabilizzazione post-evento con un decremento dei tassi di deformazione nelle ultime acquisizioni; tuttavia, in alcune porzioni circoscritte della fascia di interdizione la dinamica deformativa permane attiva, non mostrando ancora una evidente stabilizzazione. Particolare attenzione viene rivolta al settore centrale della fascia di interdizione nei pressi del plesso scolastico "San Giuseppe", come discusso in sezione 9.4.

Infine, l'applicazione della tecnica Dynamic InSAR mette in evidenza la persistenza di una dinamica attiva in corrispondenza dei corpi di frana.

#### 4.5.9 Programmazione delle acquisizioni radar satellitari

La Tabella 6 sintetizza il calendario delle acquisizioni programmate sull'area di Niscemi, aggregando i dati provenienti dalle costellazioni satellitari prese in esame (Sentinel-1, COSMO-SkyMed). La programmazione segue l'ordine cronologico dei passaggi.

<b>Data di acquisizione</b>	<b>Satellite</b>
19/04/2026	SNT A 117
20/04/2026	SNT A 44, SNT D 124
21/04/2026	CSK D
22/04/2026	CSK A
25/04/2026	SNT A 117
26/04/2026	SNT A 44, SNT D 124
29/04/2026	CSK D
30/04/2026	CSK A

**Tabella 6 - Cronoprogramma delle acquisizioni satellitari per l'area di Niscemi.**

## 5 Analisi dei dati satellitari ottici

Il CPC-UNIFI ha effettuato l'analisi dei dati satellitari ottici acquisiti da diversi sensori sull'area di interesse elaborandoli con diverse tecniche di *image analysis* al fine di stimare gli spostamenti superficiali planimetrici in prossimità del paese di Niscemi, a verifica delle analisi manuali già riportate nella sezione 3.3.

A tal fine, sono state analizzate coppie di immagini ottiche satellitari pre-evento e post-evento per valutare il campo di deformazione verificatosi e caratterizzare l'evoluzione spaziale e temporale degli spostamenti durante e dopo le fasi principali dei dissesti. Sono stati considerati diversi intervalli temporali, in modo da distinguere un'analisi dei dati pre-evento, un'analisi co-evento e un'analisi post-evento.

L'analisi dei dati satellitari ottici si basa sull'utilizzo di sensori passivi installati su piattaforme spaziali. Tali sensori, per poter operare, necessitano di una sorgente di energia esterna, che principalmente è rappresentata dalla radiazione solare. A differenza dei sensori attivi, non emettono una propria radiazione, ma registrano l'energia solare riflessa o emessa dalla superficie terrestre nelle diverse lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico.

Proprio per la loro natura passiva, la qualità e l'utilizzabilità delle immagini acquisite dipendono dalle condizioni di illuminazione (quindi dalla presenza di luce diurna) e dall'assenza di copertura nuvolosa o di altri fattori atmosferici che possano ostacolare la radiazione.

Per l'analisi delle immagini ottiche sono state adottate le tecniche COSI-Corr (*Coregistration of Optical Sensed Images and Correlation*) e PIV (*Particle Image Velocimetry*), utilizzando prodotti ad alta e ad altissima risoluzione forniti dalle costellazioni PlanetScope, Pléiades Neo e WorldView Legion.

Si sottolinea che da tali analisi si ricavano soltanto le componenti dello spostamento interne al piano dell'immagine (*e.g.*, spostamenti planimetrici nel caso di riprese satellitari) e che non è pertanto possibile effettuare alcuna valutazione sulla componente verticale dello stesso (*e.g.*, sprofondamenti e rigonfiamenti del terreno).

### 5.1 Tecniche di elaborazione

#### 5.1.1 COSI-Corr

COSI-Corr è un modulo integrato in ENVI progettato per ottenere un'elaborazione geometrica accurata di immagini ottiche satellitari e aeree tramite ortorettifica, co-registrazione e correlazione, ed è stato sviluppato per identificare deformazioni del suolo a partire da acquisizioni multitemporali.

In particolare, viene utilizzato per lo studio di frane, flussi glaciali e deformazioni cosismiche, ma può essere applicato anche alle analisi di cambiamento che richiedono una registrazione molto accurata delle immagini.

Il metodo COSI-Corr è una tecnica di telerilevamento che produce un'osservazione automatica dei cambiamenti a livello di *pixel* confrontando due immagini co-registrate, una acquisita prima e una dopo l'evento di deformazione. Attraverso un algoritmo di rilevamento dei cambiamenti tra *pixel* che opera nel dominio della frequenza, COSI-Corr analizza lo spostamento relativo dei *pixel* all'interno di finestre di correlazione, in modo tale da stimare le traslazioni e i movimenti presenti, anche molto piccoli, fino a livello di sub-*pixel*.

Il primo passo della tecnica riguarda l'identificazione di aree stabili tramite i punti di controllo a terra (*Ground Control Points*, GCP), e sulla base di questi, si ottengono due livelli di spostamento per ogni coppia di immagini: uno in direzione nord-sud (N/S) e uno in direzione est-ovest (E/W).

Viene inoltre prodotto un parametro di qualità, ovvero il rapporto segnale/rumore (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR) che fornisce informazioni in merito all'accuratezza del risultato pixel per pixel.

Per quanto riguarda lo spostamento N/S, valori positivi indicano uno spostamento verso nord, mentre valori negativi indicano la direzione sud; per lo spostamento E/W, valori positivi rappresentano la direzione di spostamento verso est e valori negativi la direzione ovest.

Per correlare le immagini e fornire gli spostamenti, esistono due tipi di correlatori: di frequenza e statistico. Il primo si basa sull'algoritmo di Fourier, è più preciso e accurato ma anche più sensibile al rumore, ed è quindi adatto alla produzione di risultati su immagini di buona qualità. Il correlatore statistico, invece, è più grossolano ed è applicato a immagini rumorose che sono già state analizzate con il correlatore in frequenza ma che hanno prodotto risultati insoddisfacenti.

In questo caso è stata applicata la correlazione in frequenza che si articola in due fasi principali: la prima fase prevede una stima preliminare e grossolana dello spostamento *pixel-per-pixel* tra due porzioni di immagine corrispondenti.

La dimensione della finestra di correlazione dovrebbe essere almeno doppia rispetto allo spostamento atteso; tuttavia, nella pratica, è raccomandato un rapporto maggiore, poiché l'aumento della dimensione della finestra consente di ridurre il rumore e le incertezze associate alla misura.

Successivamente alla stima dello spostamento iniziale, viene eseguita una seconda e conclusiva correlazione finalizzata al recupero dello spostamento a livello *sub-pixel*. L'elaborazione delle immagini è stata condotta utilizzando diverse combinazioni di dimensioni delle finestre iniziali e finali, espresse in *pixel*, comprese tra 8-8 *pixel* e 128-128 *pixel* per identificare la finestra migliore.

La scelta della dimensione della finestra influenza in modo significativo la qualità delle misure ottenute. L'utilizzo di finestre di dimensioni ridotte, come la configurazione 8-8 *pixel*, produce valori di qualità più bassi, introducendo un maggiore grado di incertezza nell'analisi dello spostamento della frana a causa della presenza casuale di misure di scarsa qualità; tuttavia, tale configurazione consente di ottenere informazioni più dettagliate ed è pertanto più indicata per aree di estensione limitata o per frane di piccola scala, in quanto il rumore di fondo influisce in misura minore sulla analisi.

Al contrario, l'incremento delle dimensioni delle finestre, fino alla configurazione iniziale-finale di 128-128 *pixel*, è adatto a individuare pattern spaziali più chiari e coerenti, grazie alla significativa riduzione del rumore di fondo.

La combinazione di finestre di grandi dimensioni e aree estese risulta ampiamente documentata in letteratura, poiché è particolarmente adatta allo studio di spostamenti di grande entità.

Tale configurazione ha consentito una rappresentazione più accurata del profilo e della geometria della frana. Inoltre, la possibilità di definire la dimensione del *pixel* contribuisce a migliorare la risoluzione spaziale dei risultati finali.

### 5.1.2 Particle Image Velocimetry (PIV)

La tecnica PIV (*Particle Image Velocimetry*), sulla quale è incentrata la formulazione del *software* PIVlab, è stata inizialmente concepita per la misurazione non-intrusiva della dinamica dei fluidi mediante algoritmi di cross-correlazione di immagini.

Col passare degli anni e con lo sviluppo di sensori ottici sempre più performanti, l'uso della tecnica è stato progressivamente esteso all'analisi di qualsiasi processo deformativo che possa essere catturato opportunamente mediante una sequenza temporale di immagini.

In sintesi, PIVlab è in grado di eseguire una cross-correlazione diretta di coppie di immagini nel dominio dello spazio o, in alternativa, una cross-correlazione dei segnali in frequenza in esse contenuti mediante applicazione ricorsiva della trasformata discreta di Fourier.

Il codice contiene inoltre specifiche funzionalità mirate a omogeneizzare il contrasto delle immagini, ridurre il contributo statistico al segnale di cross-correlazione generato da oggetti altamente riflettenti e, similmente, filtrare i vettori spostamento statisticamente implausibili per direzione e modulo (*outliers*) rispetto a quanto stimato nelle aree circostanti.

Per il tipo di applicazione in oggetto risulta particolarmente conveniente il *pre-processing* mediante metodi di equalizzazione adattiva dell'istogramma limitata al contrasto (CLAHE), i quali consentono di ottimizzare indipendentemente le aree caratterizzate sia da un basso sia da un alto grado di esposizione.

Ai fini della cross-correlazione, ciascuna immagine del *dataset* viene suddivisa in un numero predeterminato di celle di interrogazione parzialmente sovrapposte fra loro: la stima degli spostamenti prevede quindi di marcare uno *speckle pattern* caratteristico in ciascuna cella dell'immagine A e di identificare l'ubicazione del suo corrispondente più probabile nell'immagine B (Thielicke & Stamhuis, 2014).

Varie procedure di *multi-pass*, *smoothing* e interpolazione sono infine implementabili per incrementare il rapporto segnale/rumore nei dati di *output*. In condizioni ottimali, il margine di errore della tecnica è inferiore al decimo di *pixel*; tuttavia, esso è ovviamente in larga parte influenzabile dalla qualità delle immagini, dall'accuratezza della loro co-registrazione e dalla variabilità delle condizioni al contorno ai vari istanti di acquisizione.

## 5.2 Satelliti utilizzati

### 5.2.1 PlanetScope (alta risoluzione)

La costellazione di satelliti PlanetScope è composta da oltre 200 satelliti DOVE (DOVE e SuperDOVE) che dal 2016 consentono l'acquisizione di immagini ottiche ad alta risoluzione (3 m) orbitando intorno alla Terra ogni giorno.

Ogni *cubesat* DOVE opera in quattro bande: rosso, verde, blu e infrarosso vicino mentre i SuperDOVE di ultima generazione operano in otto bande spettrali (blu costiero, blu, verde I, verde, giallo, rosso, rosso limite e vicino infrarosso).

I prodotti PlanetScope sono disponibili a diversi livelli di processamento:

- *Basic Scene Product* (Livello 1-B) che forniscono radianza scalata e corretta radiometricamente e a livello di sensore, che richiede elaborazioni e correzioni geometriche. Questo prodotto ha un inquadramento basato sulla scena e non è proiettato cartograficamente.
- *Ortho Scene Product* (Livello 3-A) che fornisce un prodotto ortorettificato, una radianza scalata o un'immagine di riflettanza superficiale adatta ad applicazioni analitiche e visive ed è proiettato cartograficamente.
- *Ortho Tile Product* (Livello 3-B), ortorettificato e proiettato nel sistema UTM in cui le correzioni radiometriche e del sensore sono applicate direttamente ai dati.

La metodologia è stata applicata a cinque immagini PlanetScope, acquisite tra il 1 gennaio 2026 e il 2 febbraio 2026 al fine di ottenere una panoramica dell'area di studio nelle fasi precedenti e successive all'evento analizzato. I dettagli e le caratteristiche delle immagini utilizzate sono riportati in Tabella 7.

La procedura di identificazione dei GCPs, finalizzata al riconoscimento dei punti stabili all'interno delle immagini per evidenziare le aree in movimento, è stata effettuata utilizzando i dati EGMS (*European Ground Motion Service*) e le relative serie temporali. In particolare, sono stati selezionati i punti che non presentavano variazioni significative di spostamento nel periodo più recente.

L'analisi è stata inizialmente condotta applicando la metodologia alla coppia di immagini acquisite il 1 gennaio 2026 e l'8 gennaio 2026, entrambe precedenti all'evento.

Tale confronto non ha evidenziato spostamenti e movimenti significativi sull'intera area di studio. Successivamente la stessa procedura è stata applicata alle coppie di immagini acquisite l'8 gennaio 2026 e il 17 gennaio 2026, poi il 17 gennaio 2026 e il 27 gennaio 2026 e il 27 gennaio 2026 e il 2 febbraio 2026. In questi casi sono stati osservati movimenti significativi in prossimità del paese di Niscemi, inizialmente localizzati nell'area nord e successivamente estesi all'area sud.

Immagine	Data di acquisizione	Risoluzione	Bande
20260101_102026_13_24fa	01/01/2026	3 m	RGB
20260108_094959_74_255c	08/01/2026	3 m	RGB
20260117_103850_76_24ed	17/01/2026	3 m	RGB
20260127_101715_07_253a	27/01/2026	3 m	RGB
20260202_102119_87_2506	02/02/2026	3 m	RGB

**Tabella 7 - Caratteristiche delle immagini PlanetScope, con relativa data di acquisizione, risoluzione e bande.**

### 5.2.2 Pléiades Neo e WorldView Legion (altissima risoluzione)

Le costellazioni Pléiades Neo e WorldView Legion forniscono al giorno d'oggi i prodotti ottici di maggior risoluzione disponibili commercialmente (30 cm). I satelliti che le compongono operano lungo orbite terrestri basse (soltanto eliosincrone per i Pléiades Neo, anche a media inclinazione per i WorldView Legion) e acquisiscono immagini in bande spettrali multiple.

Sebbene sia teoricamente ottenibile una frequenza di rivisitazione di diverse volte al giorno, quest'ultima è in realtà fortemente condizionata dalla quantità e dalla priorità delle richieste di *tasking* commissionate agli enti gestori delle costellazioni; ne consegue che immagini differenti sulla stessa area sono di norma acquisite in maniera altamente irregolare e con angoli di incidenza marcatamente variabili.

Le specifiche principali dei prodotti attualmente a disposizione del CPC-UNIFI sono elencate nella Tabella 8.

Si è quindi proceduto, preliminarmente all'analisi, alla co-registrazione e co-rettificazione delle immagini sfruttando: i parametri RPC (*Rational Polynomial Coefficients*) che definiscono la relazione geometrica tra le coordinate del terreno e le distorsioni causate dall'angolo di ripresa del satellite; le basi topografiche già citate nella sezione 3; e le ortofoto da drone acquisite dal Comune di Niscemi e dalla Regione Siciliana.

Si sottolinea che tale procedura di correzione prospettica, laddove consente di allineare con precisione molto elevata le aree spoglie, può causare distorsioni non trascurabili degli elementi che si trovano significativamente rialzati rispetto al suolo (*e.g.*, chiome di alberi e, soprattutto, tetti di edifici), cosa che a sua volta influenza il margine di errore locale delle tecniche di elaborazione descritte nella sezione 5.1.

Data di acquisizione	Risoluzione	Bande	Off-nadir	Elevazione solare
29/11/2025	30 cm	RGB + infrarosso vicino, <i>red edge, deep blue</i>	20,8°	30,8°
27/01/2026	30 cm	RGB + infrarosso vicino	44,3°	33,4°
13/02/2026	30 cm	RGB + infrarosso vicino	23°	37,7°

**Tabella 8 - Caratteristiche delle immagini Pléiades Neo e WorldView Legion.**

## 5.3 Risultati

### 5.3.1 Confronto delle immagini PlanetScope

In Figura 99 sono riportati i risultati dell'analisi dell'area di Niscemi, ottenuti dall'elaborazione di due immagini acquisite in data 08 gennaio 2026 e 17 gennaio 2026. La mappa mostra il modulo dello spostamento dato dalla somma delle componenti est-ovest e nord-sud per la zona nord.

I risultati evidenziano un'area interessata da spostamenti verso ovest, evidenziato dalle frecce, fino a 10 m in 11 giorni (velocità massima di circa 0,9 m/giorno).

In Figura 100 sono riportati i risultati ottenuti dall'analisi COSI-Corr relativi al confronto di due immagini acquisite rispettivamente il 17 gennaio 2026 e il 27 gennaio 2026, che evidenziano spostamenti significativi nell'area di studio. La mappa mostra il modulo dello spostamento dato dalla somma delle componenti est-ovest e nord-sud per le tre frane d'interesse.

Nel settore nord si osserva ancora un leggero spostamento con valori massimi fino a 6 m in 11 giorni (velocità di circa 0,5 m/giorno) in direzione ovest, come indicato dalle frecce. Tale andamento risulta essere coerente con il movimento evidenziato nel periodo precedente.

Nella frana centrale, invece, l'analisi evidenzia spostamenti più rilevanti prevalentemente in direzione sud, con alcune porzioni caratterizzate da componenti verso sud-ovest. Lo spostamento verso sud-ovest risulta complessivamente più marcato e significativo, con valori massimi fino a 37 m in 11 giorni (con una velocità di circa 3,3 m/giorno) nella porzione nord-ovest del corpo di frana. Nella zona centrale si osservano valori leggermente inferiori, in direzione sud, fino a 34 m in 11 giorni (con velocità di circa 3,1 m/giorno) e nei settori nord-orientali adiacenti al centro abitato e in quello meridionale, gli spostamenti presentano valori compresi tra 26 e 29 m in 11 giorni (con velocità di circa 2,6 m/giorno) in direzione sud.

Nel settore sud, si osserva uno spostamento con valori intorno a 3 m in 11 giorni (circa 0,27 m/giorno) in direzione ovest.

In Figura 101 sono illustrati i risultati dell'analisi condotta sul confronto di due immagini acquisite il 27 gennaio 2026 e il 2 febbraio 2026, entrambe successive all'evento principale. A causa di un diverso ritaglio delle immagini utilizzate, l'area a nord risulta essere incompleta.

La mappa mostra il modulo dello spostamento dato dalla somma delle componenti est-ovest e nord-sud. In tutta l'area di interesse si osservano spostamenti verso ovest o sud-ovest, nettamente inferiori rispetto a quelli mostrati nel periodo precedente.

I valori massimi risultano compresi tra 1 e 3 m in 7 giorni (velocità di circa 0,1 - 0,4 m/giorno).

Si sottolinea che tali valori sono dell'ordine di grandezza della risoluzione delle immagini e rientrano pertanto nel margine di errore della tecnica utilizzata.

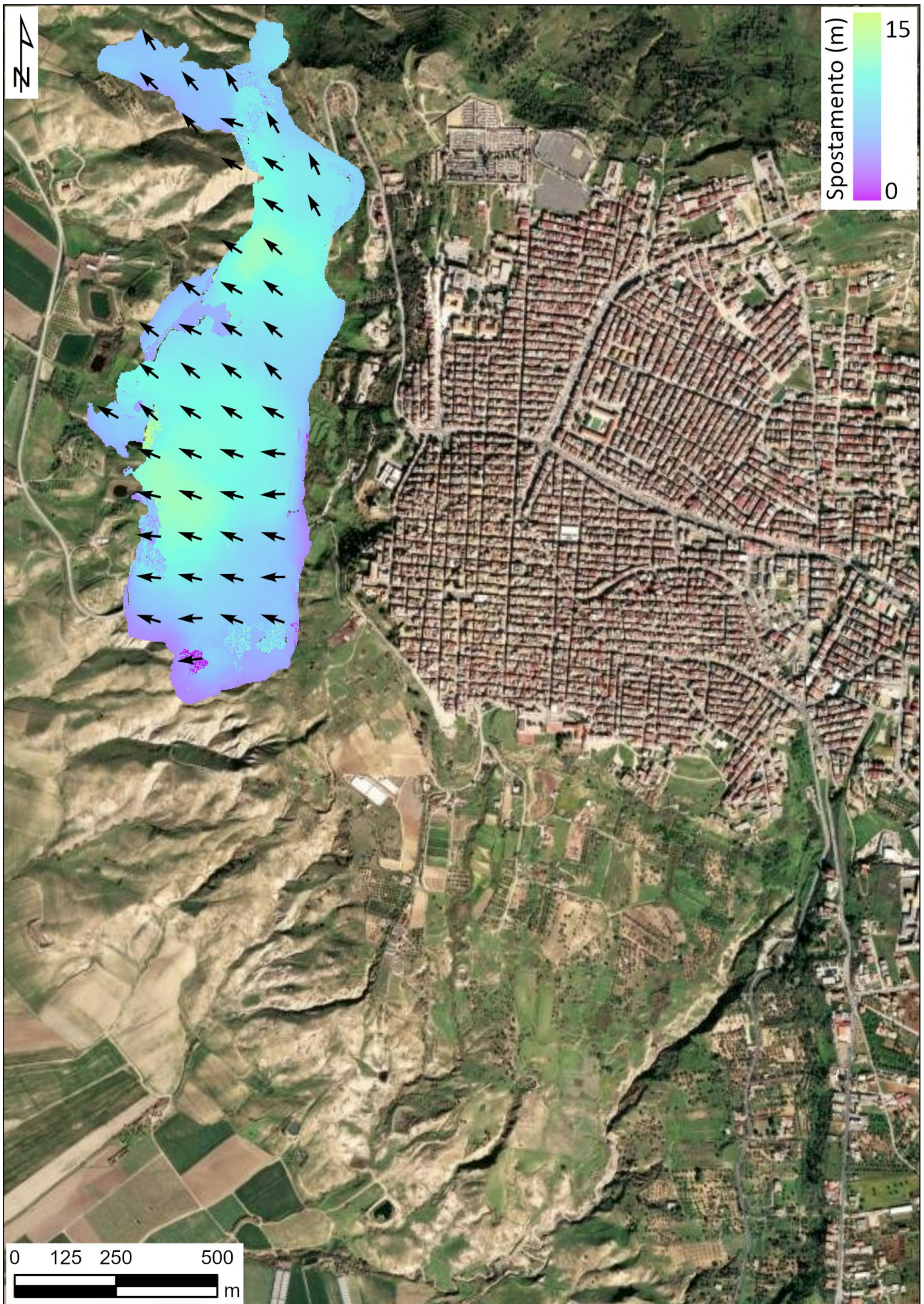


Figura 99 - Modulo dello spostamento dell'area di Niscemi ottenuto tramite il COSI-Corr con immagini satellitari acquisite in data 8 gennaio 2026 e 17 gennaio 2026 per l'area nord.

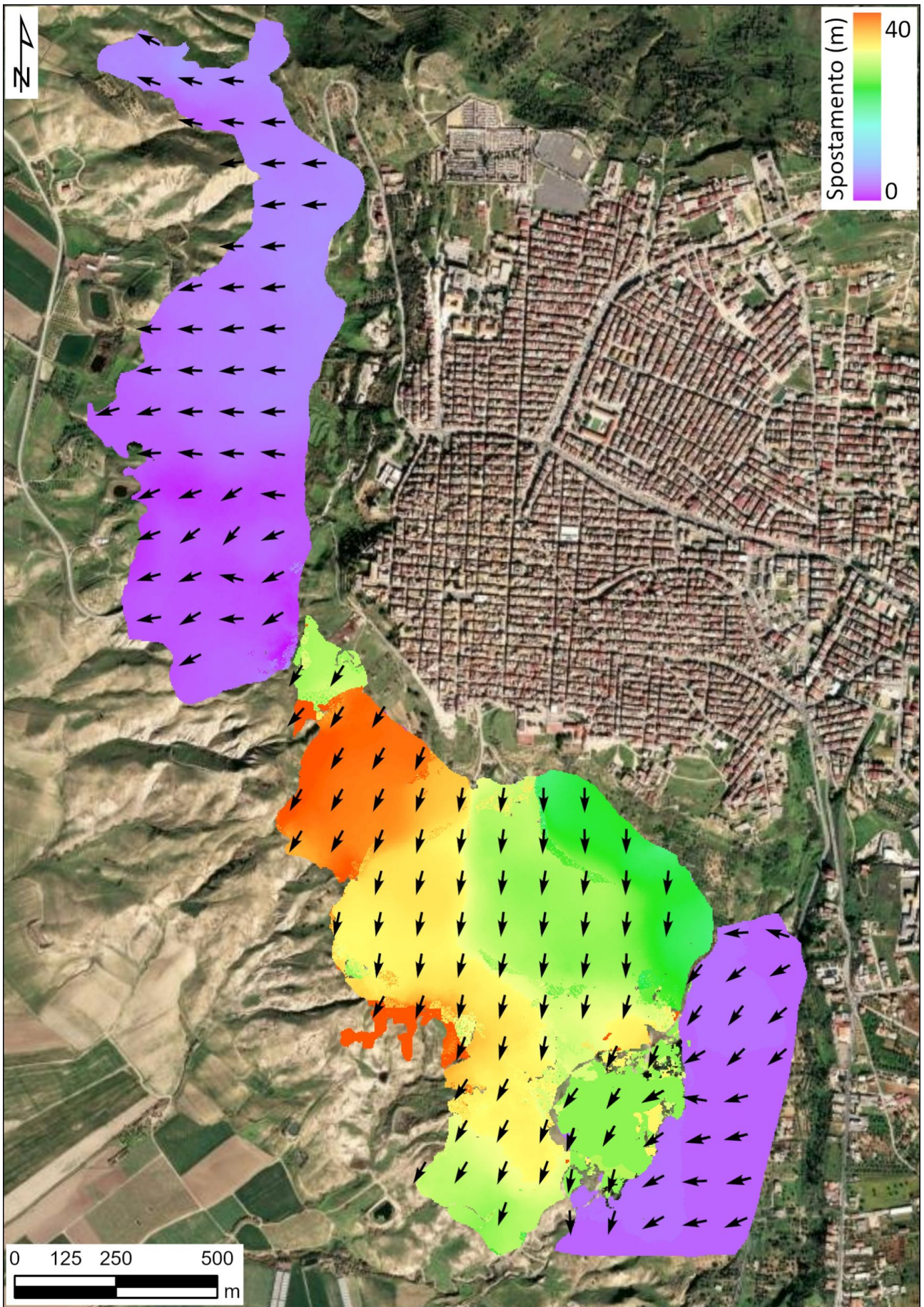


Figura 100 - Modulo dello spostamento del suolo tramite il COSI-Corr con immagini satellitari acquisite in data 17 gennaio 2026 e 27 gennaio 2026.

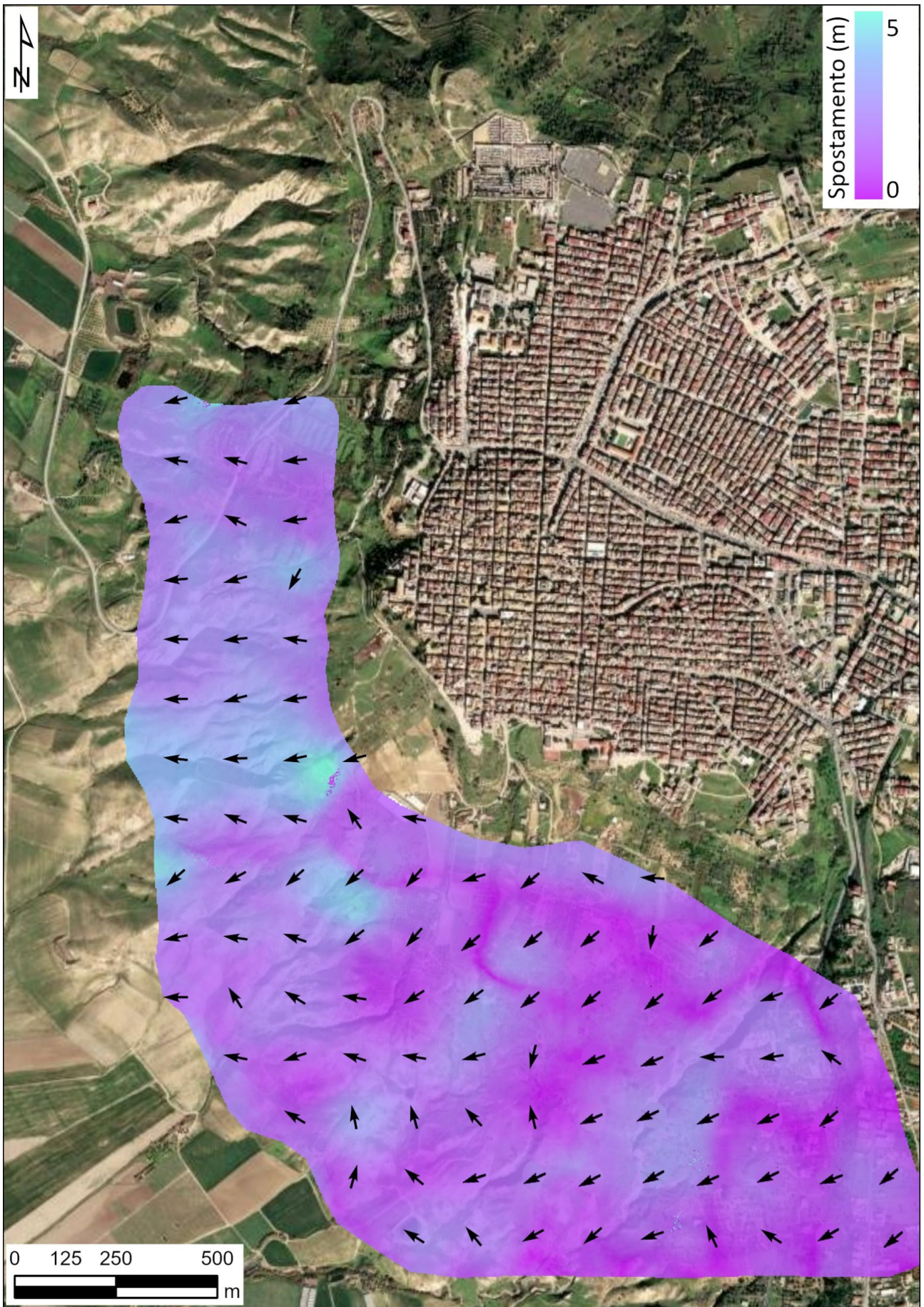


Figura 101 - Modulo dello spostamento dell'area di Niscemi ottenuto tramite il confronto di due immagini acquisite in data 27 gennaio 2026 e 2 febbraio 2026 tramite COSI-Corr.

### 5.3.2 Confronto delle immagini Pléiades Neo e WorldView Legion

I risultati dell'analisi PIVlab delle immagini ad altissima risoluzione sono sintetizzati nella Figura 102 e nella Figura 103; nello specifico, la Figura 102 mostra il confronto fra l'immagine Pléiades Neo del 29 novembre 2025 e l'immagine WorldView Legion del 27 gennaio 2026, mentre la seconda il confronto fra le immagini WorldView Legion del 27 gennaio 2026 e del 13 febbraio 2026.

Si conferma quanto riportato in precedenza riguardo alla coalescenza di tre settori in frana cinematicamente separati, caratterizzati cioè da spostamenti marcatamente differenti in termini di entità e direzione; a tal proposito, i valori illustrati nella Figura 102 risultano pienamente compatibili con quanto valutato in fase di caratterizzazione e perimetrazione preliminare dei fenomeni (sezione 3.3).

La Figura 103 rivela infine un'assenza di spostamenti post-evento superiori al margine di errore. Come accennato, quest'ultimo varia da circa 10-20 cm in aree spoglie a circa un ordine di grandezza superiore in aree densamente urbanizzate.

Per quanto riguarda l'analisi effettuata con il COSI-Corr su immagini ad altissima risoluzione acquisite dai satelliti Pleiades Neo e WorldView Legion, in Figura 104 è riportato il modulo dello spostamento nel periodo 29 novembre 2025 - 27 gennaio 2026 dato dalla somma delle componenti di spostamento in direzione est-ovest e nord-sud.

L'analisi, che conferma quanto già evidenziato dai risultati ottenuti mediante le immagini PlanetScope, mostra valori di spostamento fino a 13 m nel settore nord con direzione preferenziale verso ovest; nel settore centrale si osservano valori significativamente più elevati, fino a 43 m, con direzione sud-sud/ovest; infine, nel settore sud si registrano spostamenti fino a 8 m, anch'essi orientati verso ovest.

Tali valori risultano compatibili con i due eventi verificatesi rispettivamente in data 15-16 gennaio e 25-26 gennaio 2026.

In Figura 105 è riportato il modulo dello spostamento ottenuto dal confronto tra due immagini WorldView Legion, acquisite rispettivamente in data 27 gennaio 2026 e 13 febbraio 2026, analizzate per tutti e tre i settori. L'analisi è stata eseguita tramite il COSI-Corr e il risultato rappresenta la somma delle componenti est-ovest e nord-sud.

I risultati non evidenziano spostamenti significativi nei settori analizzati, in accordo con quanto già emerso dall'analisi condotta sulle immagini PlanetScope.

In particolare, il settore nord mostra una sostanziale assenza di movimento nell'intera area analizzata, mentre nel settore centrale e sud si osservano valori massimi di spostamento dell'ordine di 2 m, compatibili con un limitato movimento residuo, presumibilmente nei giorni immediatamente successivi all'evento principale.

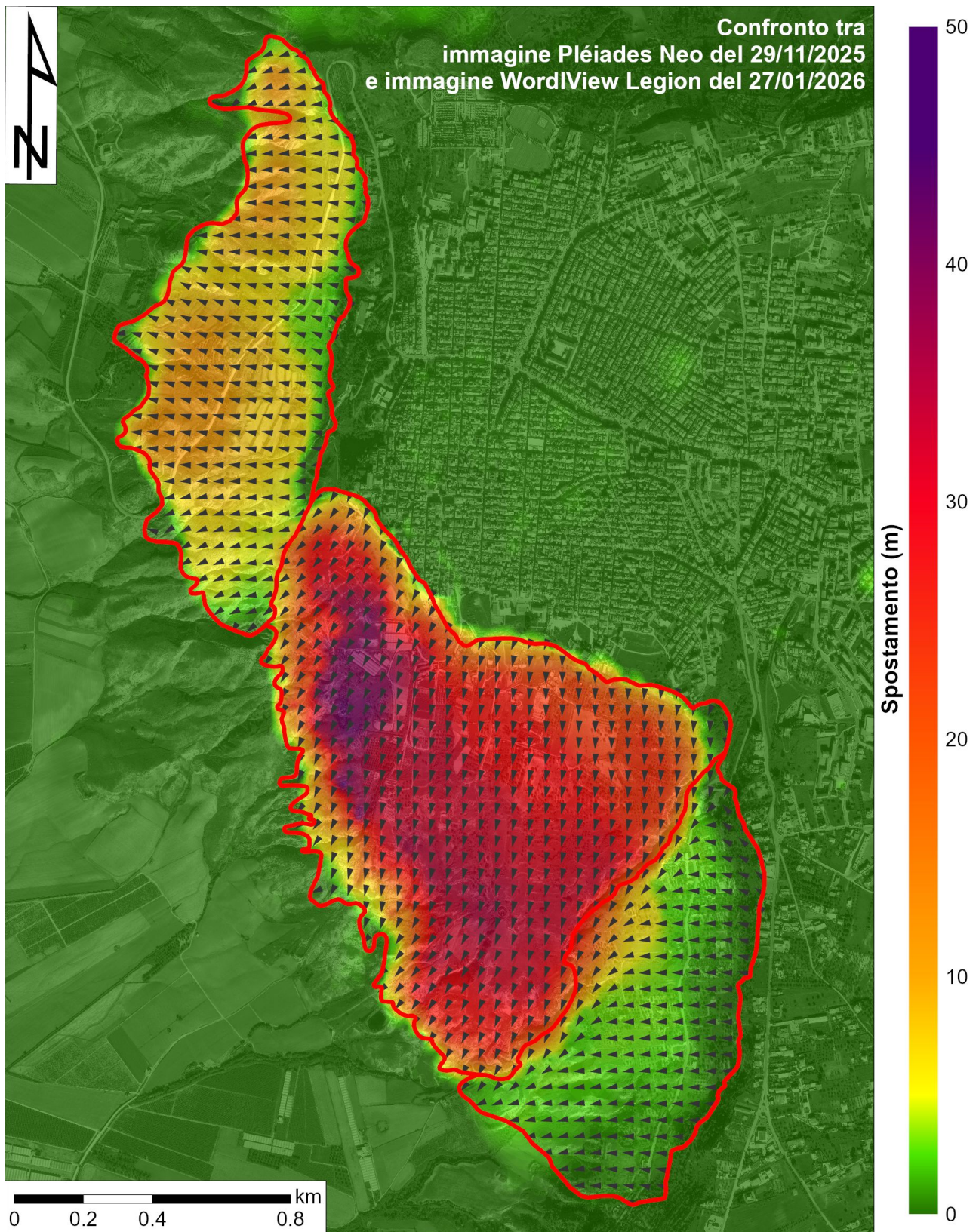


Figura 102 - Spostamenti ricavati dal confronto delle immagini Pléiades Neo del 29 novembre 2025 e WorldView Legion del 27 gennaio 2026.

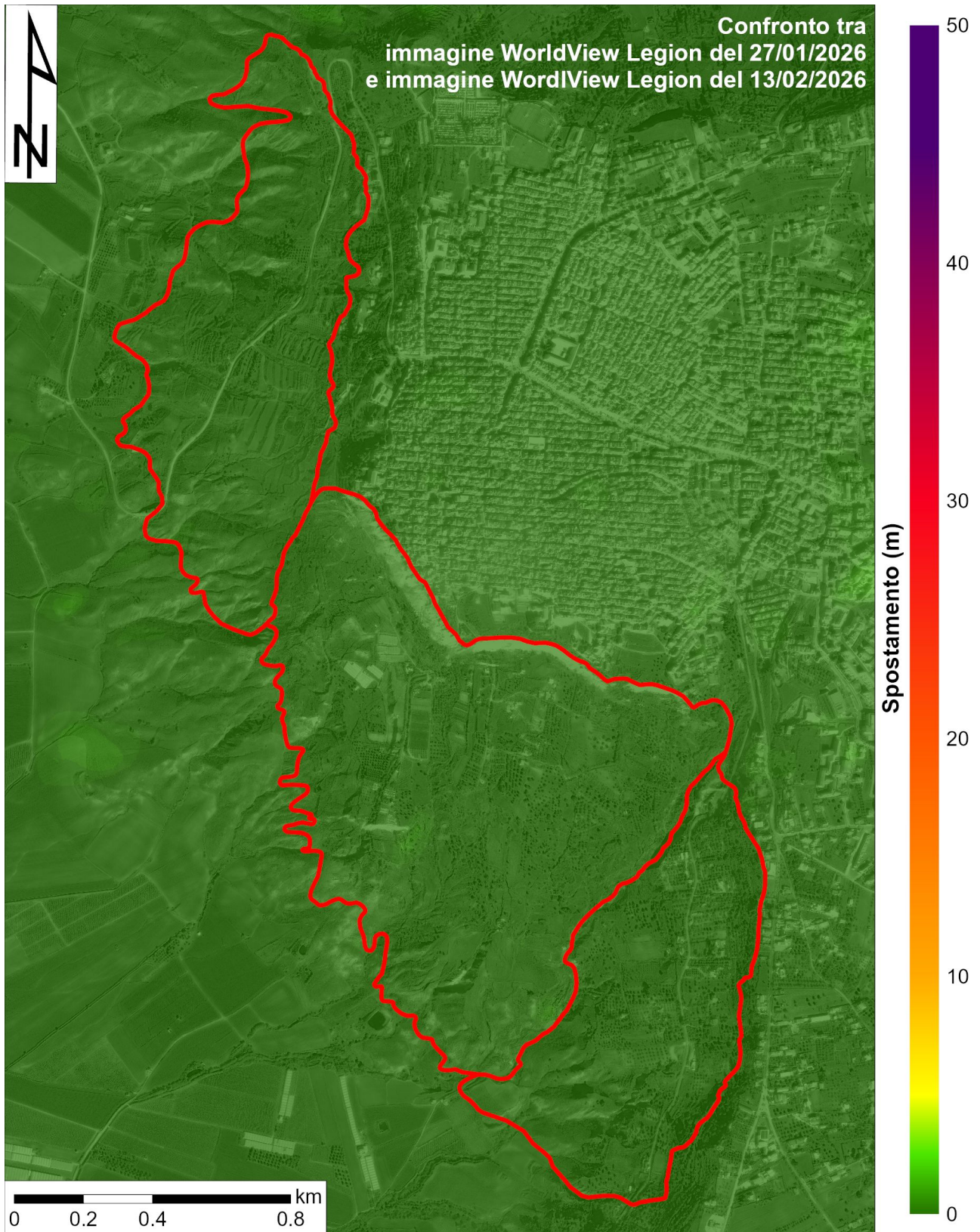


Figura 103 - Spostamenti ricavati dal confronto delle immagini WorldView Legion del 27 gennaio e 13 febbraio 2026.

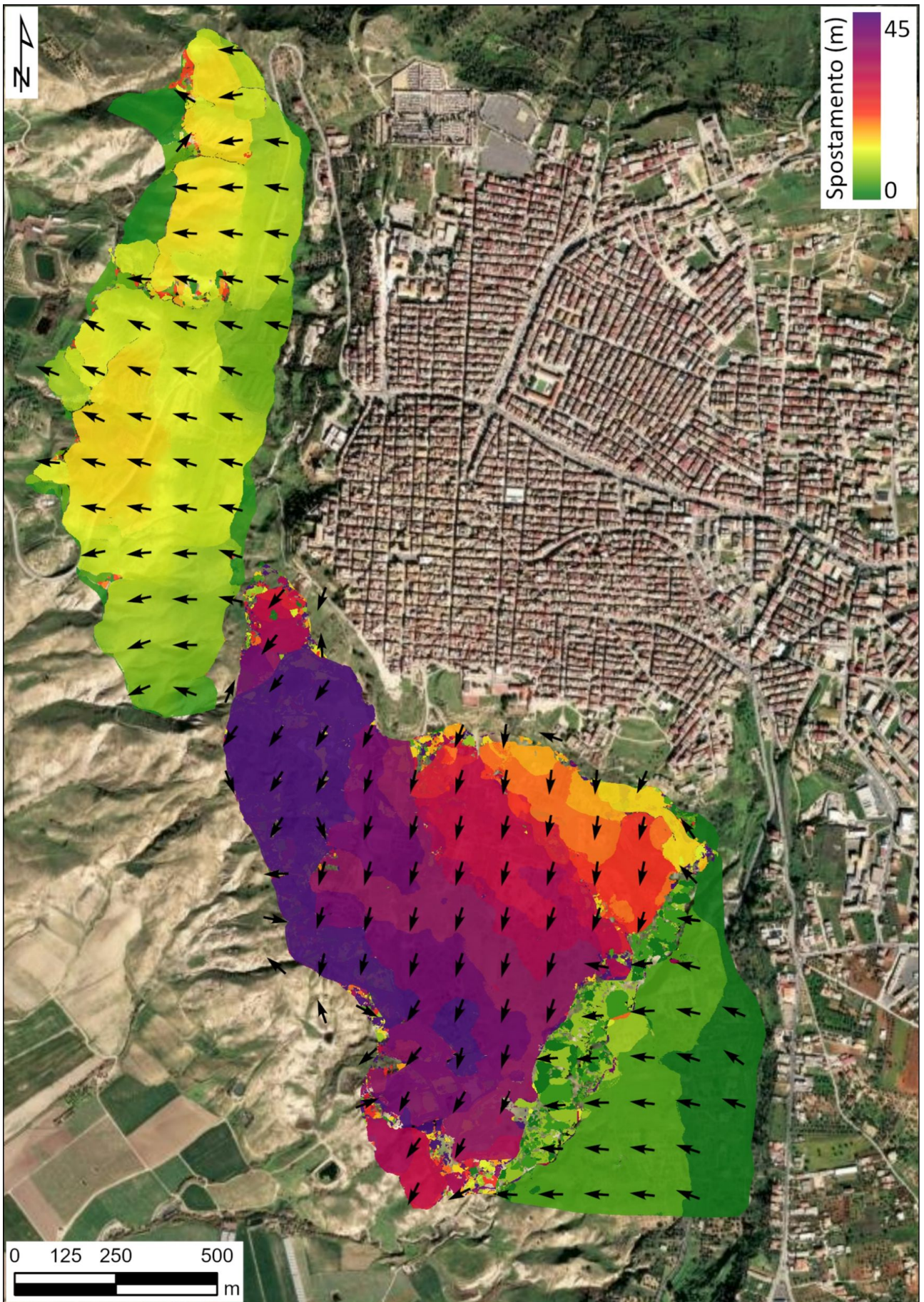


Figura 104 - Modulo dello spostamento dell'area di Niscemi ottenuto tramite il confronto di due immagini ad altissima risoluzione acquisite in data 29 novembre 2025 e 27 gennaio 2026 utilizzando la tecnica del COSI-Corr.

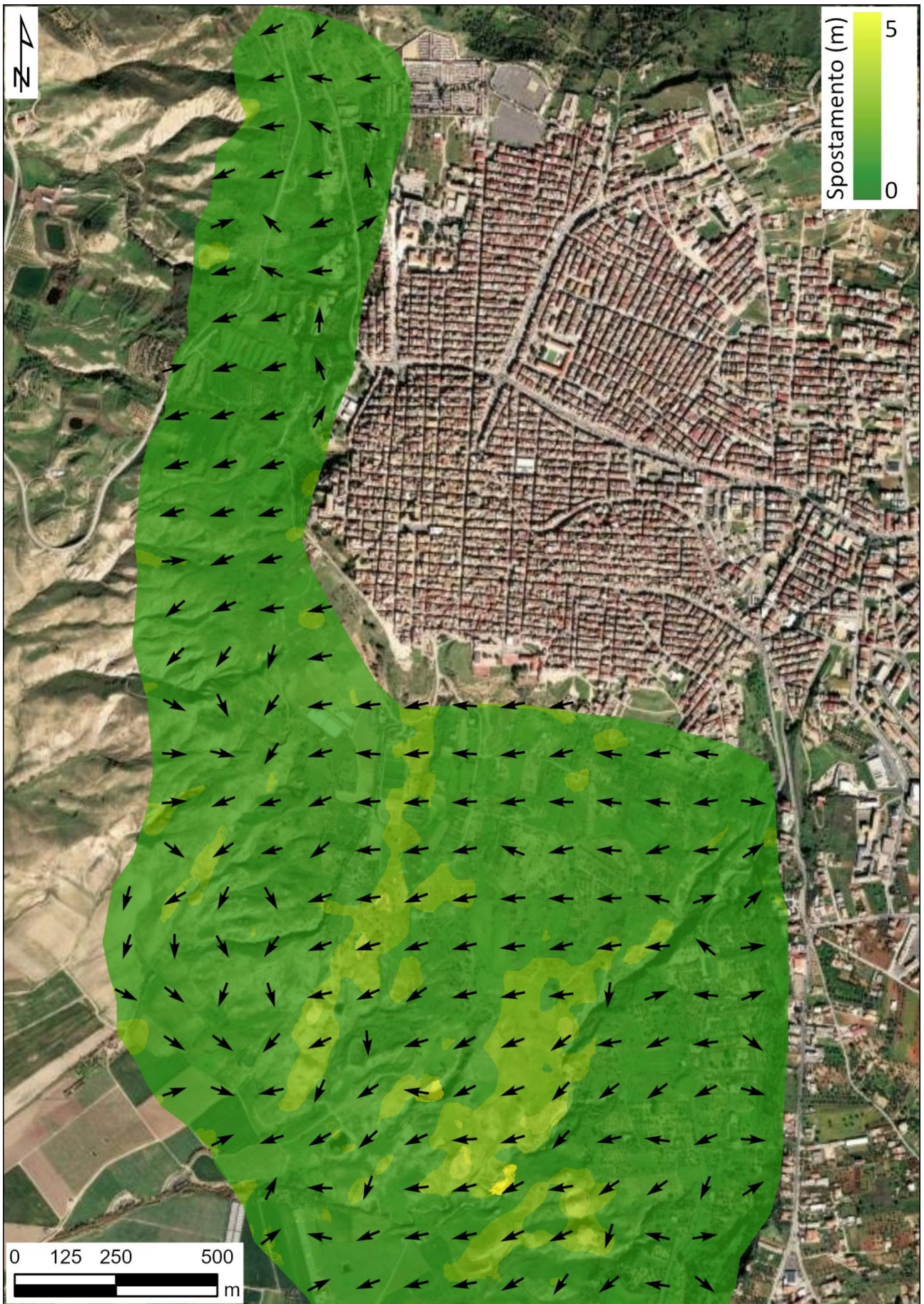


Figura 105 - Modulo dello spostamento nel periodo di acquisizione 27 gennaio 2026 - 13 febbraio 2026 tramite l'analisi con COSI-Corr per i tre settori analizzati.

## 6 Indagini geofisiche

Con la nota 6222/DG/DRPC Sicilia del 3 febbraio 2026 "*Emergenza Frana Niscemi - Esecuzione indagini geofisiche sulla frana di Niscemi*" la Presidenza della Regione Sicilia - Dipartimento della Protezione Civile (DRPC Sicilia) ha richiesto all'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - OGS una prospezione geoelettrica 3D ed una prospezione sismica ad alta risoluzione in onde P e SH nell'abitato di Niscemi.

L'uso combinato dei dati derivanti da indagini sismiche attive e da tomografia di resistività elettrica (ERT) costituisce oggi una pratica consolidata per aumentare l'affidabilità dei modelli del sottosuolo. Mentre le misure sismiche quantificano principalmente le proprietà elastiche del terreno (velocità di propagazione delle onde P e S, legate a densità e rigidità dei materiali), i dati ERT forniscono informazioni sulla distribuzione della resistività elettrica, legata alla porosità, alla saturazione di fluido e alla composizione litologica delle unità geologiche.

Valutare la sensibilità del sottosuolo ai due tipi di segnale fisico utilizzati da questi metodi permette di far emergere caratteristiche diverse nello stesso volume di sottosuolo. Inoltre, ciascun tipo di dato può evidenziare aspetti complementari della struttura investigata.

Ad esempio, un cambiamento significativo nella velocità sismica può essere associato a un contrasto di resistività elettrica, come accade nella transizione da materiali sabbiosi a livelli argillosi saturi, permettendo una più robusta interpretazione litostratigrafica. L'integrazione è inoltre preziosa in presenza di anomalie complesse o in situazioni di alta eterogeneità laterale, poiché consente di ridurre l'ambiguità.

Nel presente rapporto vengono presentati i risultati preliminari di entrambe le indagini che saranno oggetto di un rapporto approfondito in corso di preparazione da parte dell'OGS.

### 6.1 Indagine geoelettrica

#### 6.1.1 Tomografie elettriche 3D con Fullwaver

I metodi geoelettrici sono metodi di esplorazione non invasiva tra i più comunemente impiegati per problemi ambientali, ingegneristici, idrogeologici, archeologici e di esplorazione mineraria. Sono impiegati per individuare bersagli con dimensioni variabili da qualche millimetro a qualche chilometro (Loke *et al.*, 2013, Pazzi *et al.*, 2019).

Il metodo geoelettrico, e in particolare la Tomografia di Resistività Elettrica (ERT), è una tecnica molto efficace per la costruzione di modelli geologici e per il monitoraggio delle frane, perché consente di investigare il sottosuolo in modo non invasivo e di ripetere le misure nel tempo.

Il principio fisico su cui si basa è la misura della resistività elettrica del sottosuolo, ovvero la sua capacità di opporsi al passaggio della corrente elettrica, una proprietà che varia in funzione della litologia, del grado di fratturazione e soprattutto del contenuto d'acqua, fattori strettamente legati ai processi di instabilità dei versanti.

Durante le indagini una serie di elettrodi viene disposta sulla superficie del terreno e le acquisizioni avvengono mediante una sequenza preimpostata, preparata dall'operatore, che di volta in volta seleziona sia la coppia di elettrodi che induce corrente nel terreno che la coppia che misura il potenziale.

L'immissione di corrente elettrica nel terreno e la misura delle differenze di potenziale, unite all'informazione sulla geometria di acquisizione (cioè la posizione dei quattro elettrodi utilizzati), consentono di ottenere dati che, una volta elaborati tramite algoritmi di inversione, vengono trasformati in immagini 2D o 3D della distribuzione di resistività nel sottosuolo.

Queste immagini costituiscono la base per la costruzione di modelli geologici, nei quali è possibile riconoscere le principali unità litologiche e i loro rapporti strutturali.

L'interpretazione dei modelli geoelettrici, integrata con informazioni geologiche e geotecniche indipendenti, permette di individuare elementi chiave per la comprensione della frana, come la geometria del corpo instabile, la posizione della superficie di scivolamento e la presenza di livelli argillosi o zone fortemente saturate. In molti casi, i contrasti di resistività evidenziano il passaggio tra materiali rimaneggiati e il substrato più competente, fornendo indicazioni fondamentali per la ricostruzione del modello geologico del versante.

Il sistema *FullWaver* della Iris Instruments (Figura 106) è stato progettato per la misura di resistività, polarizzazione indotta e potenziale spontaneo su grandi superfici 2D e 3D con topografia complessa.

Il tipo di misura, pur conservando i principi base della prospezione geoelettrica, costituisce un approccio innovativo nell'acquisizione del dato, aumentando le potenzialità del metodo anche rispetto ai tradizionali sistemi multielettrodi, ormai in uso da decine di anni.

La strumentazione si compone di un sistema di trasmissione ad alta potenza (TIP 6000, Figura 106b) posto in serie ad una unità *box I-FullWaver* (box arancione in Figura 106a,b) per la generazione e la misura della corrente immessa, e di almeno 30 sistemi indipendenti di registrazione del potenziale (*box verdi* in Figura 106a, denominati *V-FullWaver*), ognuno dei quali gestisce 3 elettrodi (P1,P2 e P3) che formano 2 coppie di elettrodi di potenziale (P1-P2 e P3-P3) in continua misurazione, così da poter registrare sia il Potenziale Spontaneo che quello indotto dall'energizzazione.

Ciascun *box* ha un'autonomia di funzionamento continuativo di 8 h, con un tempo di campionamento di 10 ms. L'apertura dei dipoli di potenziale (cioè la distanza tra P1 e P2 e quella tra P2 e P3) può arrivare fino a 50-100 m. Il sistema offre una grande flessibilità nella disposizione dei ricevitori, limitando le interazioni dei cavi con le infrastrutture (strade, edifici, proprietà private), e la spaziatura tra le triplette di elettrodi definisce la profondità di indagine (oltre i 200 m), utilizzando una configurazione di acquisizione con i poli di energizzazioni remoti.

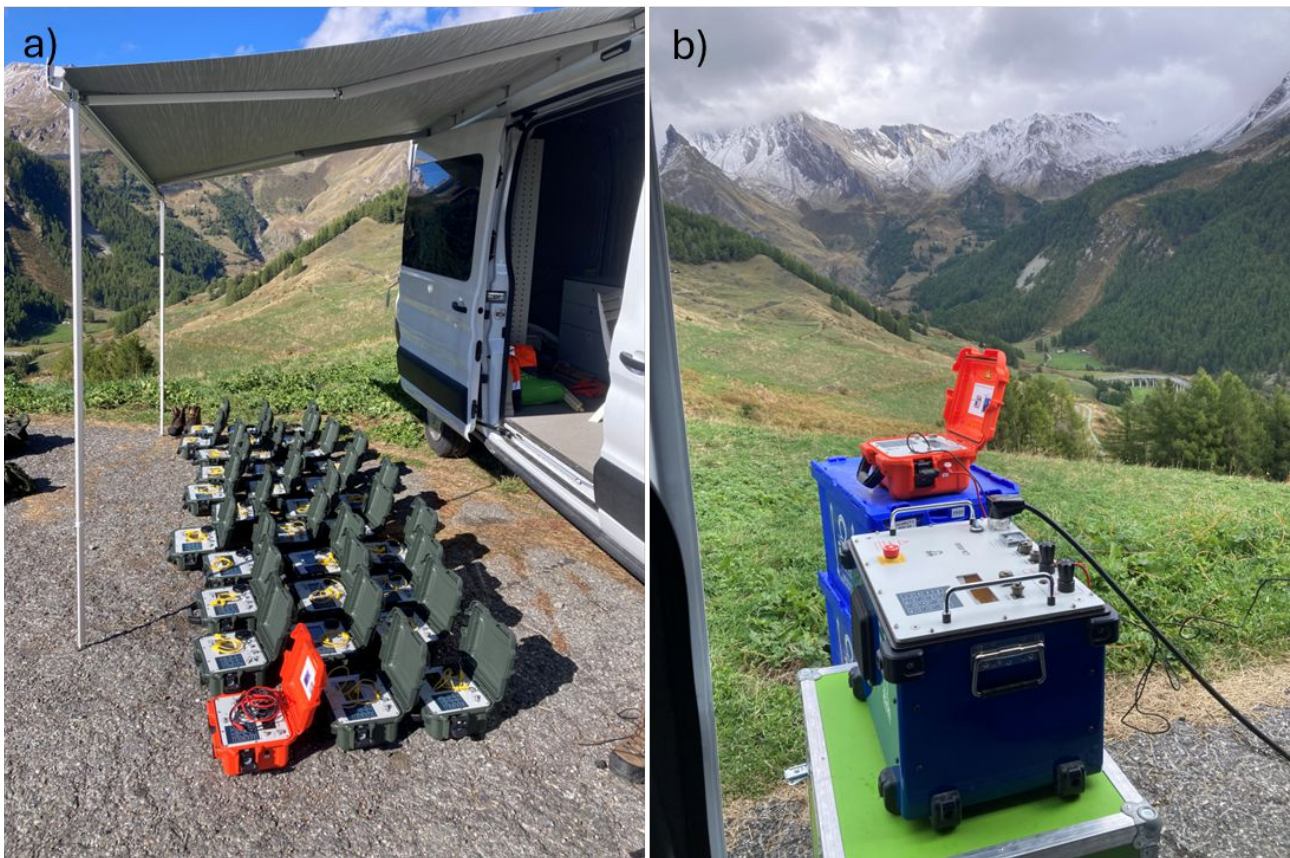
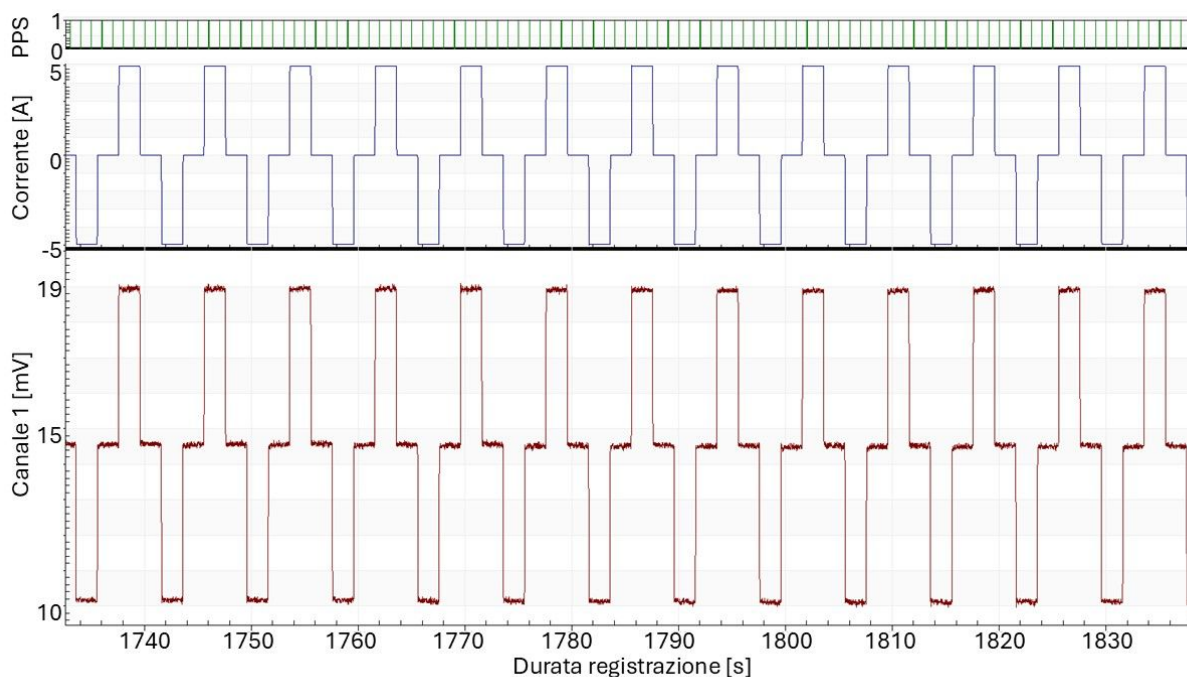


Figura 106 - a) I gruppi di registrazione del sistema *FullWaver*: il box arancione è l'*I-FullWaver* che, posto in serie al trasmettitore, registra la corrente generata nel terreno, i box verdi sono i *V-FullWaver* che misurano le differenze di potenziale del campo elettrico generato dalla corrente immessa. b) Unità di trasmissione ad alta potenza TIP 6000 collegata in serie all'unità *I-FullWaver* per la registrazione della corrente immessa.

Tale configurazione è finalizzata ad avere un buon dettaglio dei primi metri del sottosuolo, unitamente ad una misura profonda. Ciascun *V-FullWaver* è dotato di un'unità GNSS per la sincronizzazione PPS e la localizzazione, così come il TIP 6000 è il dispositivo GNSS integrato che permette la sincronizzazione dei segnali di corrente *I* e di potenziale *V* misurati (Figura 107), in modo da ricavare i tradizionali valori essenziali al calcolo della resistività secondo la legge di Ohm, ed eventualmente della caricabilità qualora sia richiesta l'analisi della polarizzazione indotta.

Mediante ogni campagna geoelettrica con *FullWaver* prevede più di 5000 punti di misura nel sottosuolo e la progettazione dei punti di misura richiede un importante lavoro pianificatorio solitamente eseguito sfruttando le potenzialità dei pacchetti *Google Earth*, in modalità *StreetView*, unite ad un sopralluogo, laddove possibile.



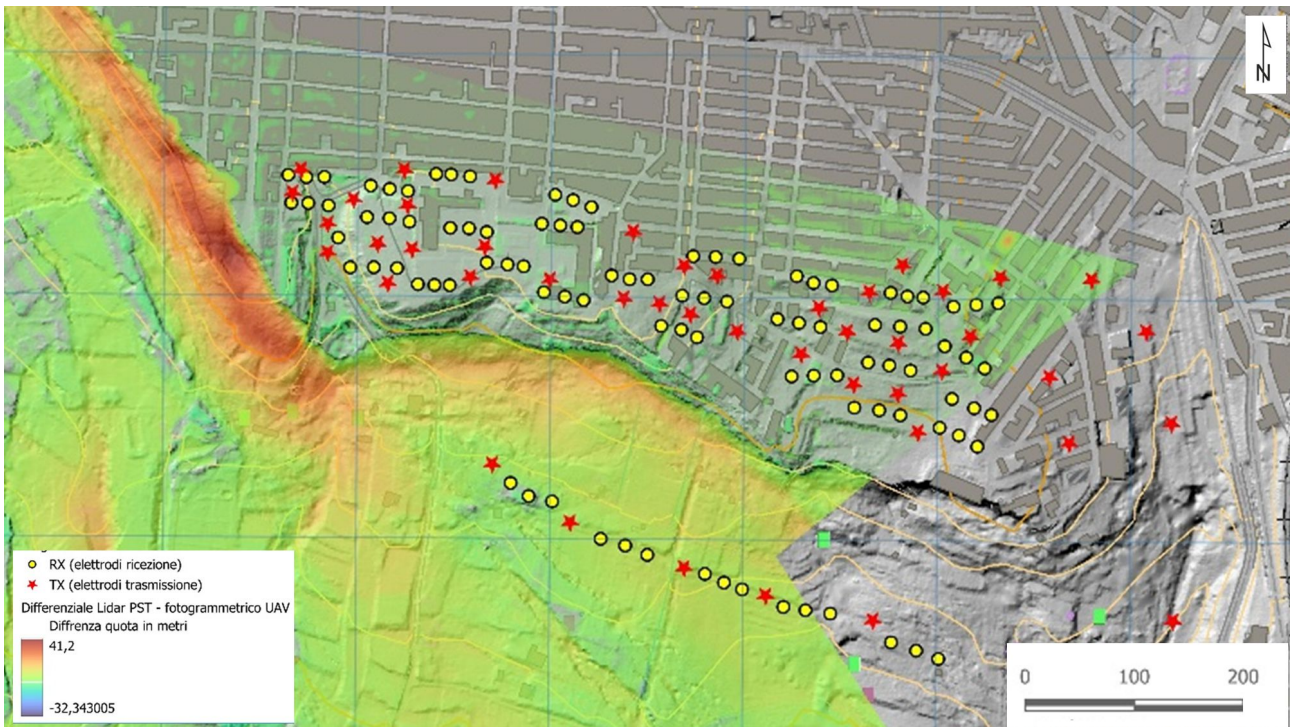
**Figura 107 - Esempio di sincronizzazione dei segnali registrati dal GNSS (barre verde in alto), dall'unità *I-FullWaver* (grafico blu) e dall'unità *V-FullWaver* (grafico rosso).**

### 6.1.2 Campagna di acquisizione

La campagna di indagine 3D aveva l'obiettivo di caratterizzare il contesto geologico profondo al di sotto dell'abitato di Niscemi. In Figura 108 è riportata l'ubicazione del rilievo così come progettato sfruttando le potenzialità dei pacchetti *Google Earth*, in modalità *StreetView*, unite ad un modello morfologico differenziale, ottenuto utilizzando i rilievi aerofotogrammetrici pre- e post-frana, realizzato dal Comune di Niscemi e forniti dal DRPC.

La scelta dell'area, sebbene in una zona interdetta e accessibile solo previa scorta di personale abilitato, è stata dettata dalla presenza di un centro abitato pressoché privo di superfici non coperte (spazi verdi pubblici, aiuole, giardini).

Il livello di dettaglio della progettazione è stato elevato, anche per ottimizzare al massimo la logistica sul terreno, considerando i vincoli legati all'operatività in un ambiente urbanizzato in stato di emergenza con pesanti limitazioni di accessibilità. Il disegno del progetto sfrutta l'app *Google Earth*, in modo da poter essere facilmente consultato dai componenti delle squadre di acquisizione durante le operazioni di campagna.



**Figura 108 - Progettazione preliminare del rilievo geoelettrico utilizzando come base il modello differenziale di spostamento ottenuto confrontando dati morfologici pre- e post-frana.**

Per l'esecuzione delle misure di resistività, caricabilità e potenziale spontaneo è stato utilizzato esclusivamente il sistema *FullWaver* della Iris Instruments.

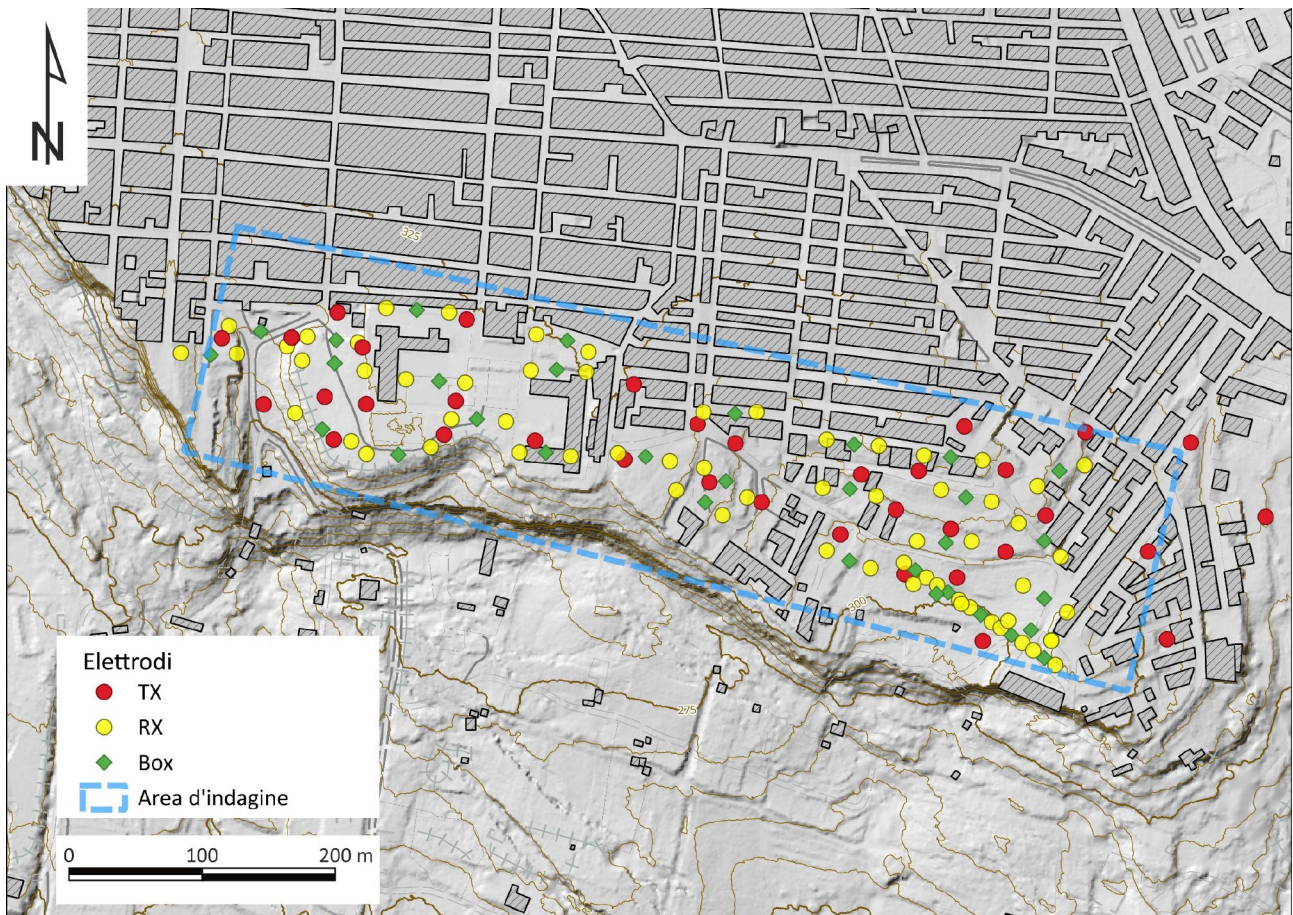
La campagna di prospezione geoelettrica 3D è stata condotta nei giorni 9-11 febbraio 2026. Per l'acquisizione del potenziale sono stati impiegati 32 *box*, 27 dei quali con gli elettrodi P1 e P3 (pallini gialli - RX in Figura 109) posti a 20 m rispetto all'elettrodo centrale P2 (rombo verde - Box in Figura 109) e distribuiti come da progetto e come indicato in Figura 109 in modo da investigare un'area di ca. 170x700 m (area delimitata dalla linea tratteggiata blu in Figura 109), e 5 con gli elettrodi P1 e P3 (pallini gialli in Figura 109) posti a 10 m rispetto all'elettrodo centrale P2 (box in Figura 109) e distribuiti in modo da risultare sovrapposti alla linea di acquisizione della prospezione sismica.

Questi ultimi sono stati così posizionati, constatata l'impossibilità, per motivi di sicurezza, di posizionarli al piede della frana nel luogo di progetto.

Per l'energizzazione sono stati posizionati due poli positivi remoti (TX1 e TX2 all'esterno dell'area raffigurata in Figura 109) che sono rimasti fissi nel corso di tutta l'acquisizione e che venivano alternativamente collegati ad uno dei 36 poli negativi distribuiti all'interno dell'area di indagine (pallini rossi - TX in Figura 109).

Tutti i punti di misura TX, così come tutti gli elettrodi, sono stati georiferiti con un rilievo GNSS dedicato al fine di ottenere il corretto valore del fattore geometrico.

In totale sono quindi state effettuate 107 energizzazioni con valori di corrente nel *range* di 5-7 A e sono stati acquisiti quadripoli sia in modalità dipolo-dipolo che gradiente (così da combinare i vantaggi di entrambi gli *array* di misura e ridurre i limiti) per un totale di 6639 acquisizioni distribuite fino a più di 200 m di profondità.



**Figura 109 - Distribuzione dei *box*-P2 (rombi in verde) e degli elettrodi (P1 e P3) di acquisizione del potenziale (RX, in giallo). Si ricorda che, per ciascun *box*, la misura del potenziale avviene tra la coppia P1-P2 e la coppia P3-P2. In rosso sono indicate le posizioni dei poli negativi usati per la trasmissione della corrente (TX, in rosso). In blu è indicata la pianta dell'area indagata.**

### 6.1.3 Risultati

Il contesto ambientale in cui si è svolta l'indagine, pur presentando una potenziale complessità data dall'abitato stesso, mostra valori di resistività praticamente privi di rumore antropico. Le misure sono quindi risultate di ottima qualità.

A titolo di esempio in Figura 110 è riportato il dettaglio del segnale registrato al primo canale del *box* V-FW n. 9 (ricevitore RX9) in corrispondenza dell'evento di trasmissione tra gli elettrodi TX307 e TX108. Si può distintamente riconoscere il segnale dovuto al campo elettrico generato dal dipolo di trasmissione.

La presenza di circa 10 *stack* di misura, registrati nel corso di quasi 90 s di iniezione della corrente, consente di individuare un segnale medio decisamente buono (grafico in basso a sinistra nella Figura 110) con ampiezza dell'ordine di 50 mV.

Le misure di caricabilità (grafico in basso a destra) identificano chiaramente una curva di scarica. Questa tendenza è confermata anche nella misura dipolo-dipolo, riportata in Figura 111, dove si osserva un andamento analogo della curva di scarico, misurata in 8 momenti, considerato il tempo di 2000 ms impostato per questo tipo di misura.

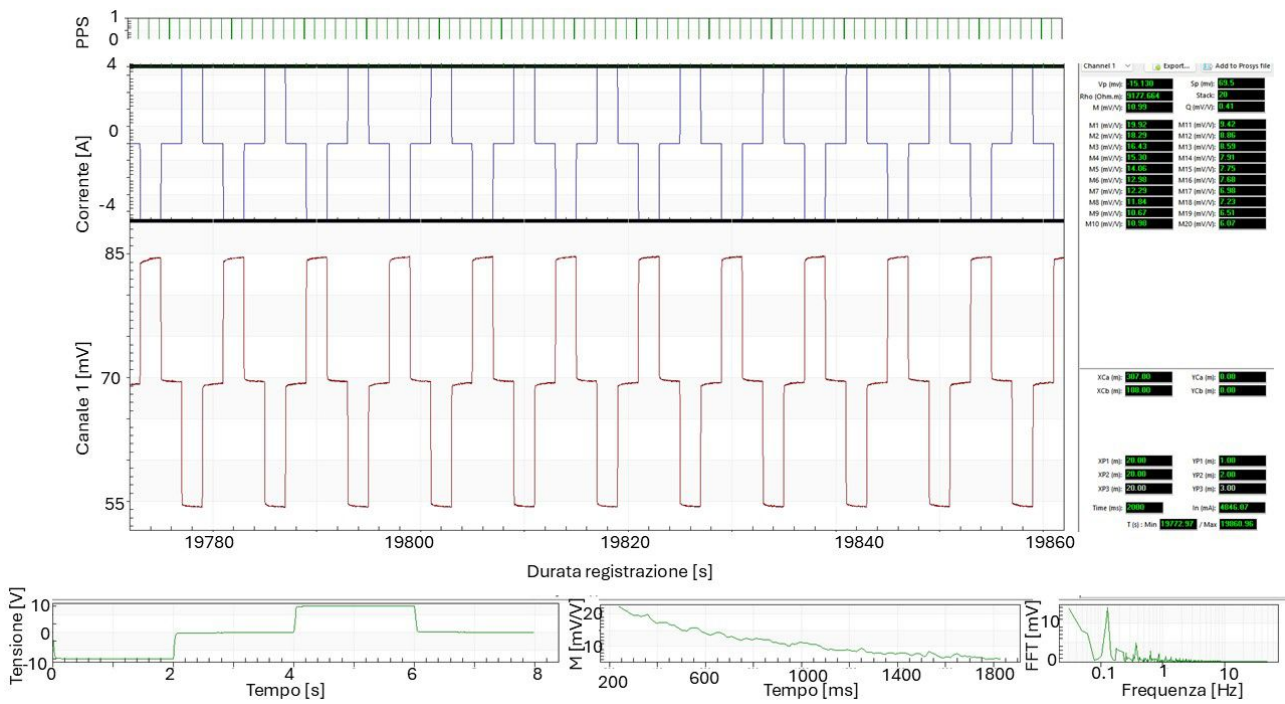


Figura 110 - In blu il grafico dell'andamento temporale dell'intensità di corrente (mA) iniettata in corrispondenza del dipolo di trasmissione TX307-TX108 (quadripolo di tipo gradiente). In rosso il grafico dell'andamento temporale del corrispondente segnale di potenziale (mV) registrato dal primo canale del box V-FW n. 9. In basso a destra il segnale mediato sui diversi stack di misura. In basso al centro la curva di scarico della caricabilità.

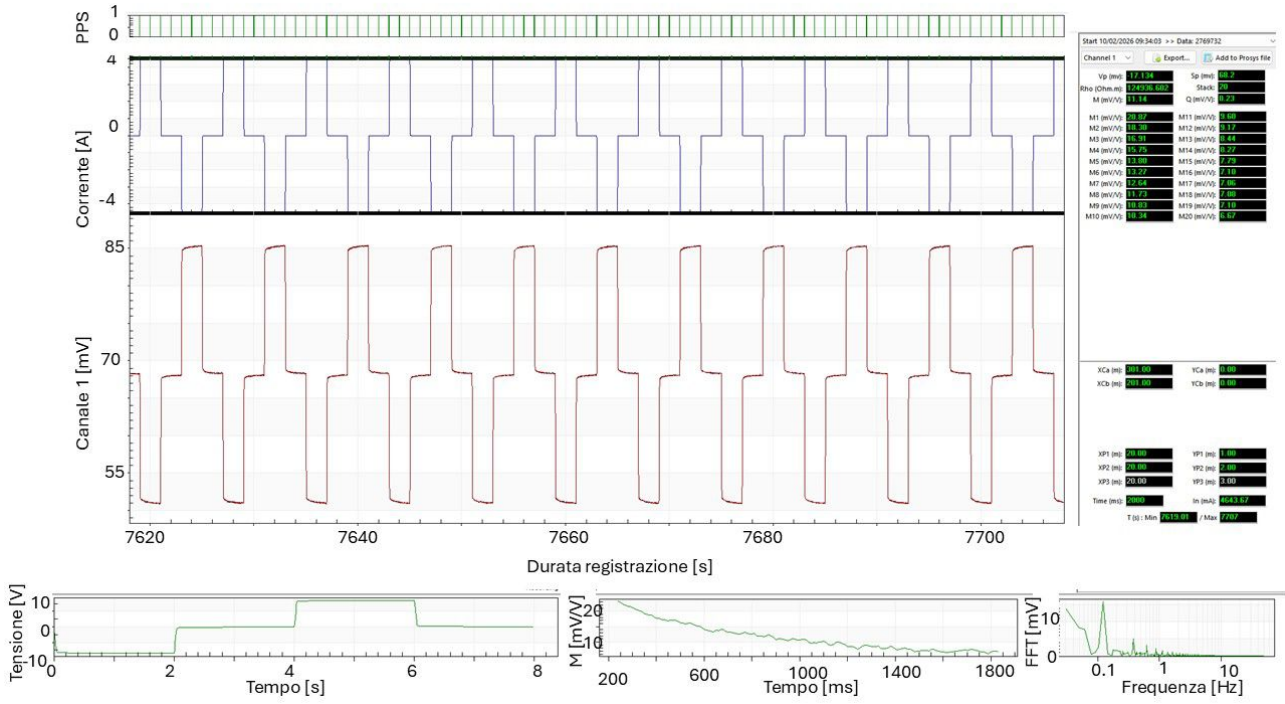
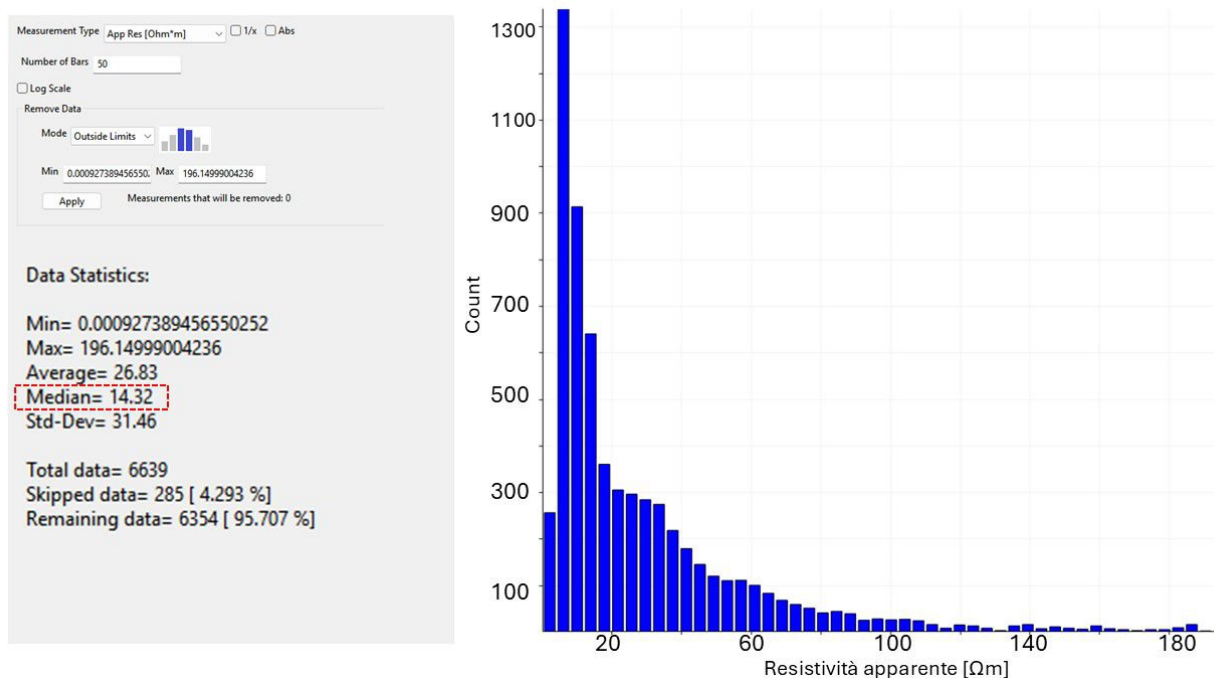


Figura 111 - In blu il grafico dell'andamento temporale dell'intensità di corrente (mA) iniettata in corrispondenza del dipolo di trasmissione TX301-TX201 (quadripolo di tipo dipolo-dipolo). In rosso il grafico dell'andamento temporale del corrispondente segnale di potenziale (mV) registrato dal primo canale del box V-FW n. 20. In basso a destra il segnale mediato sui diversi stack di misura. In basso al centro la curva di scarico della caricabilità.

La fase di *pre-processing* del dato, oltre che alle consuete verifiche sulla qualità del dato, richiede l'analisi del segnale per ogni singola stazione di misura ed il suo abbinamento con le trasmissioni. Tale passaggio è indispensabile, altrimenti il *software* di inversione non è in grado di leggere le misure in maniera corretta, e viene effettuato mediante il programma *FullWaver Viewer*, la cui schermata è riportata in Figura 112.



**Figura 112 - Istogramma dei valori di resistività apparente misurati che evidenzia valori di resistività apparente misurati nel sito molto bassi.**

L'elaborazione dei dati ERT è stata effettuata utilizzando il *software* ViewLab 3D della Geostudi Astier, versione 3.8, attraverso il classico processo dell'inversione geofisica 3D con l'applicazione della seguente configurazione:

- aggregazione delle singole acquisizioni;
- importazione della topografia in quote ortometriche (coordinate UTM33 - WGS84);
- generazione, sulla base dell'ubicazione dei punti di misura del sottosuolo e alla loro estensione areale, della *mesh* 3D, con celle cubiche con il lato pari a circa un terzo della distanza elettroica (7.5 m) e una profondità totale ottenuta dalla distribuzione dei punti di misura (Figura 113), previa verifica di quanto ipotizzato in fase di simulazione. Questo accorgimento limita la creazione di artefatti in fase di inversione, creando un modello, certamente meno esteso in termini di dimensioni, ma sicuramente più robusto ed affidabile in termini di risultati. La base di partenza per la realizzazione delle maglie 3D per l'inversione dei dati è stato il DTM fornito dal DRPC, che è stato decampionato adeguando la dimensione delle celle a quella delle maglie di progetto;
- rototraslazione della maglia per minimizzare la regione di *background*;
- definizione del modello di resistività di partenza per l'inversione pari a 18  $\Omega$ m (valore leggermente maggiore della mediana dei valori di resistività apparente come si vede in Figura 112);
- applicazione del 1% di rumore ai dati per la resistività;
- applicazione di un tipo di inversione con ricalcolo del parametro *roughness* a ciascuna iterata con un massimo di 4 *trial* (*full inversion*).

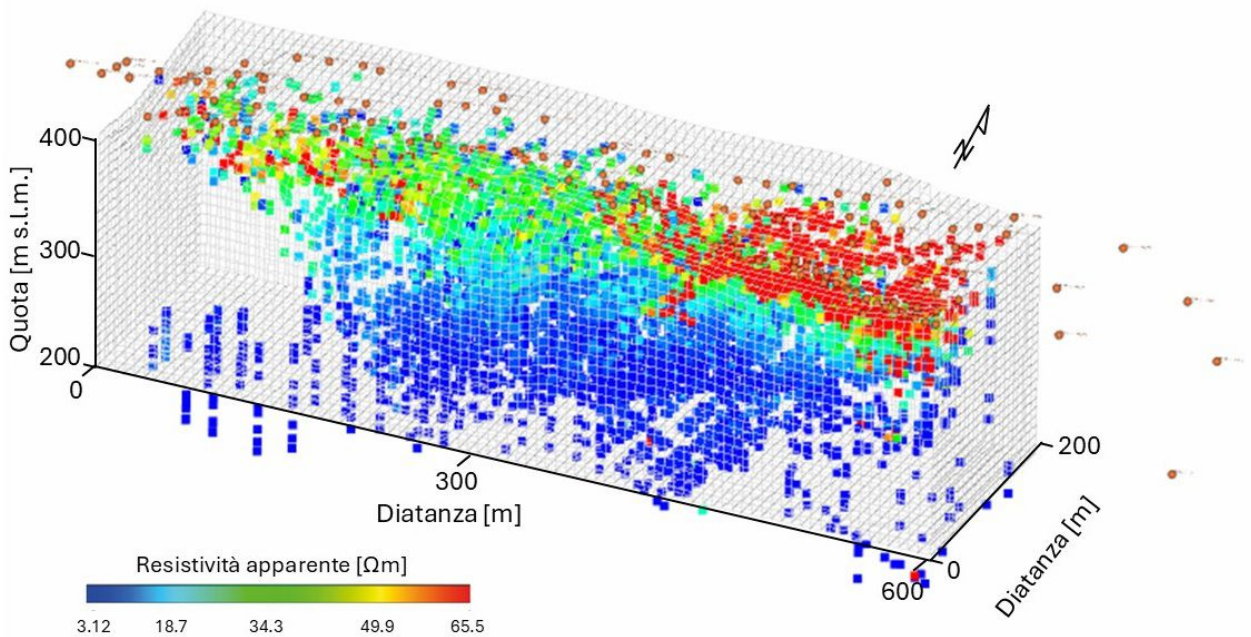


Figura 113 - Ubicazione nel sottosuolo dei punti di misura utilizzati nell'inversione e derivano dal filtraggio del dato di campagna (pallini colorati) e *mesh* 3D per l'inversione dei valori di resistività apparente.

Il tool di processing *ViewLab* 3D realizza l'inversione minimizzando gli scarti tra pseudosezione calcolata e pseudosezione misurata con l'applicazione matematica del metodo dei minimi quadrati associato a regolarizzazione, nota in letteratura come Inversione "Occam".

Le inversioni di resistività, mediamente, sono andate a convergenza in 6 iterazioni con una ottima concordanza fra modello calcolato e modello misurato come evidenziato in Figura 114: a sinistra è riportato il numero totale delle iterazioni nel processo di inversione e a destra il *cross-plot* dei dati misurati confrontati con i dati modellati al termine della inversione.

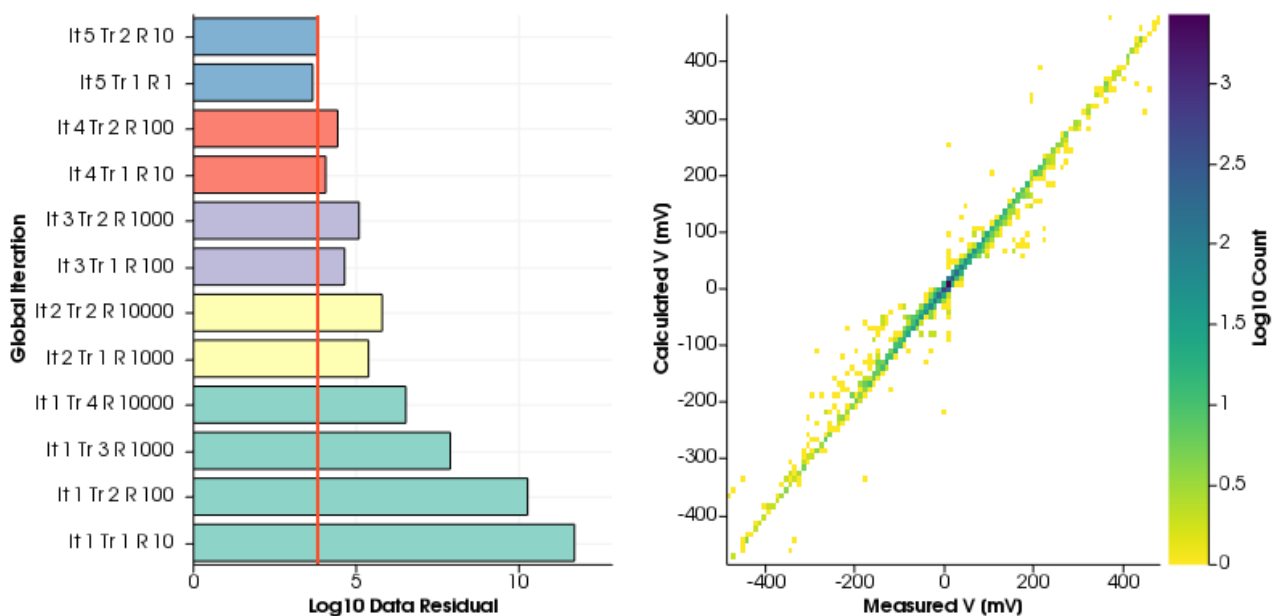
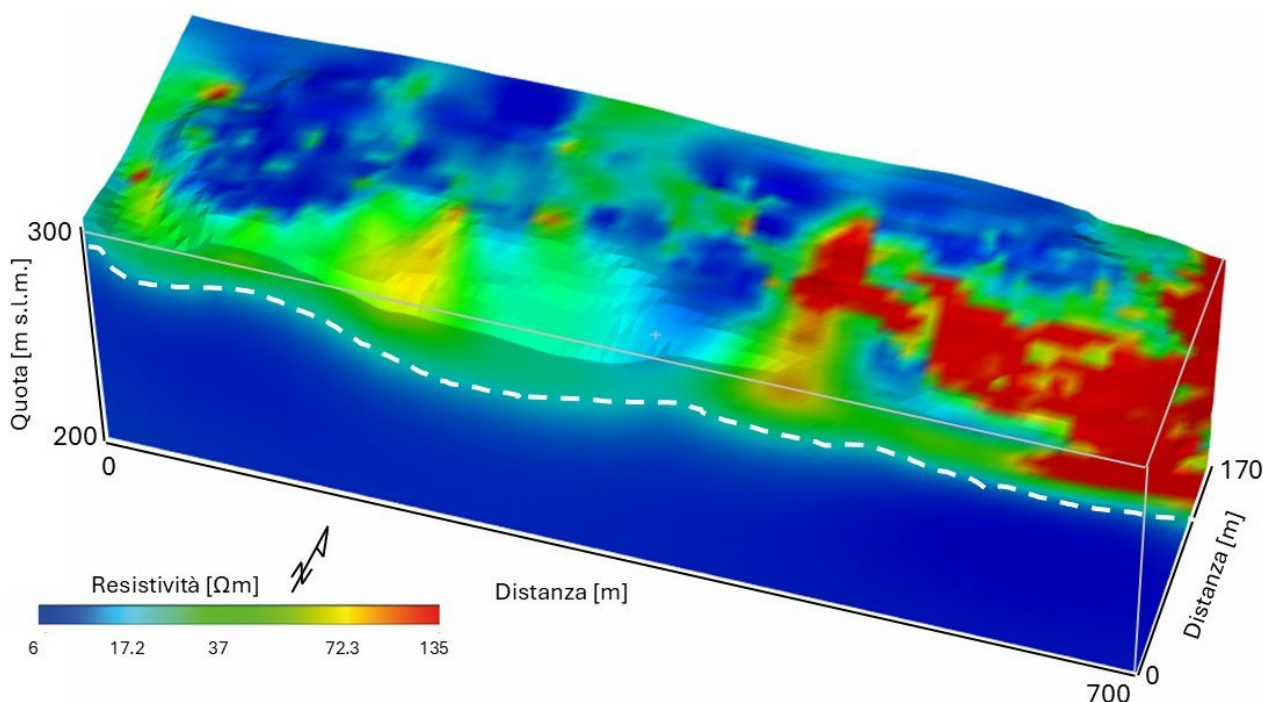


Figura 114 - Grafici finali di controllo del processo di inversione della resistività: a sinistra l'andamento del *misfit* fra i dati modellati e quelli misurati. A destra *cross-plot* della *V* (mV) fra dati calcolati da modello al termine dell'inversione e quelli misurati sul campo.

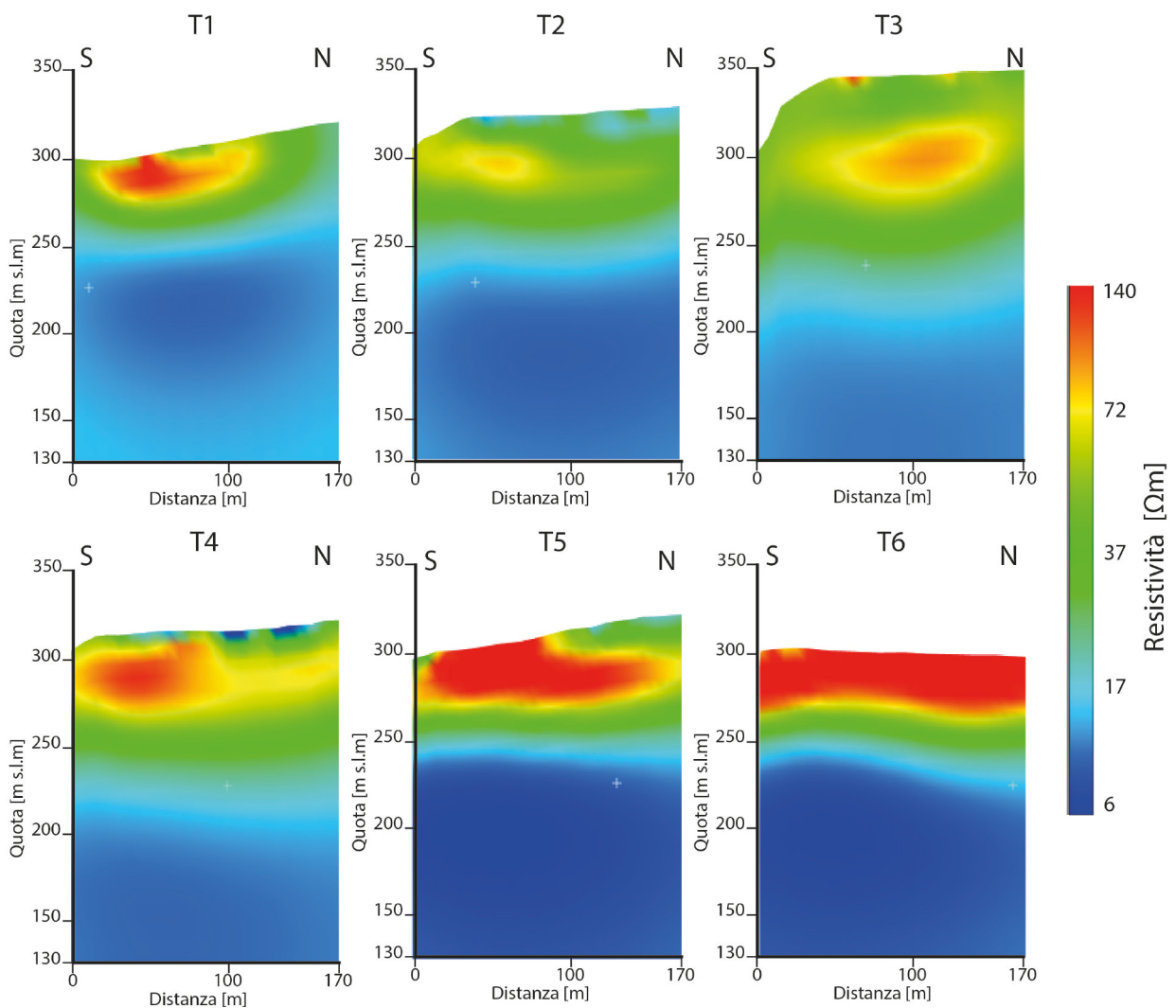
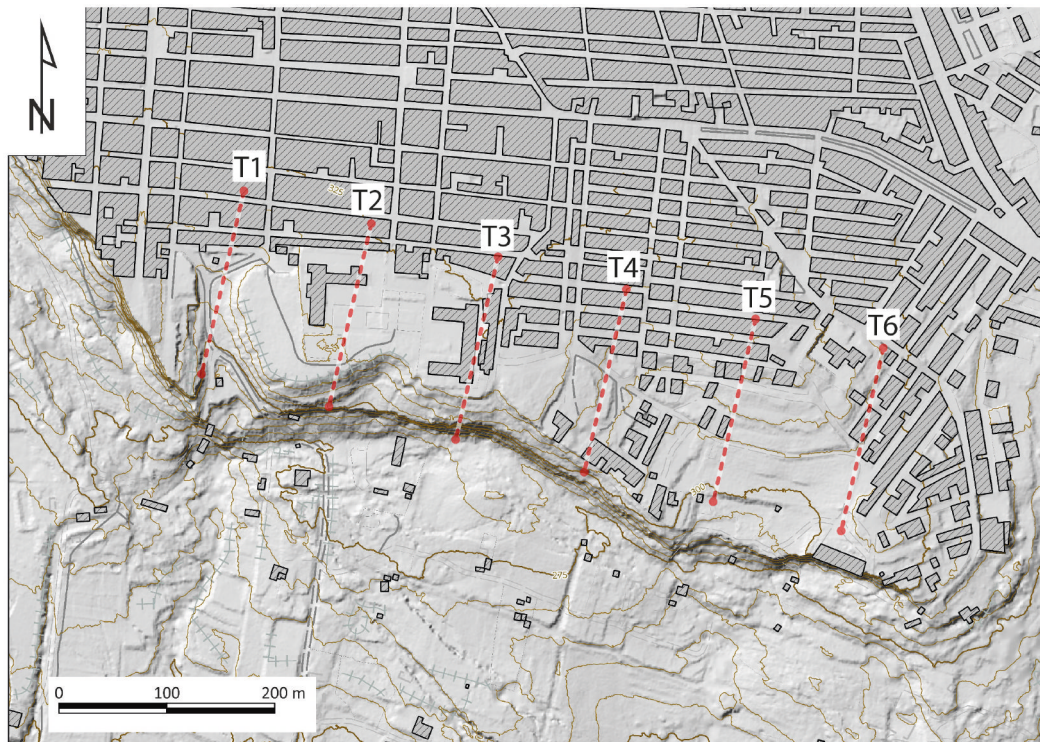
Il modello 3D di resistività ottenuto è riportato in Figura 115 e mostra chiaramente la presenza di un importante volume basso resistivo profondo che si sviluppa generalmente a partire da 50 m di profondità. Esso è descrivibile come il pacco di argille noto dalla letteratura dell'area.



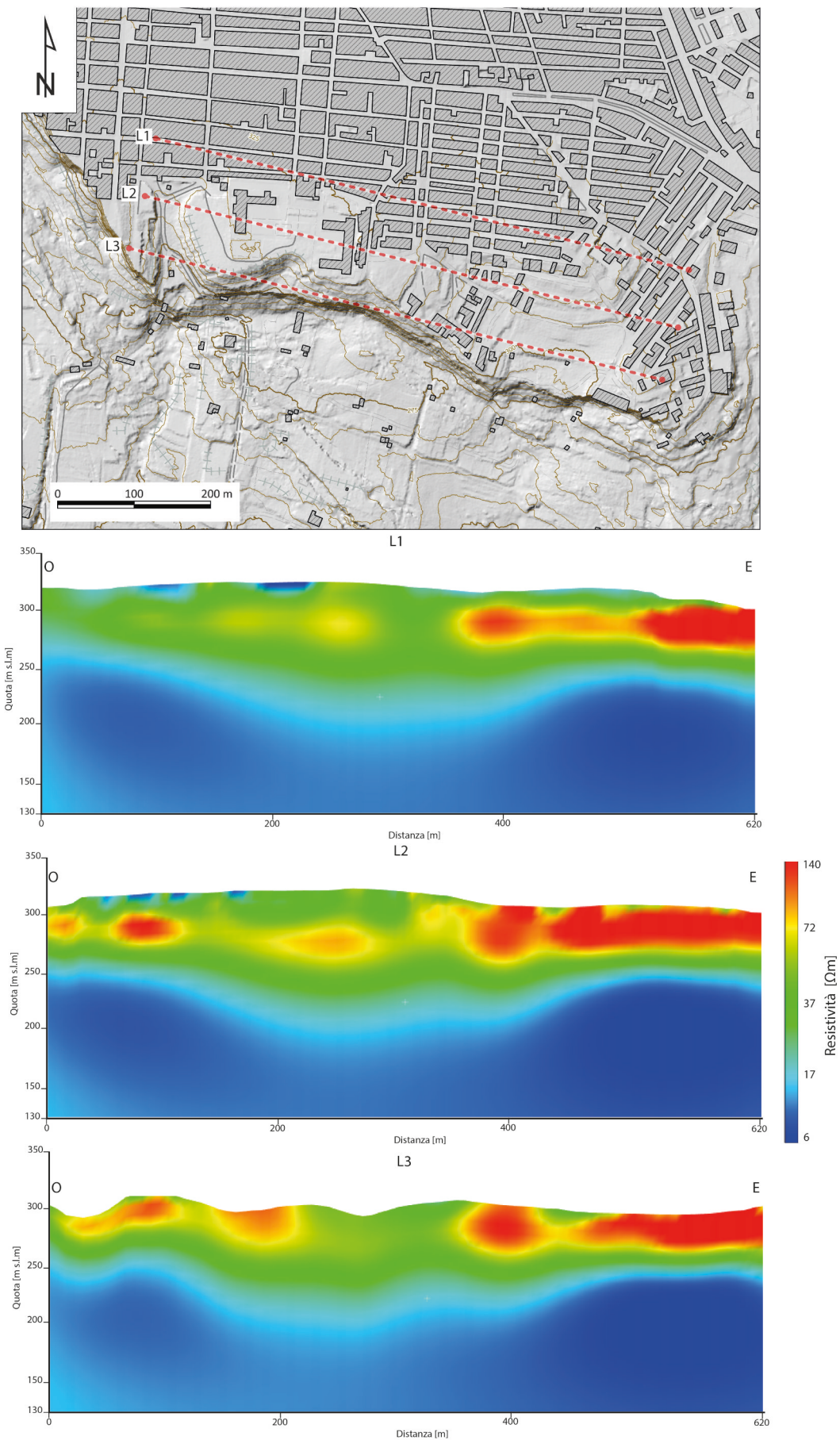
**Figura 115 - Volume di resistività, con evidenziato (linea bianca tratteggiata) il presunto contatto tra le argille profonde e le sabbie su cui sorge l'abitato di Niscemi. In trasparenza è sovrapposto il DTM aggiornato alla situazione morfologica attuale.**

In Figura 116 e Figura 117 sono riportate rispettivamente alcune sezioni trasversali (orientate sud-nord) e longitudinali (orientate ovest-est) che mettono in luce degli allineamenti concordi con quanto riportato in Rizzo (2004) e mostrano come il tetto del corpo argilloso sia irregolare e presenti degli elementi con resistività inferiore.

Il sovrastante volume con resistività di fondo di 40  $\Omega\text{m}$  presenta volumi più alti resistivi concentrati nella parte orientale del modello. In Figura 118 sono riportate tre sezioni orizzontali a diversa profondità (300 m, 260 m e 200 m s.l.m.) che confermano, soprattutto in profondità, un allineamento concorde con quanto riportato da Rizzo (2004).



**Figura 116 -** Sezioni trasversali al corpo di frana (T1-T6) estratte dall'intero volume indagato. La loro localizzazione in pianta è mostrata nel pannello in alto. Tutte e sei le sezioni sono orientate da sud a nord. Colori freddi indicano valori di resistività bassi (alta conducibilità), mentre i colori caldi indicano alti valori di resistività (bassa conducibilità).



**Figura 117 - Sezioni longitudinali al corpo di frana (L1-L6) estratte dall'intero volume indagato. La loro localizzazione in pianta è mostrata nel pannello in alto. Tutte e sei le sezioni sono orientate da sud a nord. Colori freddi indicano valori di resistività bassi (alta conducibilità), mentre i colori caldi indicano alti valori di resistività (bassa conducibilità).**

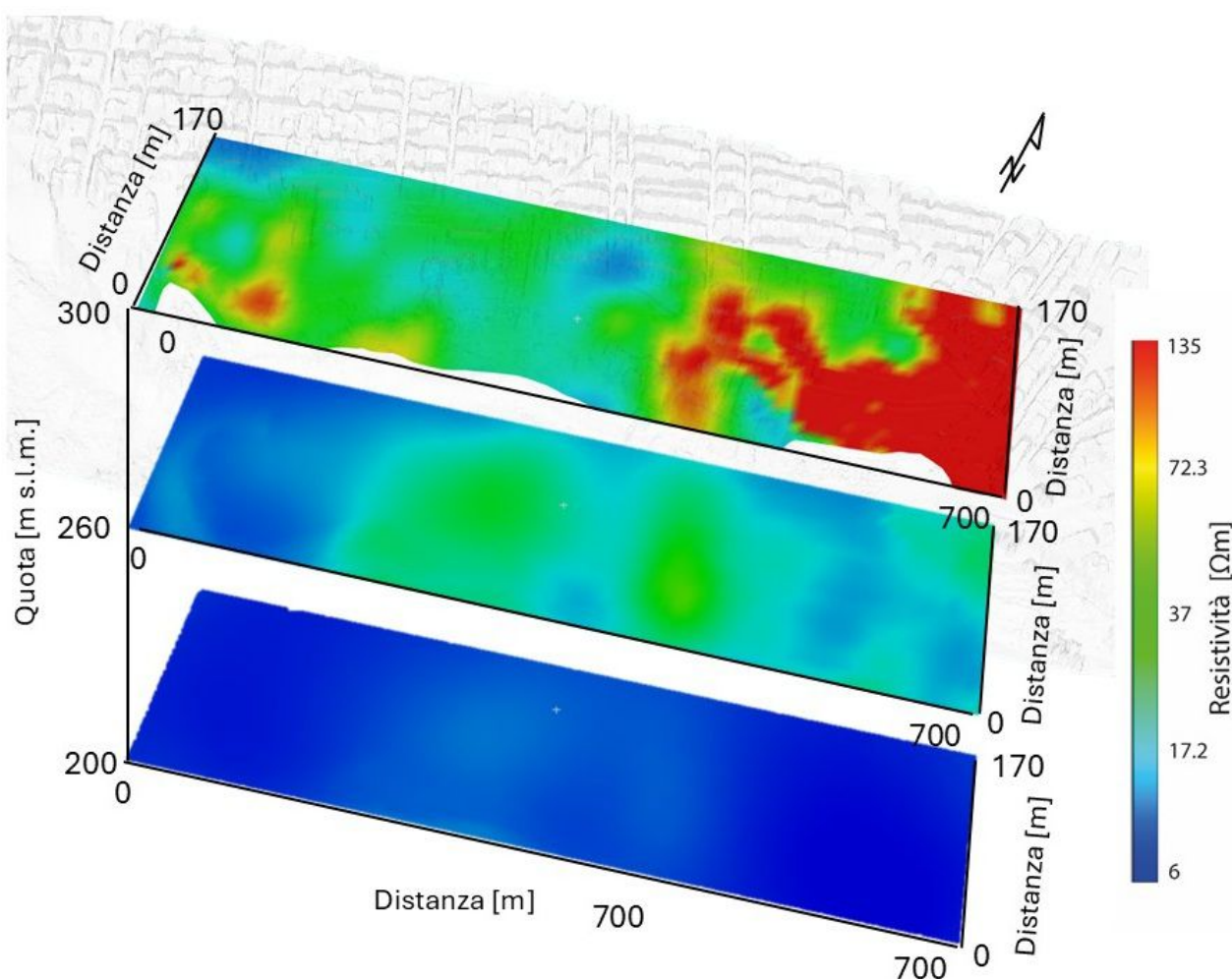


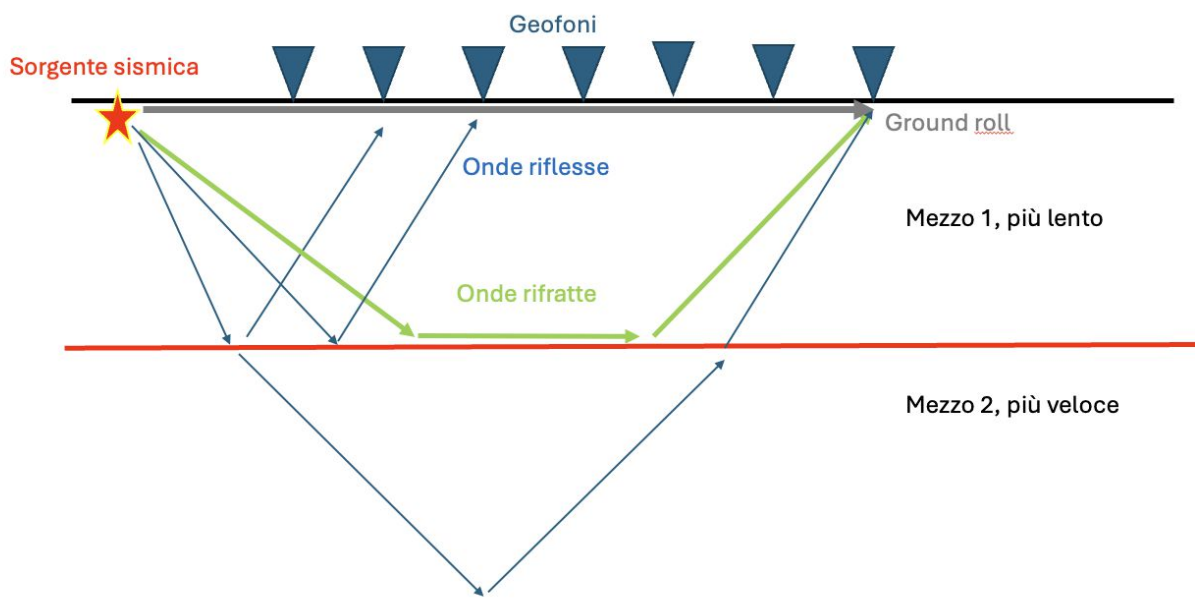
Figura 118 - Sezioni in pianta estratte dall'intero volume indagato a tre diverse profondità (300 m, 260 m e 200 m s.l.m.). Colori freddi indicano valori di resistività bassi (alta conducibilità), mentre i colori caldi indicano alti valori di resistività (bassa conducibilità).

## 6.2 Indagine sismica ad alta risoluzione in onde P e SH

### 6.2.1 I metodi di sismica attiva

I metodi di sismica attiva sono tecniche geofisiche non invasive ampiamente adottate per investigare le proprietà elastiche e strutturali del sottosuolo attraverso l'immissione controllata di energia meccanica e la registrazione della risposta del terreno, sotto forma di onde di superficie, riflesse o rifratte. A differenza delle indagini passive, nella sismica attiva il segnale di origine è generato artificialmente, con sorgenti controllate, la cui tipologia dipende dagli obiettivi di indagine, dalla profondità di interesse e dalle caratteristiche del sito.

La risposta del terreno a tale sollecitazione viene registrata da dei sensori, detti geofoni, posti equispaziati sulla superficie. Sui sismogrammi così ottenuti è possibile identificare principalmente tre tipi di onde, le cui modalità di propagazione sono schematizzate in Figura 119. Il *Ground roll* (in grigio in Figura 119), o onda di superficie, si propaga all'interfaccia tra il terreno e la superficie libera. L'energia che penetra all'interno del terreno ad un certo punto incontrerà un'interfaccia con uno strato avente velocità di propagazione più alta e maggiore densità, ovvero maggiore impedenza acustica. A quel punto, a seconda dell'angolo di incidenza, si avrà una riflessione di parte dell'energia verso la superficie (in blu in Figura 119) oppure una rifrazione (in verde in Figura 119).



**Figura 119 - Schema del metodo sismico, in cui sono evidenziati i principali tipi di onde generate dalla sorgente sismica controllata: in grigio il *Ground roll*, in verde le onde rifratte e in blu le onde riflesse e trasmesse dal mezzo 1 al mezzo 2.**

L'elaborazione dei dati sismici richiede una sequenza complessa di passaggi, tra cui la correlazione con il segnale sorgente e l'applicazione di filtri per aumentare il rapporto segnale/rumore. In seguito a questa fase di *preprocessing*, è possibile "separare" i tre tipi di onda qui sopra descritti e procedere ad estrarre informazioni da ciascuna di esse. In particolare, dalle onde rifratte, tramite un processo d'inversione, è possibile ottenere un profilo bidimensionale di velocità sismica.

Dalle onde di superficie, sempre tramite un processo d'inversione, è possibile ottenere un profilo monodimensionale di velocità delle onde di taglio. Infine, dalle onde riflesse è possibile ottenere un'immagine in profondità delle geometrie presenti nel sottosuolo, in cui ai riflettori possono corrispondere contatti litologici, superfici di scorrimento, strati a diverso grado di fratturazione e saturazione in fluidi, ecc. L'elaborazione dei dati sismici risulta particolarmente complessa e richiede un cospicuo investimento in termini di tempo e risorse computazionali per ottenere dei risultati affidabili e quindi geologicamente interpretabili.

### 6.2.2 Campagna di acquisizione

L'indagine sismica prevedeva l'acquisizione in zona di frana di un profilo ad alta risoluzione in onde P e SH.

Con il supporto dei VVFF del comando di Caltanissetta e della Protezione Civile, in data 6 febbraio è stata effettuata una scelta delle possibili aree dove posizionare la linea. I criteri di scelta sono stati vincolati dall'accessibilità (rischiosità causata dall'evento franoso in atto), dalla lunghezza (le dimensioni del profilo devono essere compatibili con la profondità del bersaglio), dalla presenza di eventuali rumori ambientali (traffico, sorgenti di rumore antropiche, ecc.) e dalla mancanza di sottoservizi (dispersione di energia immessa, segnali ghost, ecc.).

Date le condizioni ambientali, delle possibili aree individuate tramite l'analisi delle immagini satellitari di *Google Earth*, la scelta è ricaduta sull'area A in Figura 120. Tale area, infatti, si presentava come un falso piano leggermente inclinato a più terrazzi o gradoni, con manto erboso, di facile accesso sia per il personale che per i mezzi di appoggio. La parte più ad est della zona A (50 m), ritenuta ad alta pericolosità, è stata occupata dal personale esclusivamente per il tempo necessario al posizionamento dei sensori.



**Figura 120 - Aree visionate durante lo *scouting*. La scelta è ricaduta sull'area A visto che permetteva un maggiore sviluppo del profilo rispetto all'area B [immagine tratta da Google Earth].**

Il profilo (Figura 121) ha seguito un orientamento SE-NO. Dapprima sono stati posizionati i geofoni orizzontali (LGT a 14 Hz) orientati ortogonalmente alla linea (SH) e spazati ogni 2 metri. Il profilo sismico, iniziato il più vicino possibile al fronte della frana del 1997 (stazione 101), terminava in via Pantelleria (stazione 226), su asfalto. In totale il profilo era coperto da 126 canali per una lunghezza totale dello stendimento di 250 m. In Figura 122 è riportata una foto della fase di allestimento dello stendimento, ed in particolare del posizionamento del primo geofono della linea.

Tutti i dati sismici sono stati acquisiti con *SUMMIT X One DMT*, un sistema telemetrico multicanale, progettato per rilievi flessibili 2D e 3D. Il sistema include delle unità, dette "Box", che possono essere collegate in qualunque punto di un cavo a due fili grazie alla tecnologia *Snap On*, consentendo una geometria del ricevitore (geofono) completamente libera e svincolata da rigidi vincoli spaziali. All'interno di ciascuna unità *Box* è presente un convertitore A/D a 24 bit con frequenze di campionamento fino a 16 kHz.

I dati digitalizzati sono trasmessi alla *console* centrale, dove è possibile visualizzare ciascun *common shot gather* acquisito per il controllo di qualità in tempo reale nella postazione di registrazione. Dalla stessa *console* centrale è possibile effettuare dei test automatici integrati che aiutano a verificare le prestazioni dell'apparecchiatura e permettono di intervenire immediatamente in caso di malfunzionamenti sulla sensoristica. Il controllo di qualità permette anche di monitorare all'istante le eventuali distorsioni della sorgente dovute a scarso accoppiamento.

Il sistema è utilizzato per rilievi a rifrazione e riflessione, indagini ingegneristiche e geotecniche e monitoraggio microsismico (*noise*) in ambienti difficili. Il sistema telemetrico è composto da cavi che si connettono tra loro tramite *Data Collector*, i quali alimentano anche la linea utilizzando batterie esterne.

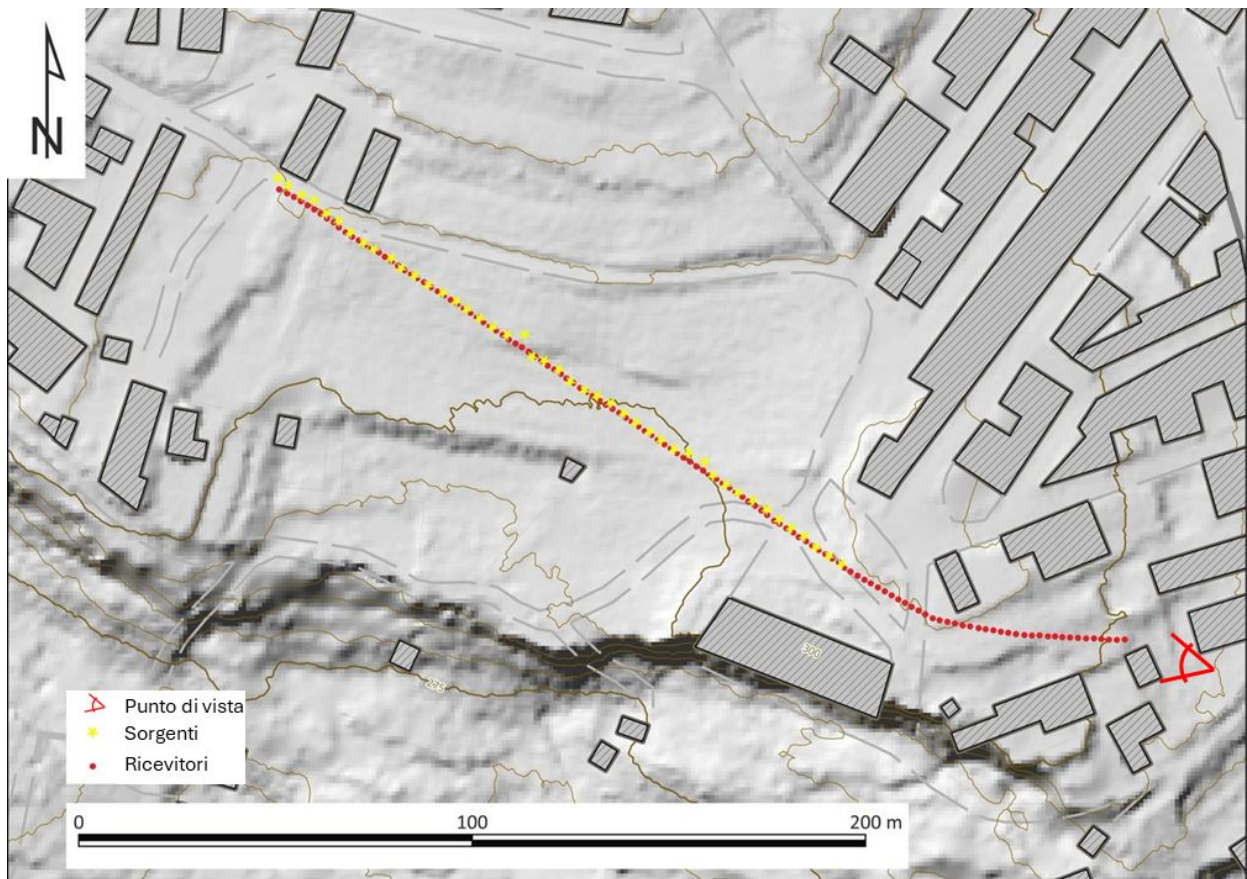


Figura 121 - Posizioni di sorgenti (in giallo) e ricevitori (in rosso) lungo la linea sismica. A SE è inoltre indicato il punto di vista di Figura 122.



Figura 122 - Foto delle fasi di stesura della linea sismica verso NO. Per il punto di vista della foto si faccia riferimento al simbolo in Figura 121.

In Tabella 9 sono riportate le specifiche tecniche del'X One DMT.

Sampling Interval	1/16, 1/8, 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8 ms
Pre-Amplified Gain	0 dB, 20 dB or 40 dB
Gain Accuracy	Typical 1% (tra tutti i canali)
Sample resolution	32 bits
Input Signal range	± 5 V 10 V peak to peak
Input Impedance	20 kOhm
Instantaneous Dynamic Range	≥ 132 dB @ 2 ms sampling interval
Passband	DC (0 Hz) to 0.8 x Nyquist
Digital Anti-Alias Filter	3 dB @ 0.8 x Nyquist
Rejection at Nyquist Frequencies	-120 dB
System Dynamic Range	≥ 145 dB
Analogue Anti-Alias Filter	7.2 kHz 6 dB/octave
Data Format	SEG 2-Y

**Tabella 9 - Specifiche X One DMT.**

Per energizzare, è stata impiegata una sorgente vibrazionale elettrodinamica *ELVIS VII* (costruita dalla ditta *GeoSym GmbH*), di cui riportiamo le caratteristiche in Tabella 10. La scelta è stata motivata dalla portabilità e versatilità del sistema *ELVIS*, nonché dalla possibilità di configurarlo per la generazione sia di onde compressionali (P) sia di taglio (S).

Rispetto alle sorgenti impulsive, le sorgenti vibrazionali presentano il vantaggio di trasferire al terreno energia distribuita nel tempo, evitando picchi di ampiezza istantanea che potrebbero determinare criticità operative. Inoltre, le sorgenti vibrazionali garantiscono una maggiore ripetibilità del segnale immesso ad ogni punto scoppio. Di contro, l'utilizzo e la registrazione di *sweep* della durata di diversi secondi comportano una maggiore esposizione all'acquisizione di rumori ambientali o antropici. Lo *sweep* impiegato per tutte le acquisizioni aveva un range di frequenze tra 20 Hz e 240 Hz, per una durata di 16 s. Il tempo di ascolto è stato fissato a 17 s, risultando quindi in un tempo netto di ascolto pari a 1 s.

Produttore	Geosym GmbH
Modello	EIVIS VII (P/S)
Drive system	Cascaded linear motor
Power supply	24 V DC
Peak force	~ 1100 N
Frequency range (P)	20 - 350 Hz
Frequency range (S)	20-320 Hz
Source weight	~ 35 kg
Total weight	~ 130 kg
Trigger signal output voltage	0.1 Vpp
Sweep signal output voltage	20 Vpp

**Tabella 10 - Specifiche ELVIS VII.**

Le energizzazioni sono state eseguite ogni due stazioni di geofoni (4 m), a partire dalla stazione 225 fino alla 139 (posizioni dispari), più la 226. L'area compresa tra le stazioni 101 e 138 non è stata energizzata poiché interdotta dai VVFF, in quanto ritenuta troppo prossima al bordo della frana. Successivamente all'acquisizione in modalità SH, si è proceduto all'acquisizione del medesimo profilo in modalità P (Figura 1a), installando nel terreno geofoni verticali SM-24 a 10 Hz. L'energizzazione con *ELVIS VII* in modalità compressionale, anche in questo caso ogni due stazioni di geofoni, è stata avviata dalla stazione 139 fino alla 225 (+226). Al termine dell'acquisizione con onde P, la strumentazione *ELVIS* è stata nuovamente configurata in modalità S e, riutilizzando i geofoni orizzontali (ruotati di 90° in senso antiorario), è stato acquisito un ulteriore profilo in modalità SV, non previsto nella proposta di accordo attuativo. L'acquisizione del profilo SV è stata avviata dalla stazione 225 (+226).

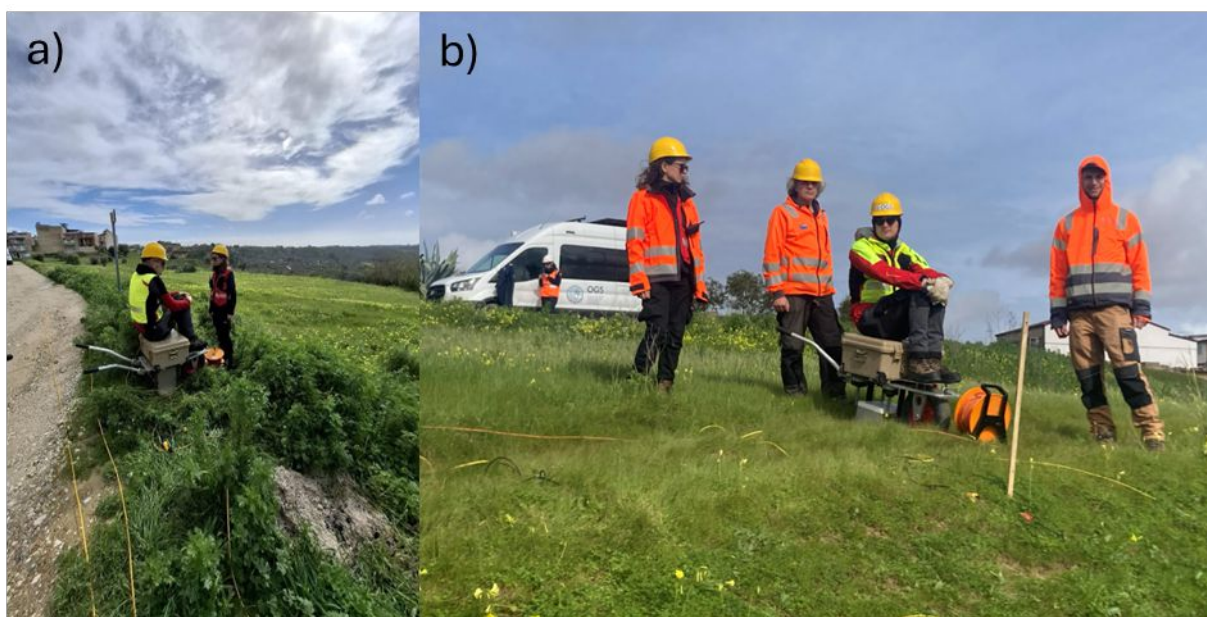


Figura 123 - a) Fase di energizzazione con *ELVIS* in modalità compressoriale. b) Fase di energizzazione con *ELVIS* in modalità SV.

In Tabella 11 sono riportate le specifiche dei geofoni utilizzati per l'acquisizione delle onde P e S.

	SM-24 10 HZ verticale	LGT-14 HZ orizzontale
Natural Frequency (Hz)	10	14
Open Circuit Damping	0.25	0.2
Damping with Shunt Resistance	0.65	0.6
Intrinsic Voltage Sensitivity (V/m/s)	61.2	28.8
Sensitivity with Shunt Resistance (V/m/s)	32	18.2
Coil Resistance (Ohm)	1004	375
Shunt Resistance (Ohm)	1100	-

Tabella 11 - Specifiche dei geofoni utilizzati.

In tutte le modalità di acquisizione sono state effettuate due energizzazioni per ciascun punto di *shot*. I sismogrammi relativi a ciascun punto di energizzazione sono stati poi sommati, al fine di migliorare il rapporto segnale/rumore.

I parametri e la geometria di acquisizione sono riportati in Tabella 12.

Profilo [stazioni]	Inizio energ.	Fine energ.	Shots points	Sweep [Hz]/[S]*	Tempo di registrazione [s]	Sampling interval [ms]
P [101-226]	139	226	88	20-240/16	17	0.5
SH [101-226]	226	139	88	20-240/16	17	0.5
SV [101-226]	226	139	88	20-240/16	17	0.5

Tabella 12 - Specifiche *ELVIS VII*. \**Taper* iniziale e finale dello *sweep* pari a 0.1 s

I dati acquisiti sono stati elaborati separatamente per le onde rifratte (primi arrivi), riflesse e di superficie, per poi essere integrati sia quantitativamente che qualitativamente in sede di interpretazione, specie i profili tomografici e le sezioni a riflessione.

### 6.2.3 Risultati: tomografia dei primi arrivi

La tomografia dei primi arrivi è una tecnica che consiste nell'inversione dei tempi di arrivo (*traveltime inversion*) delle onde rifratte (primi arrivi). Essa consiste nella ricerca iterativa del modello di velocità  $v(x, z)$  tale che i tempi calcolati (o sintetici)  $T_{calc}$  riproducano al meglio i tempi osservati  $T_{obs}$ . Per calcolare i tempi sintetici, ad ogni iterazione il *software* effettua il cosiddetto *ray tracing*, ovvero i raggi relativi a ciascun punto di scoppio vengono deviati all'interno di ciascuna cella della griglia di inversione secondo la legge di *Snell*. Il risultato è un profilo di velocità sismiche, ovvero un'immagine di come la velocità sismica è distribuita nel sottosuolo.

Poiché il metodo si basa sulla misurazione accurata dei tempi di arrivo dei fronti d'onda, il primo passo consiste nel *picking* dei primi arrivi sui *common shot gathers*, ovvero l'identificazione, per ciascun geofono, del tempo in cui l'energia coerente del segnale raggiunge i sensori, superando il livello di rumore di fondo (linee rosse in Figura 124). Questo rappresenta la prima energia utile registrata, e costituisce la base dei dati per la fase di inversione.

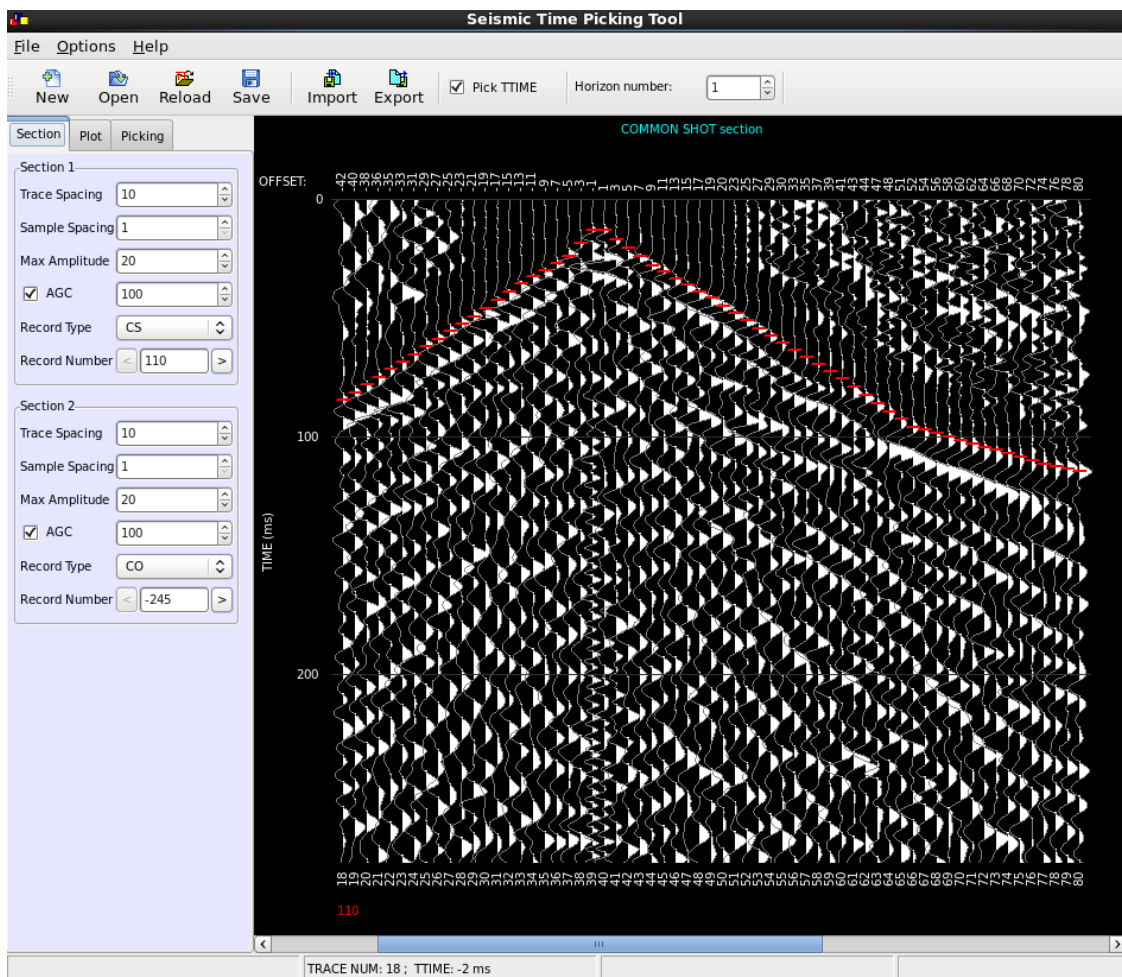


Figura 124 - *Picking* dei primi arrivi delle onde P, all'interno del *software TravelTimePick*.

Successivamente, si impone che la distribuzione di velocità nel modello sia coerente con i tempi di percorrenza osservati e con la geometria dei raggi sismici nel mezzo. Ciò conduce alla formulazione di un sistema di equazioni lineari simultanee, risolto in modo iterativo. A partire da un modello iniziale, il *software* procede a linearizzare la relazione tra tempi di percorrenza e velocità attorno al modello corrente, risolvere

il sistema lineare risultante, aggiornare il modello, e ripetere questa procedura in modo iterativo fino a convergenza.

La base del modello è definita da una griglia di celle nelle quali vengono assegnati i valori di velocità, entro un range prestabilito di possibili velocità sismiche, nel quale il processo di inversione ricerca il minimo della funzione obiettivo.

La tomografia dei primi arrivi rappresenta una tecnica estremamente efficace per inferire la struttura di velocità del sottosuolo a partire da misure di *traveltime*. Il successo dell'inversione dipende fortemente dall'accuratezza del *picking* dei primi arrivi (a sua volta determinata dalla qualità del dato acquisito) e da una corretta parametrizzazione del modello, che deve garantire un equilibrio tra risoluzione e stabilità numerica.

Per la tomografia dei primi arrivi è stato utilizzato il *software* Cat3D (Böhm et al., 2014), prodotto all'interno di OGS.

In Figura 125 viene mostrato un profilo di velocità con sovrapposti i raggi così come sono stati calcolati nell'ultima iterazione prima della convergenza. La densità di raggi è un buon indicatore dell'affidabilità del modello; infatti, più raggi intersecano una singola cella, maggiore sarà l'affidabilità del valore di velocità trovato dall'inversione in quella cella.

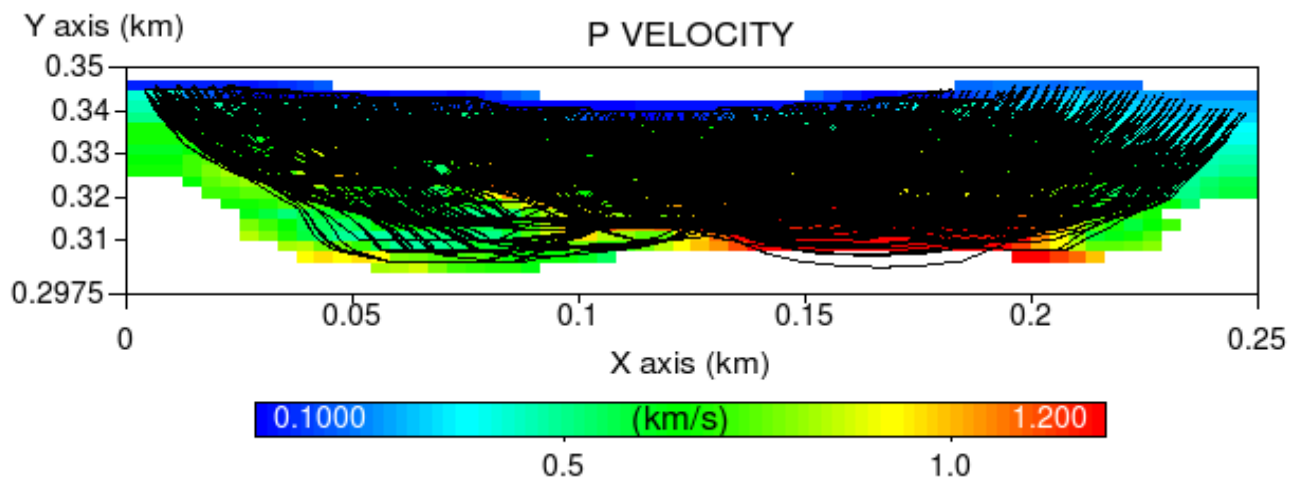
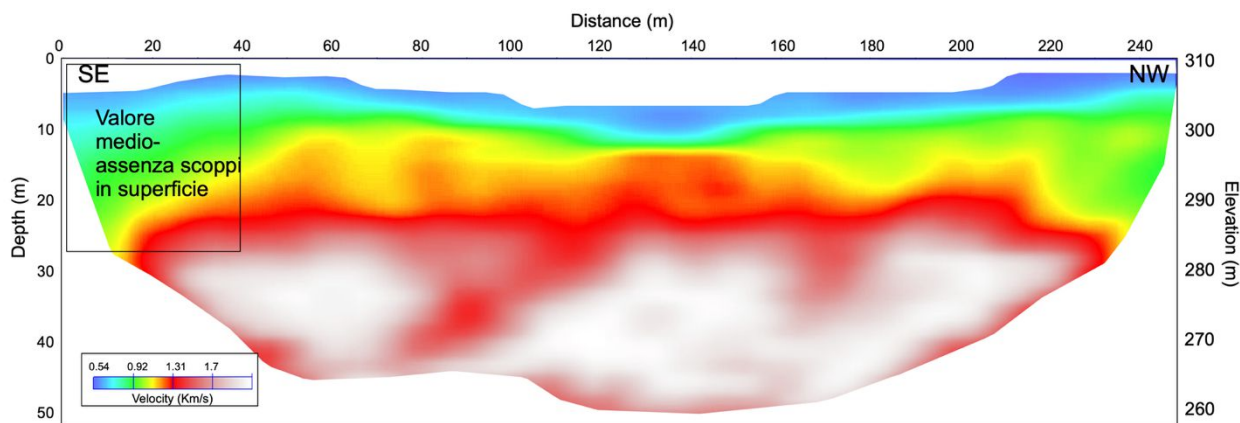


Figura 125 - Plot della densità di raggi, maggiore la densità di raggi, maggiore è l'affidabilità del modello.

Di seguito vengono illustrati i risultati relativi alla tomografia delle onde P ed SH ed il corrispondente profilo del rapporto  $V_P/V_{SH}$ .

La tomografia delle onde P (profilo mostrato in Figura 126) fornisce la distribuzione della velocità delle onde di compressione (P), sensibile alle variazioni di densità, litologia e grado di consolidazione dei materiali, oltre che alla presenza di acqua nei pori. È utile per delineare discontinuità stratigrafiche, strutturali e variazioni di compattezza nel sottosuolo. Il campo di velocità P evidenzia una stratificazione verticale ben definita. Nella porzione più superficiale si osservano valori di  $V_P$  relativamente bassi, compatibili con sabbie sciolte o poco addensate, verosimilmente caratterizzate da elevata porosità. Tale strato, che si presenta di colore blu nel profilo in Figura 126, può essere assimilato allo strato aerato.

Al di sotto di questo livello, a quota 295 m ca., si registra una variazione litologica piuttosto piatta, cui è associato un incremento delle velocità, interpretabile come passaggio a sabbie maggiormente compatte. Il contrasto più significativo si osserva in corrispondenza del passaggio verso il livello argilloso. In tale intervallo, la variazione di velocità non è solo legata alla compattazione, ma soprattutto alla differente natura litologica e al comportamento elastico del materiale. La tomografia fornisce quindi una buona ricostruzione della zonazione verticale, con risoluzione ottimale nelle prime decine di metri, mentre tende a perdere dettaglio alle maggiori profondità per limiti intrinseci della geometria dei raggi e dell'inversione.

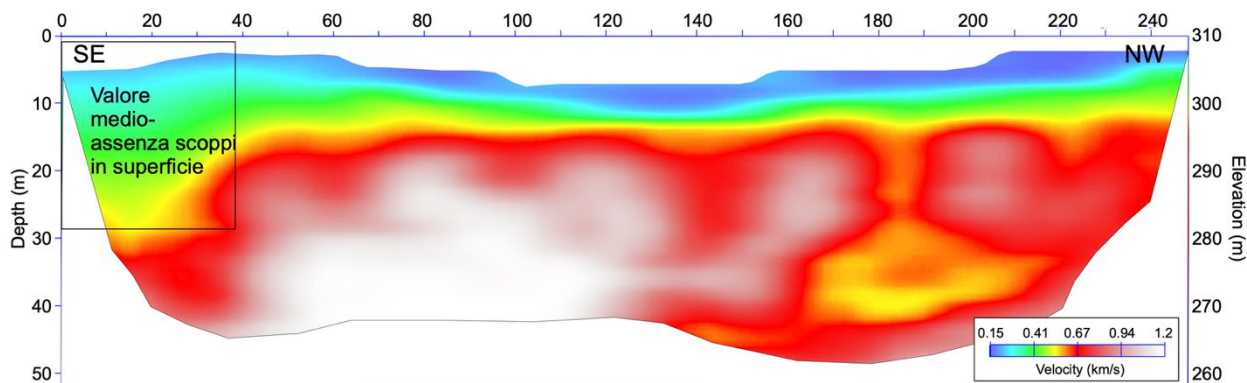


### Velocity Field P

Figura 126 - Profilo tomografico di velocità P.

La tomografia delle onde SH (profilo in Figura 127) restituisce la distribuzione della velocità delle onde di taglio polarizzate ortogonalmente alla linea sismica (SH), strettamente legata alla rigidità e alla risposta sismica dei terreni. Questo modello consente di individuare zone a bassa velocità potenzialmente riconducibili a materiali incoerenti o deformabili. Similmente al profilo compressionale, la parte più superficiale presenta le velocità più basse (colore blu), corrispondenti allo strato aerato.

È possibile notare come questo presenti spessore maggiore rispetto a quanto visto nel profilo compressionale. Ciò è probabilmente dovuto alla pioggia molto abbondante caduta nella notte intercorsa tra l'acquisizione del profilo S e del profilo P. Infatti, la presenza di acqua causa un aumento della velocità P, mentre la velocità delle onde S non ne risente. La parte più profonda, avente velocità più alta (colore bianco, 1.7-2.0 km/s in Figura 127), presenta moderate variazioni laterali di velocità, la cui natura può essere determinata dal confronto con altri profili/dati e sarà pertanto discussa nella sezione 6.3.



### Velocity Field S

Figura 127 - Profilo tomografico di velocità SH.

Il rapporto  $V_P/V_S$  (profilo in Figura 128) rappresenta un parametro diagnostico fondamentale per distinguere materiali con differenti gradi di saturazione e fratturazione. Valori elevati del rapporto indicano generalmente presenza di fluidi o livelli saturi, mentre valori più bassi sono tipici di terreni asciutti o fratturati. L'analisi spaziale di questo rapporto permette quindi di individuare zone potenzialmente interessate dalla falda freatica o da variazioni nel contenuto d'acqua.

In particolare, si può notare che lo strato a velocità più alte (a partire da 20 m di profondità in Figura 123) presenta un'anomalia a bassa velocità ad una distanza di 180 m. Tale calo di velocità non è presente nel profilo P. Ciò è evidente dal rapporto  $V_P/V_S$  (area rossa -  $V_P/V_S > 2.5$ ), e si spiega con una zona a maggiore porosità e ad alto contenuto di acqua. Inoltre, a distanza di 110 m, dove sul profilo P si evidenzia un calo delle velocità, non si riscontra lo stesso nel profilo S (Area blu in Figura 123 cui corrisponde un rapporto  $V_P/V_S \sim 1$ ).

Ciò è probabilmente dovuto ad una minore saturazione in acqua (diminuzione velocità P), con spazio poroso inalterato (velocità S invariata).

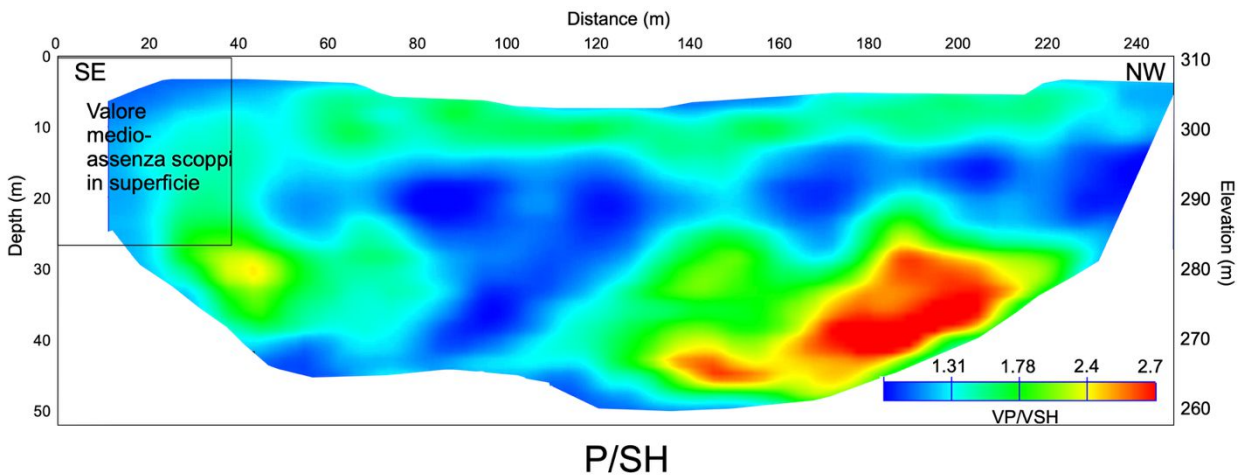


Figura 128 - Profilo del rapporto  $V_p/V_s$ .

#### 6.2.4 Risultati: *imaging a riflessione*

In Figura 129 è illustrato il risultato dell'*imaging* del profilo delle onde P riflesse. Si osserva una riflessione caratterizzata da un marcato contrasto di impedenza acustica a circa 30-35 m di profondità dal piano campagna, in coerenza con i profili di velocità ottenuti mediante tomografia, nonché con l'*imaging* delle onde SH e con i risultati dell'inversione delle onde di superficie.

Poiché i *common mid point* (CMP in Figura 130) sono distribuiti a un passo regolare di 1 m, i valori riportati sull'asse delle ascisse rappresentano sia la distanza reale dall'inizio della linea sia la posizione dei CMP.

La limitata estensione dello stendimento ha tuttavia condizionato la possibilità di individuare eventuali ulteriori riflettori a profondità maggiori.

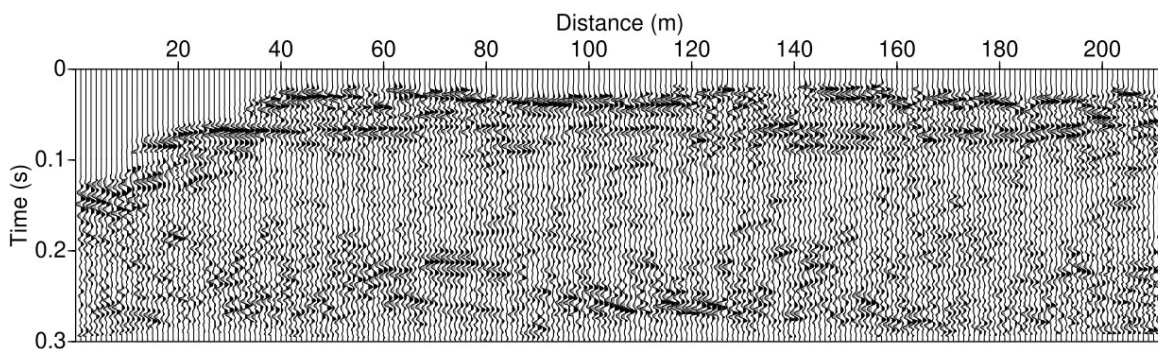
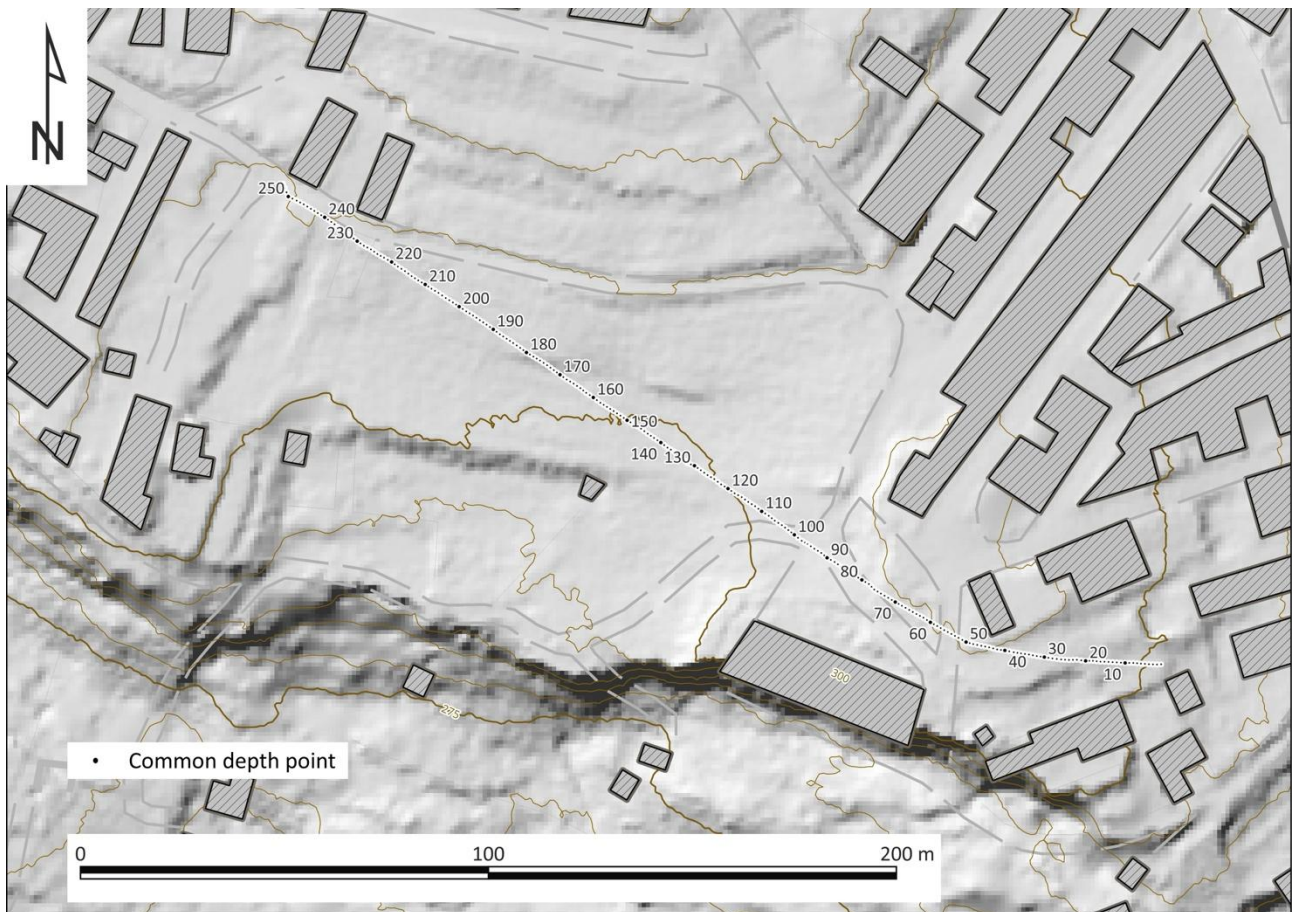
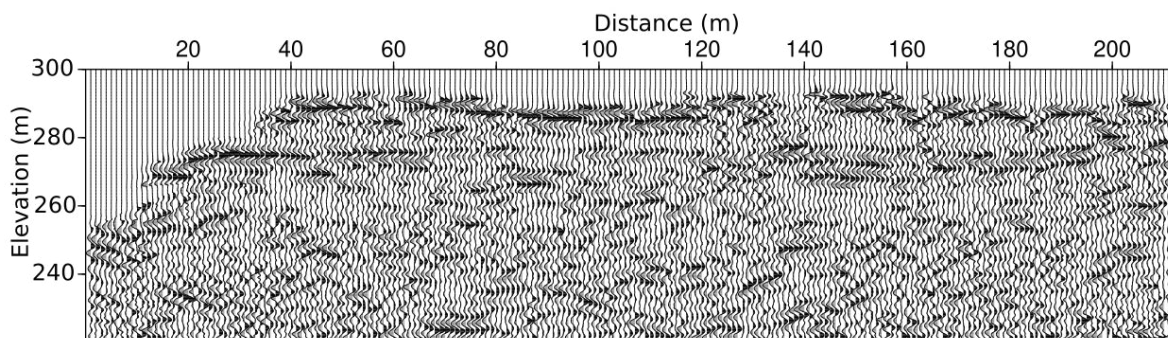


Figura 129 - Profilo onde P (in tempo). I valori riportati sull'asse delle ascisse rappresentano sia la distanza reale dall'inizio.



**Figura 130 - Posizione dei CMP/CDP lungo la linea sismica.**

In Figura 131 è mostrata la sezione a riflessione delle onde P convertita in profondità utilizzando il campo delle velocità ottenuto in fase di *stack*.



**Figura 131 - Sezione a riflessione delle onde P convertita in profondità utilizzando il campo delle velocità ottenuto in fase di *stack*. I valori riportati sull'asse delle ascisse rappresentano sia la distanza reale dall'inizio della linea sia la posizione dei CMP.**

Al fine di integrare il profilo tomografico con la sezione sismica a riflessione, i due risultati sono stati sovrapposti e sono mostrati in Figura 132. Si può così valutare la coerenza tra i due risultati, ottenuti in modo del tutto indipendente. Questo permette quindi di aumentare il grado di affidabilità dei risultati.

Questo riflettore rappresenta molto probabilmente il contatto litologico tra le sabbie sovrastanti e il livello argilloso-marnoso sottostante. La continuità e la buona definizione del riflettore indicano un contrasto di impedenza acustica marcato, compatibile con la transizione tra materiale granulare relativamente rigido e materiale fine plastico. L'accordo geometrico tra riflessione e tomografia rafforza l'affidabilità dell'interpretazione, anche considerando che la conversione tempo-profondità introduce inevitabilmente un margine di incertezza legato al modello di velocità.

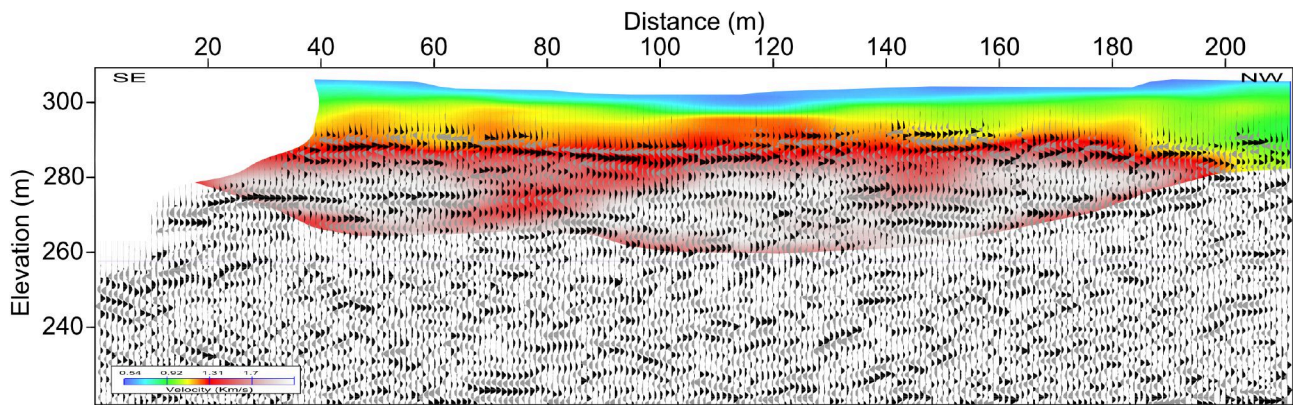


Figura 132 - Sovrapposizione dell'imaging P con il profilo tomografico corrispondente. I valori riportati sull'asse delle ascisse rappresentano sia la distanza reale dall'inizio della linea sia la posizione dei CMP.

Dalla sovrapposizione con il profilo di velocità tomografica (Figura 133) si evidenzia la presenza di un primo strato alterato a bassa velocità fino a una profondità di 10-12 m alla cui base sono presenti delle velocità variabili lateralmente da 0,55 km/s a 1,2 km/s. Alcune di queste variazioni laterali possono essere legate alla presenza di zone più o meno fratturate o più o meno consolidate che vanno a influenzare i valori di velocità delle onde S.

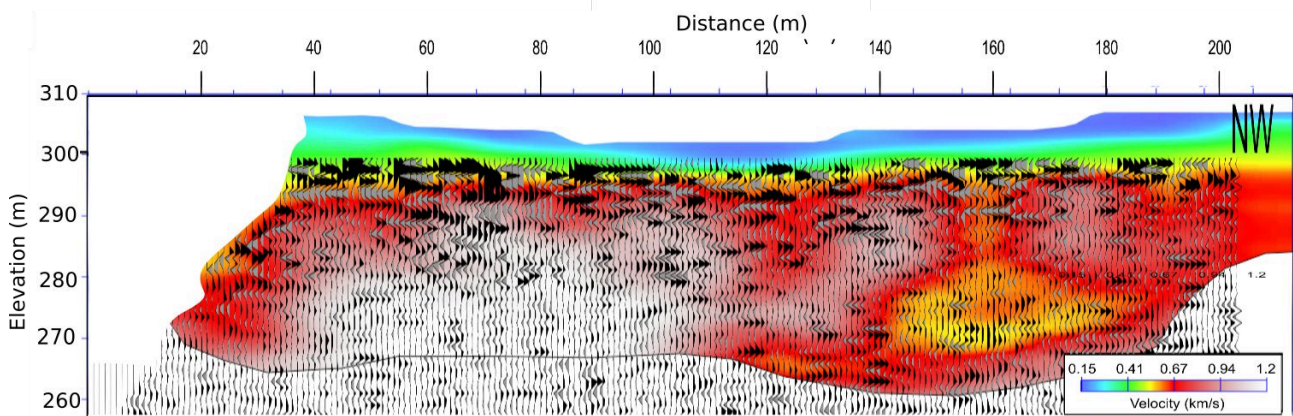


Figura 133 - Sovrapposizione della parte superficiale della linea sismica con il risultato dell'inversione tomografica (onde SH). I valori riportati sull'asse delle ascisse rappresentano sia la distanza reale dall'inizio della linea sia la posizione dei CMP.

A profondità superiori, dove si hanno informazioni solo dalla sezione sismica a riflessione, appare evidente la presenza di un passaggio litologico, evidenziato nella sezione di una fascia di riflessione abbastanza frastagliata, alla profondità di circa 35-40 metri.

In Figura 134 e in Figura 135 sono riportate rispettivamente la sezione *stack* e la stessa sezione convertita in profondità utilizzando il campo di velocità di *stack*.

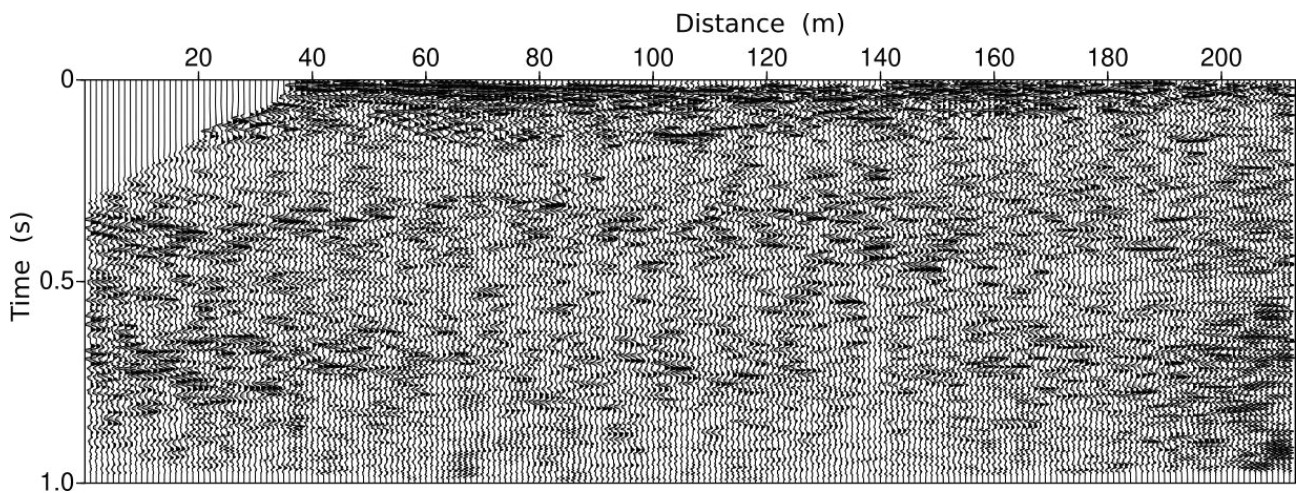


Figura 134 - Sezione Stack SH nel dominio dei tempi (TWT). I valori riportati sull'asse delle ascisse rappresentano sia la distanza reale dall'inizio della linea sia la posizione dei CMP.

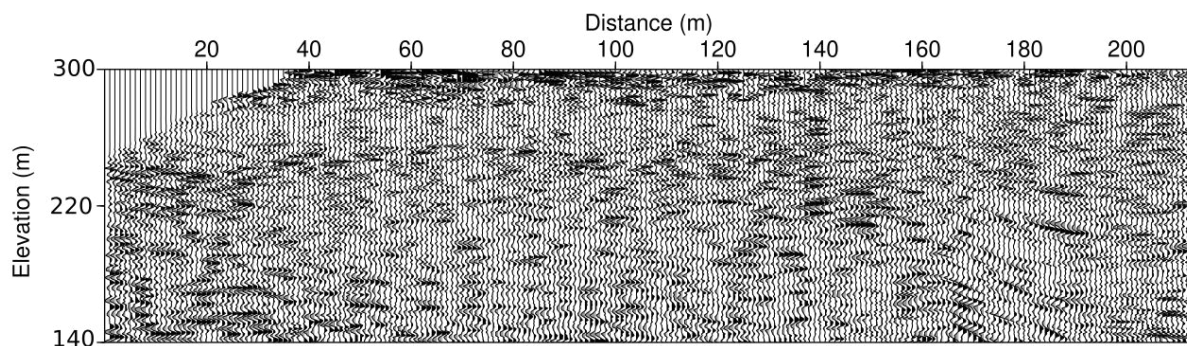


Figura 135 - Sezione Stack SH convertita in profondità. I valori riportati sull'asse delle ascisse rappresentano sia la distanza reale dall'inizio della linea sia la posizione dei CMP.

### 6.2.5 Risultati: onde di superficie

Le onde di superficie sono state trattate con il metodo di analisi multicanale noto come *MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves)*. Questo metodo si basa sul carattere dispersivo delle onde di superficie, ovvero sulle diverse velocità di propagazione a frequenze diverse. L'inversione delle onde di *Rayleigh* si basa sull'analisi della loro dispersione per ricostruire il profilo verticale delle proprietà elastiche del sottosuolo, in particolare della velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ).

Le onde di *Rayleigh* sono onde superficiali a moto ellittico retrogrado nel piano verticale (P-SV) e la loro propagazione dipende principalmente dalla  $V_s$ , pur risultando debolmente influenzata anche da  $V_p$  e dal coefficiente di *Poisson*.

Nel caso specifico, è stato preso in considerazione il sismogramma relativo al punto di scoppio 139, selezionando i ricevitori da 143 a 226 (geometria illustrata in Figura 136). Il profilo monodimensionale risultante è quindi una sorta di media delle velocità di onde di taglio nella sezione compresa tra i ricevitori sopra menzionati.

L'elaborazione è stata effettuata utilizzando la componente verticale con geofoni aventi frequenza naturale di 10 Hz, lungo il medesimo stendimento precedentemente descritto. L'inversione è stata condotta mediante approccio *Full Velocity Spectrum (FVS)*, senza effettuare un *picking* manuale delle curve di dispersione. In questo metodo, l'intero spettro frequenza-velocità viene confrontato con lo spettro teorico calcolato per un modello stratificato del sottosuolo.

In Figura 137 vengono mostrati il sismogramma (sinistra) e lo spettro di velocità (destra). Il processo iterativo modifica spessori e valori di  $V_s$  fino a minimizzare la differenza globale tra spettro osservato e spettro sintetico, riducendo la soggettività legata all'interpretazione manuale delle sole curve modali.

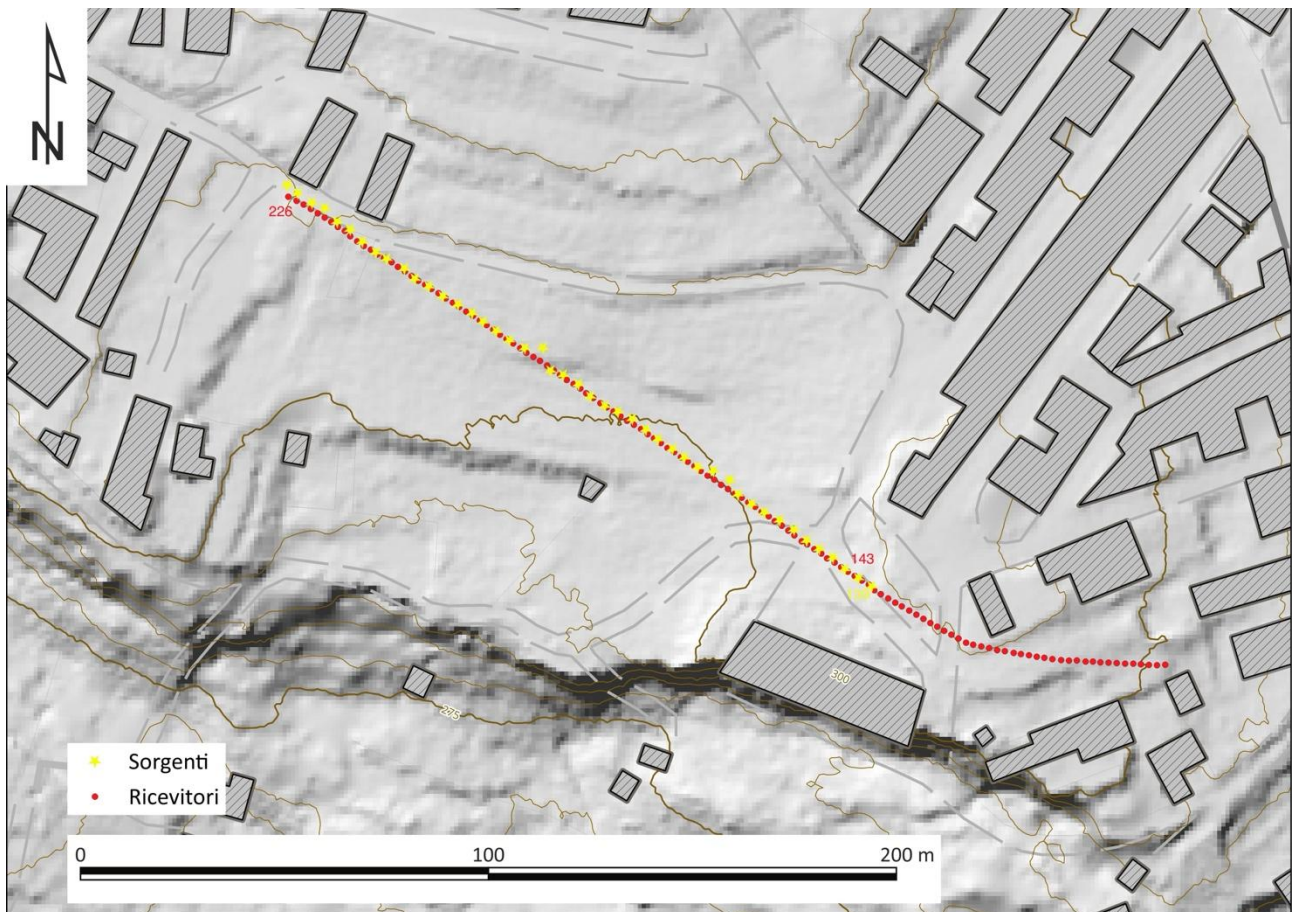


Figura 136 - Geometria di acquisizione con indicati in giallo i punti di energizzazione ed i geofoni considerati nel calcolo della MASW.

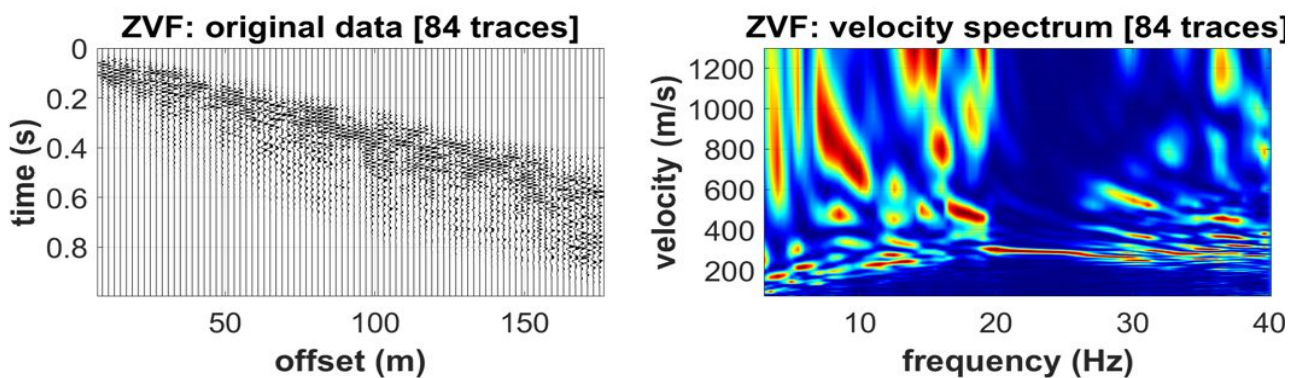


Figura 137 - Sismogramma (sinistra) e spettro di velocità (destra).

Questo approccio consente di sfruttare l'intera informazione contenuta nei dati, inclusi eventuali contributi modali multipli, migliorando la stabilità dell'inversione rispetto ai metodi basati esclusivamente sul modo fondamentale. L'attendibilità del modello dipende dal contenuto in frequenza registrato e dalla lunghezza dello stendimento.

Con geofoni da 10 Hz, è limitata rispetto a geofoni a frequenza naturale inferiore. Poiché la profondità di indagine delle onde superficiali è proporzionale alla lunghezza d'onda (circa metà della lunghezza d'onda dominante), la frequenza minima effettivamente registrabile controlla la profondità massima realmente vincolata dal dato sperimentale.

La lunghezza dello stendimento influisce direttamente sulla capacità di campionare lunghezze d'onda elevate: uno stendimento più lungo consente di vincolare meglio gli strati profondi, mentre una linea più

corta aumenta l'incertezza alle basse frequenze e, conseguentemente, nelle porzioni più profonde del modello.

In sintesi, l'inversione FVS delle onde di *Rayleigh* con geofoni da 10 Hz fornisce una stima robusta del profilo di  $V_S$  e del parametro  $V_{Seq}$  nei primi metri o decine di metri, mentre le porzioni più profonde del modello risultano progressivamente meno vincolate dal contenuto in bassa frequenza dei dati acquisiti e devono pertanto essere interpretate con maggiore cautela.

Eventuali stime di  $V_P$  o del coefficiente di *Poisson* devono inoltre essere considerate indicative, in quanto non direttamente determinate in modo indipendente dai dati di dispersione.

In questo tipo di approccio MASW viene realmente invertita la curva di dispersione delle onde di *Rayleigh*, che è fortemente sensibile alla velocità delle onde di taglio  $V_S$ , mentre la sensibilità a  $V_P$  e alla densità è secondaria.

Di conseguenza, il modello ottenuto è affidabile soprattutto per il profilo di  $V_S$ . I valori di  $V_P$  e del coefficiente di *Poisson* riportati nel *software* sono infatti indicati come "*approximate values*": questo significa che non sono stati direttamente invertiti, ma derivano da ipotesi o relazioni empiriche a partire da  $V_S$ . Con la sola componente verticale, quindi, non si effettua una vera inversione delle onde P, ma una stima indiretta di  $V_P$  basata su assunzioni sul rapporto di *Poisson*.

Il profilo  $V_S$  (Figura 138) mostra una forte eterogeneità nei primi metri e un progressivo incremento della rigidità in profondità, con un  $V_{S30}$  intorno a 250 m/s, compatibile con una categoria di sottosuolo C secondo le NTC 2018.

Tuttavia, le elevate deviazioni standard negli strati più profondi indicano una minore sensibilità della curva di dispersione oltre una certa profondità, e quindi una maggiore incertezza del modello in quelle zone. In sintesi, l'inversione della componente verticale delle onde di *Rayleigh* fornisce una stima robusta di  $V_S$ , ma non consente una determinazione affidabile e indipendente di  $V_P$ .

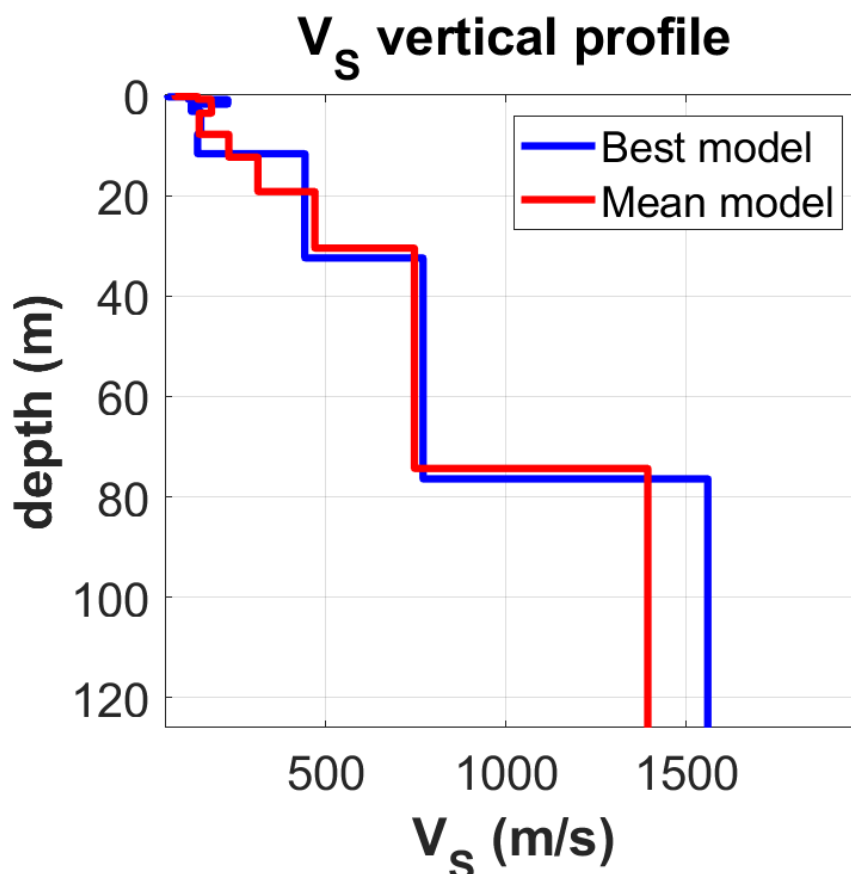


Figura 138 - Risultato dell'analisi delle onde di superficie con metodo MASW.

L'inversione delle onde di *Love* si basa sull'analisi della loro dispersione per ricostruire il profilo verticale della velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) nel sottosuolo. Le onde di *Love* sono onde superficiali a polarizzazione orizzontale (SH) e si propagano in mezzi stratificati in funzione esclusiva delle proprietà di taglio dei materiali attraversati.

Proprio perché dipendono unicamente dal comportamento SH, esse risultano particolarmente adatte alla determinazione diretta della  $V_s$ , senza essere influenzate dai parametri compressivi ( $V_p$  e coefficiente di *Poisson*).

Nel caso specifico sono state utilizzate le acquisizioni con geofoni con frequenza naturale di 14 Hz, orientati trasversalmente alla linea sismica, così da registrare la componente orizzontale perpendicolare alla direzione di propagazione, dove l'energia delle onde di *Love* è predominante.

I segnali registrati nel dominio tempo-spazio sono stati quindi trasformati nel dominio frequenza-velocità per ottenere lo spettro di dispersione (Figura 139) ed il processo di inversione è avvenuto come per l'analisi delle onde di *Rayleigh*.

Al termine del processo è stato ottenuto un profilo verticale di  $V_s$  compatibile con i dati registrati, insieme a una stima dell'incertezza e alla valutazione della profondità effettivamente investigabile. L'attendibilità del risultato è strettamente legata al contenuto in frequenza effettivamente registrato e alla geometria dello stendimento, così come descritto in precedenza.

Nel caso di geofoni con frequenza naturale di 14 Hz, la risposta strumentale è ottimizzata per frequenze medio-alte, mentre risulta meno sensibile alle basse frequenze rispetto a geofoni a frequenza naturale inferiore. Ciò implica una minore capacità di registrare in modo efficace energia a frequenze molto basse, che sono quelle associate alle lunghezze d'onda maggiori e quindi agli strati più profondi.

In sintesi, l'inversione delle onde di *Love* fornisce una stima diretta e fisicamente ben vincolata del profilo di  $V_s$  e del parametro  $V_{s30}$  (Figura 140); tuttavia, con geofoni da 14 Hz e una configurazione tipica di indagine superficiale, il modello risulta generalmente molto affidabile nei primi metri-decine di metri (in particolare per la stima del  $V_{s30}$ ), mentre le porzioni più profonde devono essere interpretate con maggiore cautela, in quanto meno direttamente vincolate dal contenuto in bassa frequenza dei dati acquisiti.

Le onde di *Love* sono polarizzate orizzontalmente e dipendono esclusivamente dalla propagazione delle onde SH in un mezzo stratificato. A differenza delle onde di *Rayleigh*, non coinvolgono il moto P-SV e non sono influenzate direttamente da  $V_p$  o dal coefficiente di *Poisson*. La curva di dispersione delle onde di *Love* è quindi sensibile quasi esclusivamente al profilo di  $V_s$ , rendendo l'inversione concettualmente più "pulita" dal punto di vista parametrico.

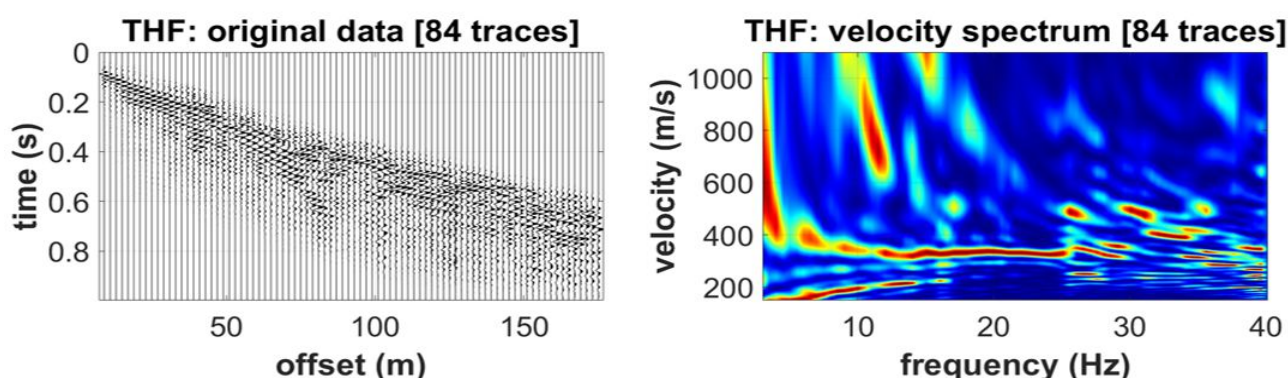


Figura 139 - Sismogramma (sinistra) e spettro di velocità di fase relativo alle onde di *LOVE* (componente SH).

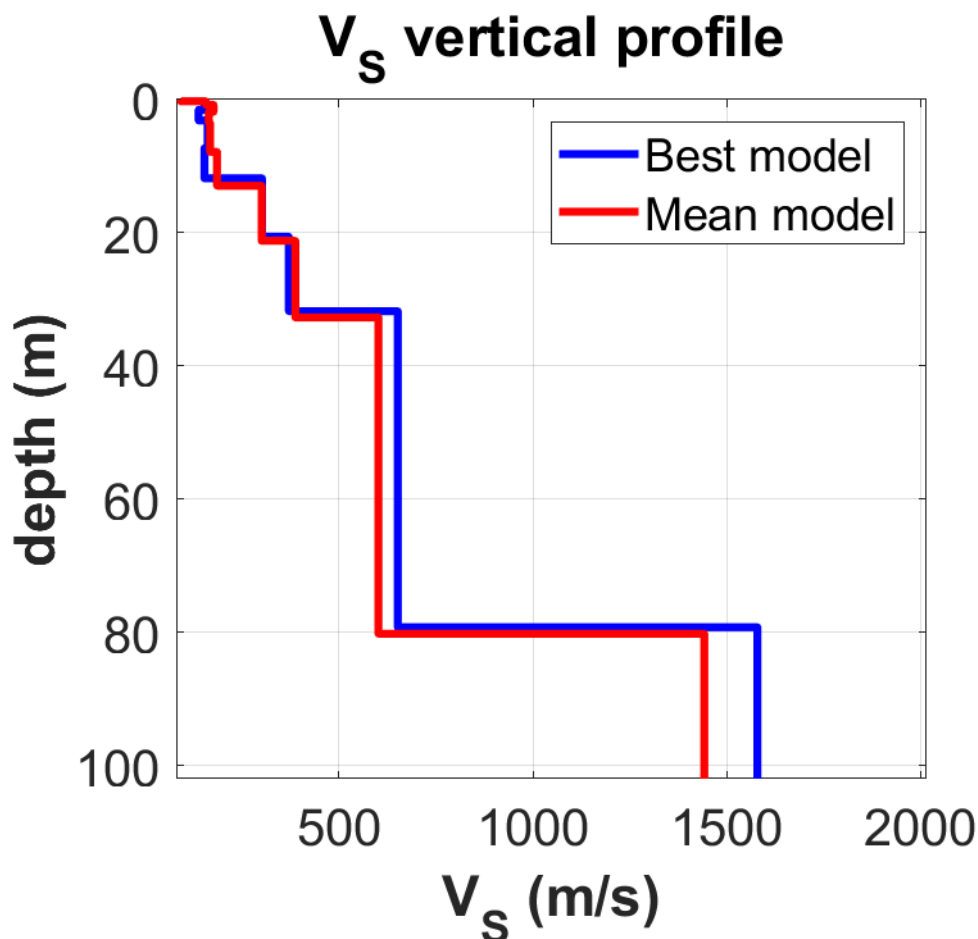


Figura 140 - Risultato dell'inversione delle onde di Love.

In questo caso, il modello migliore mostra valori di  $V_S$  nei primi metri compresi tra circa 100 m/s e 170 m/s, con un progressivo aumento della rigidità in profondità. Anche qui si osservano leggere inversioni locali di velocità nei primi strati, probabilmente legate al *trade-off* spessore/velocità tipico delle inversioni *multilayer*.

Il *trade-off* spessore-velocità è la difficoltà intrinseca nel distinguere se una certa risposta sismica sia dovuta a uno strato più spesso o a una diversa velocità, perché entrambe le combinazioni possono spiegare ugualmente bene i dati osservati. La  $V_{S30}$  risulta compresa tra 228 m/s e 239 m/s (rispettivamente *best model* e *mean model*), valore coerente con una categoria di sottosuolo C secondo le NTC 2018.

Un aspetto importante è che, a differenza del caso *Rayleigh*, qui non compaiono stime di  $V_P$  o di *Poisson*: questo è coerente con la fisica del problema. L'inversione delle onde di Love non consente in alcun modo di stimare  $V_P$ , perché le onde SH non "sentono" il comportamento compressivo del mezzo.

Di conseguenza, il modello ottenuto rappresenta direttamente un profilo di  $V_S$ , senza necessità di assunzioni su  $v$ . Le deviazioni standard crescenti in profondità indicano, anche in questo caso, una riduzione della sensibilità oltre la profondità realmente investigabile (circa 30-40 m per il calcolo di  $V_{S30}$ , mentre il modello si estende molto più in profondità).

Questo suggerisce che gli strati più profondi sono meno vincolati dai dati di dispersione. In sintesi, l'inversione della componente trasversale delle onde di Love fornisce una stima di  $V_S$  ancora più direttamente vincolata rispetto alle onde di *Rayleigh*, perché elimina l'influenza di  $V_P$  e del coefficiente di *Poisson*. Tuttavia, proprio per questa ragione, non permette alcuna informazione sulle onde P o sui parametri elastici completi del mezzo.

Il confronto tra i modelli di velocità ottenuti dall'inversione delle onde di *Rayleigh* (componente verticale) e delle onde di *Love* (componente trasversale, SH), acquisiti nello stesso sito, evidenzia una sostanziale coerenza del quadro geofisico generale. Entrambi i modelli mostrano terreni superficiali a bassa velocità, con progressivo incremento della rigidità in profondità e presenza di un substrato rigido oltre alcune decine di metri.

I valori di  $V_{S30}$  risultano compresi tra 228 m/s e 261 m/s nei due casi, conducendo in modo concorde alla classificazione del sito in categoria C secondo le NTC 2018. Le principali differenze si osservano nei primi metri: il modello derivato dalle onde di *Rayleigh* presenta maggiore variabilità e inversioni locali di velocità, mentre il modello ottenuto dalle onde di *Love* risulta più regolare e leggermente più elevato nei livelli superficiali.

Tale differenza è attribuibile alla diversa sensibilità fisica delle due tipologie d'onda: le onde di *Rayleigh* sono influenzate, seppur in misura secondaria, anche dai parametri elastici compressivi ( $V_P$  e coefficiente di Poisson), mentre le onde di *Love* dipendono esclusivamente dal comportamento SH, fornendo una stima più diretta della  $V_S$ .

In profondità, le discrepanze tra i due modelli aumentano ma risultano associate a una maggiore incertezza d'inversione, come evidenziato dall'incremento delle deviazioni standard; pertanto, tali differenze non possono essere considerate significativamente vincolate dai dati.

Nel complesso, i due modelli sono compatibili e descrivono in modo coerente la struttura sismica del sito, con differenze riconducibili principalmente alla diversa sensibilità fisica delle onde considerate e al normale grado di non unicità dell'inversione.

### 6.3 Integrazione indagine geoelettrica e sismica

L'utilizzo di metodi geofisici diversi (indagini geoelettriche, sismiche a rifrazione per tomografia dei primi arrivi P e SH, sismica a riflessione di onde P e SH e analisi delle onde di superficie sia *Rayleigh* che *Love*), basati su principi fisici differenti, consente di osservare il sottosuolo da prospettive complementari, in quanto ciascun metodo è sensibile a proprietà fisiche dei materiali diverse, quali resistività elettrica, densità, rigidità e contenuto in acqua.

La combinazione di queste informazioni rappresenta pertanto uno strumento efficace per ridurre l'ambiguità interpretativa e migliorare la definizione del modello geologico del sito.

Le indagini geoelettriche 3D hanno consentito di caratterizzare il contesto geologico a scala areale e in profondità, evidenziando la presenza di un ampio volume caratterizzato da valori di resistività relativamente bassi. Tale volume, che si sviluppa generalmente a partire da profondità dell'ordine di alcune decine di metri, è interpretabile come un corpo sedimentario a prevalente composizione fine e con elevato contenuto d'acqua.

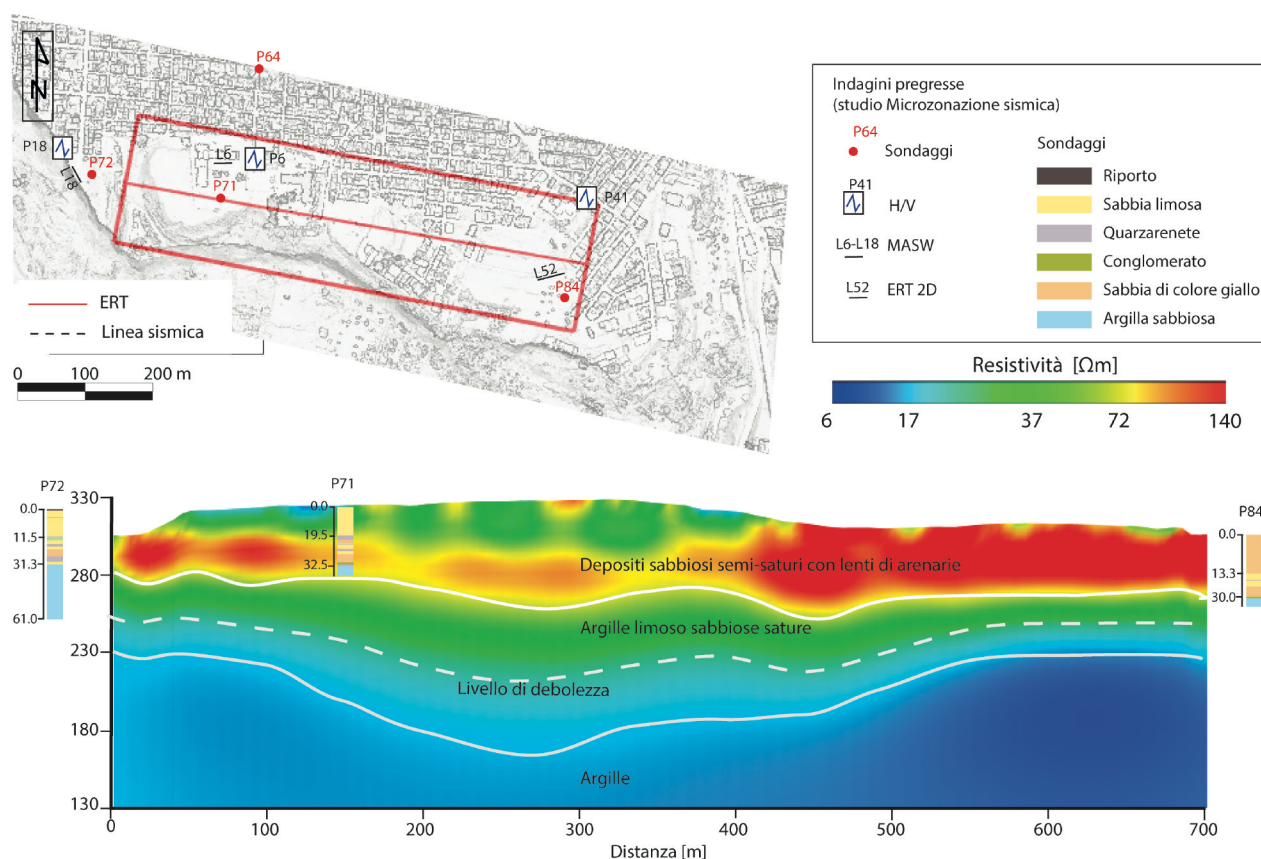
Il modello di resistività (Figura 141) mostra chiaramente la presenza di un importante volume basso resistivo profondo che si sviluppa generalmente a partire da 30 m di profondità, descrivibile come il pacco di argille noto dalla letteratura dell'area e confermato dai sondaggi presenti nell'area e realizzati nell'ambito delle indagini per la Microzonazione Sismica (sondaggi P71, P72 e P84 in Figura 141).

Il livello di argille individuato nel sondaggio è ascrivibile ad argille limoso-sabbiose in condizioni sature con valori fino a 50  $\Omega\text{m}$  (colore verde in Figura 141), mentre le argille sottostanti (verosimilmente le argille marnose grigio-azzurre indicate nella carta geologica in Figura 2) hanno valori di resistività molto bassi fino a un massimo di 20  $\Omega\text{m}$  (colore blu in Figura 141). Questo è in accordo con il lavoro di Rizzo (2004) che mostra come il tetto del corpo argilloso sia irregolare e presenti degli elementi con resistività inferiore.

All'interno delle argille limoso-sabbiose è possibile individuare un livello di debolezza, indicato dalla linea tratteggiata in Figura 141, verosimilmente identificabile come una possibile superficie di scivolamento a profondità variabili fra circa 50 e 115 m dal piano di campagna.

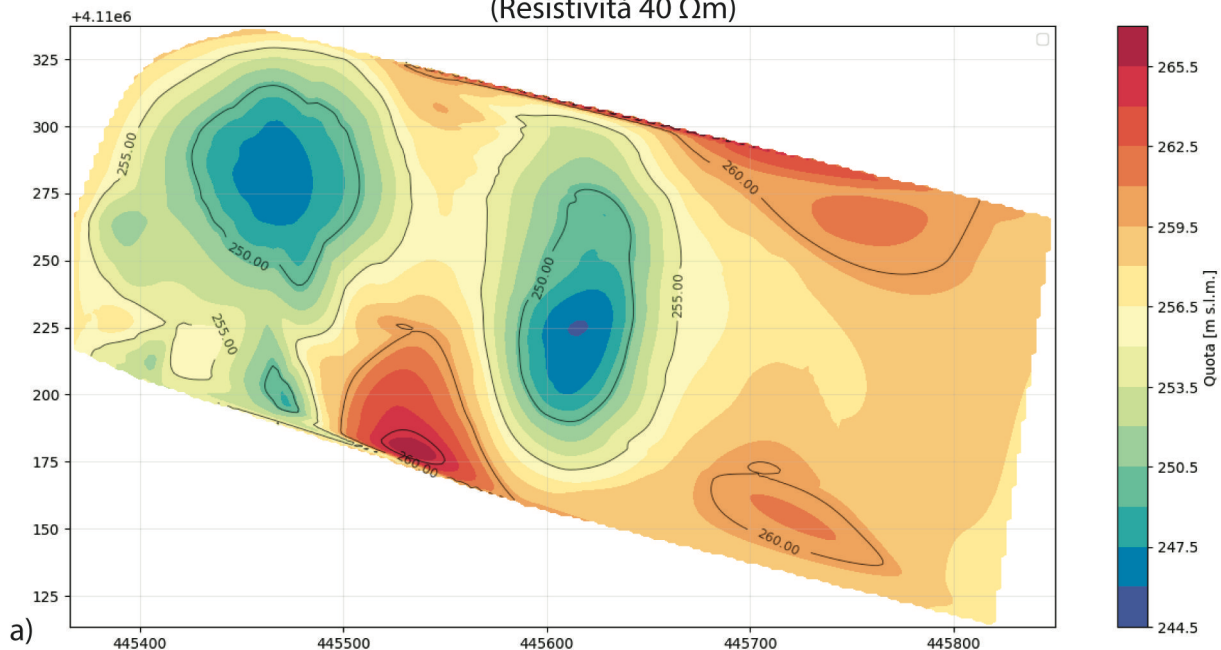
La distribuzione tridimensionale della resistività mostra una geometria non uniforme del tetto di questo livello conduttivo, con variazioni laterali che suggeriscono una certa eterogeneità litologica del sottosuolo. Questa informazione rappresenta un importante vincolo geometrico per la ricostruzione del modello geologico complessivo.

In Figura 142 sono mostrate due mappe che rappresentano una la quota s.l.m. dell'interfaccia più superficiale, cioè quella tra il complesso sabbioso-limoso-arenaceo e le argille limoso-sabbiose e identificabile con valori di resistività sui 40  $\Omega\text{m}$ , e l'altra la quota s.l.m. del livello di debolezza e identificabile con valori di resistività sui 20  $\Omega\text{m}$ . Tali valori di quota sono da intendersi affetti da un errore di  $\pm 5$  m, in conseguenza della dimensione delle celle del modello di resistività. In Figura 143, invece, è indicata la profondità dal piano di campagna delle due interfacce sopra descritte.



**Figura 141 - Estratto, dal modello 3D di resistività, di una sezione 2D parallela al fronte della frana e passante per il sondaggio P71. Nella mappa in alto a destra la linea rossa indica la posizione della sezione 2D in relazione all'intero volume 3D indagato (rettangolo rosso) e alle indagini pregresse presenti nell'area e realizzate nell'ambito degli studi di Microzonazione Sismica. Le linee bianche continue sovrapposte alla sezione tomografica 2D indicano l'interfaccia tra il complesso sabbioso-limoso-arenaceo e le argille limoso-sabbiose e tra queste e le sottostanti argille marnose grigio-azzurre. La linea bianca tratteggiata indica un livello di debolezza presente nelle argille verosimilmente attribuibile alla superficie di scivolamento.**

Quota s.l.m. interfaccia tra complesso sabbioso-limoso-arenaceo e le argille limoso sabbiose  
(Resistività 40 Ωm)



Quota s.l.m. del livello di debolezza all'interno delle argille limoso sabbiose  
(Resistività 20 Ωm)

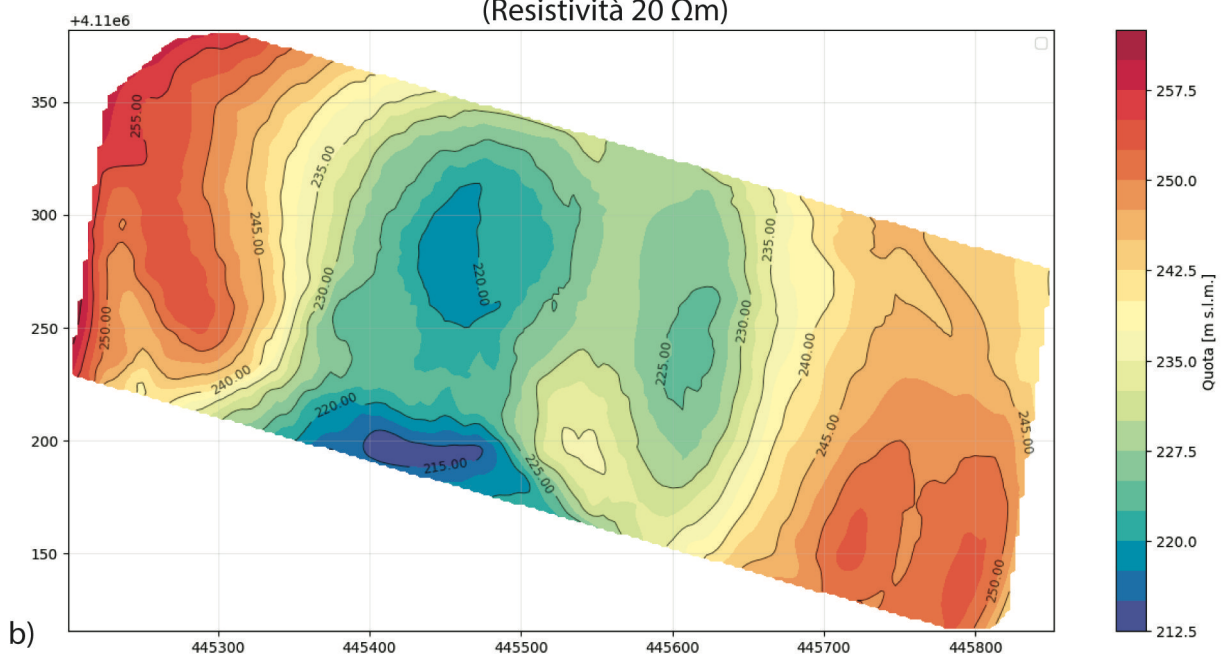
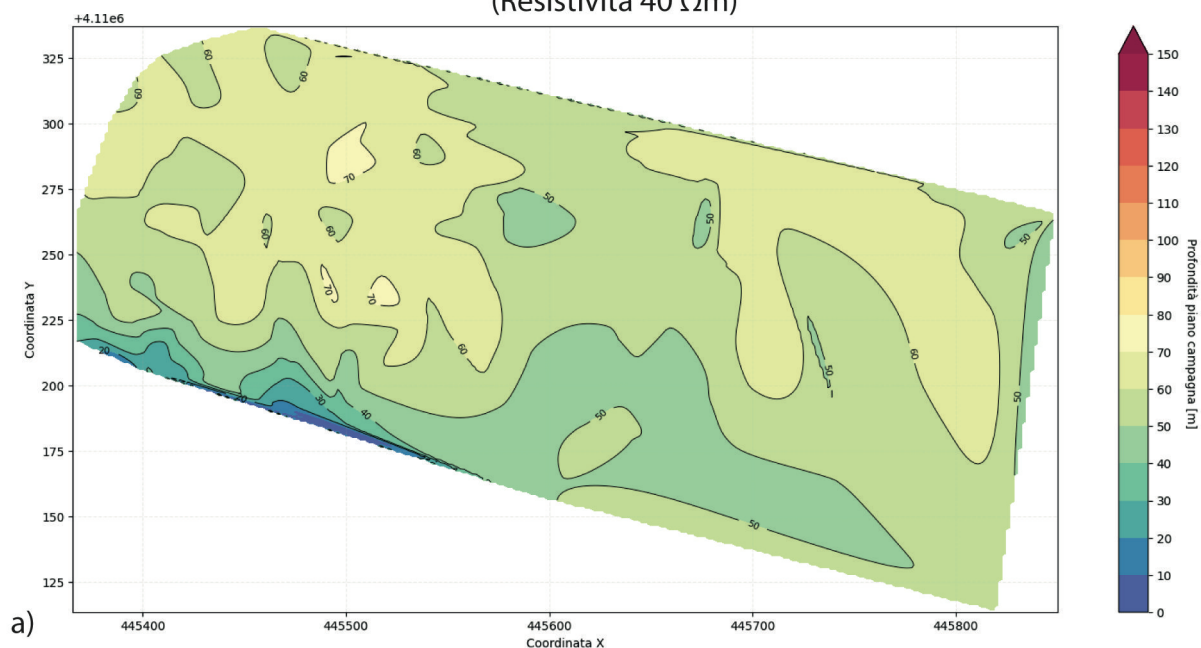


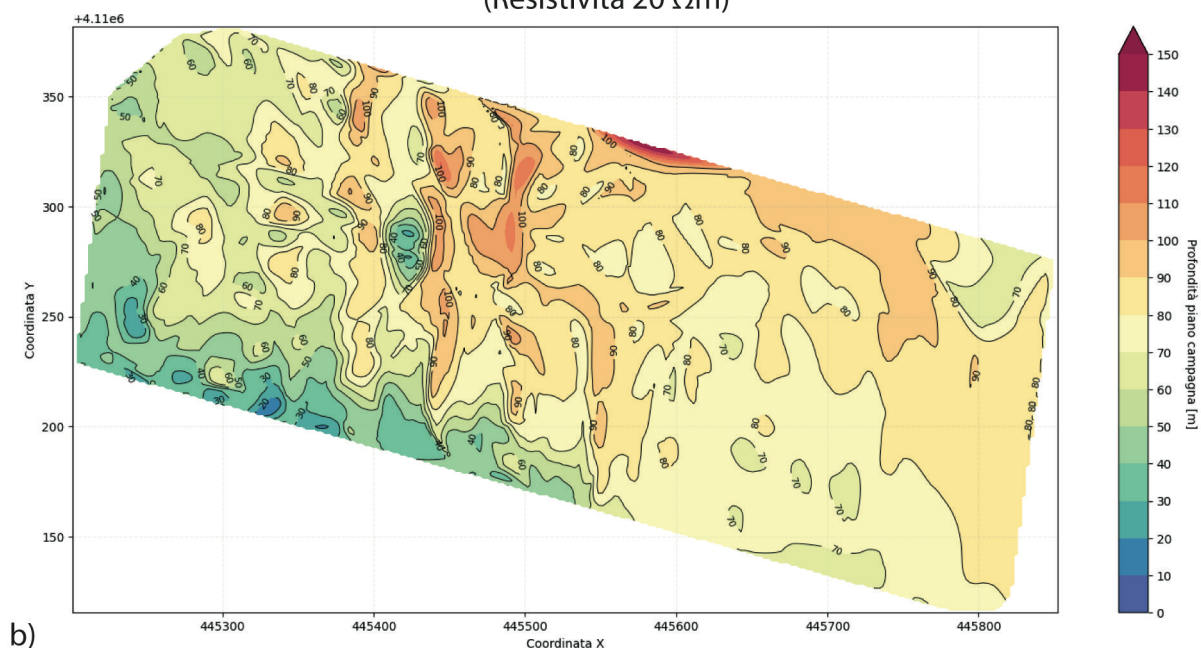
Figura 142 - a) Quota dell'interfaccia tra il complesso sabbioso-limoso-arenaceo e le argille limoso-sabbiose corrispondente ad un valore di resistività di 40 Ωm e b) quota del livello di debolezza all'interno delle argille limoso-sabbiose corrispondente ad un valore di resistività di 20 Ωm. I valori di profondità sono da intendersi con un errore di  $\pm 5$  m.

Profondità interfaccia tra complesso sabbioso-limoso-arenaceo e le argille limoso sabbiose  
(Resistività 40  $\Omega$ m)



a)

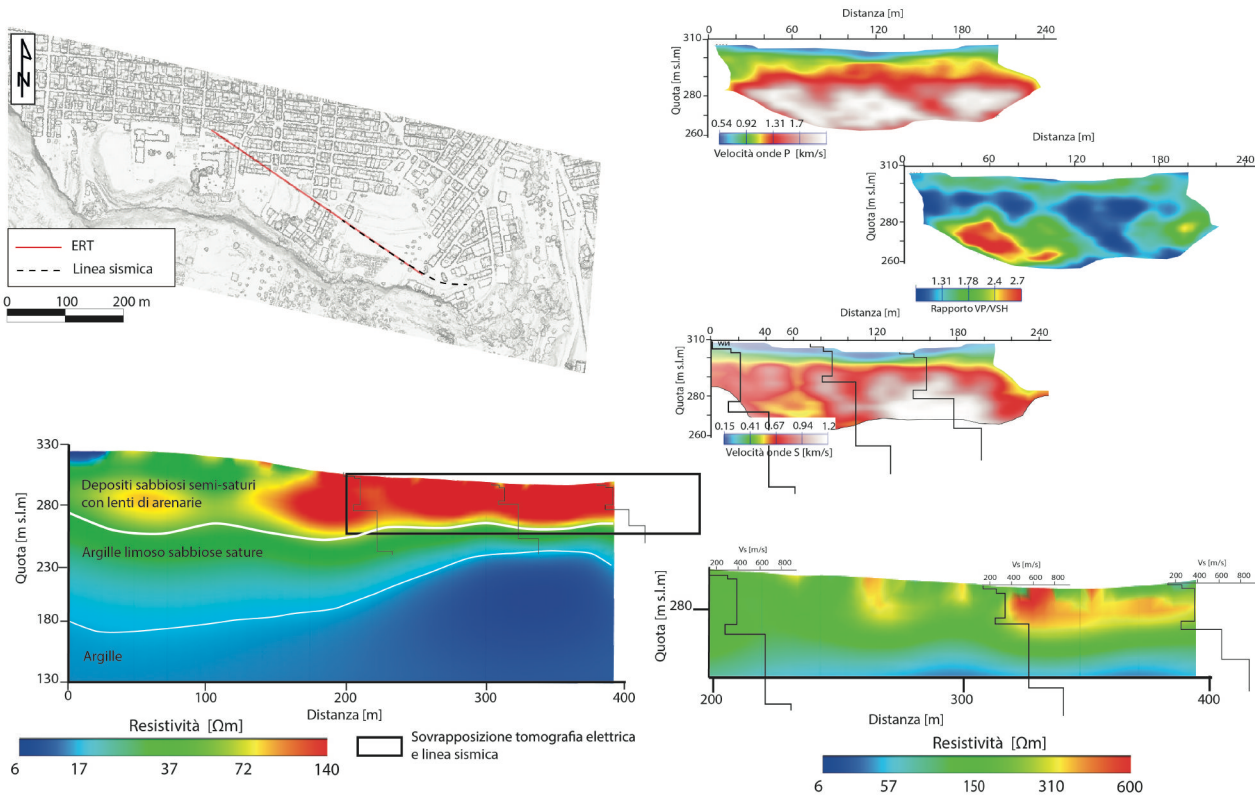
Profondità del livello di debolezza all'interno delle argille limoso sabbiose  
(Resistività 20  $\Omega$ m)



b)

**Figura 143 - a) Profondità dal piano di campagna dell'interfaccia tra il complesso sabbioso-limoso-arenaceo e le argille limoso-sabbiose corrispondente ad un valore di resistività di 40  $\Omega$ m e b) profondità dal piano di campagna del livello di debolezza all'interno delle argille limoso-sabbiose corrispondente ad un valore di resistività di 20  $\Omega$ m. I valori di profondità sono da intendersi con un errore di  $\pm$  5 m.**

In Figura 144 sono riportati in maniera sinottica i risultati delle diverse indagini geofisiche effettuate. In particolare, in basso a sinistra è riportata una sezione geoelettrica 2D estratta dal volume 3D in corrispondenza della linea sismica. Il riquadro nero a partire da circa 200 m indica la zona di sovrapposizione tra geoelettrica e indagini sismiche, mentre per la loro disposizione in pianta si faccia riferimento all'insero in alto a sinistra. In basso a destra è mostrato uno zoom della tomografia elettrica 2D con una scala cromatica diversa in modo da accentuare le anomalie presenti nei primi 50 m.



**Figura 144 - Sintesi dei risultati delle indagini geofisiche. In alto a sinistra la posizione in pianta della linea sismica (linea nera tratteggiata) e della sezione geoelettrica 2D (rappresentata con la linea rossa e mostrata in basso a sinistra) estratta dal volume 3D. Il riquadro nero sovrapposto alla tomografia elettrica indica l'area di sovrapposizione con le indagini sismiche, riportate in alto a destra, e lo zoom sulla tomografia elettrica riportato in basso a destra con una scala colore tale da accentuare le anomalie resistive presenti nei primi 50 m. I profili di velocità  $V_s$  ottenuti dall'analisi di tracce di rumore sismico ambientale sono sovrapposti alla tomografia elettrica, allo zoom di questa nell'area di sovrapposizione con le indagini sismiche, e alla tomografia sismica in onde  $V_s$ .**

Le indagini sismiche forniscono una prospettiva complementare, basata sull'analisi delle proprietà elastiche dei materiali.

La tomografia dei primi arrivi ha evidenziato una chiara zonazione verticale delle velocità, con uno strato superficiale a bassa  $V_p$  e  $V_s$  (materiali sabbiosi sciolti o poco addensati corrispondenti alla zona aerata) con spessore variabile lungo lo stendimento e con un massimo di 5-7 m. Successivamente è ben visibile un marcato incremento di velocità a una profondità di circa 15 m nel modello di velocità.

Questo andamento è coerente con una successione stratigrafica caratterizzata da terreni granulari superficiali che diventano progressivamente più consolidati in profondità. L'imaging sismico a riflessione consente inoltre di individuare con maggiore precisione i contrasti di impedenza acustica presenti nel sottosuolo.

Nel modello di velocità S si presenta sub-orizzontale ed è probabilmente associato ad un cambio di tipo litologico. Più in profondità sono presenti delle velocità, sia P che S, superiori e con diverse variazioni laterali. In particolare, a una distanza del modello di 180 m e una profondità di 30-40 m è presente un'area caratterizzata da valori di velocità P e S più bassi rispetto a quelli circostanti.

Questa anomalia può essere dovuta alla presenza di sedimenti con maggior porosità (diminuzione della velocità delle onde S) e presenza di acqua nello spazio poroso (diminuzione delle onde P non marcata). Questa interpretazione è suffragata dal confronto con la tomografia elettrica (Figura 144) che evidenzia in quest'area un aumento della conducibilità, probabilmente legato ad una maggior presenza d'acqua.

Un'altra area con una forte anomalia è presente alla distanza di 90-110 m e a profondità superiore a 20 m. In questo caso è presente una diminuzione dei valori di velocità P, mentre i valori di velocità S rimangono

praticamente inalterati. Questo è spiegabile ipotizzando che in tale area la saturazione in acqua dello spazio poroso è minore rispetto ai sedimenti presenti lateralmente.

Queste due anomalie appaiono evidenti nella sezione  $V_p/V_s$ , che evidenzia anche dal punto di vista visivo, la diversità delle due anomalie.

La buona densità di raggi nelle porzioni superficiali garantisce un'elevata affidabilità del modello nelle prime decine di metri, mentre la risoluzione decresce in profondità per limiti geometrici dell'inversione.

Le sezioni sismiche a riflessione confermano la presenza di un riflettore continuo e ben definito a 30-40 m di profondità, indice di un forte contrasto di impedenza acustica coerente con il contatto litologico sabbie/argille. La sovrapposizione tra tomografia sismica e riflessione mostra una significativa coerenza geometrica, rafforzando l'interpretazione e aumentando l'affidabilità complessiva del modello.

Le analisi MASW, condotte con inversione *Full Velocity Spectrum* delle onde di *Rayleigh* e con inversione delle onde di *Love*, hanno fornito un profilo di  $V_s$  robusto nei primi 30-40 m, con valori superficiali dell'ordine di 100-170 m/s e incremento progressivo fino a valori superiori a 500-700 m/s in profondità.

Le differenze tra modelli *Rayleigh* e *Love* sono riconducibili alla diversa sensibilità fisica delle onde considerate e al normale grado di non unicità dell'inversione, mentre le discrepanze alle maggiori profondità riflettono la minore sensibilità del dato alle basse frequenze.

I profili di velocità ottenuti dall'inversione di dati di rumore sismico ambientale e sovrapposti sia alla tomografia elettrica che alla tomografia sismica di onde S sono mediamente in accordo con i risultati della MASW perché, a differenza di queste, individuano delle inversioni di velocità a profondità comprese tra i 20 m e i 40 m. Tale discrepanza può essere imputabile alla frequenza propria degli strumenti utilizzati che nel caso delle acquisizioni di rumore sismico ambientale è avvenuta con un tromometro digitale della serie Tromino R con frequenza proprio di 4,5 Hz portata elettronicamente a valori intorno a 0,1 Hz.

Il confronto tra i risultati geoelettrici e quelli sismici evidenzia come i due metodi mettano in risalto aspetti differenti della stessa struttura geologica. La resistività elettrica è fortemente influenzata dal contenuto in acqua e dalla porosità dei sedimenti, mentre le velocità sismiche sono principalmente legate alle proprietà elastiche e al grado di consolidazione dei materiali.

Di conseguenza, un livello argilloso saturo può presentare valori di resistività molto bassi anche a profondità maggiori rispetto al principale contrasto meccanico evidenziato dalle indagini sismiche. Questa differenza di sensibilità fisica spiega perché il volume conduttivo individuato dalla tomografia geoelettrica possa risultare più profondo rispetto al principale riflettore sismico, senza che ciò rappresenti necessariamente una contraddizione interpretativa.

Un ulteriore contributo all'interpretazione deriva dall'analisi del rapporto  $V_p/V_s$ , utilizzato come indicatore qualitativo del grado di saturazione dei sedimenti. Alcune anomalie osservate lungo il profilo sismico possono essere associate a variazioni locali del contenuto d'acqua o della porosità dei materiali. Tali interpretazioni devono tuttavia essere considerate indicative, poiché il rapporto  $V_p/V_s$  può essere influenzato da diversi fattori e non costituisce un indicatore univoco delle condizioni idrogeologiche.

Nel complesso, le diverse metodologie geofisiche, pur basate su principi fisici distinti, convergono verso un modello stratigrafico coerente caratterizzato da terreni superficiali sabbiosi a bassa rigidità sovrastanti un livello più competente a maggiore rigidità e contrasto elastico, individuato con elevata continuità laterale intorno ai 35-40 m di profondità. L'accordo tra tecniche indipendenti costituisce un elemento fondamentale di validazione del modello geofisico ricostruito.

Il modello di sottosuolo ottenuto dall'integrazione delle indagini geofisiche è stato utilizzato quale vincolo stratigrafico e geometrico per la definizione del modello numerico agli elementi distinti presentato nella sezione 7.2, contribuendo alla ricostruzione delle superfici di contatto litologico e alla calibrazione della geometria del sottosuolo adottata nelle simulazioni.

In Figura 145 è mostrata la correlazione spaziale tra il modello di resistività e la sezione della frana principale di Niscemi (Figura 15). In particolare, il livello di debolezza ipotizzato nel modello di resistività a seguito delle

indagini geofisiche, indicato come linea tratteggiata bianca in Figura 141, si colloca in un intervallo altimetrico compreso tra 212 e 260 m s.l.m.; tale intervallo risulta pienamente compatibile con il prolungamento verso monte della superficie di scivolamento ricostruita nel modello di Figura 15.

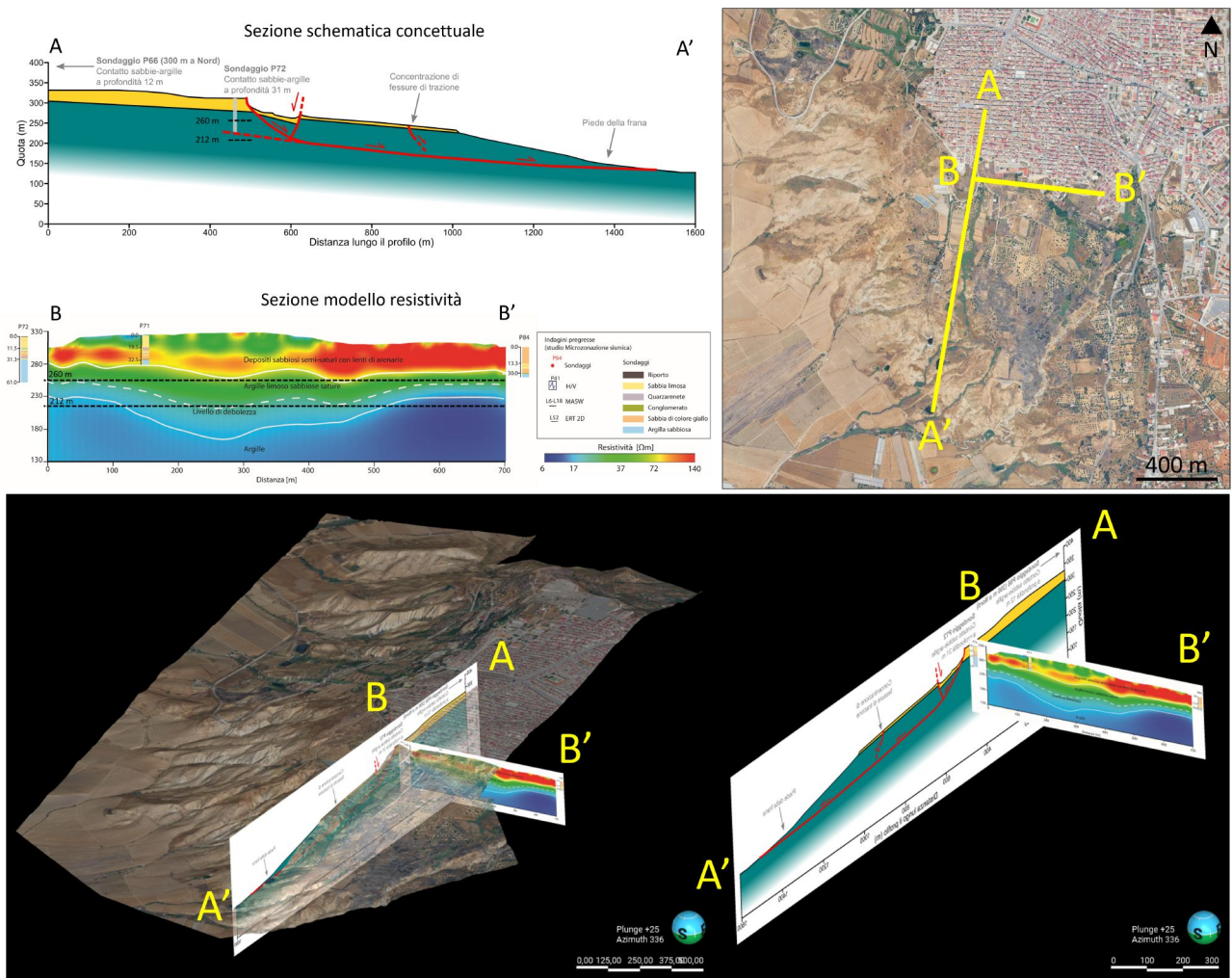


Figura 145 - Correlazione spaziale tra il modello di resistività e la sezione della frana centrale di Niscemi. In alto, visualizzazione bidimensionale delle sezioni correlate, proiettate ortogonalmente sull'area di studio; in basso, ricostruzione tridimensionale del modello.

## 7 Caratterizzazione e modellazione geotecnica

### 7.1 Caratterizzazione geotecnica

#### 7.1.1 Stratigrafia

Lo studio geologico e geotecnico effettuato dal Comitato Tecnico Scientifico relativamente alla frana del 12 ottobre 1997 (Castiglione *et al.*, 2000) evidenzia in maniera chiara come dal punto di vista litologico l'area sia caratterizzata da materiali con un forte contrasto in termini sia di resistenza sia di permeabilità.

Dai dati derivanti dai 74 sondaggi effettuati successivamente alla frana e spinti a profondità comprese tra i 17,5 m e i 100 m, Castiglione *et al.* (2000) hanno potuto ricostruire con elevato dettaglio la serie stratigrafica dei terreni fornendo importanti indicazioni sugli spessori dei litotipi e sull'assetto giaciturale.

Relativamente alla stratigrafia i sondaggi evidenziano uno spessore del livello delle sabbie variabile da poco più di 30 m, in corrispondenza del ripiano su cui sorge l'abitato, a valori di 10 m - 15 m spostandosi verso il piede della frana. Questi valori trovano conferma nei dati derivanti dalla microzonazione sismica realizzata all'interno del paese per conto della Regione Siciliana.

Relativamente alle condizioni di giacitura del contatto lo studio di Castiglione *et al.* (2000) evidenzia un'inclinazione nella porzione centrale e terminale della frana del 1997 compresa tra i 5° e i 7° e valori prossimi ai 10°-12° in prossimità della scarpata, dove il contatto appare leggermente inclinato per effetto del movimento della frana.

#### 7.1.2 Proprietà geotecniche

Nello studio di Castiglione *et al.* (2000) sono descritte in dettaglio le proprietà geotecniche delle argille derivate da prove in laboratorio su campioni con differente grado di disturbo prelevati da 49 dei 74 sondaggi effettuati a carotaggio continuo eseguiti sia nel pianoro su cui sorge l'abitato di Niscemi sia sulla frana del 1997.

Le argille si presentano normalconsolidate con un peso di volume compreso tra i 19 e i 20 kN/m<sup>3</sup> e una plasticità variabile da bassa a elevata. Il contenuto d'acqua, valutato al tempo dell'esecuzione dei sondaggi tra il 1999 e il 2000, ben dopo l'evento del 1997, risulta sempre superiore al limite di plasticità.

In particolare, gli autori evidenziano come il contenuto d'acqua nelle argille tende a diminuire con la profondità là dove le argille non risultano rimaneggiate mentre i valori maggiori sono rilevati a profondità maggiori dove le argille risultano rimaneggiate, ovvero a profondità maggiori di ca. 40 m in prossimità del torrente Bonifazio e a profondità minori spostandosi verso il piede della frana (fino a 10 m per il sondaggio posto più a valle). Questo aspetto, unito a quanto evidenziato dai dati inclinometrici successivamente descritti, fornisce una chiara indicazione sulla potenziale profondità della superficie di scivolamento.

Relativamente ai parametri di resistenza al taglio delle argille questi sono stati derivati da differenti prove di laboratorio tra cui: prove triassiali consolidate non drenate; prove di taglio diretto e prove di taglio residuale.

I risultati delle prove mostrano valori pressoché indipendenti dalla profondità di campionamento con valori di  $c'$  nulli e  $\phi'$  pari a 21° relativamente alle prove triassiali; e valori di  $c'$  compresi tra 0 e 30 kPa e  $\phi'$  in genere pari a 27° con minimo di 22° relativamente alle prove di taglio diretto. I valori di resistenza residua risultano pari a  $c'_r=0$  e  $\phi'_r=18^\circ$  in ottimo accordo con quelli di Rizzo (2004) pari rispettivamente a  $c'_r=0$  e  $\phi'_r=17^\circ$ .

Nella relazione di Castiglione *et al.* (2000) non risultano parametri geotecnici per le sabbie sovrastanti per l'impossibilità di prelievo di campioni indisturbati da utilizzare per prove di laboratorio.

La Tabella 13 riassume i principali parametri geotecnici delle argille.

Peso di volume	Contenuto d'acqua	Prova TxCD		Prova TD		Prova TR	
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	w <sub>n</sub> (%)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	c' (kPa)	$\phi'_r$ (°)
19-20	0.25-0.30	0	21	0 - 30	22 - 27	0	18

Tabella 13 - Principali parametri geotecnici delle argille (Castiglione *et al.*, 2000).

### 7.1.3 Inclinatori

I dati inclinometrici, riportati nello stesso studio e relativi agli anni 1999-2000, evidenziano movimenti a due differenti profondità (Figura 146, Figura 147, Figura 148). Si riscontrano movimenti alla profondità di 37,5 m per l'inclinometro S19C e alla profondità di 26 m per l'inclinometro S17C; movimenti di simile o leggermente inferiore entità sono visibili a profondità maggiori e rispettivamente alla profondità di 58 m per l'inclinometro S19C, 66 m per l'inclinometro S08C e 55 m per l'inclinometro S07C.

Si ritiene che i movimenti più superficiali possano essere indicativi di un movimento successivo all'interno della frana principale, la cui superficie di scivolamento sarebbe pertanto posizionata a profondità comprese tra i 55 m e i 66 m.

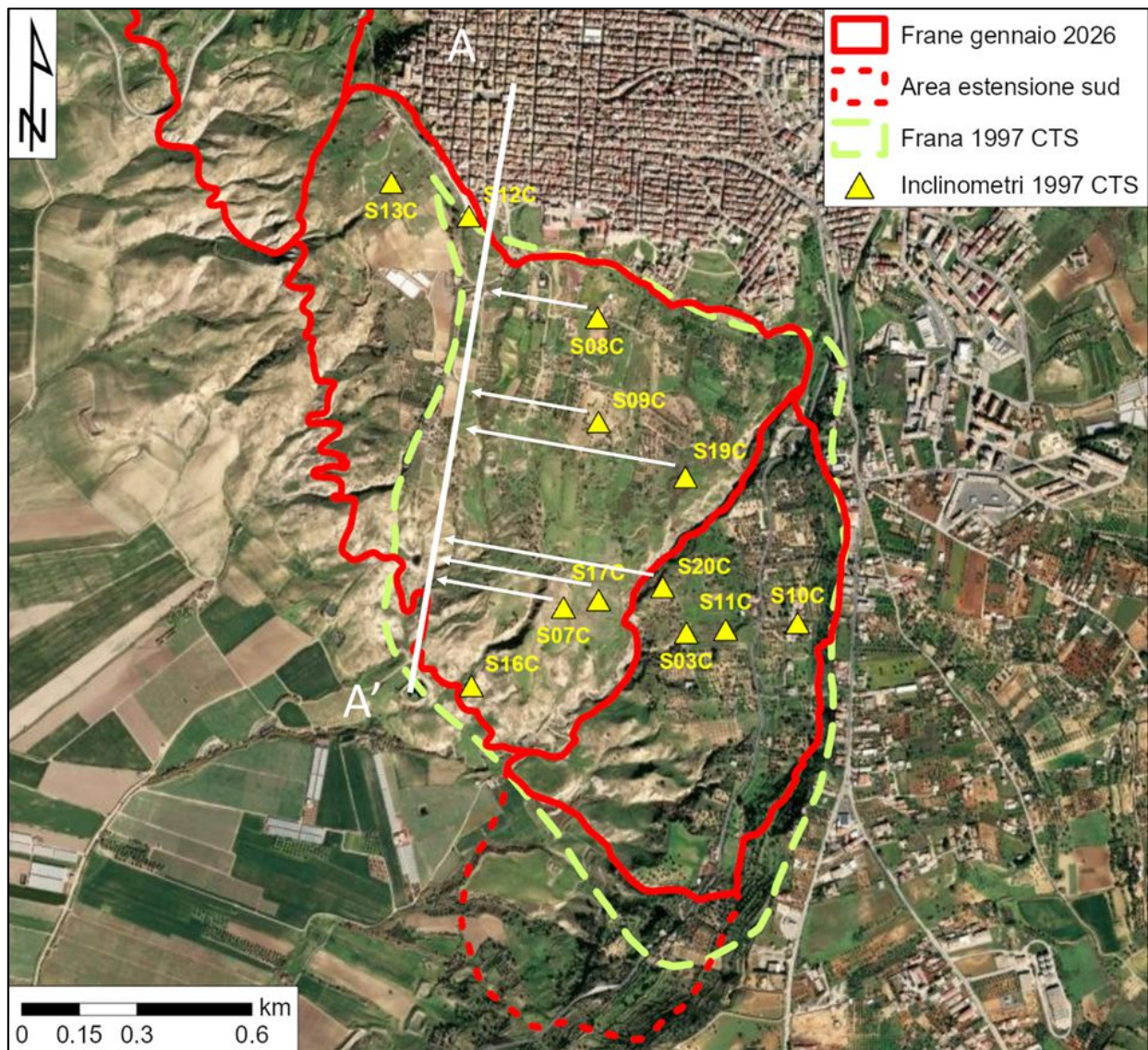


Figura 146 - Ubicazione dei sondaggi attrezzati con tubi inclinometrici (da Castiglione *et al.*, 2000).

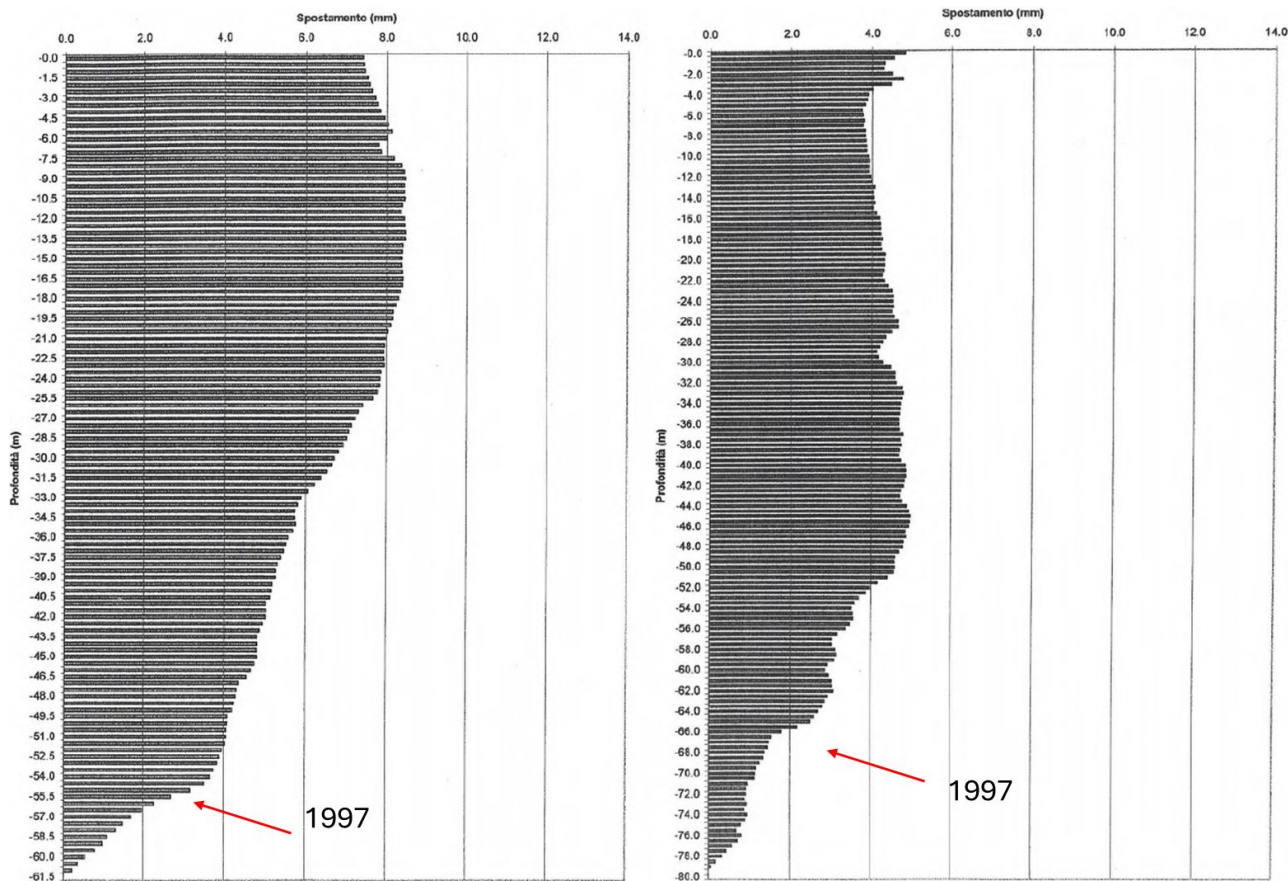


Figura 147 - Valori cumulati degli spostamenti rilevati al periodo 28 gennaio 1999 - 22 giugno 2000. A sinistra inclinometro S07C, a destra inclinometro S08C.

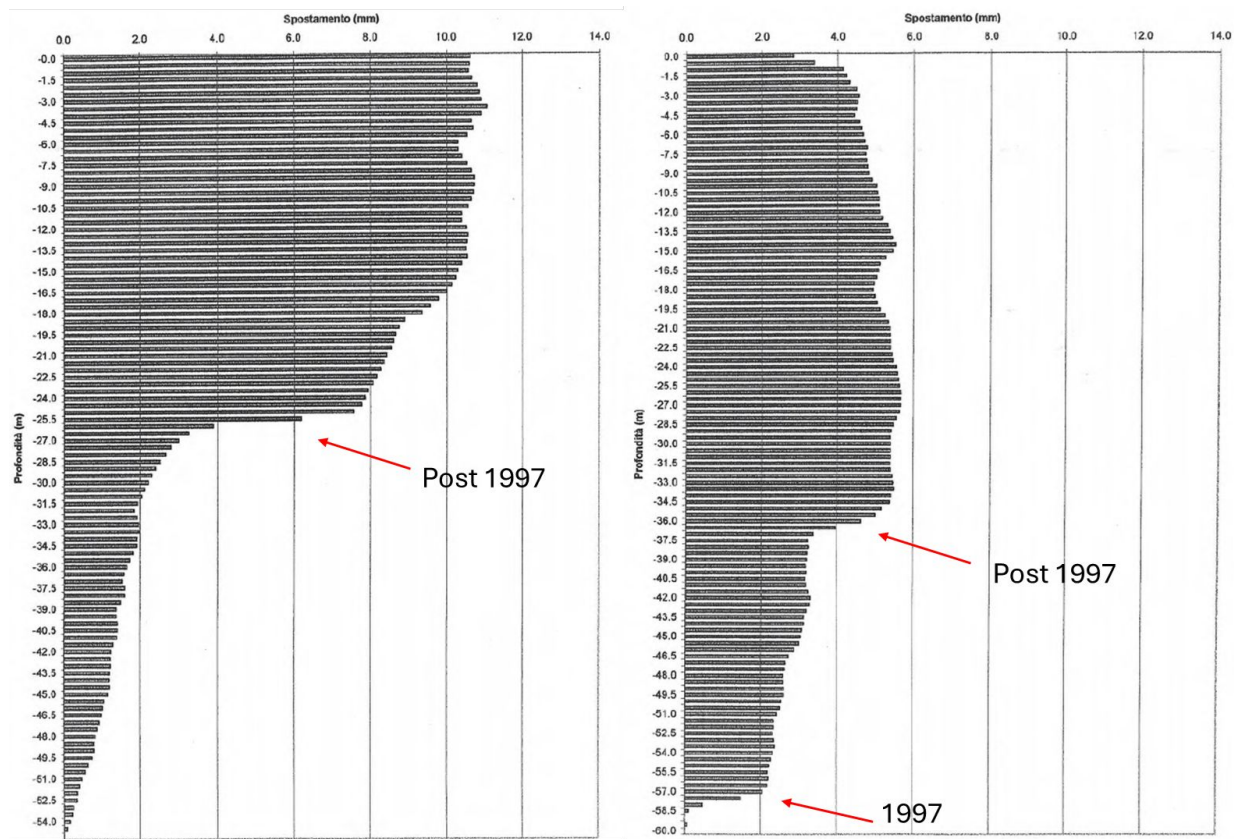


Figura 148 - Valori cumulati degli spostamenti rilevati al periodo 19 marzo 1999 - 16 febbraio 2000 (S17C) e al periodo 10 marzo 1999 - 27 giugno 2000 (S19C). A sinistra inclinometro S17C, a destra inclinometro S19C.

Per una migliore comprensione dell'ubicazione delle verticali inclinometriche sopracitate rispetto alla traccia di sezione longitudinale alla frana centrale del 2026, è stata eseguita una proiezione ortogonale dei dati di spostamento sul piano della sezione stessa (Figura 146).

Si sottolinea che la campagna di misure è stata per lo più condotta al margine orientale dell'attuale frana centrale e a quello occidentale dell'attuale frana sud, ovvero in corrispondenza del corpo principale della frana del 1997; la proiezione dei dati di spostamento cumulato sulla sezione longitudinale alla frana centrale, posta a circa 300 m di distanza, implica di conseguenza una traslazione a quote marcatamente differenti rispetto ai sondaggi originari e su una topografia che, in ogni caso, ha subito cambiamenti significativi a seguito degli eventi franosi recenti.

Dalla Figura 149 e più in generale dall'analisi di tutti i grafici disponibili, si evince che la maggior parte dei sondaggi non mostra discontinuità nette nei valori di spostamento cumulato; è pertanto plausibile che essi non siano arrivati sufficientemente in profondità per intercettare la superficie di scivolamento basale. Eccezioni sono rappresentate, come già accennato, dagli inclinometri S07C, S17C e S19C; il primo e l'ultimo in particolare, posti rispettivamente al piede e a metà della traccia di sezione AA' (Figura 146), denotano movimenti a profondità generalmente compatibili con il meccanismo e la geometria della frana ipotizzati.

Secondo tale interpretazione, la profondità della superficie di scivolamento in corrispondenza del punto mediano della frana centrale si attesterebbe intorno a circa 60 m. Tale valore è a sua volta compatibile con la profondità massima presunta del fenomeno di circa 80 m (sezione 3.3.3), circoscrivibile alla zona immediatamente antistante al *Graben*.

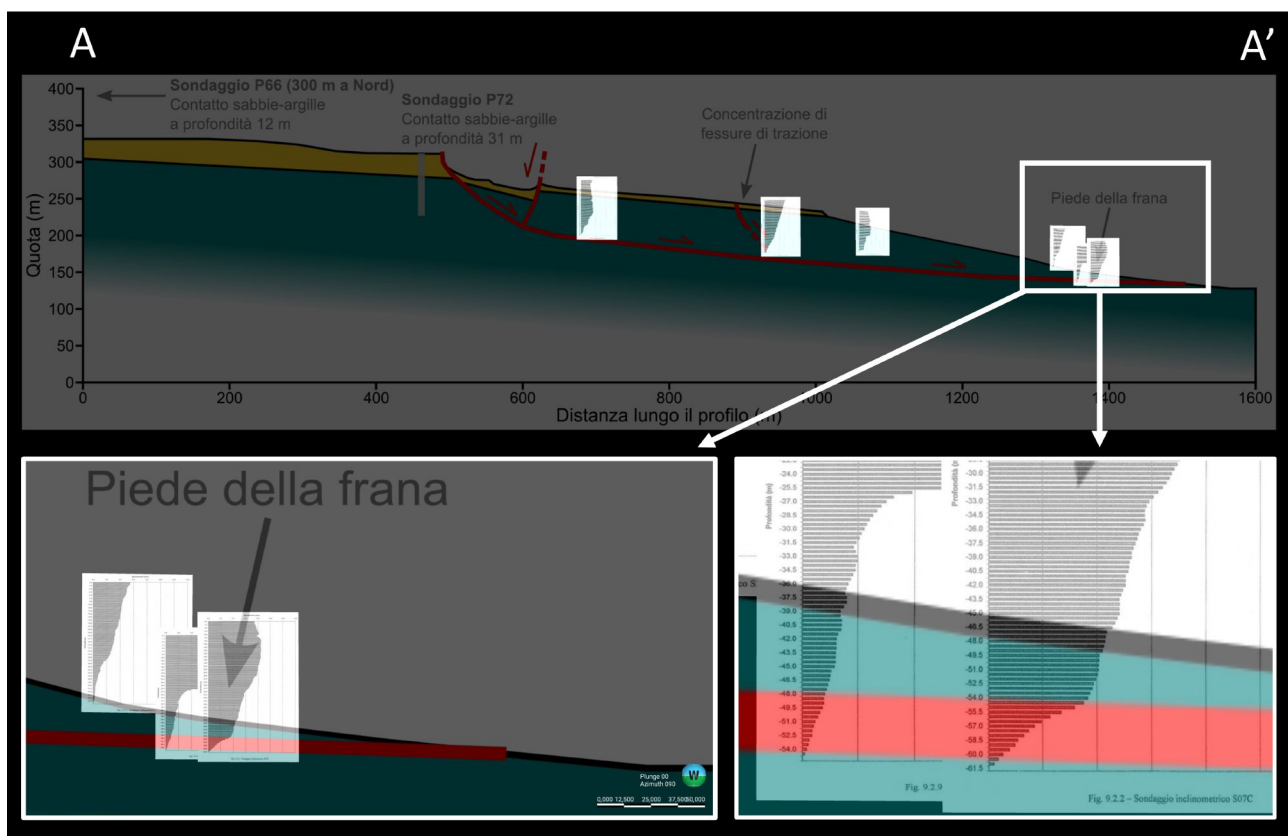


Figura 149 - Proiezione sulla sezione schematica longitudinale alla frana centrale delle misure di spostamento cumulato relative alle verticali inclinometriche.

### 7.1.4 Piezometria

I dati piezometrici (Castiglione *et al.*, 2000) mostrano come all'interno delle argille si siano mantenute nel tempo condizioni di acqua in pressione con livelli di risalita anche superiori ai 10 m (Figura 150, Figura 151).

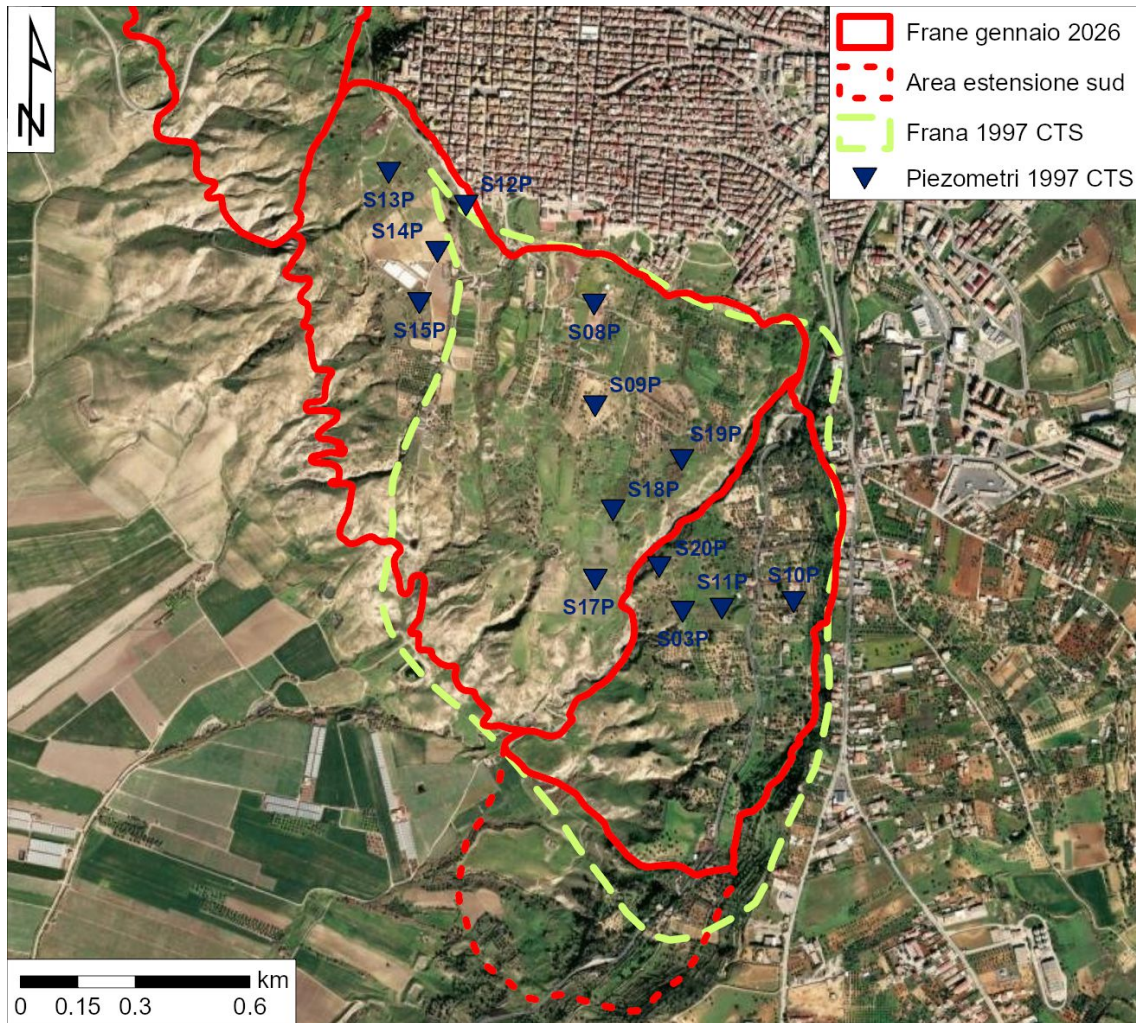


Figura 150 - Ubicazione dei sondaggi attrezzati con tubi piezometrici (Castiglione *et al.*, 2000).

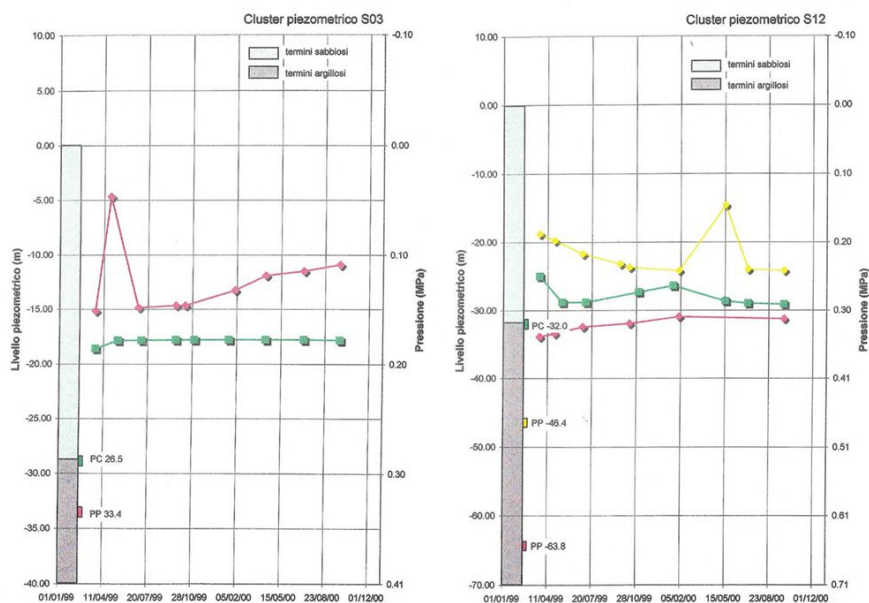


Figura 151 - Andamento del livello piezometrico nelle argille e al contatto con la sabbia (da Castiglione *et al.*, 2000).

## 7.2 Modellazione numerica

Con l'obiettivo di confermare il modello cinematico di riferimento ipotizzato sulla base delle osservazioni geologiche e geomorfologiche, sono state effettuate delle modellazioni numeriche con il codice FLAC 2D (*Fast Lagrangian Analysis of Continua*), un codice di modellazione numerica del continuo in due dimensioni sviluppato da Cundall (1976) appositamente per applicazioni nel campo della geomeccanica. Il programma utilizza uno schema di calcolo esplicito basato sul metodo delle differenze finite con formulazione lagrangiana.

I metodi numerici alle differenze finite (FDM) e agli elementi finiti (FEM) suddividono i materiali che devono essere modellati in un certo numero di elementi, in modo da formare una griglia (*mesh*) e risolvere le equazioni del moto ai nodi di tale griglia. Mentre nei FEM queste sono risolte simultaneamente per tutti i nodi della griglia impostando un sistema di equazioni che mettono in relazione le forze e gli spostamenti di ciascun nodo tramite una matrice di rigidità globale (*global stiffness matrix*), nei FDM le equazioni vengono risolte individualmente per ogni nodo.

Questo può essere fatto grazie al codice esplicito utilizzato, che fa riferimento a una procedura con scansione nel tempo (*time marching*) per la risoluzione delle equazioni del moto. Si assume infatti che, per intervalli di tempo sufficientemente piccoli, un disturbo in un nodo non influenza gli elementi immediatamente adiacenti. A questo proposito è opportuno precisare che, nelle analisi meccaniche, gli intervalli di tempo non corrispondono ad un tempo reale, ma si riferiscono soltanto ad un "tempo macchina" legato alla procedura di calcolo.

Un'ulteriore prerogativa del programma è la cosiddetta "formulazione lagrangiana", secondo la quale qualora si verificano condizioni di plasticizzazione e di deformazione i nodi si spostano realmente, dal momento che le loro coordinate vengono aggiornate automaticamente ad ogni ciclo di calcolo. Questo risulta possibile proprio in virtù della procedura impiegata per la soluzione delle equazioni del moto, indipendentemente per ogni nodo, senza la necessità di assemblare una matrice di rigidità globale.

Ogni ciclo di calcolo di FLAC passa attraverso i seguenti punti:

1. per ogni nodo del reticolo viene calcolata, sommando i contributi delle zone di continuo ad esso collegate, una massa  $m$ , una risultante delle forze esterne  $F_e$  applicate al nodo e una risultante delle azioni interne  $F_i$  ottenuta per integrazione degli sforzi nelle zone collegate al nodo stesso. Si calcola quindi la forza netta agente sul nodo  $F_u = F_e - F_i$  (*unbalanced force*); tale forza, che in un sistema in equilibrio deve essere nulla, è responsabile dell'eventuale situazione di non equilibrio del nodo;
2. per ogni nodo viene impostata un'equazione di Newton, mediante la quale si determina l'accelerazione  $a$  del nodo. Integrando due volte l'accelerazione si ottengono la velocità e lo spostamento incrementale del nodo (ricordando che il passo d'integrazione  $dt$  deve essere scelto con molta attenzione per evitare problemi di instabilità numerica);
3. il campo di spostamenti incrementali così calcolato permette di determinare il campo di deformazioni incrementali e quindi, attraverso il legame costitutivo dei materiali, il campo di variazione degli sforzi nelle zone del reticolo;
4. la variazione degli sforzi comporta una variazione nodo per nodo della risultante delle forze interne  $F_i$ ; si ritorna quindi al punto 2 con questi valori aggiornati e si ripete il ciclo procedendo al successivo incremento  $dt$ .

Per il raggiungimento delle condizioni di equilibrio FLAC esegue automaticamente uno smorzamento "fittizio" in base alla velocità calcolata per ciascun nodo. Il tipo di soluzione di un problema può essere ricondotto ad uno dei seguenti casi:

- verificando che nell'evoluzione dello stato di sforzo le  $F_i$  progressivamente equilibrano le  $F_e$  e dunque le forze nette si riducono e con esse le velocità (grazie all'effetto dello smorzamento), mentre gli spostamenti raggiungono valori costanti e il modello evolve quindi verso uno stato stazionario;
- in una o più parti del modello le proprietà meccaniche del materiale vengono superate e, quindi, le  $F_i$  non arrivano mai a riequilibrare le  $F_e$ .

Nel secondo caso, nei nodi si continua ad avere un'accelerazione (compensata dall'azione delle forze smorzanti) e una velocità che non scendono mai a zero, con il materiale che continua quindi a deformarsi (meccanismo di collasso). FLAC permette di seguire questo fenomeno fino a che le deformazioni non divengono tali da produrre zone di forme geometricamente inaccettabili, come per esempio quadrilateri concavi, il che generalmente avviene a stadi molto avanzati del collasso, per i quali la modellazione del materiale come continuo non è più corretta.

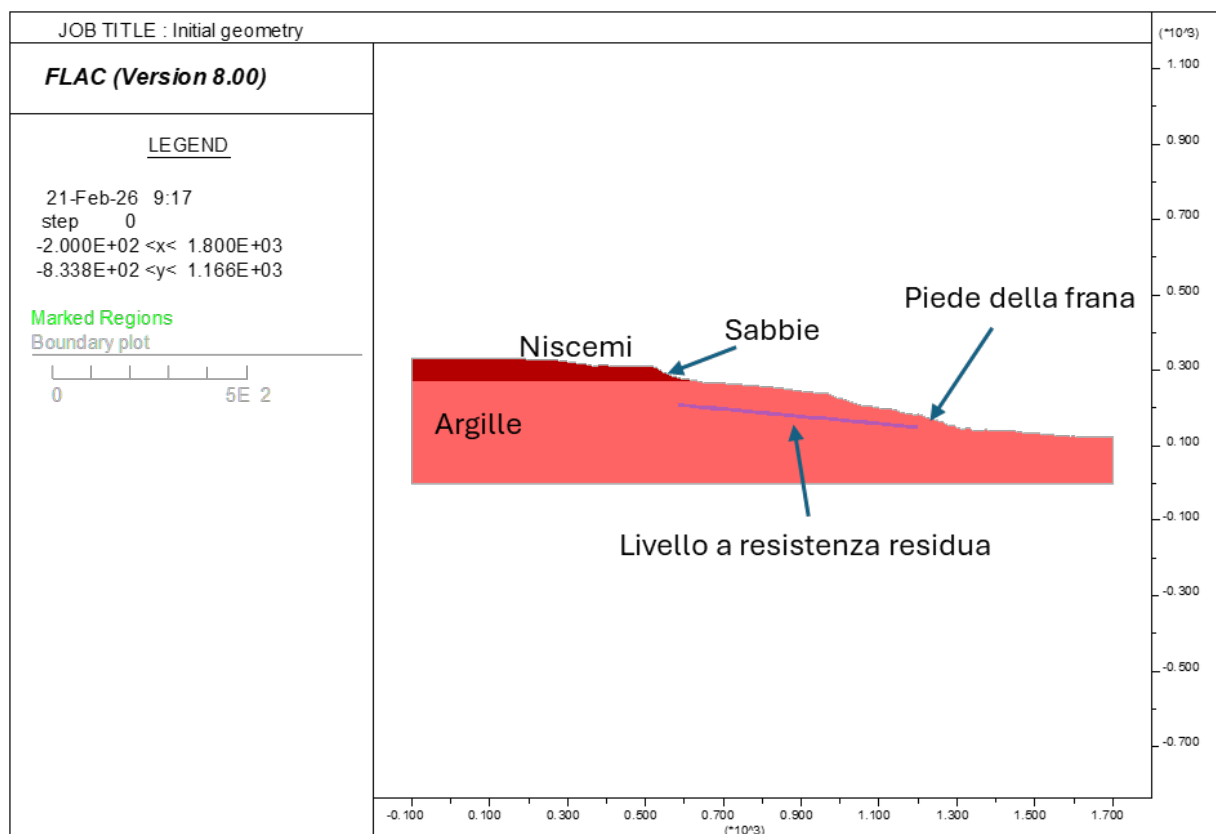
La sezione di riferimento utilizzata per le modellazioni numeriche è la stessa del profilo schematico riportata nella sezione precedente, e le proprietà geotecniche rappresentative dei materiali (Tabella 14) sono state estratte analizzando i risultati di prove di laboratorio discusse nella sezione precedente.

Materiale	Densità (kg/m <sup>3</sup> )	c' - picco (kPa)	φ' - picco (°)	c <sub>r</sub> ' - residua (kPa)	φ <sub>r</sub> ' (°) - residuo
Sabbia	2000	0	32	0	32
Argilla	1950	20	23	0	18

**Tabella 14 - Proprietà dei materiali considerati nell'analisi FDM.**

Con l'obiettivo di verificare la cinematica generale del movimento principale è stato definito un modello geologico semplificato della frana principale, dove è stato inserito all'interno delle argille un unico livello debolmente a franapoggio, in accordo con le informazioni geologiche disponibili, con la consapevolezza che tale schematizzazione rappresenta comunque una semplificazione della realtà (Figura 152).

Sebbene non si abbiano informazioni dirette sulla distribuzione delle pressioni interstiziali immediatamente precedenti alla fase parossistica, si è ipotizzata all'interno del modello la presenza di una falda prossima al piano di campagna, condizionata dal contrasto di permeabilità fra le sabbie e le argille sottostanti. Sono state fatte in particolare due ipotesi in merito alle possibili distribuzioni delle pressioni interstiziali che verranno presentate in seguito. In entrambi i casi, assegnando al materiale argilloso i parametri di picco (Tabella 14), il modello raggiunge sempre una situazione di equilibrio (Figura 153), a testimoniare un fattore di sicurezza  $F_s > 1$ .



**Figura 152 - Modello numerico alle differenze finite della frana principale di Niscemi.**

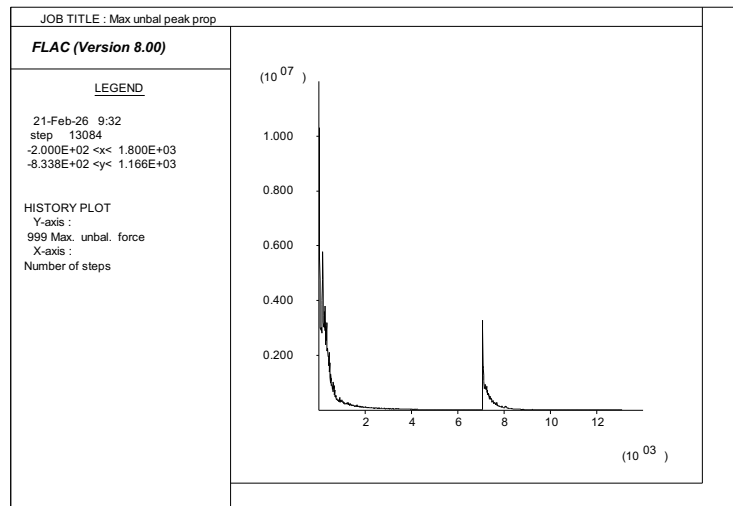


Figura 153 - Variazione della massima forza risultante agente sui nodi del modello. Assegnando i parametri di picco a tutti i materiali argillosi, il modello raggiunge una situazione di equilibrio.

### 7.2.1 Modello con saturazione totale delle argille

Assegnando al modello una falda che si sviluppa all'interno delle sabbie e coincidente col piano di campagna a valle del contatto sabbie-argille (Figura 154) e i parametri residui in corrispondenza del livello a resistenza residua all'interno delle argille, il modello non converge verso una situazione di equilibrio (Figura 155), a testimonianza di un fattore di sicurezza  $F_s < 1$ .

Come si può osservare in Figura 156 e Figura 157, in questo caso la plasticizzazione del materiale riguarda la porzione di piede del versante instabile, con fenomeni che riproducono in scala quello globale, in analogia con quanto osservato da Castiglioni *et al.* (2000).

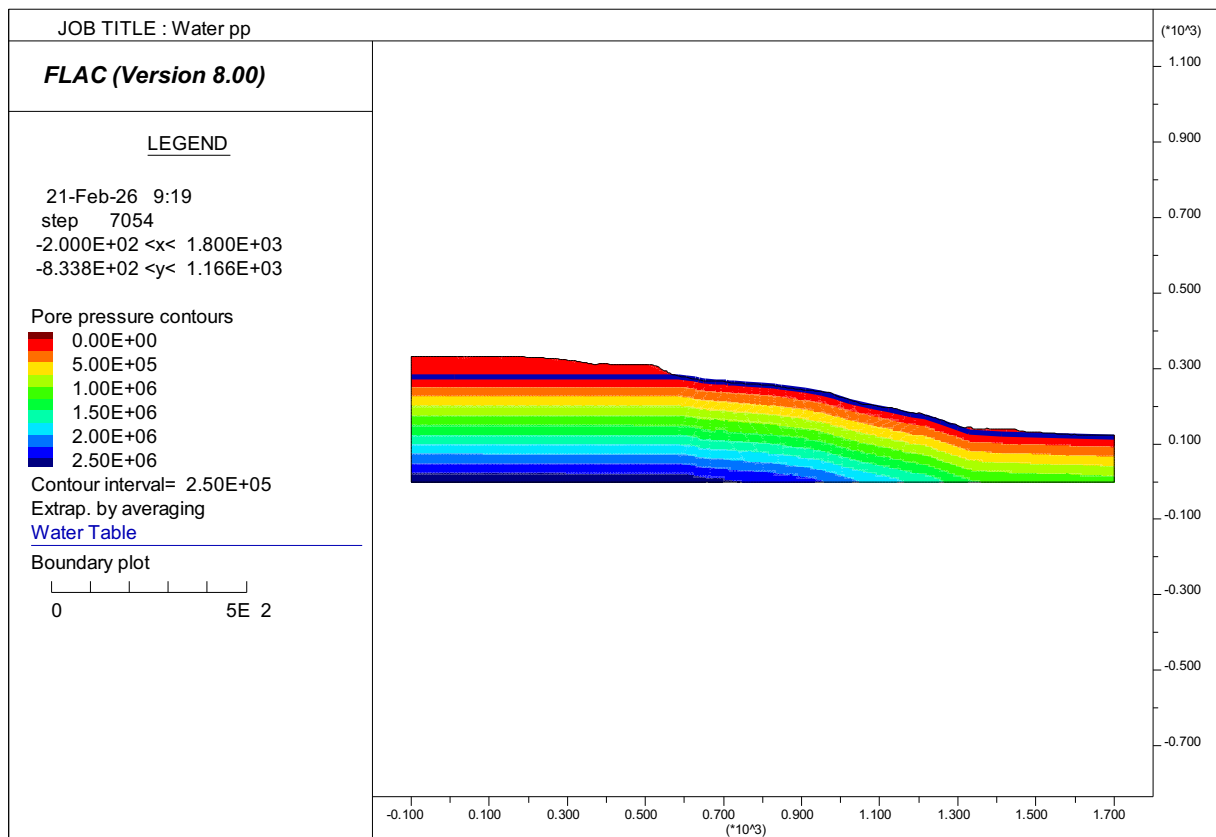


Figura 154 - Impostazione di un livello piezometrico che si sviluppa all'interno delle sabbie e coincidente col piano di campagna a valle del contatto sabbie-argille (linea blu) e relative pressioni interstiziali all'interno del modello.

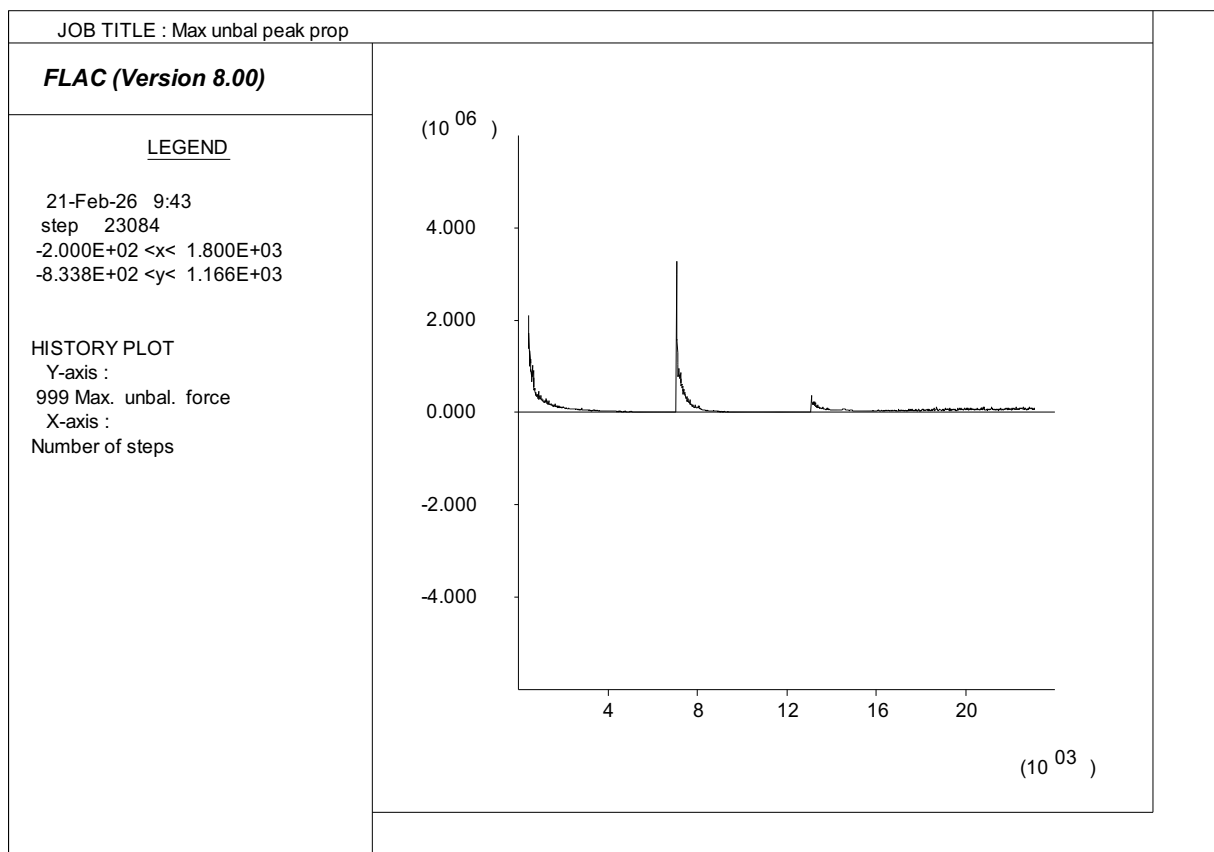


Figura 155 - Variazione della massima forza risultante agente sui nodi del modello assegnando i parametri residui al livello argilloso.

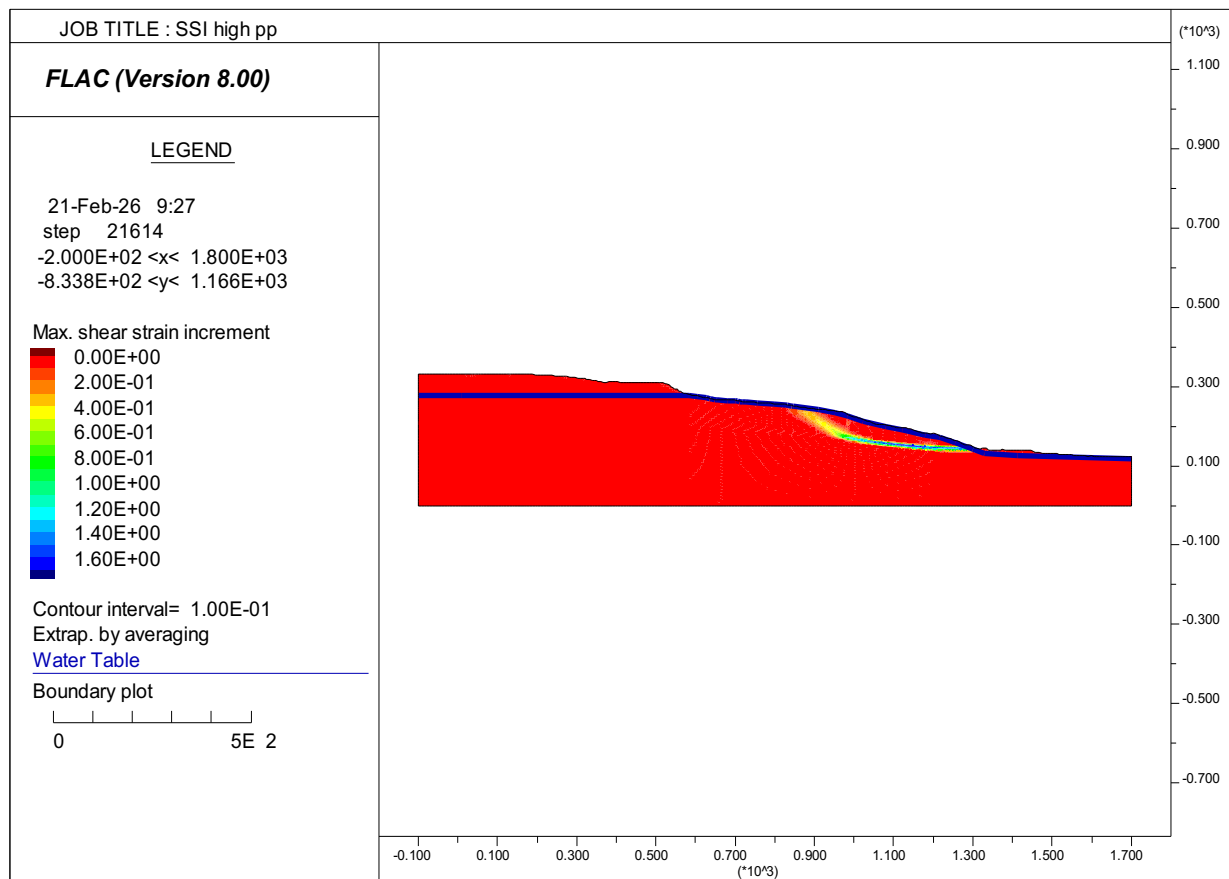


Figura 156 - Zone di concentrazione di rottura per taglio con falda al piano di campagna.

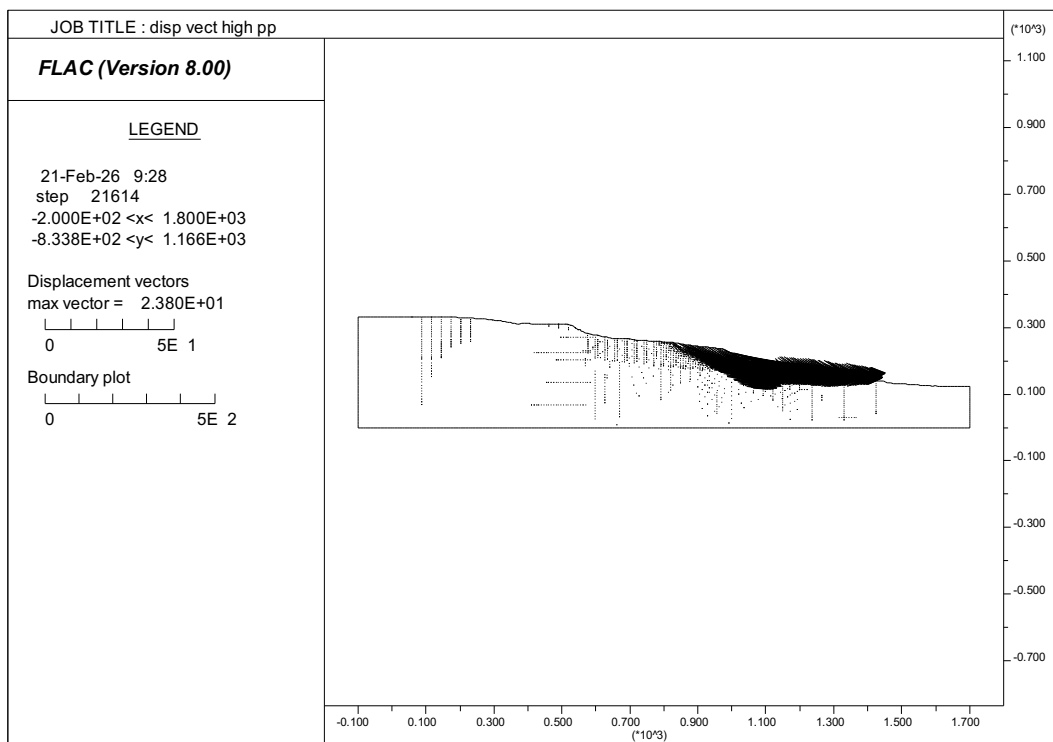


Figura 157 - Vettori spostamento nel caso di falda coincidente col piano di campagna.

### 7.2.2 Modello con saturazione parziale delle argille

Per cercare di riprodurre il fenomeno generale fino a interessare anche la porzione sabbiosa soprastante, si è quindi abbassato il livello piezometrico in prossimità del piede, secondo la configurazione riportata in Figura 158.

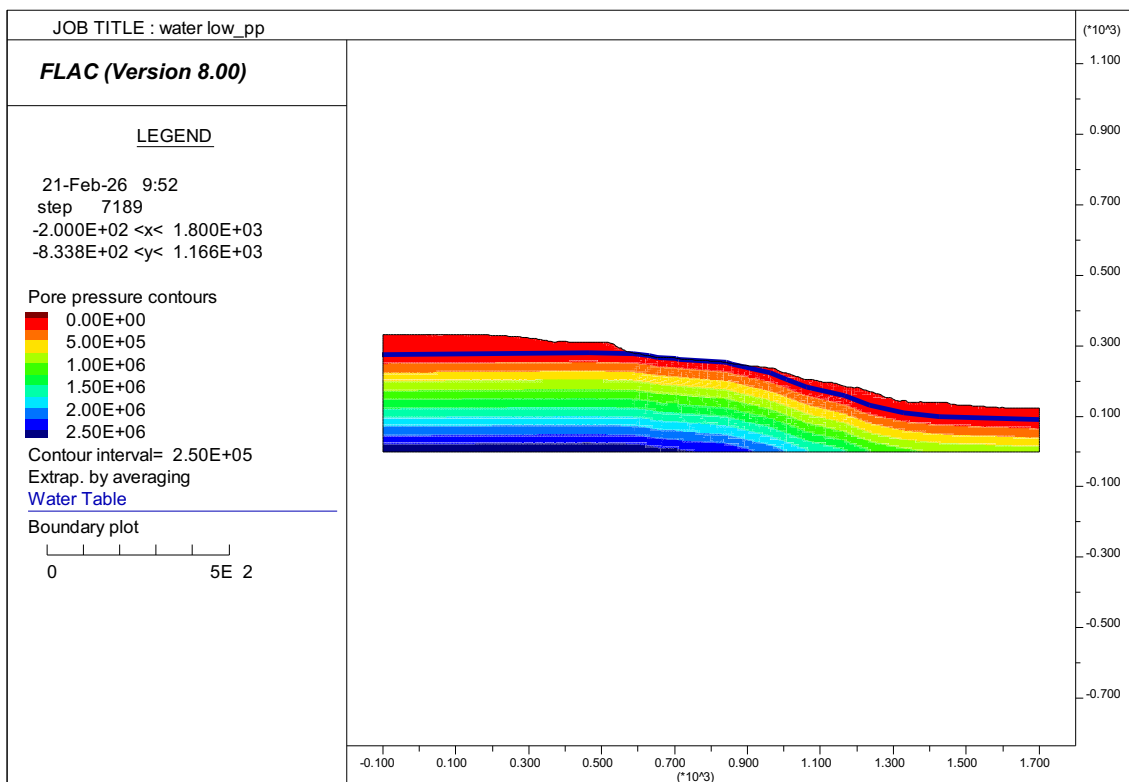


Figura 158 - Livello piezometrico ridotto in prossimità del piede del versante e relative pressioni interstiziali all'interno del modello.

In queste condizioni il modello converge verso una situazione di stabilità.

La condizione limite di scivolamento si verifica per un angolo di resistenza residua pari a  $13,5^\circ$ , determinando una destabilizzazione completa del versante secondo un meccanismo analogo a quello ipotizzato.

Ciò è testimoniato dalla distribuzione dei vettori spostamento e dalle zone di concentrazione di rottura per taglio, che evidenziano la formazione della scarpata principale che taglia la formazione sabbiosa soprastante e di una zona di rottura antitetica a delimitare l'area del *Graben* in abbassamento (Figura 159, Figura 160 e Figura 161).

La distribuzione degli spostamenti all'interno della massa in movimento conferma un movimento prevalentemente orizzontale nella zona centrale e di piede del corpo di frana (Figura 162), con una componente verticale preponderante solamente nell'area del *Graben* (Figura 163).

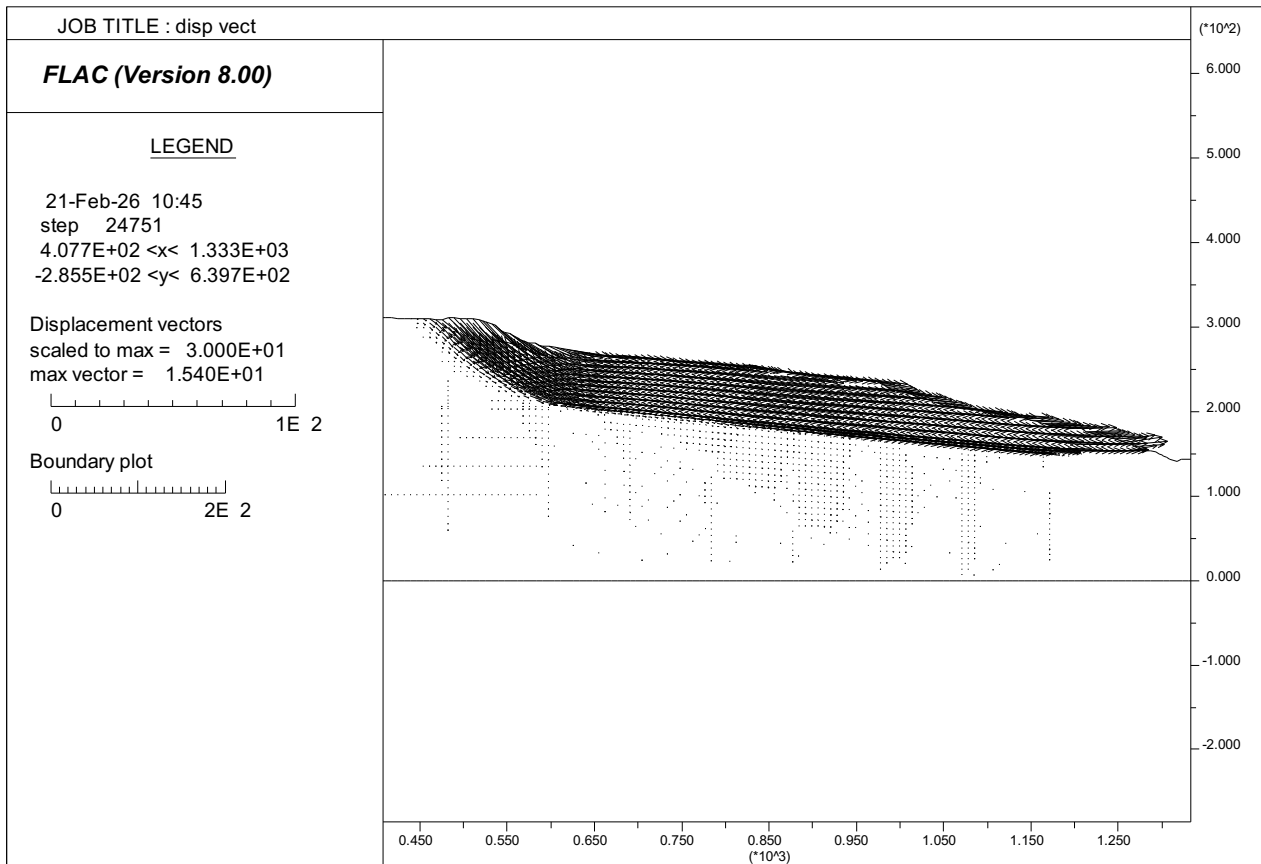


Figura 159 - Vettori spostamento in caso di mobilitazione dell'intero versante, in analogia con la frana principale.

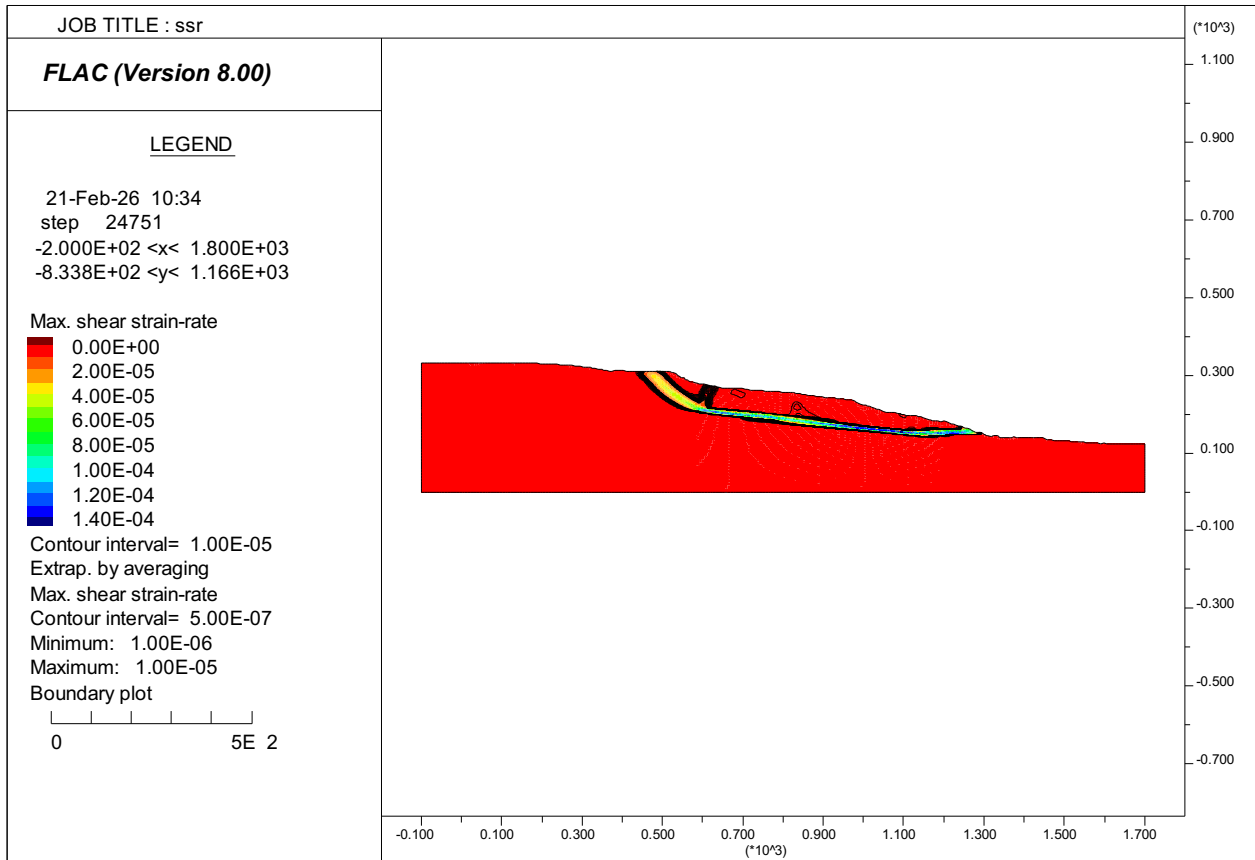


Figura 160 - Zone di concentrazione di rottura per taglio, con evidenza di rottura antitetica.

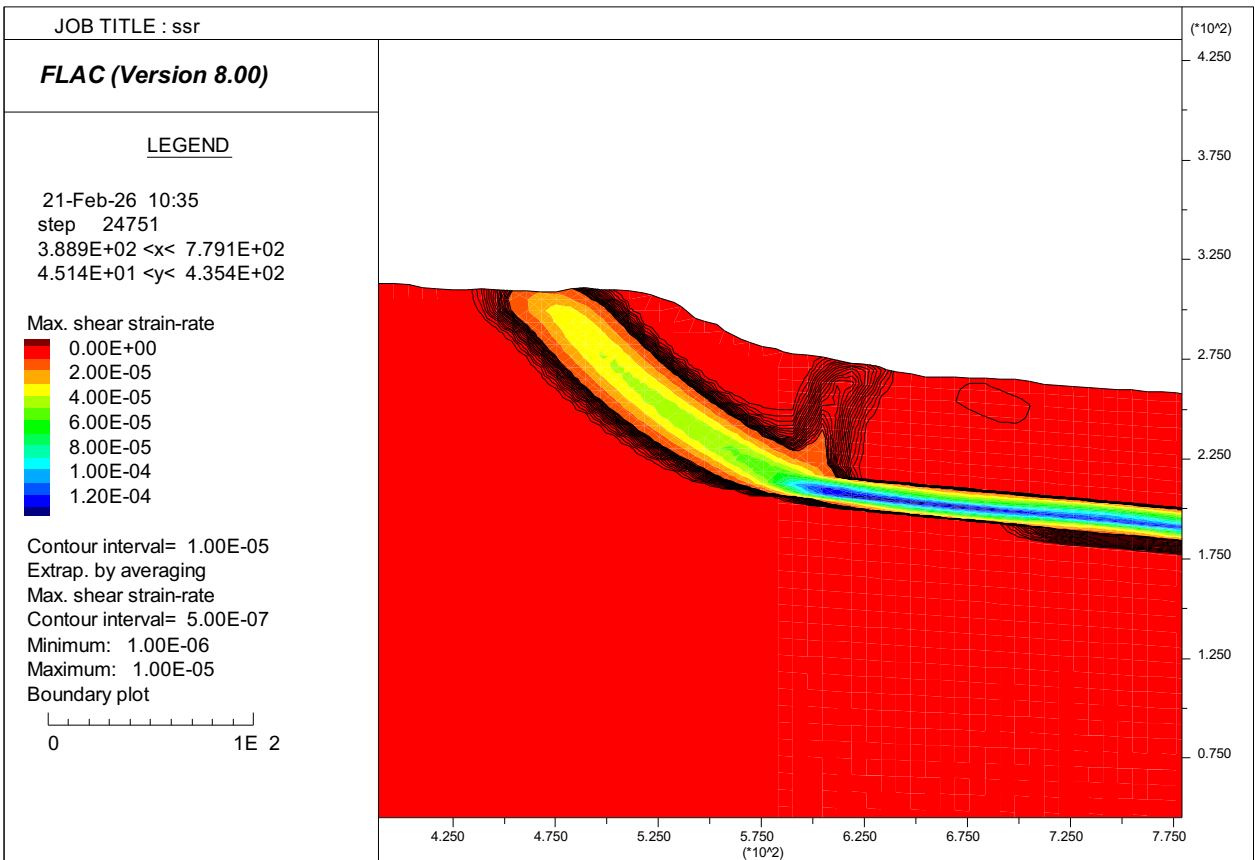
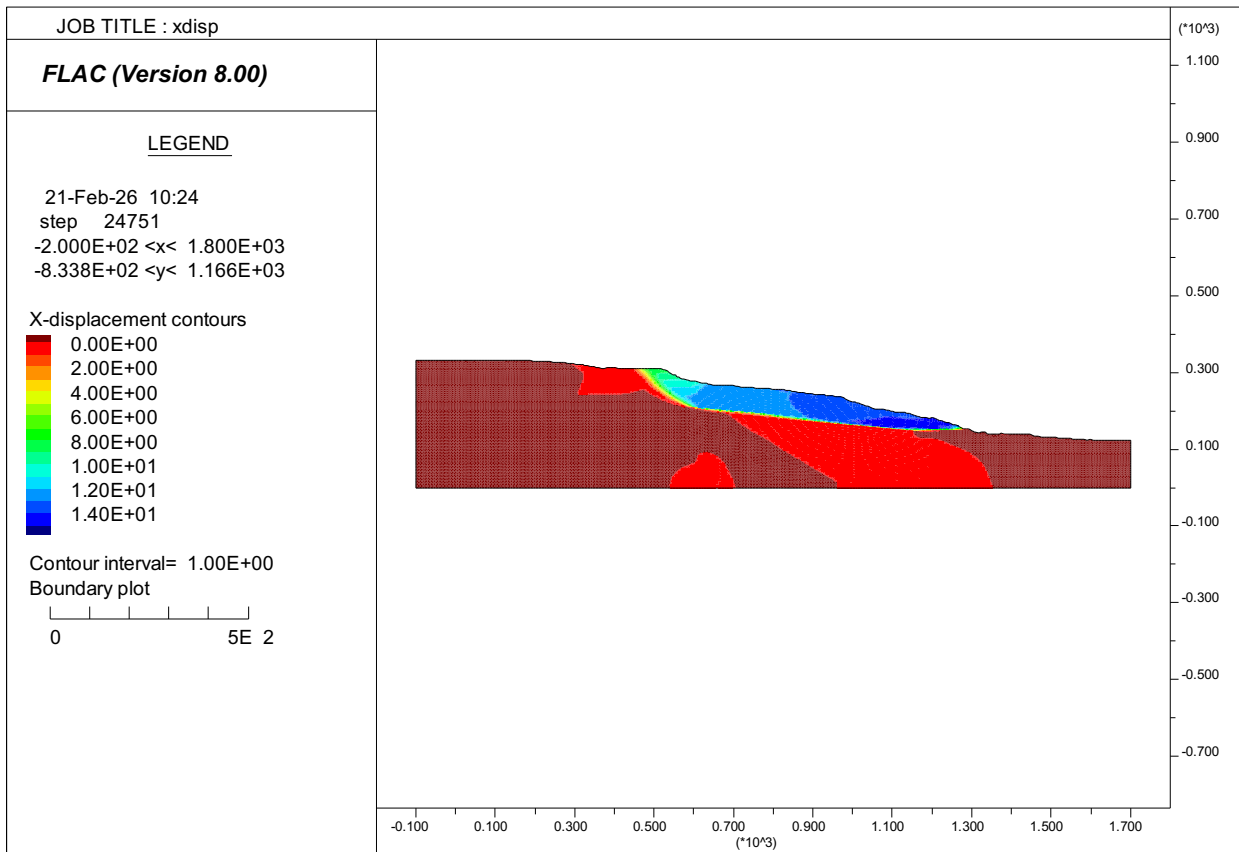
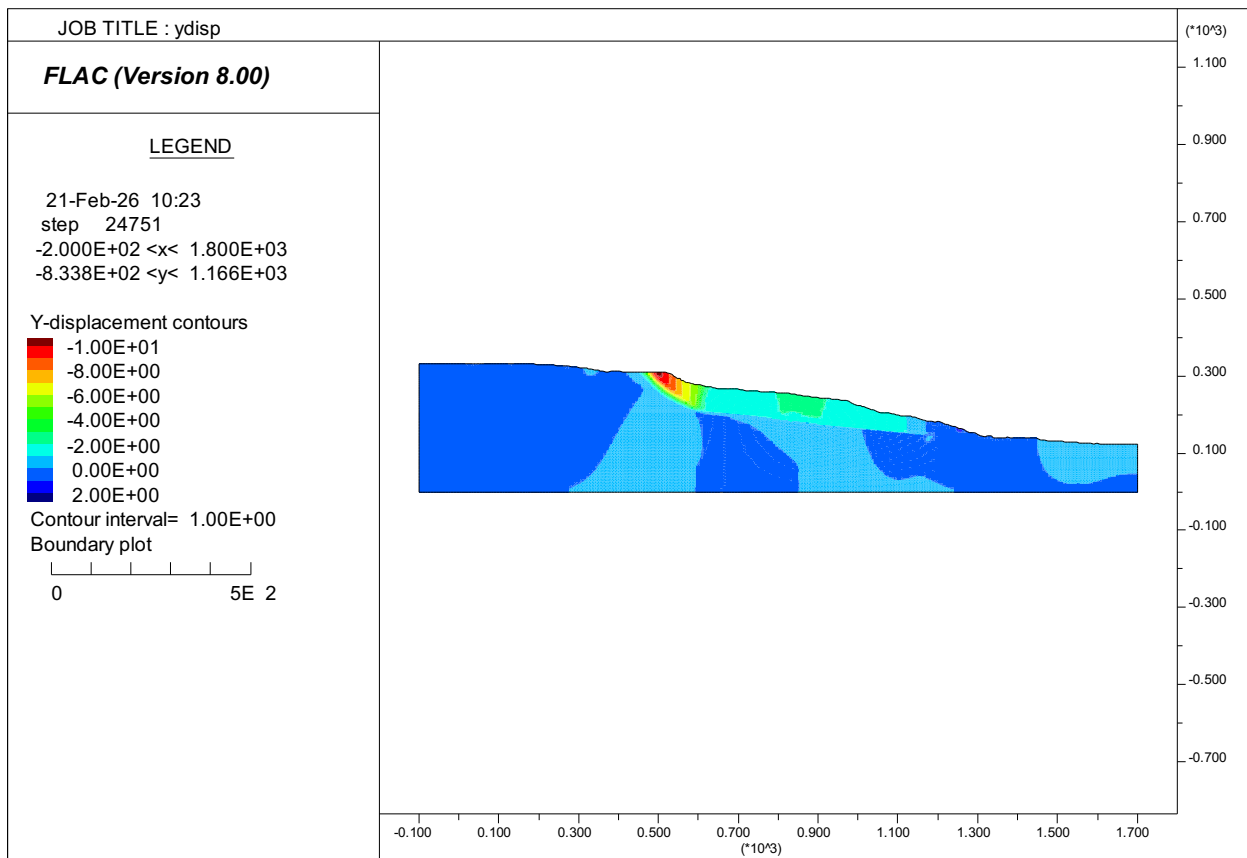


Figura 161 - Zone di concentrazione di rottura per taglio, con evidenza di rottura antitetica. Particolare in corrispondenza della scarpata principale e dell'area del *Graben*.



**Figura 162 - Isolinee di spostamento orizzontale.**



**Figura 163 - Isolinee di spostamento verticale.**

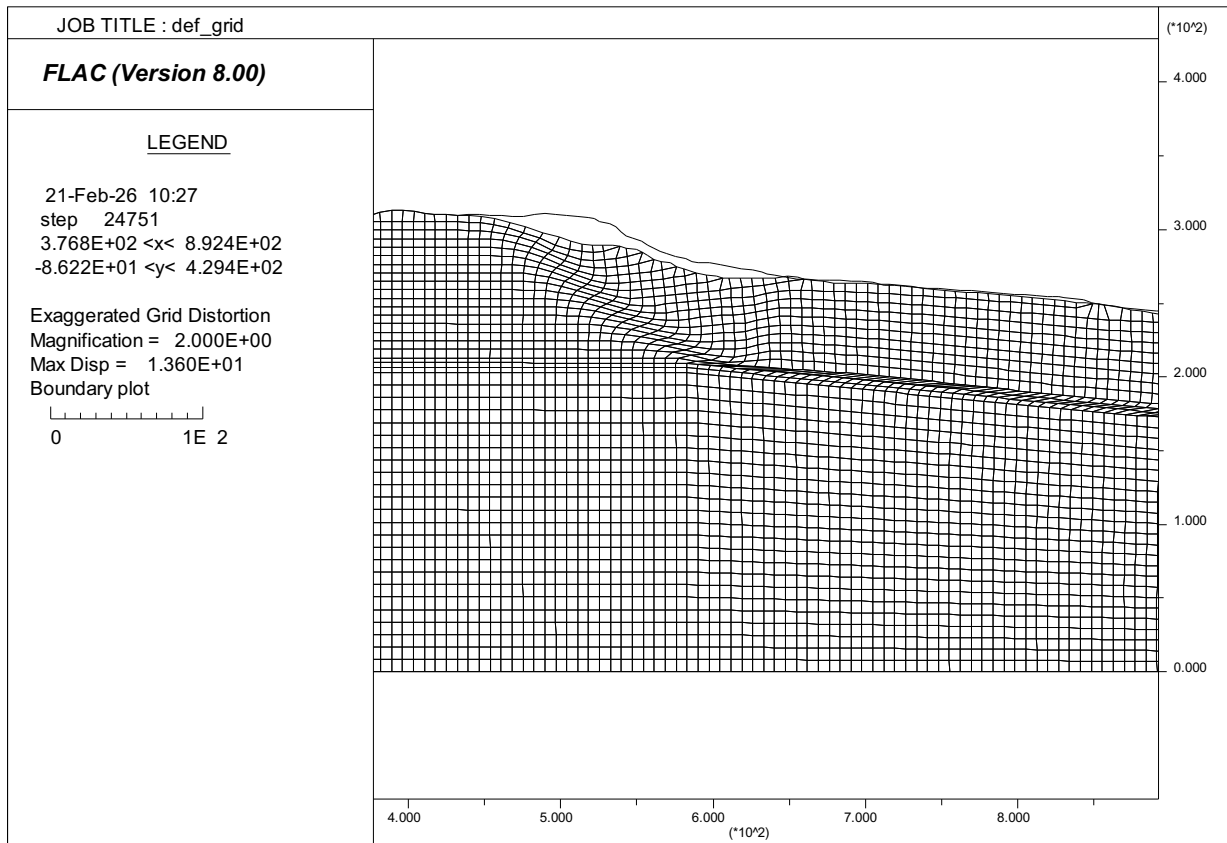


Figura 164 - Deformazione della griglia del modello nella porzione superiore del corpo di frana e profilo indeformato.

## 8 Caratterizzazione e modellazione idrologico-idraulica

Ai fini del dimensionamento delle opere di regimazione delle acque superficiali provenienti dall'abitato di Niscemi, che contribuiscono al drenaggio sul corpo di frana, si sono rese necessarie una caratterizzazione plano-altimetrica di dettaglio per l'individuazione dei percorsi di drenaggio superficiale, un'analisi statistica delle precipitazioni e la successiva stima delle portate al variare del periodo di ritorno.

Nel presente capitolo vengono quindi descritte l'attività di rilievo topografico svolta per la realizzazione del DTM (*Digital Terrain Model*), l'analisi dei percorsi di drenaggio e le metodologie adottate per la caratterizzazione delle precipitazioni intense e delle portate di picco nel territorio.

Per lo studio delle precipitazioni è stato adottato un approccio di regionalizzazione dei valori massimi annui a scala di bacino, basato sull'analisi delle serie storiche dei massimi annui di precipitazione di breve e media durata (30 minuti, 1, 3, 6, 12 e 24) registrati dai pluviometri ricadenti nel bacino del fiume Gela e nelle aree limitrofe.

Per la valutazione delle portate al colmo di piena è stato invece utilizzato un approccio modellistico afflussi-deflussi, in considerazione della mancanza di serie storiche osservate dei massimi annuali di portata.

### 8.1 Rilievo UAV ed elaborazione DTM

In questo paragrafo sono sintetizzate le attività di rilievo ed elaborazione dati acquisiti tramite UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) ed in particolare, sono descritte le attività preliminari per la valutazione dello scenario operativo e relative autorizzazioni, di pianificazione delle missioni, di rilievo e di elaborazione dei dati al fine di dare evidenza del metodo utilizzato.

#### 8.1.1 Rilievo UAV

##### Obiettivo del rilievo

Lo scopo dell'acquisizione è la produzione di un modello digitale tipo DTM dell'area di interesse avente caratteristiche geometriche (alta risoluzione spaziale) e aggiornamento (rappresentazione dello stato dei luoghi odierno) adatti alla corretta descrizione delle condizioni morfologiche del terreno, necessarie per l'implementazione del modello idrologico ed idraulico di dettaglio. Di fatto sulla zona in oggetto sono già reperibili diverse informazioni geospaziali, tuttavia, esse non garantiscono la corretta definizione del reticolo idraulico superficiale nell'abitato di Niscemi e nei versanti del torrente Benefizio.

I dati già disponibili sono:

- DTM a 1 m derivante da rilievo LiDAR aereo realizzato nel 2010 nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento (PST) del MASE;
- DTM a 2 m derivante da rilievo LiDAR aereo realizzato nel 2013 dalla Regione Siciliana;
- DTM ricampionato a 1 m derivante dalla nuvola di punti ad alta risoluzione acquisita fra il 18 gennaio e il 2 febbraio 2026 dal Comune di Niscemi mediante rilievo aerofotogrammetrico da drone del solo corpo di frana e a parziale copertura dell'abitato;
- modello digitale di superficie (*Digital Surface Model - DSM*) ricampionato a 1 m derivante dalla nuvola di punti ad alta risoluzione acquisita fra il 3 e il 7 febbraio 2026 dalla Regione Siciliana mediante rilievo aerofotogrammetrico da drone del solo corpo di frana e a parziale copertura dell'abitato.

Le attività di rilievo sono state pianificate e realizzate al fine di poter ottenere, nell'area concordata con il DPC (Figura 165), tramite tecnica fotogrammetrica delle acquisizioni UAV, i seguenti nuovi prodotti cartografici:

- DSM in formato *raster* (geoTIFF) con risoluzione geometrica pari a 10 cm/px e relative versioni derivate da sottocampionamento per garantire la fruibilità e trasferibilità del dato;
- ortomosaico a colori RGB in formato *raster* (geoTIFF) di risoluzione geometrica pari a 5 cm/px;

- nuvola di punti nativa con colorazione RGB con densità media nominale di 400 punti/m<sup>2</sup>;
- nuvola di punti classificata nelle seguenti categorie: *Ground*, *Building* e *Vegetation* con densità media nominale di 400 punti/m<sup>2</sup> (prodotto di secondo livello);
- DTM in formato *raster* (geoTIFF) di risoluzione geometrica pari a 10 cm/px e relative versioni derivate da sottocampionamento per garantire la fruibilità e trasferibilità del dato (prodotto di secondo livello).

Tutti i prodotti sono forniti secondo il sistema cartografico di riferimento scelto, corrispondente a WGS84 UTM 33N (EPSG:32633), e quote ortometriche UTM-ETRF2000 (<https://epsg.io/6326-datum>).

### Scenario operativo

Lo scenario operativo risulta essere composto da due settori principali “strutturalmente” molto differenti tra loro che caratterizzano il Comune di Niscemi:

- contesto urbano (anche ad alta densità abitativa) comprensivo della maggior parte delle abitazioni comunali, chiuso ad est all’inizio del viale Mario Gori all’altezza dello stadio comunale e a sud sulla SP11 all’altezza del mercato ortofrutticolo;
- area extra-urbana/rurale definita dalle immediate vicinanze alla suddetta area urbana unita al corso del torrente Benefizio dallo sbocco presso la SP10 per 3 km a valle verso la piana di Gela.

Le aree così definite determinano lo scenario operativo di riferimento e, di conseguenza, l’attrezzatura necessaria, la strategia di acquisizione e la relativa logistica. Esse hanno inoltre un impatto significativo sulla necessità di reperire informazioni supplementari (ad esempio, punti di appoggio o di controllo a terra).

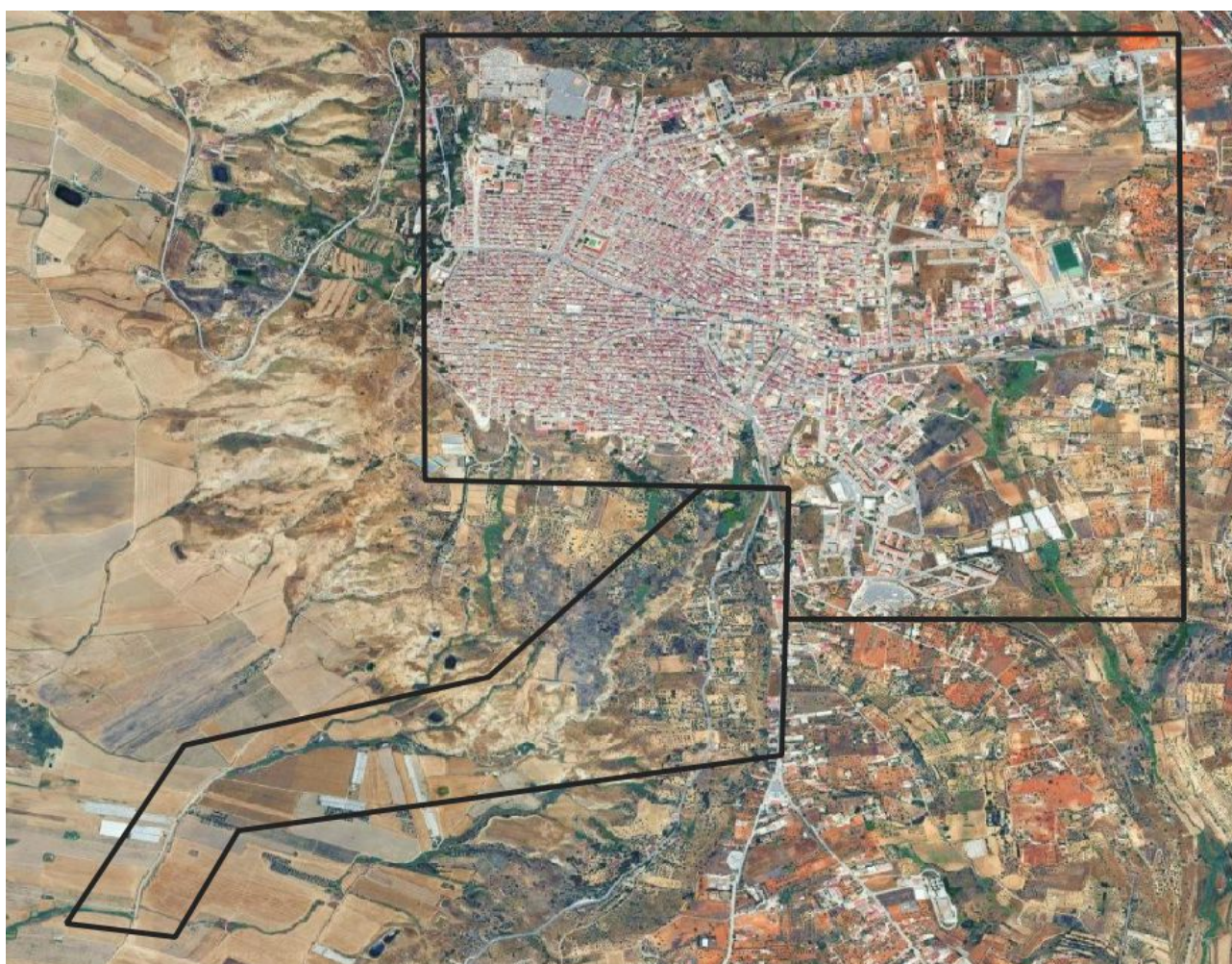
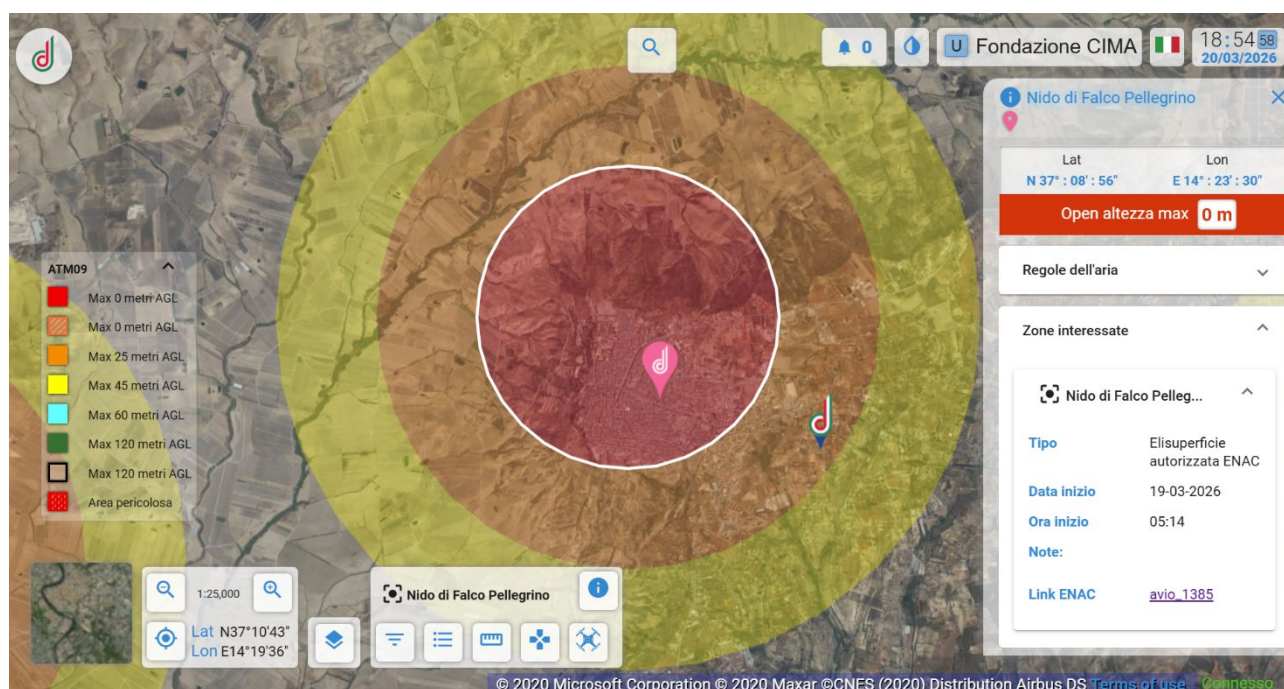


Figura 165 - Aree di interesse suddivise nelle due tipologie principali: i) deflusso superficiale su area urbana e ii) deflusso su asta del torrente Benefizio.

Un ulteriore elemento da considerare, per lo svolgimento delle attività di rilievo tramite UAV, è la presenza dell'elisuperficie "Nido di falco pellegrino", situata alle coordinate 37° 9'18.57"N - 14°23'17.07"E, autorizzata dall'Ente Nazionale per l'Aviazione Civile (ENAC) per attività HEMS e di protezione civile (Figura 166).



**Figura 166 - Limitazioni al volo nell'area di interesse (Fonte: <https://www.d-flight.it/web-app/> del 20.03.2026, ore 18:54).**

Considerando lo scenario operativo di intervento, in fase pianificatoria si è resa necessaria la richiesta autorizzativa per poter condurre nell'area indicata operazioni in categoria *Open* ai sensi del Reg. ENAC "UAV-IT" che ha visto il coordinamento in fase interlocutoria preliminare, autorizzativa e attuativa di tutti i soggetti interessati e coinvolti nel processo: del Dipartimento di Protezione Civile (Ufficio II - Previsione e prevenzione del rischio Servizio Rischio idraulico, idrogeologico, costiero e da deficit idrico), del Centro Operativo Aereo Unificato del DPC (COAU), dell'ENAC e della Fondazione CIMA. Si rimanda alla documentazione predisposta per l'ottenimento dell'autorizzazione al sorvolo a seguito di lettera di attivazione Fondazione Cima da parte di DPC (DPC-DPC\_Generale-P-UII-PRE-0012842-16/03/2026) e al successivo benestare rilasciato da parte di ENAC (ENAC-PROT-26/03/2026-0049854-P) per il reperimento di elementi di eventuale interesse.

### Attrezzatura

Stante la finalità del rilievo, le caratteristiche delle aree e le condizioni meteorologiche caratterizzanti la finestra operativa assegnata per la realizzazione dell'intervento, si è optato per l'impiego di un *DJI Mavic3E* (Figura 167) avente le seguenti caratteristiche: velivolo di ridotte dimensioni, equipaggiato con fotocamera digitale RGB (CMOS da 4/3, px effettivi: 20 MP e obiettivo con FOV: 84°, lunghezza focale equivalente: 24 mm e apertura: f/2.8-f/11) e dotato di modulo aggiuntivo RTK per il posizionamento di precisione (accuratezze (RMSE) di circa 1-3 cm sulle dimensioni orizzontali e di 2-5 cm in quota).

L'equipaggiamento ha inoltre previsto la disponibilità di un *DJI Mavic Mini 4 Pro* (Figura 167, Figura 168), velivolo di classe C0, con MTOM (*Maximum Take-Off Mass*) pari a 249 g e dotato di fotocamera digitale RGB (CMOS 1/1.3", px effettivi 48 MP, FOV diagonale: 82.1°, lunghezza focale equivalente: 24 mm e apertura (fissa): f/1.7. Tuttavia, il ridotto peso al decollo limita da un lato la qualità del sistema di posizionamento (GNSS) a bordo e, quindi, non consente di operare correzioni nella posizione del centro di presa tramite le comuni tecniche RTK/nRTK/PPK, e dall'altro, una maggiore sensibilità al vento.

Il rilievo tramite *DJI Mavic3E* ha previsto l'impiego di correzioni da rete (nRTK) fornite da *provider* nazionale (*Smartnet Hexagone*) nella soluzione VRS multi-costellazione.



Figura 167 - Operazione di rilievo della zona rurale comprensiva dell'asta del torrente Benefizio nella piana di Gela con utilizzo di *DJI Mavic 3E* equipaggiato di terminatore e paracadute.



Figura 168 - Impiego aggiuntivo di *DJI Mavic Mini 4 Pro* in contesto urbano (in area limitrofa all'elisuperficie Nido di Pellegrino).

## Pianificazione delle missioni UAV

L'area oggetto di interesse è stata suddivisa in 13 sub-aree per le quali si è proceduto alla pianificazione di singole missioni al fine di garantire i criteri minimi operativi (VLOS) e di *safety* previsti e concordati, nonché per assicurare il raggiungimento di adeguati *standard* di qualità dei dati necessari per le successive fasi del lavoro (Figura 169, Figura 170).



Figura 169 - Corografia delle 13 aree (13 missioni) pianificate e realizzate (urbane e rurali).

Per quanto concerne le aree urbane, la pianificazione ha considerato i seguenti criteri:

- punti di decollo/atterraggio (TO&L) centrali alla zona e/o in area limitrofa dotata di ampia visuale sopraelevata per garantire la precoce individuazione di possibili interferenze aeree;
- distanza della zona dal TO&L per garantire le operazioni in VLOS;
- dimensionamento legato alla necessità di ricambi batteria;
- orientamento della prua del mezzo in accordo con le direttrici principali degli elementi a terra;
- alte sovrapposizioni per garantire la possibilità di ricostruzione (individuazione di punti di legame delle immagini adiacenti sufficienti) anche su zone potenzialmente occluse;
- raggiungimento a terra della zona per eventuali misurazioni GNSS in appoggio.

Per la definizione delle aree rurali si sono valutati:

- TO&L centrali alla zona e/o in area limitrofa dotata di ampia visuale sopraelevata;
- distanza della zona dal TO&L per garantire le operazioni in VLOS;
- dimensionamento legato alla necessità di ricambi batteria;
- orientamento della prua del mezzo per meglio descrivere al meglio i particolari geomorfologici.

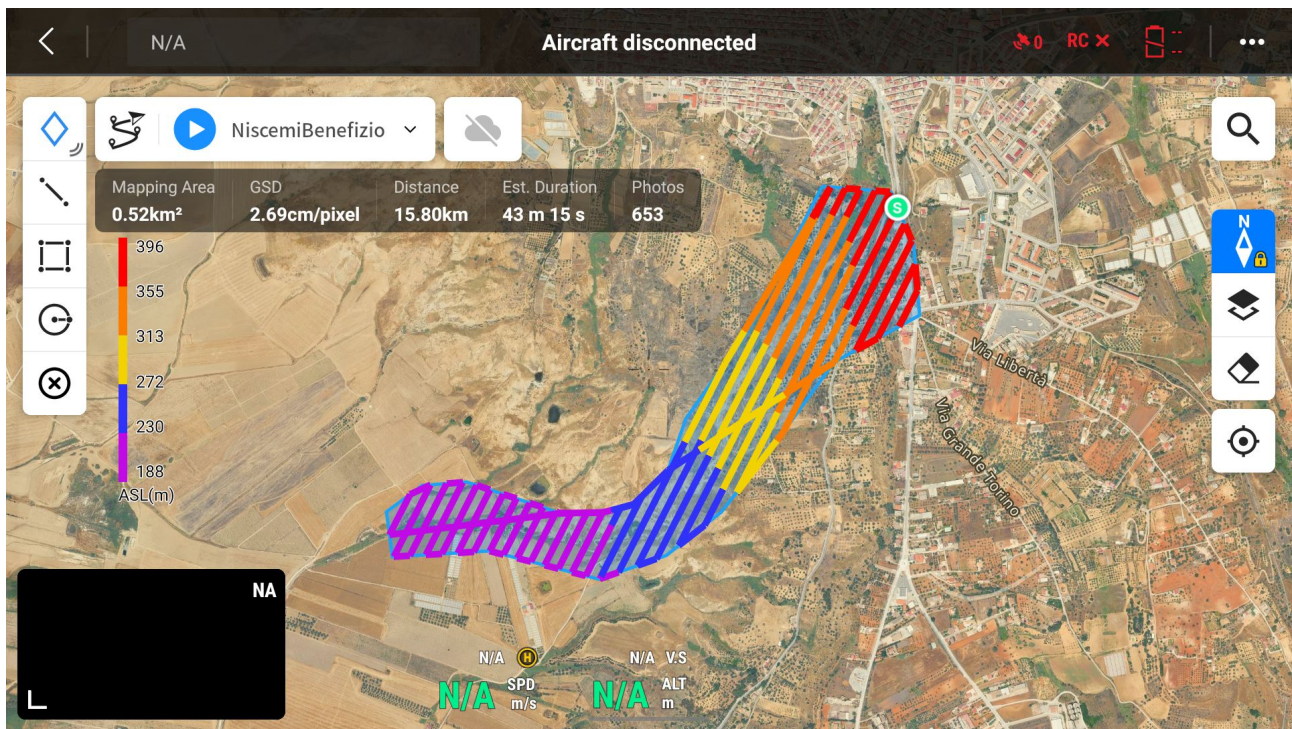


Figura 170 - Esempio di pianificazione per la missione di ricoprimento di circa 2 km dell’asta del torrente Beneficio.

In riferimento a quanto sopra descritto, a seconda dell’area rilevata (urbano/extra-urbano), le attività di rilievo sono state condotte con *setup* differenti al fine di garantire l’ottimale acquisizione dei dati. Nella Tabella 15 si riportano sinteticamente, e a titolo esemplificativo, i parametri utilizzati nelle attività di rilievo.

Area rilevata	Tipo di acquisizione	Quota relativa di volo - AGL (m)	Velocità (m/s)	Setup payload
Area urbana	Automatico, camera nadirale, sovrapposizioni frontali 70% e laterali 80% + acquisizioni manuali in caso di elementi critici	80-100	5-6	RGB auto
Area extra-urbana	Automatico, camera nadirale, sovrapposizioni frontali 70% e laterali 80%	100	6	RGB auto

Tabella 15 - *Setup* (parametri principali) definiti per le diverse aree rilevate.

Le zone di TO&L sono state definite in via preliminare sulla scorta della cartografia regionale e ausili *on line* (*Google Maps*) e successivamente valutate e confermate in loco con il supporto della Polizia Municipale che ne ha considerato l’accessibilità e suggerito altre eventuali aree sulle quali è stato effettuato specifico sopralluogo per confermarne l’adeguatezza alle operazioni.

La Figura 171 mostra le effettive aree di TO&L utilizzate. Come si può notare, alcune zone sono state rilevate dagli stessi punti di decollo in quanto garantivano le caratteristiche sopra descritte.

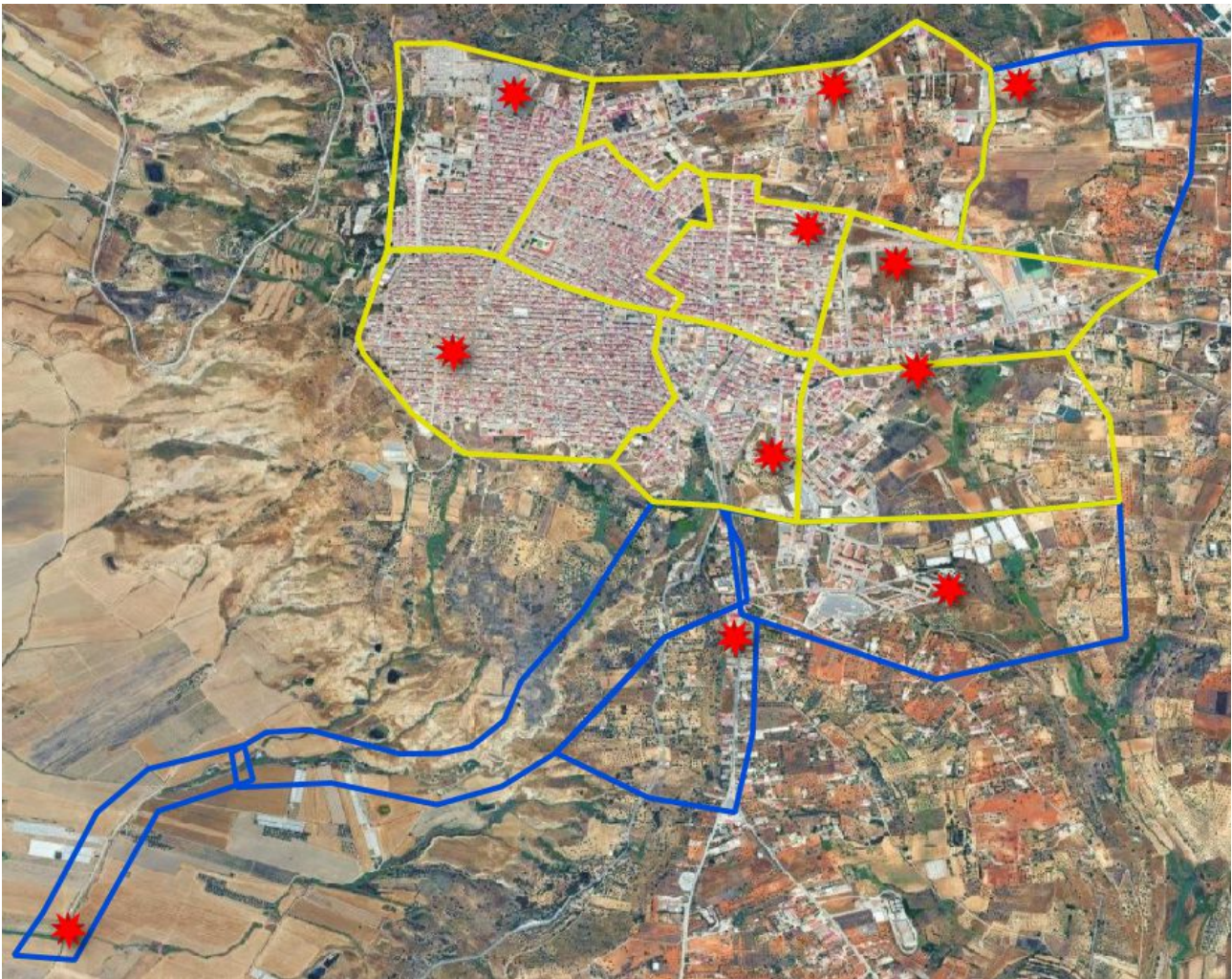


Figura 171 - Punti di decollo/atterraggio utilizzati per le acquisizioni delle 13 aree (urbane e rurali).

### Organizzazione operativa di campo

L'organizzazione operativa ha visto il coordinamento della squadra UAV di Fondazione CIMA, con il personale del DPC presente in loco, la Polizia Municipale in supporto e delimitazione, in alcuni casi, delle aree TO&L, il personale del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco per l'accompagnamento in zona rossa e aree a questa limitrofe e con il referente per elisuperficie "Nido di falco pellegrino" per la comunicazione circa l'avvio e la conclusione delle operazioni di volo.

La procedura operativa concordata con i referenti ENAC per la mitigazione del rischio ed applicata in occasione del rilievo ha previsto per ogni giornata:

- verifica in loco delle condizioni meteo e contatto con il referente delle attività dell'elisuperficie finalizzato a verificare eventuali attività programmate;
- *briefing* pre-operativo tra i componenti del *team* di Fondazione CIMA e le altre persone coinvolte (Polizia Municipale, ecc.) per la definizione del programma di rilievo e la condivisione delle procedure di *contingency* e *emergency*;
- raggiungimento località concordate di TO&L, se necessario accompagnati da soggetti terzi (es. VVF, ecc.) e adozione di qualsiasi altra misura di mitigazione del rischio nei confronti della popolazione;
- valutazione ultima da parte del pilota di UAV delle condizioni meteo, di visibilità e/o di presenza ostacoli o fattori esterni e segnalazione (telefonica) dell'avvio delle attività ai soggetti coinvolti

Le attività di rilievo sono state condotte da un *team* così composto:

- n. 1 Pilota in Comando - PIC (pilota UAV con comprovata esperienza in contesti operativi ed emergenziali);

- n. 1 assistente al PIC (pilota UAV con comprovata esperienza in contesti operativi ed emergenziali) per supporto generale e sostituzione in caso di problemi del PIC ;
- n. 1 osservatore dislocato lontano dal PIC per garantire l'osservazione dello spazio aereo da diversa visuale.

Le comunicazioni e la valutazione delle condizioni al contorno sono state supportate da:

- radio PMR per le comunicazioni fra i componenti della squadra;
- radio in ascolto su frequenze aeronautiche per l'individuazione di eventuale transito/ingresso su elisuperficie;
- *app flight radar* per il controllo in tempo reale dello spazio aereo e del traffico civile;
- *app di nowcasting* per la verifica in tempo reale di finestre di operabilità meteo.

In aggiunta:

- dotazioni di strumentazione per verifica in campo della qualità del dato ottenuto;
- dotazioni di *backup* e supporti in caso di *failure* di parte della strumentazione principale;
- antenna *Starlink* per connessione satellitare in caso di assenza di rete locale.

Al termine di ogni acquisizione (singola missione) si è proceduto con il *quality data check* per assicurarsi della completezza del rilievo, della sua qualità geometrica e radiometrica e del livello di accuratezza di posizionamento raggiunto per ogni immagine. L'intero processo è stato ripetuto per ogni singola missione.

A conclusione di ogni sessione di acquisizione, come previsto dalla procedura concordata, si è comunicato il termine delle attività al referente della Polizia Municipale e al referente dell'elisuperficie a conferma del disimpegno dello spazio aereo.

### **Dataset acquisito**

Nonostante le attività abbiano subito diversi stop per condizioni meteo non favorevoli (su 4 giorni di rilievi, circa la metà del periodo ha visto condizioni di pioggia/temporali e/o venti con velocità medie pari a 10 m/s e localmente raffiche fino a 20 m/s e/o scarsa visibilità), non ci sono state particolari problematiche e/o eventi che abbiano messo a rischio la sicurezza delle operazioni (ad esclusioni di passaggi di aerei a bassa quota proveniente da base di Sigonella).

Le attività di rilievo hanno consentito di acquisire un *dataset* i cui elementi salienti sono riassunti in Tabella 16.

<b>Parametro</b>	<b>Valore</b>
Estensione area oggetto di rilievo (km <sup>2</sup> )	6,5
Numero missioni	13
Tempo complessivo di volo effettivo (h)	9
Numero immagini complessive	7.075
Dimensione complessiva dati acquisiti (GB)	87

**Tabella 16 - Caratteristiche del *dataset* acquisito durante le operazioni UAV.**

## **8.1.2 Restituzione Prodotti**

### **Elaborazione dati grezzi**

I dati acquisiti sono stati trattati secondo le tecniche consolidate della fotogrammetria aerea tramite il *software Agisoft Metashape Pro* (ver. 2.0.0 build 15597 64bit), da cui il processo di elaborazione consente di ricostruire il modello tridimensionale degli oggetti rilevati e di poterne di conseguenza derivare DSM, DTM, ortomosaici e nuvole di punti (Figura 173, Figura 174, Figura 175, Figura 176, Figura 177, Figura 179).

Nel caso specifico si è proceduto con l'elaborazione di tutto il blocco fotogrammetrico al fine di beneficiare del rilevante numero di immagini per irrobustire il blocco fotogrammetrico e diminuire gli errori di riproiezione.

Per la conversione delle coordinate dei centri di presa dal sistema di riferimento nativo (WGS 84, quote ellissoidiche) al sistema di coordinate proiettate definito per gli *output* del processo (UTM-ETRF2000, quote ortometriche) è stato utilizzato il *software* Convergo (del Centro Interregionale per i Sistemi Informatici, geografici, statistici - CPSG - Comitato Permanente per i sistemi geografici) e i grigliati ufficiali dell'Istituto Geografico Militare - IGM in formato gpk2.

Si omette la descrizione dettagliata del flusso di lavoro riportando unicamente alcuni dei parametri ritenuti maggiormente significativi per dare evidenza della qualità e della robustezza del dato prodotto (Figura 172):

- Immagini acquisite (punti di presa) 7075
- immagini allineate 7075;
- punti di legame: 4,170,581;
- errore RMS di riproiezione 0.178807 (1.37471 px);
- *Point cloud*: 873,707,194 punti;
- DEM: generato da nuvola di punti con interpolazione abilitata.

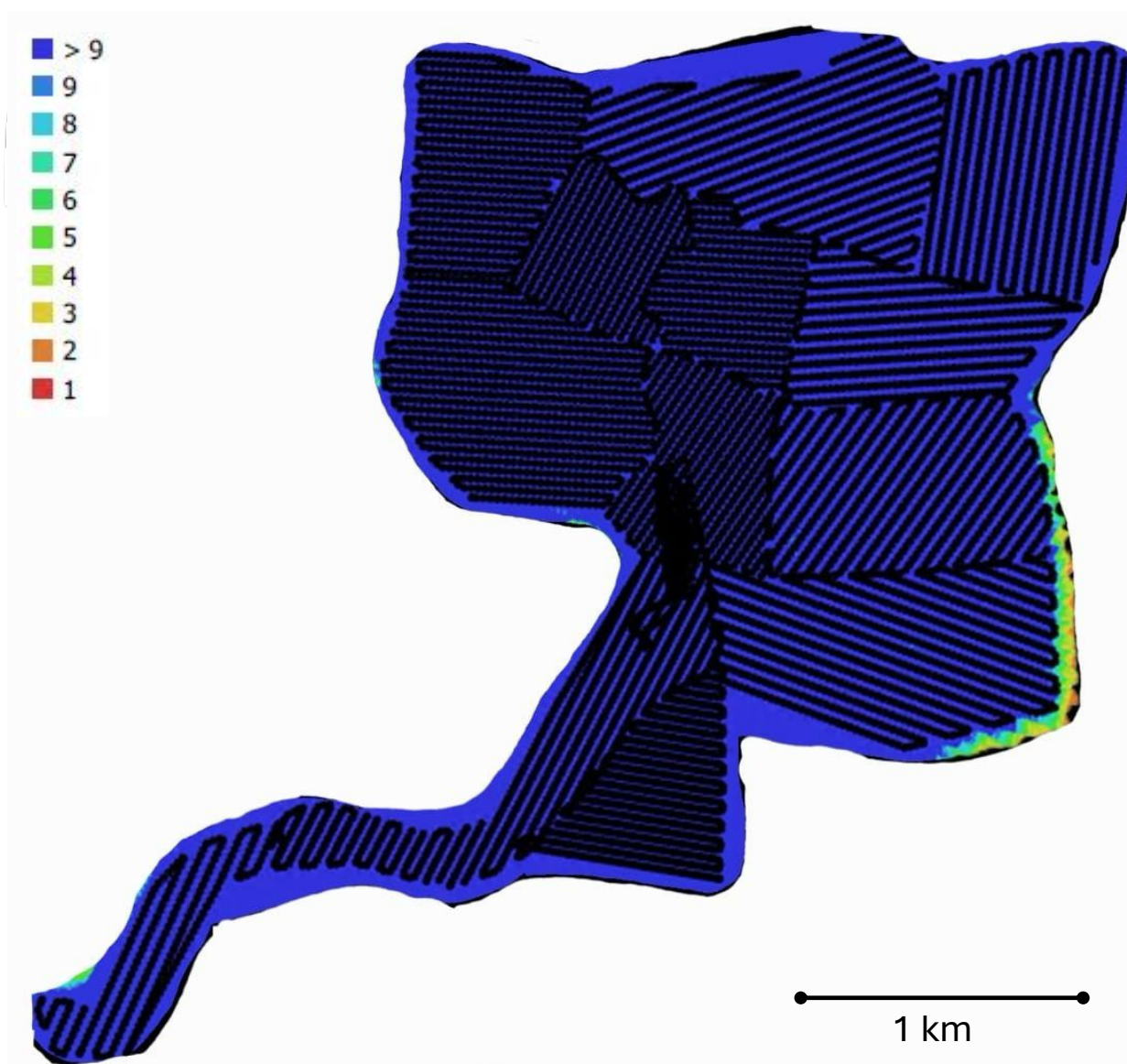
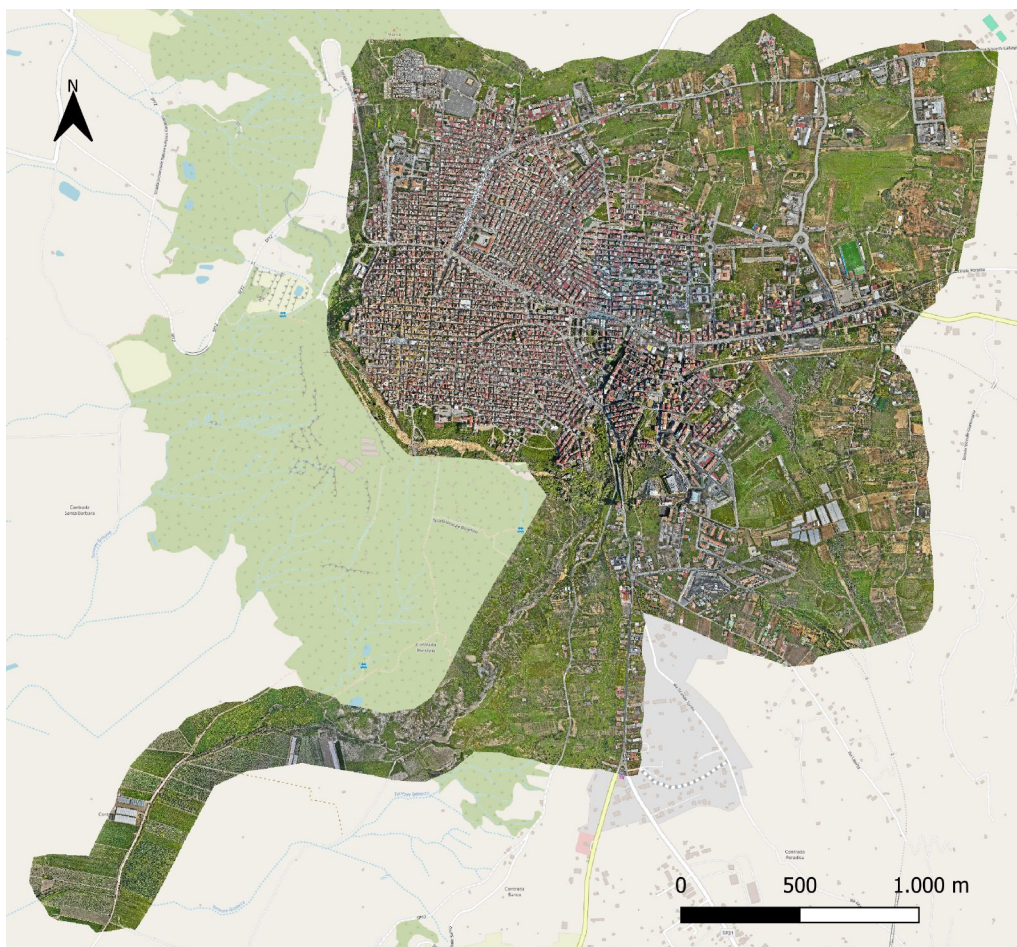


Figura 172 - Posizione delle camere (punti di scatto) delle 7075 immagini e loro sovrapposizioni.



**Figura 173 - Ortomosaico a colori RGB delle acquisizioni UAV.**



**Figura 174 - Dettaglio di ortomosaico (risoluzione 3cm/px) su Belvedere e porzione di frana.**

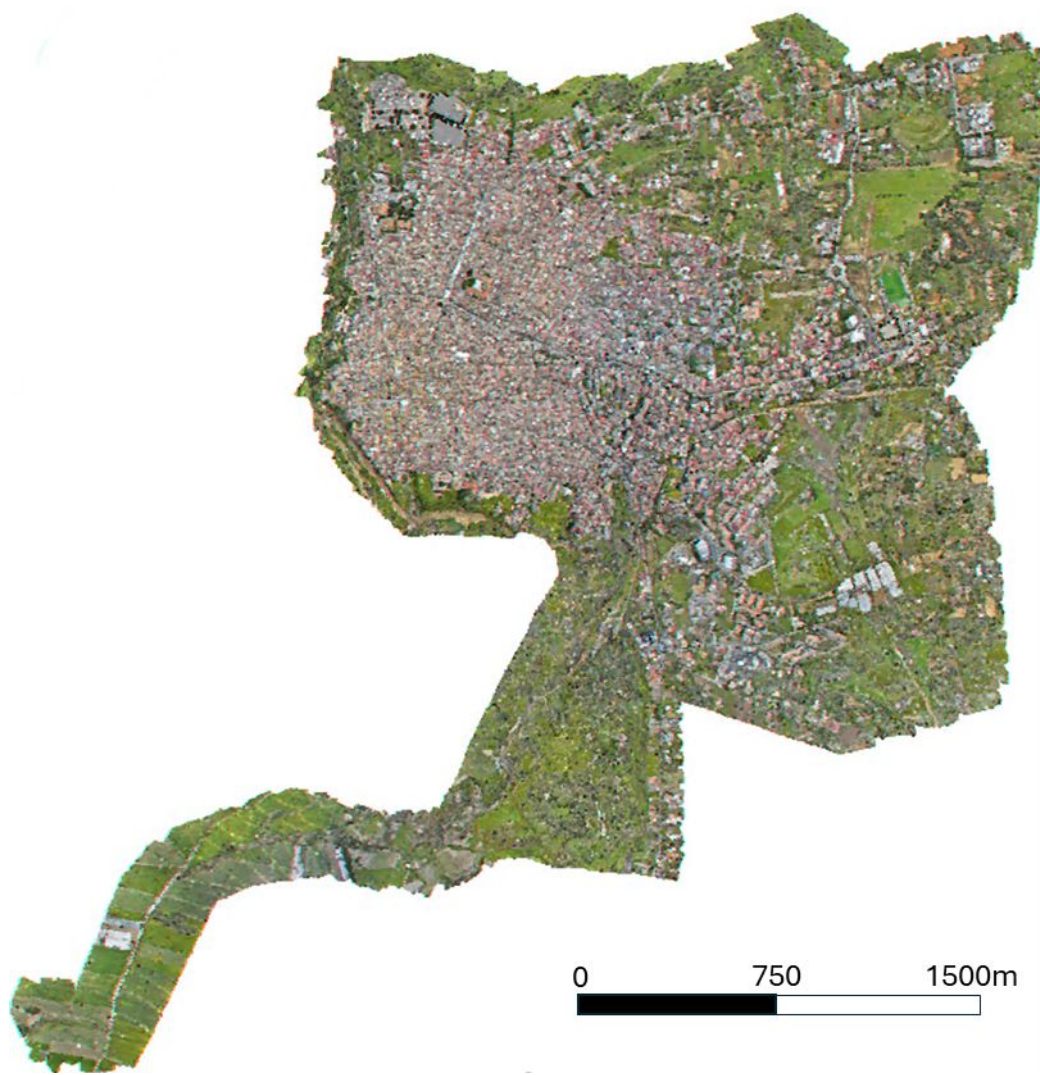


Figura 175 - Nuvola di punti nativa con colorazione RGB e densità media nominale di 400 punti/m<sup>2</sup>.



Figura 176 - Dettaglio tridimensionale della nuvola di punti nativa sullo sbocco dall'abitato del torrente Benefizio.

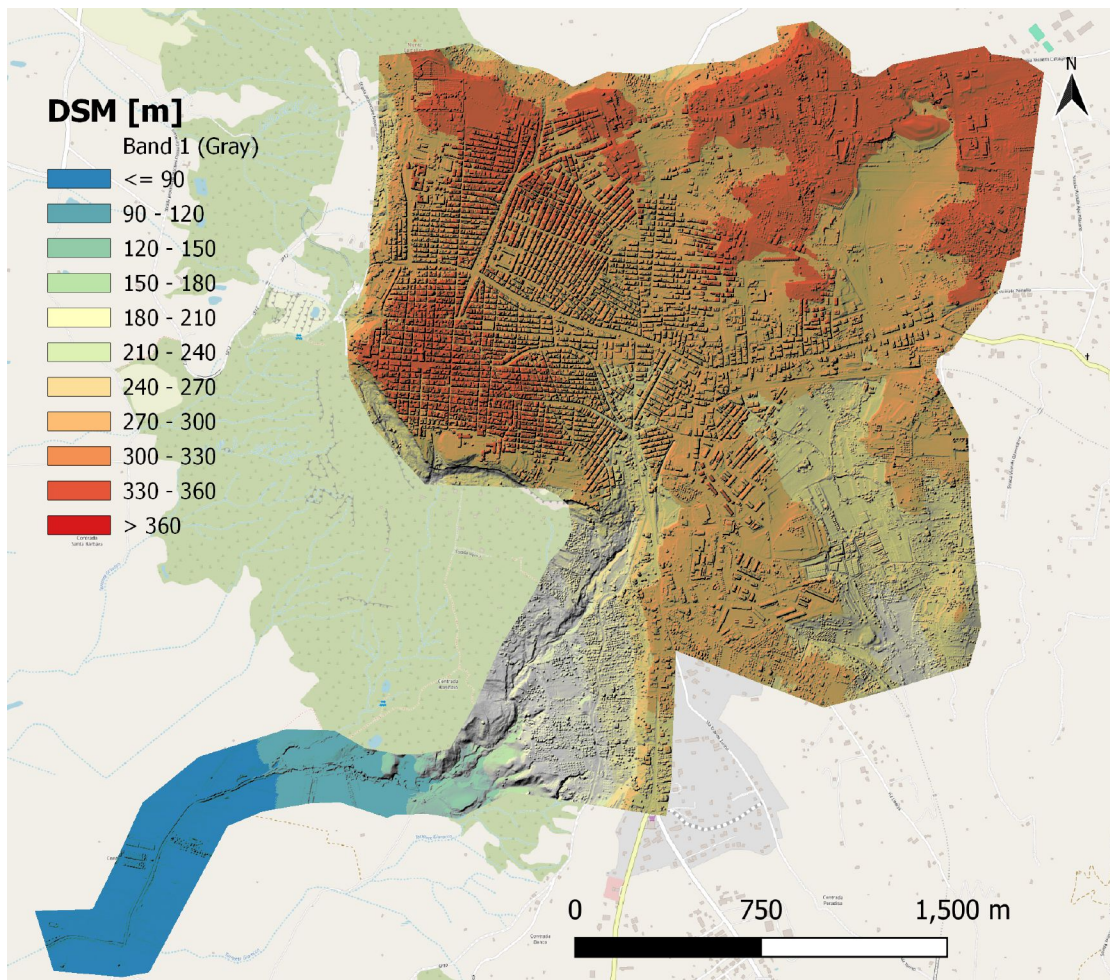


Figura 177 - DSM con risoluzione geometrica pari a 10 cm/px dell'intera acquisizione.

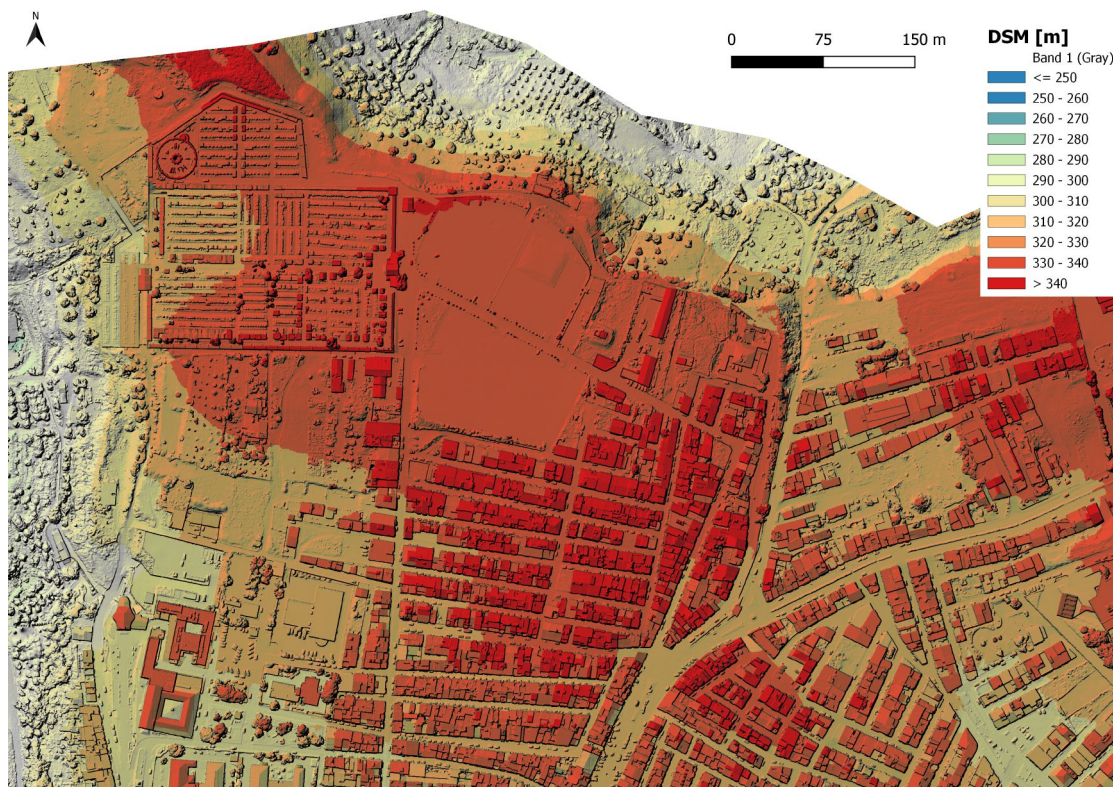


Figura 178 - Dettaglio su parte nordoccidentale del comune di Niscemi del DSM a risoluzione 25 cm/px.

## Elaborazione di secondo livello

In seconda analisi si è proceduto ad una “ripulitura” del DSM andando a rimuovere artefatti ed errori nel dato nativo (presenza tendoni del mercato, alberi, ecc.). Per tale elaborazione è stato utilizzato un processo semiautomatico per la classificazione del dato (in Tabella 17 i risultati della classificazione automatica) e per correzione della nuvola di punti (Figura 179, Figura 180).

Classe	Numero punti
Terreno	316,555,597
Vegetazione	172,760,986
Edificio	248,878,244
Superficie Stradale	98,883,310
Auto	23,738,900
Manufatto	12,890,157
Totali	873,707,194

Tabella 17 - classificazione automatica da Software Agisoft Metashape Pro.

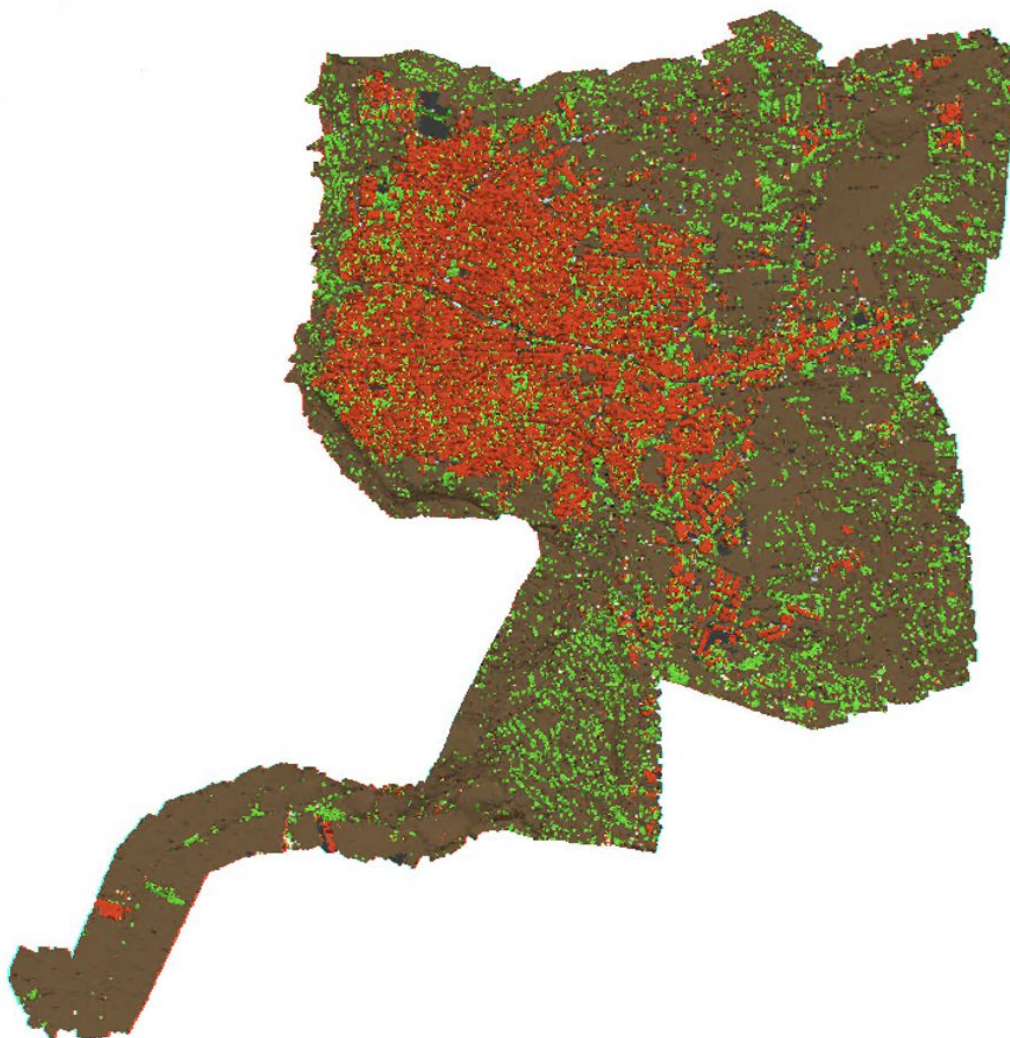


Figura 179 - Classificazione automatica della nuvola di punti. La colorazione rappresenta punti terreno (marrone), punti edificio (rosso), punti vegetazione (verde), punti strade (grigio).

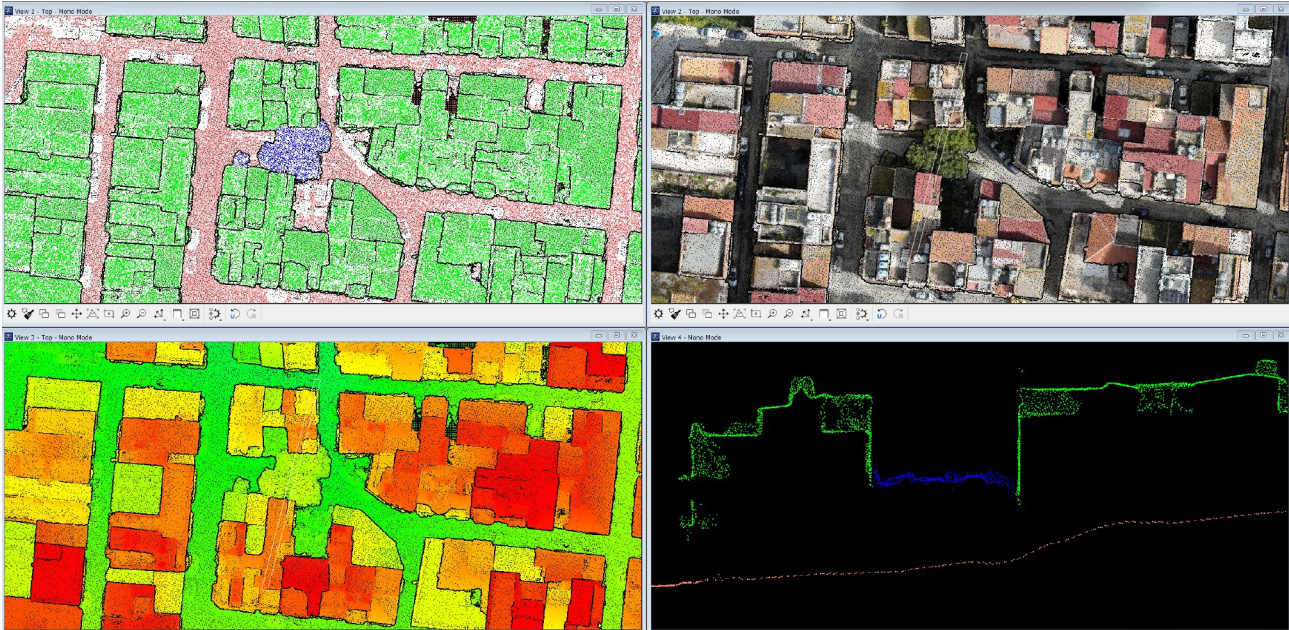


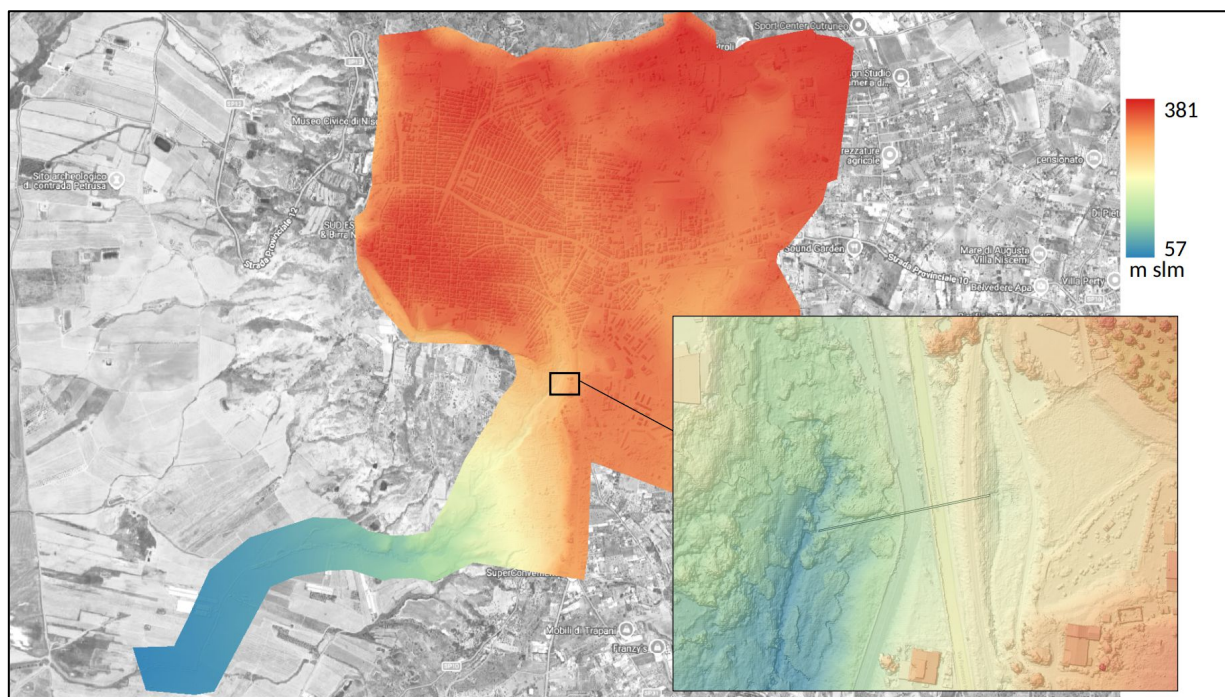
Figura 180 - Intervento supervisionato per la pulizia della nuvola di punti (e.g. presenza alberi). Le immagini mostrano la stessa zona colorata secondo classificazione automatica (alto sinistra), RGB (alto a destra), quote (basso a sinistra) e la sezione ove si vede l'albero da rimuovere.

## 8.2 Analisi idrologica del bacino del torrente Benefizio

### 8.2.1 Analisi del drenaggio superficiale e definizione dei bacini idrografici

A partire dal DSM di dettaglio ottenuto come descritto nei paragrafi precedenti si è proceduto all'individuazione della rete di drenaggio superficiale. Il DSM è stato ricampionato a una risoluzione spaziale di 25 cm ed elaborato con *software GRASS GIS*.

Al fine di rappresentare il canale di drenaggio artificiale che, sottopassando la linea ferroviaria e le SP10 e SP11, convoglia le acque nel Benefizio a valle dello scatolare di sbocco, è stato effettuato un condizionamento idraulico del DTM con scavo semplice a pendenza costante, come mostrato in Figura 181.



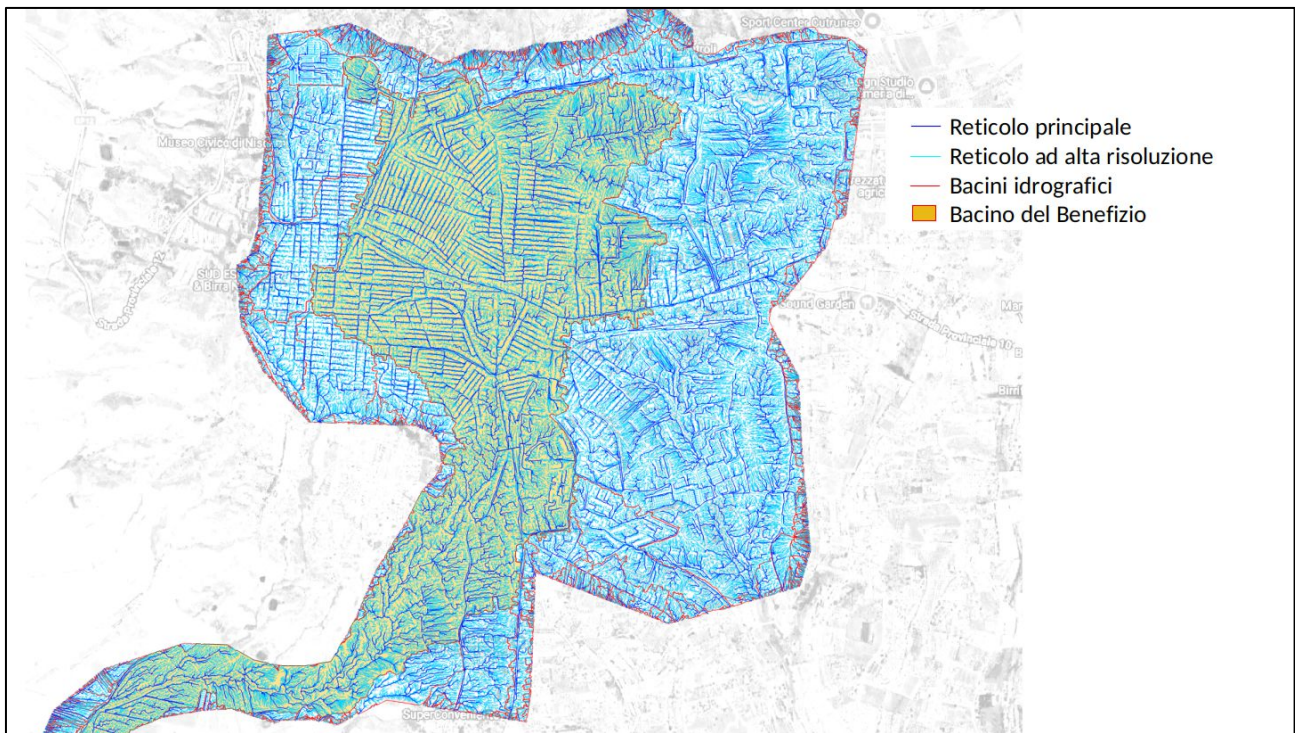
**Figura 181 - DSM ricampionato a 25 cm e scavo effettuato per rappresentare il canale di drenaggio.**

Il reticolo idrografico superficiale è stato derivato mediante l'applicazione dell'algoritmo D8, che consente la determinazione delle direzioni di drenaggio a partire dal modello digitale del terreno. In particolare, per ciascuna cella del *raster* del DSM, è stata assegnata la direzione di deflusso verso la cella adiacente caratterizzata dalla massima pendenza negativa, individuata tra le otto possibili direzioni cardinali e diagonali. Tale procedura permette la ricostruzione del campo di moto superficiale e la conseguente estrazione della rete di drenaggio. Il reticolo è stato estratto con due differenti livelli di dettaglio:

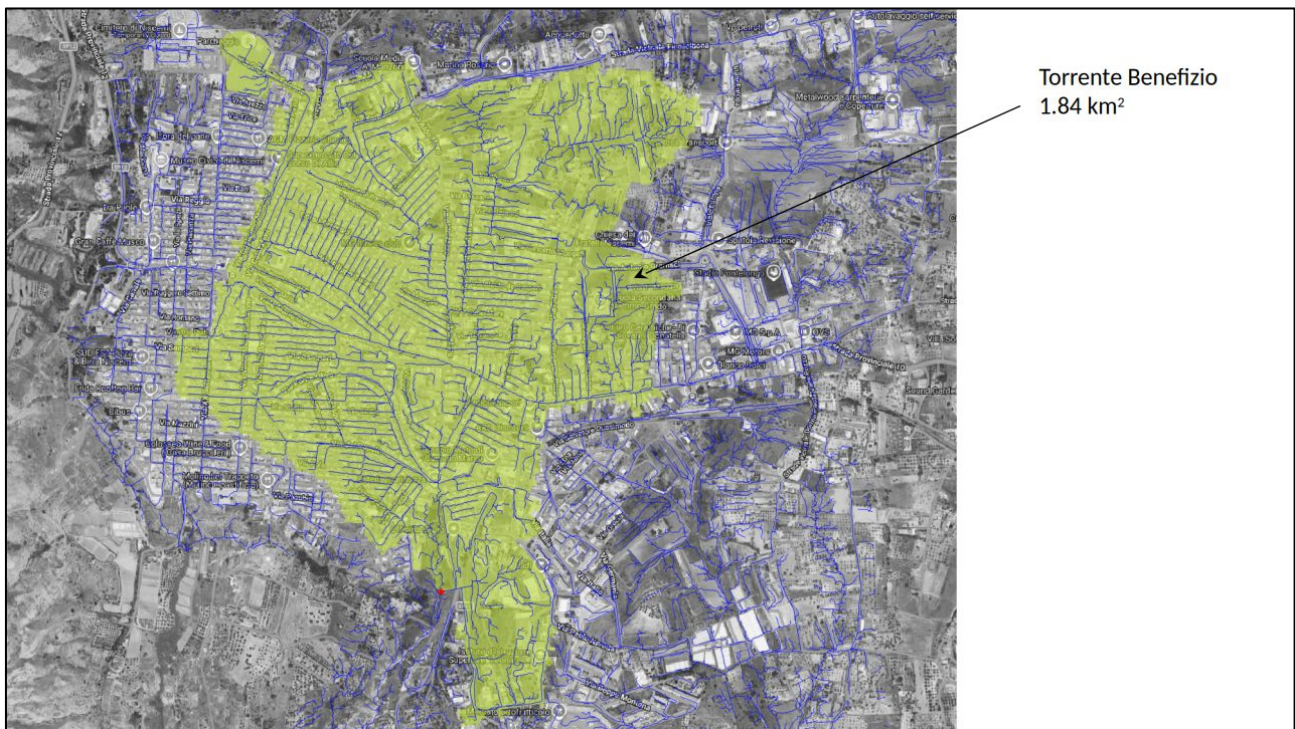
- reticolo ad alta risoluzione (aste di drenaggio con area contribuyente minima di 30 m<sup>2</sup>);
- reticolo principale (aste di drenaggio con area contribuyente minima di 700 m<sup>2</sup>).

I due reticoli sono mostrati in Figura 182. Le idroderivate definite con la procedura descritta hanno permesso inoltre la delimitazione dei bacini idrografici che insistono sull'abitato di Niscemi. In particolare, è evidenziato il bacino del torrente Benefizio, verso cui drena buona parte delle acque che precipitano all'interno del centro abitato.

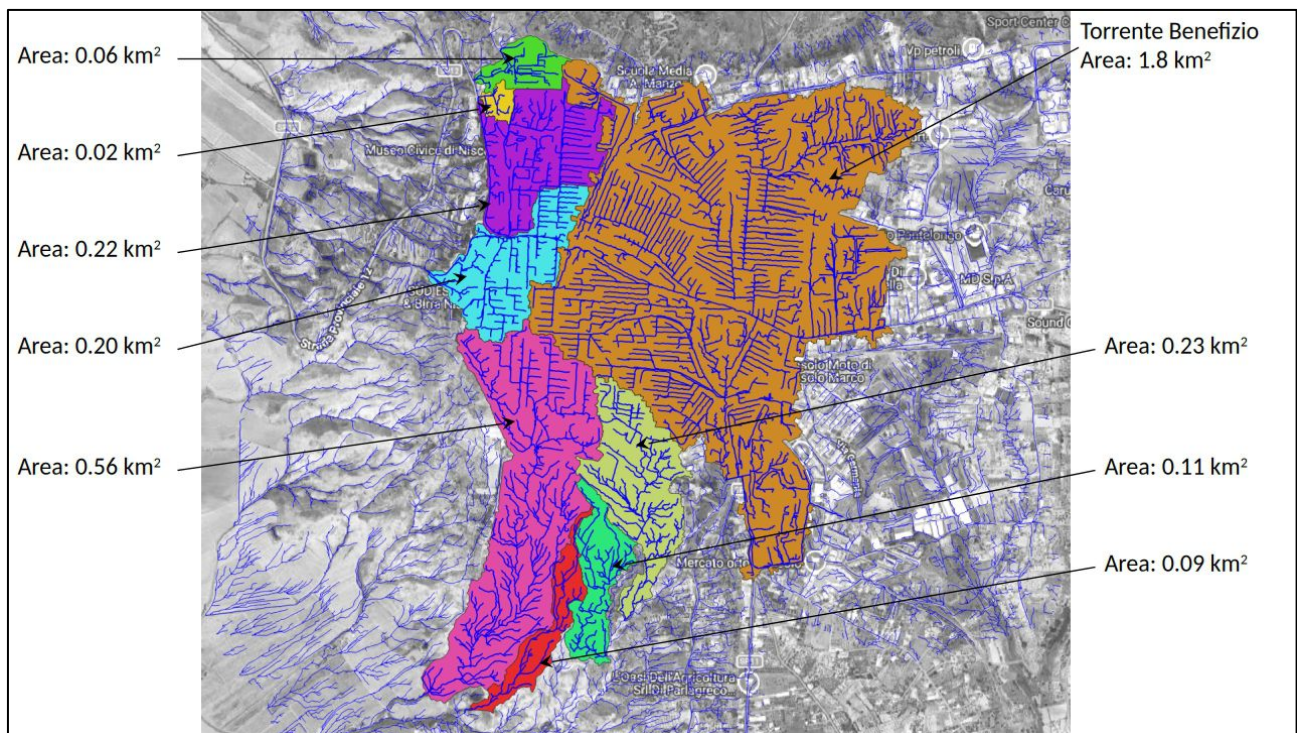
Ai fini della modellazione idrologica è stato identificato il sottobacino del torrente Benefizio chiuso nella sezione di interesse, ovvero la sezione a valle dell'immissione del canale in sponda sinistra che convoglia le acque della porzione di bacino passando sotto la linea ferroviaria e le SP10 e SP11. Il bacino di interesse è mostrato in Figura 183 e l'area così definita è stata utilizzata per il computo della portata di progetto nelle successive sezioni.



**Figura 182 - Rete di drenaggio modellata e bacini idrografici che insistono sul territorio in esame.**



**Figura 183 - Sottobacino del torrente Benefizio chiuso alla sezione di interesse per il dimensionamento degli interventi di stabilizzazione del torrente Benefizio.**



**Figura 184 - Identificazione dei bacini minori di interesse che drenano acque superficiali sul corpo frana.**

La Figura 184 illustra l'identificazione dei bacini minori. In particolare, i bacini indicati in verde ( $A=0.06 \text{ km}^2$ ), giallo ( $A=0.02 \text{ km}^2$ ), viola ( $A=0.22 \text{ km}^2$ ) e azzurro ( $A=0.2 \text{ km}^2$ ) sono bacini che convogliano le acque sulla frana nord; i bacini indicati in rosso ( $A=0.09 \text{ km}^2$ ), verde chiaro ( $A=0.11 \text{ km}^2$ ) e ocra ( $A=0.23 \text{ km}^2$ ) sono affluenti in sponda sinistra del torrente Benefizio che convogliano le acque sulla frana centrale. Il reticolo illustrato in Figura 184 è stato ottenuto unendo il DSM descritto precedentemente ottenuto da rilievo UAV CIMA con il DSM ad alta risoluzione acquisita fra il 3 e il 7 febbraio 2026 dalla Regione Siciliana mediante rilievo aerofotogrammetrico da drone del solo corpo di frana e a parziale copertura dell'abitato disponibile agli scriventi con risoluzione di 1 metro.

### 8.2.2 Caratterizzazione idrologica mediante *Curve Number (SCS-CN)*

Per la stima delle portate massime annuali per il torrente Benefizio si è scelto di adottare un approccio di tipo afflussi-deflussi basato sul metodo SCS-CN (*Soil Conservation Service - Curve Number*) sviluppato dal Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti (USDA) del *Natural Resources Conservation Service National Engineering Handbook* (USDA-SCS, 1956).

Il metodo si basa sul parametro definito *Curve Number (CN)* che può variare tra 0 e 100: valori alti del parametro CN rappresentano suoli poco permeabili, mentre valori bassi indicano terreni ad alta permeabilità. Il CN è funzione della tipologia di uso-copertura del suolo, della tipologia geo-pedologica del suolo e delle condizioni di umidità del suolo all'inizio dell'evento meteorico. Per riprodurre la mappa del CN sono state utilizzate le tabelle standard dell'USDA che associano a ciascuna tipologia di uso del suolo (ossia copertura vegetale e grado di antropizzazione) i valori del CN in funzione anche dalle caratteristiche idrologiche del suolo, in relazione alla maggiore o minore permeabilità del substrato (tipi idrologici A-B-C-D).

Il suolo dell'area di interesse è stato valutato suolo di tipo idrologico C, ovvero suoli con infiltrazione lenta. Come mappa di riferimento è stata utilizzata la Carta dell'Uso del Suolo secondo Corine Land Cover scala 1:10.000, sviluppata nell'ambito del progetto carta degli HABITAT della regione siciliana 1:10.000 (<https://www.sitr.regione.sicilia.it/geoportale/it/metadata/details/337>). La carta è stata estratta per la zona di interesse e ritagliata sui sottobacini in analisi (Figura 185).

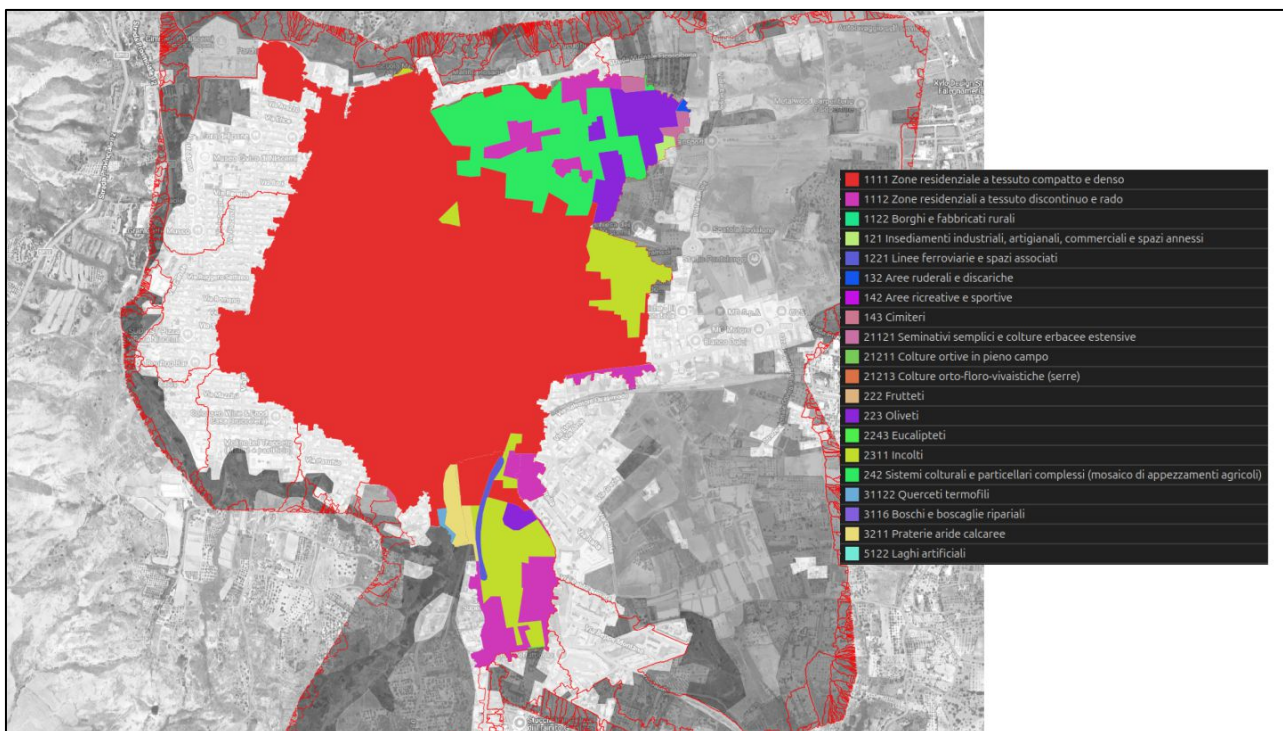


Figura 185 - Carta dell'Uso del Suolo secondo *Corine Land Cover* per il sottobacino di interesse.

Le classi della carta di uso suolo sono state associate a valori di CN, in base alla classificazione riportata in Tabella 18.

Classe CLC	CN
223 Oliveti	78
143 Cimiteri	86
121 Insediamenti industriali, artigianali, commerciali e spazi annessi	94
1112 Zone residenziali a tessuto discontinuo e rado	83
1221 Linee ferroviarie e spazi associati	98
3211 Praterie aride calcaree	79
242 Sistemi colturali e particellari complessi (mosaico di appezzamenti agricoli)	79
132 Aree ruderali e discariche	89
21121 Seminativi semplici e colture erbacee estensive	86
2311 Incolti	71
31122 Querceti termofili	73
1111 Zone residenziale a tessuto compatto e denso	90

Tabella 18 - Classi di Uso Suolo associate a valori di *Curve Number*.

I valori ottenuti sono stati convertiti in valori di massimo invaso del suolo (S) mediante la formula del metodo SCS-CN:

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

È stato quindi calcolato il valore di massimo invaso medio a scala di bacino, usando una media pesata sulle aree. Invertendo l'equazione di cui sopra è stato ottenuto un valore di CN medio pari a 87.

I valori ottenuti sono coerenti con quelli deducibili dalla Tav.07 allegata al PAI 2004 della Regione Sicilia che presenta valori nelle fasce 76.01-87 e 87.01-98 e mostrata in Figura 186.

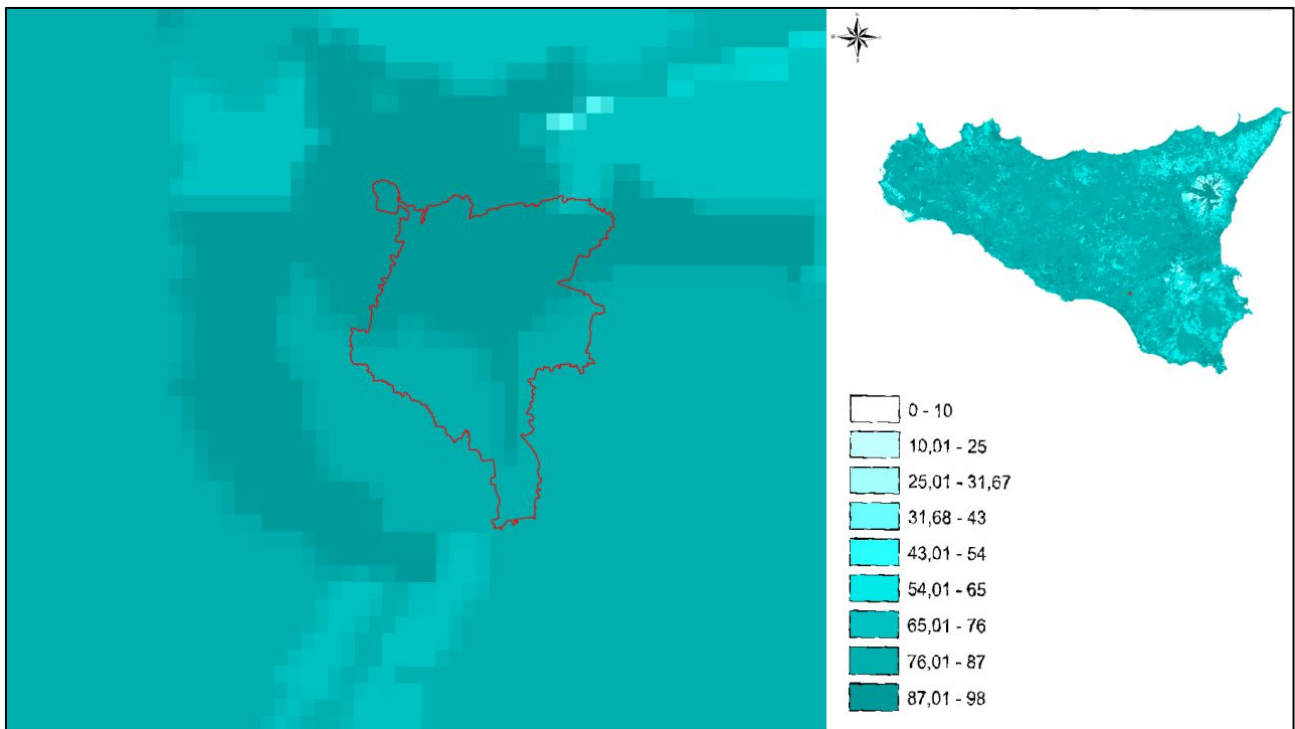


Figura 186 - Estratto della Tav.07 allegata al PAI della Regione Siciliana: Carta del CN, sovrapposta alla mappa del bacino di interesse.

## 8.3 Analisi delle precipitazioni estreme

### 8.3.1 Analisi regionale delle precipitazioni estreme e modellazione statistica

Per la definizione dei massimi annuali di precipitazione nel territorio di Niscemi si è scelto di utilizzare l'analisi di frequenza con approccio regionale a scala di bacino. Tale approccio è senz'altro da preferire rispetto ad un approccio a sito singolo poiché consente di utilizzare contemporaneamente tutta l'informazione pluviometrica disponibile sul territorio in esame, e permette di tener conto delle differenti lunghezze delle serie storiche osservate ai diversi siti di misura, riducendo l'incertezza delle valutazioni statistiche sul campione osservato. In accordo con il metodo della piena indice (Dalrymple, 1960; Hosking e Wallis, 1997), ampiamente usato nel campo dell'analisi degli estremi idrologici, sono stati utilizzati i dati di precipitazioni massime annuali di durata prefissata misurati dal pluviometro di Niscemi e dai sensori ricadenti nel bacino del fiume Gela, bacino di pertinenza di Niscemi, più alcuni pluviometri limitrofi. Il principio di tale approccio è quello di irrobustire la base di dati per consentire analisi accurate anche su eventi con frequenze molto basse.

Il *dataset* utilizzato ha incluso dati per durate degli eventi maggiore o uguale a 1 ora per le stazioni di Caltagirone, Caltanissetta, Diga Cimia, Diga Disueri, Gela, Mazzarino, Mineo e Niscemi e per durate inferiori all'ora le stazioni di Caltanissetta, Diga Cimia, Diga Disueri, Gela, Mazzarino e Niscemi. Mediamente per le durate inferiori all'ora si hanno serie con minore disponibilità di dati rispetto ai dati di durata superiore. Il periodo di disponibilità, variabile a seconda della stazione, copre il periodo 1928 - 2018.

I dati pluviometrici sono stati reperiti dagli Annali Idrologici disponibili al seguente indirizzo <https://www.regione.sicilia.it/istituzioni/regione/strutture-regionali/presidenza-regione/autorita-bacino-distretto-idrografico-sicilia/annali-idrologici>.

Come si può osservare dagli intervalli di disponibilità dei dati storici riportati in Tabella 19 e Tabella 20, un'analisi su singolo sito per Niscemi consentirebbe di utilizzare un *dataset* limitato al periodo 1974-1999; al contrario, un approccio di tipo regionale permette di includere *dataset* più estesi temporalmente e aggiornati.

Stazione	Latitudine	Longitudine	Quota (m slm)	Intervallo di disponibilità dei dati	Numero di anni effettivamente disponibili
Caltagirone	37.23994	14.51855	513	1930-2018	58
Caltanissetta	37.49667	14.05694	597	1928-2017	71
Diga Cimia	37.18972	14.35444	171	2009-2018	7
Diga Disueri	37.19028	14.28971	163	1967-2018	37
Gela	37.06469	14.25168	30	1928-2018	65
Mazzarino	37.30389	14.21861	547	1928-2017	40
Niscemi	37.14583	14.39639	332	1974-1999	18
Mineo	37.27083	14.69306	520	1928-2018	60

**Tabella 19 - Pluviometri utilizzati per la caratterizzazione delle precipitazioni intense massime annuali, sulle durate 1, 3, 6, 12, 24 ore. Viene riportato l'intervallo di disponibilità dei dati ricavati dagli Annali Idrologici e il numero di anni effettivamente disponibili per ciascuna stazione.**

Stazione	Latitudine	Longitudine	Quota (m slm)	Intervallo di disponibilità dei dati	Numero di anni effettivamente disponibili
Caltanissetta	37.49667	14.05694	597	1966-2017	30
Diga Cimia	37.18972	14.35444	171	1998-2018	9
Diga Disueri	37.19028	14.28971	163	1967-2018	21
Gela	37.06469	14.25168	30	1964-2018	34
Mazzarino	37.30389	14.21861	547	1966-2017	18
Niscemi	37.14583	14.39639	332	1975-1999	11

**Tabella 20 - Pluviometri utilizzati per la caratterizzazione delle precipitazioni intense massime annuali, sulle durate inferiori all'ora. Viene riportato l'intervallo di disponibilità dei dati ricavati dagli Annali Idrologici e il numero di anni effettivamente disponibili per ciascuna stazione.**

I dati dei massimi annuali per durate prefissate sono stati adimensionalizzati rispetto al valor medio per la stessa durata, mantenendo separati i campioni per durate sopra l'ora (durate di 1, 3, 6, 12, 24 ore) e sotto l'ora (durate differenziate a seconda della stazione da 5 minuti a 1 ora). La separazione delle analisi è stata mantenuta perché tipicamente si osserva una differente genesi dei fenomeni di diversa durata, che si riflette in differenti proprietà statistiche delle due popolazioni, con distribuzioni dei massimi per gli eventi di breve durata caratterizzate da "code" più pesanti.

Precipitazioni brevi sono solitamente associate a fenomeni convettivi intensi e localizzati, mentre eventi di durate più lunghe sono associati a sistemi frontali o fenomeni più persistenti ed estesi. Inoltre, la numerosità molto maggiore delle misurazioni su durate superiori all'ora causerebbe un *fit* sul campione misto fortemente sbilanciato sulle durate lunghe (Figura 187, Figura 188). Ciò ha ulteriormente confermato la scelta di differenziare l'analisi su due intervalli di durata.

Entrambe le popolazioni di valori, una volta adimensionalizzate mediante procedura di regionalizzazione, hanno permesso la costituzione di un campione più numeroso ed entrambi hanno mostrato un ottimo accordo con la legge per la distribuzione di probabilità Generalized Extreme Value (GEV) Distribution, come mostrato in Figura 187 e Figura 188. La formulazione della GEV è la seguente:

$$h_{(a,TR)} = \mu + \sigma/\chi \left( \left( -\log((TR - 1)/TR) \right)^{(-\chi)} - 1 \right)$$

dove  $h_{(a,TR)}$  è l'altezza di precipitazione adimensionalizzata, che può essere determinata in funzione del tempo di ritorno TR e dei parametri GEV  $\mu$ ,  $\chi$ ,  $\sigma$ .

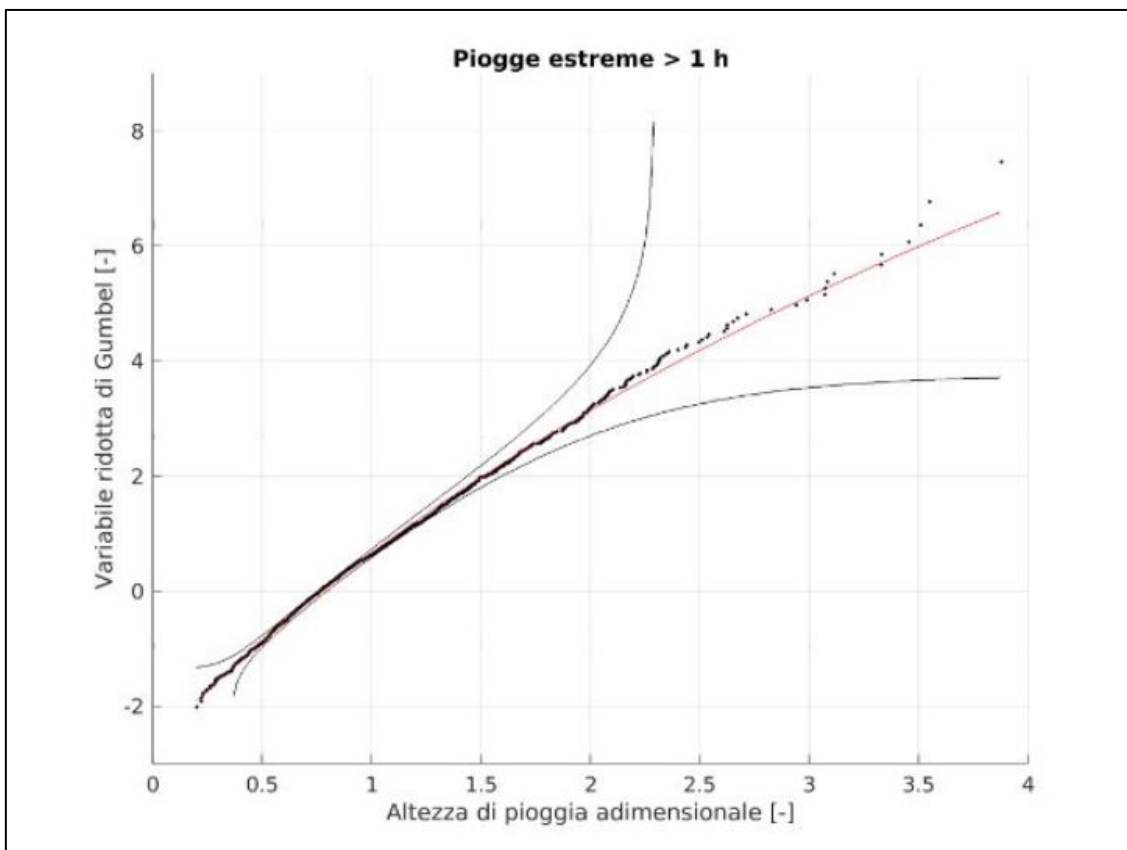


Figura 187 - *Fit* della distribuzione del campione di piogge estreme di durate superiori a 1 ora (pioggia adimensionale in carta di Gumbel), con banda di confidenza al 95%.

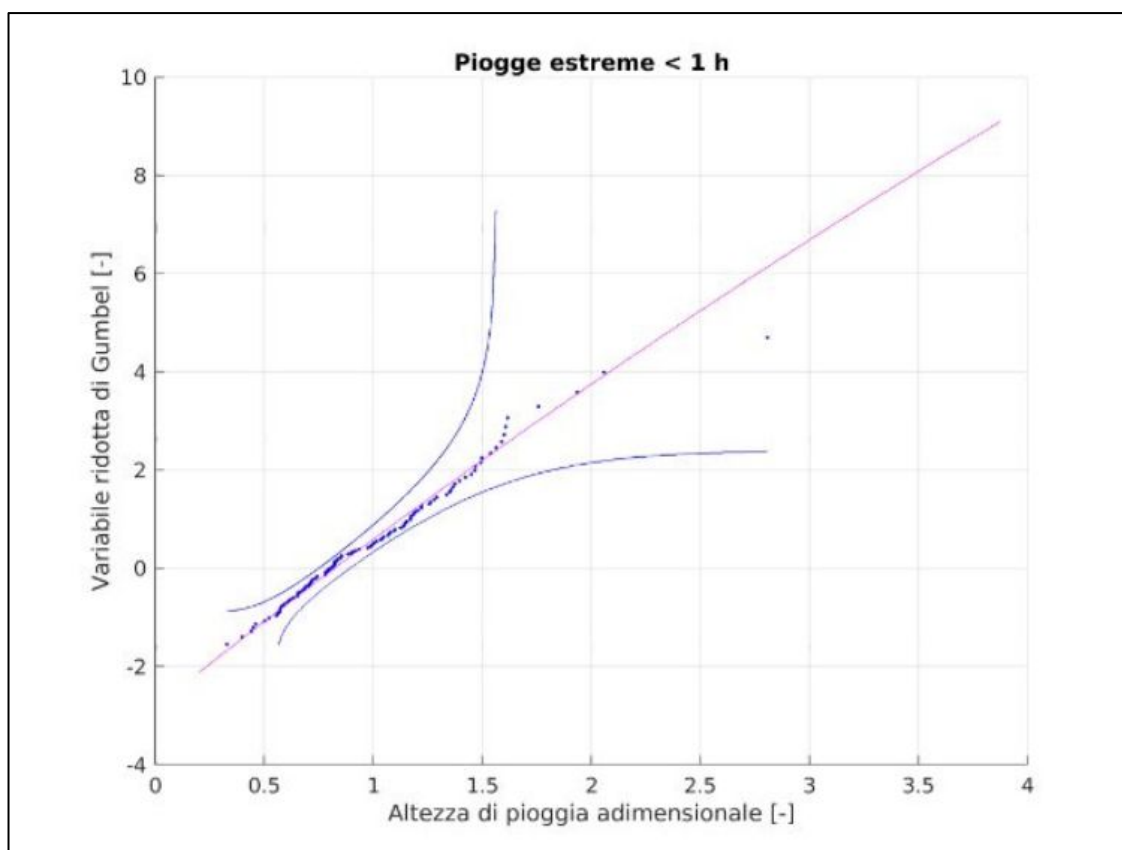


Figura 188 - *Fit* della distribuzione del campione di piogge estreme di durate inferiori a 1 ora (pioggia adimensionale in carta di Gumbel) con banda di confidenza al 95%.

La scelta di una adimensionalizzazione della distribuzione dei massimi consente una fattorizzazione della costruzione della Linea Segnatrice di Possibilità Pluviometrica (LSPP), cioè la sua scomposizione nel prodotto di una funzione del solo Tempo di Ritorno (curva di crescita) e di una funzione della sola durata per la stima dell'altezza di pioggia  $h$ .

La LSPP per l'abitato di Niscemi è stata quindi calcolata mediante *fit* di una legge di potenza con metodo dei minimi quadrati, usando la forma classica a due parametri  $h=ad^n$  sui valori medi di altezza di pioggia per ciascuna durata.

Data la scarsa disponibilità di dati di altezze di pioggia per durate inferiori all'ora per il pluviometro di Niscemi, si è optato per un *fit* di un'unica curva LSPP per tutte le durate, come mostrato in Figura 189. Ciò si differenzia dalla stima della curva di crescita mediante GEV con parametri stimati con metodo di massima verosimiglianza, ove i parametri della GEV sono stimati separatamente per durate inferiori e superiori all'ora.

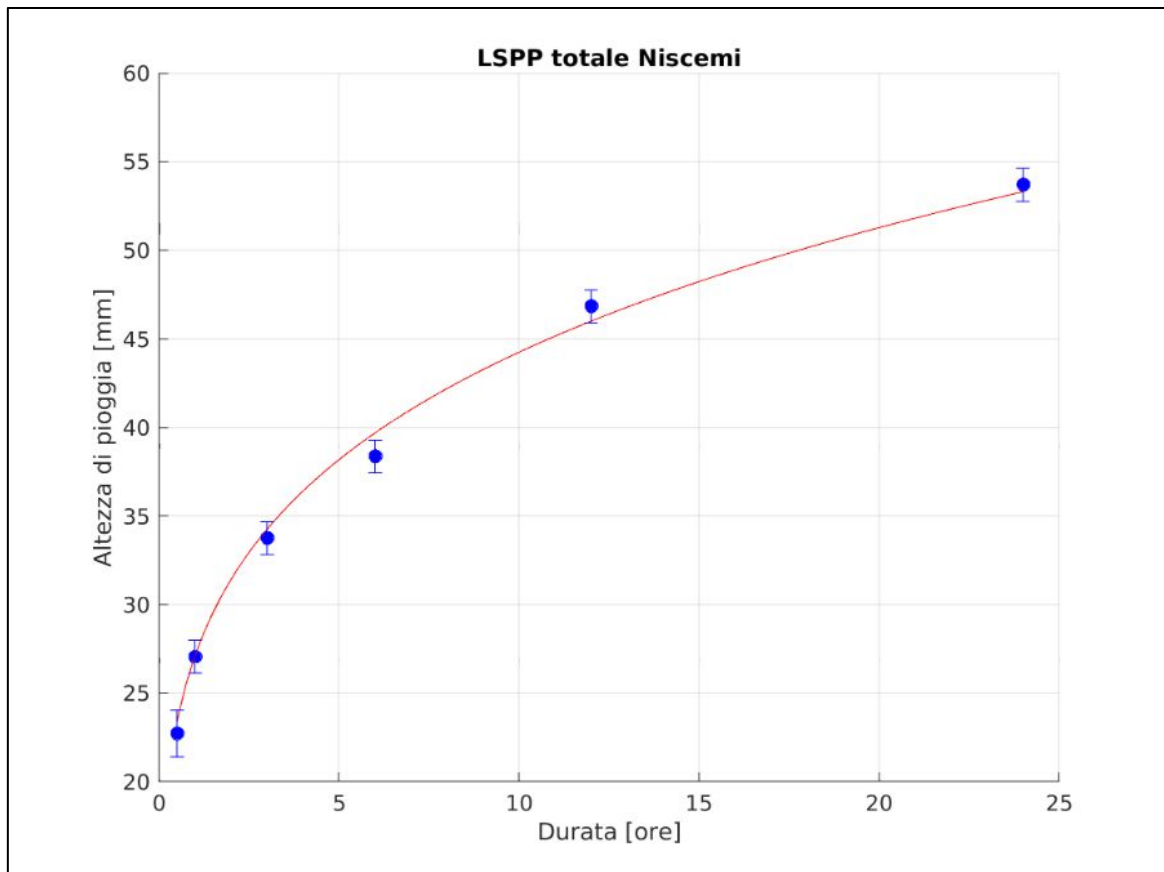


Figura 189 - *Fit* della LSPP media (linea continua) per il pluviometro di Niscemi a partire dalle misure dei massimi di precipitazione per diverse durate (valori puntuali). Gli intervalli di confidenza sono proporzionali all'incertezza delle medie usate per il *fit* (tanto più grandi quanto meno numerosi i campioni).

Le risultanti formule per la stima dell'altezza di pioggia estrema  $h$  (in mm) in funzione della durata  $d$  (in ore) e del tempo di ritorno  $T$  (in anni) si ottiene quindi come prodotto della LSPP ( $h=ad^n$ ), unica per tutte le durate, e del fattore di crescita, stimato individualmente per durate sotto e sopra l'ora mediante *fit* di distribuzioni GEV:

$$h(T, d) = \left[ 0.8192 + 12.5339 \left[ \left( -\log \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{-0.024} - 1 \right] \right] 27.1257d^{0.2127} \quad (1)$$

$$h(T, d) = \left[ 0.7728 + 3.2867 \left[ \left( -\log \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{-0.1007} - 1 \right] \right] 27.1257d^{0.2127} \quad (2)$$

dove  $\log$  è il logaritmo naturale. La formula (1) è valida per durate inferiori a 1 ora, e la formula (2) per durate pari o superiori a 1 ora.

Nella Tabella 21 sono riportate, a titolo di esempio, alcune altezze di pioggia ottenute dalle equazioni (1) e (2) per varie combinazioni di durate e tempi di ritorno.

Durata/ TR [anni]	2	5	10	20	25	50	75	100	200
5 min	14.9	20.4	24.2	27.9	29.1	32.7	34.9	36.5	40.2
10 min	17.2	23.7	28.0	32.3	33.7	37.9	40.5	42.2	46.6
15 min	18.8	25.8	30.6	35.2	36.7	41.4	44.1	46.0	50.8
20 min	20.0	27.4	32.5	37.4	39.0	44.0	46.9	49.0	54.0
25 min	20.9	28.8	34.1	39.3	40.9	46.1	49.2	51.3	56.6
30 min	21.8	29.9	35.4	40.8	42.5	47.9	51.1	53.4	58.9
35 min	22.5	30.9	36.6	42.2	44.0	49.5	52.8	55.1	60.8
40 min	23.1	31.8	37.7	43.4	45.2	51.0	54.3	56.7	62.6
45 min	23.7	32.6	38.6	44.5	46.4	52.2	55.7	58.2	64.2
50 min	24.3	33.3	39.5	45.5	47.4	53.4	57.0	59.5	65.6
55 min	24.8	34.0	40.3	46.4	48.4	54.5	58.1	60.7	67.0
1 ora	24.3	35.5	43.6	52.1	54.9	63.9	69.4	73.5	83.8
3 ore	30.7	44.8	55.1	65.8	69.3	80.7	87.7	92.9	105.9
6 ore	35.6	52.0	63.9	76.2	80.3	93.5	101.7	107.6	122.7
12 ore	41.2	60.2	74.0	88.3	93.1	108.4	117.8	124.7	142.2
24 ore	47.8	69.8	85.8	102.3	107.8	125.6	136.5	144.5	164.7

Tabella 21 - Altezza di precipitazione in funzione della durata dell'evento e del tempo di ritorno.

Si può notare dalla Figura 190 come il *fit* di una distribuzione GEV a 3 parametri sul campione di dati di pioggia sia in grado di rappresentare più accuratamente di una Gumbel (a 2 parametri) i valori estremi (sulla destra del grafico), a beneficio di una stima più accurata delle altezze di pioggia con tempo di ritorno elevato.

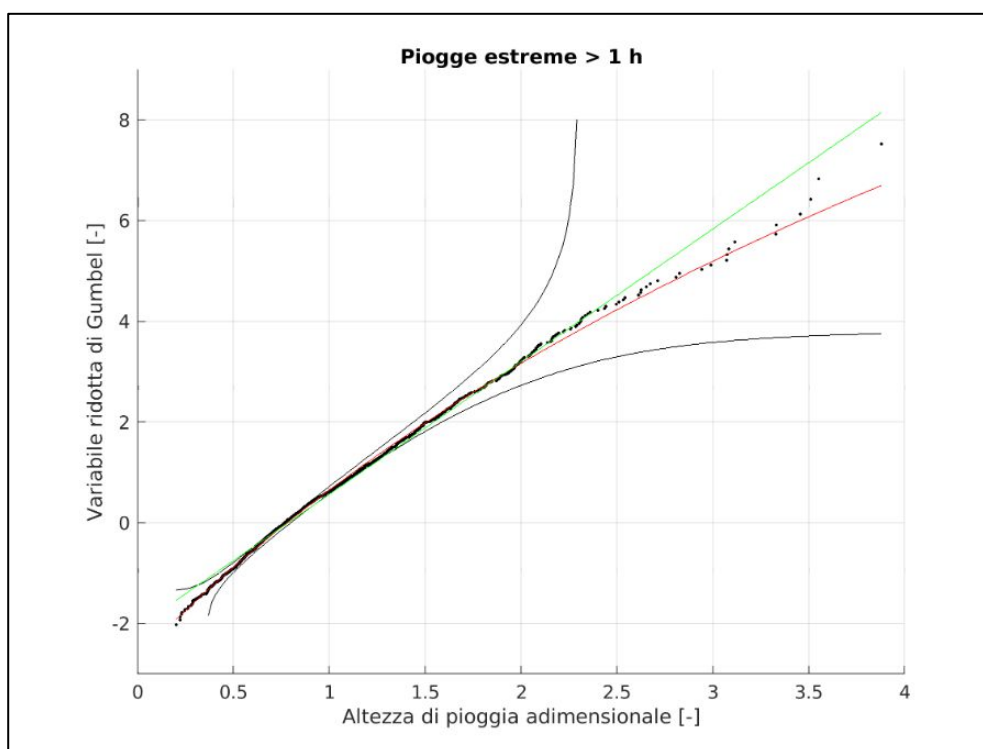


Figura 190 - Confronto dei *fit* sul campione di piogge estreme di durate superiori a 1 ora (pioggia adimensionale in carta di Gumbel). In rosso la GEV (con banda di confidenza al 95%), in verde una distribuzione di Gumbel stimata sullo stesso campione.

La presente analisi non tiene conto in questa fase degli effetti del cambiamento climatico e fornisce una stima delle precipitazioni massime annuali che sarà successivamente rivalutata, in sede di progetto, per includere gli effetti del cambiamento climatico. Come descritto in Freni (2020), è noto infatti che nel territorio regionale sia in atto una progressiva evoluzione dei principali parametri climatici, con particolare riferimento a temperatura e precipitazioni.

Relativamente alle precipitazioni, anche in Sicilia, lo studio riscontra una crescente variabilità sia in termini di distribuzione temporale sia di intensità degli eventi. In particolare, si osserva una tendenza alla diminuzione dei quantitativi medi annui, accompagnata da un aumento della frequenza di eventi intensi concentrati in brevi intervalli temporali, alternati a periodi prolungati di siccità.

### 8.3.2 Confronto con altri studi disponibili

In questa sezione vengono confrontate le LSPP ottenute dal presente lavoro con due formulazioni pre-esistenti:

- quelle stimate dal Centro Funzionale Decentrato del Dipartimento Regionale della Protezione Civile (DRPC), e disponibili al seguente indirizzo: <https://www.protezionecivilesicilia.it/it/146-cfdmi.asp>;
- quelle desumibili dal Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico della Regione Siciliana (PAI) dell'anno 2004 e disponibili all'indirizzo <https://www.sitr.regione.sicilia.it/pai/>.

Per entrambi gli studi sopracitati le LSPP sono state estratte per la stazione pluviometrica di Niscemi.

Più in dettaglio, DRPC per la stazione pluviometrica di Niscemi utilizza su 18 anni di misure pluviometriche tra il 1974 e il 1999, e fornisce una stima della LSPP usando la stessa formula usata in questo lavoro, con le differenze principali di utilizzare una distribuzione di Gumbel (invece di GEV) con *fit* unico su tutte le durate, in quanto non menziona l'uso di dati sub-orari. Inoltre, la LSPP del DRPC non adotta l'approccio di regionalizzazione ma si basa sui soli dati provenienti dalla stazione di Niscemi.

A titolo di confronto, di seguito si riportano le curve LSPP del DRPC per alcuni tempi di ritorno.

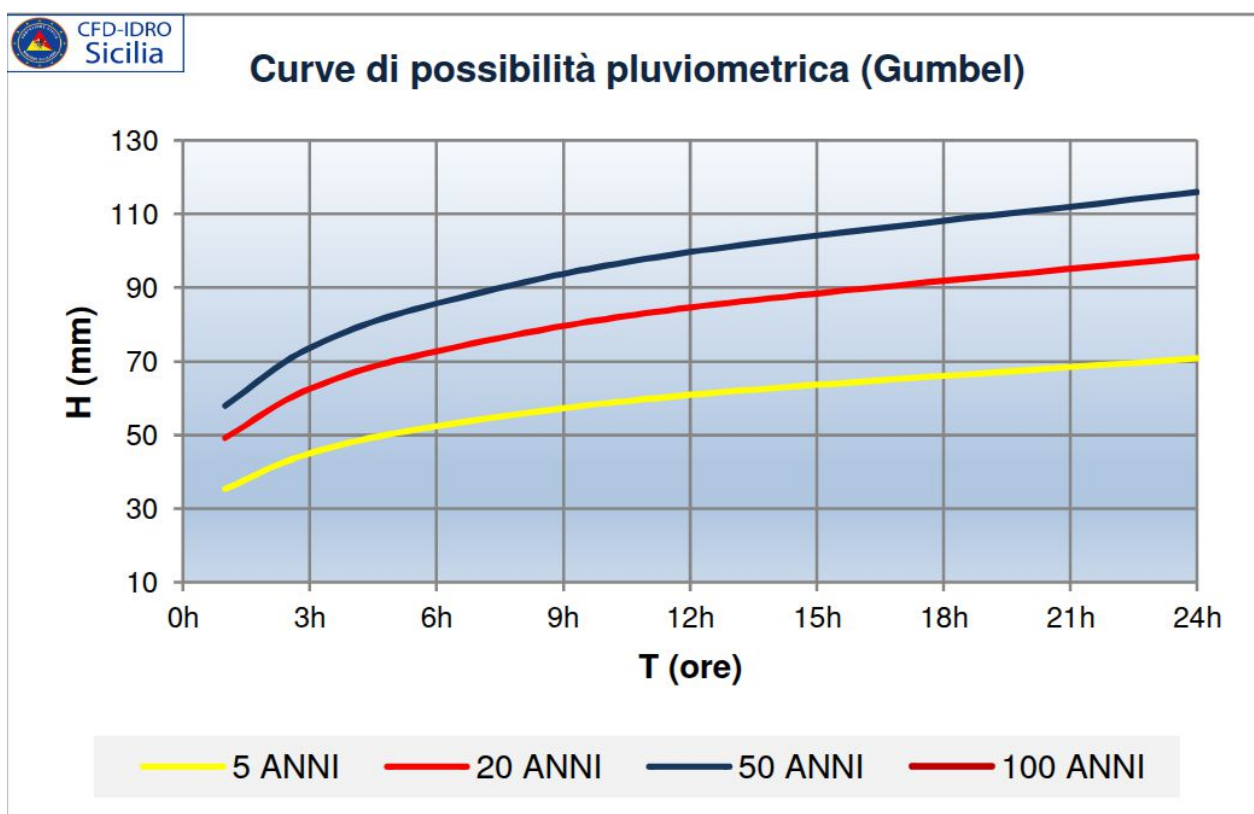


Figura 191 - LSPP stimate dal Centro Funzionale Decentrale (DRPC Sicilia).

I valori stimabili dal PAI per i parametri "a" ed "n" sono stati estratti da mappe *raster* definite per classi, pertanto, il confronto con gli altri due approcci risulta per lo più qualitativo. Il confronto tra i tre approcci (Tabella 22) mostra un'elevata similarità dei parametri della legge di potenza stimata, con differenze dell'1% sul parametro a e del 2% sull'esponente n dei parametri DRPC.

Riguardo ai valori PAI, il parametro a è allineato agli altri due approcci, mentre l'esponente n risulta nella classe  $0.25 \div 0.28$ , suggerendo un maggiore aumento dell'altezza di pioggia all'aumentare della durata.

	a	n
<b>v.2026</b>	27.125	0.2127
<b>DRPC</b>	26.744	0.218
<b>PAI 2004</b>	24 ÷ 27	0.25 ÷ 0.28

**Tabella 22 - Confronto dei parametri a ed n della legge di potenza della LSPP stimata in questo lavoro (v.2026) con le stime DRPC e PAI.**

Differenze più marcate con DRPC si riscontrano nei valori del fattore di crescita Kt. Differenze attese e giustificabili dall'uso di un approccio parzialmente diverso per la stima della curva di crescita come già descritto in precedenza.

TR [anni]	2	5	10	20	50	100	200
<b>Kt 2026 (d&lt;1 ora)</b>	0.930	1.279	1.515	1.745	2.050	2.282	2.518
<b>Kt 2026 (d≥1 ora)</b>	0.896	1.309	1.609	1.919	2.355	2.709	3.088
<b>Kt DRPC (d≥1 ora)</b>	0.926	1.324	1.587	1.840	2.167	2.412	2.656

**Tabella 23 - Confronto tra i coefficienti Kt della curva di crescita proposti in questo lavoro (Kt 2026) con le stime DRPC.**

Complessivamente, la stima delle altezze di pioggia per varie durate e tempi di ritorno generata dalle formule ottenute in questo lavoro si discosta da quelle del DRPC da un massimo negativo di -18% per Tempo di Ritorno (TR) = 2 anni e durata di 24 ore, ad un massimo positivo del +28% per TR=50 anni e durata di 1 ora, con valori più simili per durate e tempi di ritorno intermedi, risultando così più cautelative per tempi di ritorno alti. Si riporta in Tabella 24, a titolo di esempio, un confronto delle stime di cumulate di pioggia a 1 e 24 ore per diversi tempi di ritorno, utilizzando le due formulazioni.

Le differenze riscontrate sono attese e rientrano nell'incertezza tipica di questo tipo di analisi.

L'approccio adottato nel presente studio consente di ottenere un'analisi robusta dei massimi annuali di precipitazione, poiché l'analisi di frequenza con approccio "regionale" permette di sfruttare simultaneamente l'intera informazione pluviometrica disponibile sull'area in esame. Tale impostazione consente inoltre di considerare le differenti lunghezze delle serie storiche osservate nei diversi siti di misura, riducendo l'incertezza associata alle stime statistiche sul campione osservato. L'approccio adottato permette infine di aggiornare il campione a periodi più recenti: le serie di massimi pluviometrici utilizzate si estendono infatti fino al 2018.

TR [anni]	2	5	10	20	50	100	200
<b>P 1 ora (2026)</b>	24.3	35.5	43.6	52.0	63.9	73.5	83.8
<b>P 1 ora (DRPC)</b>	25.0	31.0	37.0	43.0	50.0	-	-
<b>Differenza [%]</b>	-3%	15%	18%	21%	28%	-	-
<b>P 24ore (2026)</b>	47.8	69.8	85.8	102.3	125.6	144.5	164.7
<b>P 24ore (DRPC)</b>	58	74	86	100	116	-	-
<b>Differenza [%]</b>	-18%	-6%	0%	2%	8%	-	-

**Tabella 24 - Confronto tra stime di cumulate di pioggia a 1 e 24 ore proposte in questo lavoro (2026) con le stime DRPC.**

## 8.4 Definizione dei massimi annuali di portata per il torrente Benefizio

L'analisi è stata condotta con l'obiettivo di stimare le portate di piena per il torrente Benefizio, che svolge funzione di collettore principale delle acque meteoriche provenienti dal sistema di drenaggio urbano ove presente.

Si è scelto di adottare un approccio di tipo afflussi-deflussi basato sul metodo SCS-CN accoppiato con l'idrogramma unitario adimensionale SCS. Tale metodologia consente di rappresentare in modo semplificato ma fisicamente significativo i processi di infiltrazione, accumulo e trasformazione della pioggia in deflusso, risultando particolarmente adatta per piccoli bacini urbani. Inoltre, la metodologia è coerente con quanto proposto nel PAI del 2004 e in linea con le indicazioni contenute nel PAI 2020 "Capitolo 11 - Norme di attuazione"

Il bacino idrografico di interesse sottende una superficie complessiva pari a circa 1.8 km<sup>2</sup> (Figura 183) ed è caratterizzato da un valore medio di CN pari a 87, come descritto nei paragrafi precedenti.

Per quanto riguarda la stima del tempo di corrivazione, considerando che si sta trattando un piccolo bacino urbano (< 2 km<sup>2</sup>), equazioni di letteratura di uso tipico tarate per bacini naturali come la formula di Kirpich o la formula di Giandotti non rappresentano bene le velocità dell'acqua su vaste superfici impermeabili o reti fognarie tendendo a fornire sovrastime e risultando quindi poco adatte. È stata quindi utilizzata la formula empirica, coerente con bacini di piccole dimensioni a risposta rapida:

$$T_c = 0.25 + 0.27A^{0.5}$$

dove  $A$  è l'area del bacino espressa in km<sup>2</sup>. Il tempo di corrivazione risulta pari a 36 minuti.

Come dato di *input* è stata utilizzata la LSPP descritta nel paragrafo precedente, a partire dalla quale sono stati costruiti ietogrammi sintetici di tipo Chicago (Keifer and Chu 1957), discretizzati con passo temporale pari a 1 minuto e di durata pari al tempo di corrivazione, scelta adeguata in relazione alla ridotta estensione del bacino e ai tempi di risposta.

Lo ietogramma di tipo Chicago è un modello sintetico che descrive la distribuzione temporale dell'intensità di pioggia a partire dalla LSPP, l'intensità media si ricava come:

$$i(d) = \frac{h(d)}{d} = ad^{n-1}$$

e da questa si costruisce lo ietogramma imponendo un picco in una posizione relativa prefissata rispetto alla durata totale dell'evento. In particolare, fissato un fattore di asimmetria  $r$  che definisce la posizione del picco di intensità rispetto alla durata complessiva dell'evento, le intensità prima e dopo il picco vengono calcolate applicando la legge LSPP su durate incrementali crescenti e decrescenti, garantendo continuità e conservazione del volume totale di precipitazione.

Sono stati quindi costruiti ietogrammi differenti al variare del Tempo di Ritorno di interesse. Il fattore di asimmetria  $r$  è stato variato nell'intero intervallo [0, 1], selezionando per ciascun Tempo di Ritorno la configurazione che massimizzava la portata al colmo dell'idrogramma risultante. Il fattore di asimmetria ottimale, in tal senso, è risultato essere compreso tra 0.98 e 1, quindi con il picco posizionato alla fine della durata dello ietogramma (Figura 192).

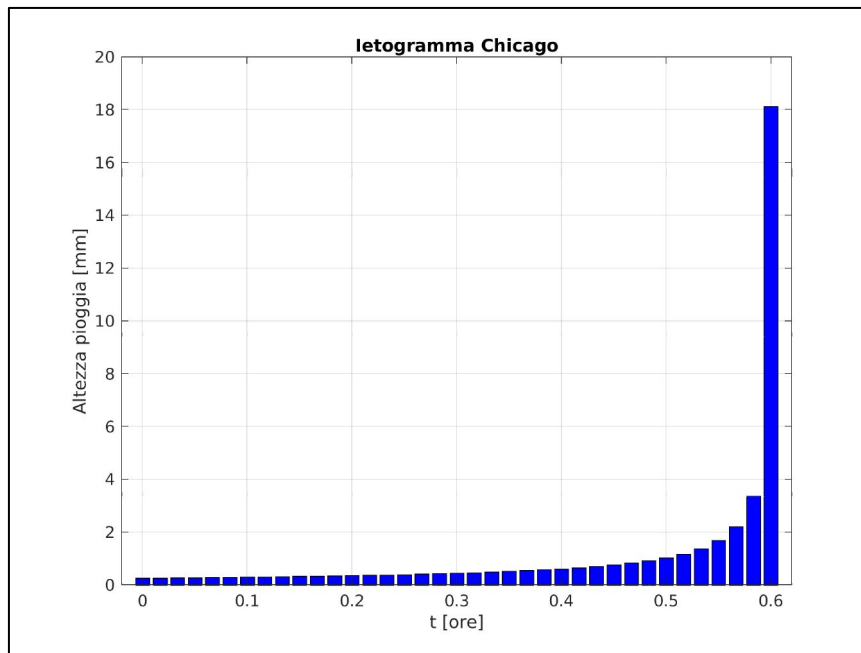


Figura 192 - Ietogramma di progetto tipo Chicago.

È stata quindi applicata la procedura SCS-CN per la stima della pioggia efficace definita dalla seguente relazione:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad \text{per } P > I_a$$

dove:

- $P_e$ : precipitazione efficace,
- $P$ : precipitazione totale,
- $I_a$ : perdita iniziale,
- $S$ : capacità massima di invaso del suolo.

Il parametro  $S$  è legato al Curve Number tramite:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

mentre la perdita iniziale è assunta pari a:

$$I_a = 0.2 \cdot S$$

Tale procedura è stata applicata in forma incrementale allo ietogramma discretizzato, ottenendo quindi la serie temporale della pioggia efficace, e permettendo la simulazione della dinamica dell'infiltrazione con progressiva saturazione. Il calcolo è stato effettuato con un passo di calcolo numerico pari a 1 minuto.

Per il calcolo dell'idrogramma alla chiusura del bacino è necessario definire anche un idrogramma unitario, in questo caso sono state valutate due possibilità: l'idrogramma standard SCS, che è definito in forma adimensionale per punti e viene normalmente caratterizzato tramite il tempo al picco  $T_p$  e la portata di picco  $Q_p$  (vedi Figura 193 e Tabella 25) e l'idrogramma triangolare SCS (Figura 194). Quest'ultimo è definito come un idrogramma lineare a tratti costituito da un tratto crescente dall'istante 0 fino al tempo di picco  $T_p$ , seguito da un tratto decrescente fino a una durata complessiva dell'idrogramma  $T_b$ , con  $T_b = 2.67 \cdot T_p$ . Entrambi gli idrogrammi sono stati qui opportunamente riscritti considerando il tempo di picco:

$$T_p = 0.6 \cdot T_c + \frac{dt}{2}$$

ove  $T_c$  è il tempo di corrivazione stimato e  $dt$  è il tempo di calcolo (Figura 193).

$t/T_p$	$q/Q_p$	$t/T_p$	$q/Q_p$	$t/T_p$	$q/Q_p$
0	0	1.7945	0.990	3.7380	0.147
0.1645	0.030	1.9440	0.930	4.0370	0.107
0.3290	0.100	2.0935	0.860	4.3360	0.077
0.4935	0.190	2.2430	0.780	4.6350	0.055
0.6580	0.310	2.3925	0.680	4.9340	0.040
0.8225	0.470	2.5420	0.560	5.2330	0.029
0.9870	0.660	2.6915	0.460	5.5320	0.021
1.1515	0.820	2.8410	0.390	5.8310	0.015
1.3160	0.930	2.9905	0.330	6.1300	0.011
1.4805	0.990	3.1400	0.280	6.8775	0.005
1.6450	1.000	3.4390	0.207	7.250	0

Tabella 25 - Valori dell'idrogramma *standard SCS*, definiti in funzione del tempo di picco e della portata di picco.

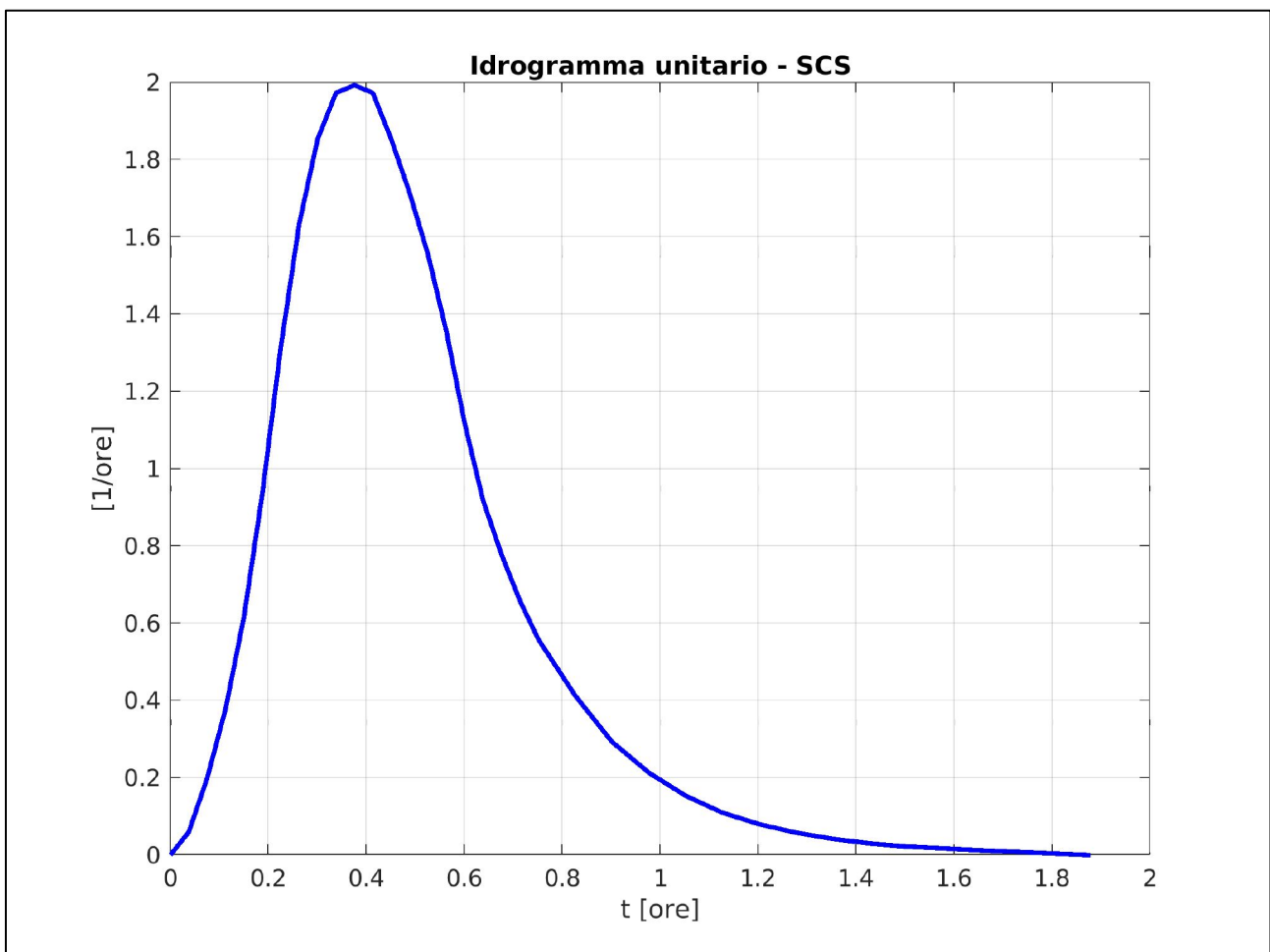
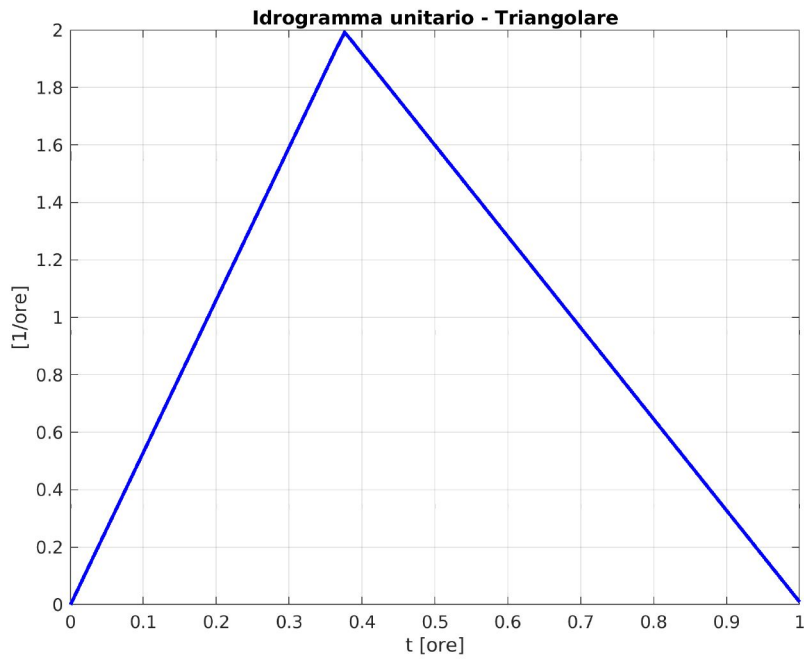


Figura 193 - Idrogramma unitario adimensionale *standard SCS*.



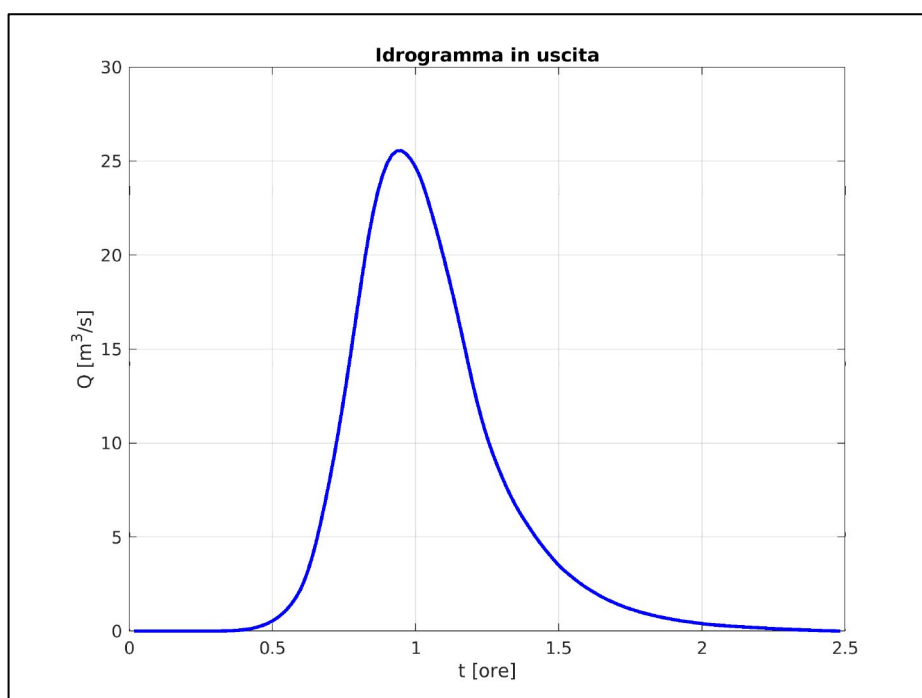
**Figura 194 - Idrogramma unitario adimensionale triangolare SCS.**

La trasformazione della pioggia efficace in deflusso è stata quindi eseguita mediante convoluzione con gli idrogrammi unitari adimensionali. La relazione di convoluzione è espressa come:

$$Q(t) = \int_0^t P_e(\tau)h(t - \tau)d\tau$$

dove:

- $Q(t)$  è la portata al tempo  $t$
- $P_e(t)$  è la pioggia efficace al tempo  $t$
- $h(t)$  è l'idrogramma unitario



**Figura 195 - Esempio di idrogramma risultati in uscita ottenuto con l'idrogramma unitario *standard* SCS.**

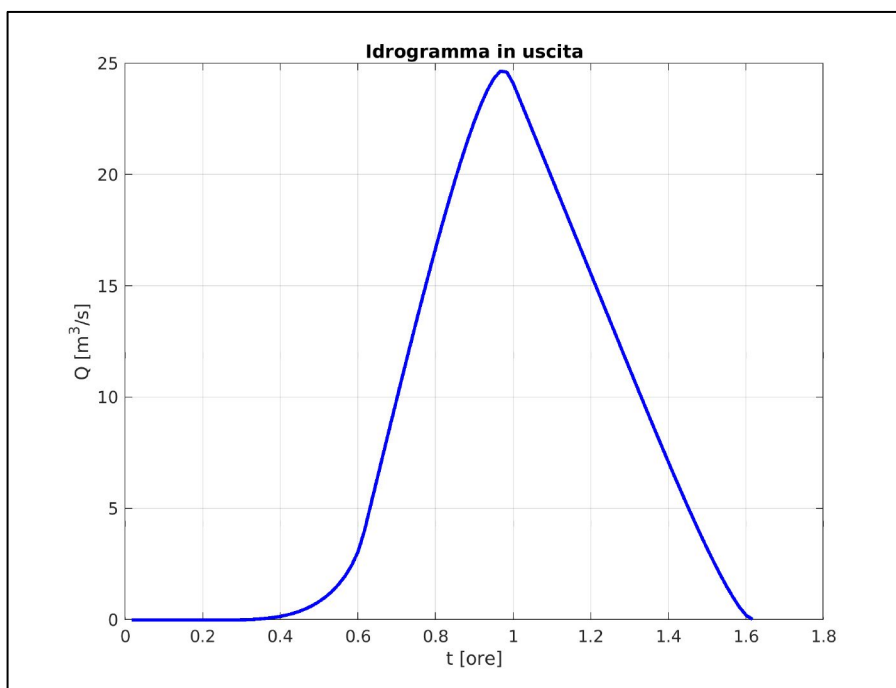


Figura 196 - Esempio di idrogramma risultati in uscita ottenuto con l'idrogramma unitario triangolare SCS.

Le simulazioni sono state condotte per diversi tempi di ritorno, ottenendo i valori di portata al colmo riportati nella Tabella 26.

TR [anni]	2	5	10	20	50	100	200
<b>Q<sub>max</sub> [m³/s] (IU SCS standard)</b>	4.3	9.0	12.6	16.5	21.8	26.1	30.6
<b>Q<sub>max</sub> [m³/s] (IU SCS triangolare)</b>	4.2	8.8	12.3	16.1	21.3	25.5	29.8

Tabella 26 - Portate massime annuali in [m³/s] al variare del Tempo di Ritorno.

L'utilizzo dell'idrogramma standard SCS fornisce valori di portata al picco leggermente superiori a quelli ottenuti con l'idrogramma triangolare. In favore di sicurezza si ritiene dunque di utilizzare i valori corrispondenti all'idrogramma SCS (prima riga della Tabella 26).

L'approccio adottato ha consentito di ottenere una stima coerente delle portate di piena, tenendo conto della distribuzione temporale della precipitazione per il torrente Benefizio. La stessa metodologia per la determinazione delle portate può essere applicata ad ogni sottobacino dell'area di interesse della frana, compresi i piccoli sottobacini scolanti di pertinenza della frana Nord che non drenano nel torrente Benefizio.

Tali valori di portata, allo stato attuale delle analisi e in questa fase di studio, sono da considerarsi di riferimento e potranno essere ulteriormente affinati ad esempio includendo una valutazione sul contributo del cambiamento climatico e/o ulteriori dati di precipitazione ufficiali qualora fossero disponibili.

## 8.5 Analisi delle precipitazioni degli eventi franosi del gennaio 2026

L'analisi delle precipitazioni antecedenti l'evento franoso di Niscemi si è concentrata prevalentemente sulle serie pluviometriche misurate alle stazioni di Niscemi e della Diga di Cimìa, posta a 6 km a nord-ovest di Niscemi.

In particolare, il secondo pluviometro presenta serie temporali più complete rispetto a quello di Niscemi, permettendo una valutazione più completa su periodi temporali pluriennali. Il pluviometro di Niscemi, pur attivo durante tutto il mese di gennaio 2026, presenta un'interruzione nella serie temporale dei dati da

novembre 2024 al 17 dicembre 2025, limitando una corretta analisi degli apporti pluviometrici precedenti l'evento franoso.

Le precipitazioni cadute a Niscemi nei giorni precedenti l'evento non hanno manifestato elevata intensità se confrontate con le LSPP descritte nei paragrafi precedenti, rimanendo al di sotto del tempo di ritorno minimo (TR=2 anni) per tutte le durate di pioggia (1, 3, 6, 12, 24 ore) e per tutti i giorni con dati disponibili da dicembre 2025 a fine gennaio 2026.

Le cumulate in occasione del ciclone Harry, tra 20 e 21 gennaio 2026, sono state relativamente modeste per un totale nei due giorni di 14 mm a Niscemi e di 22 mm alla Diga di Cimìa, ben al di sotto dei quantitativi misurati lungo la costa est della Sicilia, dove localmente si sono superati i 200 mm nello stesso periodo (Figura 197).

Di maggiore interesse risulta l'analisi delle precipitazioni cumulate su durate più lunghe, pari a 30, 60 e 90 giorni precedenti (Figura 198 e Figura 199). Analizzando le serie temporali disponibili di quest'ultima variabile dal 2011 in avanti, si nota come i 60 giorni precedenti l'evento di gennaio 2026 siano stati i più piovosi degli ultimi 5 anni a Niscemi e degli ultimi 10 anni alla Diga di Cimìa.

La stessa analisi è stata effettuata considerando durate di 30 e 90 giorni. Si è quindi estratto il percentile corrispondente alle precipitazioni cumulate nei 30, 60 e 90 giorni precedenti il 31 gennaio 2026, per le stazioni di Niscemi e Diga di Cimìa.

L'analisi si basa su 15 anni di dati giornalieri per Niscemi, dal 15 marzo 2011 al 1 aprile 2026 (76% di misure valide) e su 11.5 anni di dati giornalieri per Diga di Cimìa, dal 29 settembre 2014 al 1 aprile 2026 (72% di misure valide).

I risultati, riassunti in Tabella 27 mostrano valori superiori al 95° percentile per tutte e tre le durate con serie complete, con un picco pari al 98,8° percentile per le precipitazioni cumulate a 60 giorni presso la diga di Cimìa. In particolare, le cumulate su 60 e 90 giorni si configurano come eventi rari, con una frequenza osservata di poco superiore all'1%. Valori analoghi nella serie analizzata sono stati registrati solo nel 2014.

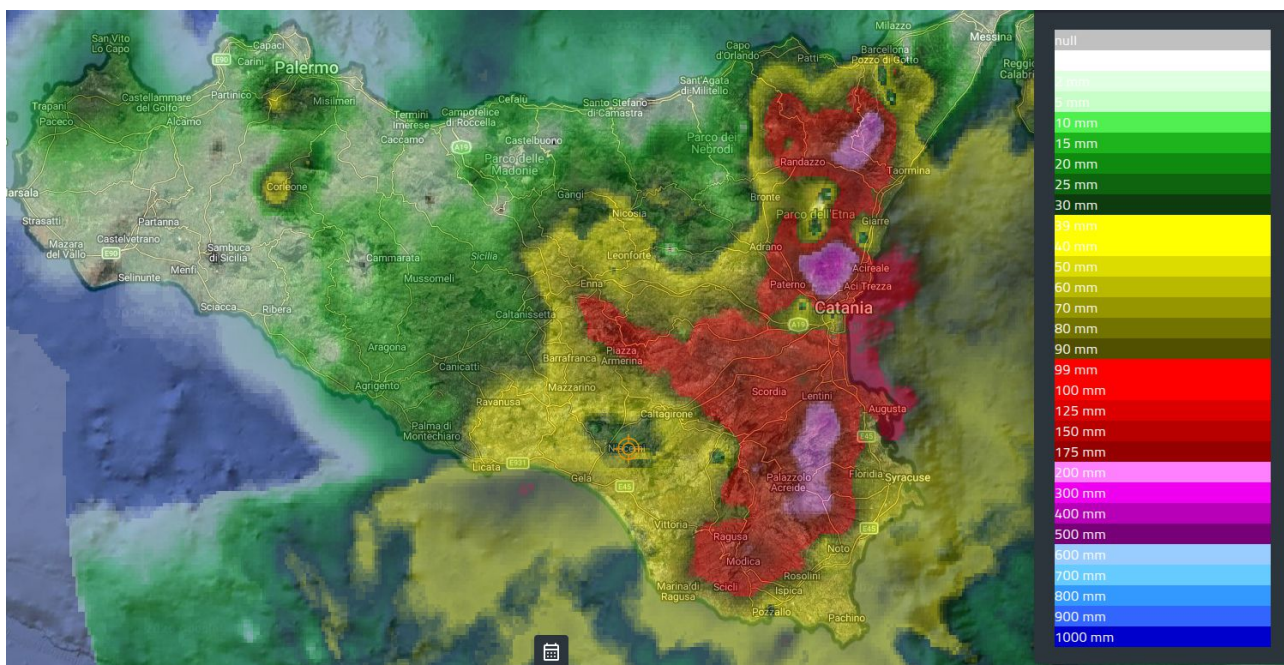
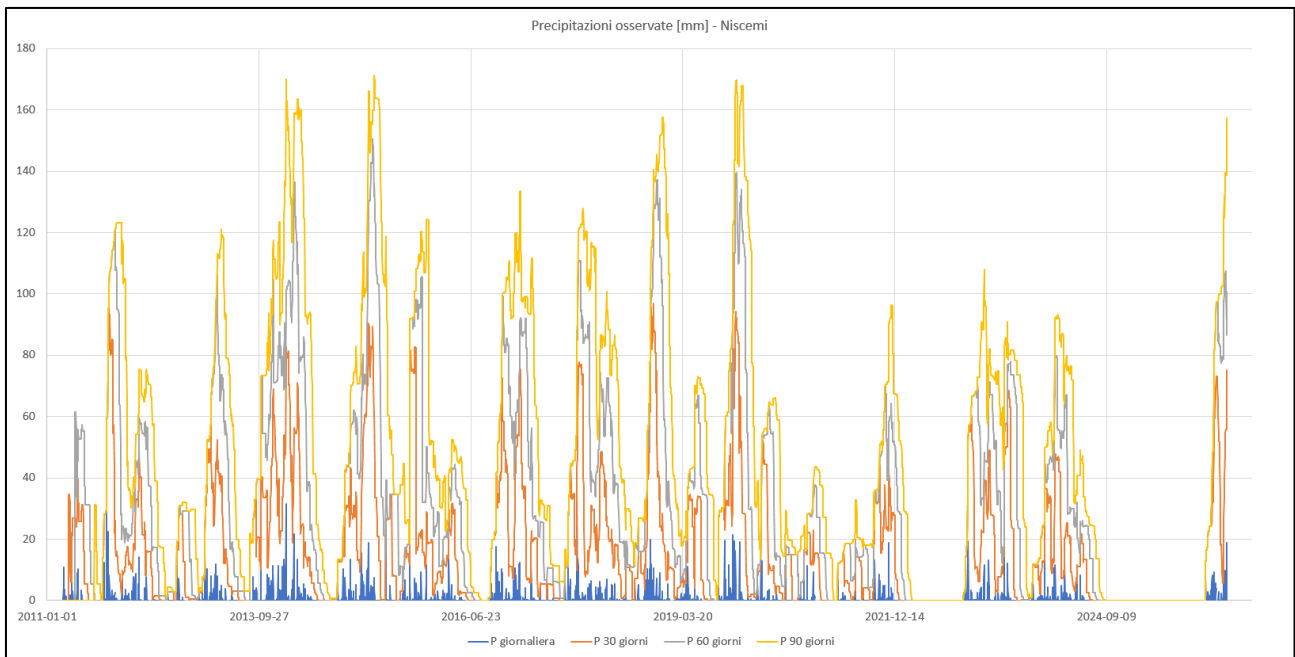
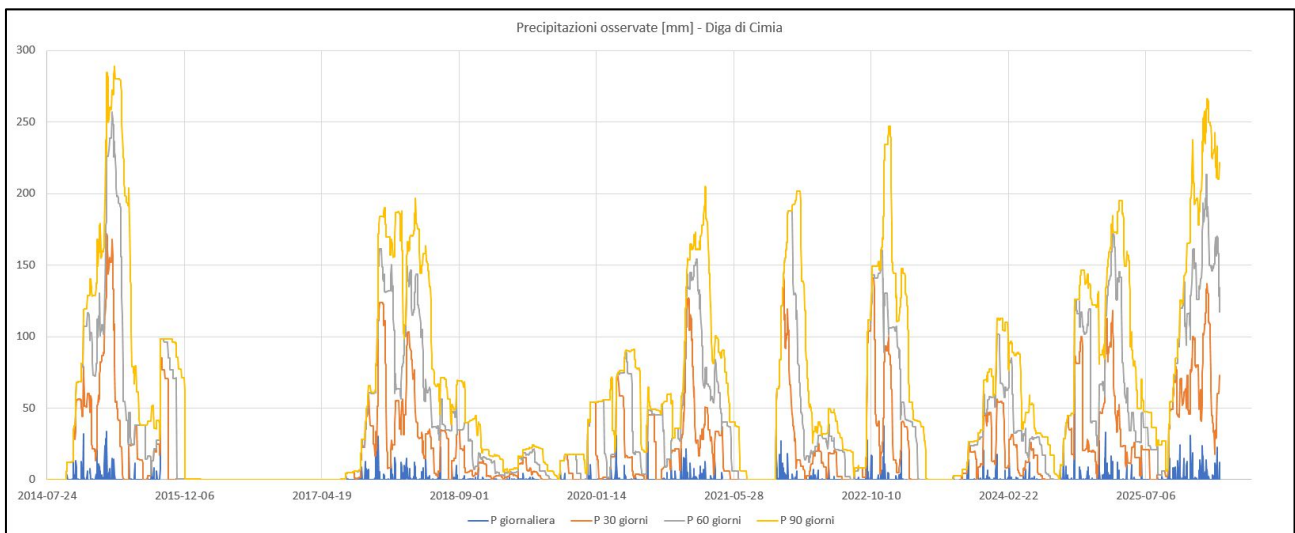


Figura 197 - Precipitazioni cumulate nei due giorni del ciclone Harry (20-21 gennaio 2026) sulla Sicilia stimate dalla fusione di osservazioni pluviometriche e rada. La posizione di Niscemi è indicata con un puntatore arancione (fonte myDewetra <https://mydewetra.org/>).



**Figura 198 - Precipitazioni cumulate su 1, 30, 60 e 90 giorni osservate alla stazione pluviometrica di Niscemi tra il 2011 e il 2026.**



**Figura 199 - Precipitazioni cumulate su 1, 30, 60 e 90 giorni osservate alla stazione pluviometrica Diga di Cimia tra il 2014 e il 2026.**

Percentili P al 31 gennaio 2026	30 giorni	60 giorni	90 giorni
Niscemi	95,1%	89,4%*	77,3%*
Diga di Cimia	96,0%	98,8%	98,5%

**Tabella 27 - Percentili delle precipitazioni cumulate nei 30, 60 e 90 giorni precedenti il 31 gennaio 2026 a Niscemi e Diga di Cimia. I valori contrassegnati da \* sono incompleti per mancanza di misurazione del dato a Niscemi prima del 18 dicembre 2025.**

## 9 Valutazione del rischio residuo nel centro abitato

Alla data del presente rapporto le frane di Niscemi si presentano ancora in evoluzione attiva. Le evidenze geomorfologiche (scarpate attive, fenditure aperte, deformazioni del piano campagna) indicano una persistente dinamica di movimento, in particolare nei versanti occidentali e meridionali.

L'analisi dei dati interferometrici satellitari post-evento (sezione 4.5) mostra come il centro abitato presenti condizioni di sostanziale stabilità. Tuttavia, la frana, e in particolare la sua scarpata principale che borda il paese, è suscettibile di evoluzione retrogressiva.

Sulla base delle geometrie osservate, del confronto con la frana del 1997 e dell'evento storico del 1790, è plausibile ipotizzare un ulteriore arretramento del ciglio di scarpata dell'ordine di alcune decine di metri, soprattutto in caso di nuovi eventi pluviometrici significativi.

Tale evoluzione potrebbe coinvolgere ulteriori edifici posti in prossimità del margine instabile e compromettere in modo permanente tratti di viabilità strategica.

Il rischio residuo per il centro abitato deve pertanto essere considerato elevato per la frana nel suo complesso, con particolare riferimento alle aree immediatamente retrostanti il ciglio della scarpata e ai settori già interessati dal movimento franoso.

Con i dati geotecnici, geofisici e di monitoraggio oggi a disposizione è tuttavia possibile analizzare la stabilità della scarpata principale valutando l'entità della sua futura retrogressione, in modo da ricalibrare l'estensione della "fascia rossa" di interdizione.

### 9.1 Modello di arretramento della scarpata principale

I materiali su cui sorge l'abitato di Niscemi sono costituiti da un livello superiore di sabbie talvolta addensate intercalate da livelli calcarenitici e limosi alla base, che poggiano con un contatto sub-orizzontale su un livello di argilla limosa.

Dalla documentazione disponibile risulta ben caratterizzato dal punto di vista geotecnico il materiale argilloso sottostante, a differenza della soprastante porzione sabbiosa/calcarenitica. Un riferimento attendibile di quest'ultimo è riportato in una sezione geologica di una relazione relativa a un intervento di stabilizzazione nell'area in oggetto realizzata dal Dott. Geol. Puccio (2010), dove si fa riferimento a un terreno granulare ( $c'=0$ ) con angolo di attrito variabile fra  $32^\circ$  e  $42^\circ$ .

Considerando le caratteristiche geotecniche dei materiali e le evidenze dell'evoluzione in atto sulla parete di neoformazione (Figura 200), si ritiene che il meccanismo di dissesto più probabile sia il graduale arretramento della parete con conseguente riduzione della pendenza per effetto di fenomeni estremamente superficiali, caratteristici di materiale a comportamento puramente attritivo come quello che costituisce il livello sabbioso soprastante.

Col tempo il materiale franato si accumula al piede formando una falda detritica che si va a raccordare con la parete disponendosi secondo l'angolo di riposo caratteristico del materiale. Per le presenti analisi si considera cautelativamente un angolo di riposo pari a  $30^\circ$ .



**Figura 200 - Particolare della scarpata principale della frana di Niscemi nella zona del quartiere Sante Croci. Immagine acquisita durante il sopralluogo da elicottero del 27 gennaio 2026 che mostra l'evoluzione in atto della scarpata con formazione di coni detritici.**

## **9.2 Evidenze di arretramento dal confronto tra rilievi topografici**

Nella Figura 201 è riportato il tasso di arretramento del ciglio della scarpata nei primi dieci giorni successivi all'evento, sulla base delle misurazioni effettuate dalla Regione Siciliana così come comunicate dal Prof. Francesco Castelli.

L'acquisizione di un nuovo rilievo topografico da drone nel periodo compreso fra il 31 marzo e il 3 aprile 2026 (sezione 8.1) ha consentito di quantificare l'arretramento della scarpata della Frana Centrale nel periodo intercorso dal rilievo acquisito dal Comune di Niscemi nelle immediatezze dell'evento (31 gennaio 2026).

Le nuvole di punti ad altissima risoluzione derivanti dai due rilievi, entrambe già proiettate nel sistema di coordinate WGS84 UTM 33N (EPSG: 32633), sono state per tale scopo ricampionate a 10 cm e co-registrate in quote ortometriche facendo riferimento al geoide EGM96. Successivamente, l'analisi delle variazioni tra i due prodotti è stata realizzata mediante un algoritmo di calcolo delle distanze di tipo *mesh-to-point*, nell'ottica di ottenere valori positivi o negativi in base all'orientazione spaziale della topografia originaria - nel caso in oggetto, valori negativi per arretramento/erosione della scarpata e valori positivi per accumulo/deposizione alla base della scarpata.

La Figura 202 mostra i risultati della procedura: si evince che, nel periodo considerato (circa due mesi), l'arretramento della scarpata non è stato uniforme per tutta la sua lunghezza, bensì è progredito principalmente in settori circoscritti con valori che non hanno oltrepassato 10 m.



**Figura 201 - Stima del tasso di arretramento (in rosso in metri) del ciglio della scarpata di frana per i primi dieci giorni successivi all'evento (per gentile concessione del Prof. Francesco Castelli).**

Questi settori di scarpata sono individuabili subito a sud del Belvedere, nel quartiere Sante Croci nei pressi dei punti terminali di via Roma e via Regina Margherita, all'altezza del plesso scolastico "San Giuseppe" e nel tratto compreso tra questi ultimi due (il cui dettaglio è riportato nei pannelli A e B della Figura 202).

Non si ravvisa un legame fra la nicchia di arretramento ubicata all'altezza del plesso scolastico "San Giuseppe" e i lenti spostamenti registrati dal sensore GNSS di INGV denominato NSGP (sezione 9.4).

Nella Figura 203 è illustrata l'evoluzione della topografia nel tempo, rispetto alla situazione pre-frana (2013), confrontando modelli digitali di elevazione (DEM) realizzati il 26 gennaio, il 31 gennaio e l'1-2 aprile 2026.

In essa sono mostrati i rapporti tra la parte di versante interessata dal distacco principale (profilo e superficie verde) e la sua evoluzione successiva, che porta alla formazione della scarpata e al suo arretramento con accumulo di materiale alla base (profili e superfici gialla, rossa e fucsia).

Le due sezioni analizzate, pur essendo molto vicine tra loro, mostrano che l'arretramento lungo la scarpata avviene con velocità e tempi diversi, come già osservato nella sezione 9.2.

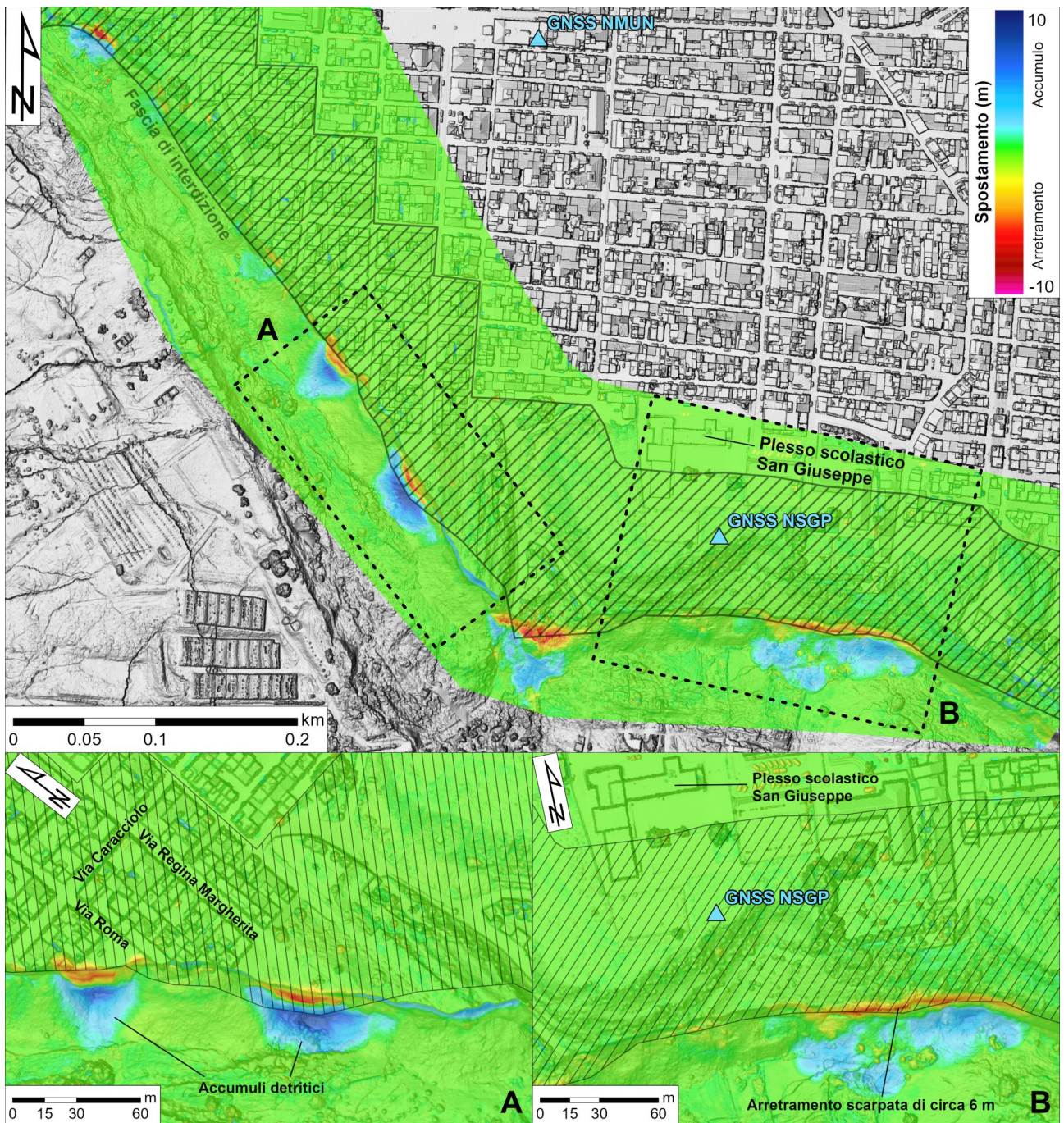


Figura 202 - Spostamenti ricavati dal confronto dei rilievi topografici da drone acquisiti dal Comune di Niscemi e dalla Fondazione CIMA. Valori negativi denotano processi di arretramento/erosione della scarpata, valori positivi processi di accumulo/deposizione alla base della scarpata.

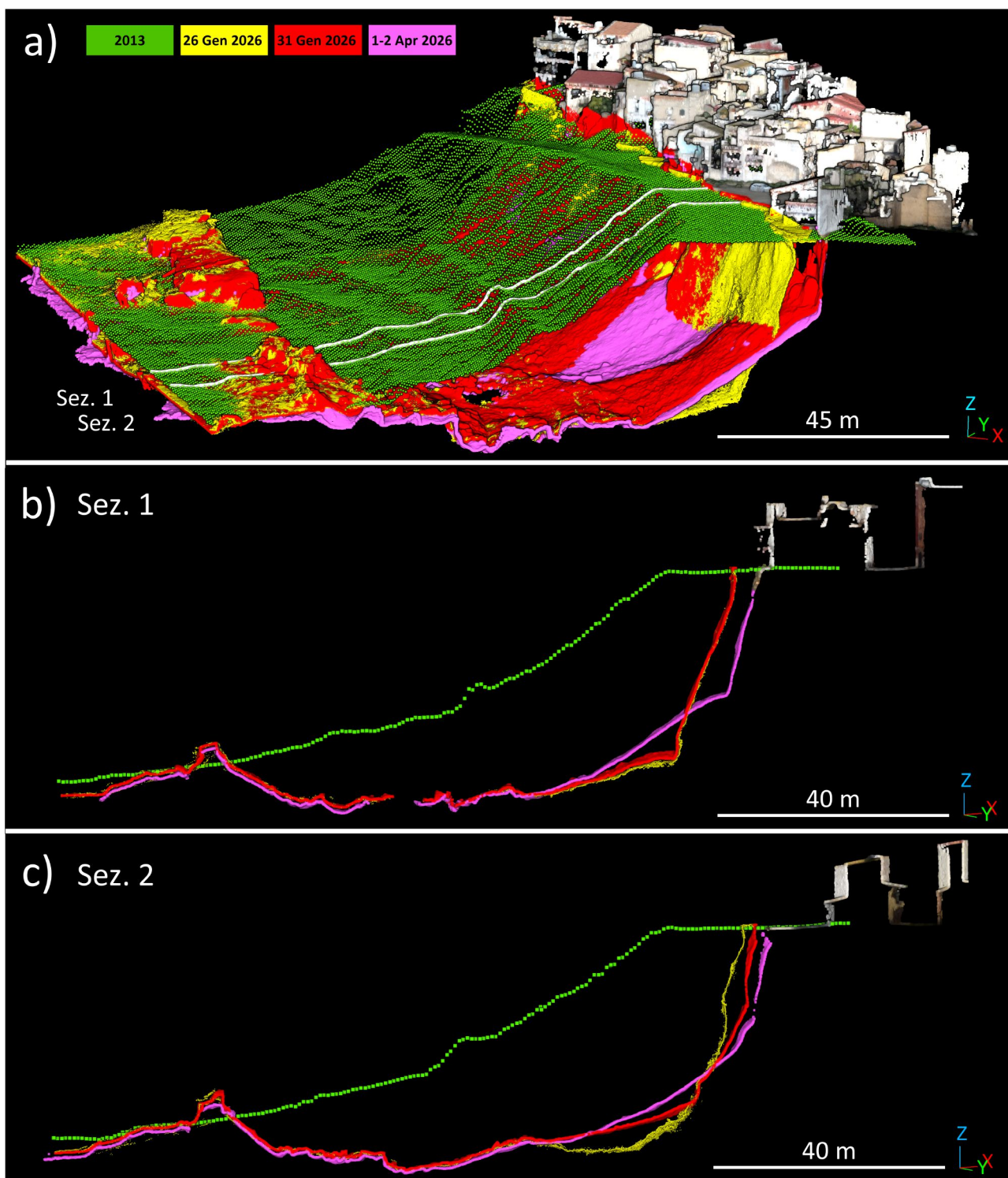


Figura 203 - Confronto nell'area del quartiere Sante Croci fra la topografia pre-frana (profilo e superficie verde da DTM MASE) e quella relativa al 26 gennaio (profilo e superficie gialla, da modello digitale CPC-UNIFI), 31 gennaio (profilo e superficie rossa da rilievo aerofotogrammetrico realizzato dal Comune di Niscemi) e 1-2 aprile (profilo e superficie fucsia da rilievo aerofotogrammetrico realizzato dalla Fondazione CIMA). Nel pannello a) sono inoltre identificate in bianco le tracce delle sezioni illustrate nei pannelli b) e c).

L'estensione del rilievo della Fondazione CIMA a tutto il corso del torrente Benefizio fino al suo sbocco nella piana di Gela ha inoltre reso possibile, mediante l'analisi delle differenze di quota rispetto al rilievo del Comune, valutare la risposta geomorfologica dell'alveo alle frane del gennaio 2026.

Dalla Figura 202 si evince una dinamica di generalizzato approfondimento dell'alveo (*i.e.*, differenze di quota negative), con valori medi approssimabili in circa 1-2 m e valori massimi che hanno anche raggiunto 5 m in corrispondenza di quei tratti del corso del torrente che più erano stati ostruiti dallo scoscendimento della

Frana Centrale. Si osservano inoltre fenomeni localizzati di frane di sponda, per lo più ubicati in tratti altamente acclivi lungo la sinistra idrografica (cioè al margine della Frana Sud).

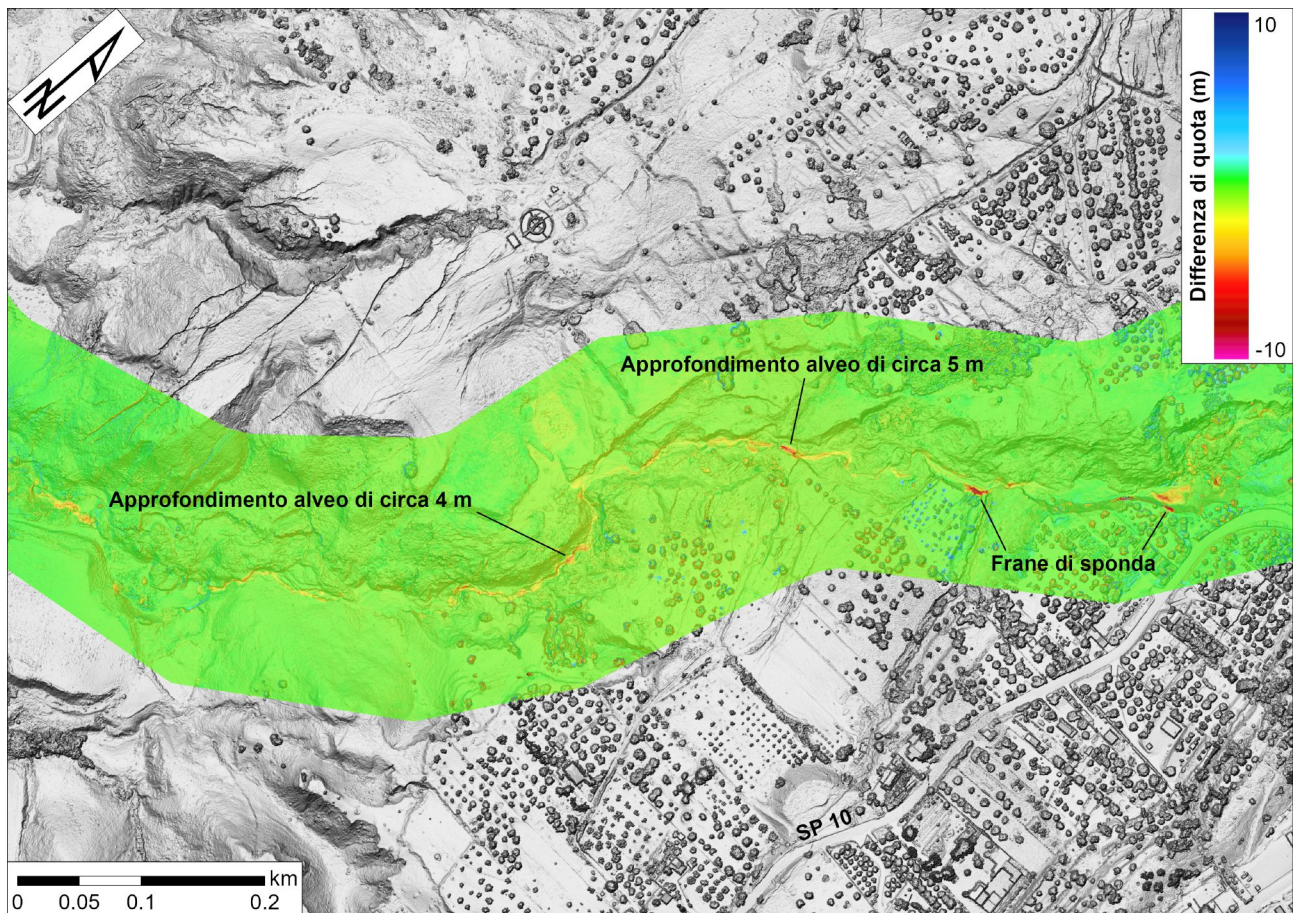


Figura 204 - Mappa delle differenze di quota ricavate in corrispondenza del corso del torrente Benefizio dal confronto dei rilievi topografici da drone acquisiti dal Comune di Niscemi e dalla Fondazione CIMA.

### 9.3 Scenari di arretramento in funzione del fattore di sicurezza

Sulla base delle osservazioni sopra riportate, è stato realizzato un profilo topografico utilizzando come base il rilievo aerofotogrammetrico del 31 gennaio e passante per la zona del quartiere Sante Croci, in un punto dove la parete non è ancora interessata da evidenti fenomeni di erosione e accumulo e dove risulta ancora evidente il contatto fra le sabbie e le argille sottostanti (Figura 205).

Tale scelta è ancora una volta a favore della sicurezza, in quanto nei settori dove la parete ha già subito un'erosione, le pendenze si sono già ridotte e ci si attende ragionevolmente un arretramento minore.

Lungo tale profilo sono state quindi tracciate a partire dal contatto sabbie-argille (che in tal punto affiora pressoché alla base della parete) le linee corrispondenti all'angolo di riposo ridotto secondo un fattore di sicurezza ( $F_s$ ) variabile da 1 a 2.9.

In particolare, il modello si basa sull'assunzione che l'angolo di riposo delle sabbie, equivalente a  $30^\circ$ , corrisponda all'angolo di attrito efficace  $\phi$ , per cui l'inclinazione delle linee corrispondenti ai diversi valori di  $F_s$  è data da:  $\tan \phi / F_s$ .

Ognuna di queste linee interseca il profilo topografico in corrispondenza del paese in un punto per il quale viene misurata la distanza a partire dall'orlo della scarpata alla data del rilievo utilizzato (31 gennaio).

Come si può osservare dalla Figura 206 alla Figura 212, tale valore varia da circa 44 m per  $F_s$  pari all'unità a 150 m per  $F_s$  pari a 2.9.

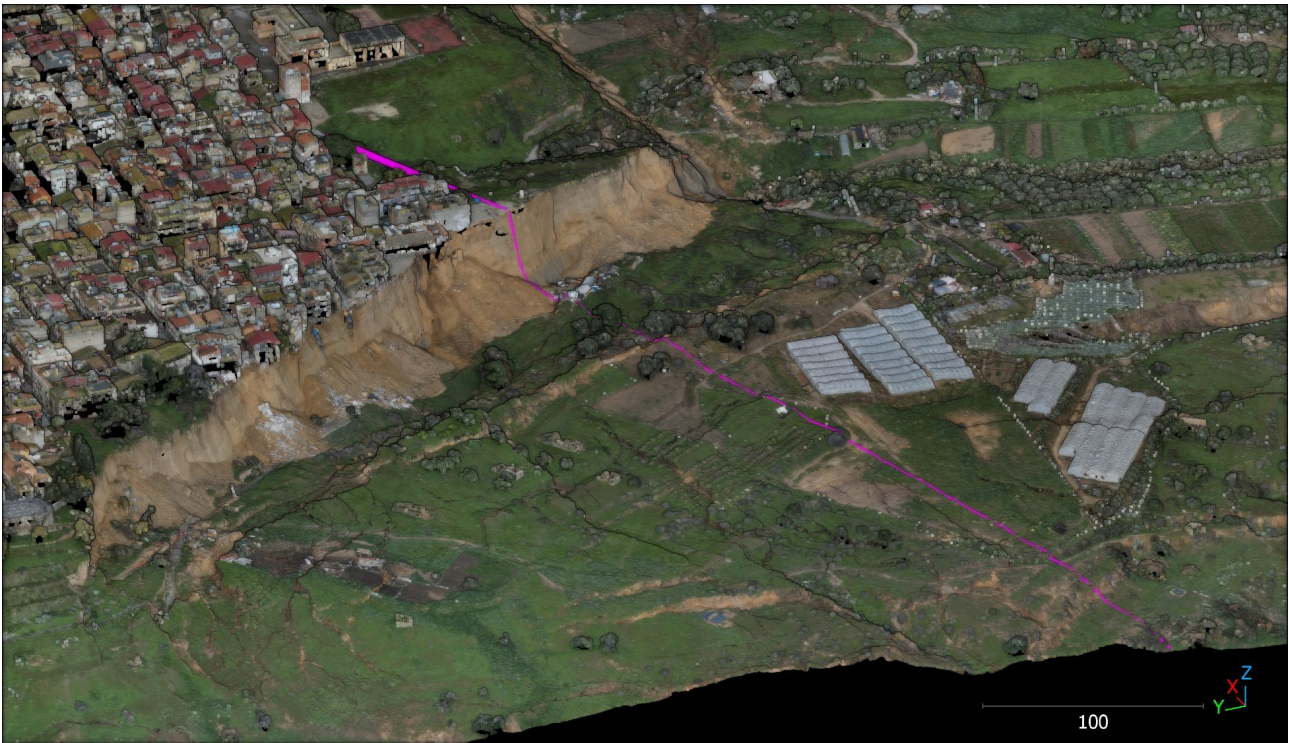


Figura 205 - Traccia della sezione (linea fucsia) utilizzata per la valutazione dell'arretramento della parete.

Si precisa che questa analisi considera la naturale evoluzione, già in atto, di graduale arretramento della scarpata di neoformazione ad elevata inclinazione, senza prendere in considerazione eventuali riattivazioni del corpo di frana principale, che possono prevedere fenomeni di arretramento più profondi, la cui entità può essere comunque cautelativamente assimilata a quella massima osservata in occasione dell'evento del 25-26 gennaio (25-30 m).

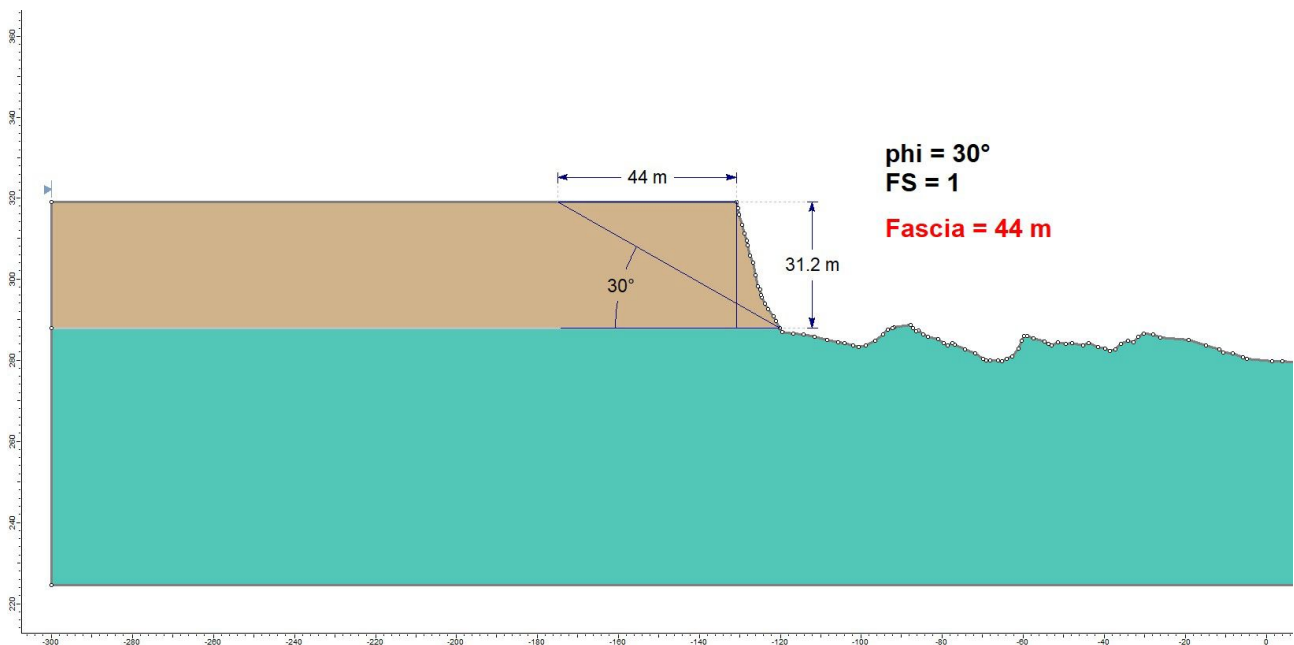


Figura 206 - Stima dell'arretramento della parete principale in corrispondenza del profilo analizzato considerando un Fattore di Sicurezza  $F_s=1$ , da cui risulta una fascia di rispetto di 44 m.

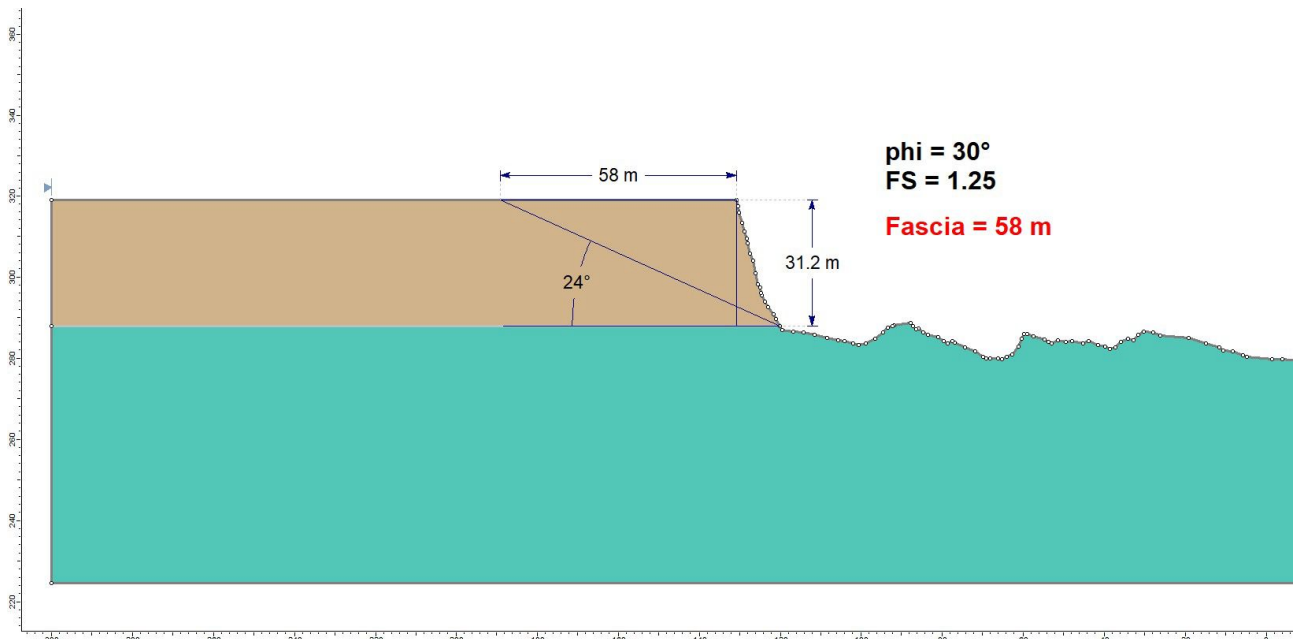


Figura 207 - Stima dell'arretramento della parete principale in corrispondenza del profilo analizzato considerando un Fattore di Sicurezza  $F_s=1.25$ , da cui risulta una fascia di rispetto di 58 m.

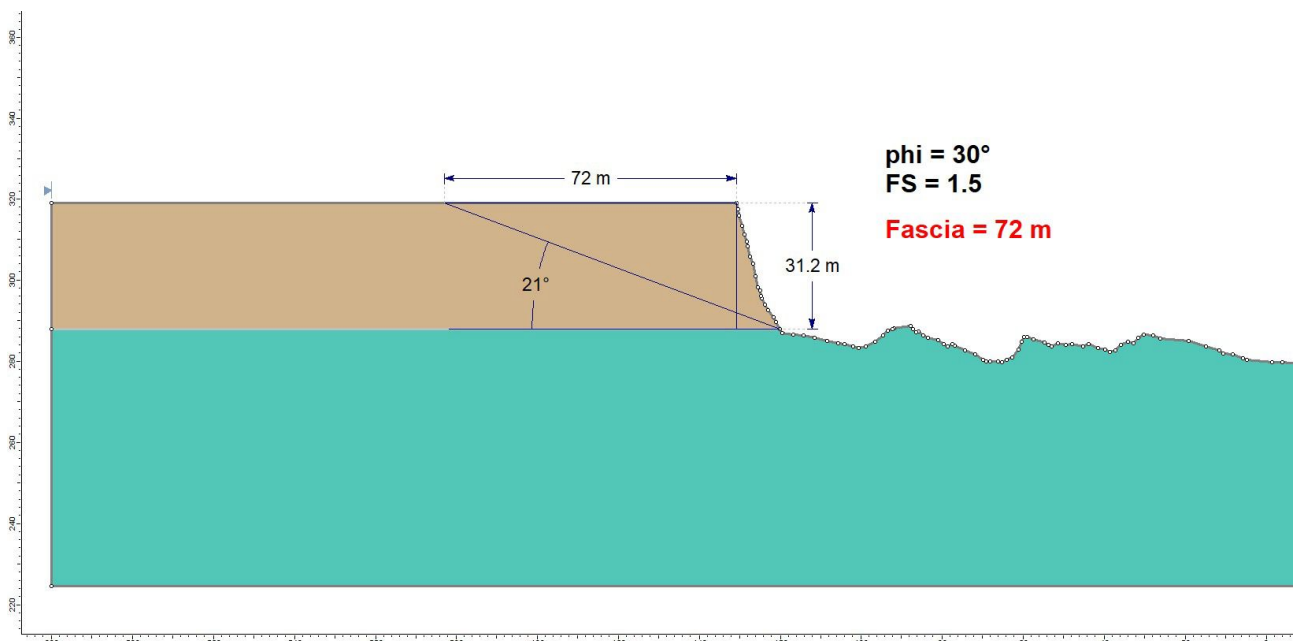


Figura 208 - Stima dell'arretramento della parete principale in corrispondenza del profilo analizzato considerando un Fattore di Sicurezza  $F_s=1.5$ , da cui risulta una fascia di rispetto di 72 m.

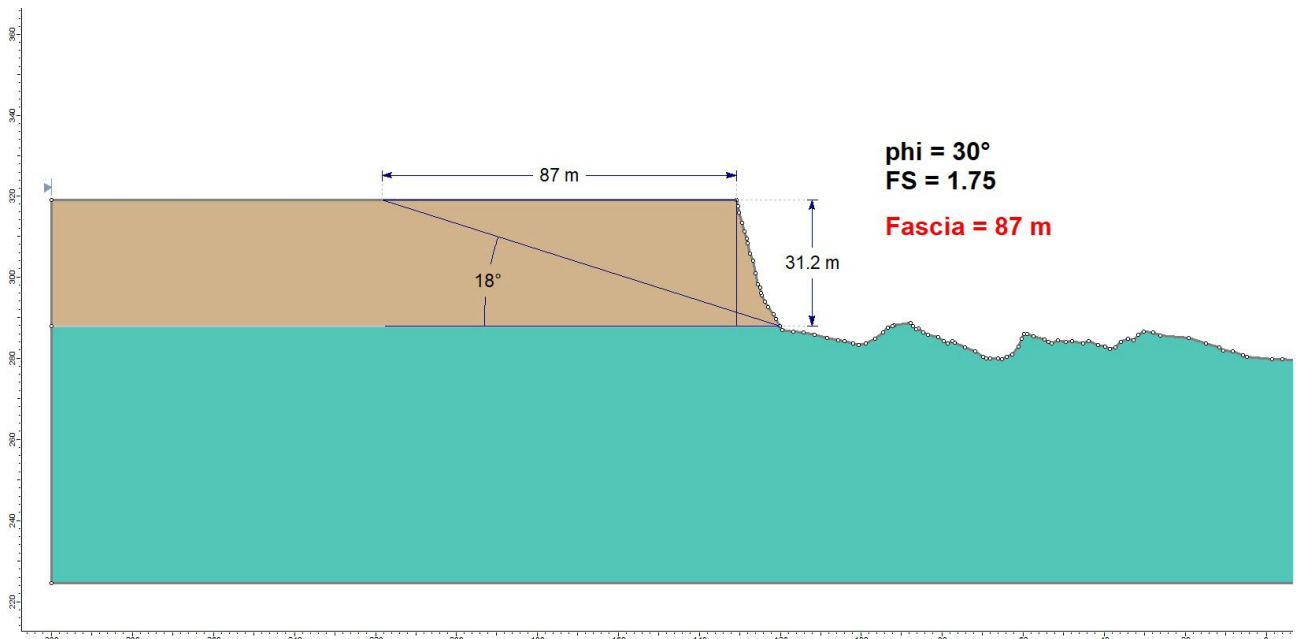


Figura 209 - Stima dell'arretramento della parete principale in corrispondenza del profilo analizzato considerando un Fattore di Sicurezza  $F_s=1.75$ , da cui risulta una fascia di rispetto di 87 m.

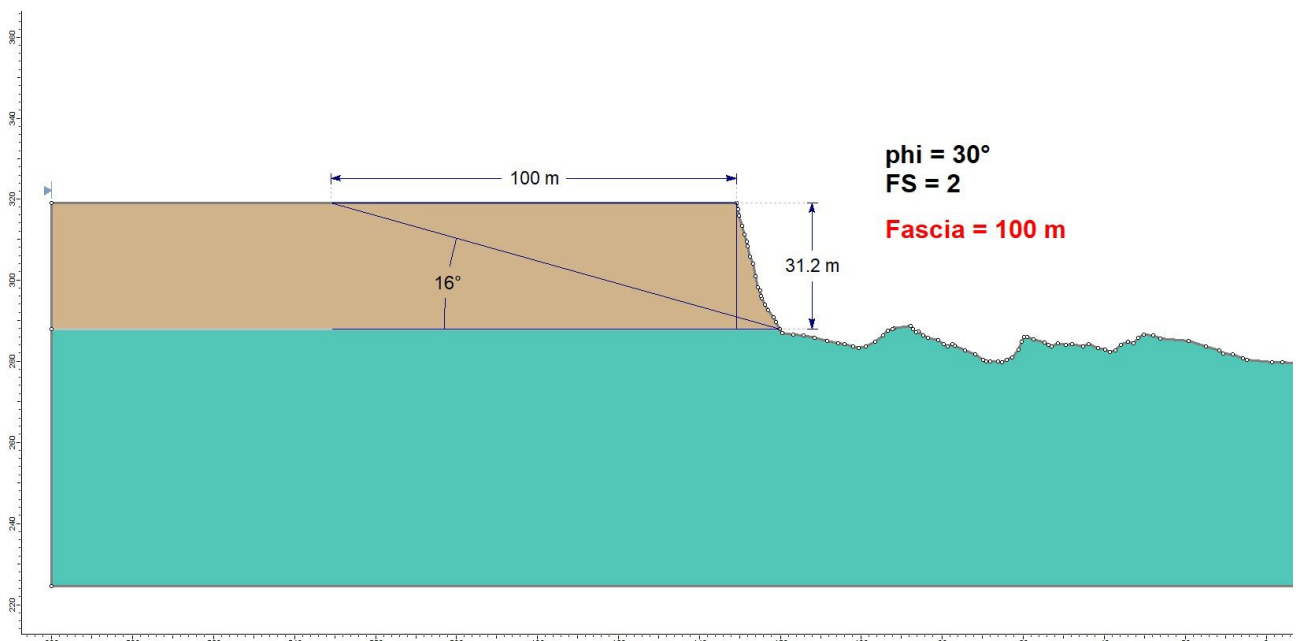
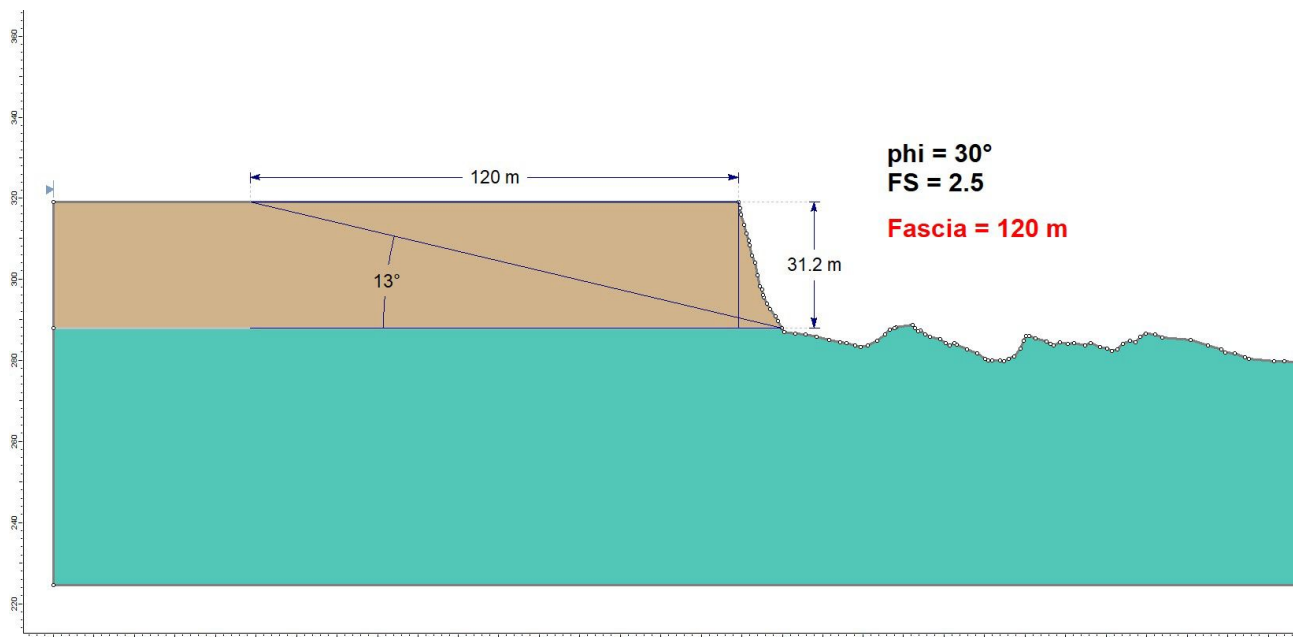
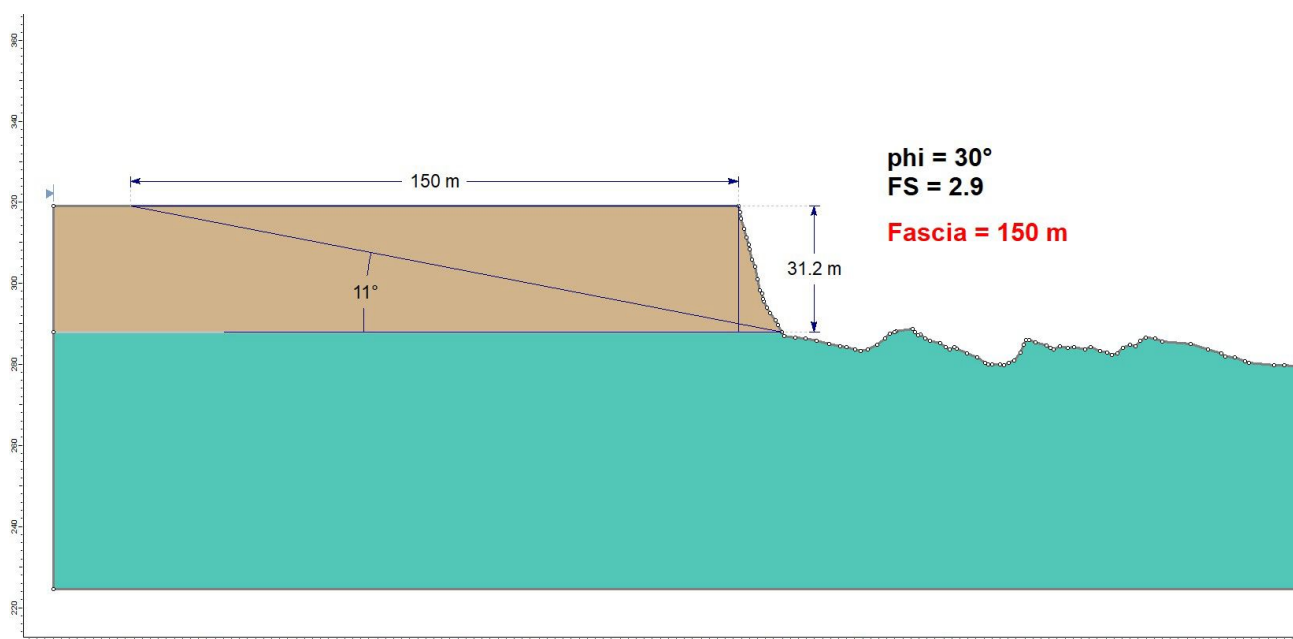


Figura 210 - Stima dell'arretramento della parete principale in corrispondenza del profilo analizzato considerando un Fattore di Sicurezza  $F_s=2$ , da cui risulta una fascia di rispetto di 100 m.



**Figura 211 - Stima dell'arretramento della parete principale in corrispondenza del profilo analizzato considerando un Fattore di Sicurezza  $F_s=2.5$ , da cui risulta una fascia di rispetto di 120 m.**



**Figura 212 - Stima dell'arretramento della parete principale in corrispondenza del profilo analizzato considerando un Fattore di Sicurezza  $F_s=2.9$ , da cui risulta una fascia di rispetto di 150 m.**

La fascia di interdizione fissata con ordinanza comunale nell'immediatezza dell'evento, estesa 150 m dalla scarpata di frana verso l'interno dell'abitato, corrisponde a un fattore di sicurezza molto elevato ( $F_s=2.9$ ).

Con tutte le precauzioni adottate nel modello, si ritiene di poter ragionevolmente adottare un fattore di sicurezza  $F_s=1.5$ , che comunque risulta superiore al valore  $F_s=1.25$  previsto dalla vigente normativa per la componente attritiva della resistenza al taglio dei terreni (Norme Tecniche per le Costruzioni, D.M. 17 gennaio 2018).

Nella Figura 213 è rappresentata la fascia di arretramento per  $F_s=1.5$  estrapolando lo schema di calcolo geometrico sopra illustrato a tutta la lunghezza della scarpata che delimita la frana centrale a ridosso del centro abitato.

A tal fine il ciglio della scarpata è stato discretizzato in tanti punti e per ognuno di essi si è calcolato il dislivello fra il ciglio stesso e il piede; laddove il piede della scarpata è ricoperto da cono detritico, è stato trovato il

punto di intersezione fra la pendenza della scarpata (sempre assunta cautelativamente pari a  $70^\circ$ ) e il piano orizzontale che si origina dal piede del cono detritico.

Dal piede della scarpata, reale o ricostruito, è stata di conseguenza calcolata punto per punto la distanza di arretramento del ciglio della scarpata corrispondente a un angolo di  $21^\circ$  (cioè  $\tan\phi'/1,5$ ). La distanza di arretramento stimata in corrispondenza degli edifici è generalmente compresa fra 50-70 m, con un valore massimo pari a circa 83 m.

Tenuto conto che il ciglio della scarpata ha registrato un ulteriore arretramento di alcuni metri rispetto al rilievo topografico da drone del 31 gennaio 2026 utilizzato per le analisi, si raccomanda, in via prudenziale, di prevedere una fascia di interdizione nel centro abitato non inferiore a 100 m dal ciglio stesso, con possibilità di aggiornamento sulla base dei risultati del monitoraggio e delle indagini geognostiche.

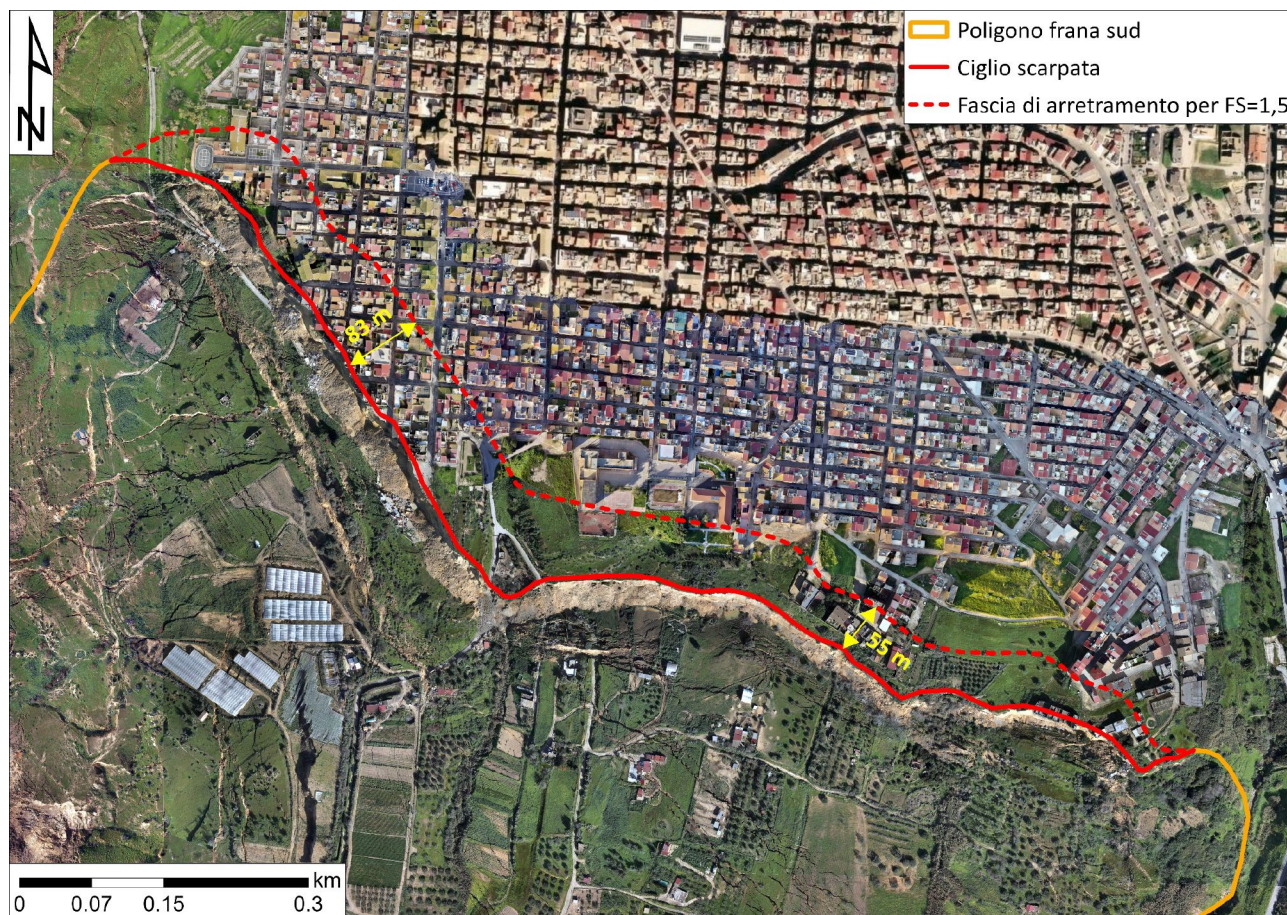


Figura 213 - Distanza di arretramento della scarpata della frana centrale considerando un Fattore di Sicurezza  $F_s=1.5$ .

#### 9.4 Monitoraggio dei movimenti nella fascia di interdizione

Come evidenziato dall'analisi interferometrica post-evento di tutte le immagini satellitari acquisite (Capella Space, Sentinel-1, COSMO-SkyMed, PlanetScope), il centro abitato di Niscemi e la fascia di interdizione non risultano interessati da movimenti significativi (sezioni 4.5 e 5.3).

Tale osservazione è generalmente confermata anche dai sensori GNSS installati dall'INGV, la maggior parte dei quali mostra spostamenti non significativi e con direzione non coerente con l'andamento dei versanti (Figura 214 e Figura 215).

L'unica eccezione è rappresentata dal sensore denominato NSGP, ubicato sul ciglio della scarpata della frana centrale nei pressi della sede del plesso scolastico "San Giuseppe" (Figura 216); quest'ultimo manifesta, infatti, già a partire dall'inizio del monitoraggio, spostamenti verso sud quantificabili in circa un centimetro al mese (Figura 217).

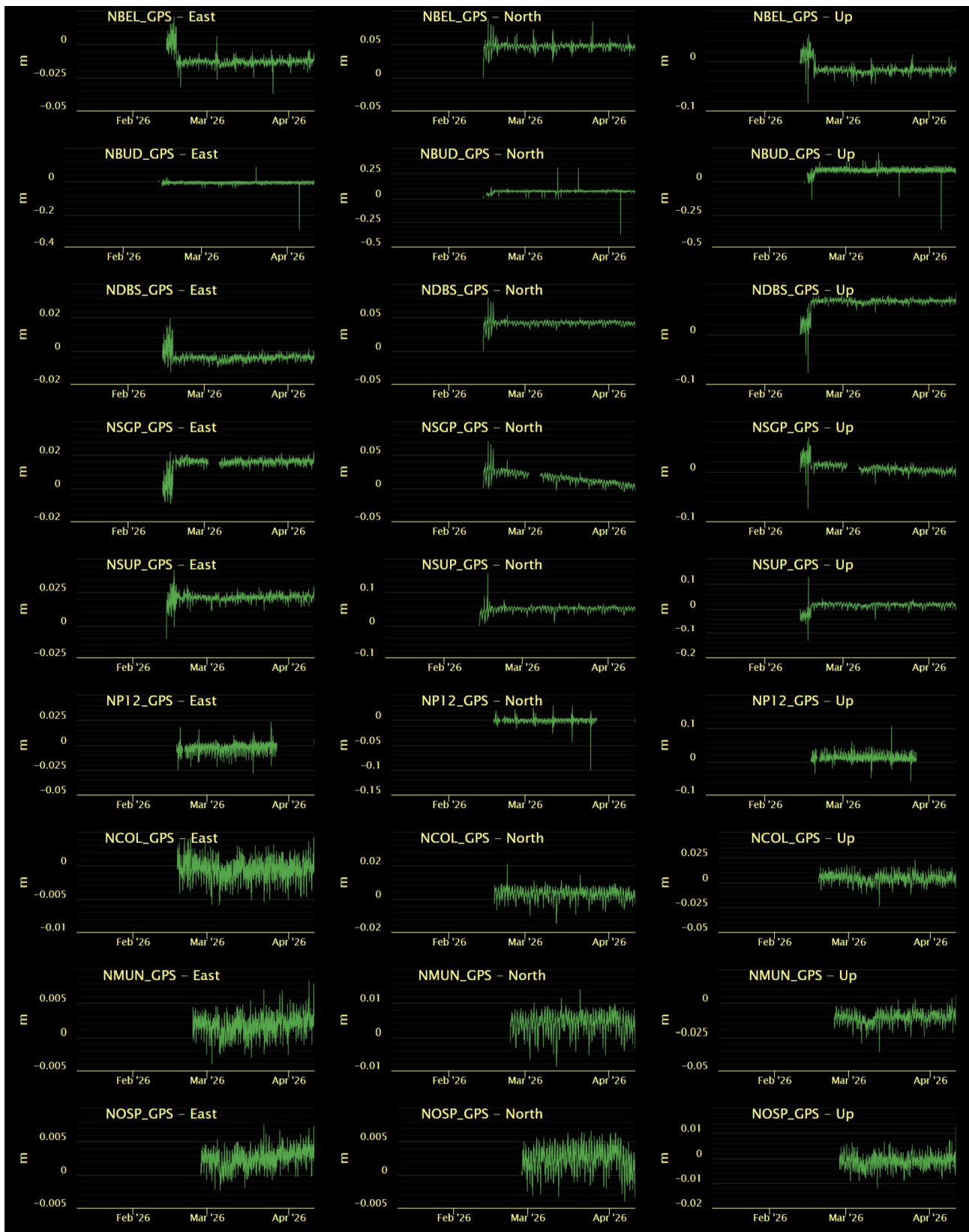


Figura 214 - Serie temporali delle componenti di spostamento delle stazioni di monitoraggio GNSS dell'INGV.

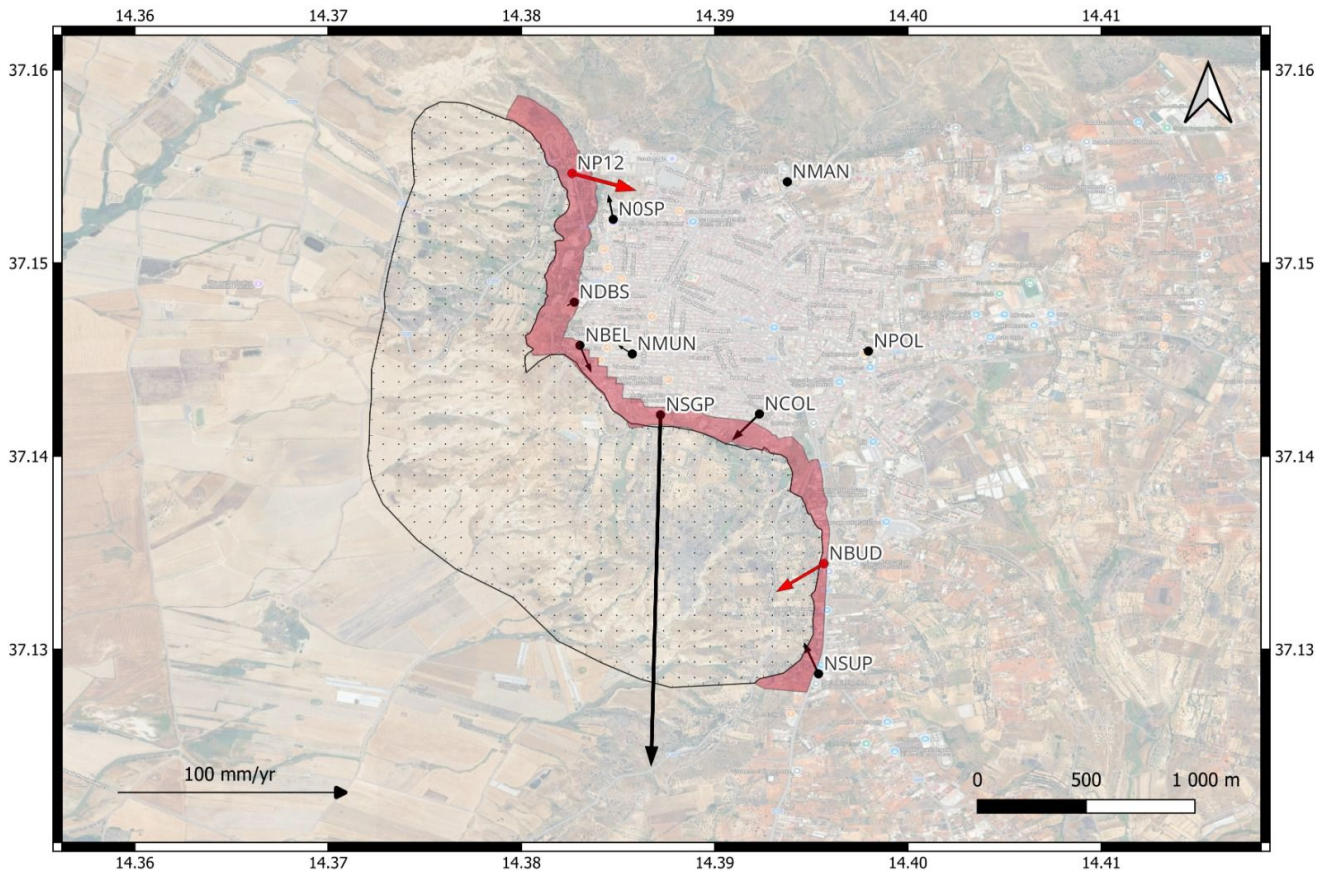
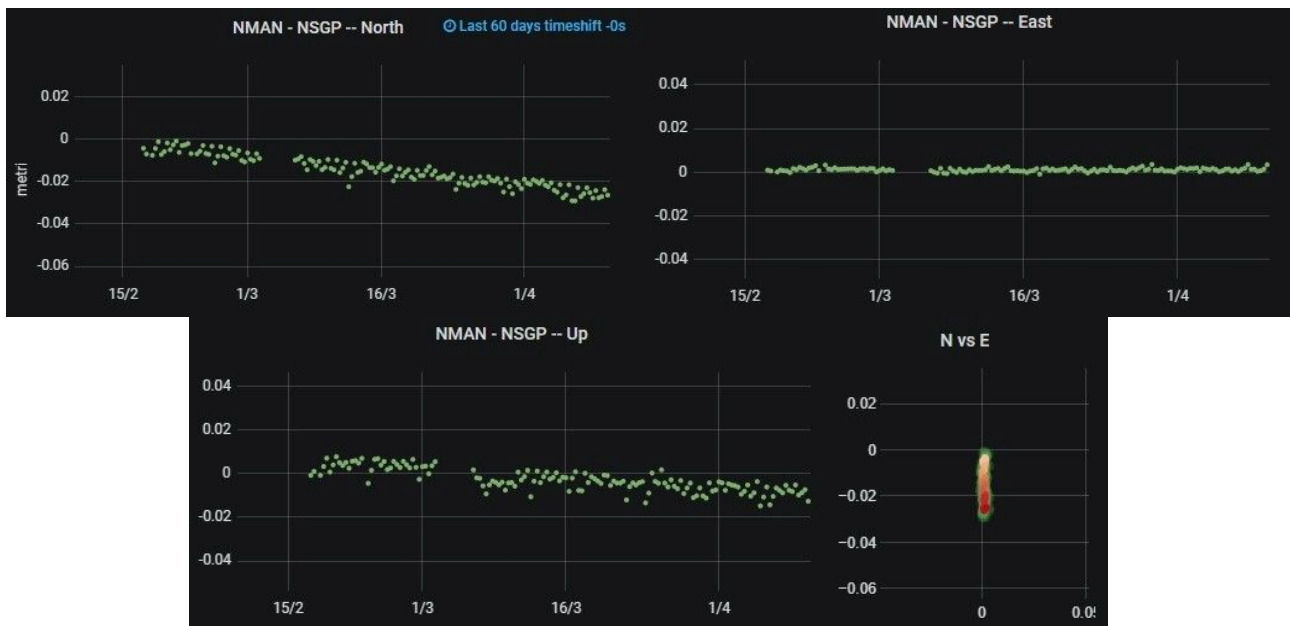


Figura 215 - Ubicazione planimetrica delle stazioni di monitoraggio GNSS dell'INGV con vettori spostamento. Fonte: INGV.



Figura 216 - Ubicazione del sensore GNSS denominato NSGP e localizzato sul ciglio della scarpata nei pressi del plesso scolastico "San Giuseppe". Foto: INGV.



**Figura 217 - Componenti di spostamento del sensore GNSS installato nei pressi del plesso scolastico “San Giuseppe”.**

L’evidenza degli spostamenti rilevati dal sensore NSGP trova corrispondenza nei risultati dell’analisi interferometrica ottenuta da dati Sentinel-1 elaborati con tecnica SBAS.

In questo caso, al fine di evidenziare gli spostamenti differenziali, è stata adottata una finestra di stabilità pari a  $\pm 0,2$  cm. In Figura 218 e Figura 219 sono riportate, rispettivamente per la geometria ascendente (31 gennaio 2026 - 7 aprile 2026) e discendente (7 febbraio 2026 - 8 aprile 2026), le mappe degli spostamenti differenziali e le relative serie temporali per i punti identificati in prossimità del sensore GNSS NSGP.

Dall’analisi delle mappe di spostamento, si evince come il dato in orbita discendente risulti più efficace nel descrivere la cinematica in atto rispetto a quello in orbita ascendente. Quest’ultimo non mostra variazioni significative nelle serie temporali dei punti di misura (*MPs - Measurement Points*) analizzati. In particolare, l’analisi di dettaglio condotta sulla geometria ascendente mostra come i punti selezionati rientrino all’interno della finestra di stabilità, mentre le relative serie temporali non evidenziano tendenze significative. Al contrario, la geometria discendente mostra in mappa punti con spostamento differenziale al di fuori della finestra di stabilità, che trova riscontro nelle serie temporali: queste mostrano infatti una netta variazione in corrispondenza dell’evento di gennaio 2026, seguita da una tendenza di progressivo allontanamento dal sensore lungo la linea di vista del satellite (LOS).

Tale quadro conferma come la geometria discendente risulti più sensibile ai segnali deformativi rispetto a quella ascendente nel contesto specifico dell’area in esame. Questa discrepanza è riconducibile alla geometria di acquisizione del sensore; nella proiezione lungo la LOS della geometria discendente, le componenti di spostamento verticale e quelle orizzontali verso ovest si sommano, poiché entrambe vengono lette come un allontanamento dal satellite. Al contrario, lungo la LOS della geometria ascendente, le medesime componenti tendono a compensarsi reciprocamente, dato che il movimento verticale indica un allontanamento, mentre quello verso ovest si traduce in un avvicinamento al sensore, attenuando così il segnale complessivo rilevato.

Alla luce delle considerazioni esposte, gli spostamenti misurati dal sensore GNSS NSGP trovano quindi corrispondenza, con un certo grado di approssimazione, con la tendenza deformativa identificata dal dato radar satellitare.

Conseguentemente ai movimenti in atto rilevati, seppur localizzati, si raccomanda di procedere con verifiche e controlli *in situ* al fine di accertare l’evoluzione del fenomeno e di mantenere l’assoluta interdizione all’accesso nella fascia rossa, quale misura precauzionale a tutela della pubblica incolumità.



**Figura 218 -** Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1 in geometria ascendente, elaborati con tecnica SBAS, nell'intervallo di tempo 31 gennaio 2026 - 7 aprile 2026, nell'area circostante il plesso scolastico "San Giuseppe". A destra, le serie temporali dei punti evidenziati in mappa.



**Figura 219 -** Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1 in geometria discendente, elaborati con tecnica SBAS, nell'intervallo di tempo 7 febbraio 2026 - 8 aprile 2026, nell'area circostante il plesso scolastico "San Giuseppe". A destra, le serie temporali dei punti evidenziati in mappa.

## 9.5 Gestione del rischio residuo a breve termine nel centro abitato

In base alle precedenti considerazioni, il principale scenario di rischio residuo a breve termine nel centro abitato riguarda l'arretramento progressivo della scarpata formatasi a seguito della fase parossistica del movimento. Si tratta di un processo in parte inevitabile e naturale, mediante il quale il versante tende a ristabilire un nuovo profilo di equilibrio.

Nel breve periodo, la priorità assoluta rimane la salvaguardia della pubblica incolumità in relazione alla nuova morfologia determinatasi.

Si ritiene pertanto necessario:

- mantenere attive le ordinanze di inagibilità per gli edifici situati in prossimità del ciglio della scarpata;
- confermare una fascia di interdizione di almeno 100 m dal margine della scarpata (corrispondente a fattori di sicurezza superiori a 1,5), con possibilità di aggiornamento sulla base dei risultati del monitoraggio e delle indagini geognostiche;
- prevedere la delocalizzazione degli edifici ubicati entro una fascia di 50 m dal margine della scarpata (corrispondente a fattori di sicurezza minori di 1,25).

Per quanto riguarda la viabilità, si raccomanda:

- la conferma dell'interdizione dei tratti stradali interferenti con il corpo di frana, con particolare riferimento alla SP10 e alla SP12;
- il mantenimento di un monitoraggio continuo della SP11, data la sua prossimità alle aree in movimento, con controllo dello stato di fessurazione dei terreni e delle strutture a valle della carreggiata, anche mediante strumentazione automatica;
- la pianificazione e comunicazione tempestiva di percorsi alternativi sicuri, al fine di garantire l'accessibilità al centro abitato e la continuità dei servizi essenziali evitando il transito in prossimità di aree potenzialmente instabili.

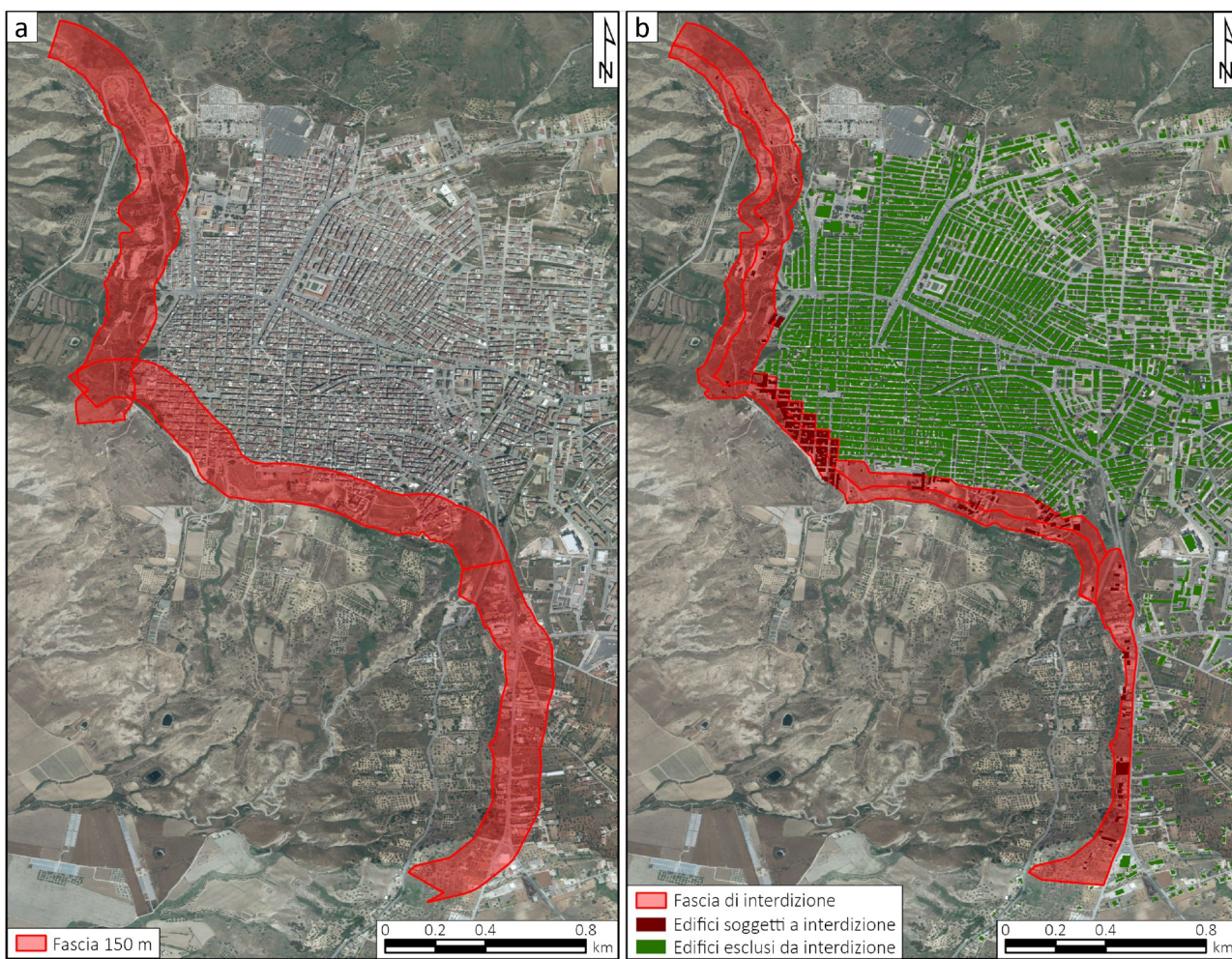
## 9.6 Aggiornamento della fascia di interdizione

Sulla base delle precedenti considerazioni, il Commissario straordinario, nominato ai sensi del Decreto-Legge 27 febbraio 2026 n.25 ha proposto al comune di Niscemi la riduzione della fascia di interdizione da 150 m a 100 m dal ciglio della scarpata nel centro abitato in corrispondenza della frana centrale in quanto tale riduzione: *“appare idonea a garantire un adeguato margine di sicurezza per la popolazione ed è coerente con un approccio conservativo alla gestione del rischio residuo. Si precisa che gli immobili solo parzialmente ricadenti entro tale fascia devono considerarsi esclusi dalla medesima e, pertanto, non soggetti a interdizione.”*

Tale provvedimento, recepito dall'ordinanza sindacale n. 19 del 28 febbraio 2026, è stato ritenuto idoneo a garantire un adeguato margine di sicurezza e coerente con la gestione del rischio residuo.

In Figura 220 sono riportate la fascia di interdizione stabilite con l'Ordinanza sindacale n.12 del 28 gennaio 2026 all'indomani della frana e la nuova fascia stabilita con l'Ordinanza sindacale n.19 del 28 febbraio 2026. Si specifica che la riduzione riguarda esclusivamente il settore della frana centrale. La rimodulazione visibile in corrispondenza della frana sud è derivata da una precedente ordinanza sindacale legata alla viabilità sulla SP11.

Conseguentemente, in Figura 220 gli edifici sono stati classificati in funzione della nuova perimetrazione della fascia distinguendo tra gli edifici soggetti a interdizione e gli edifici esclusi dalla fascia di interdizione. Coerentemente con le disposizioni del Commissario straordinario, tale categoria comprende anche i manufatti solo parzialmente interessati dal perimetro, per i quali è stata confermata la revoca del provvedimento di interdizione.



**Figura 220 - Evoluzione delle misure di salvaguardia nel centro abitato di Niscemi: (a) fascia di interdizione di 150 m stabilita all'indomani dell'evento franoso con Ordinanza sindacale n.12 del 28/01/2026; (b) rimodulazione del perimetro a seguito della nota del Commissario straordinario e dell'Ordinanza sindacale n. 19 del 28/02/2026. Sono evidenziati in rosso gli edifici soggetti a interdizione e in verde quelli esclusi dal provvedimento.**

## 10 Scenari di rischio e strategie di riduzione del rischio

### 10.1 Scenari di rischio

Nel quadro evolutivo delineato nel presente rapporto, l'evento del 2026 si configura come una nuova fase di riattivazione, con contestuale ampliamento areale, di un sistema franoso complesso e a carattere persistente.

L'attività del dissesto risulta ampiamente documentata in ambito storico e geomorfologico e ha già manifestato fasi di significativa riattivazione, tra cui quella del 1997, a sua volta riconducibile alla riattivazione di un movimento gravitativo preesistente, attestato almeno a partire dalla fine del XVIII secolo.

In tale prospettiva, l'evento attuale non rappresenta un fenomeno isolato, bensì un'evoluzione coerente nell'ambito della dinamica di lungo periodo del versante. Ne consegue che le valutazioni e i criteri di intervento formulati dal Comitato Tecnico Scientifico in occasione della riattivazione del 1997 (Castiglione *et al.*, 2000) mantengono sostanziale validità concettuale e metodologica.

Tali considerazioni vengono pertanto riprese nel presente rapporto e ricalibrate alla luce delle nuove evidenze morfologiche, geotecniche e idrogeologiche emerse nel contesto attuale.

In totale accordo con le conclusioni di Castiglione *et al.* (2000) si deve preliminarmente riconoscere che le dimensioni, la complessità morfologica e la natura geologica del complesso franoso di Niscemi confermano, anche alla luce delle più recenti evidenze di campo e delle indagini in corso, l'impossibilità di conseguire una stabilizzazione definitiva dell'intero sistema di versante mediante interventi strutturali estensivi.

Tale conclusione non deriva esclusivamente da valutazioni di natura economica o di rapporto costi-benefici, ma soprattutto da considerazioni tecniche e geomeccaniche relative:

- alla scala del fenomeno, che coinvolge volumi molto estesi e superfici di scivolamento profonde;
- alla presenza di materiali con marcato contrasto meccanico e idrogeologico, in particolare sabbie poco cementate sovrastanti argille e limi a bassa permeabilità;
- alla dinamica regressiva del fenomeno, con arretramento della scarpata e continua riorganizzazione morfologica, che rende incerti gli effetti a lungo termine di eventuali interventi di stabilizzazione puntuale;
- al ruolo determinante dei processi idrologici e geomorfologici attivi, in particolare l'erosione al piede dei versanti e l'infiltrazione diffusa delle acque;
- al controllo tettonico e all'influenza di processi deformativi profondi, ancora poco investigati;
- all'influenza crescente degli eventi meteorologici intensi, che possono determinare rapide variazioni delle condizioni di stabilità.

La gestione della criticità idrogeologica attualmente in atto sui versanti occidentale e meridionale di Niscemi impone quindi un approccio graduale, differenziato e adattivo, fondato sulla distinzione tra differenti scenari di rischio.

#### 10.1.1 Arretramento della scarpata di neoformazione

L'arretramento progressivo della scarpata formatasi in seguito alla fase parossistica del movimento rappresenta, come si è visto nella sezione 8, un processo in parte naturale e difficilmente evitabile, attraverso il quale il versante tende gradualmente a raggiungere un nuovo assetto di equilibrio. Si ritiene che gli interventi non possano essere orientati alla ricostruzione della morfologia preesistente, ma debbano accompagnare l'evoluzione del pendio attraverso:

- opere di riprofilatura ove tecnicamente possibile;
- regimazione delle acque superficiali;
- protezione dall'erosione diffusa.

### 10.1.2 Riattivazione del fenomeno profondo

Tale scenario di rischio riguarda l'eventuale riattivazione del movimento profondo, con mobilitazione dell'intera massa lungo superfici di scivolamento già impostate su livelli a resistenza residua.

L'evoluzione recente della frana ha consentito l'osservazione diretta del contatto tra sabbie e argille sottostanti. Tale contatto evidenzia un marcato contrasto di permeabilità che, unitamente all'assetto debolmente a franapoggio della stratificazione, favorisce fenomeni di filtrazione diffusa e localmente concentrata.

In diversi punti sono state osservate portate significative anche a distanza di giorni dalla fase parossistica, con fenomeni di sifonamento ed erosione di materiale. È importante sottolineare che, prima dell'esposizione del contatto litologico, tali acque si riversavano direttamente nella massa in frana, emergendo solo in minima parte durante eventi pluviometrici intensi.

Le evidenze pluviometriche indicano inoltre una risposta relativamente rapida del sistema (ordine di circa tre giorni) agli eventi piovosi intensi. Tali tempi risultano difficilmente compatibili con la sola permeabilità delle argille, suggerendo un controllo strutturale del dissesto: fratture e discontinuità agiscono infatti come vie preferenziali di infiltrazione verso i livelli profondi, contribuendo all'aumento delle pressioni interstiziali lungo le superfici di scivolamento.

Prima di intervenire direttamente sul corpo di frana, è pertanto necessario:

- comprendere in modo approfondito il regime idrogeologico;
- individuare le cause d'innescio e i percorsi preferenziali dell'acqua;
- attendere una significativa riduzione o stabilizzazione delle velocità di movimento;
- operare esclusivamente in condizioni di sicurezza, supportate da monitoraggio continuo.

## 10.2 Strategie di mitigazione del rischio

Le strategie di mitigazione del dissesto devono essere articolate su diversi orizzonti temporali, tenendo conto sia della complessità dei processi geomorfologici in atto sia dell'evoluzione attesa del versante.

In questa prospettiva è utile distinguere tra interventi attuabili nel medio periodo, finalizzati principalmente al controllo dei fattori che favoriscono l'evoluzione della frana, e strategie di più lungo termine, che potranno essere definite solo sulla base di una più approfondita caratterizzazione geologica e geotecnica del sistema franoso.

### 10.2.1 Strategie di mitigazione nel medio periodo

Nel medio periodo, la strategia di mitigazione dovrà concentrarsi prioritariamente sui principali processi che contribuiscono all'evoluzione della frana, con i seguenti obiettivi:

- ridurre l'infiltrazione proveniente da monte;
- captare e canalizzare le emergenze nei punti a maggiore portata, una volta stabilizzata la scarpata sommitale;
- regimare le acque meteoriche e gli impluvi;
- proteggere il piede del versante dall'erosione;
- intervenire sulla stabilizzazione e, ove necessario, sull'impermeabilizzazione di aree critiche, quali l'alveo del torrente Benefizio.

Tali obiettivi potranno essere perseguiti attraverso un insieme coordinato di interventi di natura idraulica, idrogeologica e geotecnica, finalizzati al controllo delle pressioni interstiziali e alla riduzione dei processi erosivi, mediante:

- la riduzione dell'erosione al piede dei versanti con opere di regimazione idraulica nei principali impluvi, quali briglie selettive, opere dissipative e interventi di stabilizzazione delle sponde;

- la regimazione e l'allontanamento controllato delle acque superficiali provenienti dall'abitato, attraverso il miglioramento e la manutenzione della rete di drenaggio urbano e la separazione efficace delle acque meteoriche e reflue dal corpo di frana;
- la riduzione dell'infiltrazione diffusa mediante la manutenzione delle superfici, la gestione delle fratture e delle depressioni e la protezione dei versanti;
- l'individuazione e l'eliminazione di eventuali perdite del sistema acquedottistico;
- il miglioramento delle condizioni idrogeologiche mediante sistemi di drenaggio superficiale e profondo, da progettare sulla base di un'adeguata caratterizzazione geologica e geotecnica;
- la protezione dei versanti mediante interventi di ingegneria naturalistica e la gestione della copertura vegetale, al fine di ridurre l'erosione superficiale.

Tali interventi non sono in grado di stabilizzare la frana, ma contribuiscono a rallentarne l'evoluzione e a ridurre la probabilità di riattivazioni e accelerazioni del movimento.

### 10.2.2 Strategie di mitigazione nel lungo periodo

È in corso una campagna di indagini finalizzata a definire la profondità e le caratteristiche dei livelli di scivolamento basali. Solo a valle di tale caratterizzazione potranno essere progettate opere strutturali di consolidamento della scarpata e del versante.

Considerata l'estensione planimetrica del dissesto, la profondità delle superfici di scivolamento e la complessità dei meccanismi di instabilità, una stabilizzazione efficace e durevole fondata esclusivamente su opere strutturali - quali grandi palificate, muri di sostegno o sistemi di paratie tirantate - appare tecnicamente complessa, economicamente gravosa e, in prospettiva, di limitata efficacia.

Anche qualora tali interventi risultassero localmente realizzabili, essi inciderebbero prevalentemente sulle porzioni superficiali del versante, senza modificare in modo sostanziale i meccanismi profondi dell'instabilità.

Come già rilevato da Castiglione *et al.* (2000), analoghe criticità si riscontrano nel caso di interventi strutturali estensivi, quali il completo ritombamento delle principali incisioni (in particolare quella del torrente Benefizio), la gradonatura generalizzata dei versanti o la stabilizzazione delle scarpate di distacco mediante opere di sostegno continue.

Tali soluzioni presenterebbero ancora oggi rilevanti problematiche operative e un'elevata incertezza in termini di risultati attesi, a causa delle complesse condizioni geomorfologiche e geotecniche del sito.

Alla luce di tali considerazioni, un approccio fondato esclusivamente su interventi strutturali massivi non appare idoneo a garantire una stabilizzazione globale del sistema franoso, rendendo necessario privilegiare strategie integrate di regimazione idraulica, controllo delle infiltrazioni, drenaggio profondo, protezione dall'erosione al piede del versante e gestione del rischio.

### 10.3 Strategie di prevenzione del rischio: interventi non strutturali

Come si è già osservato, la gestione del rischio associato a grandi movimenti franosi non può basarsi esclusivamente su interventi strutturali di stabilizzazione, ma richiede anche un insieme di misure di prevenzione non strutturale orientate alla riduzione dell'esposizione e della vulnerabilità del territorio.

In sistemi geomorfologici complessi e in evoluzione, tali misure assumono un ruolo centrale nel garantire una gestione efficace e sostenibile del rischio nel tempo.

In questa prospettiva, risultano particolarmente rilevanti l'adozione di strategie di gestione adattiva del rischio, basate sull'aggiornamento continuo delle conoscenze e degli strumenti di pianificazione, e l'implementazione di sistemi di monitoraggio integrati, capaci di supportare sia l'interpretazione dei processi evolutivi sia eventuali sistemi di allerta precoce.

### 10.3.1 Gestione adattiva del rischio

Il complesso franoso presenta un comportamento evolutivo di lungo periodo, su scale pluridecennali o secolari, con possibili riattivazioni locali e un potenziale arretramento progressivo del ciglio.

Le conoscenze attuali indicano un sistema dinamico caratterizzato da fasi lente e persistenti, intervallate da accelerazioni legate a eventi meteorologici intensi o a condizioni idrologiche sfavorevoli, in particolare lungo le incisioni e le scarpate a maggiore acclività.

Non è possibile formulare previsioni puntuali né sui tempi né sull'entità delle future evoluzioni. Tuttavia, è ragionevole ritenere che il fenomeno continuerà a manifestarsi nel tempo, secondo modalità coerenti con la sua natura strutturalmente controllata e con la sensibilità dei terreni coinvolti alle variazioni delle pressioni interstiziali.

Alla luce delle considerazioni esposte, l'approccio più appropriato non consiste nella stabilizzazione integrale del fenomeno, bensì nella gestione del rischio entro livelli accettabili, secondo il principio della convivenza controllata con la frana.

Tale impostazione prevede l'aggiornamento continuo della zonazione della pericolosità, attraverso l'integrazione sistematica di rilievi geomorfologici, dati geotecnici e tecniche di monitoraggio satellitare e strumentale.

Sul piano della pianificazione territoriale, l'approccio implica il divieto o la forte limitazione di nuove edificazioni nelle aree a pericolosità elevata e molto elevata, il controllo rigoroso dell'uso del suolo e la delocalizzazione progressiva di edifici e infrastrutture esposti a rischio significativo, in particolare nei settori prossimi al ciglio della frana e lungo le principali superfici di instabilità. Nelle aree limitrofe, la pianificazione dovrà privilegiare destinazioni compatibili con la dinamica evolutiva del versante, come aree verdi o spazi non edificabili.

Completano il quadro la riduzione progressiva della vulnerabilità, una pianificazione coerente con l'evoluzione del fenomeno e una gestione strutturata del rischio, supportata da un adeguato piano di protezione civile e da una comunicazione trasparente con la popolazione.

Questo orientamento risponde a un principio oggi ampiamente condiviso nella gestione dei grandi movimenti franosi: non l'eliminazione del fenomeno, ma la riduzione dell'esposizione e l'incremento della resilienza del territorio.

### 10.3.2 Monitoraggio e sistemi di allerta

Un elemento assolutamente imprescindibile e fondante di qualsiasi strategia di gestione adattiva del rischio idrogeologico è rappresentato dall'implementazione di un sistema di monitoraggio sistematico, multiparametrico e continuo. Per rispondere alla naturale complessità delle dinamiche di versante presenti nel caso di studio, tale sistema non può limitarsi a singole misurazioni isolate, ma deve necessariamente integrare in una logica olistica e sinergica una pluralità di tecniche di monitoraggio, tra cui:

- monitoraggio meteo-climatico mediante stazioni termo-pluviometriche: fondamentale per registrare in tempo reale le forzanti ambientali (intensità e durata delle precipitazioni, variazioni termiche), consentendo di stabilire le soglie pluviometriche critiche che governano l'innesco o la riattivazione dei cinematismi e le correlazioni fra afflussi meteorici e pressioni neutre nel terreno;
- osservazioni geomorfologiche e idrogeologiche periodiche sul campo: i sopralluoghi specialistici da parte di tecnici esperti rimangono essenziali per validare i dati strumentali, mappando l'insorgenza di nuove evidenze di dissesto (scarpate di neoformazione, venute d'acqua anomale, rigonfiamenti) e contestualizzando l'evoluzione fenomenologica del pendio;
- modelli topografici periodici ad altissima risoluzione: realizzati mediante rilievi da drone di tipo fotogrammetrico o LiDAR, che permettono la generazione di Modelli Digitali del Terreno (DTM) multi-temporali. Il confronto differenziale di tali modelli consente di quantificare con precisione i volumi mobilizzati e di mappare l'evoluzione morfodinamica superficiale;

- strumentazione in sito: attraverso reti GNSS per il tracciamento tridimensionale continuo di eventuali spostamenti superficiali;
- monitoraggio strutturale degli elementi a rischio: tramite l'installazione di reti di sensori (clinometri, fessurimetri ed estensimetri), finalizzate a valutare lo stato di deformazione del patrimonio edilizio e infrastrutturale esposto ai dissesti;
- monitoraggio geotecnico e idrogeologico profondo in foro: che prevede l'uso combinato di inclinometri per l'individuazione precisa della profondità e delle velocità delle superfici di scorrimento, e di piezometri per la misurazione delle fluttuazioni della falda e delle pressioni neutre interstiziali;
- monitoraggio idrometrico per il controllo delle portate dei deflussi superficiali in corrispondenza di punti critici e sensibili del reticolo idrografico naturale e artificiale;
- tecniche di telerilevamento satellitare: con particolare riferimento all'interferometria radar ad apertura sintetica (InSAR), che fornisce misurazioni millimetriche degli spostamenti del terreno sull'area interessata dal dissesto e sui territori circostanti.

L'analisi integrata di dati di vario tipo acquisiti a scale differenti costituisce una solida base tecnica e scientifica per la progettazione e l'implementazione di eventuali sistemi di allertamento precoce (Early Warning Systems), capaci di attivare procedure di protezione civile basate sul superamento di soglie predefinite.

Inoltre, il mantenimento di un monitoraggio continuo e protratto nel tempo assolve a molteplici funzioni strategiche, permettendo di:

- individuare in modo tempestivo e inequivocabile eventuali fasi di accelerazione dei movimenti gravitativi, intercettando i precursori di un possibile collasso prima che questo si verifichi;
- supportare le decisioni operative e la gestione delle emergenze da parte delle amministrazioni competenti, fornendo dati oggettivi e quantitativi che riducono l'incertezza gestionale;
- valutare rigorosamente l'efficacia degli interventi di mitigazione eventualmente già realizzati, o in via di progettazione, verificando strumentalmente se i tassi di deformazione e i livelli di falda rispondono secondo le previsioni di progetto;
- contribuire al progressivo e continuo miglioramento della comprensione scientifica e tecnica dei complessi meccanismi evolutivi che governano il fenomeno franoso.

Infine, il patrimonio di dati acquisiti deve contribuire ad alimentare un ciclo di pianificazione territoriale. Tali informazioni costituiranno infatti la base indispensabile per l'aggiornamento periodico e ragionato delle fasce di rispetto, per la tempestiva revisione degli strumenti normativi urbanistici e per la pianificazione finanziaria e tecnica dei futuri interventi di mitigazione. Solo attraverso questo approccio si realizza un vero e proprio adattamento dinamico e proattivo alla naturale e continua evoluzione geomorfologica del versante.

Come già accennato, la strumentazione di monitoraggio sopra elencata, oltre ad assolvere alla funzione primaria di allertamento e supporto alla strategia di mitigazione del rischio, costituisce anche un elemento tecnico e conoscitivo determinante e insostituibile relativamente alle opere strutturali di sistemazione in via di progettazione.

In particolare, considerando che il motore cinematico principale del dissesto è strettamente legato alle fluttuazioni del regime delle pressioni neutre nel sottosuolo, la rete di monitoraggio pluviometrico, idrometrico e piezometrico assume una valenza strategica assoluta sia nella fase di progettazione (*ante operam*), che in quella di esercizio (*post operam*). Per questo motivo, nella sezione successiva inerente la descrizione dettagliata delle opere strutturali suggerite, verrà dedicato un paragrafo al sistema di monitoraggio finalizzato alla realizzazione e alla verifica dell'efficacia degli interventi.

#### 10.4 Strategie di prevenzione del rischio: interventi strutturali

Gli interventi di prevenzione strutturale per la riduzione del rischio idrogeologico e idraulico dovranno essere basati su una strategia di intervento basata sul controllo delle acque, sul miglioramento delle condizioni idrogeologiche e della stabilità dei versanti e sulla gestione del reticolo idrografico.

Come ben evidenziato nella sezione 3.4, relativa alle cause degli eventi franosi, il contesto geologico è caratterizzato da sabbie arenacee permeabili sovrapposte ad argille impermeabili, una configurazione che favorisce l'infiltrazione delle acque meteoriche e l'accumulo di pressioni interstiziali lungo le superfici di contatto, condizioni che possono innescare movimenti franosi sia superficiali sia profondi.

A questo si aggiunge il ruolo dell'erosione torrentizia, in particolare lungo il torrente Benefizio, che provoca lo scalzamento del piede dei versanti e contribuisce alla riattivazione dei fenomeni di instabilità.

La strategia operativa di intervento può essere articolata in due fasi esecutive principali.

#### **10.4.1 Fase iniziale**

Questa fase ha lo scopo di stabilizzare il sistema franoso e ridurre rapidamente i fattori di instabilità.

Le attività da mantenere includono il monitoraggio continuo dei movimenti e delle condizioni idrogeologiche, il mantenimento delle ordinanze di sgombero nelle aree a rischio e il completamento delle indagini geologiche e geotecniche.

Gli interventi preliminari prevedono la riorganizzazione della rete acquedottistica e di quella fognaria con separazione tra acque bianche e nere, la realizzazione di sistemi di drenaggio mediante pozzi di emungimento e gallerie drenanti per il controllo della falda, la sistemazione idraulica dei principali recettori e interventi temporanei sulla viabilità.

Sono inoltre previste demolizioni e delocalizzazioni degli edifici non recuperabili e la riprofilatura della scarpata. L'obiettivo principale è contenere l'arretramento delle scarpate e verificare l'efficacia delle opere preliminari.

Gli interventi relativi alla fase iniziale sono descritti nella successiva sezione 11.

#### **10.4.2 Fase di completamento**

Una volta stabilizzato il quadro evolutivo e acquisite conoscenze più approfondite sui meccanismi di instabilità, si potrà procedere alla progettazione di interventi mirati di consolidamento e alla riorganizzazione dell'assetto territoriale.

Come si è più volte osservato, tali interventi non potranno tuttavia perseguire una stabilizzazione definitiva dell'intero sistema di versante, che, alla luce delle sue dimensioni, della complessità morfologica e della natura geologica del complesso franoso, deve essere gestito nel tempo attraverso un approccio integrato di mitigazione e controllo del rischio.

Questa fase prevede il completamento delle demolizioni e delle delocalizzazioni, la riprofilatura morfologica completa della scarpata e la stabilizzazione definitiva dei versanti.

Sono inoltre previsti interventi di sistemazione idraulica e forestale delle aree interessate dalla frana, il completamento delle opere di regimazione idraulica e il ripristino delle principali infrastrutture viarie di accesso al paese.

L'obiettivo finale è il miglioramento della stabilità dei versanti, il ripristino e la corretta funzionalità del reticolo idraulico e la salvaguardia, ove possibile, delle infrastrutture territoriali, nell'ambito di una strategia complessiva di mitigazione e gestione del rischio nel tempo.

L'approccio complessivo integra quindi monitoraggio, drenaggio profondo, gestione delle acque superficiali e interventi morfologici sul versante, con una realizzazione progressiva che consente di adattare le opere ai risultati del monitoraggio e all'evoluzione del fenomeno franoso.

## 11 Proposte per il programma degli interventi strutturali di riduzione del rischio

### 11.1 Quadro generale

La presente sezione illustra il programma di interventi strutturali proposto per la fase iniziale di riduzione del rischio idrogeologico e idraulico nell'area interessata dalle frane di Niscemi.

Il programma è articolato secondo priorità operative ed è finalizzato alla messa in sicurezza delle aree più critiche e alla riduzione immediata delle condizioni di pericolosità nei settori a maggiore instabilità. Esso costituisce il primo livello attuativo della strategia complessiva di gestione del dissesto, in attesa della definizione progettuale e della realizzazione degli interventi strutturali di più ampia scala che richiederanno tempi più lunghi di pianificazione e approvazione.

Il quadro concettuale che governa l'impostazione del programma muove dal riconoscimento che la stabilizzazione definitiva dell'intero sistema franoso - per le sue dimensioni, la profondità delle superfici di scivolamento e la complessità geologica dei terreni coinvolti - non è tecnicamente conseguibile attraverso interventi puntuali o localizzati. La strategia adottata si fonda pertanto su un approccio adattivo e progressivo, orientato al controllo dei principali fattori di instabilità: le circolazioni idriche all'interno dei corpi di frana, responsabili dell'incremento delle pressioni interstiziali, e i processi erosivi lungo il reticolo idrografico, in particolare il torrente Benefizio, che costituisce il fianco e il piede delle Frane Centrale e Sud.

Gli interventi proposti sono organizzati in cinque settori di intervento (Figura 221): i tre corpi di frana individuati - Frana Nord (FN), Frana Centrale (FC) e Frana Sud (FS) - cui si aggiunge un quarto ambito dedicato alla sistemazione idraulica del torrente Benefizio (BE) e un quinto relativo agli interventi nel centro abitato di Niscemi (AB).

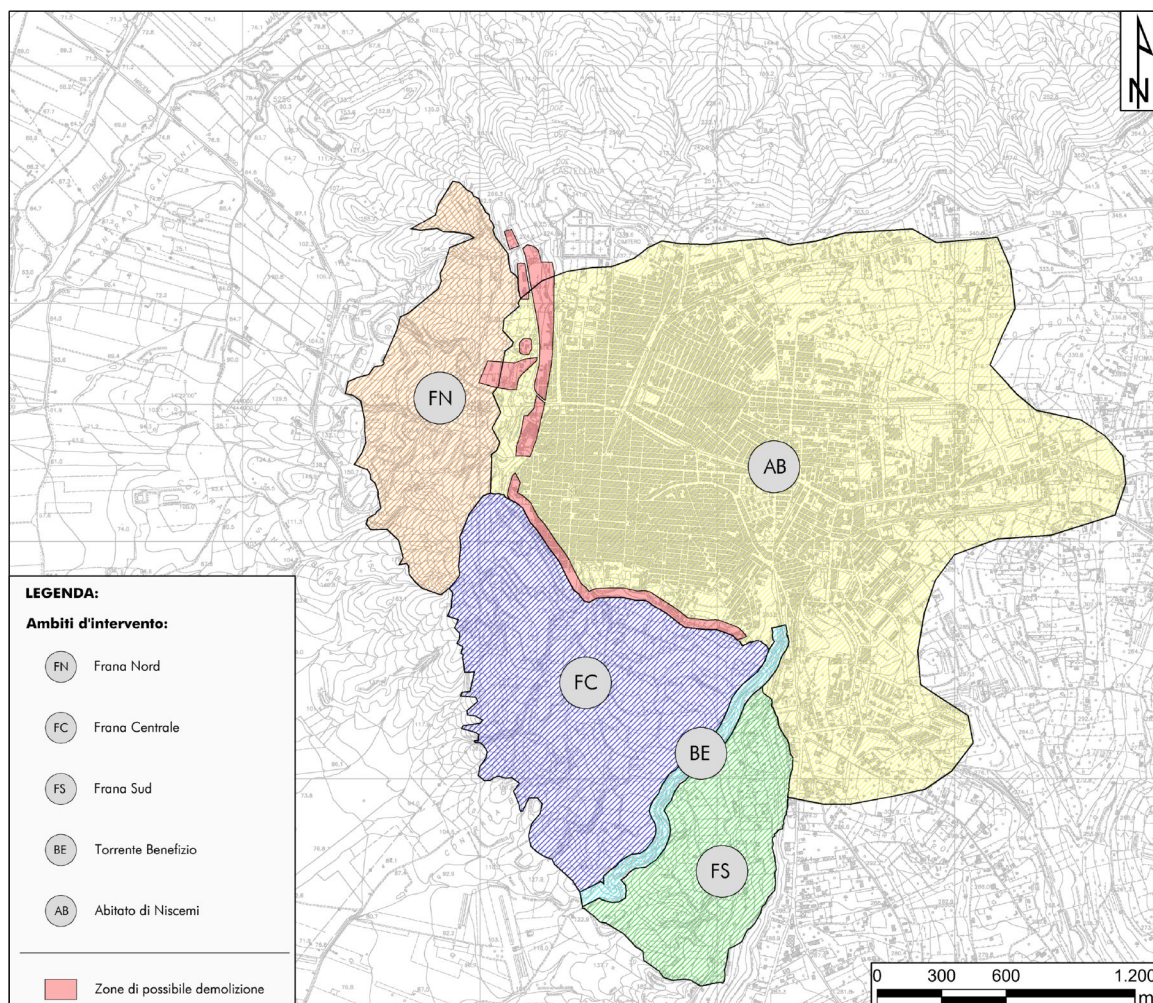


Figura 221 - Settori di intervento.

Per ciascun intervento il documento fornisce la descrizione sommaria delle opere, il piano di indagine geognostico propedeutico alla progettazione esecutiva, i riferimenti tipologici e fotografici alle zone di attuazione, e un'ipotesi di quadro economico di massima, con la precisazione che le valutazioni di costo potranno essere aggiornate sostanzialmente sulla base dei dati che saranno acquisiti nelle successive fasi progettuali.

Il programma complessivo degli interventi, illustrato nella Figura 222 e nella tavola allegata, prevede azioni integrate di regimazione delle acque superficiali e profonde e di controllo dei deflussi lungo i principali impluvi, mediante opere di drenaggio e interventi puntuali di stabilizzazione nei settori più instabili.

L'elemento centrale della strategia è la realizzazione di gallerie drenanti profonde - tre interventi complessivi nelle Frane Nord e Centro (FN.1, FC.1, FC.2), con sviluppi rispettivamente di circa 1500 m, 700 m e 900 m - quale principale strumento strutturale di riduzione del rischio. Queste opere sono finalizzate al drenaggio profondo del versante e alla diminuzione delle pressioni interstiziali nei livelli argillosi, con effetti diretti sulla stabilità complessiva e sui meccanismi di riattivazione dei movimenti franosi, attraverso un sistema di dreni a raggiera in grado di intercettare le circolazioni idriche sia sopra che al di sotto della quota d'imposta della galleria, incluse le falde presenti negli strati più profondi.

A completamento del sistema di drenaggio tramite gallerie drenanti, nella Frana Centrale è prevista la realizzazione di un campo pozzi di emungimento (FC.3), con funzione di regolazione del livello piezometrico nei livelli sabbiosi e di monitoraggio continuo dell'efficacia delle opere principali.

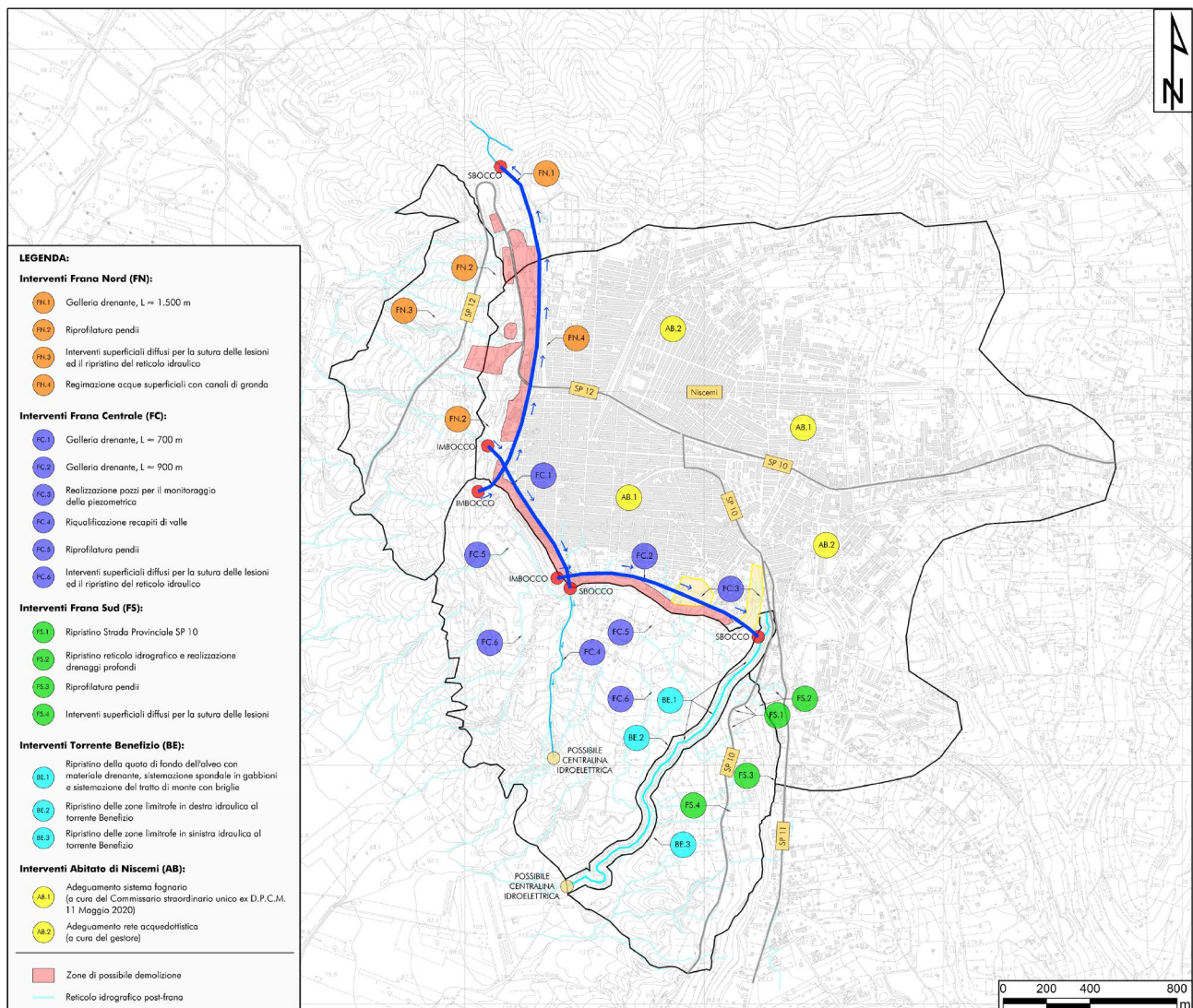


Figura 222 - Planimetria con ubicazione degli interventi previsti dal programma.

Le opere di drenaggio sono integrate da interventi di riprofilatura dei pendii nelle tre aree di frana (FN.2, FC.5, FS.3), realizzati mediante strutture in terra armata con livelli drenanti interni, finalizzati a ridurre le irregolarità morfologiche che favoriscono l'infiltrazione rapida e il ruscellamento concentrato, e a ristabilire geometrie di versante più compatibili con le condizioni geotecniche locali.

Completano il quadro del drenaggio superficiale i sistemi di canali di gronda per le aree urbane non ancora servite dalla rete esistente (FN.4) e gli interventi diffusi di sutura delle lesioni e ripristino del reticolo idraulico minore nei terreni a valle (FN.3, FC.6, FS.4), realizzati anche con tecniche di ingegneria naturalistica, briglie dissipative e rivestimenti in biorete, con funzione di riduzione dell'erosione superficiale e ripristino della continuità morfologica.

La riqualificazione dei recapiti di valle nel settore centrale (FC.4) completa il sistema di drenaggio superficiale, garantendo la compatibilità idraulica tra le portate drenate dalle gallerie e le condizioni geomorfologiche dei versanti riceventi.

Particolare rilievo assume la sistemazione idraulica del torrente Benefizio, affrontata attraverso tre tipologie di intervento coordinate (BE.1, BE.2, BE.3): la realizzazione di briglie in calcestruzzo armato su fondazioni profonde e il ripristino del fondo alveo con materiale drenante nel tratto montano, la protezione spondale in gabbioni in destra e sinistra idraulica, e la posa di una tubazione di grande diametro per il convogliamento controllato delle portate urbane verso valle. Questi interventi sono finalizzati alla riduzione dell'erosione al piede dei versanti argillosi, che costituisce uno dei principali fattori di innesco e riattivazione dei fenomeni franosi.

Il ripristino funzionale della Strada Provinciale SP10 (FS.1) e la sistemazione del reticolo superficiale e dei drenaggi profondi nel settore meridionale (FS.2) completano il programma con interventi infrastrutturali subordinati al progressivo consolidamento delle condizioni di stabilità del versante.

Nel settore del centro abitato (AB), il programma prevede due interventi di primaria importanza per la riduzione dei contributi idrici verso i versanti in frana. Sebbene questi interventi ricadano al di fuori della diretta competenza programmatica del Commissario straordinario ex D.L. 27 febbraio 2026 n.25, essi sono considerati parte integrante della strategia complessiva di riduzione del rischio e dovranno essere coordinati con le opere strutturali previste negli altri settori, in ragione del loro impatto diretto sulle condizioni idrogeologiche del versante.

L'intervento AB.1 riguarda l'adeguamento e la riorganizzazione del sistema fognario urbano, finalizzato alla corretta raccolta e all'allontanamento delle acque reflue e meteoriche che attualmente contribuiscono, attraverso dispersioni e perdite nella rete, all'alimentazione delle circolazioni idriche sotterranee nei corpi di frana; tale intervento sarà realizzato dal Commissario Straordinario Unico per il dissesto idrogeologico, nominato ai sensi del DPCM 11 maggio 2020.

L'intervento AB.2 riguarda invece l'adeguamento della rete acquedottistica, con l'obiettivo di ridurre le perdite idriche nella distribuzione, anch'esse identificate come fattore contributivo all'incremento delle pressioni interstiziali nel sottosuolo del versante; la sua realizzazione è di competenza del gestore della rete idrica.

Il programma è corredato da una scala di priorità che individua come interventi di prima urgenza le gallerie drenanti, il campo pozzi, le opere di sistemazione del torrente Benefizio e gli adeguamenti delle reti fognaria e acquedottistica nel centro abitato - in quanto direttamente rivolti al controllo delle cause di innesco - cui seguono, in ordine di priorità decrescente, gli interventi di regimazione superficiale e di riprofilatura dei pendii, e infine le sistemazioni diffuse dei versanti e il ripristino delle infrastrutture viarie.

Il programma è accompagnato da un sistema di monitoraggio strumentale dedicato agli interventi, articolato su piezometri a corda vibrante, colonne multiparametriche, idrometri, flussimetri e interferometria radar satellitare, con funzione sia di supporto alla progettazione sia di verifica dell'efficacia delle opere realizzate nel tempo.

Ogni campagna d'indagine geognostica è stata tarata sull'importanza delle opere ipotizzate, precisando comunque che alla ricostruzione dell'andamento stratigrafico, geotecnico, idrogeologico e sismico del sottosuolo per ogni area d'intervento, concorrono tutti i dati conoscitivi acquisiti globalmente. Per questo

motivo per alcuni interventi (FN4, BE2 e BE3), non sono state previste specifiche indagini conoscitive in quanto possono essere utilizzati i dati acquisiti con quelle realizzate a supporto degli interventi arealmente limitrofi. Le indagini sono state ubicate sulla base dell'attuale conoscenza dei luoghi; tuttavia, è importante precisare che queste potranno subire un riposizionamento in virtù della reale accessibilità dei luoghi al momento della loro esecuzione. Inoltre, si precisa che tutti i piani di indagine potranno essere modificati adattandoli a eventuali future esigenze e/o modifiche progettuali.

Nei riferimenti fotografici e nei dettagli tipologici vengono individuate le zone principali di intervento in modo da contestualizzare le proposte formulate.

Nei quadri economici di massima viene riportato un sintetico quadro di spesa tenendo conto sia degli importi per i lavori, generalmente calcolati con riferimenti parametrici, sia delle prevedibili somme a disposizione, che prevedono anche una quota di imprevisti (mediamente del 5% sull'importo dei lavori). Si sottolinea che le valutazioni economiche potranno essere modificate, anche sostanzialmente, sulla base dei dati che saranno acquisiti nelle successive fasi di progettazione.

## 11.2 Interventi sulla Frana Nord (FN)

### 11.2.1 Intervento FN.1 - Galleria drenante, L ≈ 1500 m

**Ubicazione:** Frana Nord

L'intervento denominato FN.1 prevede la realizzazione di una galleria drenante profonda ubicata a ovest dell'abitato, con sviluppo complessivo pari a circa 1500 m. La galleria è impostata con quota di imbocco pari a circa 292 m s.l.m. e quota di sbocco pari a circa 265 m s.l.m., con direzione di deflusso delle acque da sud verso nord. Il profilo longitudinale è caratterizzato da due differenti tratti: un primo tratto, di lunghezza pari a circa 600 m, con pendenza dell'ordine del 2,5%, e un secondo tratto finale, di circa 900 m, con pendenza pari a circa il 1,3%.

L'opera è finalizzata all'intercettazione delle acque circolanti negli strati permeabili mediante la realizzazione di dreni sub-verticali e sub-orizzontali, con successivo convogliamento delle portate captate all'interno della galleria e recapito finale in un'area di valle posta a nord dell'abitato. I dreni sub-verticali saranno inoltre sviluppati anche inferiormente rispetto alla quota della galleria, al fine di consentire la captazione di eventuali circolazioni idriche presenti anche negli strati più profondi, inclusi quelli argillosi, in presenza di falde o livelli saturi al di sotto dell'asse della galleria. Tale configurazione consente di ridurre le pressioni interstiziali all'interno del corpo di frana, migliorando le condizioni di stabilità del versante.

Il tracciato plano-altimetrico è stato definito sulla base dei rilievi aerofotogrammetrici disponibili, con l'obiettivo di massimizzare l'efficacia del drenaggio nella porzione di monte del fenomeno franoso e, al contempo, ridurre la fascia di interferenza con l'abitato. Le acque drenate saranno convogliate verso l'esterno mediante idonei sistemi di canalizzazione, eventualmente integrati con sistemi di regolazione automatica delle portate o con opere di accumulo e laminazione.

Per il presente intervento sono state inoltre valutate, in via preliminare, le possibili interferenze con le opere già realizzate nell'ambito del progetto denominato "*Stabilizzazione del versante ovest della città di Niscemi - zona del Belvedere*" (febbraio 2010), che prevedeva la riprofilatura del versante mediante un sistema di terre armate, pali di grosso diametro e micropali. Dalle prime analisi condotte, il posizionamento della galleria drenante non sembrerebbe interferire con tali opere; tuttavia, in sede di progettazione di maggiore dettaglio, tali aspetti dovranno essere oggetto di specifiche verifiche e approfondimenti.

Per ricostruire le caratteristiche stratigrafiche, geotecniche, idrogeologiche e sismiche dei terreni attraversati dalla galleria, e su cui la stessa si imposterà, è stata prevista la seguente campagna di indagini:

- n.10 sondaggi a carotaggio continuo a 60 m (al di sotto della quota di imposta della galleria, con prelievo di campioni di terreno per analisi geotecniche di laboratorio, prove SPT - *Standard*

*Penetration Test* a fondo foro, prove di permeabilità tipo Lefranc e posizionamento piezometri di Casagrande per la misura della pressione neutra dell'acqua in particolari intervalli di profondità);

- n.5 sondaggi a distruzione a 60 m (per il posizionamento di ulteriori piezometri di Casagrande);
- n.3 indagini sismiche in foro Down-Hole;
- n.7 tomografie sismiche a rifrazione in onde P e SH.

L'ubicazione presunta delle indagini è illustrata in Figura 223.



Figura 223 - Ubicazione indagini geognostiche a supporto dell'intervento FN.1.

Al fine di fornire un inquadramento spaziale e costruttivo dell'opera, nelle figure che seguono vengono riportati i riferimenti fotografici relativi alle aree di imbocco (Figura 224) e di sbocco (Figura 225) della galleria drenante. La documentazione è integrata dalla sezione tipologica del versante (Figura 226) e dai relativi profili altimetrici d'asse (Figura 227 e Figura 228).



**Figura 224 - Zona di imbocco della galleria drenante.**



**Figura 225 - Zona di sbocco della galleria drenante**

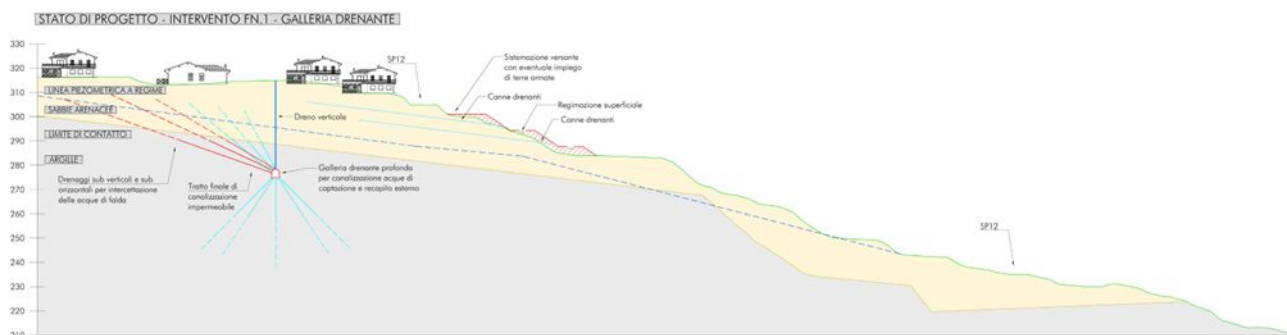


Figura 226 - Sezione tipologica del versante in frana con galleria drenante profonda nelle argille.

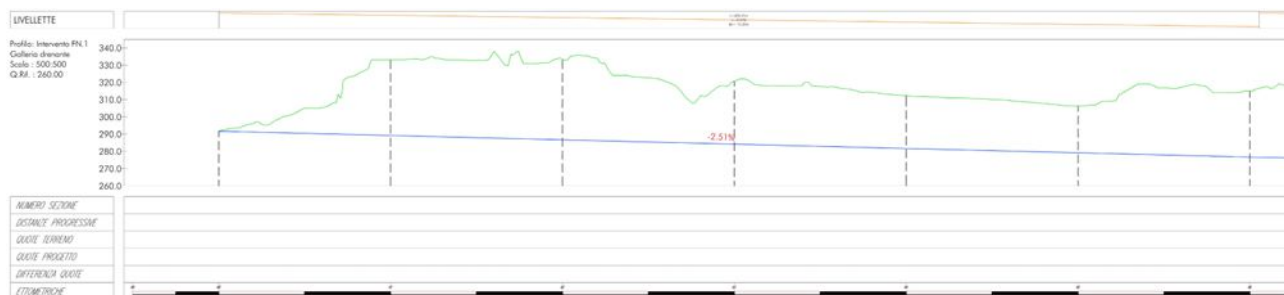


Figura 227 - Parte 1 del profilo altimetrico d'asse dell'orizzontamento inferiore della galleria drenante.

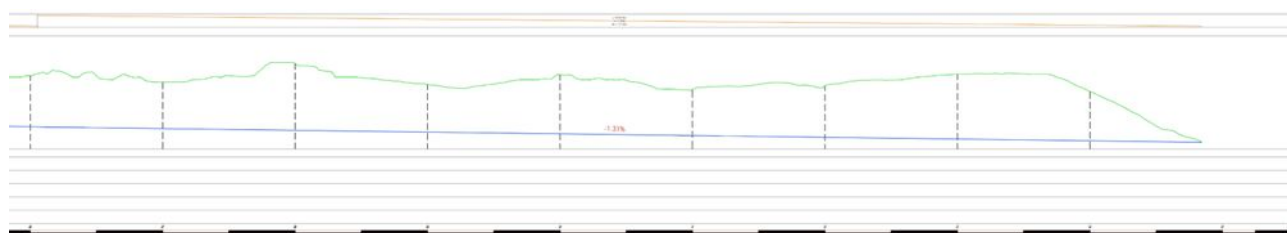


Figura 228 - Parte 2 del profilo altimetrico d'asse dell'orizzontamento inferiore della galleria drenante.

In Tabella 28 è riportata una stima sintetica dei costi che include sia l'importo dei lavori e degli oneri per la sicurezza, sia le somme a disposizione dell'Amministrazione.

<b>A) Lavori</b>		
A.1	Importo delle opere	€ 9.900.000,00
A.2	Oneri per la sicurezza	€ 200.000,00
	<b>Totale</b>	<b>€ 10.100.000,00</b>
<b>B) Somme a disposizione dell'Amministrazione</b>		
B.1	IVA sui Lavori	€ 2.222.000,00
B.2	Imprevisti e arrotondamenti	€ 517.500,00
B.3	Indagini geognostiche - Comprensive di IVA	€ 335.500,00
B.4	Spese tecniche e incentivi - Comprensive di Contributi e IVA	€ 925.000,00
	<b>Totale somme a disposizione</b>	<b>€ 4.000.000,00</b>
	<b>SOMMA</b>	<b>€ 14.100.000,00</b>

Tabella 28 - Ipotesi di quadro economico di massima dell'intervento FN.1.

### 11.2.2 Intervento FN.2 - Riprofilatura pendii

**Ubicazione:** Frana Nord

La riprofilatura del versante nel settore settentrionale si rende necessaria al fine di mitigare le condizioni di instabilità determinate dalla rapida infiltrazione delle acque meteoriche nei terreni superficiali e nei livelli più permeabili in profondità. L'attuale configurazione morfologica, caratterizzata da irregolarità, scarpate acclivi e superfici disomogenee, favorisce infatti il ruscellamento concentrato e l'assorbimento localizzato delle acque, con conseguente incremento delle pressioni interstiziali e riduzione della resistenza al taglio dei terreni.

In tale ambito la frana è caratterizzata dalla presenza di un'evidente fessurazione nel settore settentrionale, che ha determinato significative discontinuità morfologiche e ha interdetto la SP12, evidenziando condizioni di instabilità particolarmente marcate.

L'intervento FN.2 prevede la regolarizzazione del pendio mediante operazioni di riprofilatura su un'estensione stimata di circa 1 km, con altezze massime dell'ordine di 35 m. La rimodellazione del versante sarà finalizzata alla definizione di geometrie più compatibili con le condizioni geotecniche locali, attraverso la riduzione delle pendenze e la continuità delle superfici. Tenendo conto di lavori già eseguiti e zone che sono al momento attuale relativamente integre, si stima che l'intervento possa interessare almeno il 50% dello sviluppo della scarpata principale di frana.

Le opere potranno prevedere l'impiego di soluzioni strutturali flessibili, quali soprattutto terre armate, in grado di garantire la stabilità dei nuovi profili e al contempo adattarsi a eventuali assestamenti differenziali, già in passato realizzate su queste scarpate dando buoni risultati in termini di stabilità. All'interno delle strutture in terra armata, o comunque nelle operazioni di riprofilatura, sarà prevista l'installazione di opportuni livelli drenanti, costituiti da canne drenanti/trincee drenanti, finalizzati all'intercettazione e allo smaltimento delle acque infiltrate, con conseguente riduzione delle pressioni interstiziali nei terreni.

In corrispondenza della sommità di ciascun terrazzamento sarà inoltre prevista la realizzazione di canalette per la regimazione delle acque superficiali, al fine di intercettare e convogliare i deflussi meteorici in modo controllato, evitando fenomeni di ruscellamento concentrato ed infiltrazione localizzata.

La riprofilatura, integrata con questi sistemi di drenaggio profondo e superficiale e soprattutto con la realizzazione della galleria drenante sopra descritta, consentirà di limitare l'infiltrazione profonda, favorire uno smaltimento più graduale delle acque meteoriche e ristabilire una configurazione morfologica complessivamente più stabile, contribuendo al miglioramento delle condizioni di equilibrio del versante nel medio e lungo periodo.

Per ricostruire le caratteristiche stratigrafiche, geotecniche, idrogeologiche e sismiche dei terreni interessati dall'intervento, è stata prevista la seguente campagna di indagini:

- n.5 sondaggi a carotaggio continuo a 40 m (con prelievo di campioni di terreno per analisi geotecniche di laboratorio e prove SPT a fondo foro);
- n.3 piezometri a tubo aperto in PVC (per rilevare l'oscillazione della piezometrica nel tempo);
- n.2 inclinometri (per rilevare spostamenti laterali e deformazioni del terreno nel tempo);
- n.2 tomografie sismiche a rifrazione in onde P e SH.

Considerando che l'intervento prevede la movimentazione ed il riutilizzo di terreno, sono stati previsti anche il campionamento e l'analisi chimica ai sensi del DPR 120/2017 e s.s.i.i..

L'ubicazione presunta delle indagini è rappresentata in Figura 229.



**Figura 229 - Ubicazione indagini geognostiche a supporto dell'intervento FN.2.**

Al fine di contestualizzare la morfologia del versante e le soluzioni progettuali ipotizzate, nelle figure che seguono vengono riportati i riferimenti fotografici dei pendii in frana oggetto di riprofilatura (Figura 230) e lo schema tipologico dell'intervento mediante la realizzazione di terre armate (Figura 231).



Figura 230 - Riprofilatura dei pendii nella zona compresa tra il tratto di monte e quello di valle della SP12.

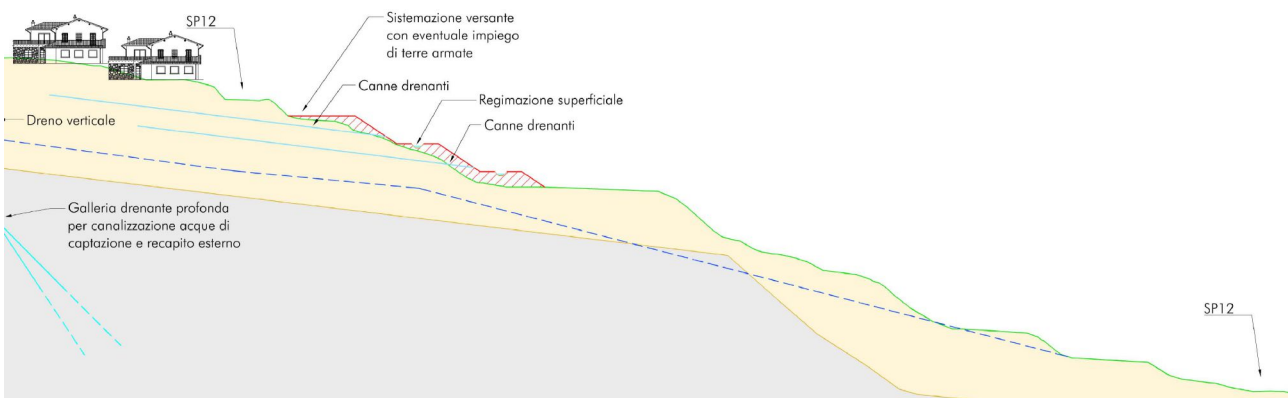


Figura 231 - Riprofilatura versante di valle con terre armate.

In Tabella 29 è riportata una stima sintetica dei costi che include sia l'importo dei lavori e degli oneri per la sicurezza, sia le somme a disposizione dell'Amministrazione.

A) Lavori		Globale
A.1	Importo delle opere	€ 2.800.000,00
A.2	Oneri per la sicurezza	€ 60.000,00
	<b>Totale</b>	<b>€ 2.860.000,00</b>
B) Somme a disposizione dell'Amministrazione		
B.1	IVA sui Lavori	€ 629.200,00
B.2	Imprevisti	€ 142.100,00
B.3	Indagini geognostiche - Comprensive di IVA	€ 103.700,00
B.4	Spese tecniche e incentivi - Comprensive di Contributi e IVA	€ 265.000,00
	<b>Totale somme a disposizione</b>	<b>€ 1.140.000,00</b>
	<b>SOMMA</b>	<b>€ 4.000.000,00</b>

Tabella 29 - Ipotesi di quadro economico di massima dell'intervento FN.2.

### 11.2.3 Intervento FN.3 - Interventi diffusi per la sutura delle lesioni e il ripristino del reticolo idraulico

**Ubicazione:** Frana Nord

I versanti immediatamente a valle dell'abitato, nel settore settentrionale, risultano interessati da fenomeni di erosione accelerata lungo gli impluvi principali, con progressivo approfondimento dei solchi e arretramento delle scarpate. Tali processi determinano l'indebolimento del piede del versante e contribuiscono all'evoluzione dei movimenti franosi, attraverso l'azione erosiva concentrata che altera l'equilibrio morfologico dei pendii.

In tale contesto, l'intervento FN.3 è finalizzato alla riduzione dei processi erosivi e al ripristino della funzionalità del reticolo idraulico minore mediante opere diffuse di sistemazione idraulica, in coerenza con le tecniche di ingegneria naturalistica previste per il controllo delle acque superficiali.

L'area è caratterizzata dalla presenza di ampie fratture del terreno, sia a monte che a valle della SP12, con sviluppo prevalente nord-sud, che determinano significative discontinuità morfologiche e differenze di quota. Tali fratture hanno inoltre contribuito all'interruzione della SP12, con cedimenti localizzati dell'asse stradale in corrispondenza del settore sud-occidentale.

L'intervento prevede la realizzazione di un insieme coordinato di opere diffuse, tra cui:

- la riprofilatura degli impluvi principali, finalizzata alla regolarizzazione delle pendenze longitudinali e al miglioramento della capacità di deflusso delle acque;
- la stabilizzazione del fondo e delle sponde delle incisioni anche mediante tecniche di ingegneria naturalistica, quali rivestimenti in bioreti e interventi di rinverdimento controllato;
- la realizzazione di briglie dissipative nei tratti caratterizzati da maggiore energia del flusso, con funzione di riduzione della velocità delle acque e contenimento dei fenomeni erosivi;
- il ripristino e la risagomatura dei fossi di scolo secondari, al fine di garantire una corretta regimazione delle acque meteoriche e limitare i fenomeni di ruscellamento diffuso;
- la sutura delle lesioni superficiali presenti nel terreno, mediante riempimento e costipamento con materiali idonei e successiva regolarizzazione del piano campagna, con funzione di riduzione delle infiltrazioni e ripristino della continuità morfologica;
- interventi locali di sistemazione delle aree maggiormente dissestate in prossimità della SP12, in coordinamento con le scelte infrastrutturali relative alla viabilità alternativa.

In fase preliminare era stata valutata la realizzazione di un attraversamento della SP12 mediante ponte su pozzi drenanti profondi; tuttavia, l'attuale incertezza del quadro evolutivo del dissesto non consente la definizione di soluzioni puntuali affidabili, rendendo necessario l'individuazione di un tracciato alternativo di collegamento.

Per ricostruire le caratteristiche stratigrafiche, geotecniche, idrogeologiche e sismiche dei terreni interessati dall'intervento, è stata prevista la seguente campagna di indagini:

- n.3 sondaggi a carotaggio continuo a 40 m (con prelievo di campioni di terreno per analisi geotecniche di laboratorio e prove SPT a fondo foro);
- n.3 piezometri a tubo aperto in PVC (per rilevare l'oscillazione della piezometrica nel tempo);
- n.10 prove penetrometriche statico-dinamico a 15m (o fino a rifiuto strumentale);
- n.3 tomografie sismiche a rifrazione in onde P e SH.

Considerando che l'intervento prevede la movimentazione ed il possibile riutilizzo di un notevole volume di terreno, sono stati previsti anche il campionamento e l'analisi chimica ai sensi del DPR 120/2017 e s.s.i.i..

L'ubicazione presunta delle indagini è illustrata in Figura 232.



Figura 232 - Ubicazione indagini geognostiche a supporto dell'intervento FN.3.

Nelle figure che seguono sono riportati i riferimenti fotografici delle aree critiche da ripristinare (Figura 233) e gli schemi tipologici degli interventi diffusi, quali le briglie dissipative in gabbioni (Figura 234), i rivestimenti superficiali in biorete o materassi drenanti (Figura 235) e le tecniche di rinverdimento per il consolidamento delle piane di versante (Figura 236).



Figura 233 - Recapiti di valle da riqualificare ed evidenza sulle lesioni da ripristinare.

### Briglia in gabbioni Vista frontale

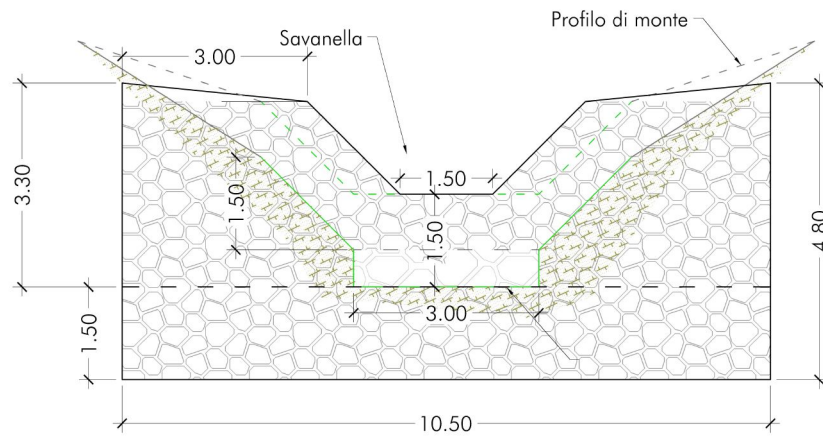


Figura 234 - Sezione tipologica della briglia in gabbioni.

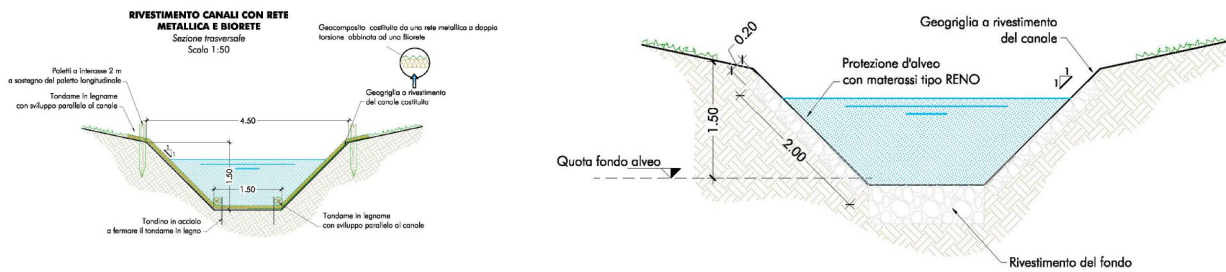


Figura 235 - Sezione tipologica di rivestimento in biorete a sinistra e con materassi drenanti a destra.

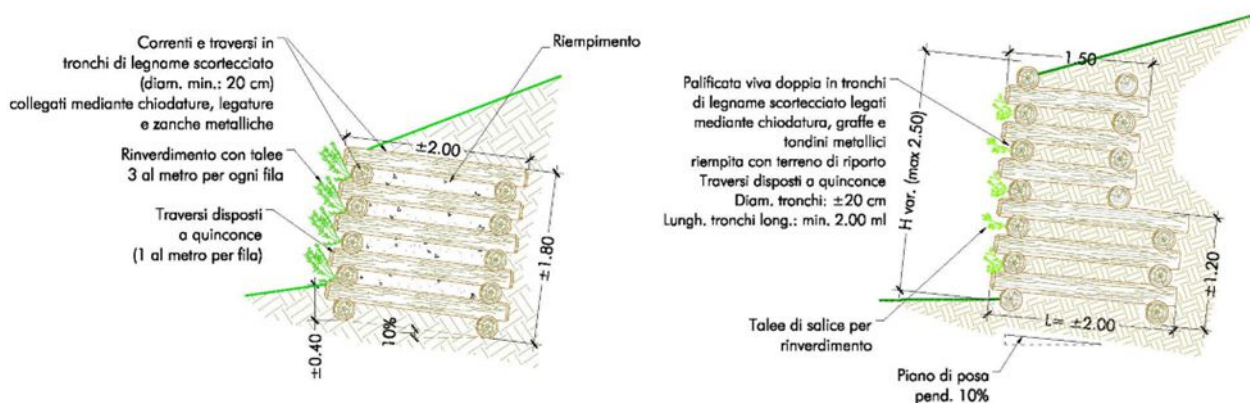


Figura 236 - Opere di ingegneria naturalistica per ripristino delle piane di un versante.

In Tabella 30 è riportata una stima sintetica dei costi che include sia l'importo dei lavori e degli oneri per la sicurezza, sia le somme a disposizione dell'Amministrazione.

A) Lavori		Globale
A.1	Importo delle opere	€ 2.500.000,00
A.2	Oneri per la sicurezza	€ 50.000,00
	<b>Totale</b>	<b>€ 2.550.000,00</b>
B) Somme a disposizione dell'Amministrazione		
B.1	IVA sui Lavori	€ 561.000,00
B.2	Imprevisti	€ 130.800,00
B.3	Indagini geognostiche - Comprensive di IVA	€ 73.200,00
B.4	Spese tecniche e incentivi - Comprensive di Contributi e IVA	€ 235.000,00
	<b>Totale somme a disposizione</b>	<b>€ 1.000.000,00</b>
	<b>SOMMA</b>	<b>€ 3.550.000,00</b>

Tabella 30 - Ipotesi di quadro economico di massima dell'intervento FN.3.

#### 11.2.4 Intervento FN.4 - Regimazione acque superficiali con canali di gronda

**Ubicazione:** Frana Nord

Nel settore settentrionale, una porzione significativa dell'abitato risulta priva di un adeguato sistema di regimazione delle acque superficiali, con conseguente dispersione incontrollata dei deflussi sul versante.

In tali condizioni, le acque bianche non correttamente canalizzate tendono a infiltrarsi nei terreni superficiali o a concentrarsi lungo percorsi preferenziali, contribuendo all'aumento delle pressioni interstiziali e alla riduzione della stabilità dei terreni, in particolare nelle aree già interessate da fenomeni franosi.

L'intervento FN.4 è pertanto finalizzato alla regimazione delle acque superficiali nelle aree attualmente non servite dalla rete esistente, attraverso la realizzazione di canali di gronda in grado di intercettare e convogliare i deflussi in modo controllato.

In particolare, si prevede la realizzazione di un sistema di raccolta superficiale, costituito da canali di gronda e piccoli bacini di intercettazione in ambito urbano, sviluppato lungo il tracciato della galleria drenante prevista nell'intervento FN.1, ma posto a quota superficiale. Tale sistema consentirà di raccogliere le acque meteoriche e convogliarle con direzione prevalente da sud verso nord.

Il deflusso sarà quindi indirizzato verso il canale realizzato in gabbioni nell'ambito dell'intervento denominato "Stabilizzazione del versante ovest della città di Niscemi - zona Belvedere" (febbraio 2010), garantendo così un recapito finale già strutturato e idraulicamente compatibile.

L'intervento consente di:

- intercettare le acque meteoriche nelle aree attualmente non servite;
- ridurre i fenomeni di infiltrazione incontrollata nei terreni;
- limitare la formazione di ruscellamenti concentrati lungo il versante;
- migliorare il collegamento tra il sistema di drenaggio superficiale e le opere esistenti.

La realizzazione dei canali di gronda rappresenta quindi un elemento fondamentale di integrazione tra il sistema di drenaggio profondo (intervento FN.1) e il reticolo idraulico superficiale, contribuendo alla riduzione delle condizioni di instabilità e al miglioramento della sicurezza idrogeologica del versante.

Per il presente intervento non sono state previste specifiche indagini in quanto il modello stratigrafico, geotecnico, idrogeologico e sismico del terreno, potrà essere ricostruito utilizzando i dati geognostici acquisiti con le campagne realizzate per gli interventi limitrofi.

Al fine di definire il posizionamento e le caratteristiche tecniche del sistema di regimazione, nelle figure che seguono vengono riportati il riferimento fotografico del versante interessato (Figura 237) e le diverse soluzioni costruttive previste, quali le sezioni tipologiche di sistemazione dei canali di gronda (Figura 238 e Figura 239).



Figura 237 - Vista completa del versante della Frana Nord con evidenza del posizionamento sommitale del canale di gronda per il recapito delle acque di scolo superficiale nei recettori posti a nord.

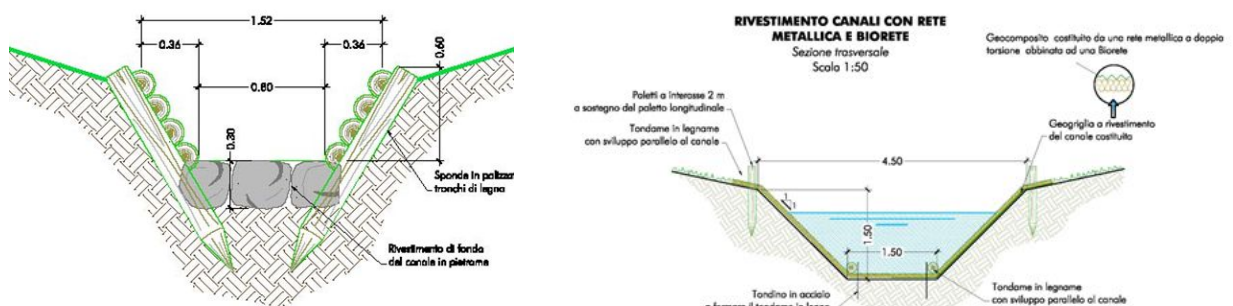
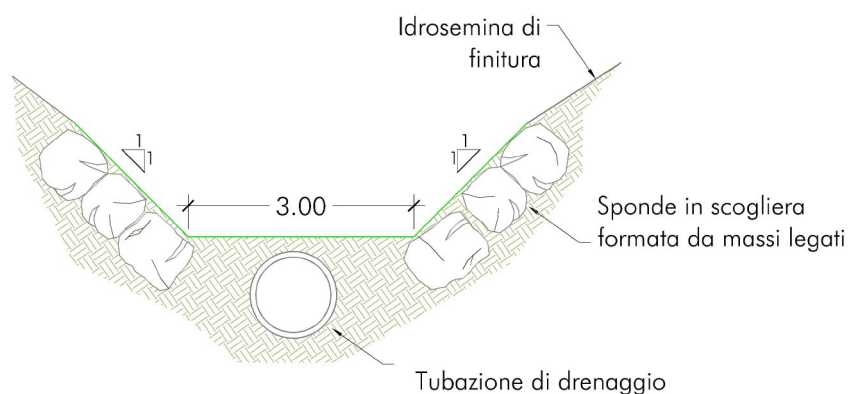


Figura 238 - Sezione tipologica di sistemazione di un canale di gronda superficiale con opere di ingegneria naturalistica (a sinistra) e con reti metalliche e biorete (a destra).



**Figura 239 - Sezione tipologica di sistemazione di un canale con scogliera e tubazione di drenaggio.**

In Tabella 31 è riportata una stima sintetica dei costi che include sia l'importo dei lavori e degli oneri per la sicurezza, sia le somme a disposizione dell'Amministrazione.

<b>A) Lavori</b>		<b>GLOBALE</b>
A.1	Importo delle opere	€ 450.000,00
A.2	Oneri per la sicurezza	€ 10.000,00
	<b>Totale</b>	<b>€ 460.000,00</b>
<b>B) Somme a disposizione dell'Amministrazione</b>		
B.1	IVA sui Lavori	€ 101.200,00
B.2	Imprevisti	€ 43.800,00
B.3	Indagini geognostiche - Comprensive di IVA	-
B.4	Spese tecniche e incentivi - Comprensive di Contributi e IVA	€ 45.000,00
	<b>Totale somme a disposizione</b>	<b>€ 190.000,00</b>
	<b>SOMMA</b>	<b>€ 650.000,00</b>

**Tabella 31 - ipotesi di quadro economico di massima dell'intervento FN.4.**

## 11.3 Interventi sulla Frana Centrale (FC)

### 11.3.1 Intervento FC.1 - Galleria drenante, L ≈ 700 m

**Ubicazione:** Frana Centrale

L'intervento FC.1 consiste nella realizzazione di una galleria drenante profonda localizzata a sud-ovest dell'abitato, con lunghezza complessiva pari a circa 700 m. La galleria presenta una quota di imbocco di circa 282 m s.l.m. e una quota di sbocco di circa 275 m s.l.m., con pendenza longitudinale media pari a circa l'1% e direzione di deflusso delle acque da nord verso sud.

L'intervento è finalizzato alla captazione delle acque presenti nei livelli più permeabili del sottosuolo, mediante un sistema di drenaggio costituito da elementi sub-verticali e sub-orizzontali collegati alla galleria principale. Le acque intercettate saranno convogliate all'interno della galleria e successivamente smaltite verso un recapito di valle situato a sud dell'abitato. Anche in questo caso, i dreni sub-verticali saranno sviluppati sia al di sopra sia al di sotto della galleria, al fine di intercettare eventuali circolazioni idriche presenti anche negli strati più profondi, inclusi quelli argillosi, in presenza di falde o livelli saturi al di sotto dell'asse della galleria. Ciò consente di incrementare l'efficacia complessiva del sistema drenante e contribuire alla riduzione delle pressioni interstiziali.

La definizione del tracciato è stata effettuata tenendo conto delle caratteristiche morfologiche e geologiche del sito, nonché della necessità di limitare le interferenze con le aree urbanizzate. Il sistema potrà essere dotato di dispositivi per la regolazione automatica delle portate e potrà essere integrato, in fase esecutiva, con ulteriori opere di drenaggio o sistemi di gestione delle acque.

Analogamente a quanto descritto per l'intervento FN.1, sono state valutate in via preliminare le possibili interferenze con il progetto già realizzato "Stabilizzazione del versante ovest della città di Niscemi - zona del Belvedere" (febbraio 2010), che prevedeva interventi di riprofilatura del versante mediante terre armate, pali di grosso diametro e micropali. Le prime valutazioni indicano che il tracciato della galleria non risulterebbe interferente con tali opere; resta comunque necessario prevedere, nelle successive fasi progettuali, specifiche verifiche di dettaglio al fine di confermare tale compatibilità.

Per ricostruire le caratteristiche stratigrafiche, geotecniche, idrogeologiche e sismiche dei terreni attraversati dalla galleria, e su cui la stessa si imposterà, è stata prevista la seguente campagna di indagini:

- n.6 sondaggi a carotaggio continuo a 60 m (al di sotto della quota di imposta della galleria, con prelievo di campioni di terreno per analisi geotecniche di laboratorio, prove SPT a fondo foro, prove di permeabilità tipo Lefranc e posizionamento piezometri di Casagrande per la misura della pressione neutra dell'acqua in particolari intervalli di profondità);
- n.3 sondaggi a distruzione a 60 m (per il posizionamento di ulteriori piezometri di Casagrande);
- n.2 Indagini sismiche in foro Down-Hole;
- n.5 Tomografie sismiche a rifrazione in onde P e SH.

L'ubicazione presunta delle indagini è rappresentata in Figura 240.



Figura 240 - Ubicazione indagini geognostiche a supporto dell'intervento FC.1.

Al fine di fornire un inquadramento spaziale e costruttivo dell'opera, nelle figure che seguono vengono riportati i riferimenti fotografici relativi alle aree di imbocco (Figura 241) e di sbocco (Figura 242) della galleria drenante. Sono inoltre riportati la sezione tipologica del versante in frana con galleria drenante (Figura 243) e il relativo profilo altimetrico d'asse (Figura 244).



**Figura 241 - Zona di imbocco della galleria drenante.**



**Figura 242 - Zona di sbocco della galleria drenante.**

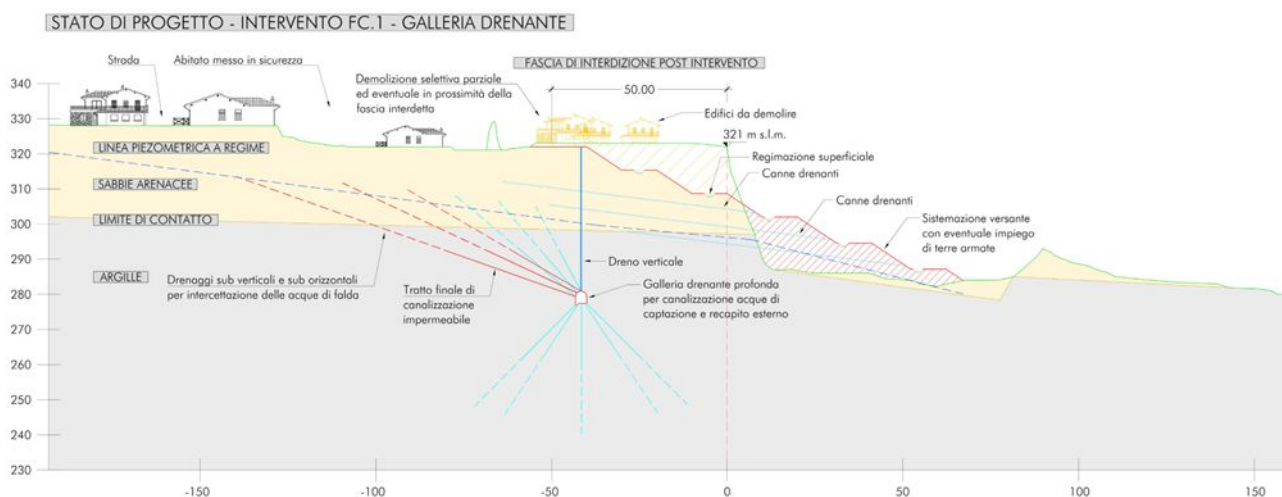


Figura 243 - Sezione tipologica del versante in frana con galleria drenante profonda nelle argille.

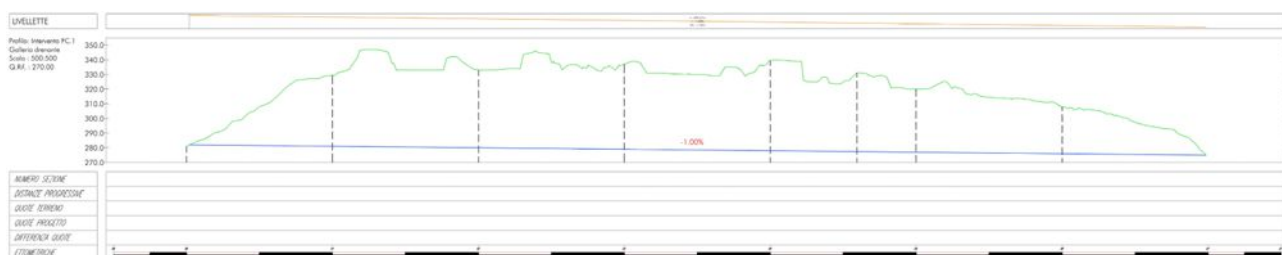


Figura 244 - Profilo altimetrico d'asse dell'orizzontamento inferiore della galleria drenante.

In Tabella 32 è riportata una stima sintetica dei costi che include sia l'importo dei lavori e degli oneri per la sicurezza, sia le somme a disposizione dell'Amministrazione.

A) Lavori		Globale
A.1	Importo delle opere	€ 5.600.000,00
A.2	Oneri per la sicurezza	€ 150.000,00
	<b>Totale</b>	<b>€ 5.750.000,00</b>
B) Somme a disposizione dell'Amministrazione		
B.1	IVA sui Lavori	€ 1.265.000,00
B.2	Imprevisti	€ 296.500,00
B.3	Indagini geognostiche - Comprensive di IVA	€ 213.500,00
B.4	Spese tecniche e incentivi - Comprensive di Contributi e IVA	€ 525.000,00
	<b>Totale somme a disposizione</b>	<b>€ 2.300.000,00</b>
	<b>SOMMA</b>	<b>€ 8.050.000,00</b>

Tabella 32 - Ipotesi di quadro economico di massima dell'intervento FC.1.

### 11.3.2 Intervento FC.2 - Galleria drenante, L ≈ 900 m

**Ubicazione:** Frana Centrale

L'intervento FC.2 prevede la realizzazione di una galleria drenante profonda ubicata a sud dell'abitato, con sviluppo complessivo pari a circa 900 m. La galleria è caratterizzata da una quota di imbocco pari a circa 285 m s.l.m. e da una quota di sbocco pari a circa 262 m s.l.m., con direzione di deflusso da ovest verso est. Il profilo longitudinale è articolato in due tratti: un primo tratto di circa 600 m con pendenza dell'ordine del 3,5%, seguito da un tratto finale di circa 300 m con pendenza più ridotta, pari a circa l'1%.

L'opera è progettata per intercettare e drenare le acque presenti negli strati permeabili del corpo di frana, mediante l'installazione di dreni sub-verticali e sub-orizzontali che convogliano le portate verso la galleria principale. I dreni sub-verticali saranno inoltre sviluppati anche al di sotto della quota della galleria, al fine di consentire la captazione di eventuali circolazioni idriche presenti anche negli strati più profondi, inclusi quelli argillosi, in presenza di falde o livelli saturi al di sotto dell'asse della galleria.

Le acque raccolte saranno successivamente recapitate nel torrente Benefizio, garantendo un efficace smaltimento verso valle e un collegamento diretto con il reticolo idrografico principale.

Il posizionamento plano-altimetrico della galleria è stato definito in funzione della morfologia del versante e della presenza del recapito idraulico naturale, con l'obiettivo di ottimizzare l'efficacia del sistema drenante. L'intervento contribuisce alla riduzione delle pressioni interstiziali e al miglioramento delle condizioni di stabilità del versante, mantenendo al contempo i vantaggi tipici delle gallerie drenanti in termini di funzionamento sostanzialmente automatico e ridotti costi di manutenzione.

Per ricostruire le caratteristiche stratigrafiche, geotecniche, idrogeologiche e sismiche dei terreni attraversati dalla galleria, e su cui la stessa si imposterà, è stata prevista la seguente campagna di indagini:

- n.8 sondaggi a carotaggio continuo a 60 m (al di sotto della quota di imposta della galleria, con prelievo di campioni di terreno per analisi geotecniche di laboratorio, prove SPT a fondo foro, prove di permeabilità tipo Lefranc e posizionamento piezometri di Casagrande per la misura della pressione neutra dell'acqua in particolari intervalli di profondità);
- n.4 sondaggi a distruzione a 60 m (per il posizionamento di ulteriori piezometri di Casagrande);
- n.3 indagini sismiche in foro Down-Hole;
- n.5 tomografie sismiche a rifrazione in onde P e SH.

L'ubicazione presunta delle indagini è illustrata in Figura 245.



Figura 245 - Ubicazione indagini geognostiche a supporto dell'intervento FC.2.

Al fine di fornire un inquadramento dell'opera, di seguito vengono riportati i riferimenti fotografici relativi alle aree di imbocco (Figura 246) e di sbocco (Figura 247) della galleria drenante presso il torrente Benefizio. La documentazione è integrata dalle sezioni tipologiche del versante (Figura 248 e Figura 249).



**Figura 246 - Zona di imbocco della galleria drenante.**



**Figura 247 - Zona di sbocco della galleria drenante nel torrente Benefizio.**

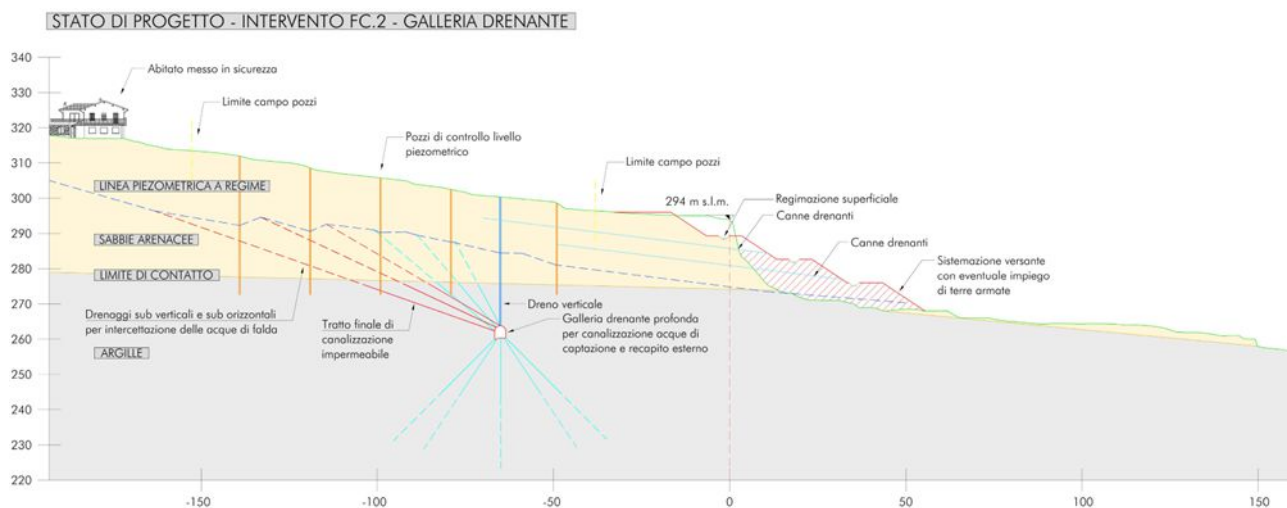


Figura 248 - Sezione tipologica del versante in frana con galleria drenante profonda nelle argille.

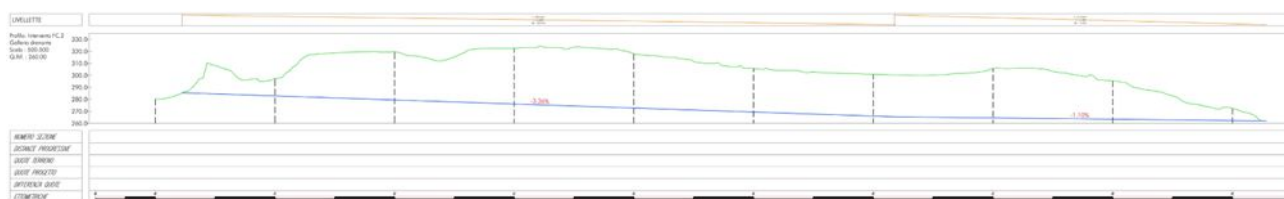


Figura 249 - Sezione tipologica del versante in frana con galleria drenante profonda nelle argille.

In Tabella 33 è riportata una stima sintetica dei costi che include sia l'importo dei lavori e degli oneri per la sicurezza, sia le somme a disposizione dell'Amministrazione.

A) Lavori		GLOBALE
A.1	Importo delle opere	€ 6.200.000,00
A.2	Oneri per la sicurezza	€ 150.000,00
<b>Totale</b>		<b>€ 6.350.000,00</b>
B) Somme a disposizione dell'Amministrazione		
B.1	IVA sui Lavori	€ 1.397.000,00
B.2	Imprevisti e arrotondamenti	€ 342.400,00
B.3	Indagini geognostiche - Comprensive di IVA	€ 280.600,00
B.4	Spese tecniche e incentivi - Comprensive di Contributi e IVA	€ 580.000,00
<b>Totale somme a disposizione</b>		<b>€ 2.600.000,00</b>
<b>SOMMA</b>		<b>€ 8.950.000,00</b>

Tabella 33 - Ipotesi di quadro economico di massima dell'intervento FC.2.

### 11.3.3 Intervento FC.3 - Realizzazione pozzi per il monitoraggio della piezometria

**Ubicazione:** Frana Centrale

L'installazione di pozzi di emungimento rappresenta uno degli interventi iniziali più efficaci per il controllo delle condizioni idrogeologiche del versante. Tali opere hanno la funzione principale di regolare il livello piezometrico all'interno degli strati permeabili nel sottosuolo, evitando fenomeni di saturazione eccessiva delle formazioni sabbioso-arenacee che costituiscono il substrato di parte del versante interessato dal dissesto.

Le stesse opere risultano anche utili al monitoraggio costante e progressivo dei livelli piezometrici iniziali e di quelli in corso d'opera, anche al fine di valutare l'efficacia delle opere realizzate.

L'intervento FC.3 prevede pertanto, in una zona caratterizzata da assenza di abitazioni e limitata acclività, la realizzazione di una serie di pozzi di emungimento disposti a monte della scarpata interessata, nei pressi delle aree comprese tra la Frana Centrale e quella Sud.

I pozzi saranno realizzati con interasse variabile in funzione delle caratteristiche di permeabilità dei terreni attraversati e delle portate attese di falda. Ciascun pozzo sarà equipaggiato con pompe sommerse dimensionate in funzione delle condizioni idrauliche locali e collegate a sistemi di attivazione automatica e controllo delle portate.

Le acque emunte verranno convogliate mediante un sistema di canalizzazioni verso appositi bacini di raccolta. Tali bacini potranno svolgere anche una funzione di laminazione delle portate o di accumulo idrico, rendendo possibile il riutilizzo delle acque per finalità agricole o irrigue qualora le condizioni qualitative lo consentano.

La possibilità di riutilizzo delle acque emunte potrebbe essere valutata previo trattamento delle acque in un impianto di depurazione prossimo alla zona d'intervento.

Dal punto di vista tecnico l'intervento mediante realizzazione di pozzi di emungimento presenta il vantaggio di una relativa semplicità realizzativa e di un'elevata modularità, che consente l'estensione del sistema in fasi successive anche ad altre porzioni del versante rispetto a quelle preliminarmente individuate in questa fase.

I primi due pozzi saranno realizzati nell'ambito del piano d'indagine. Si prevede, poi, in base ai rilevamenti e al loro funzionamento, la realizzazione di almeno altri 6 pozzi tali da avere un controllo effettivo sull'efficacia degli interventi principali (gallerie drenanti).

Per ricostruire le caratteristiche stratigrafiche e idrogeologiche dei terreni interessati dall'intervento è stato previsto di realizzare n.2 pozzi prova di profondità 80 m su cui eseguire le prove di emungimento che potranno successivamente essere incorporate nelle altre opere previste per il monitoraggio della falda.

In Figura 250 è riportata la vista planimetrica dell'ubicazione delle indagini e in Figura 251 la rappresentazione fotografica dell'area di realizzazione del campo pozzi. In Figura 252 è inoltre mostrata la sezione tipologica del versante.

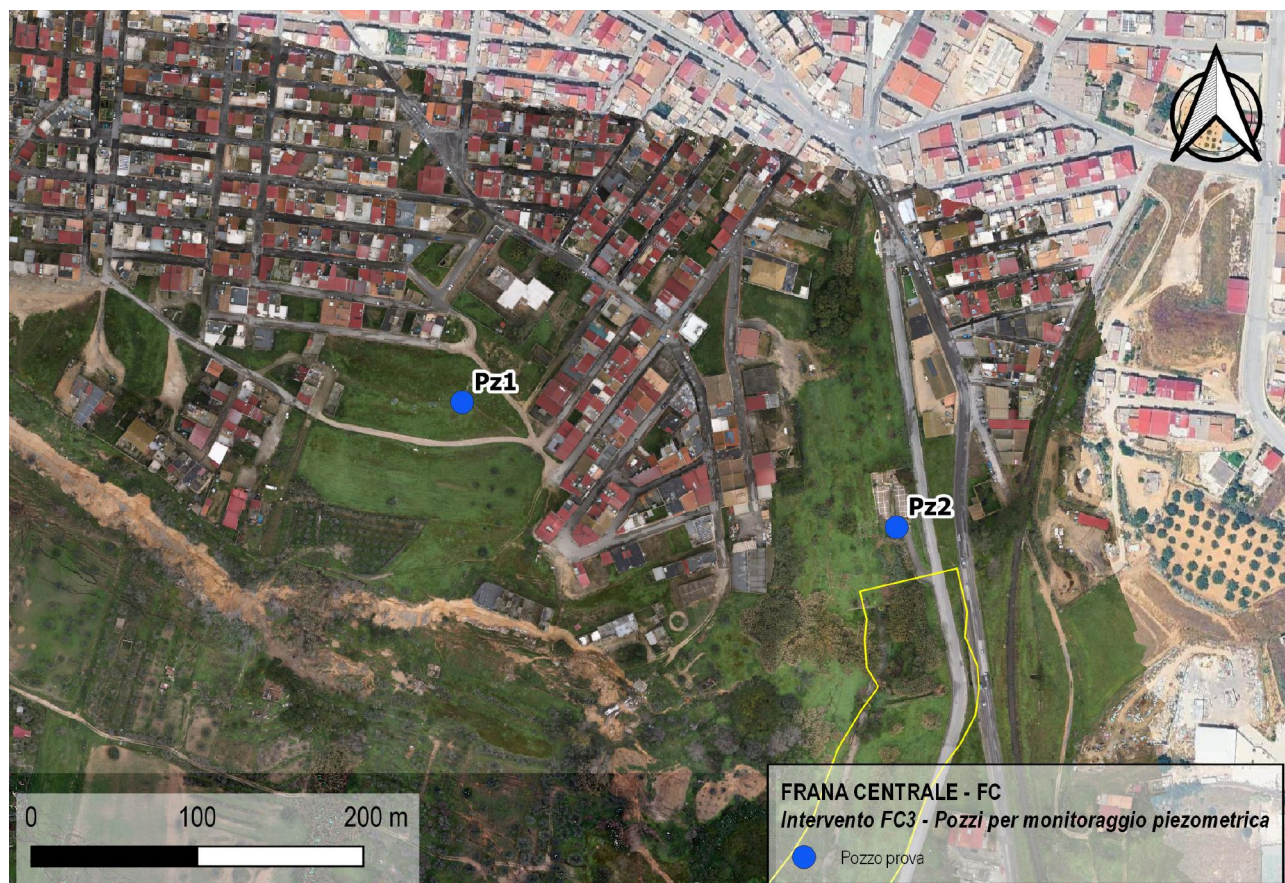


Figura 250 - Ubicazione indagini geonostiche a supporto dell'intervento FC.3.



Figura 251 - Zona di realizzazione del campo pozzi.

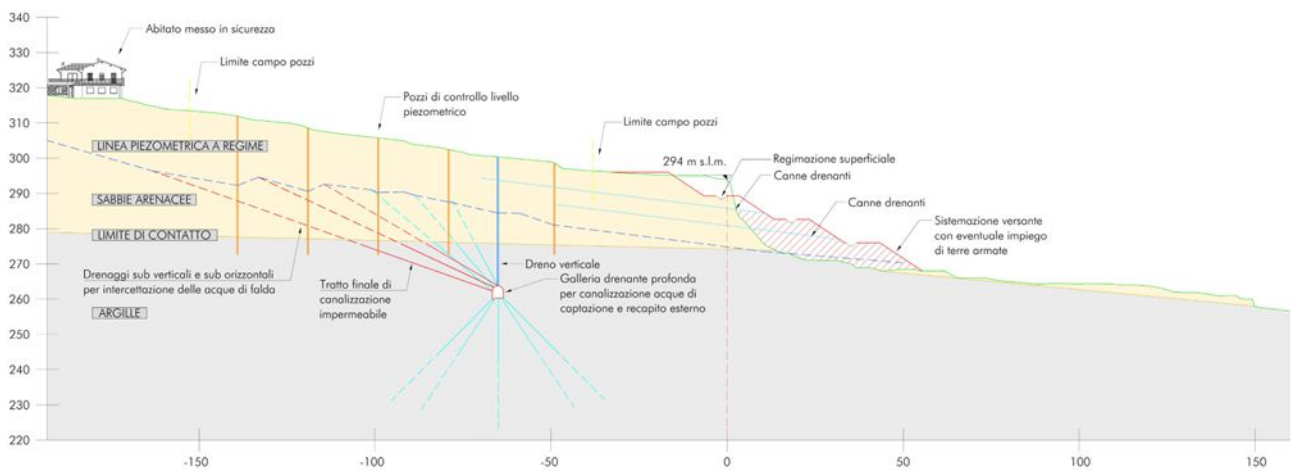


Figura 252 - Sezione tipologica del versante in frana con evidenza della zona destinata a "campo pozzi".

In Tabella 34 è riportata una stima sintetica dei costi che include sia l'importo dei lavori e degli oneri per la sicurezza, sia le somme a disposizione dell'Amministrazione.

A) Lavori		Globale
A.1	Importo delle opere	€ 660.000,00
A.2	Oneri per la sicurezza	€ 50.000,00
	<b>Totale</b>	<b>€ 710.000,00</b>
B) Somme a disposizione dell'Amministrazione		
B.1	IVA sui Lavori	€ 156.200,00
B.2	Imprevisti	€ 51.600,00
B.3	Indagini geognostiche - Comprensive di IVA	€ 317.200,00
B.4	Spese tecniche e incentivi - Comprensive di Contributi e IVA	€ 65.000,00
	<b>Totale somme a disposizione</b>	<b>€ 590.000,00</b>
	<b>SOMMA</b>	<b>€ 1.300.000,00</b>

Tabella 34 - Ipotesi di quadro economico di massima dell'intervento FC.3.

#### 11.3.4 Intervento FC.4 - Riqualificazione recapiti di valle

**Ubicazione:** Frana Centrale

Nel settore centrale del versante, il recapito finale delle acque drenate dalla galleria dell'intervento FC.1 avviene con direzione nord-sud in corrispondenza di un calanco, posto in posizione centrale rispetto al corpo di frana. Tale condizione rappresenta un elemento di criticità, in quanto concentra i deflussi in un ambito già caratterizzato da elevata instabilità morfologica ed erosione attiva.

Gli alvei dei corsi d'acqua presenti risultano infatti fortemente incisi, con approfondimenti fino ad alcune decine di metri. Questa configurazione, in continua evoluzione, comporta la progressiva rimozione del materiale di sostegno al piede dei versanti argillosi, favorendo l'innescare e la riattivazione dei fenomeni franosi.

I versanti immediatamente a valle dell'abitato sono inoltre soggetti a fenomeni di erosione accelerata, che determinano, nel tempo, l'approfondimento dei solchi e l'arretramento delle scarpate. L'azione erosiva concentrata lungo gli impluvi altera l'equilibrio morfologico del pendio, rimuovendo progressivamente il supporto alla base e accentuando l'instabilità dei terreni sovrastanti. In assenza di interventi di controllo, tali dinamiche possono evolvere in un ampliamento delle aree instabili.

L'intervento FC.4 è pertanto finalizzato alla riqualificazione del recapito di valle e alla stabilizzazione del sistema di deflusso superficiale, in modo da rendere compatibile l'immissione delle portate drenate con le condizioni geomorfologiche del sito.

A tal fine si prevede la realizzazione di opere volte a:

- regolarizzare le pendenze longitudinali degli impluvi interessati dal recapito;
- stabilizzare il fondo e le sponde delle incisioni, con particolare attenzione al tratto di immissione delle acque provenienti dalla galleria drenante;
- ridurre l'energia delle acque defluenti mediante opere dissipative (briglie e salti di fondo);
- limitare i fenomeni di erosione regressiva e di scalzamento al piede dei versanti.

Le soluzioni adottate saranno prevalentemente basate su opere flessibili, quali rivestimenti in biorete, materassi drenanti e scogliere in massi o gabbionate, in grado di adattarsi agli assestamenti del terreno e garantire al contempo una efficace protezione dall'erosione; in situazioni che richiedono minor impegno strutturale potranno essere realizzate opere con le tecniche dell'ingegneria naturalistica, da valutare con attenzione soprattutto in riferimento alla durabilità e alla resistenze dei materiali utilizzati.

Particolare attenzione dovrà essere posta alla zona di recapito delle acque drenate, dove sarà necessario prevedere opere di dissipazione dell'energia e di diffusione del flusso, al fine di evitare concentrazioni localizzate che possano innescare ulteriori fenomeni erosivi.

L'intervento si configura quindi come elemento fondamentale di collegamento tra il sistema di drenaggio profondo e il reticolo idraulico superficiale, contribuendo alla stabilizzazione del versante e alla riduzione del rischio idrogeologico nel settore centrale della frana.

Per ricostruire le caratteristiche stratigrafiche, geotecniche e sismiche dei terreni interessati dall'intervento, è stata prevista la seguente campagna di indagini:

- n.4 prove penetrometriche statico-dinamiche a 15 m (o fino a rifiuto strumentale);
- n.2 tomografie sismiche a rifrazione in onde P e SH.

Considerando che l'intervento prevede la movimentazione ed il possibile riutilizzo di terreno, sono stati previsti anche il campionamento e l'analisi chimica ai sensi del DPR 120/2017 e s.s.i.i..

L'ubicazione presunta delle indagini è rappresentata in Figura 253.

Al fine di definire l'area d'intervento e le soluzioni tecniche ipotizzate, vengono riportate in Figura 254 la documentazione fotografica della zona di valle con l'indicazione dei recapiti da riqualificare e in Figura 255 lo schema funzionale relativo alla realizzazione di briglie in gabbionate.



Figura 253 - Ubicazione indagini geognostiche a supporto dell'intervento FC.4.



Figura 254 - Vista della zona di valle del pendio con indicazione della riqualificazione dei recapiti superficiali.

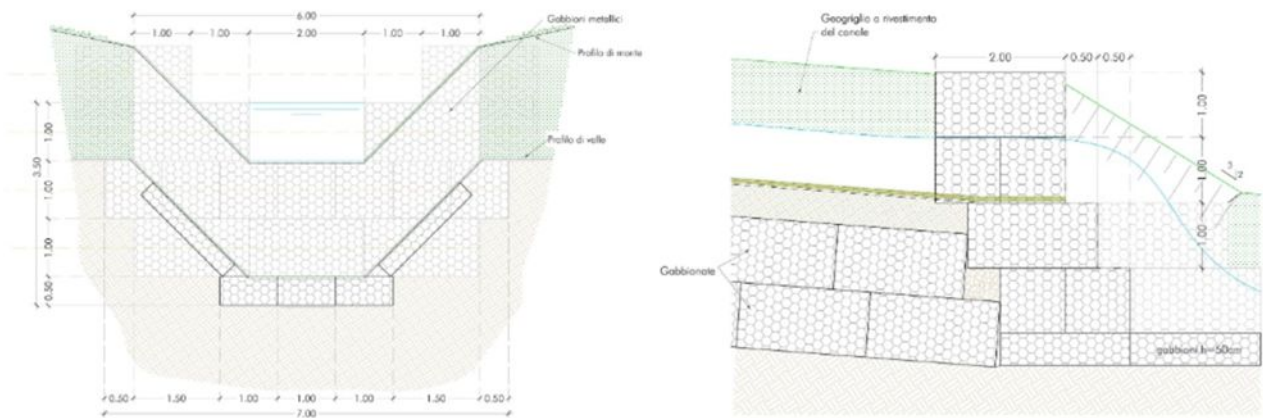


Figura 255 - Esempi di progettazione di briglie in gabbionate metalliche.

In Tabella 35 è riportata una stima sintetica dei costi che include sia l'importo dei lavori e degli oneri per la sicurezza, sia le somme a disposizione dell'Amministrazione.

A) Lavori		Globale
A.1	Importo delle opere	€ 2.200.000,00
A.2	Oneri per la sicurezza	€ 50.000,00
	<b>Totale</b>	<b>€ 2.250.000,00</b>
B) Somme a disposizione dell'Amministrazione		
B.1	IVA sui Lavori	€ 495.000,00
B.2	Imprevisti	€ 126.700,00
B.3	Indagini geognostiche - Comprensive di IVA	€ 18.300,00
B.4	Spese tecniche e incentivi - Comprensive di Contributi e IVA	€ 210.000,00
	<b>Totale somme a disposizione</b>	<b>€ 850.000,00</b>
	<b>SOMMA</b>	<b>€ 3.100.000,00</b>

Tabella 35 - Ipotesi di quadro economico di massima dell'intervento FC.4.

### 11.3.5 Intervento FC.5 - Riprofilatura pendii

**Ubicazione:** Frana Centrale

Nel settore centrale la riprofilatura del versante assume un ruolo strategico ai fini della stabilizzazione dell'area in prossimità del centro abitato, le condizioni morfologiche attuali infatti favoriscono l'infiltrazione rapida delle acque meteoriche e l'innescano di fenomeni di instabilità superficiale e profonda.

La configurazione del pendio, caratterizzata da scarpate acclivi e superfici irregolari, determina un'elevata concentrazione dei deflussi ed un incremento delle pressioni interstiziali nei terreni, con conseguente riduzione delle condizioni di equilibrio.

In questo settore è presente una "rottura" sviluppatasi in prossimità del centro abitato, che rappresenta un elemento di criticità particolarmente rilevante in quanto direttamente interferente con le aree urbanizzate.

L'intervento FC.5 prevede la riprofilatura del versante su un'estensione stimata di circa 1,5 km, con altezze massime dell'ordine di 30 m, al fine di rimodellare il pendio secondo geometrie più regolari e compatibili con le condizioni geotecniche locali.

La realizzazione delle opere potrà avvenire mediante l'impiego di strutture in terra armata ed altre soluzioni flessibili, finalizzate a garantire la stabilità del versante e la durabilità dell'intervento nel tempo. All'interno delle strutture in terra armata, o comunque nelle operazioni di riprofilatura, sarà prevista l'installazione di opportuni livelli drenanti, costituiti da canne drenanti/trincee drenanti, finalizzati all'intercettazione e allo smaltimento delle acque infiltrate, con conseguente riduzione delle pressioni interstiziali nei terreni. La regolarizzazione del profilo consentirà di ridurre le discontinuità superficiali, migliorare il controllo dei deflussi e limitare l'infiltrazione profonda delle acque, contribuendo alla protezione del centro abitato e al miglioramento delle condizioni di equilibrio complessivo del versante.

Per ricostruire le caratteristiche stratigrafiche, geotecniche, idrogeologiche e sismiche dei terreni interessati dall'intervento, è stata prevista la seguente campagna di indagini:

- n.2 sondaggi a carotaggio continuo a 40 m (con prelievo di campioni di terreno per analisi geotecniche di laboratorio e prove SPT a fondo foro);
- n.1 piezometro a tubo aperto in PVC (per rilevare l'oscillazione della piezometrica nel tempo);
- n.1 inclinometro (per rilevare spostamenti laterali e deformazioni del terreno nel tempo);
- n.2 tomografie sismiche a rifrazione in onde P e SH;
- n.4 prove penetrometriche statico-dinamiche a 15 m (o fino a rifiuto strumentale).

Considerando che l'intervento prevede la movimentazione ed il riutilizzo di un notevole volume di terreno, sono stati previsti anche il campionamento e l'analisi chimica ai sensi del DPR 120/2017 e s.s.i.i..

L'ubicazione presunta delle indagini è illustrata in Figura 256.



**Figura 256 - Ubicazione indagini geognostiche a supporto dell'intervento FC.5.**

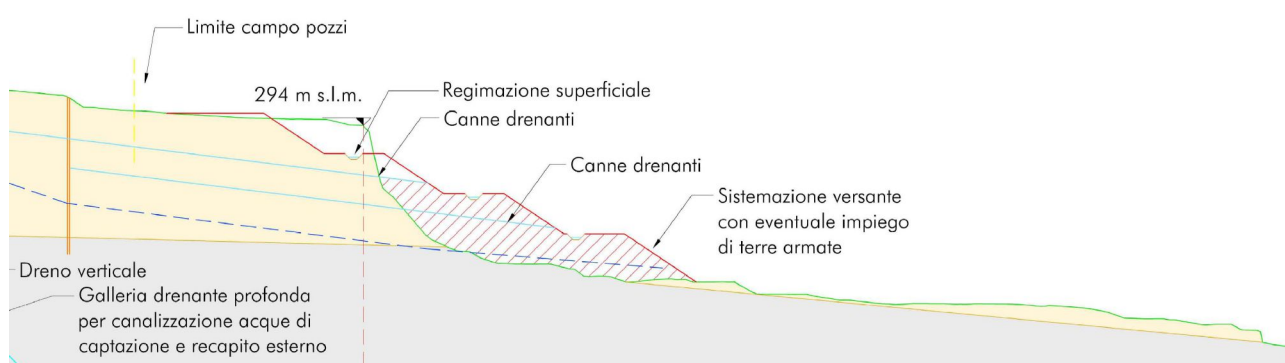
In Figura 257 è riportata la documentazione fotografica dei pendii da riprofilare e in Figura 258 e Figura 259 sono schematizzate le sezioni tipologiche relative alla rimodellazione del versante mediante l'impiego di terre armate, con i dettagli specifici rispettivamente per il settore ovest e per il settore est dell'area di intervento.



**Figura 257 - Vista dei pendii in frana da riprofilare mediante eventuale impiego di terre armate.**



**Figura 258 - Riprofilatura del pendio di valle con eventuale impiego di terre armate - Sezione su Frana Centrale - Lato ovest.**



**Figura 259 - Riprofilatura del pendio di valle con impiego di terre armate - Sezione su Frana Centrale - Lato est.**

In Tabella 36 è riportata una stima sintetica dei costi che include sia l'importo dei lavori e degli oneri per la sicurezza, sia le somme a disposizione dell'Amministrazione.

A) Lavori		GLOBALE
A.1	Importo delle opere	€ 2.200.000,00
A.2	Oneri per la sicurezza	€ 50.000,00
	<b>Totale</b>	<b>€ 2.250.000,00</b>
B) Somme a disposizione dell'Amministrazione		
B.1	IVA sui Lavori	€ 495.000,00
B.2	Imprevisti	€ 127.900,00
B.3	Indagini geognostiche - Comprensive di IVA	€ 67.100,00
B.4	Spese tecniche e incentivi - Comprensive di Contributi e IVA	€ 210.000,00
	<b>Totale somme a disposizione</b>	<b>€ 900.000,00</b>
	<b>SOMMA</b>	<b>€ 3.150.000,00</b>

**Tabella 36 - Ipotesi di quadro economico di massima dell'intervento FC.5.**

### 11.3.6 Intervento FC.6 - Interventi diffusi per la sutura delle lesioni ed il ripristino del reticolo idraulico

**Ubicazione:** Frana Centrale

Il settore centrale del versante è interessato da fenomeni diffusi di erosione superficiale lungo gli impluvi secondari, che determinano l'approfondimento progressivo delle incisioni e la perdita di funzionalità del

reticolo idraulico minore. L'azione delle acque meteoriche concentrate favorisce inoltre processi di instabilità superficiale e la degradazione morfologica diffusa.

L'intervento FC.6 è finalizzato al miglioramento della regimazione idraulica superficiale e alla riduzione dei fenomeni erosivi mediante opere diffuse di sistemazione del suolo, con particolare riferimento al controllo del ruscellamento e all'incremento della stabilità superficiale.

In tale ambito sono presenti estese fratture del terreno con andamento prevalente nordovest-sudest, che interessano ampie porzioni del versante agricolo e costituiscono vie preferenziali di infiltrazione delle acque meteoriche, accelerando l'evoluzione dei fenomeni di instabilità.

Le opere previste comprendono:

- la riprofilatura delle incisioni superficiali e degli impluvi secondari, finalizzata alla regolarizzazione delle pendenze e al miglioramento della capacità di deflusso delle acque meteoriche;
- la sistemazione e risagomatura delle canalette di raccolta minori in prossimità dei ricettori principali, al fine di ottimizzare il convogliamento delle acque superficiali e ridurre il ruscellamento diffuso;
- il miglioramento della continuità del reticolo idraulico superficiale mediante opere di connessione e adeguamento dei tracciati esistenti;
- la sutura delle lesioni del terreno mediante riempimento e compattazione con materiali idonei, seguita da regolarizzazione delle superfici, al fine di ripristinare la continuità morfologica e ridurre i percorsi preferenziali di infiltrazione;
- interventi locali di regimazione delle acque meteoriche nelle aree maggiormente fratturate, con funzione di riduzione dei fenomeni di erosione accelerata.

Gli interventi si inseriscono nel quadro delle opere flessibili, finalizzate alla riduzione dell'energia di deflusso e al contenimento dei processi erosivi, contribuendo al miglioramento complessivo delle condizioni di stabilità del versante.

Per ricostruire le caratteristiche stratigrafiche, geotecniche, idrogeologiche e sismiche dei terreni interessati dall'intervento, è stata prevista la seguente campagna di indagini:

- n.2 tomografie sismiche a rifrazione in onde P e SH;
- n.6 prove penetrometriche statico-dinamiche a 15 m (o fino a rifiuto strumentale).

Considerando che l'intervento prevede la movimentazione ed il possibile riutilizzo di terreno, sono stati previsti anche il campionamento e l'analisi chimica ai sensi del DPR 120/2017 e s.s.i.i..

L'ubicazione presunta delle indagini è illustrata in Figura 260. In Figura 261 si riporta il riferimento fotografico della zona di valle con morfologia a *Graben* ed evidenti fratture diffuse.

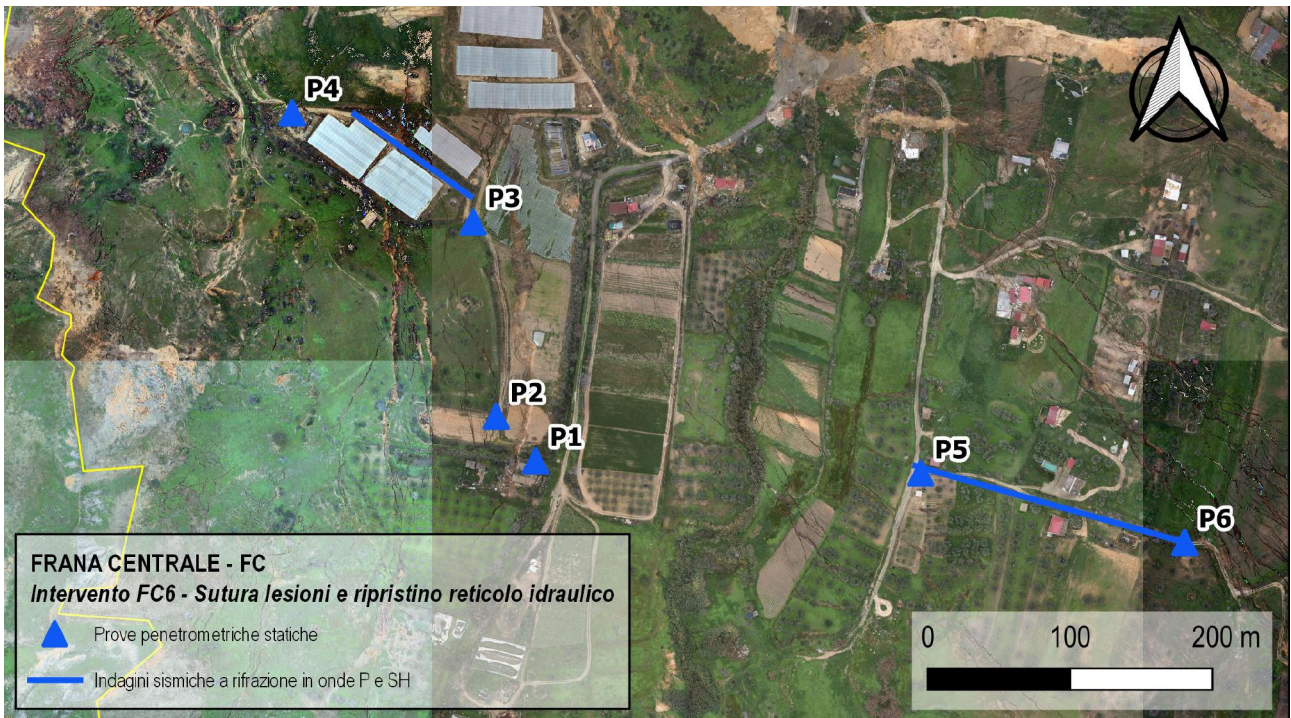


Figura 260 - Ubicazione indagini geognostiche a supporto dell'intervento FC.6.



Figura 261 - Zona di valle della frana con evidenza del movimento al piede per effetto *Graben* e delle fratture diffuse verso valle.

In Tabella 37 è riportata una stima sintetica dei costi che include sia l'importo dei lavori e degli oneri per la sicurezza, sia le somme a disposizione dell'Amministrazione.

A) Lavori		Globale
A.1	Importo delle opere	€ 2.000.000,00
A.2	Oneri per la sicurezza	€ 50.000,00
	<b>Totale</b>	<b>€ 2.050.000,00</b>
B) Somme a disposizione dell'Amministrazione		
B.1	IVA sui Lavori	€ 451.000,00
B.2	Imprevisti	€ 122.400,00
B.3	Indagini geognostiche - Comprensive di IVA	€ 36.600,00
B.4	Spese tecniche e incentivi - Comprensive di Contributi e IVA	€ 190.000,00
	<b>Totale somme a disposizione</b>	<b>€ 800.000,00</b>
	<b>SOMMA</b>	<b>€ 2.850.000,00</b>

Tabella 37 - Ipotesi di quadro economico di massima dell'intervento FC.6.

## 11.4 Interventi sulla Frana Sud (FS)

### 11.4.1 Intervento FS.1 - Ripristino Strada Provinciale SP10

**Ubicazione:** Frana Sud

La SP10 presenta diffuse condizioni di dissesto e interruzioni localizzate, in particolare in corrispondenza degli attraversamenti idraulici non adeguatamente regimati, che hanno determinato fenomeni di rottura e abbassamento localizzato della pavimentazione stradale. Tali criticità risultano strettamente connesse alla dinamica evolutiva del versante e alla mancata gestione dei deflussi superficiali.

La SP10 rappresenta un'infrastruttura viaria strategica, in quanto garantisce il collegamento tra l'abitato di Niscemi e il sistema infrastrutturale E45 Gela-Siracusa, con tempi di percorrenza inferiori rispetto alla SP12, rendendo pertanto prioritario il suo ripristino funzionale.

In fase di somma urgenza risulta necessario garantire il ripristino della funzionalità della viabilità, al fine di assicurare la continuità dei collegamenti e la sicurezza della circolazione, mediante interventi immediati di messa in sicurezza e ripristino della transitabilità.

L'intervento FS.1 è finalizzato al ripristino e alla messa in sicurezza della sede stradale mediante un insieme coordinato di opere infrastrutturali e idrauliche.

Le opere previste comprendono:

- il rifacimento del pacchetto stradale, comprensivo degli strati di fondazione e pavimentazione, al fine di ristabilire la funzionalità e la capacità portante della sede viaria;
- il rifacimento e l'adeguamento delle canalette di raccolta a bordo strada, per il corretto convogliamento e allontanamento delle acque meteoriche dalla piattaforma stradale;
- il rifacimento e l'installazione degli attraversamenti idraulici, con adeguamento delle sezioni di deflusso e miglioramento della continuità del reticolo idraulico;
- la stabilizzazione dei tratti di valle, nei settori maggiormente instabili, mediante opere di sostegno quali paratie su micropali e micropali inclinati/tiranti ovvero pali di diametri maggiori;
- interventi locali di consolidamento del corpo stradale in corrispondenza delle aree maggiormente deformate.

Si precisa che le opere strutturali di sostegno potranno essere efficacemente realizzate solo a seguito della verifica della stabilizzazione complessiva del fenomeno franoso; in condizioni di attività del dissesto, tali interventi non garantiscono infatti la necessaria efficacia e durabilità e dovranno pertanto essere subordinati all'evoluzione del quadro geotecnico.

Per ricostruire le caratteristiche stratigrafiche, geotecniche, idrogeologiche e sismiche dei terreni interessati dall'intervento, è stata prevista la seguente campagna di indagini:

- n.4 sondaggi a carotaggio continuo a 15 m (con prelievo di campioni di terreno per analisi geotecniche di laboratorio, prove SPT a fondo foro e posizionamento piezometri di Casagrande per la misura della pressione neutra dell'acqua in particolari intervalli di profondità);
- n.4 sondaggi a distruzione a 15 m (per il posizionamento di ulteriori piezometri di Casagrande);
- n.3 tomografie sismiche a rifrazione in onde P e SH;
- n.2 prove penetrometriche statico-dinamiche a 15 m (o fino a rifiuto strumentale);

L'ubicazione presunta delle indagini è rappresentata in Figura 262.

Si precisa inoltre che tale piano di indagine potrà essere modificato in base alle esigenze e/o modifiche progettuali.

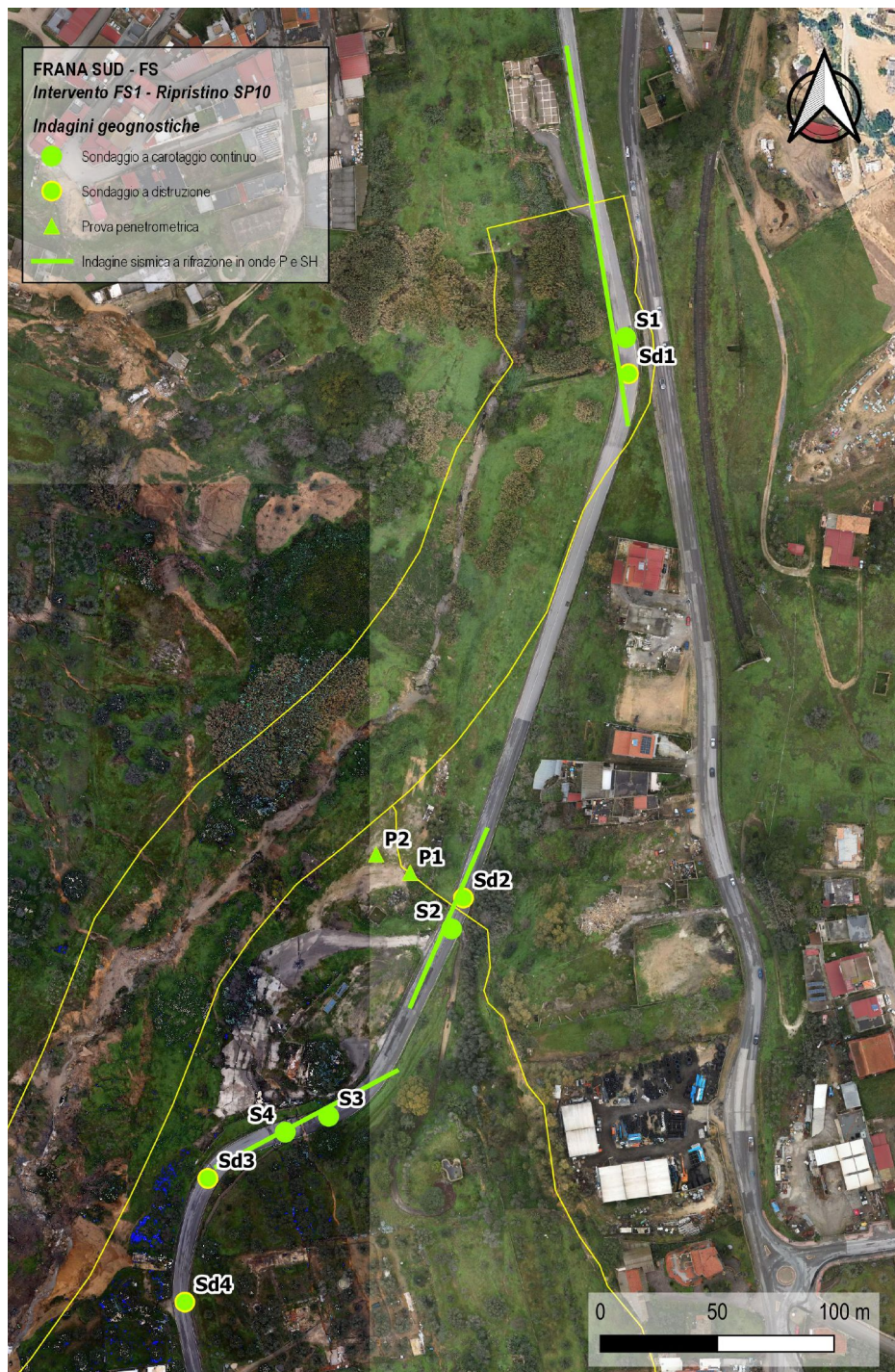
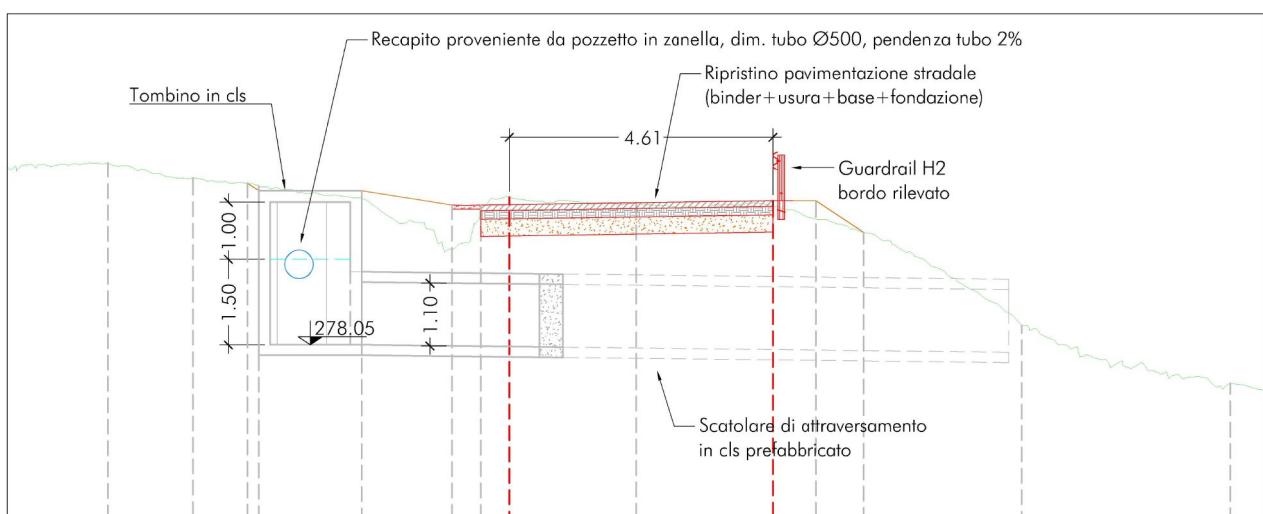


Figura 262 - Ubicazione indagini geognostiche a supporto dell'intervento FS.1.

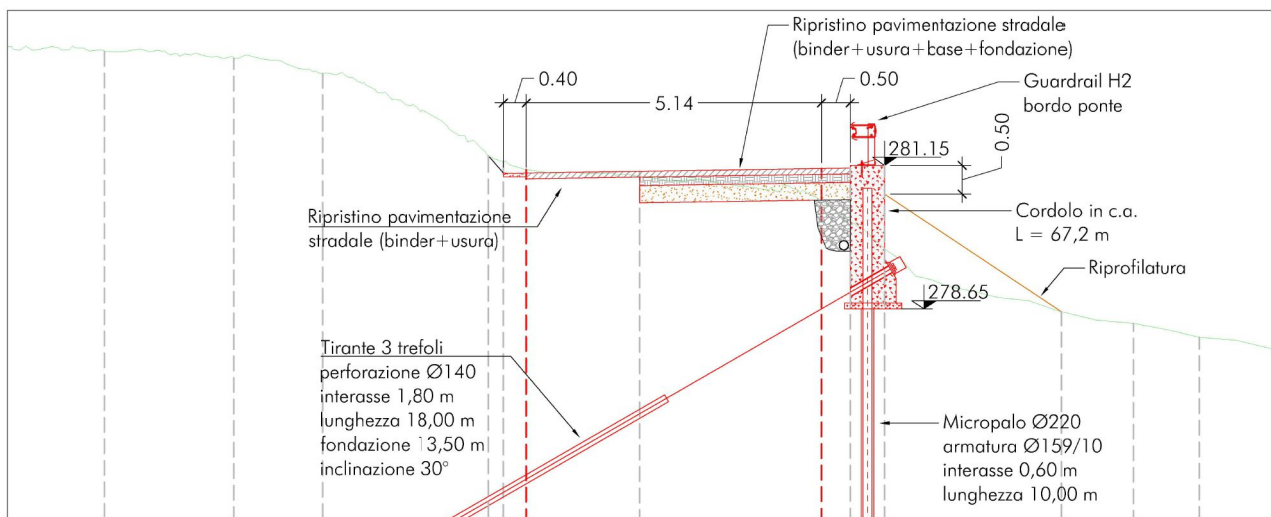
Al fine di illustrare le soluzioni tecniche ipotizzate, nelle figure che seguono sono riportate la documentazione fotografica dei tratti interrotti della SP10 (Figura 263) e le relative ipotesi di ripristino (Figura 264 e Figura 265).



**Figura 263 - Zona di interruzione della strada SP10 con necessità di ripristino stradale e di riqualificazione dei recapiti di monte, di attraversamento e di valle rispetto alla strada.**



**Figura 264 - Ipotesi di ripristino della strada con sistemazione del recapito di monte, caditoia e attraversamento scatolare sotto strada per recapito a valle.**



**Figura 265 - Ipotesi di ripristino della strada con berlinese a valle di sostegno della sede stradale e rifacimento della pavimentazione stradale.**

In Tabella 38 è riportata una stima sintetica dei costi che include sia l'importo dei lavori e degli oneri per la sicurezza, sia le somme a disposizione dell'Amministrazione.

A) Lavori		Globale
A.1	Importo delle opere	€ 1.310.000,00
A.2	Oneri per la sicurezza	€ 50.000,00
	<b>Totale</b>	<b>€ 1.360.000,00</b>
B) Somme a disposizione dell'Amministrazione		
B.1	IVA sui Lavori	€ 299.200,00
B.2	Imprevisti	€ 98.700,00
B.3	Indagini geognostiche - Comprensive di IVA	€ 67.100,00
B.4	Spese tecniche e incentivi - Comprensive di Contributi e IVA	€ 125.000,00
	<b>Totale somme a disposizione</b>	<b>€ 590.000,00</b>
	<b>SOMMA</b>	<b>€ 1.950.000,00</b>

**Tabella 38 - Ipotesi di quadro economico di massima dell'intervento FS.1.**

#### 11.4.2 Intervento FS.2 - Ripristino reticolo idrografico e realizzazione drenaggi profondi

**Ubicazione:** Frana Sud

Nel settore meridionale, poco prima dell'abitato, la SP10 risulta interrotta e disestata in diversi punti localizzati. Tali criticità si concentrano in corrispondenza di compluvi presenti a monte della sede stradale e dei relativi attraversamenti idraulici, evidenziando una stretta correlazione tra la dinamica dei deflussi superficiali e i fenomeni di instabilità del corpo di frana.

In questi ambiti, il convogliamento delle acque meteoriche verso gli attraversamenti al di sotto della SP10 determina condizioni di concentrazione dei flussi ed infiltrazione nei terreni, con conseguente degrado delle caratteristiche geotecniche. L'infiltrazione nei livelli sabbiosi superficiali comporta infatti un aumento delle pressioni interstiziali e una riduzione della resistenza al taglio dei terreni. Tale fenomeno risulta particolarmente critico in quanto questi livelli permeabili poggiano su strati argillosi meno permeabili, all'interno dei quali possono instaurarsi condizioni di sovrappressione idraulica, favorendo l'innesco e la riattivazione dei movimenti franosi.

L'intervento FS.2 è finalizzato alla riduzione delle pressioni interstiziali e al miglioramento delle condizioni di drenaggio del versante, attraverso un sistema integrato di opere di regimazione superficiale e di drenaggio profondo.

In particolare, si prevede:

- il ripristino e la sistemazione del reticolo idrografico superficiale in corrispondenza dei compluvi, mediante pulizia, risagomatura e adeguamento delle sezioni di deflusso;
- la verifica e l'eventuale adeguamento degli attraversamenti idraulici esistenti al di sotto della SP10, al fine di garantire un corretto smaltimento delle portate e ridurre i fenomeni di rigurgito e infiltrazione;
- la realizzazione di sistemi di drenaggio profondo, quali canne drenanti e trincee drenanti, finalizzati all'intercettazione e all'abbattimento delle pressioni interstiziali nei livelli più permeabili;
- la riprofilatura locale delle aree maggiormente dissestate, al fine di migliorare la regimazione delle acque superficiali e ridurre le condizioni di instabilità.

L'insieme degli interventi consente di ridurre i processi di infiltrazione incontrollata, migliorare il drenaggio dei terreni e ristabilire condizioni di equilibrio più favorevoli per il versante, contribuendo alla stabilizzazione dell'infrastruttura viaria e alla mitigazione del rischio idrogeologico nel settore meridionale.

Per ricostruire le caratteristiche stratigrafiche, geotecniche, idrogeologiche e sismiche dei terreni interessati dall'intervento, è stata prevista la seguente campagna di indagini:

- n.2 sondaggi a carotaggio continuo a 20 m (con prelievo di campioni di terreno per analisi geotecniche di laboratorio e prove SPT a fondo foro);
- n.1 tomografia sismica a rifrazione in onde P e SH;
- n.4 prove penetrometriche statico-dinamiche a 15 m (o fino a rifiuto strumentale).

Considerando che l'intervento prevede la movimentazione ed il possibile riutilizzo di terreno, sono stati previsti anche il campionamento e l'analisi chimica ai sensi del DPR 120/2017 e s.s.i.i.

L'ubicazione presunta delle indagini è illustrata in Figura 266.



Figura 266 - Ubicazione indagini geognostiche a supporto dell'intervento FS.2.

Al fine di illustrare le soluzioni di drenaggio previste vengono riportati il riferimento fotografico del versante di monte della SP10 (Figura 267) e gli schemi tecnici relativi alle opere di stabilizzazione (Figura 268 e Figura 269).



Figura 267 - Versante di monte della SP10 con necessità di sistemazione dei recapiti superficiali e di introduzione di sistemi di drenaggio profondi per la corretta regimazione delle acque di infiltrazione.

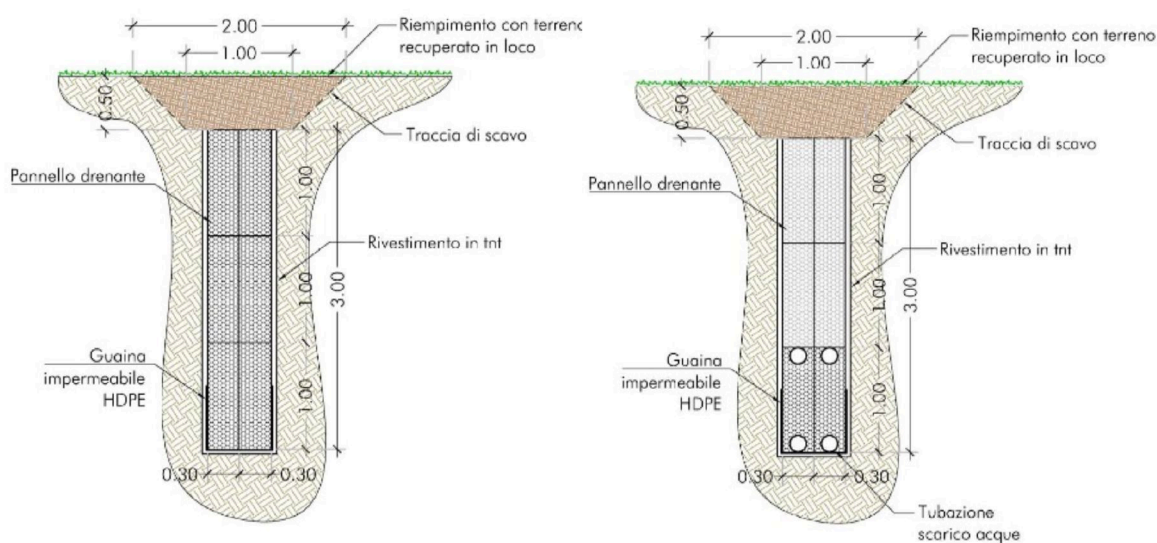
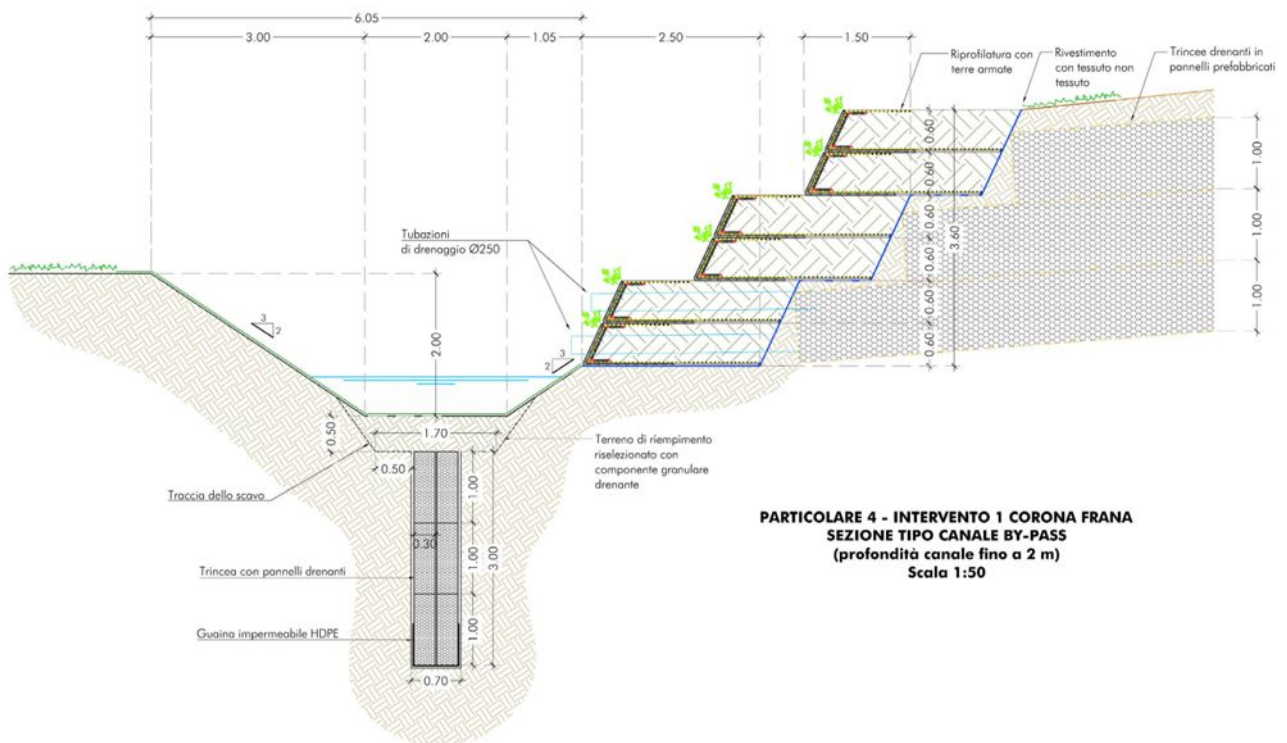


Figura 268 - Esempi di regimazione idraulica profonda delle acque con sistemazione dei recapiti superficiali, mediante trincee drenanti con sezione tipo intermedia (a sinistra) e tipo sbocco (a destra).



**PARTICOLARE 4 - INTERVENTO 1 CORONA FRANA  
SEZIONE TIPO CANALE BY-PASS  
(profondità canale fino a 2 m)  
Scala 1:50**

**Figura 269 - Esempi di regimazione idraulica profonda delle acque con sistemazione dei recapiti superficiali, mediante impiego di trincee drenanti, sistemi di terre armate e rivestimenti superficiali.**

In Tabella 39 riportata una stima sintetica dei costi che include sia l'importo dei lavori e degli oneri per la sicurezza, sia le somme a disposizione dell'Amministrazione.

A) Lavori		Globale
A.1	Importo delle opere	€ 720.000,00
A.2	Oneri per la sicurezza	€ 20.000,00
	<b>Totale</b>	<b>€ 740.000,00</b>
B) Somme a disposizione dell'Amministrazione		
B.1	IVA sui Lavori	€ 162.800,00
B.2	Imprevisti	€ 40.600,00
B.3	Indagini geognostiche - Comprensive di IVA	€ 36.600,00
B.4	Spese tecniche e incentivi - Comprensive di Contributi e IVA	€ 70.000,00
	<b>Totale somme a disposizione</b>	<b>€ 310.000,00</b>
	<b>SOMMA</b>	<b>€ 1.050.000,00</b>

**Tabella 39 - Ipotesi di quadro economico di massima dell'intervento FS.2.**

### 11.4.3 Intervento FS.3 - Riprofilatura pendii

**Ubicazione:** Frana Sud

Nel settore meridionale la riprofilatura del versante è finalizzata alla riduzione delle condizioni di instabilità legate alla morfologia attuale, caratterizzata da superfici irregolari e da pendenze elevate che favoriscono il ruscellamento concentrato e l'infiltrazione localizzata delle acque meteoriche.

Tali condizioni determinano un incremento delle pressioni interstiziali nei terreni e una conseguente riduzione della resistenza al taglio, contribuendo all'evoluzione dei fenomeni franosi.

L'intervento FS.3 prevede la regolarizzazione del pendio mediante riprofilatura su un'estensione stimata di circa 1 km, con altezze massime dell'ordine di 25 m, al fine di ottenere una configurazione morfologica più uniforme e stabile.

La rimodellazione del versante consentirà di ridurre le discontinuità superficiali, migliorare la distribuzione dei deflussi e favorire uno smaltimento più graduale delle acque meteoriche. Anche in questo caso potranno essere adottate soluzioni flessibili, quali opere in terra armata, idonee a garantire la stabilità delle nuove geometrie e la capacità di adattamento a eventuali assestamenti del terreno. All'interno delle strutture in terra armata, o comunque nelle operazioni di riprofilatura, sarà prevista l'installazione di opportuni livelli drenanti, costituiti da canne drenanti/trincee drenanti, finalizzati all'intercettazione e allo smaltimento delle acque infiltrate, con conseguente riduzione delle pressioni interstiziali nei terreni.

L'intervento contribuirà complessivamente al miglioramento delle condizioni di equilibrio del versante nel medio e lungo periodo, attraverso la riduzione dei fenomeni di infiltrazione profonda e il controllo dei processi di instabilità.

Per ricostruire le caratteristiche stratigrafiche, geotecniche, idrogeologiche e sismiche dei terreni interessati dall'intervento, è stata prevista la seguente campagna di indagini:

- n.4 sondaggi a carotaggio continuo a 20 m (con prelievo di campioni di terreno per analisi geotecniche di laboratorio e prove SPT a fondo foro);
- n.4 tomografia sismica a rifrazione in onde P e SH.

Considerando che l'intervento prevede la movimentazione ed il possibile riutilizzo di terreno, sono stati previsti anche il campionamento e l'analisi chimica ai sensi del DPR 120/2017 e s.s.i.i..

L'ubicazione presunta delle indagini è illustrata in Figura 270.

In Figura 271 è riportata la documentazione fotografica del pendio da riprofilare a monte della SP10. Sono inoltre riportati la sezione tecnica relativa alla riprofilatura del versante in sinistra idraulica rispetto al torrente Benefizio (Figura 272) e un esempio di applicazione delle terre armate (Figura 273).



**Figura 270 - Ubicazione indagini geognostiche a supporto dell'intervento FS.3.**



Figura 271 - Vista dei pendii di monte della SP10 con necessità di riprofilatura mediante eventuale impiego di terre armate.

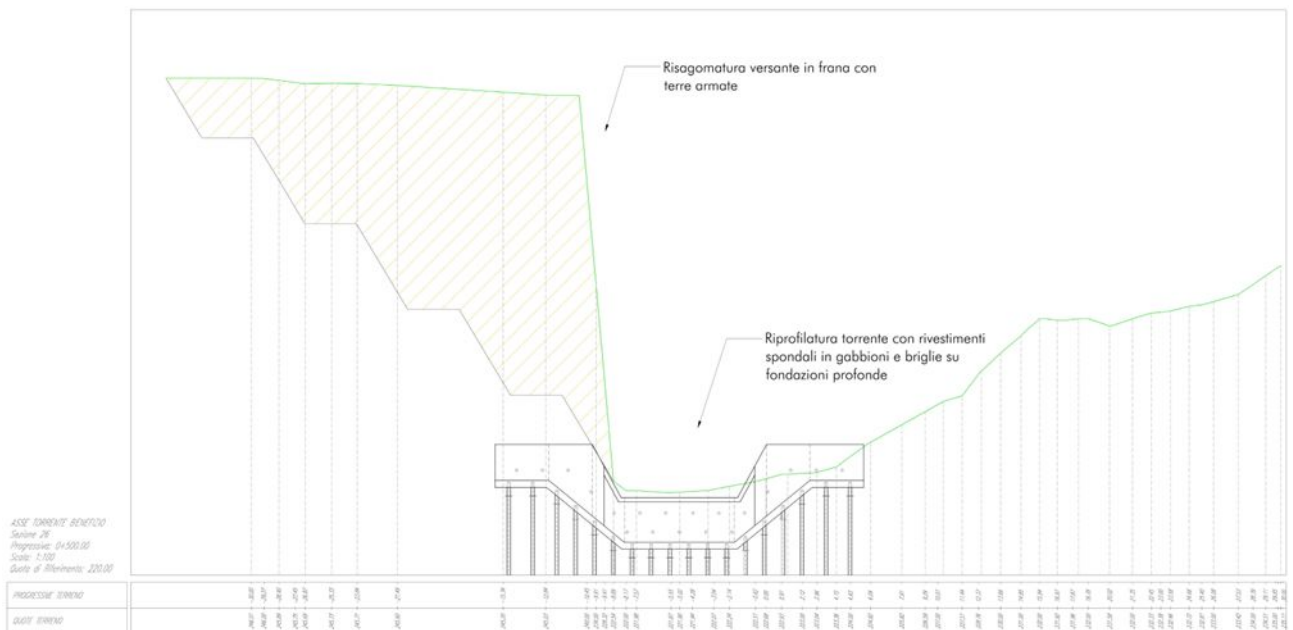


Figura 272 - Sezione tipo del versante in frana con evidenza della riprofilatura del versante in sinistra idraulica al torrente Benefizio con terre armate.

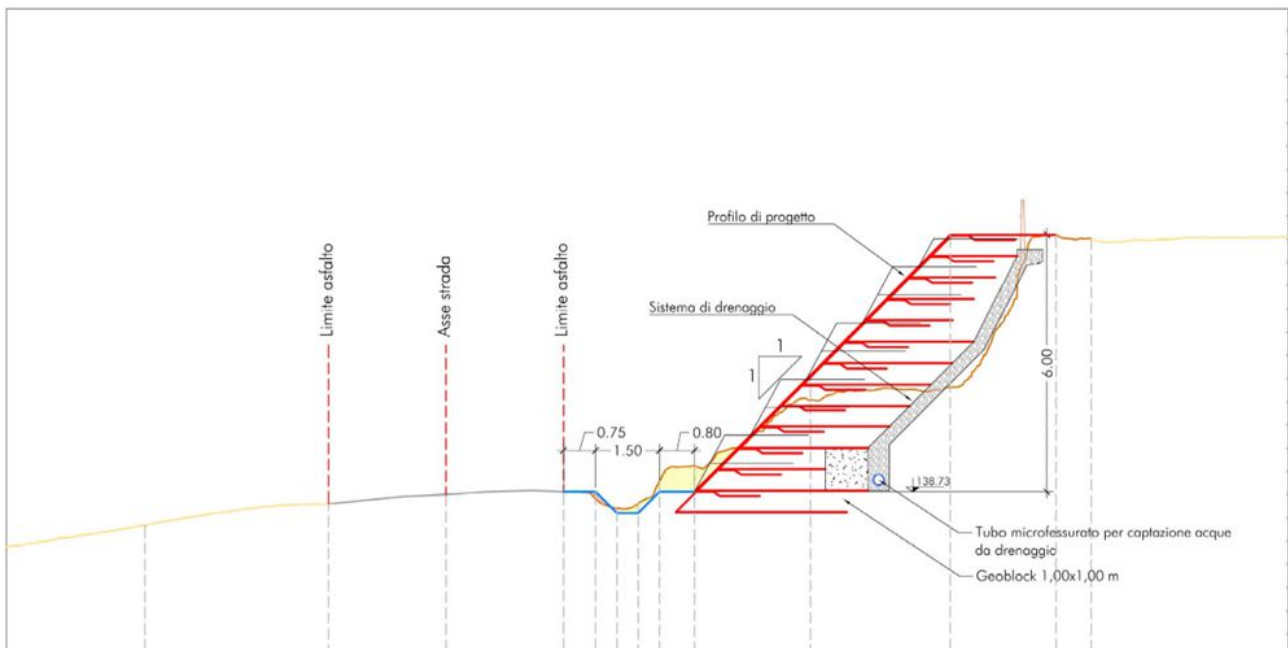


Figura 273 - Esempio di riprofilatura con terre armate del versante di monte della strada.

In Tabella 40 è riportata una stima sintetica dei costi che include sia l'importo dei lavori e degli oneri per la sicurezza, sia le somme a disposizione dell'Amministrazione.

A) Lavori		Globale
A.1	Importo delle opere	€ 700.000,00
A.2	Oneri per la sicurezza	€ 20.000,00
	<b>Totale</b>	<b>€ 720.000,00</b>
B) Somme a disposizione dell'Amministrazione		
B.1	IVA sui Lavori	€ 158.400,00
B.2	Imprevisti	€ 84.500,00
B.3	Indagini geognostiche - Comprensive di IVA	€ 67.100,00
B.4	Spese tecniche e incentivi - Comprensive di Contributi e IVA	€ 70.000,00
	<b>Totale somme a disposizione</b>	<b>€ 380.000,00</b>
	<b>SOMMA</b>	<b>€ 1.100.000,00</b>

Tabella 40 - Ipotesi di quadro economico di massima dell'intervento FS.3.

#### 11.4.4 Intervento FS.4 - Interventi diffusi per la sutura delle lesioni

**Ubicazione:** Frana Sud

Il settore meridionale del versante presenta condizioni di instabilità superficiale legate all'azione erosiva concentrata lungo gli impluvi e alla scarsa regimazione delle acque meteoriche, con conseguente progressivo approfondimento dei solchi e indebolimento del piede del versante.

L'intervento FS.4 è finalizzato al ripristino della continuità morfologica del versante e al miglioramento del sistema di drenaggio superficiale mediante opere diffuse di sistemazione idraulica, coerenti con le tecniche di ingegneria naturalistica adottate per il controllo dei fenomeni erosivi.

In tale ambito sono presenti diffuse lesioni del terreno con andamento prevalente nord-sud, localizzate sia a monte sia a valle della SP10, infrastruttura viaria principale di accesso all'abitato dal settore meridionale. Una lesione interessa direttamente il tracciato della SP10, contribuendo alla sua instabilità locale.

Le opere previste comprendono:

- la sutura delle lesioni mediante riempimento e compattazione con materiali idonei, seguita da regolarizzazione superficiale del piano campagna per il ripristino della continuità morfologica;
- la riprofilatura delle aree interessate, finalizzata alla riduzione delle discontinuità morfologiche e al miglioramento delle condizioni di deflusso superficiale;
- il ripristino del reticolo idraulico minore attraverso pulizia, risagomatura e adeguamento dei fossi di scolo, al fine di garantire una corretta regimazione delle acque meteoriche;
- la stabilizzazione delle superfici esposte lungo gli impluvi anche attraverso tecniche di ingegneria naturalistica, quali bioreti e inerbimento guidato, per la riduzione dei fenomeni di erosione superficiale;
- interventi localizzati di protezione delle aree maggiormente danneggiate in prossimità della SP10, finalizzati al miglioramento della stabilità del corpo stradale.

L'intervento contribuisce complessivamente alla riduzione dell'energia di deflusso superficiale e al miglioramento delle condizioni di stabilità del versante meridionale.

Per ricostruire le caratteristiche stratigrafiche, geotecniche, idrogeologiche e sismiche dei terreni interessati dall'intervento, è stata prevista la seguente campagna di indagini:

- n.11 prove penetrometriche statico-dinamiche a 15 m (o fino a rifiuto strumentale);
- n.4 tomografia sismica a rifrazione in onde P e SH.

Considerando che l'intervento prevede la movimentazione ed il possibile riutilizzo di terreno, sono stati previsti anche il campionamento e l'analisi chimica ai sensi del DPR 120/2017 e s.s.i.i..

L'ubicazione presunta delle indagini è illustrata in Figura 274. In Figura 275 è inoltre riportata l'evidenza fotografica delle fratture superficiali presenti sul versante che richiedono interventi di sutura e ripristino.

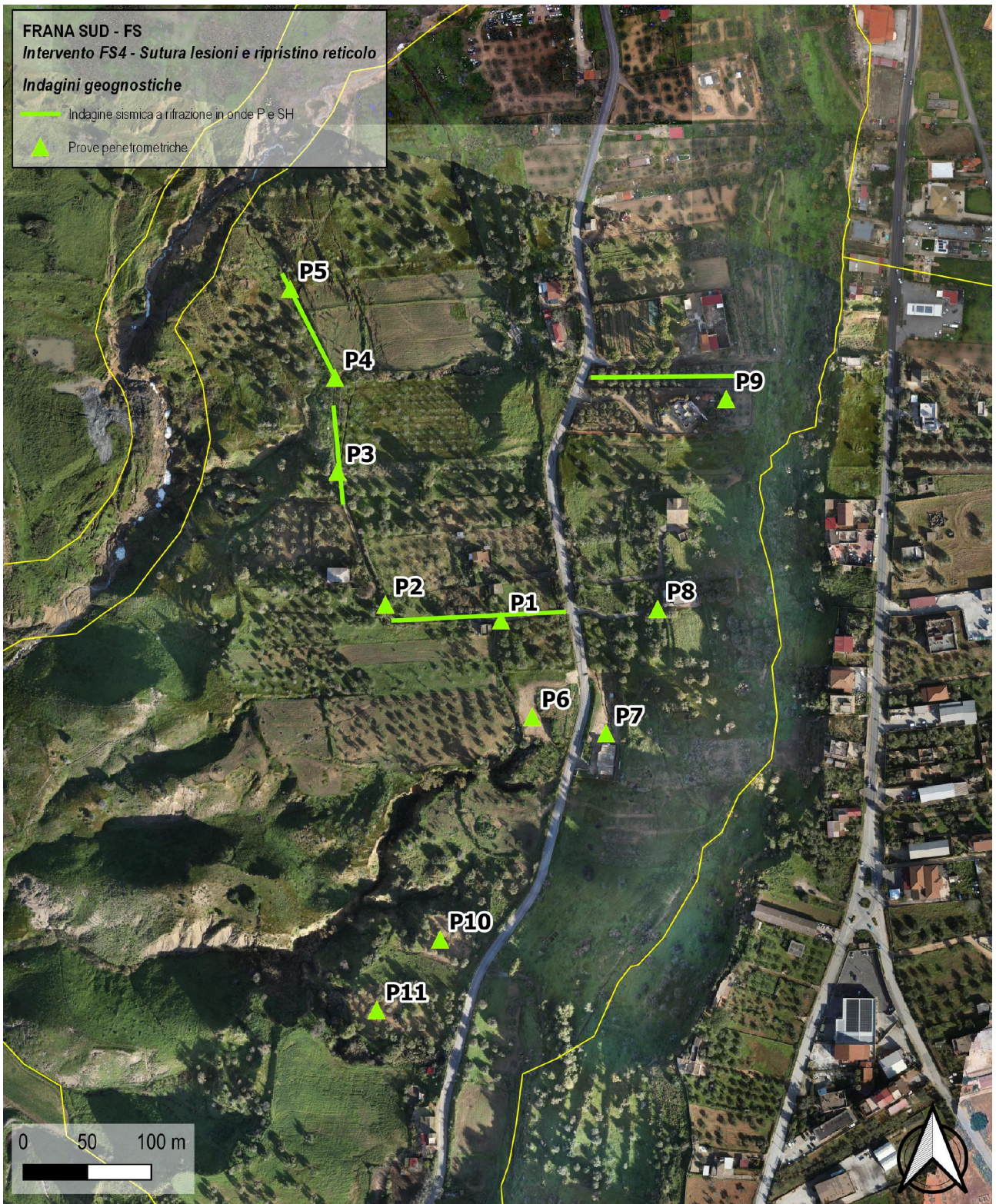


Figura 274 - Ubicazione indagini geognostiche a supporto dell'intervento FS.4.



**Figura 275 - Evidenza delle fratture superficiali con esigenza di sutura e ripristino.**

In Tabella 41 è riportata una stima sintetica dei costi che include sia l'importo dei lavori e degli oneri per la sicurezza, sia le somme a disposizione dell'Amministrazione.

<b>A) Lavori</b>		<b>GLOBALE</b>
A.1	Importo delle opere	€ 2.300.000,00
A.2	Oneri per la sicurezza	€ 50.000,00
	<b>Totale</b>	<b>€ 2.350.000,00</b>
<b>B) Somme a disposizione dell'Amministrazione</b>		
B.1	IVA sui Lavori	€ 517.000,00
B.2	Imprevisti	€ 131.400,00
B.3	Indagini geognostiche - Comprensive di IVA	€ 36.600,00
B.4	Spese tecniche e incentivi - Comprensive di Contributi e IVA	€ 215.000,00
	<b>Totale somme a disposizione</b>	<b>€ 900.000,00</b>
	<b>SOMMA</b>	<b>€ 3.250.000,00</b>

**Tabella 41 - Ipotesi di quadro economico di massima dell'intervento FS.4.**

## 11.5 Interventi sul Torrente Benefizio

### 11.5.1 Intervento BE.1 - Ripristino della quota di fondo, sistemazione spondale e del tratto di monte

**Ubicazione:** Torrente Benefizio

L'erosione del torrente Benefizio rappresenta uno dei principali fattori per le dinamiche di instabilità del territorio interessato dai fenomeni franosi, rilevandosi quale elemento critico per i dissesti "Frana Centrale", in destra idrografica, e "Frana Sud", in sinistra idrografica. Già in condizioni antecedenti ai recenti eventi di dissesto, il corso d'acqua evidenziava criticità significative legate alla regimazione delle acque e alla gestione idraulica dell'alveo, con elevate velocità di deflusso che favorivano intensi fenomeni di erosione sia lungo le sponde sia sul fondo.

L'azione erosiva ha determinato nel tempo un progressivo arretramento delle sponde e una modifica dell'assetto morfologico dell'alveo, con effetti diretti sulla stabilità dei versanti adiacenti. In particolare, nei tratti prossimi ai fronti di frana, i processi di erosione fluviale hanno causato fenomeni di scalzamento del piede del versante, riducendo il supporto naturale alla massa instabile e contribuendo all'innesco e alla riattivazione dei movimenti franosi.

Tali dinamiche erano già state evidenziate negli studi successivi alla frana del 12 ottobre 1997, nei quali il torrente Benefizio veniva individuato come uno dei principali fattori di instabilità del versante, in relazione sia all'approfondimento dell'incisione alveale sia all'apporto di acque meteoriche provenienti dall'abitato (Commissione tecnico-scientifica, 2005). In tale contesto era stata proposta una strategia di riduzione dei contributi idrici mediante deviazione delle acque urbane verso il bacino del torrente Valle Pozzo, integrata da opere di sistemazione idraulica.

Al fine di aggiornare il quadro conoscitivo e individuare i tratti maggiormente critici, sono stati eseguiti dal CIMA rilievi mediante drone con acquisizione di nuvole di punti ad alta risoluzione, che hanno consentito la ricostruzione di un modello tridimensionale del corso d'acqua e l'analisi di profili longitudinali e sezioni trasversali lungo circa 2 km di sviluppo (cfr. sezione 8 del presente Rapporto).

Le analisi hanno evidenziato:

- tratti caratterizzati da forte erosione di fondo e di sponda;
- zone di deposito sedimentario;
- tratti con pendenze elevate e presenza di salti di fondo;
- dislocazioni locali dell'alveo che alterano il regime di deflusso.

Tali condizioni determinano un'elevata variabilità idraulica lungo il torrente e contribuiscono all'innesco di fenomeni di instabilità localizzati, con possibili evoluzioni verso dissesti di maggiore estensione.

L'intervento BE.1 è finalizzato alla regolarizzazione del profilo di fondo del corso d'acqua, alla stabilizzazione delle sponde e alla riduzione degli effetti erosivi, mediante un insieme integrato di opere di sistemazione idraulica.

In particolare, si prevede:

- la realizzazione di briglie in calcestruzzo armato su fondazioni profonde lungo il tratto montano del torrente, con funzione di riduzione della pendenza, dissipazione dell'energia del flusso, stabilizzazione del fondo alveo e contenimento dell'erosione regressiva;
- il ripristino della quota di fondo dell'alveo nei tratti fra le briglie, mediante riempimento con materiale drenante, al fine di favorire la dissipazione delle pressioni interstiziali e migliorare la stabilità del fondo;
- la sistemazione delle sponde e di tratti estesi dell'alveo mediante gabbionate metalliche riempite con materiale lapideo, in grado di garantire elevata resistenza all'erosione e adattabilità agli assestamenti del terreno.

Si prevede, altresì, di disporre una tubazione di diametro consistente (al momento di diametro non inferiore a 2 m) in prossimità dell'attuale fondo dell'alveo, in modo da recapitare verso valle una parte rilevante delle

portate derivanti principalmente dai bacini urbani della città; la parte eccedente, mediante sistemi di “troppo pieno” scorrerà in superficie nel nuovo alveo stabilizzato.

Le analisi preliminari indicano la necessità di realizzare almeno 20 briglie lungo un tratto di circa 500 m, al fine di ottenere una stabilizzazione progressiva del profilo longitudinale. Le gabbionate saranno impiegate su una quota significativa del tratto più instabile (circa il 50%), in continuità con soluzioni già sperimentate con successo in contesti analoghi.

Gli interventi saranno estesi per un ulteriore tratto di almeno 1000 m con le medesime tecnologie, ma con interassi maggiori fra una briglia e l'altra man mano che ci si allontana dalla zona maggiormente incisa disposta alla base delle sponde delle Frane Centrale e Sud.

Il complesso degli interventi consente di ridurre i fenomeni erosivi, stabilizzare l'alveo e limitare i processi di scalzamento al piede dei versanti, contribuendo in modo significativo alla mitigazione del rischio idrogeologico dell'area.

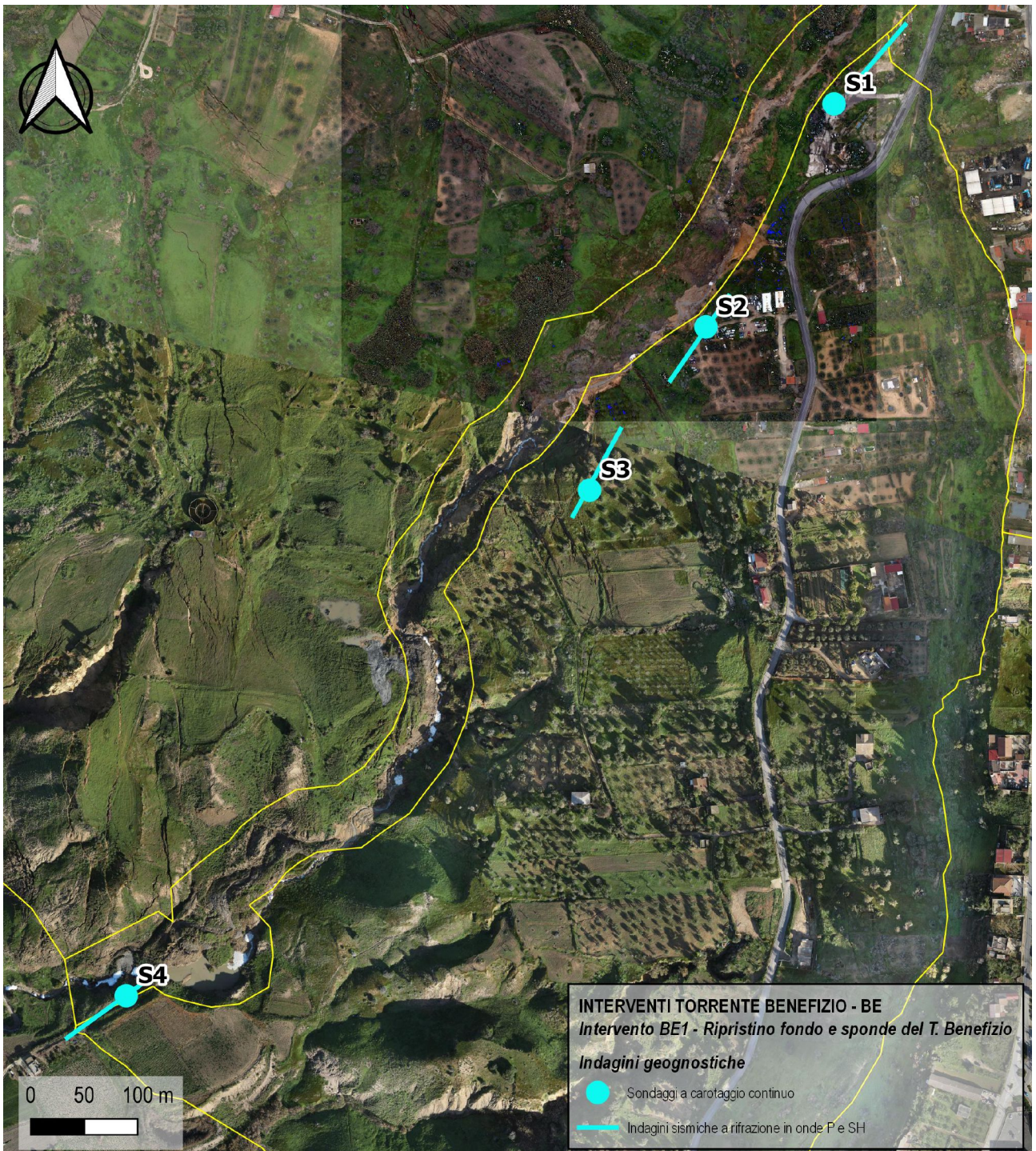
Per ricostruire le caratteristiche stratigrafiche, geotecniche, idrogeologiche e sismiche dei terreni interessati dall'intervento, è stata prevista la seguente campagna di indagini:

- n.4 sondaggi a carotaggio continuo a 30 m (con prelievo di campioni di terreno per analisi geotecniche di laboratorio e prove SPT a fondo foro);
- n.4 piezometri a tubo aperto in PVC (per rilevare l'oscillazione della piezometrica nel tempo);
- n.4 tomografie sismiche a rifrazione in onde P e SH.

Considerando che l'intervento prevede la movimentazione ed il possibile riutilizzo di terreno, sono stati previsti anche il campionamento e l'analisi chimica ai sensi del DPR 120/2017 e s.s.i.i..

L'ubicazione presunta delle indagini è illustrata in Figura 276.

Al fine di documentare le criticità e le soluzioni progettuali previste, vengono riportati lo stato di forte erosione e instabilità delle sponde e del fondo alveo del torrente Benefizio (Figura 277, Figura 278 e Figura 279) e l'analisi dei profili longitudinali con l'individuazione dei salti di fondo e delle contropendenze (Figura 280 e Figura 281). La documentazione tecnica illustra inoltre gli schemi costruttivi delle briglie (Figura 282, Figura 283, Figura 284) ed esempi di sistemazioni idrauliche mediante briglie in gabbionate (Figura 285 e Figura 286).



**Figura 276 - Ubicazione indagini geognostiche a supporto dell'intervento BE.1.**



**Figura 277 - Alveo e superfici spondali del torrente Benefizio in evidente stato di erosione e dissesto diffusi.**



**Figura 278 - Alveo e superfici spondali del torrente Benefizio in evidente stato di erosione e dissesto diffusi.**

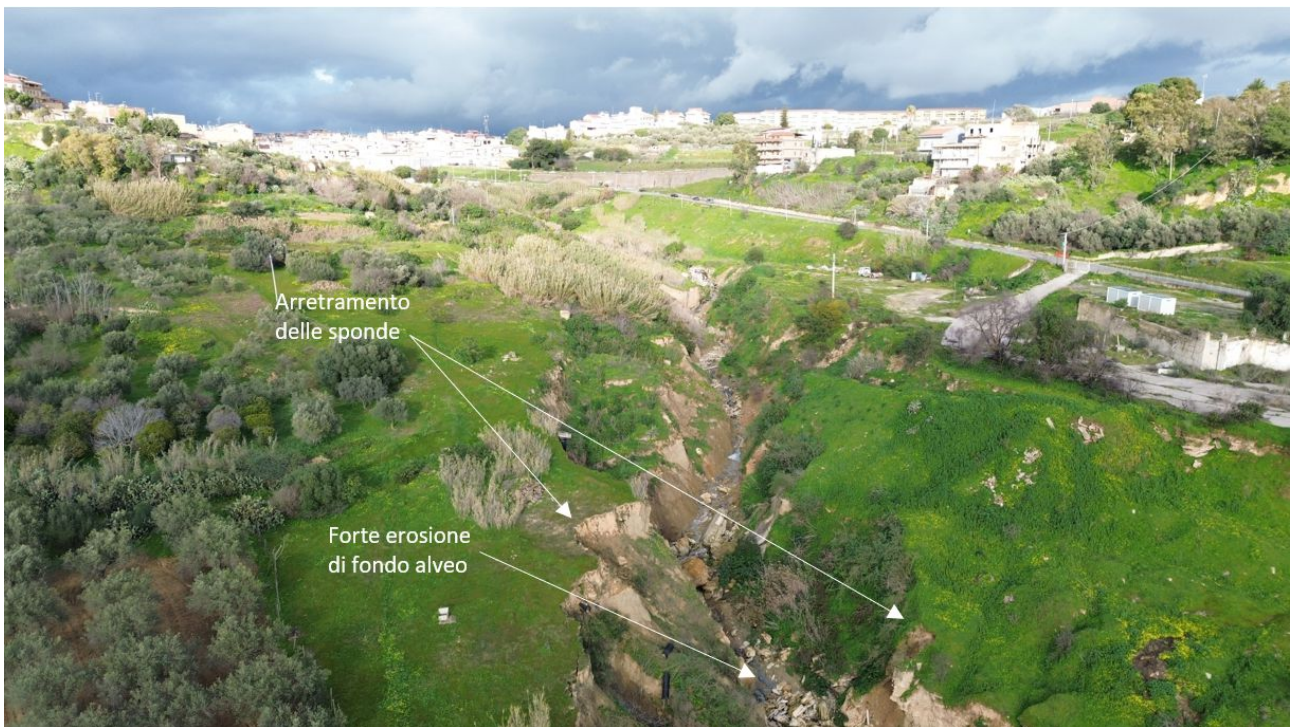


Figura 279 - Alveo e superfici spondali del torrente Benefizio in evidente stato di erosione e dissesto diffusi, con evidenza della forte pendenza longitudinale del fondo alveo.

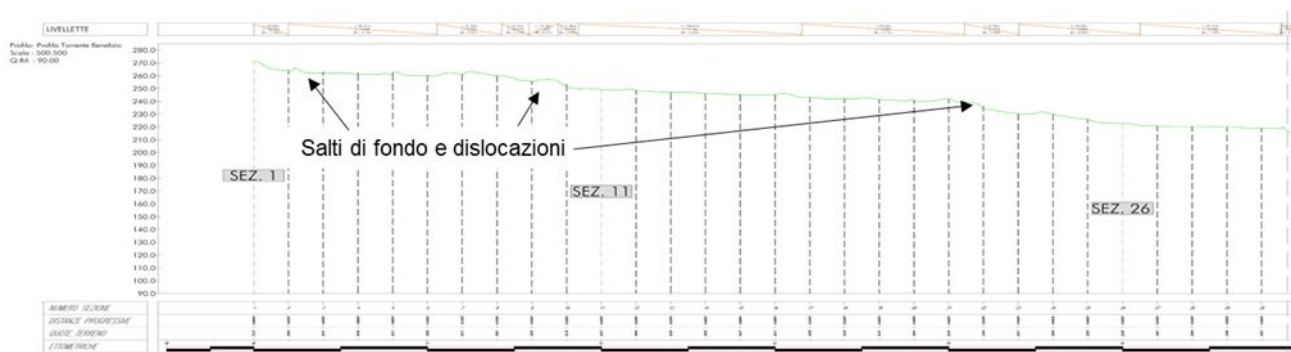


Figura 280 - Parte Nord del profilo longitudinale del torrente Benefizio, con individuazione dei salti di fondo e delle dislocazioni.

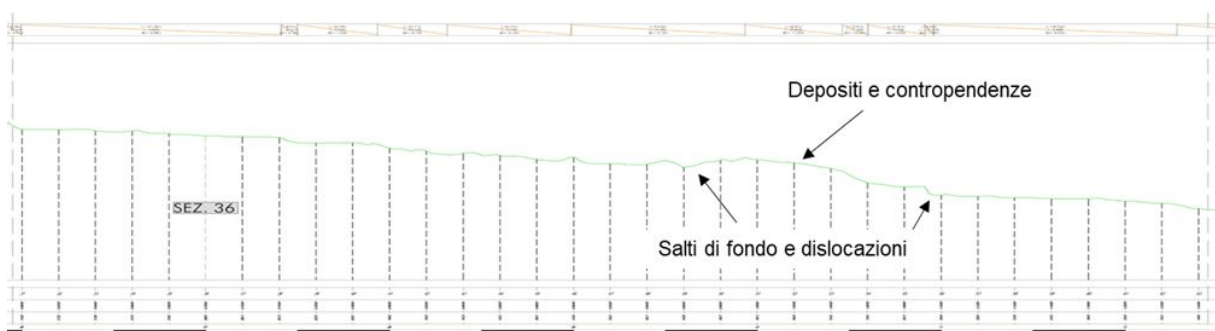


Figura 281 - Parte intermedia del profilo longitudinale del torrente Benefizio, con individuazione dei salti di fondo, dislocazioni, depositi e contropendenze.

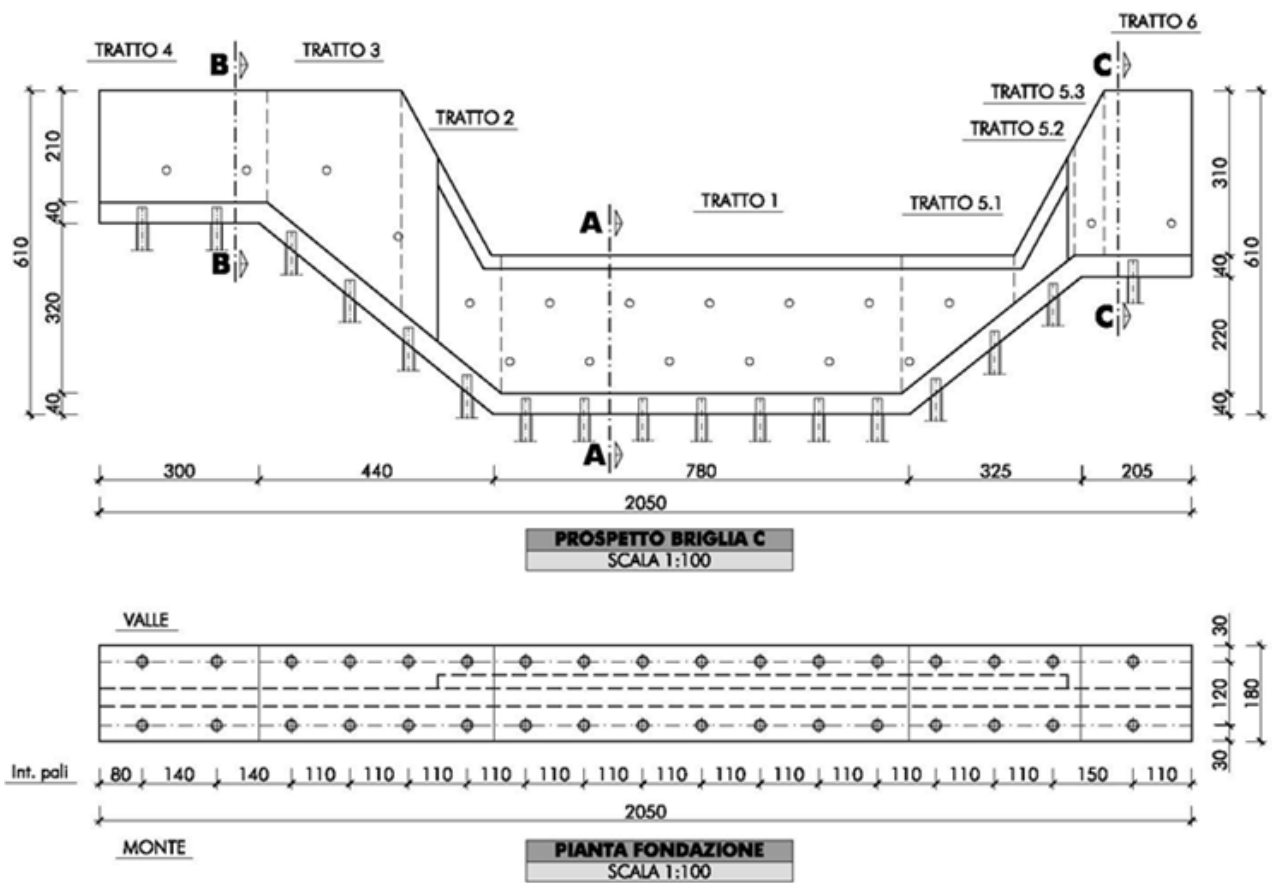


Figura 282 - Pianta e sezione di un tipologico di briglia in calcestruzzo armato su fondazioni profonde.



Figura 283 - Briglia in calcestruzzo armato su fondazioni profonde - Solco del Diavolo, Alta Garfagnana (LU).

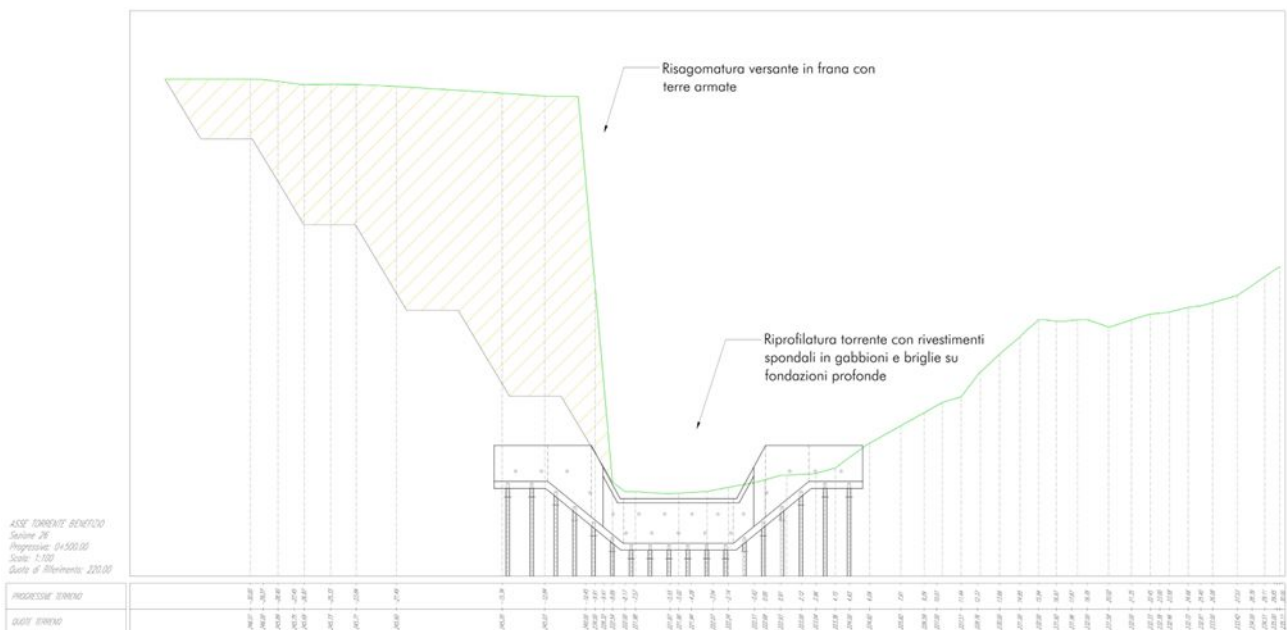


Figura 284 - Sezione tipo con briglia su fondazioni profonde e riprofilatura del versante di monte in terre armate.

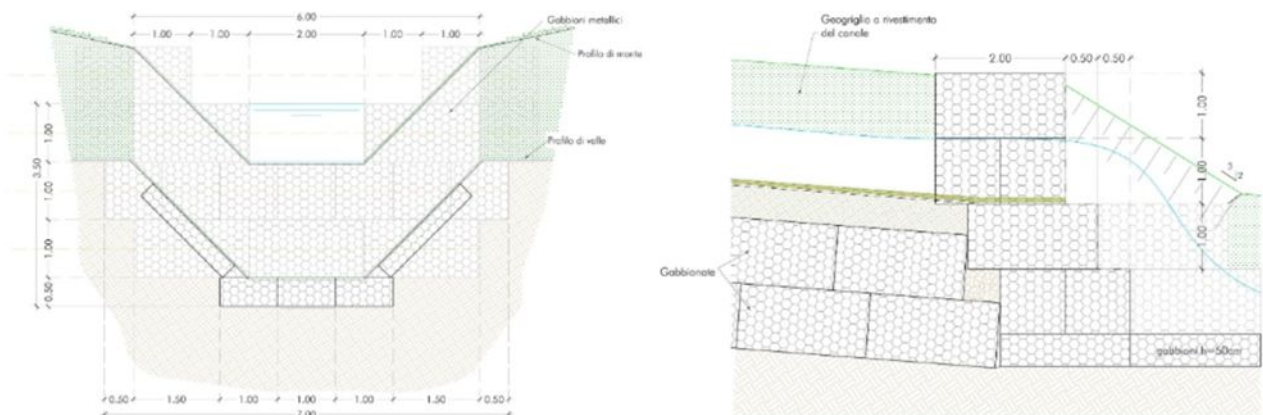


Figura 285 - Esempi di progettazione di briglie in gabbionate.



**Figura 286 - Esempi di realizzazione di briglie in gabbionate riempite con materiale lapideo nei pressi della frana di Montaguto.**

In Tabella 42 è riportata una stima sintetica dei costi che include sia l'importo dei lavori e degli oneri per la sicurezza, sia le somme a disposizione dell'Amministrazione.

<b>A) Lavori</b>		<b>GLOBALE</b>
A.1	Importo delle opere	€ 9.000.000,00
A.2	Oneri per la sicurezza	€ 180.000,00
	<b>Totale</b>	<b>€ 9.180.000,00</b>
<b>B) Somme a disposizione dell'Amministrazione</b>		
B.1	IVA sui Lavori	€ 2.019.600,00
B.2	Imprevisti	€ 496.100,00
B.3	Indagini geognostiche - Comprensive di IVA	€ 79.300,00
B.4	Spese tecniche e incentivi - Comprensive di Contributi e IVA	€ 725.000,00
	<b>Totale somme a disposizione</b>	<b>€ 3.320.000,00</b>
	<b>SOMMA</b>	<b>€ 12.500.000,00</b>

**Tabella 42 - Ipotesi di quadro economico di massima dell'intervento BE.1.**

### 11.5.2 Intervento BE.2 - Ripristino delle zone limitrofe in destra idraulica al torrente Benefizio

**Ubicazione:** Torrente Benefizio

In continuità con l'intervento BE.1, relativo alla sistemazione idraulica del torrente Benefizio mediante ripristino del fondo alveo, realizzazione di briglie e stabilizzazione delle sponde, si ritiene necessario intervenire anche nelle aree limitrofe in destra idraulica, direttamente influenzate dalle dinamiche erosive del corso d'acqua.

Le condizioni di forte incisione dell'alveo e le elevate velocità di deflusso hanno determinato nel tempo fenomeni diffusi di erosione di sponda e di scalzamento al piede dei versanti, con conseguente arretramento delle scarpate e perdita di stabilità delle aree adiacenti. Tali processi risultano strettamente connessi alla dinamica del torrente e rappresentano un fattore determinante nell'evoluzione dei dissesti, come già evidenziato nell'ambito dell'intervento BE.1.

L'intervento BE.2 è pertanto finalizzato alla stabilizzazione delle zone limitrofe in destra idraulica, attraverso opere integrate in grado di contrastare l'erosione e di migliorare le condizioni di equilibrio del sistema alveo-versante.

In particolare, si prevede:

- la protezione della parte bassa delle sponde mediante gabbioni riempiti con materiale lapideo, con funzione di difesa dall'erosione diretta del flusso;
- la realizzazione di scogliere di protezione lungo le sponde, a sostegno delle scarpate e finalizzate alla stabilizzazione delle sezioni idrauliche;
- interventi di consolidamento della parte alta delle sponde mediante rivestimenti in bioreti, finalizzati alla stabilizzazione delle superfici esposte e al controllo dei fenomeni di erosione superficiale.

L'impiego di gabbionate metalliche riempite con materiale lapideo rappresenta una soluzione tecnica consolidata, già adottata con successo in diversi contesti caratterizzati da dissesti idrogeologici analoghi, tra cui gli interventi realizzati nell'ambito della stabilizzazione della frana di Montaguto (AV), oltre che in corsi d'acqua situati a valle dell'abitato di Niscemi.

Tali opere presentano numerosi vantaggi:

- elevata capacità di adattamento agli assestamenti del terreno;
- buona resistenza all'erosione idraulica;
- possibilità di integrazione con soluzioni di ingegneria naturalistica.

L'intervento consente quindi di ridurre i fenomeni erosivi lungo la sponda destra e di migliorare la stabilità complessiva del versante, in coerenza con le opere previste nell'alveo principale.

Per il presente intervento non sono state previste specifiche indagini in quanto il modello stratigrafico, geotecnico, idrogeologico e sismico del terreno, potrà essere ricostruito utilizzando i dati geognostici acquisiti con le campagne realizzate per gli interventi limitrofi.

Al fine di illustrare lo stato attuale e le contromisure progettuali previste è riportata la documentazione fotografica della sponda in destra idraulica soggetta a forte erosione (Figura 287). La documentazione illustra inoltre sistemazioni mediante gabbioni riempiti con materiale lapideo (Figura 288 e Figura 289) e la sezione di rinforzo spondale tramite scogliere (Figura 290).

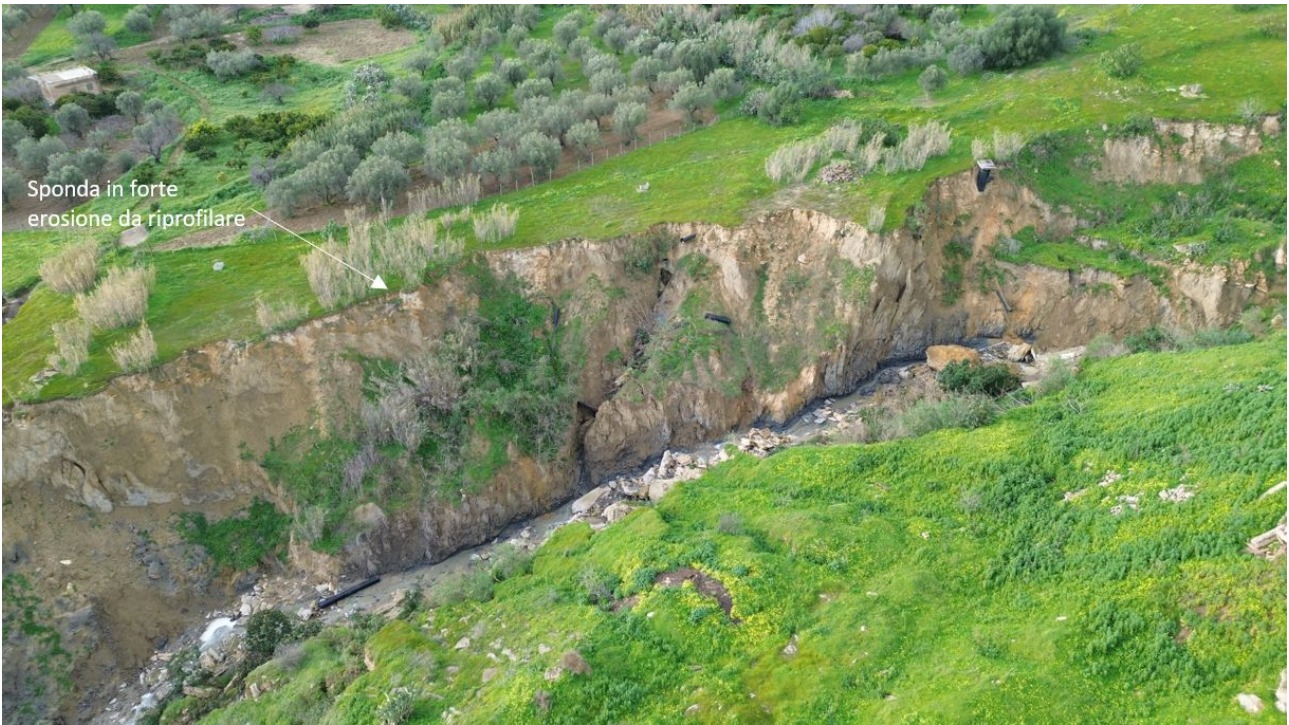


Figura 287 - Sponda in destra idraulica al torrente Benefizio in forte erosione, da riprofilare mediante impiego di gabbioni e sistemi di protezione dall'erosione superficiale

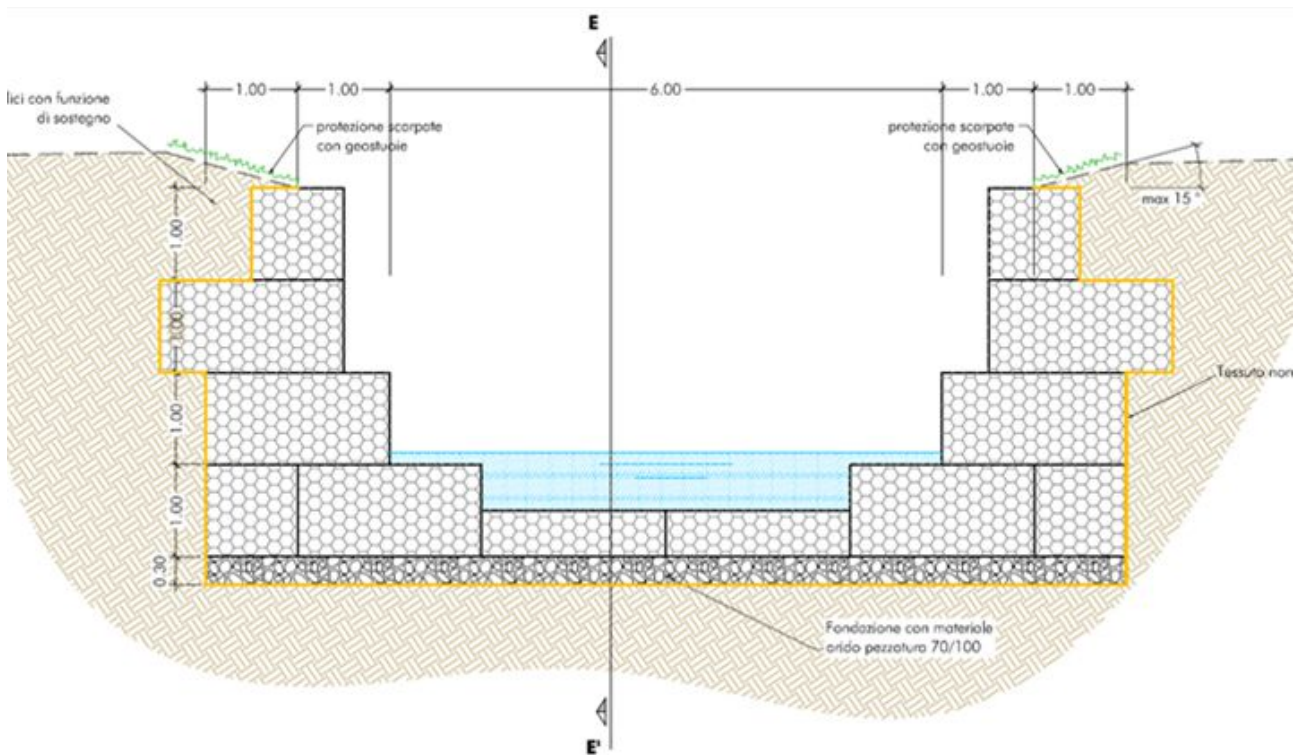


Figura 288 - Sezione tipo di sistemazione alveo e sponde mediante utilizzo di gabbioni riempiti con materiale lapideo.



Figura 289 - Sistemazione alveo e sponde mediante utilizzo di gabbioni riempiti con materiale lapideo su un canale della frana di Montaguto.

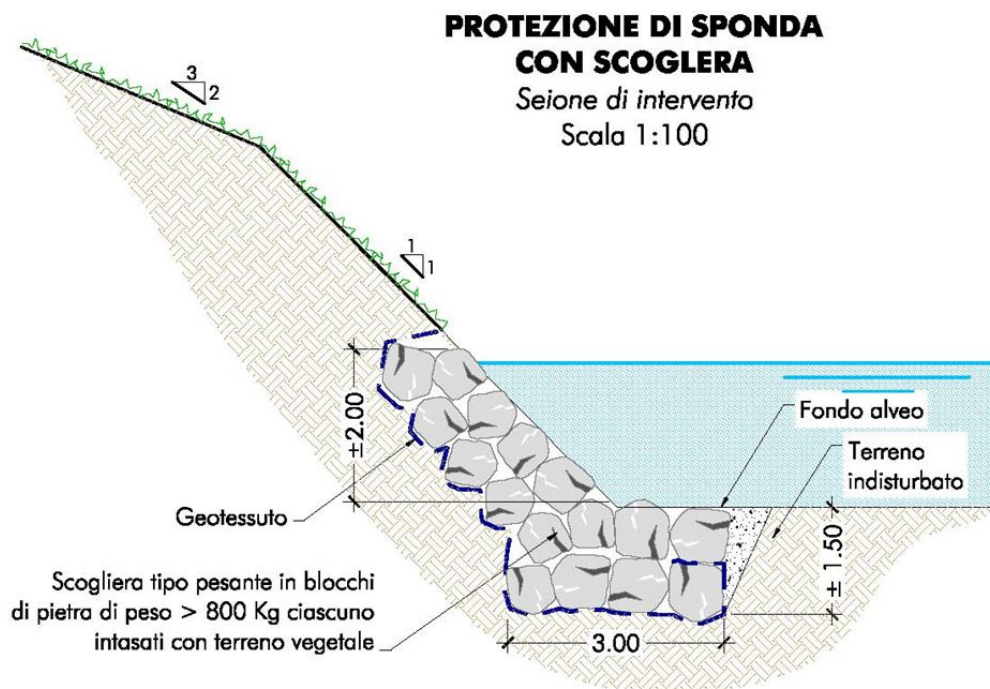


Figura 290 - Sezione tipologica di protezione spondale con scogliera.

In Tabella 43 è riportata una stima sintetica dei costi che include sia l'importo dei lavori e degli oneri per la sicurezza, sia le somme a disposizione dell'Amministrazione.

A) Lavori		GLOBALE
A.1	Importo delle opere	€ 1.400.000,00
A.2	Oneri per la sicurezza	€ 40.000,00
	<b>Totale</b>	<b>€ 1.440.000,00</b>
B) Somme a disposizione dell'Amministrazione		
B.1	IVA sui Lavori	€ 316.800,00
B.2	Imprevisti	€ 78.200,00
B.3	Indagini geognostiche - Comprensive di IVA	-
B.4	Spese tecniche e incentivi - Comprensive di Contributi e IVA	€ 115.000,00
	<b>Totale somme a disposizione</b>	<b>€ 510.000,00</b>
	<b>SOMMA</b>	<b>€ 1.950.000,00</b>

Tabella 43 - Ipotesi di quadro economico di massima dell'intervento BE.2.

### 11.5.3 Intervento BE.3 - Ripristino delle zone limitrofe in sinistra idraulica al torrente Benefizio

**Ubicazione:** Torrente Benefizio

Analogamente a quanto previsto per la sponda destra, anche le aree in sinistra idraulica del torrente Benefizio risultano interessate da diffusi fenomeni di erosione e instabilità, direttamente correlati alla dinamica evolutiva dell'alveo e alle condizioni di forte incisione descritte nell'intervento BE.1.

L'azione erosiva del corso d'acqua ha determinato un progressivo arretramento delle sponde e una riduzione del supporto al piede dei versanti, favorendo l'innescio di fenomeni di instabilità locale e contribuendo alla degradazione morfologica del pendio. Tali dinamiche risultano particolarmente critiche nelle aree in cui i versanti presentano condizioni di equilibrio già precarie.

L'intervento BE.3 è finalizzato alla riqualificazione e stabilizzazione delle zone limitrofe in sinistra idraulica, attraverso un sistema di opere analoghe a quelle previste in destra, al fine di garantire un approccio unitario e coordinato lungo l'intero tratto del torrente.

In particolare, si prevede:

- la protezione della parte bassa delle sponde mediante gabbioni riempiti con materiale lapideo, per contrastare i fenomeni di erosione di fondo e di sponda;
- la realizzazione di scogliere di protezione lungo le sponde, con funzione di sostegno delle scarpate e stabilizzazione delle sezioni idrauliche;
- interventi di consolidamento superficiale della parte alta delle sponde mediante rivestimenti in bioreti, finalizzati al controllo dell'erosione e al miglioramento della stabilità.

Anche in questo caso, l'utilizzo di gabbionate metalliche rappresenta una soluzione tecnica efficace e già ampiamente sperimentata, come dimostrato dagli interventi realizzati nella frana di Montaguto e in altri contesti analoghi, grazie alla loro capacità di adattarsi agli assestamenti del terreno, alla resistenza all'erosione idraulica e alla possibilità di integrazione con tecniche di ingegneria naturalistica.

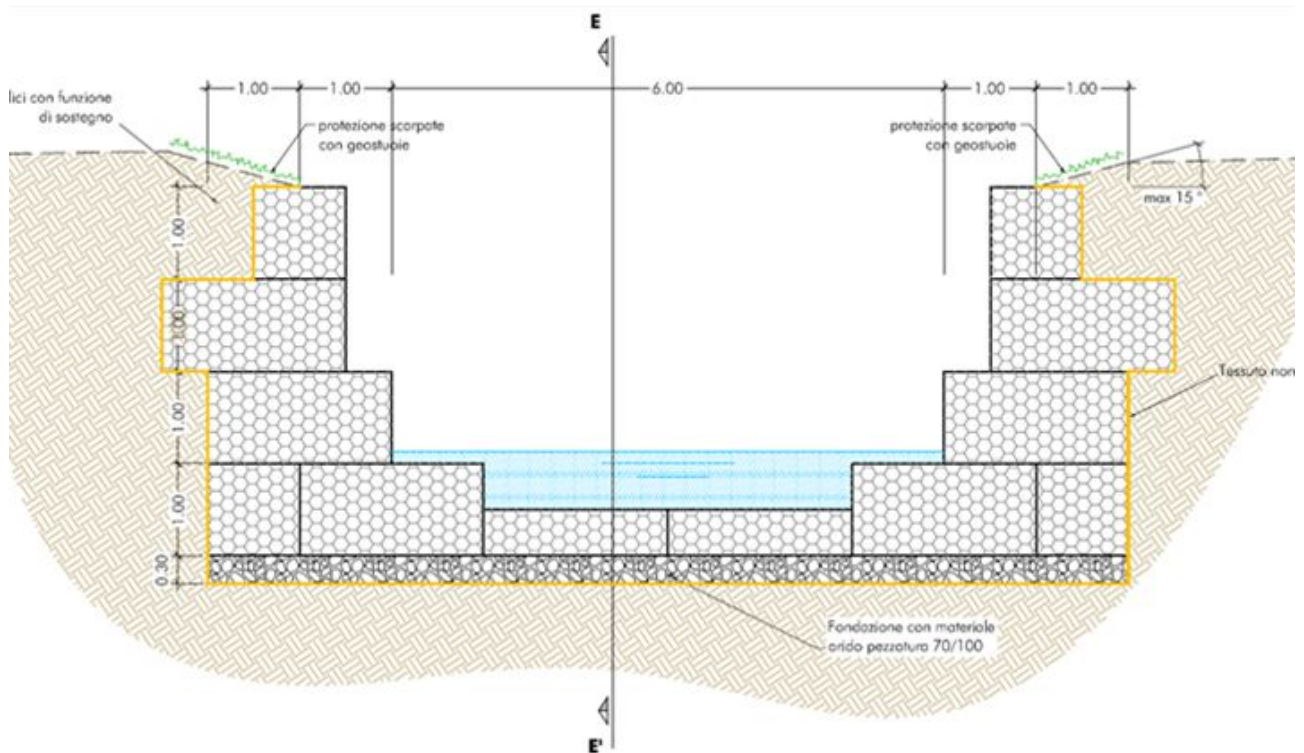
L'intervento contribuisce a ristabilire condizioni di equilibrio lungo la sponda sinistra, riducendo i fenomeni erosivi e migliorando la stabilità complessiva del sistema alveo-versante, in sinergia con le opere previste nell'ambito dell'intervento BE.1.

Per il presente intervento non sono state previste specifiche indagini in quanto il modello stratigrafico, geotecnico, idrogeologico e sismico del terreno, potrà essere ricostruito utilizzando i dati geognostici acquisiti con le campagne realizzate per gli interventi limitrofi.

Al fine di definire lo stato della sponda in sinistra e le soluzioni tecniche vengono riportati la documentazione fotografica delle aree soggette a forte erosione (Figura 291), l'impiego di gabbioni riempiti con materiale lapideo (Figura 292 e Figura 293) e le sezioni tipologiche delle scogliere di protezione (Figura 294).



**Figura 291 - Sponda in sinistra idraulica al torrente Benefizio in forte erosione, da riprofilare mediante impiego di gabbioni e sistemi di protezione dall'erosione superficiale.**



**Figura 292 - Sezione tipo di sistemazione alveo e sponde mediante utilizzo di gabbioni riempiti con materiale lapideo.**



Figura 293 - Sistemazione alveo e sponde mediante utilizzo di gabbioni riempiti con materiale lapideo su un canale della frana di Montaguto.

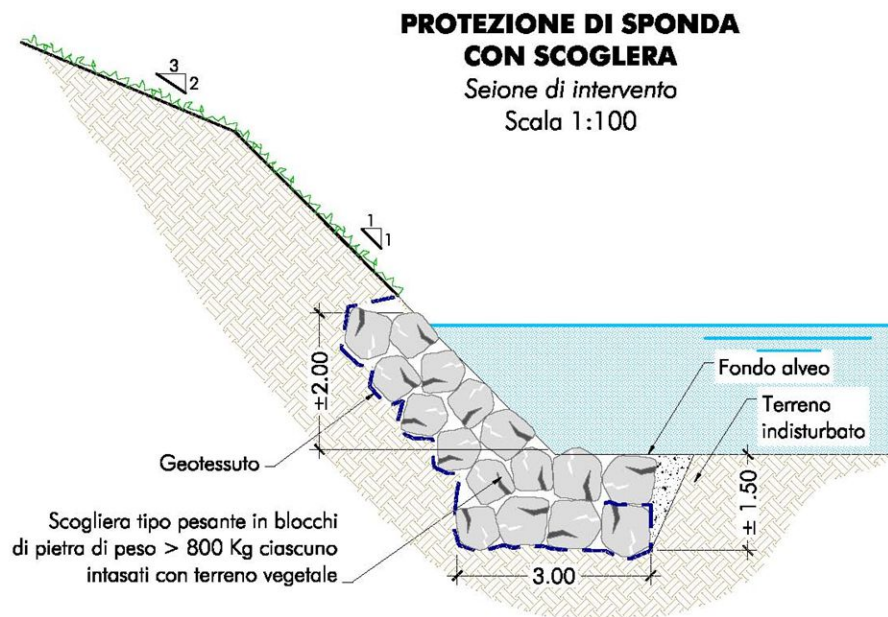


Figura 294 - Sezione tipologica di protezione spondale con scogliera.

In Tabella 44 è riportata una stima sintetica dei costi che include sia l'importo dei lavori e degli oneri per la sicurezza, sia le somme a disposizione dell'Amministrazione.

<b>A) Lavori</b>		<b>GLOBALE</b>
A.1	Importo delle opere	€ 1.400.000,00
A.2	Oneri per la sicurezza	€ 40.000,00
	<b>Totale</b>	<b>€ 1.440.000,00</b>
<b>B) Somme a disposizione dell'Amministrazione</b>		
B.1	IVA sui Lavori	€ 316.800,00
B.2	Imprevisti	€ 78.200,00
B.3	Indagini geognostiche - Comprensive di IVA	-
B.4	Spese tecniche e incentivi - Comprensive di Contributi e IVA	€ 115.000,00
	<b>Totale somme a disposizione</b>	<b>€ 510.000,00</b>
	<b>SOMMA</b>	<b>€ 1.950.000,00</b>

Tabella 44 - Ipotesi di quadro economico di massima dell'intervento BE.3.

## 11.6 Interventi nel Centro Abitato (AB)

### 11.6.1 Intervento AB.1 - Adeguamento del sistema fognario

**Ubicazione:** Centro Abitato

Gli interventi relativi al sistema fognario e al drenaggio urbano nel centro abitato di Niscemi saranno attuati dal Commissario straordinario unico ex DPCM 11 maggio 2020.

I processi erosivi che interessano i versanti a sud e a ovest dell'abitato risultano fortemente condizionati dall'apporto incontrollato di acque meteoriche e reflue provenienti dall'area urbanizzata. L'immissione diffusa di tali acque nel sottosuolo ha determinato nel tempo un incremento dei livelli di falda nei terreni superficiali e nei livelli sabbiosi più permeabili, con conseguente aumento delle pressioni interstiziali e riduzione della resistenza al taglio, favorendo l'innescò e l'evoluzione dei fenomeni di dissesto.

Le principali criticità sono riconducibili alla mancata o incompleta regimazione delle acque, allo stato di conservazione della rete e all'assenza di un sistema adeguato di trattamento delle acque reflue. In diversi tratti i collettori presentano perdite diffuse, che determinano infiltrazioni incontrollate nel sottosuolo e contribuiscono all'alimentazione idrica dei versanti instabili. Persistono inoltre scarichi non censiti o non controllati, tra cui un recapito diretto nel torrente Benefizio mediante un canale a sezione aperta (Figura 295).

È prevista la realizzazione di un nuovo impianto di depurazione in contrada Fontana del Conte, alimentato anche tramite un collettore principale proveniente dall'area dell'attuale impianto di contrada Valle Pozzo, non più adeguato. Parallelamente, dovrà essere sviluppata una rete organica di collettori per la raccolta e il convogliamento delle acque meteoriche e reflue (Figura 296).

In via preliminare sarà necessario procedere a un censimento dettagliato delle infrastrutture esistenti, finalizzato alla ricostruzione del tracciato dei collettori, alla verifica delle condizioni strutturali e alla valutazione della loro funzionalità. I nuovi collettori principali potranno essere realizzati lungo le principali direttrici viarie, utilizzando la viabilità esistente come corridoio infrastrutturale.

La riorganizzazione del sistema fognario, basata sulla separazione tra acque meteoriche e reflue e sul convogliamento controllato dei deflussi verso recapiti idraulici in aree stabili o verso l'impianto di depurazione, consentirà di ridurre significativamente gli apporti idrici nel sottosuolo, favorire l'abbassamento del livello piezometrico e limitare le variazioni rapide del carico idraulico durante eventi meteorici intensi.

Potranno inoltre essere realizzati bacini di laminazione e sistemi di accumulo per il riutilizzo delle acque meteoriche.



Figura 295 - Canale esistente di scarico in c.a. a sezione aperta nel torrente Benefizio.

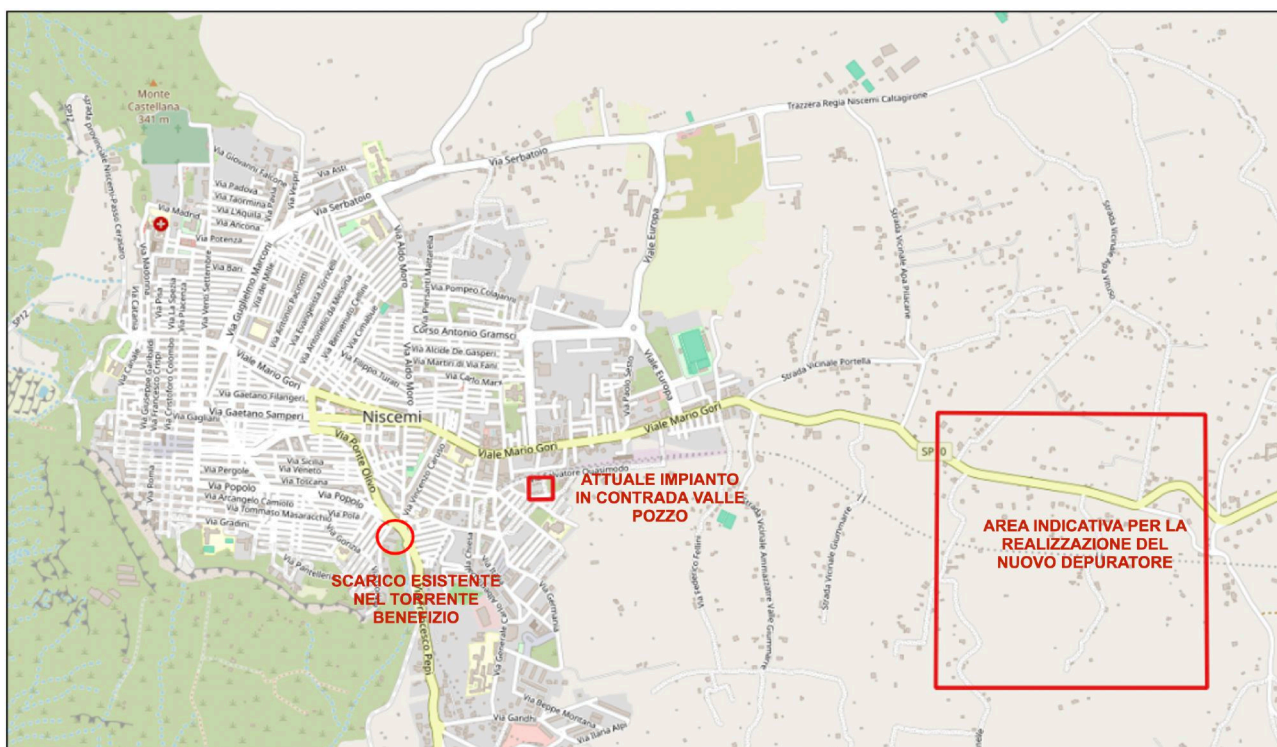


Figura 296 - Planimetria dell'abitato di Niscemi con localizzazione degli impianti di depurazione.

### 11.6.2 Intervento AB.2 - Adeguamento rete acquedottistica

**Ubicazione:** Centro Abitato

Gli interventi sulla rete acquedottistica saranno realizzati dal gestore del servizio idrico.

Le perdite della rete idrica rappresentano una fonte significativa di infiltrazione nel sottosuolo urbano, contribuendo localmente alla saturazione dei terreni e al peggioramento delle condizioni di stabilità dei versanti. In ambito urbano, tali perdite possono raggiungere valori rilevanti rispetto ai volumi immessi in rete, con una quota significativa attribuibile alla rete di distribuzione.

Gli interventi saranno finalizzati alla riduzione delle perdite e al miglioramento dell'efficienza del sistema. Tra le azioni previste rientra la regolazione delle pressioni di esercizio mediante l'installazione di riduttori di pressione nei settori della rete in cui le condizioni altimetriche lo consentano, al fine di diminuire le sollecitazioni sulle condotte e limitare le dispersioni.

Nei casi in cui sia necessario garantire l'approvvigionamento di utenze poste a quote più elevate, la pressione potrà essere ristabilita mediante l'installazione di gruppi di pompaggio. Ulteriori interventi riguarderanno la ricerca sistematica delle perdite attraverso la suddivisione della rete in distretti e l'isolamento progressivo dei tratti mediante manovre sulle saracinesche, così da individuare le dispersioni anomale e procedere alle necessarie operazioni di riparazione.

Nel complesso, tali azioni contribuiranno a ridurre gli apporti idrici non controllati nel sottosuolo e a migliorare le condizioni di stabilità dell'area

### 11.7 Sistema di monitoraggio finalizzato agli interventi

In questa sezione vengono brevemente descritte le principali tipologie di monitoraggio che si ritengono indispensabili per supportare le fasi di progettazione e di verifica dell'efficacia delle opere strutturali di mitigazione del rischio.

Nella fase di progettazione (*ante operam*), l'acquisizione in continuo dei dati idro-meteorologici e geotecnici permetterà di definire con maggior accuratezza il modello idrogeologico del versante. Correlando le precipitazioni (*input* pluviometrico) con le risposte della falda (*output* piezometrico) e le portate superficiali, sarà quindi possibile quantificare i picchi transitori delle pressioni interstiziali e le linee di flusso interne alle masse in frana.

Questo set di dati sito-specifici fornirà i parametri quantitativi necessari per dimensionare, posizionare alla corretta profondità e calibrare idraulicamente i sistemi di captazione (gallerie, pozzi, dreni).

Parallelamente, la medesima rete sensoristica manterrà un ruolo cruciale nella fase di esercizio (*post-operam*). Il mantenimento in operatività dei piezometri e dei misuratori di portata rappresenta l'unico strumento ingegneristico oggettivo per certificare la reale efficacia delle opere eseguite. Misurando fisicamente l'effettivo abbattimento del livello di falda, l'assenza di picchi di pressione a seguito di piogge intense e la contestuale riduzione dei tassi di spostamento del terreno, sarà possibile collaudare e validare nel tempo il raggiungimento degli obiettivi di stabilizzazione previsti dal progetto, ottimizzando contestualmente i futuri piani di implementazione e manutenzione delle reti drenaggio.

Un'altra fonte di informazioni fondamentali di supporto alla progettazione è costituita dai dati di monitoraggio radar interferometrico da satellite, che, oltre a consentire una dettagliata caratterizzazione spazio-temporale delle deformazioni in atto e a segnalare eventuali situazioni di criticità, anche in relazione alla perimetrazione della fascia di interdizione (*ante operam*), permetterà di osservare in dettaglio gli eventuali effetti dovuti allo scavo delle gallerie drenanti (*corso d'opera*) e di verificare su vasta scala gli effetti delle opere di mitigazione sulla stabilità dei versanti (*post operam*).

Alla luce delle opere strutturali ipotizzate, si prevede quindi di supportare il programma degli interventi con le seguenti tipologie di sensori di monitoraggio, che saranno integrate con tutta la strumentazione generale prevista per la gestione adattativa del rischio e l'allertamento già descritta nella sezione 10.3.

- interferometria radar satellitare;
- stazione meteorologica;
- piezometri;
- colonne multiparametriche;
- idrometri;

- misuratori di portata (flussimetri).

Tutta la strumentazione (con la logica eccezione dei misuratori di portata all'interno delle gallerie drenanti) dovrà essere installata il prima possibile, in modo da poter disporre di un congruo set di dati storici in base al quale calibrare, laddove necessario, la posizione e la geometria delle opere di drenaggio previste e di definire un livello piezometrico di riferimento in funzione della stagionalità tale da consentire poi la valutazione dell'efficacia delle opere realizzate (*post operam*).

Di seguito si descrivono sinteticamente le caratteristiche dei sensori proposti e le finalità di ciascuna tipologia di monitoraggio. La localizzazione indicativa di installazione dei sensori è riportata in Figura 297.

Per quanto riguarda la stazione meteorologica che, oltre ad altri parametri ambientali di indubbia utilità, permette di misurare la quantità di precipitazione nel tempo, si segnala che ne è stata recentemente installata una in corrispondenza del centro abitato su commissione della Regione Siciliana.

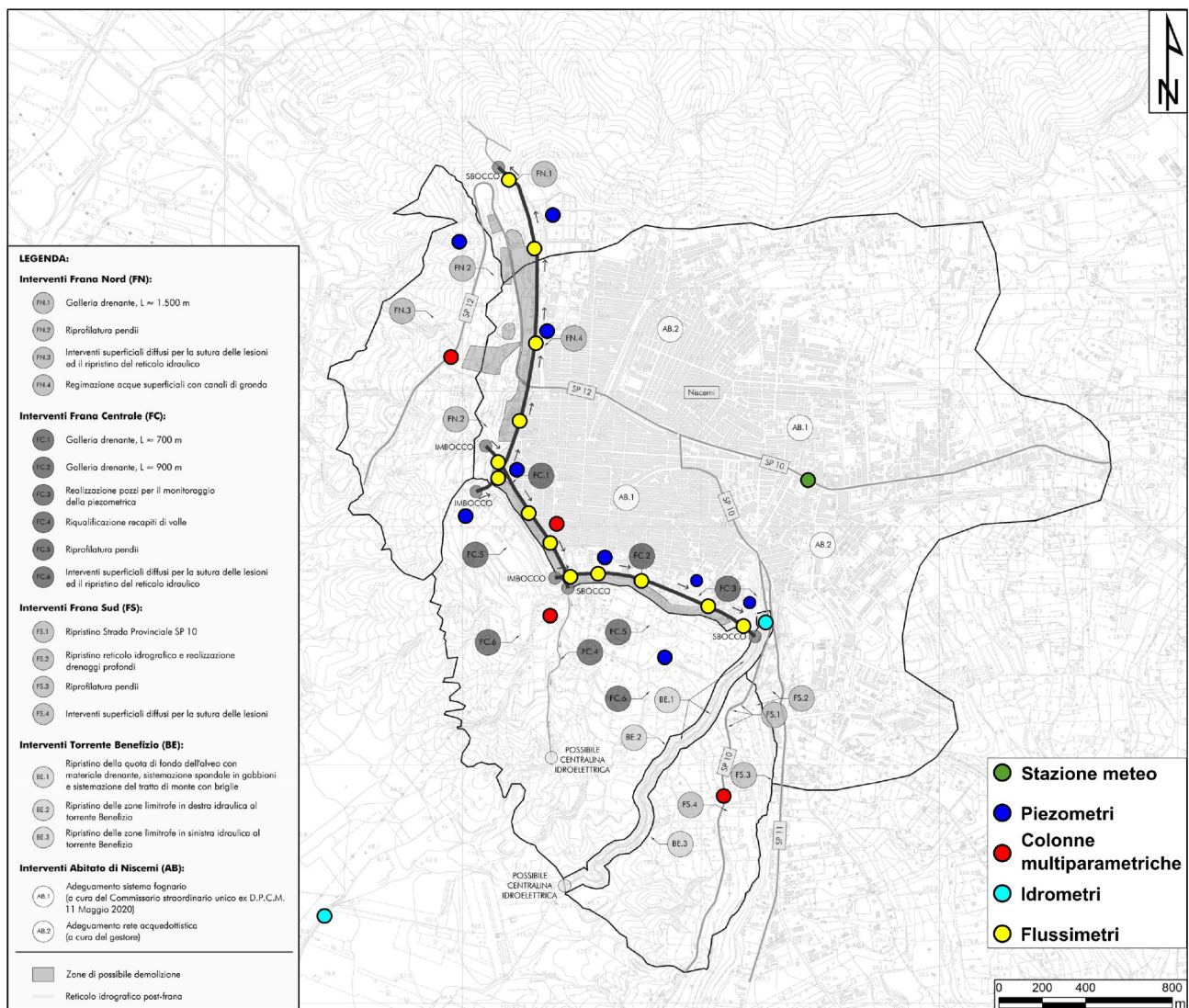


Figura 297 - Localizzazione dei sensori di monitoraggio proposti per il supporto agli interventi strutturali di mitigazione.

Si prevede inoltre di installare un totale di 9 piezometri di tipo a corda vibrante, la cui localizzazione indicativa è riportata in Figura 297. Per ciascuna verticale verranno attrezzate tre posizioni di misura a diverse profondità, con l'intento di misurare le pressioni neutre in corrispondenza di:

- livello sabbioso subito sopra al contatto con le argille;
- livello argilloso fra il contatto con le sabbie e il livello debole ipotizzato;
- livello debole ipotizzato.

La profondità ottimale per ciascuna posizione di misura verrà definita incrociando il modello geologico realizzato sulla base dei sondaggi ad oggi disponibili con le risultanze delle indagini che saranno effettuate come supporto alla progettazione delle opere e delle evidenze dirette provenienti dalla verticale di installazione.

A livello indicativo, si forniscono di seguito le profondità massime in funzione della posizione di installazione:

- 100 -120 m per i 6 piezometri ubicati nell'area dell'abitato, subito a monte delle gallerie drenanti;
- 80 -100 m per i 2 piezometri installati all'interno della Frana Centrale;
- 60 m per il piezometro installato all'interno della Frana Nord.

Le colonne multiparametriche rappresentano l'evoluzione avanzata del monitoraggio in foro, concepite come catene di moduli intelligenti collegati tra loro in modo robusto e flessibile, che consente di seguire un movimento profondo anche per grandi deformazioni. Ogni segmento agisce in modo indipendente, integrando sensori inerziali per rilevare spostamenti millimetrici e inclinazioni su tre assi, oltre a trasduttori per la pressione e la temperatura. A differenza dei sistemi statici, la struttura a colonna permette di ricostruire un profilo continuo della deformata del terreno lungo tutta la sua profondità. Questa configurazione è ideale anche per i sistemi di allertamento rapido, poiché rileva in tempo reale la propagazione di una superficie di rottura sotterranea e la correla immediatamente con le variazioni della falda acquifera locale.

Nello specifico, si prevede di installare un totale di 4 colonne multiparametriche, con passo di misura pari a 2 m, distribuite come riportato in Figura 297, e aventi le seguenti caratteristiche:

- 1 colonna all'interno della Frana Nord, fino a una profondità di 60 m;
- 1 colonna all'interno della Frana Centrale, fino a una profondità di 100 m;
- 1 colonna all'interno della Frana Sud, fino a una profondità di 50 m;
- 1 colonna nell'area del centro abitato, subito a monte della galleria drenante centrale, fino a una profondità di 120 m.

Lungo l'asta del torrente Benefizio si propone di installare 2 idrometri dotati di sensore radar per la misura in continuo del livello dell'acqua, il primo in corrispondenza dello scatolare di uscita del tombamento nei pressi del centro abitato, l'altro nell'area pianeggiante a valle del tratto calanchivo.

Infine, in corrispondenza di altrettanti tratti di tubazione all'interno delle gallerie drenanti verranno installati 13 sensori di portata del tipo flussimetri a ultrasuoni con installazione esterna "*Clamp-on*".

La scelta di questa tipologia di trasduttori è motivata dal fatto che questi ultimi riducono drasticamente i tempi e i costi di installazione, mediante fissaggio diretto sul tubo tramite binari e cinghie in acciaio.

Il modello specifico di sensore verrà individuato una volta noto il diametro di progetto della tubazione di drenaggio.

Come riportato in Figura 297, l'interdistanza fra i flussimetri varierà fra 150 m e 250 m circa, in modo da permettere di apprezzare il contributo al drenaggio totale dei singoli tratti di galleria.

Per quanto riguarda il monitoraggio radar interferometrico da satellite, verranno utilizzati congiuntamente dati derivanti dall'elaborazione periodica delle immagini radar satellitari della costellazione italiana COSMO-SkyMed dell'ASI e della costellazione Sentinel-1 del progetto europeo *Copernicus* finanziata dall'ESA. Le immagini acquisite in entrambe le orbite (ascendente e discendente) da entrambe le costellazioni satellitari saranno elaborate mediante tecnica interferometrica multi-temporale.

Una stima indicativa dei costi relativi alle attività di monitoraggio necessarie per la progettazione e la verifica dell'efficacia delle opere strutturali di mitigazione del rischio è riportata in Tabella 45.

Strumento	Costo (€)
Monitoraggio radar satellitare	240.000,00
Stazione meteorologica	10.000,00
Piezometri	220.000,00
Colonne multiparametriche	610.000,00
Idrometri	25.000,00
Misuratori di portata (Flussimetri)	125.000,00
<b>TOTALE</b>	<b>1.230.000,00</b>

Tabella 45 - Quadro economico del sistema di monitoraggio finalizzato agli interventi.

## 11.8 Quadro economico complessivo degli interventi

Il quadro economico complessivo degli interventi è illustrato in Tabella 46, dove sono indicati nelle colonne:

- gli identificativi degli interventi;
- l'importo dei lavori stimati parametricamente;
- l'importo delle indagini per l'acquisizione degli elementi necessari per procedere alla progettazione di fattibilità tecnico-economica;
- la previsione a livello di quadro economico globale che prende in considerazione anche le restanti voci delle cosiddette somme a disposizione dei soggetti attuatori (imposte, imprevisti e spese tecniche).

Settore	Elenco interventi	Importo dei lavori	Importo indagini	Importo dell'intervento
Frana Nord	FN.1	€ 10.100.000,00	€ 335.500,00	€ 14.100.000,00
	FN.2	€ 2.860.000,00	€ 103.700,00	€ 4.000.000,00
	FN.3	€ 2.550.000,00	€ 73.200,00	€ 3.550.000,00
	FN.4	€ 460.000,00	-	€ 650.000,00
	<b>Totale Frana Nord</b>	<b>€ 15.970.000,00</b>	<b>€ 512.400,00</b>	<b>€ 22.300.000,00</b>
Frana Centrale	FC.1	€ 5.750.000,00	€ 213.500,00	€ 8.050.000,00
	FC.2	€ 6.350.000,00	€ 280.600,00	€ 8.950.000,00
	FC.3	€ 710.000,00	€ 317.200,00	€ 1.300.000,00
	FC.4	€ 2.250.000,00	€ 18.300,00	€ 3.100.000,00
	FC.5	€ 2.250.000,00	€ 67.100,00	€ 3.150.000,00
	FC.6	€ 2.050.000,00	€ 36.600,00	€ 2.850.000,00
	<b>Totale Frana Centrale</b>	<b>€ 19.360.000,00</b>	<b>€ 933.300,00</b>	<b>€ 27.400.000,00</b>
Frana Sud	FS.1	€ 1.360.000,00	€ 67.100,00	€ 1.950.000,00
	FS.2	€ 740.000,00	€ 36.600,00	€ 1.050.000,00
	FS.3	€ 720.000,00	€ 67.100,00	€ 1.100.000,00
	FS.4	€ 2.350.000,00	€ 36.600,00	€ 3.250.000,00
	<b>Totale Frana Sud</b>	<b>€ 5.170.000,00</b>	<b>€ 207.400,00</b>	<b>€ 7.350.000,00</b>
Torrente Benefizio	BE.1	€ 9.180.000,00		€ 12.500.000,00
	BE.2	€ 1.440.000,00	€ 79.300,00	€ 1.950.000,00
	BE.3	€ 1.440.000,00		€ 1.950.000,00
	<b>Totale Benefizio</b>	<b>€ 12.060.000,00</b>	<b>€ 79.300,00</b>	<b>€ 16.400.000,00</b>
Monitoraggio	Piano di Monitoraggio	€ 1.230.000,00	€ 0,00	€ 1.550.000,00
<b>TOTALE</b>		<b>€ 53.790.000,00</b>	<b>€ 1.732.400,00</b>	<b>€ 75.000.000,00</b>

Tabella 46 - Quadro economico complessivo degli interventi.

## 11.9 Scala di priorità

La filosofia della proposta d'intervento è principalmente quella della preventiva limitazione delle cause che innescano gli eventi per poi procedere a graduali ripristini.

L'analisi della situazione ha consentito di individuare quali elementi essenziali in termini di cause d'inesco le circolazioni idriche all'interno dei corpi di frana (prevalentemente in direzione nord-sud/sud-ovest), responsabili dell'incremento delle pressioni interstiziali, e i fenomeni di erosione ed instabilità delle sponde del torrente Benefizio, che costituiscono il piede delle frane denominate "Centrale" e "Sud"; ulteriori cause che contribuiscono all'aggravio della situazione sono le regimazioni delle acque afferenti al centro abitato della città sia in termini di fognatura bianca sia di ottimizzazione della rete acquedottistica in termini di riduzione delle perdite. Questi elementi determinano la priorità massima (priorità 1 nel prospetto che segue) riguardo all'attuazione del piano proposto.

Poiché gli interventi caratterizzati dalla priorità 1 dovrebbero portare al conseguimento di risultati apprezzabili riguardo al raggiungimento di un equilibrio più stabile e affidabile della zona in frana, si potranno poi eseguire gli interventi di priorità 2 (generalmente ripristini nel reticolo idrografico e di regimazione delle acque superficiali con integrazione di sistemi di drenaggio anche profondi) e quelli di priorità 3 (generalmente interventi sui pendii a valle del movimento principale).

Ne risulta il prospetto riportato in Tabella 47.

Id.	Titolo	Ambito	Priorità
	Programma di monitoraggio	Tutti	1
AB.1	Adeguamento sistema fognario	Abitato di Niscemi	
AB.2	Adeguamento rete acquedottistica	Abitato di Niscemi	
FC.1	Galleria drenante, L≈700 m	Frana Centrale	
FC.2	Galleria drenante, L≈900 m	Frana Centrale	
FC.3	Realizzazione pozzi per il monitoraggio della piezometrica	Frana Centrale	
FN.1	Galleria drenante, L≈1500 m	Frana Nord	
FS.1	Ripristino Strada Provinciale SP10	Frana Sud	
BE.1	Ripristino della quota di fondo, sistemazione spondale e del tratto di monte	Torrente Benefizio	
FC.4	Riqualificazione recapiti di valle	Frana Centrale	
FN.4	Regimazione acque superficiali con canali di gronda	Frana Nord	
FS.2	Ripristino reticolo idrografico e realizzazione drenaggi profondi	Frana Sud	
BE.2	Ripristino delle zone limitrofe in destra idraulica al torrente Benefizio	Torrente Benefizio	
BE.3	Ripristino delle zone limitrofe in sinistra idraulica al torrente Benefizio	Torrente Benefizio	3
FC.5	Riprofilatura pendii	Frana Centrale	
FC.6	Interventi diffusi per la sutura delle lesioni e il ripristino del reticolo idraulico	Frana Centrale	
FN.2	Riprofilatura pendii	Frana Nord	
FN.3	Interventi diffusi per la sutura delle lesioni e il ripristino del reticolo idraulico	Frana Nord	
FS.3	Riprofilatura pendii	Frana Sud	
FS.4	Interventi diffusi per la sutura delle lesioni	Frana Sud	

Tabella 47 - Scala di priorità degli interventi.

## 12 Conclusioni

Il presente rapporto tecnico-scientifico ha analizzato in modo multidisciplinare i complessi fenomeni di instabilità gravitativa che hanno interessato il territorio di Niscemi nel mese di gennaio 2026. L'indagine, condotta attraverso il coordinamento di diverse metodologie d'analisi - dalla geomorfologia classica al telerilevamento avanzato, fino alla modellazione geomeccanica e idrologica - ha permesso di delineare un quadro conoscitivo coerente e dettagliato dei processi in atto.

La frana di Niscemi rappresenta la riattivazione e l'ampliamento di un sistema franoso profondo noto e storicamente documentato, che interessa i margini del terrazzo su cui sorge l'abitato. L'evento del 16 gennaio, seguito da un secondo evento il 25-26 gennaio 2026, si inserisce in una dinamica di instabilità di lungo periodo, controllata dalla stratigrafia, dall'assetto idrogeologico e dai processi di erosione delle acque incanalate.

### Inquadramento geologico e geomorfologico

L'inquadramento geologico e geomorfologico ha evidenziato come l'abitato di Niscemi insista su una successione sabbioso-arenacea plio-pleistocenica permeabile, sovrastante livelli limoso-argillosi e argille marnose plioceniche a comportamento meccanico più debole e sostanzialmente impermeabili.

Tale assetto determina condizioni favorevoli alla concentrazione delle pressioni interstiziali lungo superfici di contatto litologico, costituendo un fattore predisponente primario all'attivazione di superfici di scivolamento profonde.

L'assetto monoclinale con lieve immersione verso sud-sud-est, la presenza di scarpate morfologiche nette lungo i margini occidentale e meridionale del pianoro e il controllo strutturale esercitato dal fronte della Falda di Gela configurano un sistema morfostrutturale intrinsecamente predisposto a cinematismi gravitativi di grande scala.

### Frane e deformazioni gravitative antecedenti

La ricostruzione storica dei dissesti, con particolare riferimento agli eventi del 1790 e del 1997, ha confermato il carattere policiclico del fenomeno e la sostanziale coincidenza geometrica tra le aree mobilizzate nei diversi episodi.

L'evento del 1790, caratterizzato da movimenti di eccezionale entità e da manifestazioni di vulcanismo sedimentario, e quello del 1997, configuratosi come riattivazione di un corpo di frana profondo con cinematica lenta e retrogressiva, costituiscono precedenti diretti dell'evento del 2026. Quest'ultimo si inserisce pertanto in un'evoluzione pluridecennale e plurisecolare del versante, con progressive fasi di alleggerimento al piede, riorganizzazione delle superfici di scivolamento e arretramento dei coronamenti.

### Le frane del gennaio 2026

Dall'analisi dei dati topografici aggiornati è stato possibile individuare tre corpi di frana distinti e cinematicamente indipendenti, seppur coalescenti nel loro sviluppo complessivo:

- **Frana Nord:** interessata dalla prima fase parossistica del 15-16 gennaio, caratterizzata da spostamenti di oltre 12 m diretti prevalentemente verso ovest, guidata dall'erosione del reticolo idrografico minore, ha determinato il collasso della SP12;
- **Frana Centrale:** rappresenta il corpo di frana principale coinvolto nell'evento del 25-26 gennaio, caratterizzata da spostamenti di oltre 50 m diretti prevalentemente verso sud-ovest, bordata a sud-est dal torrente Benefizio in forte incisione, ha generato la grande scarpata che lambisce il margine urbano;
- **Frana Sud:** formatasi in rapida successione dopo la frana centrale nell'evento del 25-26 gennaio, separata dalla frana centrale dal torrente Benefizio, ha manifestato spostamenti di oltre 7 m in direzione ovest - sud - ovest, ha causato la parziale distruzione della SP10.

Dal punto di vista cinematico il fenomeno principale è riconducibile a una frana di scivolamento composto (*compound slide* secondo la classificazione di Hutchinson, 1988) a prevalente componente traslativa, con sviluppo retrogressivo e articolazione in più settori distinti, caratterizzati da differenti direzioni e magnitudo di spostamento.

Le analisi morfologiche e i profili topografici pre- e post-evento evidenziano la prevalenza di movimenti pseudo-rigidi a dominante traslativa, con formazione di strutture tipo *Horst* e *Graben* nella porzione sommitale e sovrascorrimento al piede. La modellazione numerica agli elementi finiti, basata sui parametri geotecnici disponibili, ha confermato la coerenza del modello concettuale di scivolamento composto, lungo una superficie listrica, con orizzonte basale a bassa inclinazione in condizioni prossime a quelle residue.

Gli eventi del gennaio 2026 hanno determinato nel loro complesso un fronte complessivo di instabilità di circa 4,7 km lungo il margine dell'abitato.

I parametri morfometrici stimati indicano volumi mobilizzati di oltre 80 milioni di metri cubi, con profondità massime presunte fino a 80 m nella frana centrale. L'angolo di mobilità (*Fahrböschung*) pari a circa 6,5° testimonia un'elevata mobilità del sistema, compatibile con condizioni di ridotta resistenza residua lungo la superficie basale e possibili fenomeni di liquefazione statica o di riduzione drastica della resistenza al taglio.

### **Cause predisponenti e fattori di innesco**

L'analisi delle cause predisponenti e dei fattori di innesco ha messo in evidenza il ruolo determinante dell'assetto litologico e del contrasto di permeabilità tra sabbie e argille, nonché dei processi erosivi lungo il torrente Benefizio e gli impluvi secondari.

L'erosione al piede ha progressivamente ridotto il confinamento laterale, determinando una ridistribuzione dello stato tensionale e una diminuzione del coefficiente di sicurezza.

Le precipitazioni antecedenti agli eventi, pur non eccezionali in termini assoluti, hanno probabilmente contribuito all'innalzamento delle pressioni interstiziali lungo le superfici di contatto litologico, in un contesto già prossimo alle condizioni di rottura.

La concomitanza di cause geologiche strutturali, idrogeologiche ed erosive configura un meccanismo di innesco multifattoriale, coerente con quanto osservato negli eventi storici precedenti.

### **Monitoraggio satellitare dei movimenti**

L'analisi integrata dei dati satellitari radar e ottici ha consentito di delineare un quadro complessivo dell'evoluzione deformativa che ha interessato il territorio comunale di Niscemi in relazione agli eventi franosi di gennaio 2026, distinguendo le fasi pre-evento, co-evento e post-evento.

Le elaborazioni interferometriche multi-temporali (SBAS e SqueeSAR), condotte sui *dataset* Sentinel-1 e COSMO-SkyMed, indicano che nel periodo antecedente ai dissesti il centro abitato risultava, nel complesso, caratterizzato da condizioni di sostanziale stabilità, con velocità medie generalmente contenute entro la soglia di stabilità adottata ( $\pm 2$  mm/anno). Diversamente, i versanti posti a valle dell'abitato, in particolare nei settori nord-ovest e sud, mostravano segnali deformativi pregressi, talora persistenti e con andamento quasi lineare nel tempo, compatibili con movimenti lenti già in atto negli anni precedenti, chiaramente evidenti almeno già dal 2011.

Le analisi co-evento, basate su DInSAR e *Pixel Offset Tracking* da dati COSMO-SkyMed e SAOCOM, hanno permesso di delimitare e quantificare il campo di deformazione associato alle riattivazioni del 15-16 e 25-26 gennaio 2026, evidenziando cinematici prevalentemente traslativi, con componenti planari dirette verso ovest e sud e abbassamenti in corrispondenza delle scarpate, coerenti con la dinamica osservata sul terreno. I dati ottici PlanetScope, ad alta risoluzione, e Pleiades NEO e Worldview Legion, ad altissima risoluzione (analisi COSI-Corr) hanno registrato spostamenti parossistici con picchi fino a 37 metri, confermando l'estrema severità dell'evento.

Le analisi post-evento, sia interferometriche sia ottiche, mostrano il progressivo esaurimento dei movimenti nei settori già interessati dai dissesti ed evidenziano una sostanziale condizione di stabilità nel centro abitato,

anche all'interno della fascia di interdizione, seppur con grado di precisione della misura ( $\pm 5$  mm) inferiore a quello pre-evento per quanto riguarda le analisi interferometriche.

L'analisi dei dati Sentinel-1 mediante tecnica Dynamic InSAR nell'area della frana nord mostra condizioni complessivamente stabili nel mese di febbraio, mentre la frana centrale e quella meridionale evidenziano spostamenti residui fino a 25 mm sul versante a valle del quartiere Sante Croci e fino a 10 mm in prossimità delle SP11 e SP10. Tali movimenti interessano prevalentemente aree non urbanizzate e ben al di fuori della fascia di interdizione nel centro abitato.

### **Indagini geofisiche, caratterizzazione e modellazione geotecnica**

Le indagini geofisiche 3D e la caratterizzazione geotecnica hanno fornito un contributo essenziale alla definizione del modello del sottosuolo, evidenziando la geometria delle superfici di contatto, la presenza di livelli a bassa resistenza e le condizioni di saturazione dei terreni argillosi.

L'interpretazione congiunta delle indagini geoelettriche 3D (ERT), delle indagini sismiche attive (tomografia dei primi arrivi ed imaging a riflessione) e delle analisi delle onde di superficie (MASW) ha permesso di ottenere una ricostruzione complessiva della struttura elettro- e sismo-stratigrafica del sottosuolo nell'area investigata.

Nel complesso, l'integrazione dei diversi metodi geofisici consente di delineare un modello del sottosuolo caratterizzato da terreni superficiali (con spessore fra 35 m e 40 m) relativamente sciolti o poco addensati, sovrastanti livelli progressivamente più rigidi e compatti. La presenza di un contrasto litologico significativo a profondità dell'ordine di alcune decine di metri è evidenziata in modo coerente dalle diverse tecniche utilizzate, sebbene ciascun metodo contribuisca a descrivere aspetti differenti della struttura investigata.

L'insieme delle evidenze disponibili contribuisce pertanto alla definizione di un modello stratigrafico e geofisico robusto, che può essere utilizzato come base per le successive analisi geologiche e geotecniche.

I dati inclinometrici e piezometrici relativi alla frana del 1997 indicano la rilevanza delle pressioni interstiziali nel controllo della stabilità, confermando la necessità di un monitoraggio accurato delle condizioni idrogeologiche.

La modellazione numerica alle differenze finite (FDM), eseguita con il codice FLAC, ha verificato la coerenza dell'ipotesi di scivolamento composto, mostrando la formazione di strutture a *Graben* nella porzione sommitale e il sovrascorrimento del piede della frana nel fondovalle.

### **Caratterizzazione e modellazione idrologico-idraulica**

È stata effettuata una caratterizzazione idrologico-idraulica del sito al fine di individuare gli interventi di mitigazione e di gestione del rischio residuo e di supportarne il dimensionamento di massima. L'analisi si è basata su un approccio che ha combinato rilievi topografici ad altissima risoluzione, ricostruzione del reticolo di drenaggio superficiale, caratterizzazione statistica delle precipitazioni estreme e modellazione afflussi-deflussi.

Il rilievo UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) ha consentito la realizzazione di un modello digitale del terreno estremamente dettagliato, fondamentale per l'individuazione dei percorsi di drenaggio e per la definizione dei sottobacini idrografici che insistono sull'area urbanizzata e sul torrente Benefizio, principale recapito delle acque superficiali.

Dal punto di vista idrologico, l'analisi delle precipitazioni è stata condotta mediante un approccio regionale a scala di bacino che ha permesso di superare i limiti delle serie storiche locali, integrando dati provenienti da più stazioni e migliorando la robustezza delle stime. I risultati mostrano una buona coerenza con studi precedenti (DRPC e PAI), pur evidenziando differenze legate all'adozione di metodologie più aggiornate e *dataset* più estesi.

La stima delle portate di piena del torrente Benefizio è stata effettuata mediante modellazione afflussi-deflussi basata sul metodo SCS-CN (*Soil Conservation Service - Curve Number*), opportunamente adattato alle caratteristiche di un piccolo bacino urbano a risposta rapida. L'integrazione con ietogrammi sintetici di tipo *Chicago* e idrogrammi unitari SCS ha permesso di ricostruire la dinamica di trasformazione della pioggia in

deflusso, fornendo valori di portata al colmo coerenti e cautelativi ai fini progettuali. Tali risultati rappresentano un riferimento tecnico per il dimensionamento delle opere di regimazione idraulica e per la gestione delle acque superficiali che contribuiscono alla dinamica del dissesto.

Un elemento di rilievo emerso dall'analisi delle precipitazioni riguarda il ruolo delle condizioni antecedenti gli eventi franosi del gennaio 2026. I dati mostrano infatti che, a fronte di precipitazioni di breve durata non eccezionali, si sono registrate cumulate su periodi di 30, 60 e 90 giorni caratterizzate da percentili elevati, indicativi di condizioni di saturazione prolungata del suolo. Questo aspetto evidenzia come i fenomeni franosi siano stati innescati non tanto da eventi intensi di breve durata, quanto da una combinazione di fattori predisponenti legati all'accumulo di acqua nel sottosuolo, confermando l'importanza di considerare anche le condizioni idrologiche di medio-lungo periodo nella valutazione del rischio.

Le metodologie adottate in questa fase, pur nello stato attuale delle conoscenze e dei dati ad oggi disponibili, forniscono un primo quadro per la definizione degli interventi, pur richiedendo futuri aggiornamenti in sede di progettazione e di verifiche idrauliche delle opere.

### **Arretramento della scarpata e valutazione del rischio residuo**

Sulla base della modellazione numerica, delle analisi geotecniche e dei dati geognostici e di monitoraggio (topografico e satellitare), è stato definito un modello di arretramento della scarpata principale per valutare il rischio residuo nel settore abitato prospiciente la frana.

Il modello adotta un approccio cautelativo, utilizzando parametri geotecnici minimi per le sabbie ( $\phi'=30^\circ$  e  $c'=0$ ) e un fattore di sicurezza  $F_s=1,5$ . Tale valore è significativamente più cautelativo rispetto al minimo di  $F_s=1,25$  richiesto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 17 gennaio 2018) per le verifiche agli stati limite ultimi in condizioni statiche.

Le simulazioni indicano un arretramento teorico della scarpata generalmente compreso tra 50 e 70 m, con un valore massimo di circa 83 m. Tali risultati hanno indicato che la fascia di interdizione di 150 m stabilita nell'immediatezza della frana, risultava significativamente più ampia rispetto alle esigenze tecnicamente giustificabili sulla base del modello adottato.

L'analisi interferometrica post-evento di tutte le immagini satellitari acquisite (Capella Space, Sentinel-1, COSMO-SkyMed, PlanetScope) non ha mostrato movimenti apprezzabili nella fascia di interdizione, così come confermato anche dai primi dati della rete di monitoraggio installata *in situ* dall'INGV, che non mostrano spostamenti significativi con direzione coerente, se non nell'immediatezza del ciglio della scarpata.

Alla luce di queste risultanze, il Commissario straordinario, nominato ai sensi del Decreto-Legge 27 febbraio 2026 n.25, ha disposto, d'intesa con il Comune, la conseguente riduzione della fascia di interdizione a 100 m dal ciglio della scarpata nel centro abitato in corrispondenza della frana centrale. Questa ampiezza garantisce un margine di sicurezza superiore agli scenari di arretramento stimati, assorbendo anche l'evoluzione morfologica recente del versante.

Pur in un quadro generale di stabilità del centro abitato, la presenza di segnali deformativi localizzati e coerenti tra diverse tecniche di monitoraggio (es. nell'area del plesso scolastico "San Giuseppe") evidenzia una dinamica ancora attiva, che impone un approccio prudenziale basato su verifiche *in situ* e sul mantenimento dell'assoluta interdizione all'accesso nella fascia rossa, a tutela della sicurezza.

### **Scenari di rischio e strategie per la riduzione del rischio**

Nonostante la ridefinizione della zona di rispetto nel centro abitato, il quadro complessivo del sistema franoso permane in uno stato di instabilità evolutiva, con un rischio residuo elevato per l'intero corpo di frana.

Si raccomanda pertanto di adottare un approccio integrato per la gestione del rischio residuo che combini misure di Protezione Civile, monitoraggio strumentale continuo, delocalizzazioni e interventi di mitigazione strutturale, al fine di ridurre progressivamente l'esposizione al rischio del centro abitato e delle infrastrutture.

Allo stato attuale, i risultati ottenuti rappresentano un quadro conoscitivo tecnicamente coerente, ma da considerarsi preliminare, in quanto basato sulle conoscenze disponibili fino alla data del presente rapporto.

La complessità del fenomeno e la sua evoluzione nel breve termine rendono necessario proseguire con ulteriori indagini e monitoraggi, al fine di ricostruire in dettaglio i meccanismi di movimento delle frane, di controllare la loro evoluzione spazio-temporale, ricostruire le cause predisponenti e innescanti degli eventi e aggiornare progressivamente il modello interpretativo del dissesto.

Le analisi condotte confermano che, a causa delle dimensioni del sistema franoso, della profondità delle superfici di scivolamento e delle caratteristiche geologiche dei terreni coinvolti, non è tecnicamente possibile conseguire una stabilizzazione definitiva dell'intero versante mediante interventi strutturali estensivi. La gestione del dissesto deve pertanto fondarsi su strategie di mitigazione del rischio e su un approccio adattivo, basato sul monitoraggio continuo e sul controllo dei principali fattori di instabilità, attraverso una combinazione equilibrata e progressiva di interventi strutturali e misure non strutturali di riduzione del rischio.

Uno dei processi attualmente in atto è l'arretramento della scarpata formatasi durante la fase parossistica del movimento. Tale fenomeno rappresenta in parte un'evoluzione naturale del versante verso un nuovo assetto di equilibrio. Gli interventi non devono quindi mirare alla ricostruzione della morfologia originaria, ma piuttosto accompagnare l'evoluzione del pendio attraverso opere di riprofilatura, regimazione delle acque superficiali e protezione dall'erosione.

Parallelamente rimane possibile la riattivazione del movimento profondo lungo superfici di scivolamento già impostate. La risposta relativamente rapida del sistema agli eventi pluviometrici suggerisce la presenza di percorsi preferenziali di infiltrazione legati a fratture e discontinuità strutturali. Le strategie di mitigazione devono quindi concentrarsi principalmente sul controllo delle acque.

Nel medio periodo gli interventi proposti sono orientati alla riduzione delle infiltrazioni, alla captazione delle emergenze idriche, alla regimazione delle acque meteoriche e alla protezione dall'erosione del piede dei versanti. Nel lungo periodo, solo una caratterizzazione geologica e geotecnica più approfondita potrà consentire la progettazione di eventuali opere strutturali mirate, che tuttavia potranno agire solo localmente e non garantire una stabilizzazione globale del sistema.

Un ruolo centrale è attribuito alle misure di prevenzione non strutturale, tra cui la gestione adattiva del rischio, l'aggiornamento continuo della zonazione di pericolosità e il controllo dell'uso del suolo. In questo contesto può risultare necessario limitare nuove edificazioni nelle aree più instabili e prevedere la progressiva delocalizzazione delle infrastrutture maggiormente esposte.

### **Proposte per il programma degli interventi strutturali di riduzione del rischio**

Sulla base del quadro conoscitivo disponibile e degli approfondimenti condotti, è stata definita una proposta organica di intervento relativa alla fase iniziale di riduzione del rischio idrogeologico e idraulico nell'area di Niscemi, articolata per ambiti territoriali e coerente con un'impostazione strategica di tipo adattivo e progressivo.

Il piano individua, per ciascun settore di intervento - corrispondente ai tre principali corpi di frana (Nord, Centrale e Sud), al torrente Benefizio e al centro abitato - le opere da realizzare, le indagini geognostiche propedeutiche alla progettazione esecutiva e un quadro economico di massima. Quest'ultimo, costruito sulla base delle risorse attualmente disponibili, è da considerarsi suscettibile di aggiornamenti anche significativi nelle successive fasi progettuali, in funzione dei nuovi dati acquisiti. Le priorità operative sono state definite in modo da massimizzare l'efficacia delle azioni rispetto ai principali fattori di innesco e riattivazione dei fenomeni franosi.

L'impostazione complessiva muove dal riconoscimento che la stabilizzazione definitiva dell'intero sistema franoso non è conseguibile mediante interventi strutturali massivi, a causa della complessità geologica, della profondità delle superfici di scivolamento e dell'estensione dei fenomeni. La strategia adottata si concentra pertanto sul controllo delle condizioni idrogeologiche del versante, agendo in via prioritaria sulla riduzione delle pressioni interstiziali e sulla regolazione dei deflussi superficiali e profondi.

In questo quadro, gli interventi strutturali principali riguardano la realizzazione di un sistema integrato di drenaggio profondo, costituito da gallerie drenanti e campi pozzi di emungimento, finalizzati alla regolazione dei livelli piezometrici nei livelli argillosi e sabbiosi e alla mitigazione dei meccanismi di instabilità. A tali opere si affiancano interventi di regimazione superficiale, tra cui la riprofilatura dei pendii mediante strutture in terra armata con livelli drenanti, la realizzazione di canali di gronda e il ripristino del reticolo idraulico minore, anche mediante tecniche di ingegneria naturalistica.

Un ruolo centrale è attribuito inoltre alla sistemazione idraulica del torrente Benefizio, attraverso la realizzazione di briglie, opere di difesa spondale e dispositivi per il controllo delle portate, con l'obiettivo di ridurre i processi erosivi al piede dei versanti, riconosciuti come fattore determinante nell'evoluzione dei dissesti. In parallelo, nel centro abitato, sono previsti interventi strategici sulla rete fognaria e acquedottistica, volti a ridurre le perdite e le infiltrazioni che alimentano le circolazioni idriche sotterranee nei corpi di frana.

Il programma comprende anche interventi infrastrutturali, tra cui il ripristino della SP10, subordinato al miglioramento delle condizioni di stabilità, mentre eventuali azioni sulla SP12 saranno definite solo in esito al monitoraggio dell'evoluzione della Frana Nord.

Elemento cardine dell'intera strategia è il sistema di monitoraggio continuo e multiparametrico, concepito sia come supporto alla progettazione sia come strumento di verifica dell'efficacia degli interventi secondo il metodo osservazionale. Tale sistema consente una gestione dinamica del rischio, permettendo di adattare progressivamente le soluzioni progettuali all'evoluzione del fenomeno e di aggiornare nel tempo le priorità e le modalità di intervento.

## 13 Bibliografia

- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E., 2002. *Small baseline subset (SBAS) interferometry: a Novel Method for Monitoring Elevation Changes Applied to volcanoes using ERS synthetic aperture Radar Data*. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 40(11), 2375-2383.
- Böhm, G. and OGS research group (2014). Cat3D. Computer aided tomography for 3-D models. User Manual, OGS
- Capilleri P. P., Maugeri M., Raciti E., 2010. *Geotechnical and Seismic Risk Evaluation in Urban Areas*. Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. 9
- Castiglione A., Liguori V., Umiltà G., Villari L.C., 2000. *La frana di Niscemi del 12 ottobre 1997. Risultati delle indagini e delle misure, studio geologico e geotecnico, interpretazione del dissesto, criteri d'intervento*. Relazione della Commissione Tecnico Scientifica nominata con ordinanza n.2703 del 29/10/97. 68 pp. + allegati.
- Casu F., Elefante S., Imperatore P., Zinno I., Manunta M., De Luca C., Lanari R., 2014. *SBAS-DInSAR parallel processing for deformation time-series computation*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 7(8), 3285-3296.
- Commissione tecnico-scientifica, 2005. *La frana di Niscemi del 12 ottobre 1997. Interventi di consolidamento della frana. Progetto esecutivo*. Ministero dell'Interno, Dipartimento della Protezione Civile, Commissione tecnico-scientifica nominata con Ordinanza n. 2703 del 29.10.97. Aggiornamento: gennaio 2025 comprendente il parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.
- Consiglio Nazionale dei Geologi, 2026. *Mesa di Niscemi. Caratterizzazione del dissesto profondo e strategie di mitigazione e comunicazione del rischio*. Febbraio 2026, 53 pp.
- Cruden D.M., Varnes D.J., 1996. *Landslides Types and Processes*. In: "Landslides: Investigation and Mitigation". Transportation Research Board. National Research Council. Special Report 247. National Academy Press, Washington, 3, 36-75.
- Cundall P., 1976. *Explicit finite difference methods in geomechanics*. Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Numerical Methods in Geomechanics, Blacksburg, 133-150.
- Dalrymple T., Flood frequency analyses, volume 1543-A di Water Supply Paper. U.S. Geological Survey, Reston, Va., <https://doi.org/10.3133/wsp1543A>, 1960.
- De Luca C., Casu F., Manunta, M., Onorato G., Lanari R., 2022, July. *On the analysis of the DInSAR time series retrieved through the P-SBAS approach: a focus on possible bias*. In EUSAR 2022; 14th European Conference on Synthetic Aperture Radar, 1-4 VDE.
- Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F., Rucci A., 2011. *A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR*. IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing, 49, 9, 3460-3470.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F., 2001. *Permanent Scatterers in SAR interferometry*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 39 (1), 8 -20.
- Freni G., *Analisi del trend climatico ed impatto sulle misure del PGRA del distretto idrografico della Sicilia, secondo ciclo* <https://www.regione.sicilia.it/sites/default/files/2021-12/3%20Relazione%20analisi%20trend%20climatico.pdf>, 2020.
- Heim A., 1932. *Der Bergsturz und Menschenleben*. Fretz und Wasmuth Verlag, Zürich, 218 pp.
- Hosking J., Wallis J., *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments*. Cambridge University Press ISBN 0521430453, 9780521430456, 1997.

- Hutchinson J.N., 1988. *General report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology*. Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, July 1988, Lausanne. 1, 3-36.
- Keifer C.J. and Chu H. H., Synthetic Storm Pattern for Drainage Design, Journal of the Hydraulics Division, Volume 83, Issue 4 <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000104>, 1956.
- Lanari R., Bonano M., Casu F., Luca C.D., Manunta M., Manzo M., Onorato G., Zinno I., 2020. *Automatic generation of Sentinel-1 continental scale DInSAR deformation time series through an extended P-SBAS processing pipeline in a cloud computing environment*. Remote Sensing, 12(18), 2961.
- Landolina Nava S., 1792. *Relazione della rivoluzione accaduta in marzo 1970 nelle terre vicine a S. Maria di Niscemi*. E. Bartels, Hamburg, 1-52.
- Loke M.H., Chambers J.E., Rucker D.F., Kuras O., Wilkinson P.B., 2013. *Recent development in the direct-current geoelectrical imaging method*. Journal of Applied Geophysics, 95, 135-156.
- Manunta M., De Luca C., Zinno I., Casu F., Manzo M., Bonano M., Fusco A., Pepe A., Onorato G., Berardino P., De Martino P., 2019. *The Parallel SBAS Approach for Sentinel-1 Interferometric Wide Swath Deformation Time-Series Generation: Algorithm Description and Products Quality Assessment*. IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens., 57(9), 6259-6281.
- Marsiano A., 1981. *Niscemi, Geografia Fisica*. EPOS ed. Palermo.
- Masaracchio G., 1790. *Relazione dei vulcani manifestati nelle terre di Niscemi in Sicilia. Lettera al vescovo di Siracusa*. Antologia romana, 50, tom. XVI. Roma (Biblioteca Comunale di Palermo, 30, D.129, 145).
- Maugeri G., 1869. *Ricordo di una convulsione ignivoma avvenuta a Niscemi*. Tipografia Luciano Rizzo.
- Pazzi V., Morelli S., Fanti R., 2019. *A review of the advantages and limitations of geophysical investigations in landslide studies*. International Journal of Geophysics. Article ID 2983087.
- Pepe A., Yang Y., Manzo M., Lanari R., 2015. *Improved EMCF-SBAS processing chain based on advanced techniques for the noise-filtering and selection of small baseline multi-look DInSAR interferograms*. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 53(8), 4394-4417.
- Pozzi S., 2010. *Studio geologico tecnico - Lavori di stabilizzazione e consolidamento versante ovest centro abitato "zona Belvedere"*. Seconda nota geologica integrativa.
- Sorriso-Valvo M., 1997. *Relazione sul sopralluogo effettuato a Niscemi (CL) il 16 ottobre 1997, sui luoghi della frana del 12 ottobre 1997*. CNR IRPI Rapporto interno.
- Rizzo V., 2004. *Un vasto movimento gravitativo al fronte della falda di Gela; evidenze e problematiche in relazione alla tettonica (Franca di Niscemi, Sicilia Meridionale)*. Bollettino della Società geologica italiana, 123(2), 229-252.
- Rizzo V., Toni G., Rijillo R., 2004. *Modelling of the deep gravity-movement of Niscemi (Caltanissetta, Sicily, Italy)*. Acta Naturalia de l'Ateneo Parmense, 40, 19-34.
- Thielicke W., Stamhuis E J., 2014. *PIVlab - Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB*. Journal of Open Research Software. 2. 10.5334/jors.bl.
- USDA-SCS National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1956.