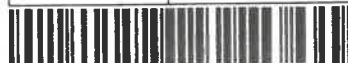




COMUNE DI LETTOMANOPPELLO

COMUNE DI LETTOMANOPPELLO

Anno	Titolo	Classe	ARRIVO
2026	X	X	
Prot.n.	2333	Del	04/03/2026



PROVINCIA DI PESCARA

PRINCIPALI INTERVENTI
DI CONSOLIDAMENTO
REALIZZATI
DAL 1933 AL 2024
e
RISULTATI
MONITORAGGIO

LA FRANA DI LETTOMANOPPELLO



ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Dossier a cura di

Dott. Geol. Giovanni Ciccone

Revisione marzo 2026

INDICE

1. PREMESSA	3
2. PRINCIPALI INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO	2
3.1. MONITORAGGIO DATI INTERFEROMETRICI I.N.G.V.	25
3.2. INSTALLAZIONE DI MICRORETE DI STAZIONI SISMICHE	36
3.3. MONITORAGGIO RETE GPS MONOFREQUENZA	59
3.4. MONITORAGGIO INCLINOMETRI	67
4. CONCLUSIONI	84

1.PREMESSA

Il comune di Lettomanoppello è ubicato sul bordo pedemontano Nord occidentale del Massiccio della Maiella, si estende per circa 15,07 Km² con altitudine media di 370 m. s.l.m. (min 126 m. max 1.375 m.) risulta compreso all'interno del Parco Nazionale della Maiella.

Il comune di Lettomanoppello confina a Nord con il comune di Turrivalignani, a Est con Manoppello e Serramonacesca a Sud con Pretoro a Ovest con Roccamorice, Abbateggio e Scafa.

Le principali vie di comunicazione sono rappresentate dalla Strada Provinciale 65 che attraversa il territorio comunale in direzione nord-sud e dalla Strada Provinciale 46 che conduce al comune di Manoppello.

L'area di studio è compresa nelle seguenti cartografie topografiche:

IGM scala 1:25.000: Fogli 360.

Carta Tecnica Regionale (CTR) scala 1:5.000: Particelle 361092, 361093, 361131, 361132, 361133, 361134, 361143, 370011 e 370024.

L'orografia del territorio di Lettomanoppello risulta essere piuttosto articolata, la porzione meridionale è infatti situata sulle pendici nordoccidentali della Maiella dove le quote raggiungono i 1300 m. s.l.m. mentre il confine settentrionale si chiude in un'area sub-pianeggiante dove le massime altezze raggiungono circa 140 m. s.l.m. questo dislivello è abbastanza regolare.

I pianori più estesi che si presentano sono Piano delle Cappello (1010 m.) Piano di Renzi e Piano di Tarica (1300 m.), il principale elemento idrografico, risulta il Fiume Lavino che costituisce il confine con il comune di Scafa, sono inoltre presenti alcune sorgenti Fonte Marte (265 m.) nei pressi della S.P.46 a Nord Est del centro storico di Lettomanoppello e Fonte di Papa (651 m.) lungo S.P.65 che conduce a Passo Lanciano.

Nel territorio comunale di Lettomanoppello risultano presenti sia movimenti franosi di tipo crollo e ribaltamento, dovuti ad una tettonica che ha determinato forti dislivelli topografici e generalizzati incrementi dell'energia di rilievo predisposti da diffusi sistemi di fratture, joints e clivaggi che interessano i litotipi calcarei, sia scorrimenti e colate in corrispondenza di alternanze di materiali con caratteristiche litotecniche ed idrogeologiche diversificate

In particolare l'area in cui è ubicato il centro storico di Lettomanoppello risulta compreso tra la scarpata che rompe l'assetto monoclinale delle pendici nord occidentali del rilievo della Maiella avente altezza di circa settanta metri, caratterizzata da elevata acclività, ed impostata sui calcari detritici e la scarpata, con un fronte di circa 400 metri, ed avente altezza di circa 30 metri, che rappresenta il ciglio principale dei movimenti gravitativi, che hanno interessato la porzione di versante immediatamente a valle del centro abitato fino al sottostante fiume Lavino. La suddetta

area è caratterizzata da una frana complessa con movimenti di tipo rotazionale e traslativo e con colamenti recenti.

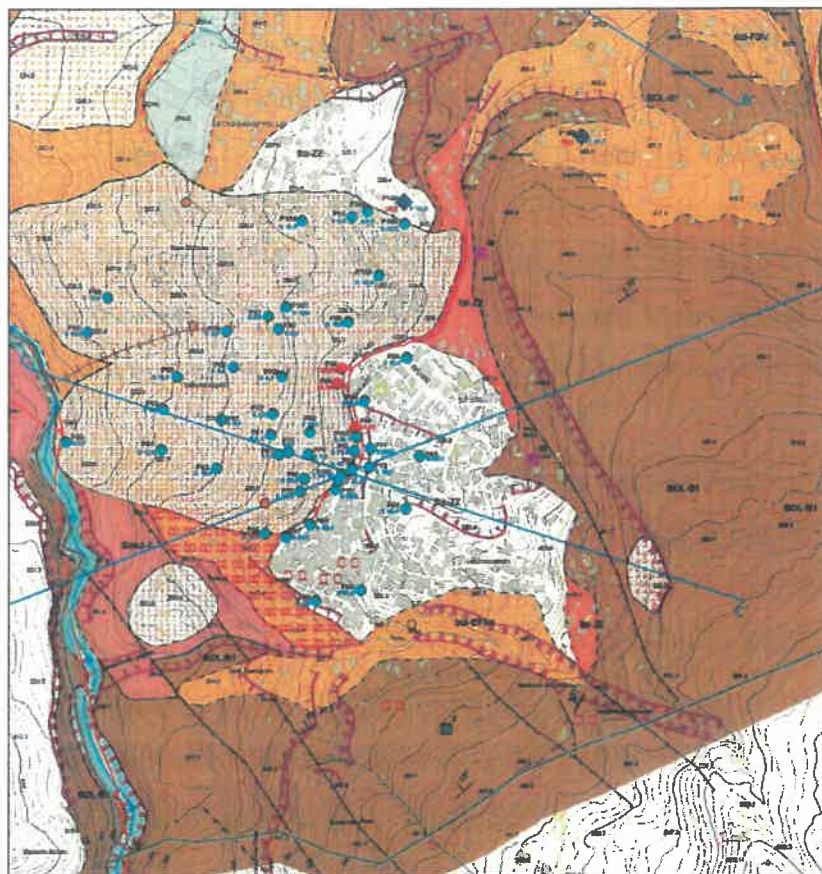


Fig. 1: Stralcio Carta Geologica Studio MZS Comunale

E' possibile pertanto definire tre zone a differente criticità :

1. Centro storico: affiorano materiali detritici antichi a grana grossa provenienti prevalentemente dalla demolizione delle formazioni calcaree. Si tratta di frammenti calcarei di varie dimensioni, fino a grossi blocchi, di forma poliedrica ed a spigoli vivi o sub-arrotondati, generalmente a contatto tra loro, fra i quali è interposta una frazione a grana più minuta anch'essa di natura calcarea e di colore biancastro, in genere piuttosto abbondante e a luoghi nettamente prevalente sulla frazione più grossa. Il materiale a grana più fine riempie quasi completamente gli interstizi tra gli elementi di dimensioni maggiori. Lo spessore è molto variabile da zona a zona anche su brevi distanze a seconda dell'andamento morfologico della superficie d'appoggio sul basamento miocenico e dell'entità dei processi erosivi subiti in superficie dopo la sua messa in posto, sulla base dei risultati dei rilievi di superficie e delle indagini tale spessore è risultato piuttosto elevato nella zona del centro abitato (tra i 18 e 46 m). *Zona in rosso Carta MOPS Microzonazione sismica comunale Fig.2* avente estensione di circa 214.000 m²

2. Da Via Valle a Largo Assunta fino al sottostante fiume Lavino : frana complessa con movimenti di tipo rotazionale e traslativo e con colamenti più recenti che hanno interessato la porzione di versante immediatamente avente estensione di circa 500.000 m². All'interno di tale area per le specifiche condizioni morfologiche, geologiche e geotecniche, indotte da particolari condizioni metereologiche, oltre che da azioni sismiche si è verificato il riattivarsi anche solo di porzioni. *Zona in viola Carta MOPS Microzonazione sismica comunale Fig.2.*
3. Scarpata fronte NW Maiella : frane da crollo e ribaltamento predisposti da sistemi di joints e fratture..

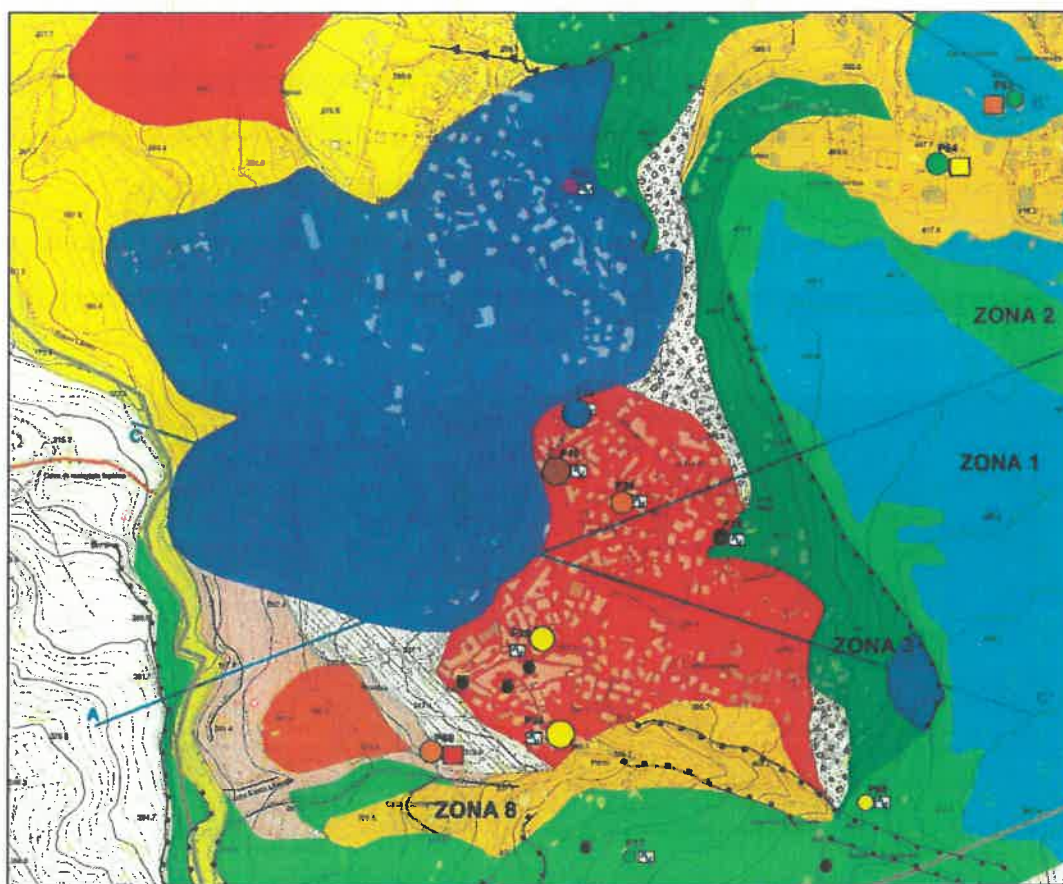


Fig. 2 : Stralcio Carta MOPS Studio MZS comunale

Dalla documentazione di eventi gravitativi nell'area a partire dal 1920, l'evento più catastrofico risulta avvenuto nel 1954 ed ha causato danni irreparabili e la completa distruzione di edifici privati e pubblici, dal catalogo Frane del Progetto AVI (scheda n. 3000320) risulta "La parte occidentale dell'abitato minaccia di sprofondare; profonde crepe si sono infatti aperte sotto numerose case e sulle strade d'ingresso, per una lunghezza di un centinaio di metri. Il 23/02/1954 sono state inviate tende e coperte ai senzatetto che risultano 72".

La frana di Lettomanoppello risulta inserita nel censimento dei dissesti della prima metà del XX secolo e nei primi provvedimenti di consolidamento di seguito riportati :

1. **Legge 445 del 9 luglio 1908** “*Sui provvedimenti per la Basilicata e la Calabria (tab. D – Lettomanoppello)*”;
2. **Decreto Regio n. 908 del 24 aprile 1921** che approva le tabelle degli abitati da consolidare a cura e a spese dello Stato;
3. **Decreto del Presidente della Repubblica 4 dicembre 1954, n. 1285** recante “*Inclusione dell’abitato di Lettomanoppello, in provincia di Pescara, fra quelli da trasferire parzialmente a cura e spese dello Stato*”;

nel decreto si riporta come di seguito “Considerando che le opere di consolidamento eseguite negli anni precedenti non hanno arrestato il movimento franoso a Lettomanoppello è stata riconosciuta la necessità di procedere, per una parte dell’abitato, allo spostamento in nuova sede”.

La zona indicata nel Decreto risulta compresa lato Nord Chiesa dell’Assunta, lungo la periferia ad Est di Corso Vittorio Emanuele sino alla Via trasversale Collarso e quindi all’incrocio tra le Vie Stefani e XX Settembre.



Fig. 3 : Area dell’abitato da trasferire D.P.R. n.1285 del 4 dicembre 1954

La frana di Lettomanoppello risulta inoltre tra quelle menzionate nel censimento delle aree del paese colpite da frane e da inondazioni per il periodo 1918-1990, studio che nel 1989 il Dipartimento della Protezione Civile commissionò al Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI) del Consiglio Nazionale delle Ricerche.

Il censimento, condotto fra il 1991 ed il 1992, venne realizzato da 17 gruppi di ricerca distribuiti su tutto il territorio nazionale e coinvolse oltre 300 fra esperti, ricercatori ed operatori tecnici. Durante la fase di censimento vennero consultati 22 quotidiani locali, per un totale di oltre 350.000 copie di giornale; reperendo ed analizzando circa 1000 pubblicazioni tecniche e scientifiche; ed effettuando interviste a 150 esperti nel settore dei movimenti franosi e delle inondazioni. Tutte le notizie censite sono andate a costituire un archivio digitale contenente oltre 17.000 informazioni relative a frane ed oltre 7000 informazioni relative ad inondazioni. Nel 1996 venne pubblicata una prima carta sinottica delle principali località colpite da movimenti franosi e da inondazioni. Da allora, si è provveduto a localizzare, come punti ed a scala 1:100.000, tutte le località note per essere state colpite da frane od inondazioni.

Sono state censite le notizie riguardanti tutto il territorio nazionale relative a: frane ss, esondazioni ss, mareggiate, trombe d'aria e valanghe, contenute sul quotidiano *"Il Tempo"* fino al 1954. Sono stati inoltre censiti eventi meteorologici estremi e terremoti quando causa innescante di dissesti idrogeologici.

E' stato consentito l'accesso ad un archivio fotografico de *"Il Tempo"* (P.zza Colonna), dal quale sono state tratte 35 notizie relative a catastrofi idrogeologiche avvenute, nell'area di competenza, tra il 1956 ed il 1992.

Da tali notizie si sono ricavate 21 segnalazioni relative a frane, 4 ad esondazioni, 8 a mareggiate e 3 ad allagamenti le cui cause non sono ben specificate; con queste notizie sono state compilate altrettante schede S0.

Di seguito si riporta la cartografia redatta nello studio per il territorio del Comune di Lettomanoppello catalogato.



COMUNE DI LETTOMANOPPELLO



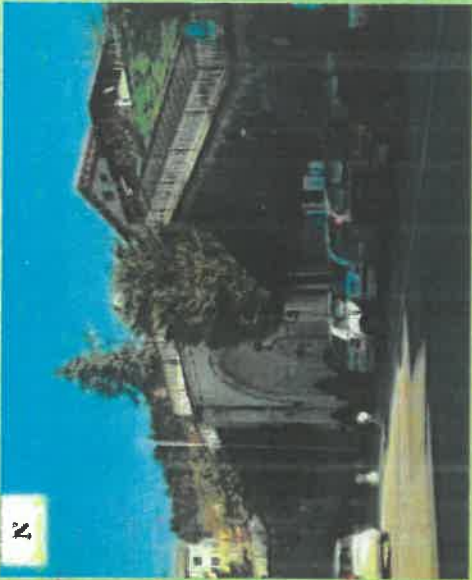
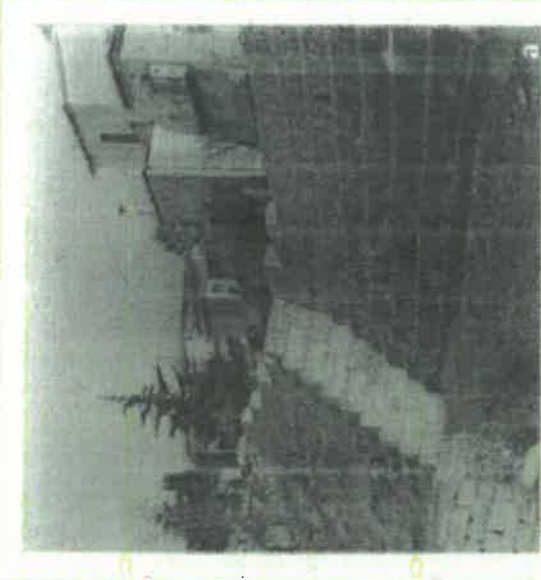
PROVINCIA DI PESCARA

2. PRINCIPALI
INTERVENTI DI
CONSOLIDAMENTO

LA FRANA DI LETTOMANOPPELLO



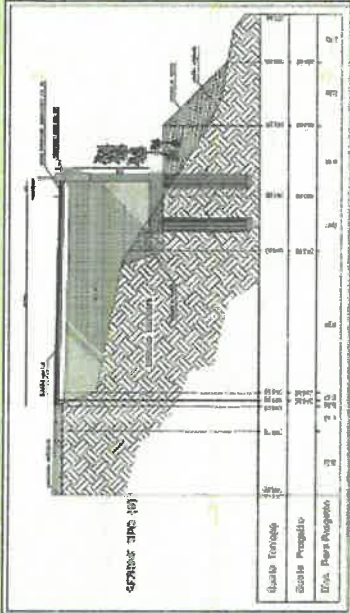
Anno	Oggetto			Tipologia
1933	Intervento di consolidamento Via Chiuse			Muro a contrafforti
1951	Intervento Di Consolidamento Via Chiuse			Muro a contrafforti

Anni 60	Intervento di Consolidamento sul ciglio superiore della scarpata di Corso Vittorio Emanuele		Muro di contenimento
Anni 60	Intervento di Consolidamento sul ciglio nord-occidentale		Gabbionata

Anno	Oggetto	Importo	Descrizione	Progettisti
1988	Lavori di consolidamento del movimento franoso sul versante nord-occidentale del centro abitato di Lettomanoppello Lotto 1 Ordinanza del Ministero per il Coordinamento della Protezione Civile n.1433/FPC del 12 aprile 1988	Lire 2.000.000.000	Le opere realizzate consistenti in una cortina di micropali realizzate all'interno di terreno consolidato mediante tecnica del jet-grouting rappresentano un intervento che veniva proposto come sperimentale con l'obiettivo di garantire la stabilità dei terreni a monte del ciglio della scarpata lungo Corso Vittorio Emanuele nel tratto antistante il monumento ai caduti e costituiscono solo un primo lotto funzionale di un più esteso progetto 	BERTINI T. TOTANI G. (1988)
Anni 90	Intervento di consolidamento a Valle della Scarpata Inferiore di Corso Vittorio Emanuele.	Lire 120.000,000	Intervento di consolidamento consistente in paratia di pali spinti a m -37 m. p.c. e gabbioni per un tratto di circa 30 metri Valle della Scarpata Inferiore di Corso Vittorio Emanuele	CONSOLE O. (1990)

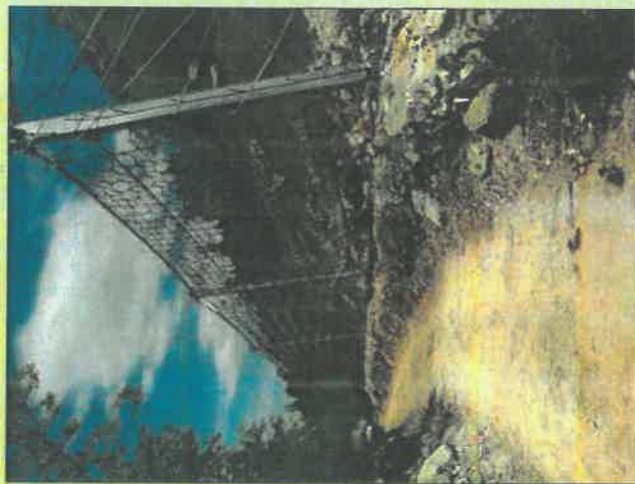
2001	Consolidamento del versante Nord-Occidentale del centro storico	Lire 83.999,911	Nello studio si evidenzia come il penepiano su cui sorge l'abitato di Lettomanoppello sia il risultato di un antico smottamento e di successivi riassetamenti nel tempo della massa franata, che le zone interessate da movimenti gravitativi più recenti siano quelle più periferiche del versante nord-occidentale a valle di Corso Vittorio Emanuele e Via Stefani, mentre le aree interessate da fenomeni gravitativi di una certa entità, in tempi remoti precedenti all'insediamento abitativo, siano quelle nella zona sud-orientale a monte del paese. Dove i fenomeni franosi hanno interessato i depositi calcarei disarticolandoli per un tratto di oltre un chilometro e determinando un abbassamento dell'ordine di 50-60 metri del blocco su cui oggi poggia il paese.	C.D. CARLINO – E. ROSSETTI (2001)
2002	Piano di interventi urgenti relativi ai dissesti idrogeologici	€ 129.141,22	Il progetto è consistito nella realizzazione di n.7 pozzi verticali per la captazione delle acque in località Fonte Vecchia e convogliamento delle stesse in una vasca di raccolta	BRANDI R. – BIANCO B. (2002)

2002	Consolidamento del versante occidentale - Zona Nord Occidentale Centro Urbano	Lire 1.401.290.686		STELLER - (Febbraio 2002)
2004	Consolidamento centro abitato zona Via Chiuse - Valle Legge 445/1908 triennio 1999-2001	€ 360.000,00	Sulla base dei sopralluoghi eseguiti e dai risultati ottenuti dalle indagini geognostiche, il geologo Cavallucci conclude che l'area del centro storico risulta edificata su un deposito detritico prodotto dalla degradazione di elementi litoidi delle formazioni calcaree affioranti nella dorsale della Maiella e che tale unità risenta di infiltrazioni da parte delle acque di circolazione che ne provocano l'alterazione provocando dissesti alla pavimentazione stradale ed ai fabbricati.	DI PIERDOMENICO G. - CAVALLUCCI S. (2004) Ingegneria 2000, Studio Associato di Progettazione e Consulenza

2005	Interventi di consolidamento del centro storico Via Valle Legge 183/89	€ 150.000,00		PELACCIA - DI FULVIO - CAVALLUCCI S. (2005)
2010	Tecnica per il miglioramento della Viabilità comunale in località Via Valle - Largo Assunta	€ 197.660,00		ALBERICO C. - DI PIERDOMENICO M. (2010)

2011	Consolidamento Corso Vittorio Emanuele- Via Fonte Vecchia Regione Abruzzo – servizio Difesa del suolo” Determinazione DC12/88 del 19/09/2010 (POR-FESR 2007-2013)	€ 500.000,00	Intervento consistente nella realizzazione di due paratie, la prima immediatamente a monte della strada che dal bivio di Corso Vittorio Emanuele conduce a Via Fonte Vecchia, costituita da pali di diametro pari a 800 mm ad interasse di 1,20 metri spinti a -12, m. p.c. collegati da un cordolo di dimensioni pari a 100 x 100 cm per una lunghezza complessiva di 34 metri, la seconda immediatamente a valle del Belvedere del paese, dove sono evidenti le presenze di fessure sulla sede stradale, costituita da pali posti su una fila di diametro pari a 800 mm ad interasse di 1,20 metri spinti a -12, m. p.c. collegati da un cordolo di dimensioni pari a 100 x 100 cm per una lunghezza complessiva di 67 metri.	MASSA F. - ESPOSITO G. (2011)
2015	Messa in sicurezza scarpata fronte NW della Maiella Regione Abruzzo finanziato ex art. 1, comma 182 della L. 24.12.2012 n.228 Determinazione DC21/29 del 16 febbraio 2015	€ 400.000,00	I numerosi sopralluoghi eseguiti avevano evidenziato la presenza di una Trincea che si sviluppa parallela al fronte della scarpata con angolo di direzione di immersione N20°W, estesa circa 50-60 m con un tratto a NW di circa 10 m distaccato di 4 m e ribassato di oltre 1 m rispetto al fronte della scarpata, inoltre si è evidenziata una significativa evoluzione del fenomeno, con presenza di sistemi di fratturazione e accumulo al piede, formazione	DI ROSA – CICCONE G. (2015)

di nicchie di distacco ben definite e movimenti di tipo complesso.



2016

Opera di protezione antierosiva del torrente Lavino ed Interventi di captazione e convogliamento delle acque superficiali che affluiscono nel corpo di frana

DELIBERA CIPE
n.25 del 10/08/2016

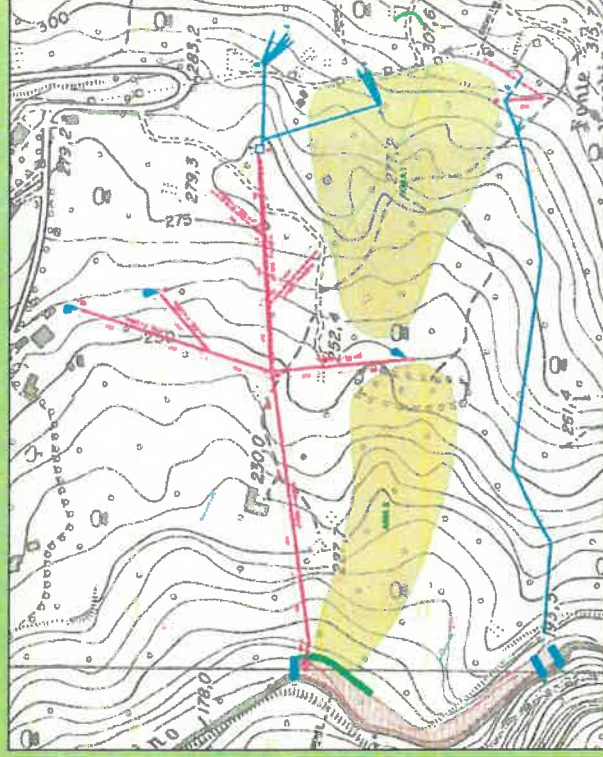
€ 750.000,00

Lo scopo degli interventi è quello di moderare la condizione di elevato rischio idrogeologico presente evitando il più possibile il ruscellamento delle acque meteoriche e di sorgente lungo il versante interessato dal movimento franoso, con effetto di erosione superficiale e di infiltrazione in profondità e mediante il controllo di queste ridurre la loro influenza sulle condizioni idrauliche e sull'influenza del regime dei moti di filtrazione nel

DI NARDO G. -
CICCONI G. (2015)

Fondo Sviluppo
Coesione 2014-
2020

pendio con conseguente modifica del sistema delle pressioni interstiziali, mentre l'intervento a valle dell'area deve evitare fenomeni di erosione sul piede della frana ad opera del torrente Lavino



2018

Completamento
Opera di protezione
antierosiva del
torrente Lavino e
Ripristino viabilità
Via Chiuse
DELIBERA CIPE
n.25 del 10/08/2016
Fondo Sviluppo
Coesione 201420

€ 1.000.000,00

Con questa seconda fase progettuale viene completata l'opera e viene ripristinata la funzionalità di Via Chiuse

DE ANGELIS F. -
CICCONE G. (2016)

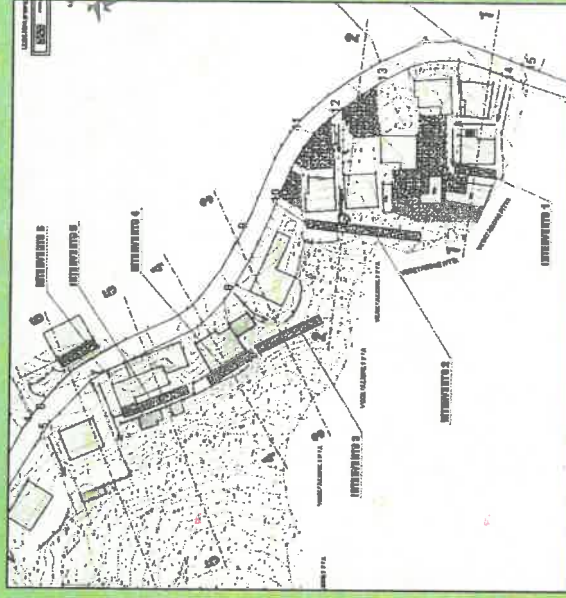
2019

Intervento Mitigazione Rischio Idrogeologico Via Valle

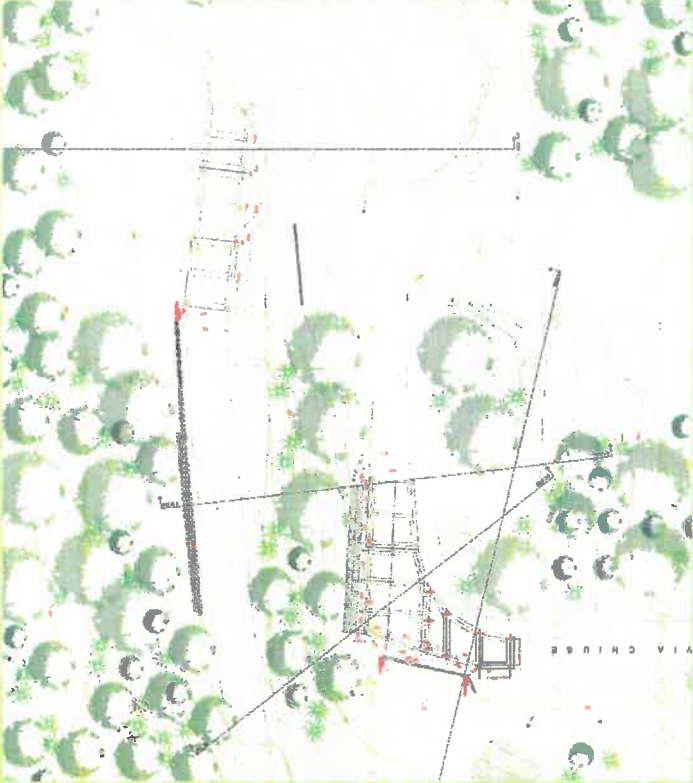
D.P.C.M. 20.02.2019 -
Codice ReNDiS:
13IR786/GI

€ 750.000,00

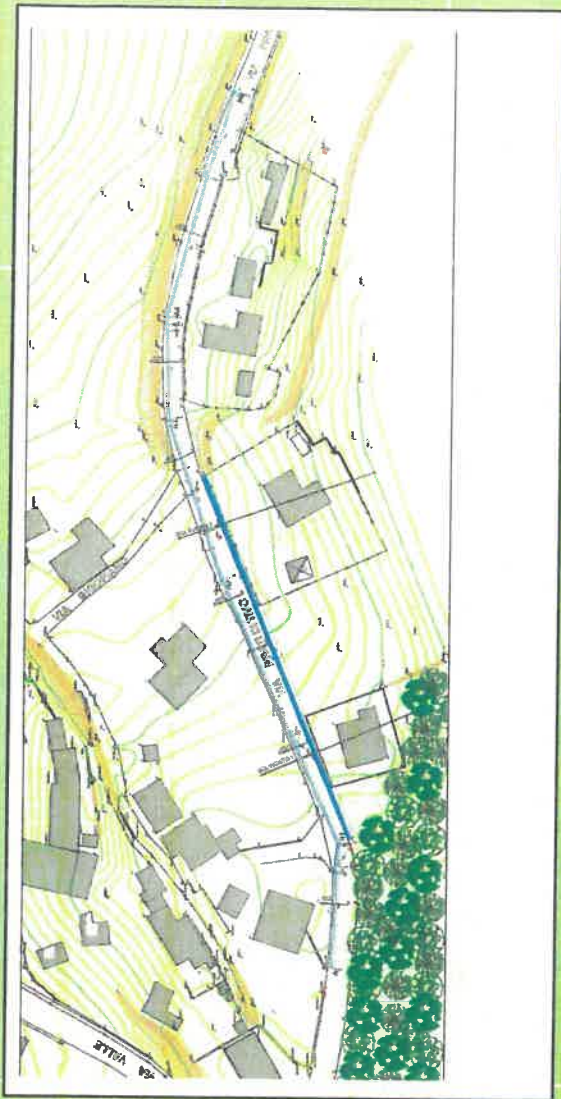
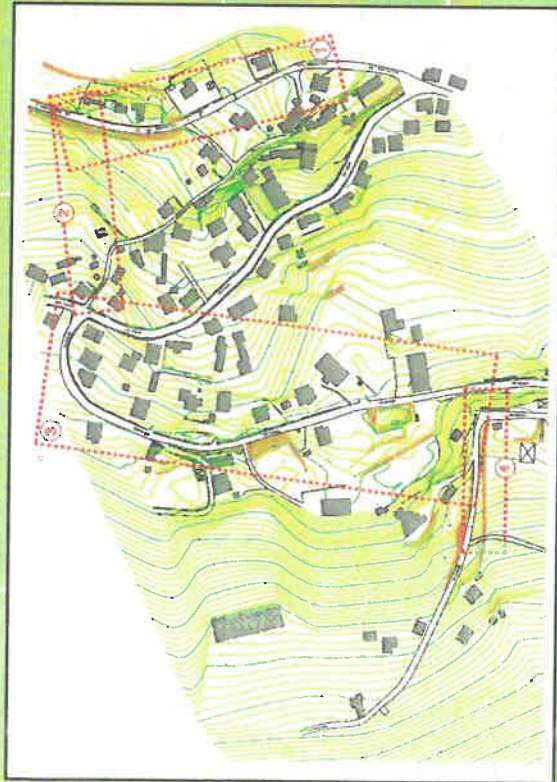
Gli interventi previsti consistono in paratie drenanti costituite da pali in c.a. collegati intesa da solettone in c.a., formate da pali in c.a. del diametro di 80 ~ 100 cm e della profondità di m. 16,0-20,0, disposti a quinconi interessati di cm 400 con cordolo delle dimensioni di cm 300 x100 a presidio dei fabbricati presenti



DELLA PENNA M.-
DI NARDO E. (2015)

2024	MITIGAZIONE RISCHIO IDROGEOLOGICO LAVINO-VIA FONTEVECCHIA	€ 800.000,00		DI ROSA
2024	COMPLETAMENTO INTERVENTI MITIGAZIONE RISCHIO IDROGEOLOGICO LETTOMANOPPELLO ReNDiS 13IR004/MT	€ 3.500.000,00	L'obiettivo che si pone il progetto, è quello di completare l'opera di protezione antierosiva del torrente Lavino, al fine di mitigare il riattivarsi di fenomeni franosi quiescenti e l'attivarsi di nuovi. Il progetto, inoltre, prevede ulteriori provvedimenti necessari sul torrente Lavino come il ripristino della funzionalità della briglia a valle e la pulizia dell'alveo. Altro obiettivo primario dell'intervento valutati i fenomeni di dissesto in atto lungo Corso Vittorio Emanuele imputabili	A.C.N.D. SRL – G. TOTANI – B. DI GIOVANNI – C. DI GIOVANNI – CICCONE G. (2024)

2026	MESSA IN SICUREZZA VERSANTE NORD OCCIDENTALE DEL CENTRO STORICO A RISCHIO IDROGEOLOGICO COMPLETAMENTO Codice ReNDiS: 13IR997/G1	€ 2.300.000,00	E' prevista la realizzazione di un DIAFRAMMA DRENANTE da realizzarsi a monte delle abitazioni di Via Valle, (lungo Via Prati di Tivo) in cui si è riscontrata una circolazione idrica ad una quota di circa 14 m. p.c all'interno della coltre detritica. La funzione dell'opera di drenaggio oltre che impedire che le acque possano interferire con le opere di fondazione insistenti sullo strato detritico delle strutture antropiche maggiormente interessate da quadri fessurativi è quello di impedire che le acque possano infiltrarsi negli strati del complesso evaporitico e causare variazioni volumetriche nella componente gessifera presente. Con la funzione di preservare il diaframma drenante da eventuali dissesti, è stato previsto la realizzazione di una paratia di pali lungo Via Prati di Tivo che, comunque, incrementa il fattore di sicurezza dell'intero versante a monte e l'allontanamento delle acque mediante un condotta che inizia dall'opera di presa delle acque di falda raccolte dal Diaframma Drenante e termina su Via Pietranegra, per lunghezza complessiva di circa ml 800,48.	DI ROSA – CICCONE G. (2015)
------	---	-------------------	---	--------------------------------



Finanziamenti

1933-2026

Importi

Lire 3.605.419,738

(non compresi interventi da anni 30 a anni 60)

€ 10.707.660

Oggetto	Importo	In attesa di Finanziamento progettazioni esecutive completate
Messa in sicurezza versante a rischio idrogeologico Cda Gesseto Lotto 1	€ 1.680.000,00	PROGETTAZIONE Decreto del 07 dicembre 2020 del Ministero degli Interni
Messa in sicurezza versante a rischio idrogeologico Cda Gesseto Lotto 2	€ 2.200.000,00	PROGETTAZIONE Decreto del 28 ottobre 2022 del Ministero degli Interni
Realizzazione Opera di drenaggio acque profonde	€ 20.029.427,32	Presentato Studio Preliminare



COMUNE DI LETTOMANOPPELLO



PROVINCIA DI PESCARA

3. RISULTATI MONITORAGGIO

LA FRANA DI LETTOMANOPPELLO



**ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA**

3.1. MONITORAGGIO DATI INTERFEROMETRICI I.N.G.V.

Nell'ambito dell'Accordo di collaborazione per attività scientifiche finalizzate allo studio del territorio comunale di Lettomanoppello (PE) interessato da fenomeni di natura franosa tra l'INGV ed il Comune di Lettomanoppello, l'INGV, il Laboratorio GeoSAR dell'ente, ha effettuato l'elaborazione di due dataset di osservazioni satellitari focalizzate sul Comune di Lettomanoppello. Le immagini satellitari acquisite da particolari sensori, noti come Radar ad Apertura Sintetica (SAR), forniscono una panoramica su vaste aree della superficie terrestre, con un singolo frame che garantisce una copertura spaziale nell'ordine di decine o centinaia di chilometri, permettendo in tal modo di avere una visione sinottica di una fenomenologia in atto. A partire dalle prime missioni spaziali che montavano a bordo un sensore SAR agli inizi degli anni novanta, sono stati compiuti enormi progressi nello sviluppo delle componenti, nella qualità delle immagini rilevate e nelle tecniche di elaborazione dei dati.

Attualmente, una delle principali tecniche per l'elaborazione delle immagini acquisite dai sensori SAR è l'Interferometria SAR (InSAR) (Massonnet et al., 1998) e le sue versioni avanzate come Persistent Scatterers (PS) o Small Baseline Subsets (SBAS) che lavorano su lunghi set di immagini multi-temporali e permettono di calcolare con elevata precisione la velocità di deformazione del terreno e le serie temporali di spostamento di punti target trovati all'interno della scena osservata. I punti target non sono altro che oggetti, all'interno dell'area osservata, che hanno la proprietà di restituire un forte segnale di ritorno al sensore SAR, come ad esempio edifici, strade, ponti.

Le tecniche InSAR multi-temporali sfruttano il tempo di percorrenza del segnale di andata e ritorno dal sensore SAR ai punti target al suolo per stimare eventuali fenomeni deformativi in atto nell'area di interesse. In particolare, esse lavorano su molteplici coppie di immagini SAR ed estraggono da ciascuna di esse la cosiddetta fase interferometrica o interferogramma. A formare l'interferogramma, oltre al contributo relativo ad eventuali deformazioni, concorrono diversi contributi tra cui la topografia ed i disturbi atmosferici, che devono essere compensati o rimossi per isolare il contributo di interesse:

dove:

- ϕ_{int} = Fase interferometrica
- ϕ_f = Contributo di "Terra Piatta"
- ϕ_{topo} = Contributo topografico
- ϕ_{displ} = Contributo di deformazione
- ϕ_{atm} = Contributo atmosferico
- ϕ_{err} = Errore di fase

Tutti gli interferogrammi calcolati con le varie coppie di immagini sono quindi trattati con diversi step elaborativi alla fine dei quali si riesce a ricostruire l'intera storia deformativa di ogni punto a partire dalla prima immagine del dataset fino ad arrivare all'ultima

Il territorio comunale di Lettomanoppello, caratterizzato dalla presenza di diversi fenomeni di natura franosa e da una complessa morfologia che complica l'installazione di reti di sensori a terra, si presta quindi bene ad uno studio con osservazioni satellitari. L'area urbana garantisce infatti un buon numero di punti target grazie ai quali è possibile ricostruire l'intera storia deformativa del terreno su cui insiste Lettomanoppello e, quindi, migliorare la conoscenza dei fenomeni caratterizzanti il territorio comunale.

Dati e metodo

I prodotti forniti nell'ambito dell'Accordo con il Comune di Lettomanoppello sono stati realizzati utilizzando due dataset di immagini SAR acquisiti rispettivamente lungo orbita ascendente e discendente (Figura 5) dalle missioni Sentinel-1 dell'Agenzia Spaziale Europea. Le missioni Sentinel-1 operano con segnali in banda C e permettono di ottenere una risoluzione al suolo di circa 15m. Inoltre garantiscono un'ampia copertura spaziale ed un buon campionamento temporale riuscendo ad acquisire un'immagine ogni 6-12 giorni.

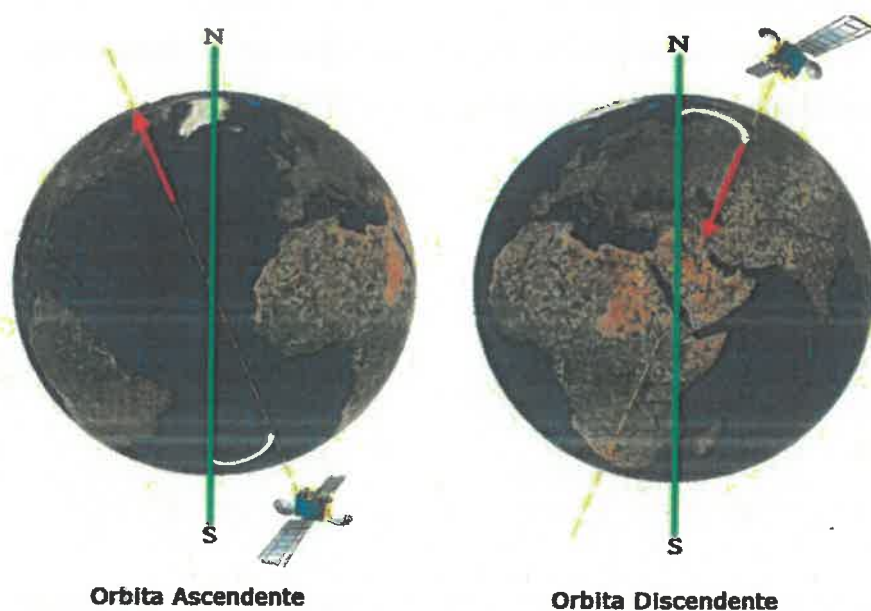


Figura 5: Geometria di osservazione di un satellite lungo orbita ascendente e discendente

La tecnica di elaborazione multi-temporale utilizzata è nota come IPTA - Interferometric Point Target Analysis (Werner et al, 2003) e permette di stimare i point target InSAR mediante dei criteri a soglia di coerenza ed intensità. L'intervallo temporale analizzato è compreso tra Gennaio 2015 e Dicembre 2021 ed in particolare il dataset ascendente è composto da 364 immagini acquisite dal 12 Gennaio 2015 al 30 Dicembre 2021 mentre quello discendente consiste di 349 immagini acquisite dall'11 Gennaio 2015 al 29 Dicembre 2021.

E' stata dapprima applicata una media spaziale a tutte le immagini in modo da ridurre l'effetto di rumore, noto come speckle noise, tipico delle immagini SAR. In tal modo è stata anche degradata la risoluzione a circa 30m, valore coincidente con quella del Modello di Elevazione Digitale (DEM) del terreno fornito dalla missione Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) ed utilizzato in alcuni step elaborativi e per georiferire i prodotti finali.

Le coppie interferometriche da utilizzare nell'elaborazione sono state scelte mediante dei criteri a soglia sulla massima baseline spaziale e temporale. Questi due parametri rappresentano rispettivamente la distanza, in metri, tra le posizioni di acquisizioni dei sensori e l'intervallo temporale, espresso in giorni, intercorso tra le due acquisizioni. Questi due parametri sono state scelti in modo tale da mantenere una connessione continua nelle reti di interferogrammi, mostrata in figura 6.

Dopo aver scartato gli interferogrammi affetti da eccessivi disturbi ed errori, la soluzione in termini di velocità lineare di deformazione del terreno e serie temporali di spostamento è stata calcolata mediante un'analisi di decomposizione a valori singolari (SVD).

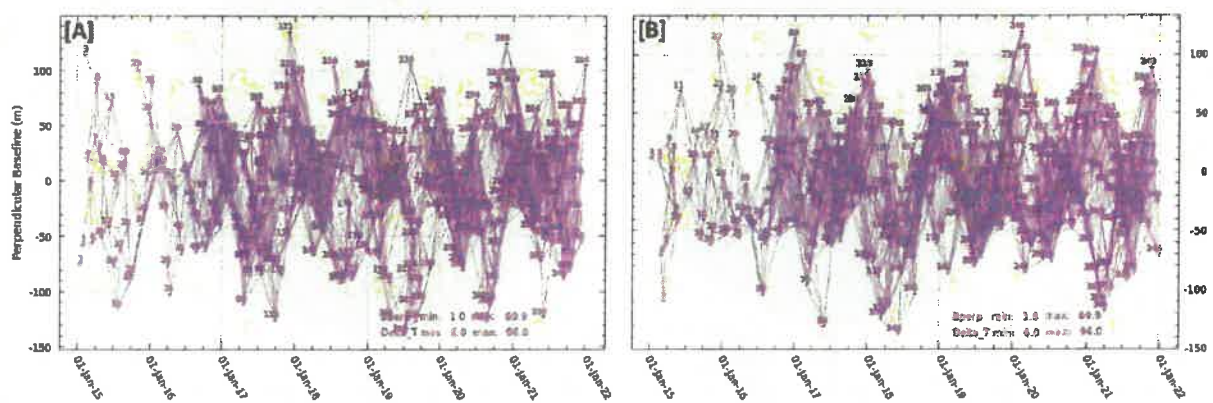


Figura 6: Reti di interferogrammi ottenute per il dato lungo orbita ascendente [A] e discendente [B]

Risultati

I prodotti ottenuti in termini di velocità di deformazione del terreno e serie temporali di spostamento sono mostrati rispettivamente in figura 7 e 8. I risultati sono consistenti con le precedenti elaborazioni effettuate dall'INGV nell'ambito del progetto FIRB Abruzzo con dati della missione spaziale Envisat operante fino al 2010. In particolare, i pattern deformativi rilevati lungo orbita ascendente (Figura 7, pannello A) e discendente (Figura 7, pannello B) sono consistenti con uno scivolamento del corpo frana in direzione SE-NW. Le velocità di deformazione mostrate nei due pannelli A e B sono infatti la somma delle componenti di deformazione verticale ed orizzontale proiettate lungo la Linea di Vista del sensore.

Tuttavia, la disponibilità di dati lungo entrambe le orbite ha permesso di scomporre il moto nella componente verticale (Figura 7, pannello C) ed orizzontale (Figura 7, pannello D), con riferimento alla componente Est- Ovest (essendo il SAR quasi insensibile alla componente Nord-Sud).

Come si evince dalle mappe di velocità, entrambe le componenti sono significative con valori massimi di velocità di circa 10/15 mm/anno. In particolare, il picco della deformazione viene rilevato per i punti target localizzati nella zona NW del centro abitato, corrispondenti agli edifici ed al manto stradale nei pressi di Via Valle, Via Guglielmo Marconi, Via Enrico Fermi e la parte iniziale di Corso Vittorio Emanuele.

L'analisi nel tempo delle serie temporali, mostrata in Figura 8 per un punto target situato nel parcheggio antistante l'ingresso nel centro storico da Corso Vittorio Emanuele, conferma di fatto quanto evidenziato dalle mappe di velocità lineare del terreno. A parte leggere oscillazioni molto probabilmente dovute ad effetti stagionali, il fenomeno sembra seguire un andamento pressoché lineare nel tempo.

La componente di deformazione orizzontale anche a causa della geometria di acquisizione dei satelliti è quella maggiormente significativa con una deformazione cumulata di circa 80mm nei 6 anni di acquisizione mentre la deformazione verticale massima è stimata intorno a 30mm. Questo spiega l'andamento opposto della serie temporale ascendente e discendente.

Infatti, in orbita ascendente un movimento verso ovest è interpretato come una deformazione positiva, che, quindi, si oppone al moto di deformazione verticale negativa. Viceversa per l'orbita discendente le due componenti si sommano e danno luogo ad una deformazione negativa più marcata.

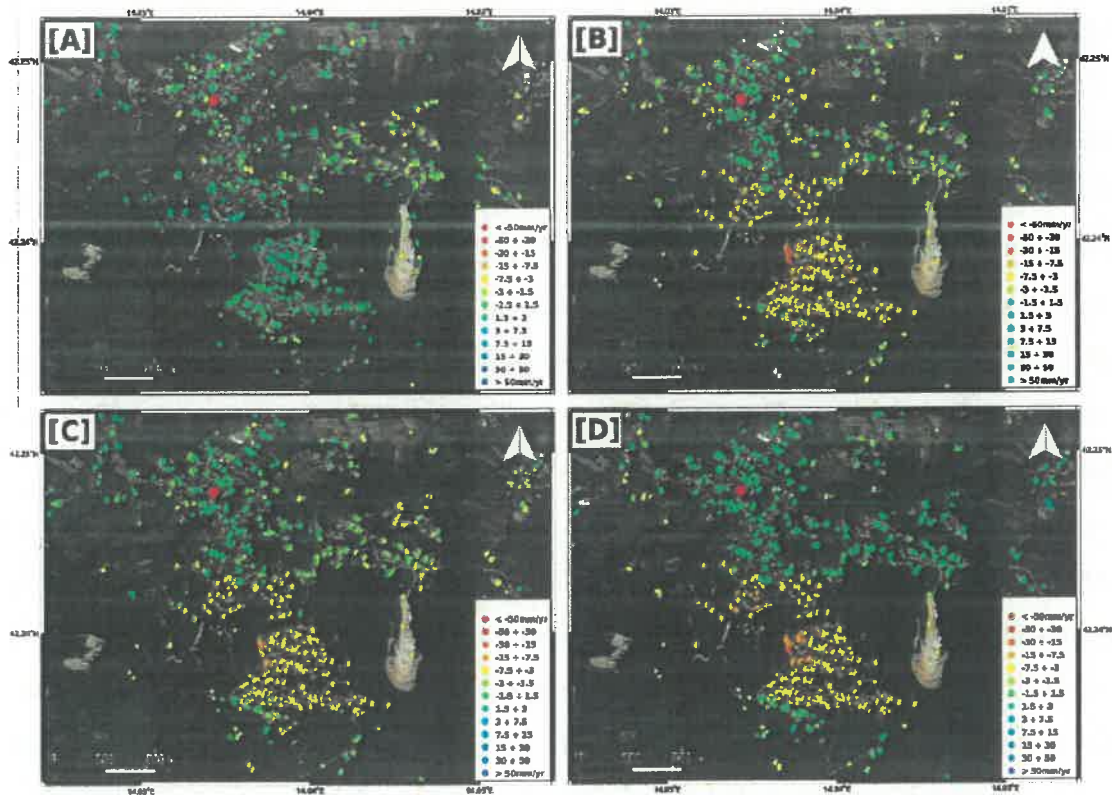


Figura 7: Mappe di velocità di deformazione del terreno lungo Linea di Vista in orbita ascendente [A] e discendente [B] e lungo componente verticale [C] ed orizzontale Est-Ovest [D].

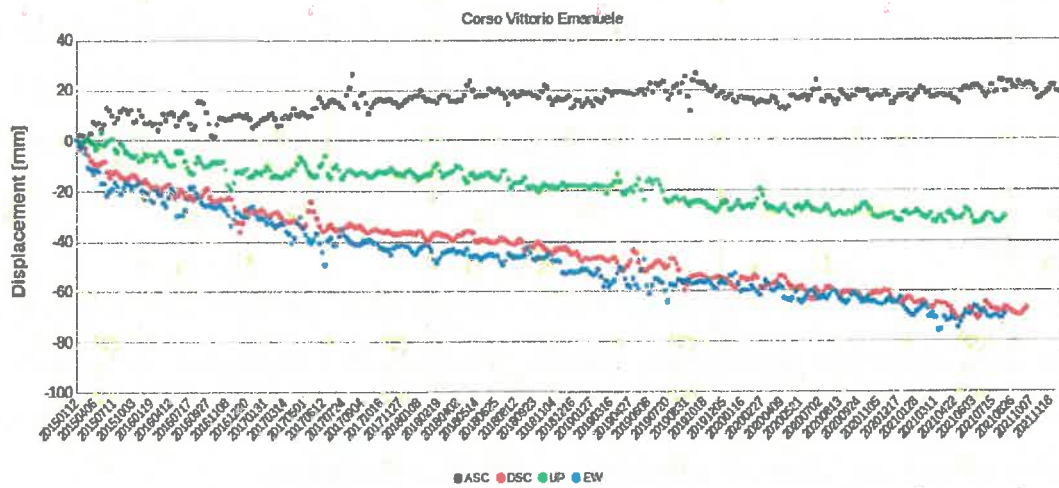
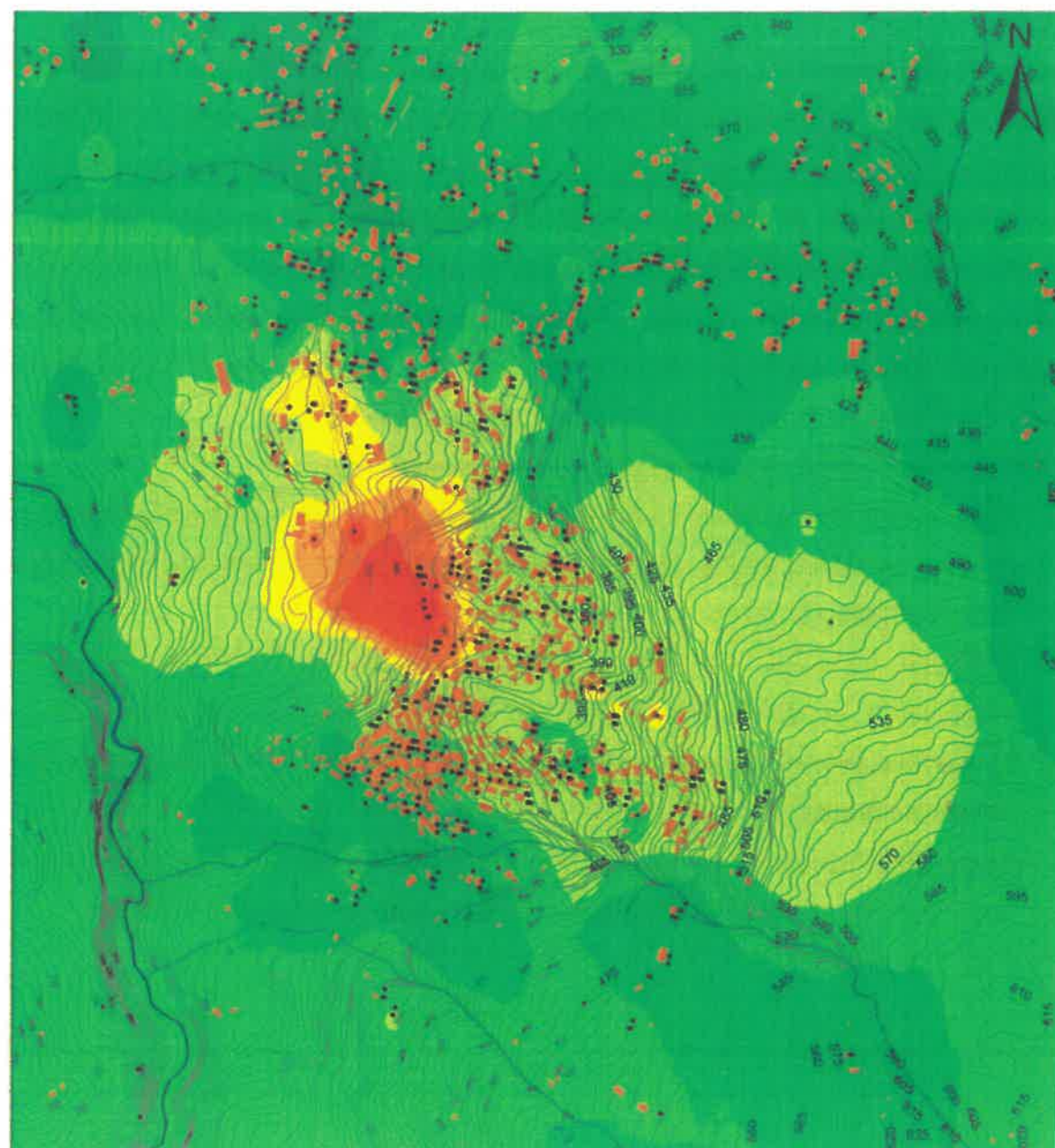


Figura 8: Serie temporali di spostamento di un punto target nei pressi di Corso Vittorio Emanuele.

Figura 9: Mappe di velocità di deformazione del terreno lungo Linea di Vista in orbita discendente su CTR 5.000



0 110 220 440 660 880 Metri

Legenda

• TS_INGV_ITA_8-1_2015_2021_MOL

<VALUE>
-19,60601234 - -17,24241538
-17,24241537 - -14,87881841
-14,8788184 - -12,51522144
-12,51522143 - -10,15162447
-10,15162446 - -7,788027498
-7,788027497 - -5,424430529
-5,424430528 - -3,06063356
-3,060633559 - -0,697236681
-0,697236681 - 1,666360378

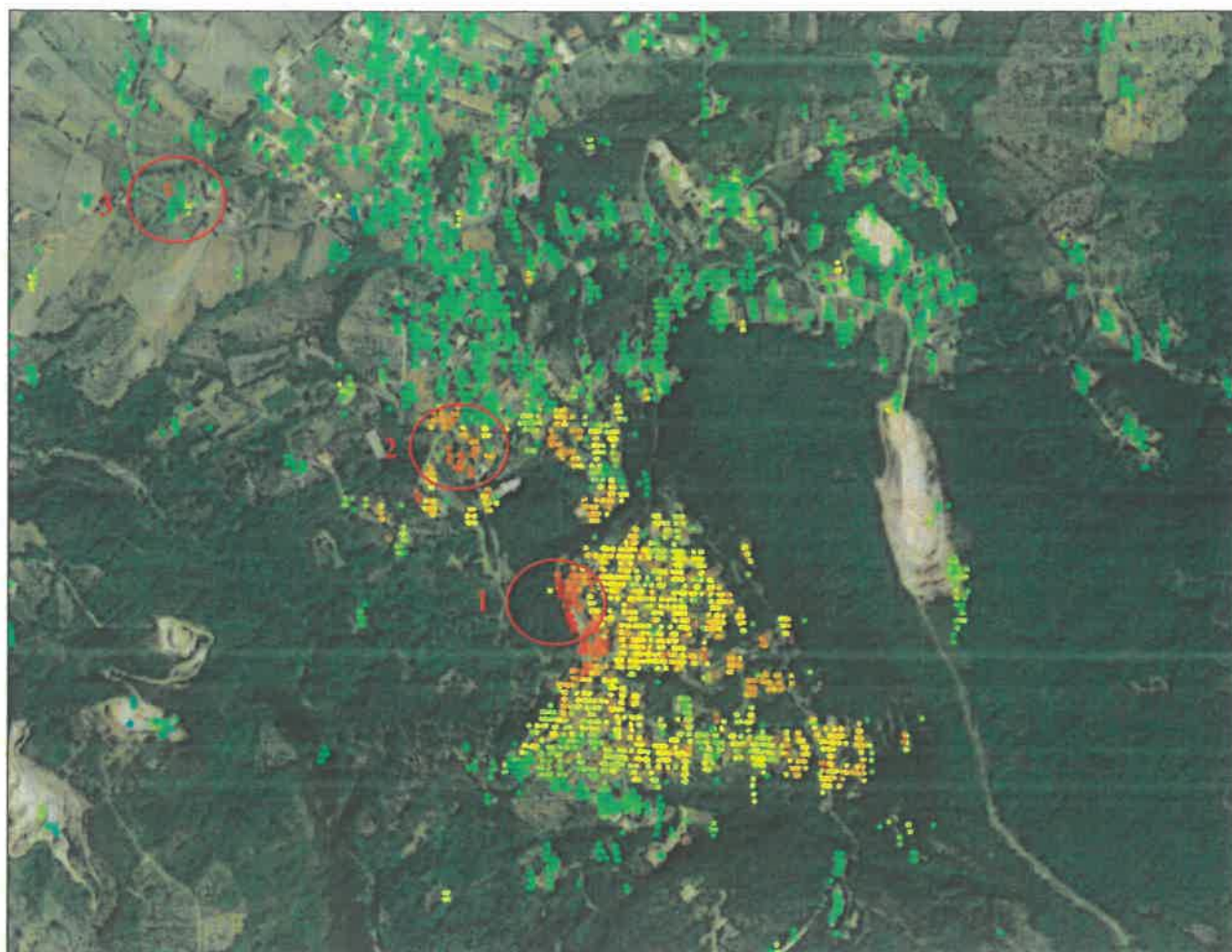
3.1.1 DATI INTERFEROMETRICI COPERNICUS

Sono stati inoltre esaminati i dati forniti dal Servizio Europeo di Movimento Terrestre (EGMS), prodotto che rappresenta l'avanguardia della tecnologia di telerilevamento spaziale, utilizzando dati di interferometria radar ad apertura sintetica (InSAR) derivati da Sentinel-1 per rilevare e misurare i movimenti del terreno in Europa con precisione millimetrica. Il prodotto viene aggiornato annualmente e può essere utilizzato per una varietà di applicazioni; Le autorità cittadine, regionali o statali possono utilizzarla per monitorare l'integrità strutturale di dighe, ponti, ferrovie ed edifici. Permette agli urbanisti di prendere decisioni basate sui dati su dove costruire nuove infrastrutture, valutando la probabilità di pericoli naturali come frane o cedimenti.

L'EGMS distribuisce tre livelli di prodotti aggiornati annualmente:

- **Base**. Mappe della velocità di vista in orbite ascendenti e discendenti con geolocalizzazione annotata e misure di qualità per ogni punto di misura. I prodotti di base sono indirizzati a un punto di riferimento locale.
- **Calibrato**. Le mappe della velocità di linea di vista in orbite ascendenti e discendenti si riferiscono a un modello derivato dai dati delle serie temporali dei sistemi satellitari di navigazione globale. I prodotti calibrati sono assoluti, non essendo più relativi a un punto di riferimento locale.
- **Ortopedia**. Componenti del moto (orizzontali e verticali) ancorate al modello geodetico di riferimento. I prodotti ortopedici vengono ricampionati su una griglia di 100 m.

Di seguito la Mappa della velocità di vista in orbite discendenti dell'area di Lettomanoppello e i grafici relativi ai FP in alcune aree del paese con evidenziate le velocità in mm/anno nel periodo 2019-2023.



Legend across all datasets. Limits are in mm/year.

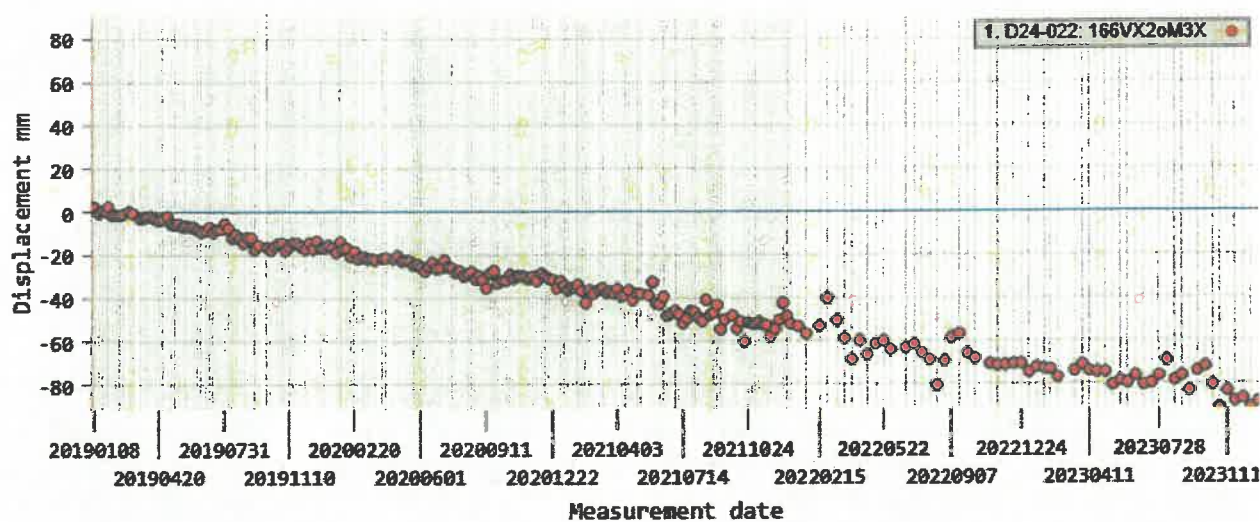
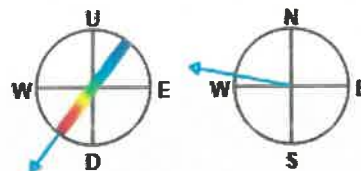


1. Centro storico
2. Via Valle
3. Case Addario

1. Centro storico : velocità media 17.70 mm/anno

Dataset: D24-022
 Point ID: 166VX2oM3X
 Position: 2135024.00 N 4655181.50 E 348.90 m
 Mean velocity: -17.70 mm/year
 Coherence: 0.78
 RMSE: 3.40 mm

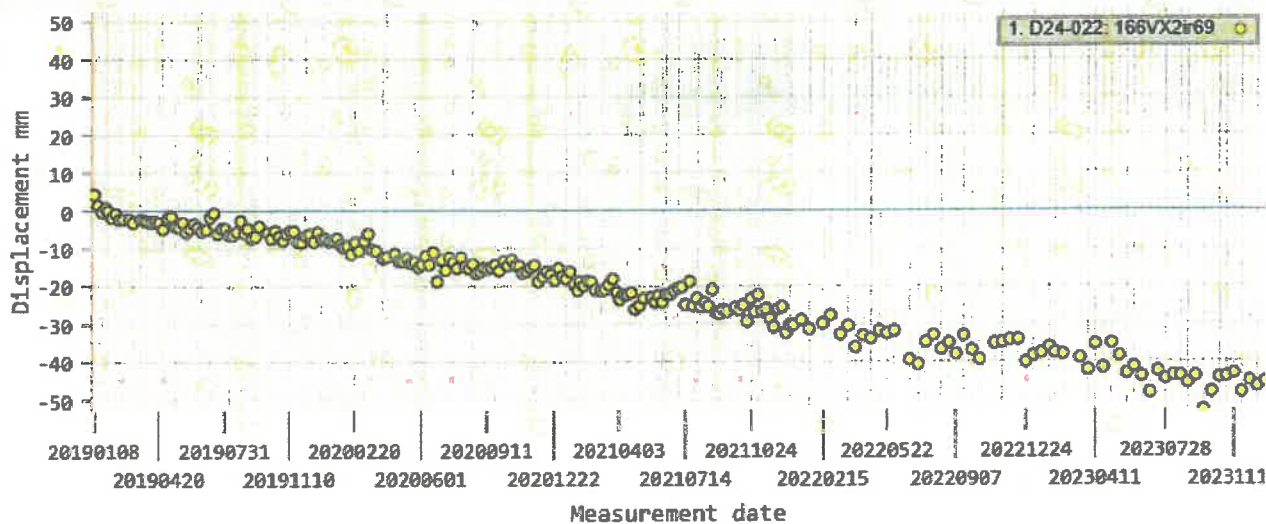
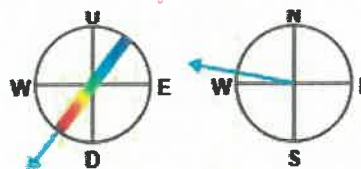
Incidence angle: 37.11°
 Track angle: 190.92°



2. Via Valle : velocità media 9.70 mm/anno

Dataset: D24-022
 Point ID: 166VX2ir69
 Position: 2135328.00 N 4654987.00 E 296.60 m
 Mean velocity: -9.70 mm/year
 Coherence: 0.90
 RMSE: 2.00 mm

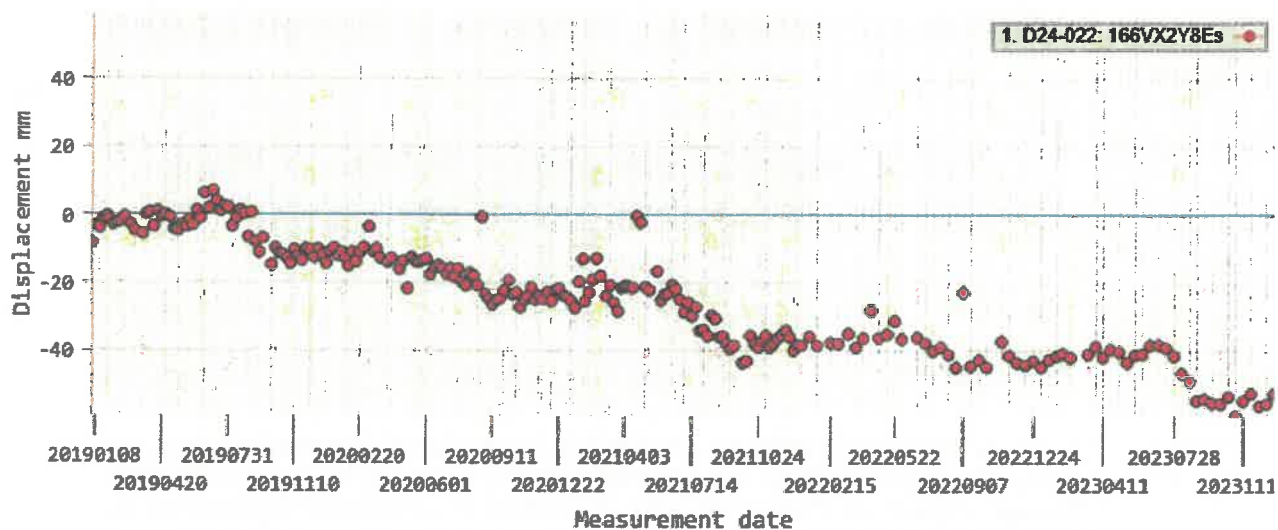
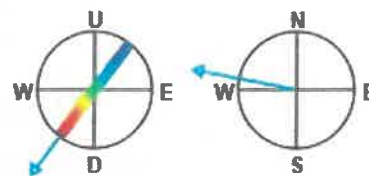
Incidence angle: 37.12°
 Track angle: 190.92°



3. Case Addario : velocità media 10.60 mm/anno

Dataset: D24-022
Point ID: 166VX2Y8Es
Position: 2135943.75 N 4654420.50 E 241.00 m
Mean velocity: -10.60 mm/year
Coherence: 0.57
RMSE: 4.40 mm

Incidence angle: 37.16°
Track angle: 190.92°



3.2. INSTALLAZIONE DI MICRORETE DI STAZIONI SISMICHE

Relazione tecnica inerente le attività di caratterizzazione del sottosuolo e monitoraggio sismologico presso il Comune di Lettomanoppello (PE)

a cura di S. Hailemikael, M. Vassallo, G. Di Giulio e G. Milana -
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma1

Premessa

In ottemperanza all' "Accordo di collaborazione per attività scientifiche finalizzate allo studio del territorio comunale di Lettomanoppello (PE) interessato da fenomeni di natura franosa" stipulato tra L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, rappresentato dal Presidente Prof. Carlo Doglioni, ed il Comune di Lettomanoppello, rappresentato dal Geom. Paolo Blasoli, si presentano i risultati delle attività previste al punto 2 dell'articolo 3 del suddetto accordo.

Ci si riferisce in particolare all'installazione ed all'analisi dati della microrete di stazioni sismiche installate nell'abitato di Lettomanoppello e finalizzate allo studio dei fenomeni franosi.

Gli obiettivi del monitoraggio sismico attuato si possono sintetizzare nei seguenti punti:

- verifica dell'influenza del corpo di frana, che interessa gran parte dell'abitato di Lettomanoppello, sullo scuotimento sismico;
- individuare possibili effetti di amplificazione del moto legati alla presenza del corpo di frana;
- verificare la stabilità nel tempo di tali fenomeni di amplificazione.

Il raggiungimento degli obiettivi prefissati si è perseguito tramite l'installazione di 6 stazioni sismiche installate nel territorio comunale ed ubicate in siti caratterizzati da differenti condizioni geologiche in termini sia di caratteristiche dei depositi affioranti che in termini delle loro geometrie.

SEZIONE ROMA 1 | Via di Vigna Murata, 605 | Roma 00143 | Italia | tel. +39.0651860426
| aoo.romal@pec.mgv.it | www.ingv.it



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA



Le stazioni sono state operative per un lungo periodo di tempo (Gennaio 2023 - Settembre 2023) al fine di ottenere un "record" significativo di dati di rumore sismico ambientale, registrando contestualmente eventuali eventi sismici (sia locali che regionali) occorsi durante l'esperimento. La durata della finestra di osservazione è un elemento essenziale per poter verificare la stabilità degli effetti di amplificazione del moto sismico o la loro variazione nel tempo legata alle caratteristiche geotecniche dei terreni che costituiscono il corpo di frana.

Inquadramento

L'area investigata è localizzata al bordo pedemontano NW del massiccio della Maiella, caratterizzata da una topografia piuttosto articolata, con quote comprese tra 300 e circa 500 m s.l.m.. Il sito occupa un versante degradante verso il settore di pianura periadriatica a Nord e bordata ad W dal corso del fiume Lavino. I depositi più antichi affioranti nell'area sono costituiti dal membro calcarenitico della Formazione di Bolognano (Messiniano), che può essere considerato il substrato geologico in questo settore (aree nocciola in Fig. 1), e dai gessi della Formazione Gessoso Solifera (Messiniano medio), poggianti direttamente sulla formazione precedente. In prevalenza, l'area vede l'affioramento di depositi continentali attribuibili a materiale detritico di versante, con spessore variabile sino al massimo a 15 m, depositi eluvio-colluviali, di natura limoso-sabbiosa, ed alluvionali, localizzati nel fondovalle del fiume Lavino, deposti a partire dal Pleistocene superiore.

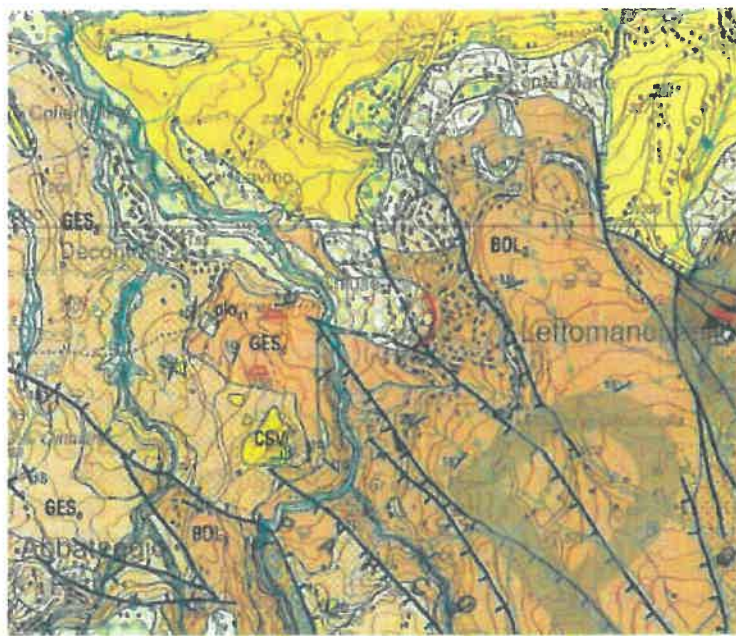
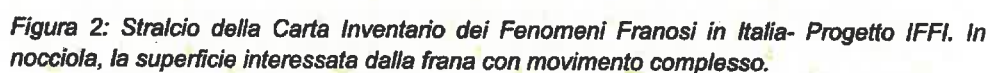


Figura 1: Stralcio Carta Geologica d'Italia scala 1:50000, Foglio 361 Chieti.

In particolare, l'area del centro storico del comune è caratterizzata dalla presenza di detriti calcarei eterometrici in matrice limosa con spessore di oltre 50 m, la cui origine è legata alla presenza di una frana quiescente. Questo fenomeno presenta un coronamento che corrisponde alla scarpata localizzata a monte del centro storico che rompe l'assetto monoclinale dell'intero versante della Maiella. Inoltre, dalla cartografia geologica di dettaglio disponibile per l'area (Relazione illustrativa studio di Microzonazione Sismica di I Livello del Comune di Lettomanoppello), si evince la presenza di un ulteriore fenomeno gravitativo attivo, caratterizzato da movimento di tipo roto-traslazionale, con coronamento localizzato a WNW del centro abitato, alla quota di circa 350 m s.l.m., che interessa gran parte del versante fino all'attuale corso del Lavino ad W, con spessore variabile da 10 a oltre 35 m. Questo fenomeno è censito nella cartografia tematica nazionale (Fig. 2). Lo studio di questi depositi sono oggetto della convenzione. Difatti, l'analisi dei dati SAR condotta dal Laboratorio GeoSAR dell'INGV ha evidenziato pattern di scivolamento del volume in frana in direzione SE-NW, con velocità massime di spostamento fino a 10-15 mm/anno nei pressi di Via Valle, Via Guglielmo Marconi, Via Enrico Fermi e la parte iniziale di Corso Vittorio Emanuele, durante il periodo di osservazione considerato compreso tra Gennaio 2015 e Dicembre 2021.



Sono state installate 5 stazioni sismiche in diversi punti del comune di Lettomanoppello (PE) a partire da Gennaio 2023 (Tabella 1 e Figura 3). La disposizione delle stazioni di monitoraggio è stata pianificata considerando l'esigenza di poter acquisire dati sia all'interno del volume in frana (TB00, TB01 e TB10), sia all'esterno, a monte del coronamento (TB06) e a quote inferiori (TB08). Inoltre, l'installazione ha soddisfatto l'esigenza di dover disporre di un allacciamento alla rete elettrica per l'alimentazione continua delle stazioni sismiche, e la possibilità di accesso ai siti di misura per la verifica periodica del corretto funzionamento delle stazioni.

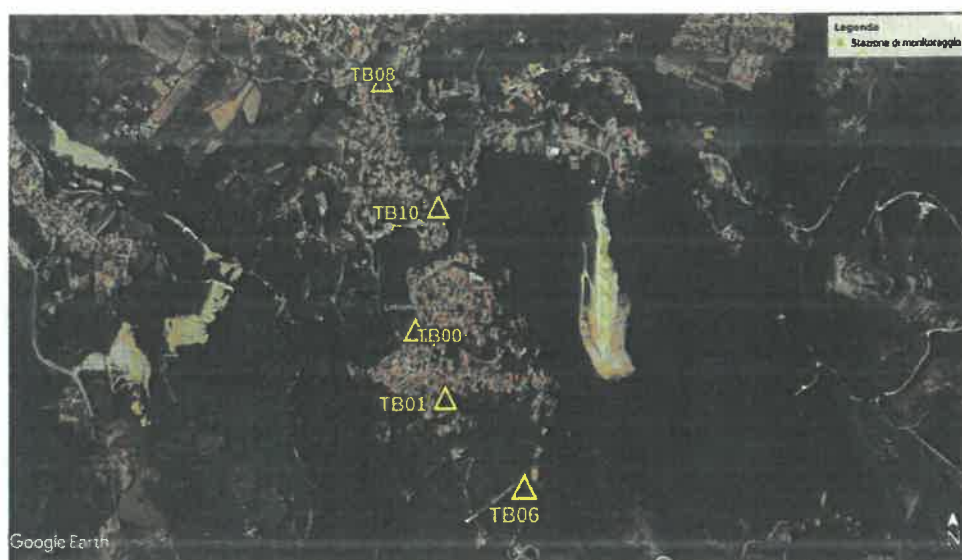


Figura 3: Immagine satellitare con ubicazione delle stazioni della microrete sismica (triangoli in giallo)

In ogni sito di misura è stata allocata una stazione sismica compatta Terrabot, prodotta dalla SARA Electronics. Ogni stazione è equipaggiata con sensore velocimetrico triassiale di tipo geofonico con frequenza propria a 4.5 Hz e con un acquisitore a 24 bit collegato ad un'antenna GPS per la temporizzazione accurata del dato registrato. Le stazioni sono state configurate per acquisire il dato sismologico in continua con frequenza di campionamento pari a 250 Hz. Le stazioni hanno funzionato dal 15 Gennaio 2023 all'11 Settembre 2023, con alcuni periodi di interruzione principalmente legati ad assenza di alimentazione della stazione per interruzione di corrente elettrica (Fig. 4).

Tabella 1: Localizzazione e operatività delle stazioni di monitoraggio

Cod. Stazione	Lat.	Long.	quota s.l.m.	periodo di operatività
TB00	42.237985°	14.037012°	351	15 gen - 11 set 2023
TB01	42.235834°	14.038493°	367	15 gen - 11 set 2023
TB06	42.233395°	14.042013	476	15 gen - 11 set 2023
TB08	42.246738°	14.035975°	295	15 gen - 11 set 2023
TB10	42.242189°	14.038500°	343	15 gen - 11 set 2023



Per valutare la qualità dei dati acquisiti alle diverse stazioni, sono state effettuate sia analisi spettrali condotte sui dati di rumore sismico ambientale sia analisi basate sul confronto dei segnali relativi a terremoti registrati alle stazioni della rete.

L'analisi spettrale è stata effettuata calcolando le curve di Power Spectral Density (PSD, Peterson, 1993) su intervalli di un'ora, utilizzando una finestra mobile semi-sovrapposta al 50%. I risultati ottenuti dalle diverse curve sono poi stati analizzati statisticamente per ricavare la probabilità di occorrenza di un fissato livello di noise ad una frequenza fissata (PPSD, McNamara & Buland, 2004) per i diversi mesi di acquisizione. In Figura 5 viene mostrato il risultato ottenuto dall'analisi statistica per il mese di Aprile 2023. Dalla figura si può notare come, per tutte le stazioni, a partire da periodi maggiori di 5 s (frequenze minori di 0.2 Hz) la massima probabilità di occorrenza aumenta linearmente con il periodo. Questo è imputabile al tipo di strumento utilizzato (velocimetro *short-period*) che non è in grado di registrare vibrazioni ambientali di piccole ampiezza caratterizzate da periodi troppo elevati. Il periodo di 5 s (frequenza di 0.2 Hz) viene quindi preso come limite strumentale per questo tipo di analisi, considerando come attendibili solo i risultati relativi a periodi minori di 5 s (ovvero frequenze maggiori di 0.2 Hz).

In Figura 5 le probabilità di occorrenza dei livelli di noise vengono comparate con i livelli di New Low Noise Model (NLNM) e New High Noise Model (NHNM, curve grigie) che rappresentano i livelli limite di riferimento (basso ed elevato, rispettivamente) per stazioni sismiche permanenti (Peterson, 1993). Per periodi inferiori a 1 s (frequenze superiori a 1 Hz) i livelli di noise più probabili sono elevati, mediamente prossimi (e in alcuni range di periodo, superano) il livello di NHNM. Questo accade per quasi tutte le stazioni della rete, tranne che per la TB06 i cui livelli di noise più probabili sono circa 5-10 db inferiori delle altre stazioni per periodi minori di 1 s (frequenze superiori di 1 Hz). I siti di misura sono rumorosi in quanto posizionati in area urbana in cui il rumore sismico di natura antropica è elevato ed è composto da segnali caratterizzati da frequenze elevate, superiori a 1 Hz (Peterson, 1993; McNamara & Buland, 2004). La stazione TB06 è meno rumorosa in quanto si posiziona in un'area meno urbanizzata del paese, dove il rumore antropico è quindi meno importante (vedi Fig. 3).

Per comprendere l'evoluzione temporale dei livelli di noise registrati, vengono riportate tutte le curve di PSD calcolate per il mese di Aprile 2023 rappresentate in modalità di spettrogramma (Fig. 6). La figura mostra chiare variazioni temporali che interessano sia la banda di periodi fra 0.01-1 s (frequenza compresa fra 1-100 Hz) che la banda 1-5 s (frequenza compresa fra 0.2-1 Hz). Nella banda di periodo 0.01-1 s le variazioni giornaliere vengono osservate alle diverse componenti delle stazioni della rete, caratterizzate da una chiara diminuzione dei livelli di noise nelle ore notturne. Nella banda 1-5 s, invece, le variazioni che si osservano hanno tempi caratteristici più lunghi, della durata di diversi giorni. Per enfatizzare maggiormente queste variazioni, abbiamo calcolato l'andamento nel tempo dei livelli di PSD mediati in tre differenti bande di periodo (frequenza): 0.07-0.14 s (curva blu in Figura 7); 0.7-1.4 s (curva arancione in Figura 7); 1.7-3.4 s (curva verde in Figura 7). Nella banda 0.07-0.14 s (frequenza nel range 7-14 Hz), i livelli di noise mostrano



un'accentuata variabilità giornaliera con livelli di noise maggiori di 10-30 db nelle ore diurne dei rispettivi livelli osservati nelle ore notturne. In questo range, il rumore è maggiore quando l'attività antropica è più importante (tra le 10 e le 15 UTC, circa) mentre i livelli di noise minimo vengono osservati intorno alla mezzanotte UTC, corrispondente alle 02 del mattino in ora locale. Nelle due bande 0.7-1.4 s e 1.7-3.4 s, l'andamento delle variazioni temporali (curve arancioni e verdi di Figura 7) è simile e può essere ricondotto a sorgenti atmosferiche (come ad esempio l'intensità del vento) o al moto ondoso lungo le linee di costa, il cui effetto si trasmette anche a grandi distanze come già osservato in altri casi studio condotti in area appenninica (Vassallo et al., 2012).

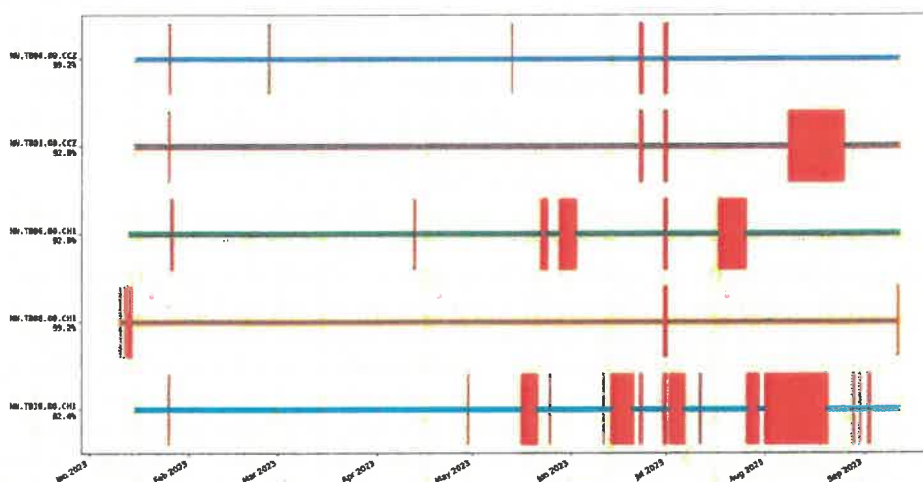


Figura 4: Periodo di acquisizione per ogni stazione sismica della microrete di monitoraggio con evidenziazione dei periodi di interruzione (linee rosse verticali e rettangoli rossi).

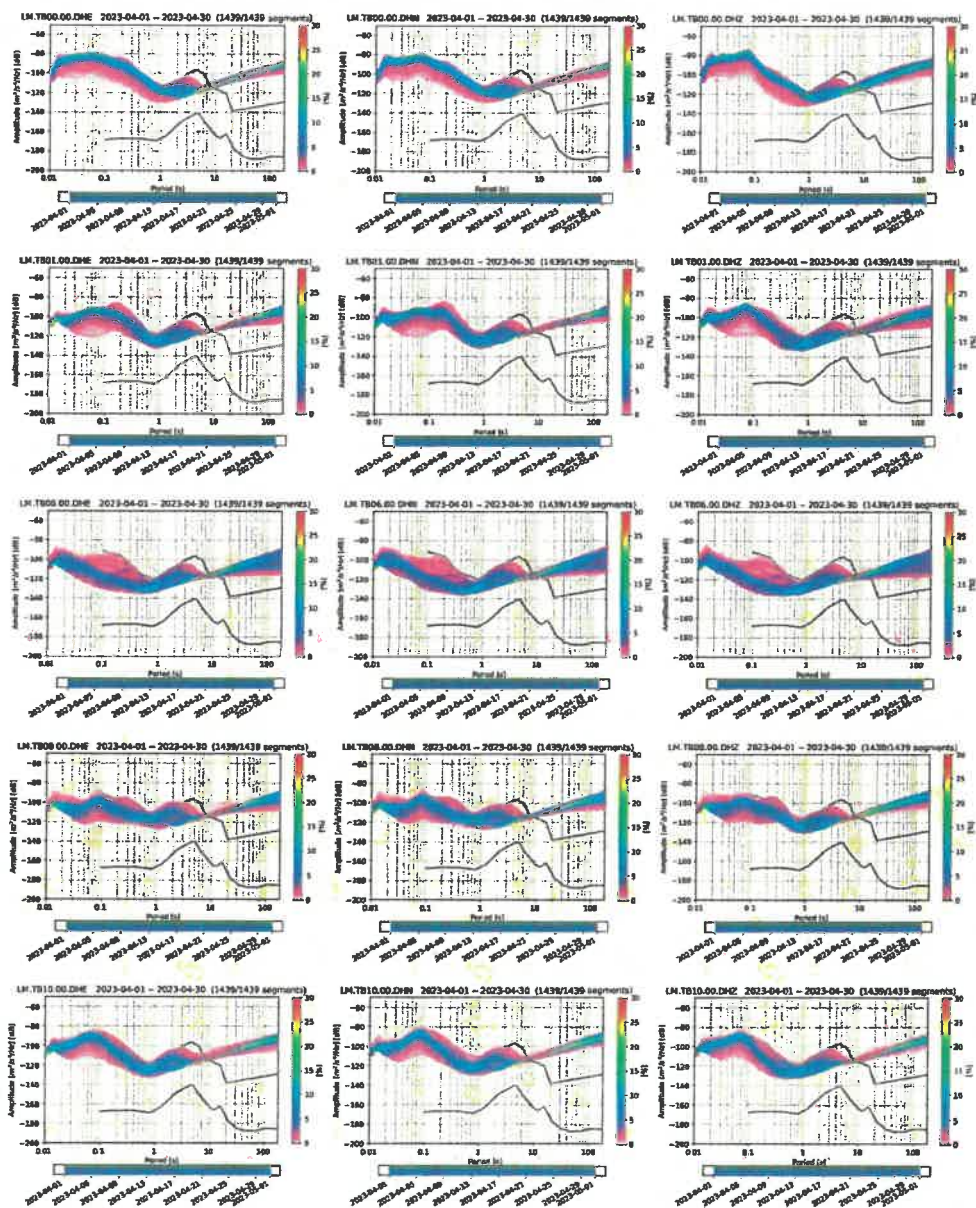




Figura 5: Probabilità di occorrenza di un determinato livello di Power Spectral Density (in scala di colore) in funzione della frequenza per ogni canale della microrete di monitoraggio sismico, calcolata per il periodo di Aprile 2023.

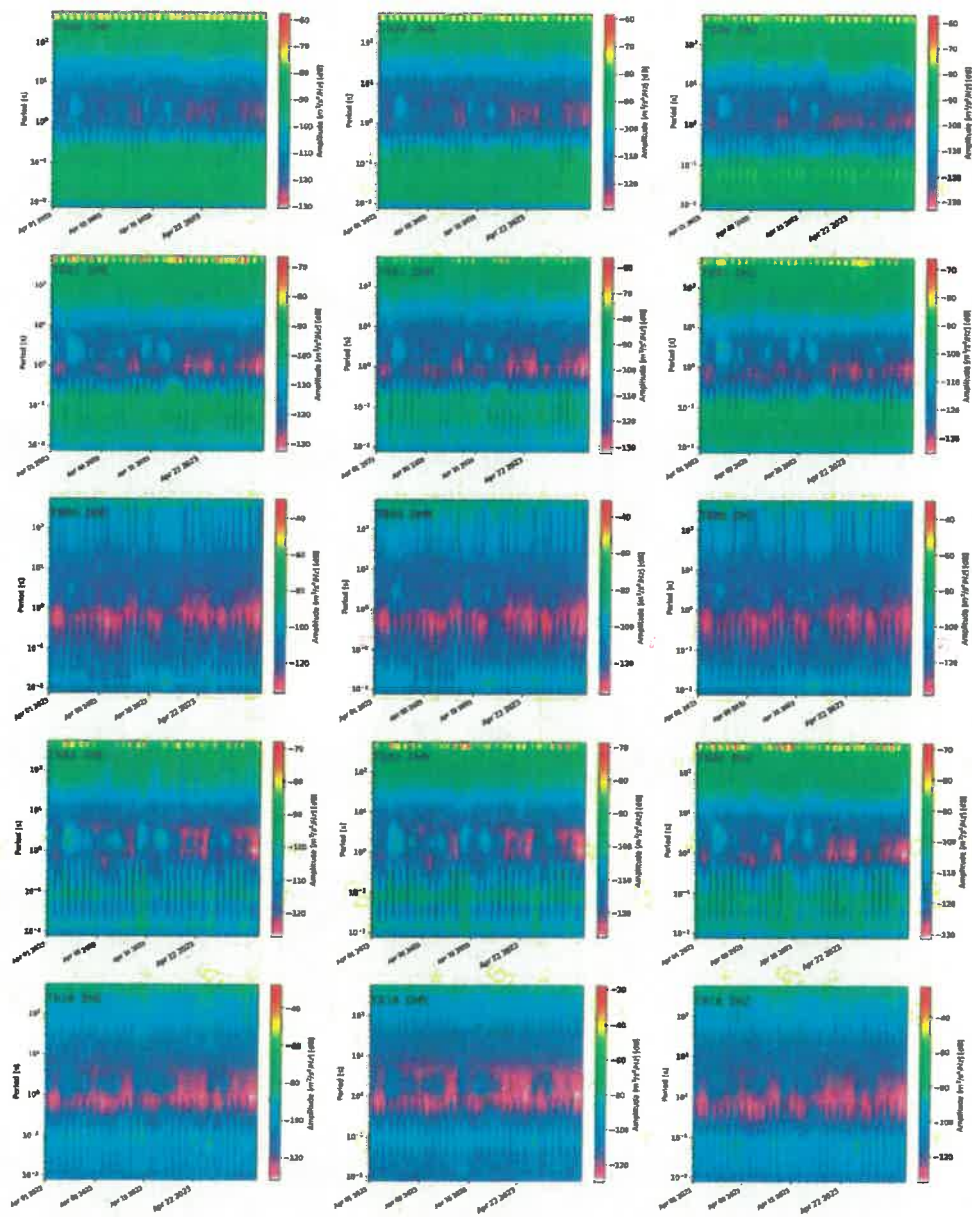


Figura 6: Livelli di Power Spectral Density (in scala di colore) in funzione della frequenza, in ordinata, calcolata per il periodo di Aprile 2023. Ogni grafico rappresenta un canale della



microrrete di monitoraggio sismico: componente E (colonna a sinistra), componente N (centro) e componente Z (destra), stazione TB00 (prima riga in alto), stazione TB01 (seconda riga), stazione TB06 (terza riga), stazione TB08 (quarta riga) e stazione TB10 (ultima riga).

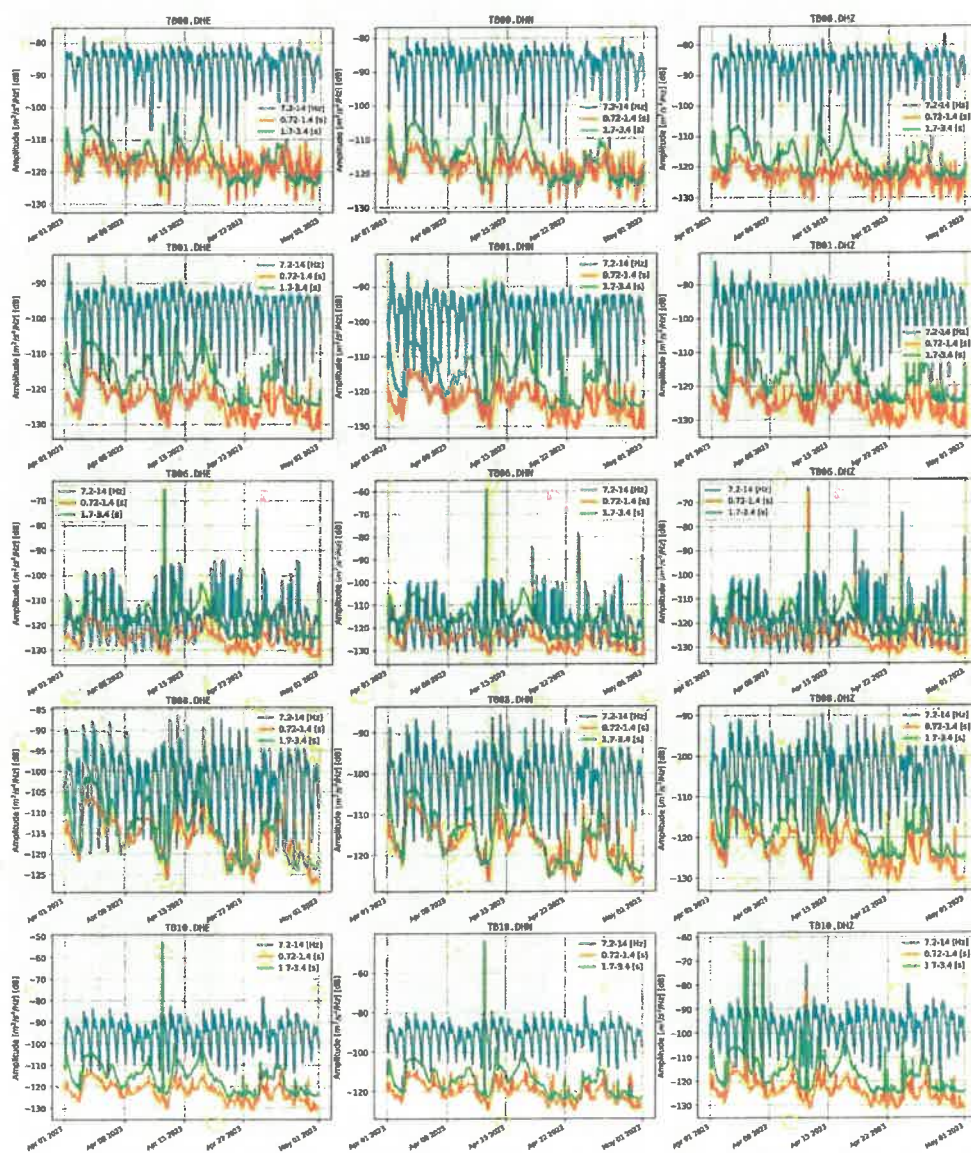




Figura 7: Andamento temporale dei livelli di Power Spectral Density mediati per intervalli di frequenza (curve colorate) nel periodo di Aprile 2023. Ogni grafico rappresenta un canale della microrete di monitoraggio sismico: componente E (colonna a sinistra), componente N (centro) e componente Z (destra), stazione TB00 (prima riga in alto), stazione TB01 (seconda riga), stazione TB06 (terza riga), stazione TB08 (quarta riga) e stazione TB10 (ultima riga).

Per valutare la qualità dei dati acquisiti in termini di sincronia temporale delle registrazioni, similitudine delle ampiezze e delle forme d'onda registrate alle diverse stazioni, abbiamo selezionato i sismogrammi registrati dalla rete per tre diversi terremoti, avvenuti a diversa distanza epicentrale dalla rete. Le caratteristiche principali dei tre terremoti sono riportate in Tabella 2. La figura 8 riporta le registrazioni dell'evento locale avvenuto a Palena (CH) il 2023-05-15 23:20:29, avente magnitudo ML pari a 2.1. Anche se la qualità dei segnali dipende dalle stazioni, si riesce a riconoscere chiaramente l'arrivo del treno d'onda associato alle fasi P ed S alle diverse stazioni. Le ampiezze registrate dalle componenti omologhe alle diverse stazioni sono fra di loro comparabili, con ampiezze maggiori osservate alle stazioni TB00, TB01, TB10 particolarmente evidenti sulle componenti orizzontali delle registrazioni e in corrispondenza delle fasi S. Di contro, la TB06 mostra ampiezze relativamente inferiori rispetto alle componenti omologhe delle altre stazioni.

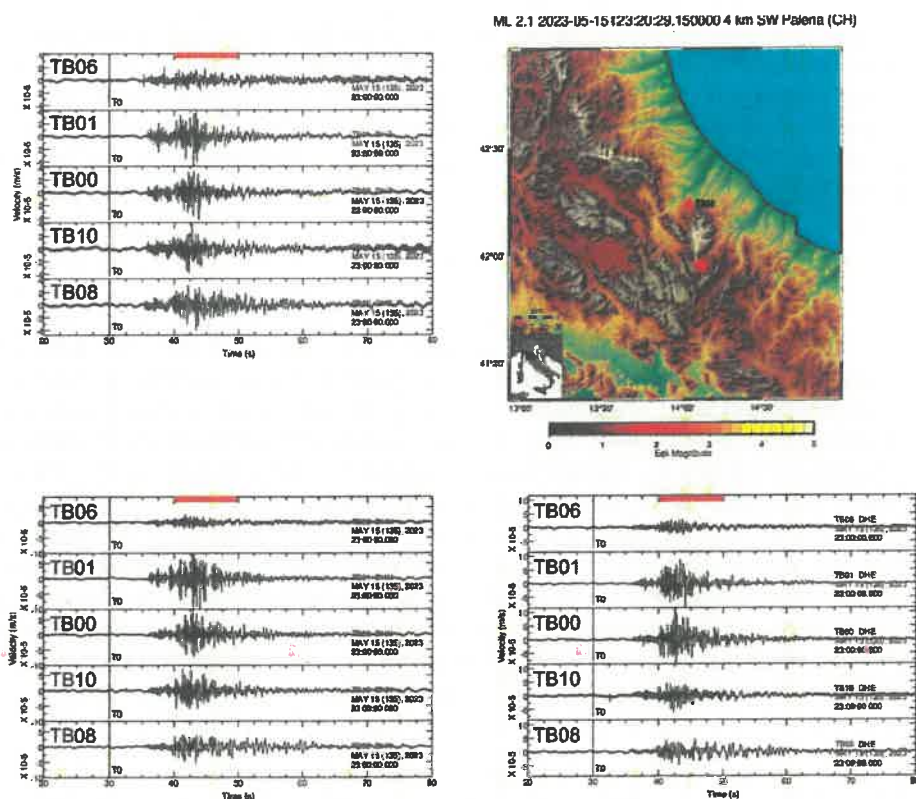


Figura 8: RegISTRAZIONI sismiche alle stazioni di Lettomanoppello del terremoto del 2023-05-15 23:20:29.15 UTC, ML 2.1 con epicentro a 4 km da Palena (CH). La mappa in alto a destra mostra la posizione dell'epicentro del terremoto (stella rossa) e delle stazioni sismiche della rete (triangoli rossi). I sismogrammi nel riquadro in alto a sinistra sono relativi alle componenti verticali delle registrazioni sismiche alle diverse stazioni. In basso a sinistra la componente N-S e in basso a destra la componente E-W. Le tracce, della durata di 60 s, sono ordinate in funzione della distanza epicentrale, in alto la stazione più prossima all'evento. La barra verticale (identificata con T0) indica il tempo origine del terremoto. Le registrazioni sono filtrate con un filtro Butterworth passa alto a 0.1 Hz.

Tabella 2: Informazioni sui terremoti selezionati

Tempo origine UTC	Lat. (°)	Lon. (°)	Prof. (km)	Magn.	Località	Distanz. da Lettomanoppello
2023-05-15T23:20:29.15	41.9537	14.1193	7.2	ML 2.1	4 km SW Palena (CH)	32 km



2023-03-28T21:52:45.07	41.6648	14.669	25.2	Mw 4.6	2 km N Montagano (CB)	82 km
2023-02-06T01:17:36.93	37.2023	37.0635	19.5	Mw 7.8	Turchia	2035 km

Mw 4.6 2023-03-28T21:52:45.070000 2 km N Montagano (CB)

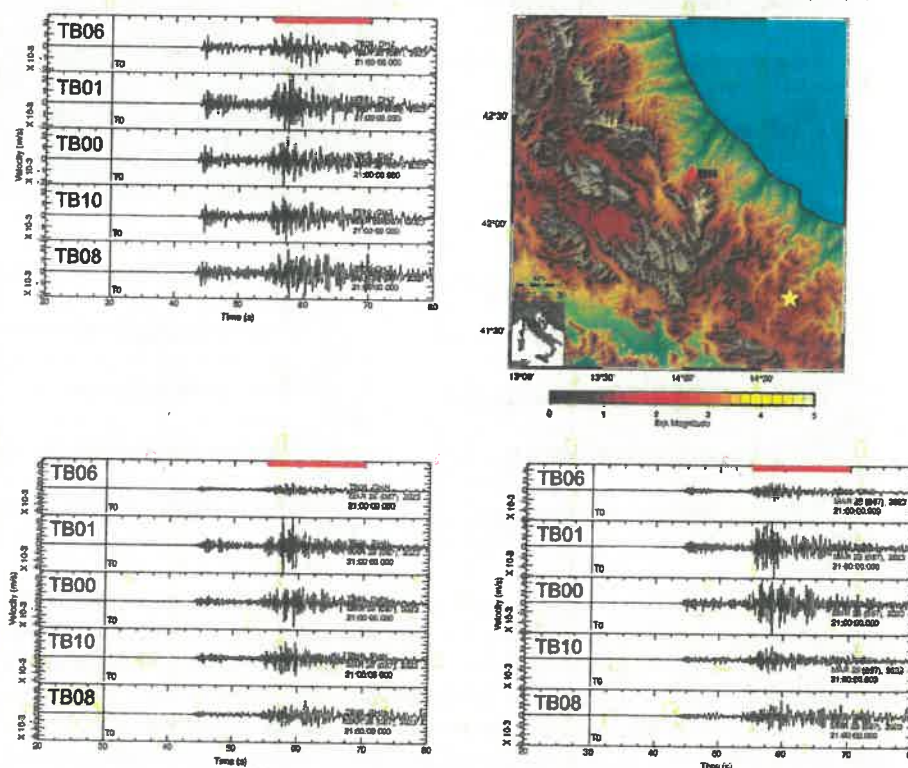


Figura 9: RegISTRAZIONI sismiche alle stazioni di Lettomanoppello del terremoto del 2023-03-28 21:52:45.07 UTC, ML 4.6 con epicentro a 2 km da Montagano (CB). La mappa in alto a destra mostra la posizione dell'epicentro del terremoto (stella gialla) e delle stazioni sismiche della rete (triangoli rossi). I sismogrammi nel riquadro in alto a sinistra mostrano le componenti verticali delle registrazioni sismiche alle diverse stazioni. In basso a sinistra la componente N-S e in basso a destra la componente E-W. Le tracce, della durata di 60 s, sono ordinate in funzione della distanza epicentrale, in alto la stazione più prossima all'evento. La barra verticale (identificata con T0) indica il tempo origine del terremoto. Le registrazioni sono filtrate con un filtro Butterworth passa alto a 0.1 Hz.



MW 7.9 2023-02-06T01:17:36.935000 Turkey earthq.

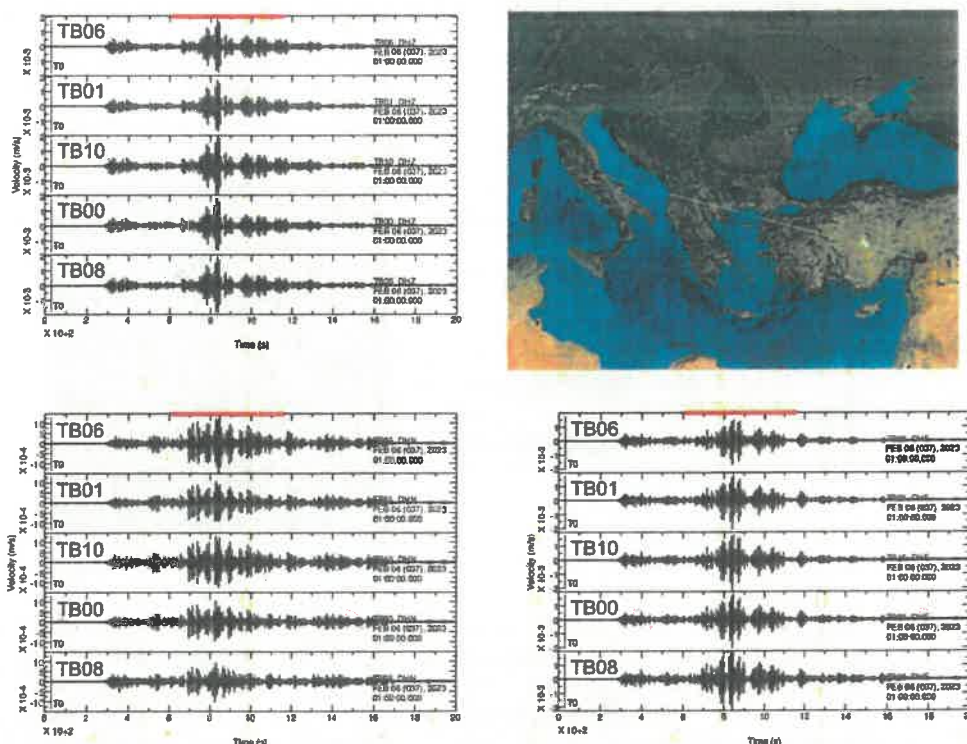


Figura 10: RegISTRAZIONI sismiche alle stazioni di Lettomanoppello del terremoto del 2023-02-06 01:17:36.935 UTC, MW 7.9 con epicentro nel distretto di Kahramanmaras (Turchia). La mappa in alto a destra mostra la posizione dell'epicentro del terremoto (circonferenza rossa) e del comune di Lettomanoppello (marker rosso). I sismogrammi nel riquadro in alto a sinistra mostrano le componenti verticali delle registrazioni sismiche alle diverse stazioni. In basso a sinistra la componente N-S e in basso a destra la componente E-W. Le tracce, della durata di 2000 s, sono ordinate in funzione della distanza epicentrale con in alto la stazione più prossima all'evento. La barra verticale (identificata con T0) indica il tempo origine del terremoto. Le registrazioni sono filtrate con un filtro Butterworth passa alto a 0.1 Hz.

Questo effetto di dipendenza delle ampiezze dalle stazioni, è probabilmente legato alla natura dei terreni. La TB06 si posiziona su terreni più competenti e meno soggetti a fenomeni di amplificazione sismica locale che invece sembrano essere rilevati per le stazioni TB00 TB01 e TB10. E' inoltre possibile notare una durata maggiore dell'evento nella registrazione della stazione TB08 in cui la coda (in Fig. 8 tra 45 e 60 s) ha una durata di circa 10-15 s



maggiore che nelle restanti stazioni, osservabile principalmente sulle componenti orizzontali delle registrazioni sismiche.

Anche per l'evento di Montagano (CB) del 2023-03-28T21:52:45.07, Mw 4.6 (Figura 9), le fasi P e S sono chiare e coerenti fra le diverse stazioni; le ampiezze alle diverse stazioni sono comparabili anche se le ampiezze registrate sono dipendenti dai diversi siti di misura. Anche in questa registrazioni la stazione TB06 è quella che ha registrato le ampiezze minori mentre ampiezze più importanti (più chiare sulle componenti orizzontali) si osservano per la TB00, la TB01 e la TB10, le cui differenze potrebbero essere spiegate dalla diversa natura dei terreni su cui le stazioni sono state installate. Anche per questo terremoto la stazione TB08 mostra una durata maggiore (particolarmente chiara sulle componenti orizzontali) con la coda dell'evento (tra 60 s e 80 s) più lunga di circa 15 s rispetto alle altre stazioni.

Le registrazioni relative al terremoto della Turchia (Figura 10) del 2023-02-06 01:17:36.935, Mw 7.9, mostrano delle fasi superficiali (fra 7000 e 1000 s) a bassa frequenza molto energetiche e coerenti alle diverse stazioni, sia in termini di ampiezza che di forma d'onda. Questo risultato è atteso a causa del contenuto in frequenza di questo tipo di registrazioni (eventi regionali) che si caratterizza di basse frequenze inferiori ad 1 Hz. L'arrivo dei diversi pacchetti d'onda (P, S e superficiali) che compongono queste registrazioni è sincrono alle diverse stazioni della rete.

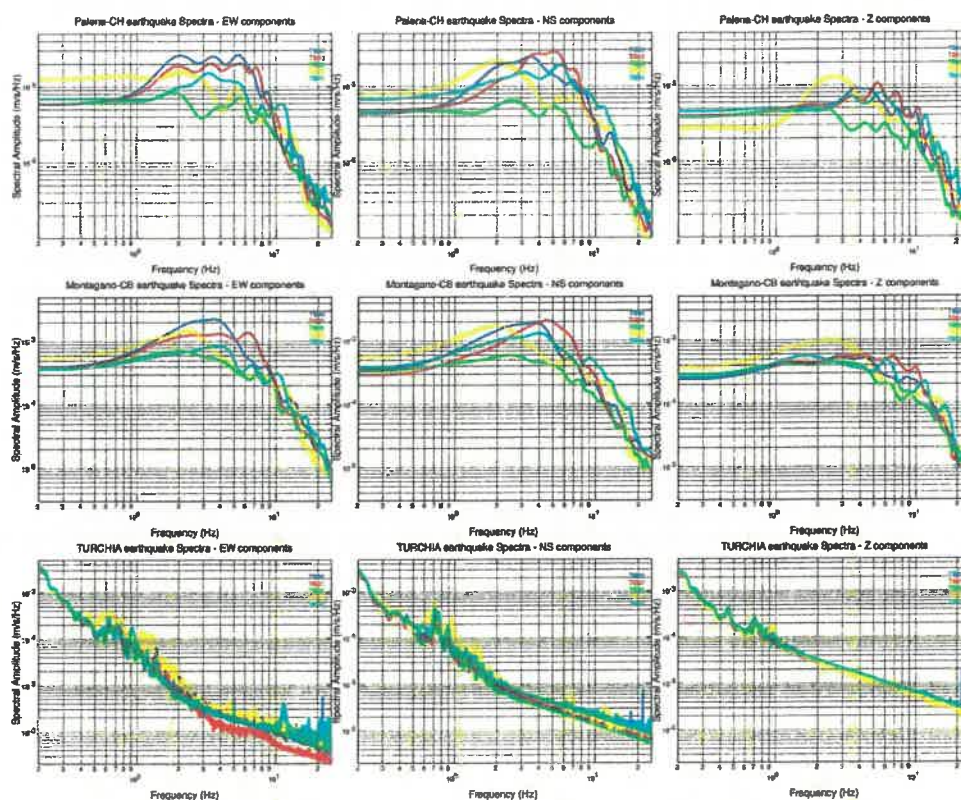


Figura 11. Spettri dei terremoti registrati a Lettomanoppello. In alto gli spettri si riferiscono al terremoto di Palena (CH) ML 2.1; al centro al terremoto di Montagano (CB) Mw 4.6 e in basso al Terremoto della Turchia, Mw 7.8. Nella colonna a sinistra vengono riportati gli spettri delle componenti Est-Ovest, al centro le componenti Nord-Sud e a destra le componenti verticali. I colori identificano le diverse stazioni: in blu la TB00; in rosso la TB01; in verde la TB06; giallo la TB08; in turchese la TB10.

Le amplificazioni per i terremoti locali (Palena e Montagano), dipendenti dal sito di misura, sono maggiormente evidenti negli spettri relativi ai tre terremoti riportati in figura 11. Gli spettri sono stati calcolati utilizzando la porzione di segnale mostrata dalla barra rossa riportata in alto nei sismogrammi di Figura 8, 9 e 10, rispettivamente. Per i terremoti di Palena (CH) e Montagano (CB), nell'intervallo di frequenza compreso fra 1 e 10 Hz, le ampiezze spettrali relative ai terremoti sono maggiori per le stazioni TB00, TB01 e TB10. Per gli stessi eventi sismici, la stazione TB08 mostra ampiezze spettrali più pronunciate fra 0.6



Hz e 4 Hz. Questi effetti sono più pronunciati sulle componenti orizzontali delle registrazioni. Per le diverse frequenze riportate nei plot (0.2-25 Hz), la stazione TB06 è quella che mostra ampiezze spettrali più contenute rispetto alle rimanenti stazioni, sia per le componenti orizzontali che per la componente verticale. Per il terremoto della Turchia, invece, gli spettri non presentano differenze significative fra le diverse stazioni.

Metodi

Allo scopo di determinare una stima robusta della distribuzione della frequenza fondamentale di risonanza (f_0) nell'area d'interesse a analizzare l'eventuale variazione di f_0 nel tempo, anche legata ad eventuali cambiamenti nelle condizioni di sottosuolo presso i siti d'installazione della microrete di monitoraggio, i dati acquisiti sono stati analizzati mediante la tecnica horizontal-to-vertical spectral ratio (HVSr). Il metodo consiste nell'acquisizione di registrazioni di rumore sismico con l'ausilio di un sismometro a 3 componenti e nel calcolo del rapporto tra la media dello spettro di Fourier (FAS) delle componenti orizzontali del moto e della verticale. Tale rapporto, di seguito indicato come HVSr, nei casi in cui il sito esaminato presenti un profilo di velocità verticale delle onde di taglio (V_s) con un marcato aumento di velocità, ovvero un marcato contrasto di impedenza sismica, generalmente mostra un picco la cui frequenza f_0 corrisponde alla frequenza di risonanza della funzione di trasferimento SH per il sito stesso e per cui è lecito attendersi una marcata amplificazione del moto in caso di evento sismico. Per ulteriori approfondimenti sul metodo HVSr si rimanda alla letteratura scientifica (Molnar et al. 2022; Lunedei and Malischewsky 2015; SESAME 2004).

Recentemente, lo sviluppo di software per l'analisi HVSr di dati sismologici acquisiti in continuo per lunghi periodi, da mesi ad anni, ha permesso di osservare variazioni significative del parametro f_0 sia regolari, con periodicità stagionale, sia irregolari ed improvvise, in corrispondenza di forti terremoti, verosimilmente legate ai cambiamenti nelle condizioni di sottosuolo al sito di misura, ed in particolare alla variazione di V_s (Vassallo et al 2022). Poiché una mobilitazione del volume in frana teoricamente dovrebbe comportare una variazione nelle proprietà del mezzo attraversato dal campo del rumore sismico, legato all'aumento della deformazione, in principio il monitoraggio HVSr in continuo potrebbe essere diagnostico del movimento.

In particolare, l'analisi è stata condotta uniformemente per ogni stazione attraverso suddivisione del segnale disponibile in finestre di 60 s, sottrazione della media e applicazione di un taper al bordo (finestra coseno al 5%). Per ogni finestra, il FAS orizzontale è stato calcolato come media quadratica delle componenti N ed E, ed il rapporto HVSr tra FAS orizzontale e FAS verticale è stato calcolato a sua volta dopo l'applicazione di un lisciamento mediante finestra del tipo Konno-Ohmachi (1998) ai FAS H e V.



Risultati

Per ciascuna stazione della microrete, i risultati ottenuti dall'analisi HVSR applicata all'intero periodo di osservazione sono riportati in termini di curve dell'ampiezza media globale HVSR e relativa incertezza (media ± 1 deviazione standard) in funzione della frequenza; media HVSR per finestre di osservazione di un'ora, variazione delle medie orarie HVSR nel tempo e media globale degli spettri FAS delle 3 componenti del moto e relativa incertezza (Figure da 12 a 16).

L'esame delle curve globali medie HVSR mostra come all'interno del corpo di frana si osservi un evidente picco di risonanza f_0 : centrato a circa 4.5 Hz (Fig. 12, sinistra) per la stazione TB00 e nell'intervallo 3-6 Hz per la stazione TB01 (Fig. 13, sinistra). Mentre per TB00 l'ampiezza media massima alla frequenza di risonanza si attesta a circa 3.5, nel caso di TB01 l'ampiezza media massima supera il valore 4.0. L'origine del picco di risonanza è verosimilmente legato alle caratteristiche del sottosuolo, laddove l'esame degli spettri FAS evidenzia un minimo dell'ampiezza FAS della componente verticale del moto ed un massimo FAS orizzontale in corrispondenza della frequenza di picco (Fig. 12 e 13, destra). In particolare, si ipotizza che la risonanza sia determinata dal contrasto d'impedenza sismica tra il materiale costituente il deposito di frana (di spessore massimo stimato in circa 50 m) e il substrato geologico indeformato.

Osservando l'andamento temporale della funzione HVSR, si evince una variazione legata al ciclo giornaliero, di debole entità, presente in tutte le stazioni esaminate, ed una debole variazione a partire dalla metà di giugno 2023 (Figg. 12 e 13, pannelli centrali): nel caso di TB00, la variazione si manifesta come una riduzione dell'ampiezza media HVSR nella banda di frequenza 2-9 Hz, mentre nel caso di TB01 si manifesta come un aumento dell'ampiezza media 2-7 Hz. A seguito dei sopralluoghi per la verifica dell'operatività della rete, nel periodo indicato è stato possibile osservare che le due stazioni sismiche in esame sono state spostate da personale non INGV per esigenze legate a movimentazioni logistiche nelle sedi di installazione, pertanto la significatività e la natura di tale variazione rimangono oggetto di ulteriori approfondimenti. Oltre a tali variazioni, se ne possono osservare altre di natura piuttosto irregolare a tutte le stazioni esaminate, verosimilmente legate ai cambiamenti temporali nella struttura del campo del rumore sismico, anche dovute alle attività antropiche presso gli edifici sede di installazione della strumentazione.

Anche nel caso dell'ulteriore stazione ubicata all'interno del corpo di frana, TB10, si osserva una curva globale media HVSR con chiari picchi di risonanza: uno a più bassa frequenza compreso tra 4-5 Hz, con ampiezza media pari a 3.5, congruente con le stime di f_0 osservate nei casi precedenti, ed uno a frequenza maggiore, compresa tra 8 e 9 Hz, con ampiezza media di circa 2.7 (Fig. 16, sinistra). Anche in questo caso, l'esame dei FAS (Fig. 16, destra) suggerisce l'ipotesi che il picco di risonanza a più bassa frequenza possa essere verosimilmente legato ad un contrasto d'impedenza sismica tra il corpo di frana ed il materiale del substrato geologico.



Nel caso delle stazioni poste all'esterno del perimetro di frana, TB06, a monte del coronamento, e TB08, al piede del versante, le curve medie globali HVSR mostrano un andamento sostanzialmente differente dai precedenti e differenti tra di loro. Per TB06, la funzione HVSR non mostra picchi chiari di risonanza e i valori medi non superano 1.7 nella banda di frequenza esaminata. Tale comportamento della funzione è compatibile con condizioni di sito corrispondenti al substrato indeformato (Fig. 14, sinistra). Nel caso della stazione TB08, la funzione HVSR mostra al contrario massimi in più bande di frequenza, tra circa 0.6 e 1 Hz e attorno a 1.5 Hz, con ampiezza media paragonabile, inferiore a 2.5 (Figura 15). Per il picco in bassa frequenza, l'osservazione dei FAS (Figura 15, destra) suggerisce l'ipotesi di un'origine stratigrafica del picco, che implicherebbe la presenza di un contrasto di V_s a profondità considerevoli nel sito in esame.

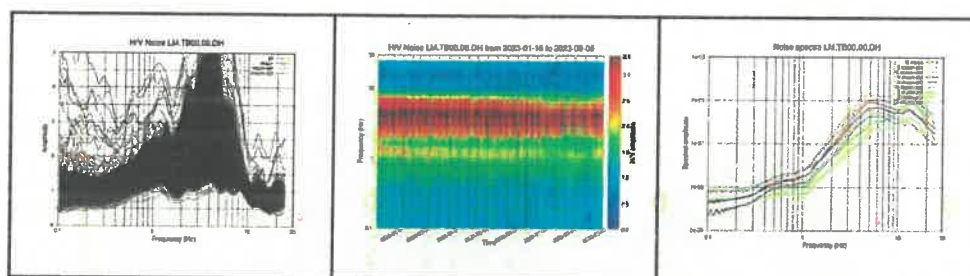


Figura 12: funzione HVSR calcolata per la stazione TB00 (pannello a sinistra). Andamento temporale della funzione HVSR (pannello centrale). FAS medio delle componenti orizzontali e verticale del moto registrato (pannello di destra).

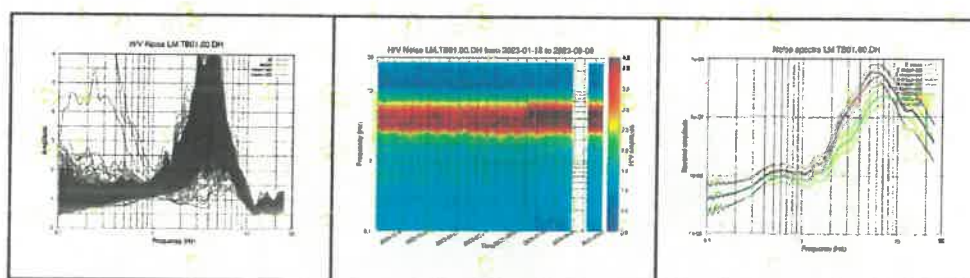


Figura 13: funzione HVSR calcolata per la stazione TB01 (pannello a sinistra). Andamento temporale della funzione HVSR (pannello centrale). FAS medio delle componenti orizzontali e verticale del moto registrato (pannello di destra).

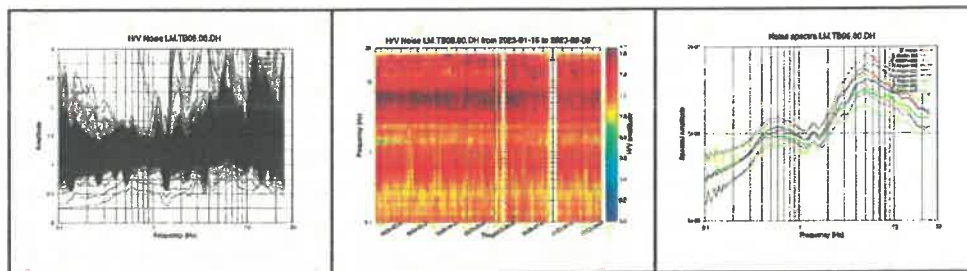


Figura 14: funzione HVSR calcolata per la stazione TB06 (pannello a sinistra). Andamento temporale della funzione HVSR (pannello centrale). FAS medio delle componenti orizzontali e verticale del moto registrato (pannello di destra).

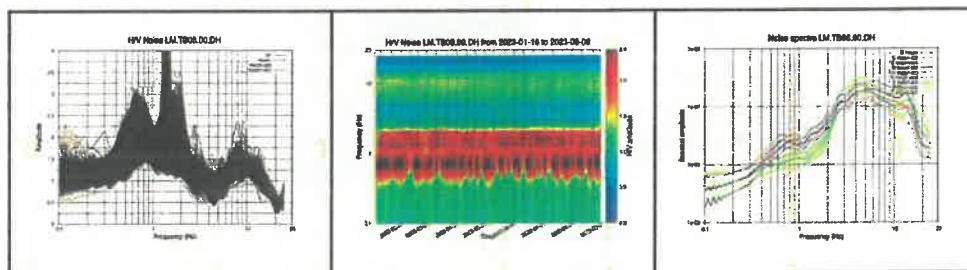


Figura 15: funzione HVSR calcolata per la stazione TB08 (pannello a sinistra). Andamento temporale della funzione HVSR (pannello centrale). FAS medio delle componenti orizzontali e verticale del moto registrato (pannello di destra).

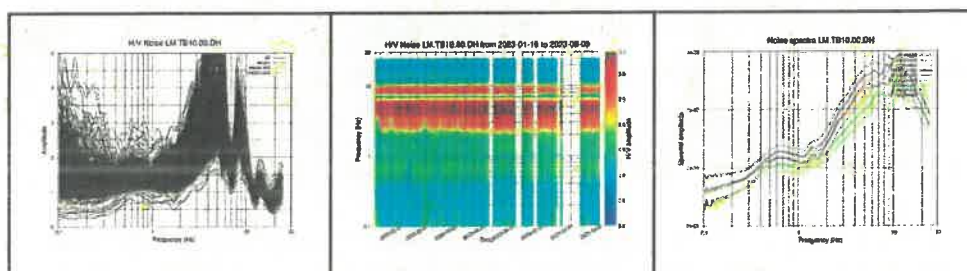


Figura 16: funzione HVSR calcolata per la stazione TB10 (pannello a sinistra). Andamento temporale della funzione HVSR (pannello centrale). FAS medio delle componenti orizzontali e verticale del moto registrato (pannello di destra).



Considerazioni conclusive

A meno di brevi periodi di mancata registrazione dovute ad interruzioni dell'energia elettrica, le stazioni della rete di Lettomanoppello hanno funzionato con continuità fra Gennaio e Settembre 2023. L'analisi spettrale, condotta sui dati sismici registrati in continua, ha enfatizzato la presenza di livelli rumore sismico ambientale elevati principalmente riconducibili all'attività antropica presente nelle aree di misura. Questo era un risultato atteso poiché legato alla necessità di posizionare le stazioni nell'area in frana che interessa la zona urbana del comune, dove però le vibrazioni sismiche di natura antropica sono più importanti. In generale, gli studi sismologici condotti in città e in ambienti urbanizzati, sono particolarmente complicati anche a causa della importante componente antropica di rumore sismico registrato. Per questo motivo, in questi contesti diventa importante avere finestre lunghe di registrazione sismologica, con dati acquisiti in modalità continua, come è stato fatto nel caso di Lettomanoppello. L'analisi massiva di tutti i dati registrati permette infatti di evidenziare (ed eventualmente rimuovere) gli effetti legati all'attività umana nei risultati ottenuti.

L'analisi HVSR dei dati acquisiti nel periodo gennaio-settembre 2023 dalla microrete di monitoraggio sismologico di Lettomanoppello, operata da INGV-Roma1, ha evidenziato la presenza di chiari picchi di risonanza del sottosuolo in una banda di frequenza piuttosto ristretta, compresa tra circa 4 e 5 Hz, entro il perimetro del corpo di frana. Le caratteristiche delle funzioni HVSR all'interno e all'esterno di quest'ultimo si differenziano in maniera evidente, laddove a monte dell'abitato si osserva una curva HVSR sostanzialmente piatta, priva di picchi di risonanza. Mentre nel settore pedecollinare le frequenze di risonanza evidenziate dall'analisi sono distribuite in bande a frequenza inferiore da quella caratteristica della zona di frana.

Inoltre, l'analisi preliminare degli eventi sismici registrati dalla rete mostra, sia per gli eventi locali sia regionali, un'effettiva capacità di detezione degli eventi da parte della rete e una significativa differenza nei livelli di scuotimento registrati alle singole stazioni, con livelli di scuotimento orizzontale maggiori per le stazioni ubicate nel volume di frana e in zona pedecollinare rispetto al settore a monte dell'abitato.

Nell'insieme, tali evidenze supportano l'ipotesi che la presenza del materiale in frana possa costituire un volume caratterizzato da V_s inferiori rispetto a quelle del materiale del substrato geologico sottostante; pertanto, tale volume potrebbe essere caratterizzato mediante un'analisi tomografica applicata al rumore sismico registrato da una densa rete di decine di sismometri opportunamente collocati nell'area d'interesse. Inoltre, in aggiunta all'analisi tomografica da rumore sismico, nel caso di un programma di monitoraggio di medio-lungo periodo, si potrebbe affiancare un'analisi orientata alla valutazione di eventuali variazioni nel tempo della velocità di propagazione del mezzo investigato, che la teoria associa a variazioni nella deformazione del materiale.



Bibliografia

Ciccone G. Microzonazione Sismica di I livello del Comune di Lettomanoppello (PE) - Relazione illustrativa.

Konno K, Ohmachi T (1998) Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bull Seis Soc Am* 88(1):228–241

Lunedei E, Malischewsky P (2015). A review and some new issues on the theory of the H/V technique for ambient vibrations. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering* 39:371–394.

McNamara, D. E. & Buland, R. P. (2004). Ambient Noise Levels in the Continental United States. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2004; 94 (4): 1517–1527. doi: <https://doi.org/10.1785/012003001>

Molnar S, Sirohey A, Assaf J, Bard P-Y, Castellaro S, Cornou C, Cox B, Guillier B, Hassani B, Kawase H, Matsushima S, Sánchez-Sesma F-J, Yong A (2022). A review of the microtremor horizontal-to-vertical spectral ratio (MHVSR) method. *J Seismol* 26:653–685. <https://doi.org/10.1007/s10950-021-10062-9>

Peterson, J. (1993). Observations and Modeling of Seismic Background Noise. U.S.G.S, Open File Report, 93-322, 95 p.

SESAME Project (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. http://sesame-fp5.obs.jif-grenoble.fr/Papers/HV_User_Guidelines.pdf

Vassallo M., Festa G., Bobbio A. (2012). Seismic Ambient Noise Analysis in Southern Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*; 102 (2): 574–586. doi: <https://doi.org/10.1785/0120110018>

Vassallo M, Cultrera G, Di Giulio G, Cara F, Milana G (2022). Peak Frequency Changes From HV Spectral Ratios in Central Italy: Effects of Strong Motions and Seasonality Over 12 Years of Observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127, e2021JB023848. <https://doi.org/10.1029/2021JB023848>

3.3. MONITORAGGIO RETE GPS MONOFREQUENZA

Il sistema di monitoraggio mediante il sistema GPS/GNSS è costituito da n.6 stazioni.

L'apparato hardware utilizzato è stato installato in modo da garantire la condizione di totale funzionalità e raggiungibilità tramite un Sistema di Comunicazione da remoto che oltre a fornire informazioni sullo stato di funzionamento della stazione, gestisce in modo programmato e sistematico l'acquisizione dei dati come da progetto.

L'apparato installato permette di monitorare gli spostamenti in concomitanza degli elementi critici individuati in loco sull'area interessata.

La rete di monitoraggio è così concepita con il fine di rilevare dati GNSS in modo automatico, con trasmissione in remoto via FTP su server dedicati in modo da fornire le grandezze utili alla previsione e/o al controllo dei fenomeni franosi innanzi richiamati.

L'apparato hardware utilizzato è stato installato in modo da garantire la condizione di totale funzionalità e sarà raggiungibili tramite un Sistema di Comunicazione da remoto che oltre a fornire informazioni sullo stato di funzionamento della stazione, gestisce in modo programmato e sistematico l'acquisizione dei dati come da progetto.

Il Ricevitore modulare GNSS MR-2 costituisce una soluzione di stazione GNSS modulare versatile e resistente. È costruito per ambienti difficili, offrendo protezione IP67 di polvere e acqua nonché un livello superiore di tolleranza alle vibrazioni e agli urti Utilizzando la tecnologia Topcon Quartz Lock Loop (spec MIL).

Le interfacce di comunicazione flessibile semplificano e rendono il ricevitore predisposto per l'integrazione in una miriade di applicazioni.

Il monitoraggio di tutti i segnali disponibili da tutte le costellazioni è reso possibile dalla tecnologia brevettata di Topcon per la *Universal Tracking Channel*.

La tecnologia Universal Channel Tracking Channels (UTC) consente ad ogni singolo ricevitore di ricevere qualsiasi segnale in ingresso GNSS. Questo è un metodo molto più efficace per affrontare il problema e, rispetto agli altri dispositivi produttori, consente la ricezione di segnali satellitari fino al 60% in più con lo stesso numero di canali.



Foto: Ricevitore GNSS

La PS-G1 è l'antenna doppia frequenza GPS+GLONASS+GALILEO altamente precisa grazie all'elevata stabilità de suo centro di fase calcolato con le nuove tecnologie di micro-centramento.

Il piatto metallico integrato aiuta ad eliminare gli errori causati dal multipath.

- Segnali ricevibili: L1, L2, L2C, GPS+GLONASS+GALILEO, WAAS/EGNOS
- Peso: 492 gr
- Dimensione: 14 x 14 x 5cm
- Guadagno segnale: 30±2 dB
- Impermeabilizzazione: waterproof
- Temperatura operativa: -40°C +55°C

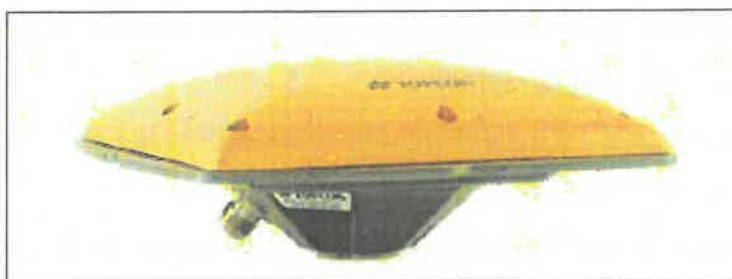


Foto : Antenna PS-G1

Il sistema è capace di acquisire, memorizzare ed archiviare automaticamente i dati che poi, mediante collegamenti in remoto, vengono inviati a un server centrale che si occupa della loro validazione e processamento, integrandoli nel suo database.

Attraverso un'applicazione ed un collegamento web, i dati saranno messi a disposizione, sia in formato grafico che in formato tabulare (.xlsx). In questo modo il sistema sarà totalmente automatico e permetterà ottenere dati aggiornati in tempo reale 24h/365 giorni all'anno.

I grafici sono totalmente dinamici e configurabili dall'utente (colore, spessore e caratteristiche grafiche delle curve), si possono scaricare file xlsx e visualizzare lo stato degli strumenti mediante tavole (o mappe) interattive.

Oltre al software OFFICE collegato direttamente alla total station che effettuerà il calcolo e l'acquisizione programmata, sarà possibile intervenire direttamente su ogni singolo ricevitore da REMOTO o in loco tramite software dedicato TRU

La struttura dell'applicazione si divide in varie sezioni:

- Sezione con documentazione di progetto (architettura de sistema di monitoraggio, mappe con la posizione degli Strumenti, spostamenti relative NEZ con sezione dinamica con grafici;
- Sezione con grafici degli spostamenti, dove si può vedere un piano o una sezione interattiva, che comprende tutti gli strumenti con i simboli dedicati.

I diagrammi consentono la visualizzazione delle misure su ogni singolo punto dei vari strumenti in un solo grafico. L'utente può decidere quali strumenti visualizzare, selezionandoli nella lista completa di tutta la strumentazione installata. Si possono in oltre, confrontare diversi strumenti con unità di misura differenti, utilizzando i 3 assi disponibili.

Per ogni punto è possibile visualizzare il diagramma dei Delta N E Z nonché il dato grezzo acquisito degli angoli e delle distanze opportunamente individuate e riportate su schema tabellare e grafico.

In qualsiasi momento è possibile scaricare in formato .xlsx dati "grezzi" e dati "processati" che possono essere sistematicamente prodotti e inviati automaticamente con percorso programmato. Il dato può anche essere esportato in formato .SQL.

La gestione degli allarmi comprende:

- Cambio di stato dello strumento e/o dei punti (report visivo di allarme. etc)
- Visualizzazione dei livelli di allarme nei grafici
- Report di riassunto della strumentazione in allarme
- Invio di Mail e/o sms

- Collegamento e avvio dell'allarme con attivazione tramite relè ad un dispositivo automatico di segnalazione e/o avvertimento (es. lampeggiante, semaforo, sbarra, ecc.)
- Programmazione degli indici di allarme previsti e personalizzabili



Figura 8: Ubicazione stazioni GNSS su CTR 5.000

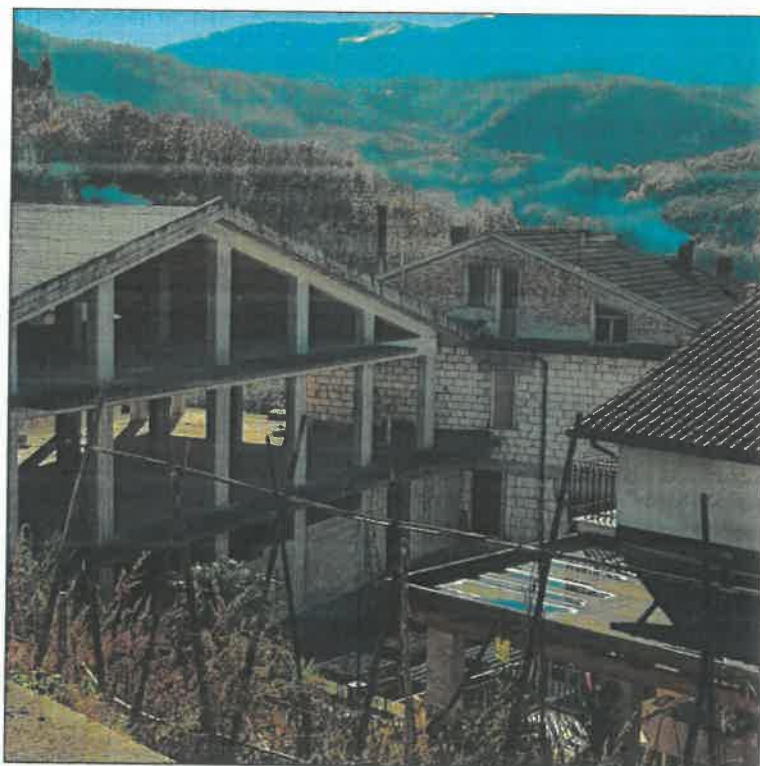


Foto : Installazione Ricevitore GPS n.3



Foto : Installazione Ricevitore GPS n.4



Foto : Installazione Ricevitore GPS n.5

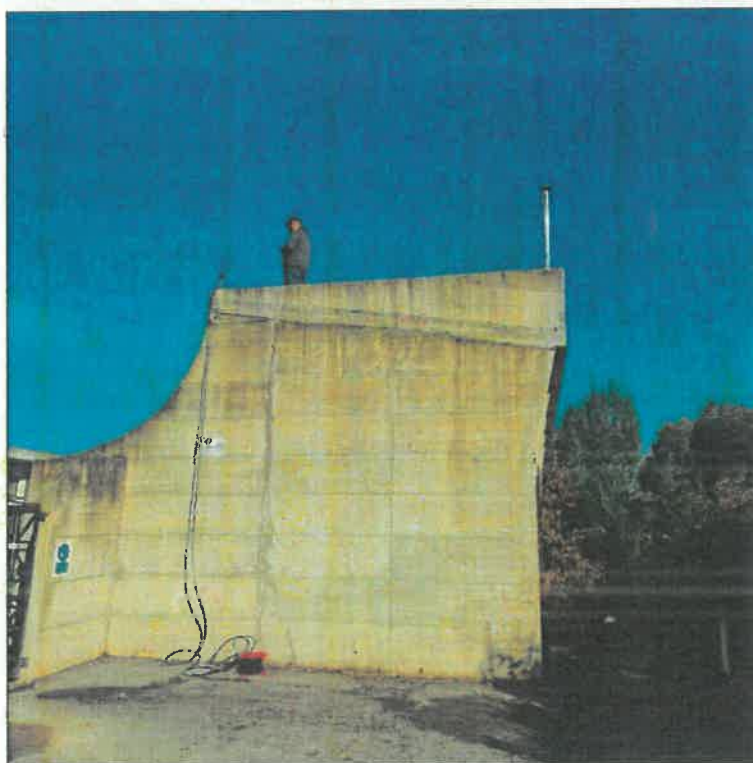
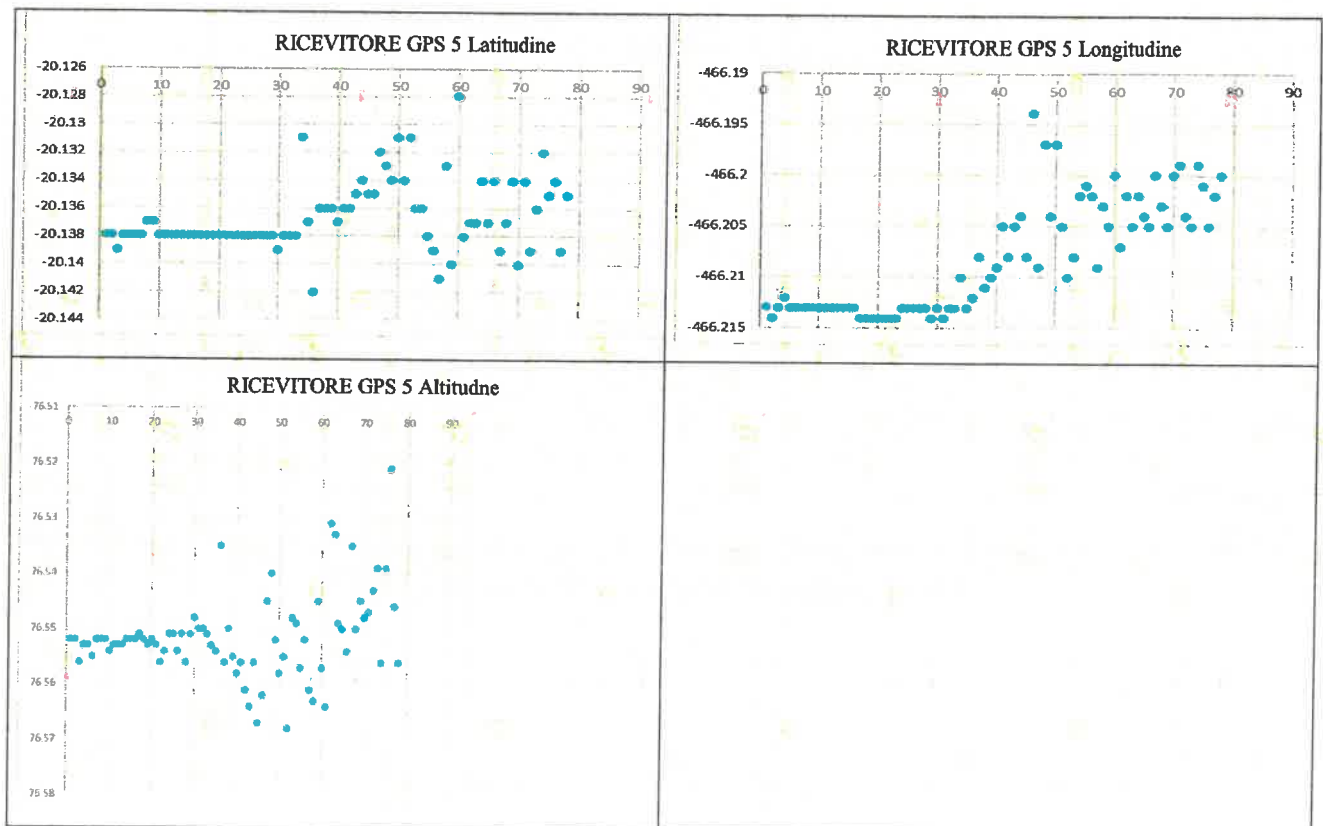
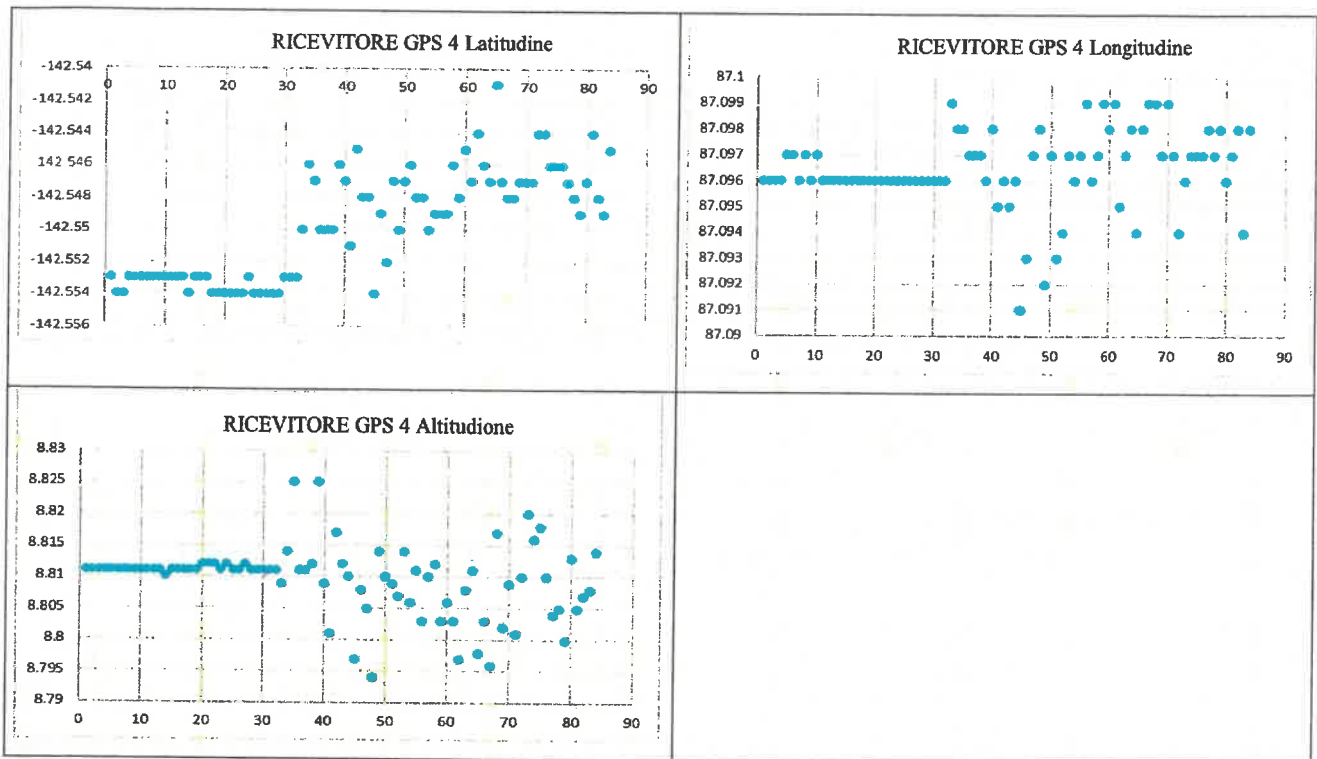
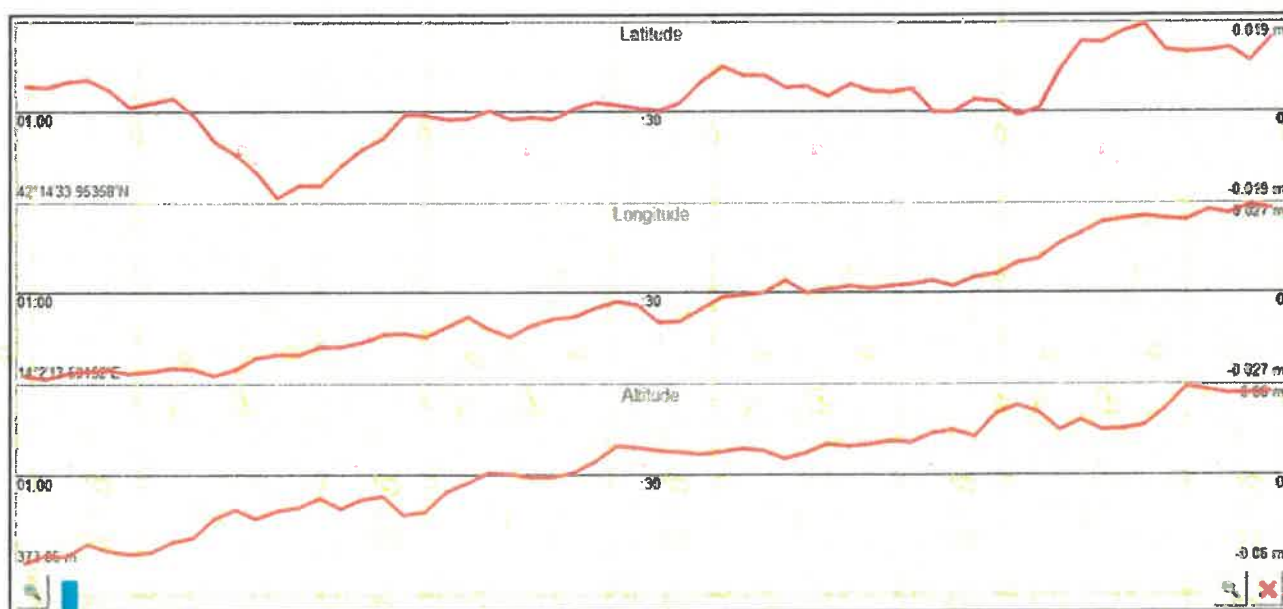
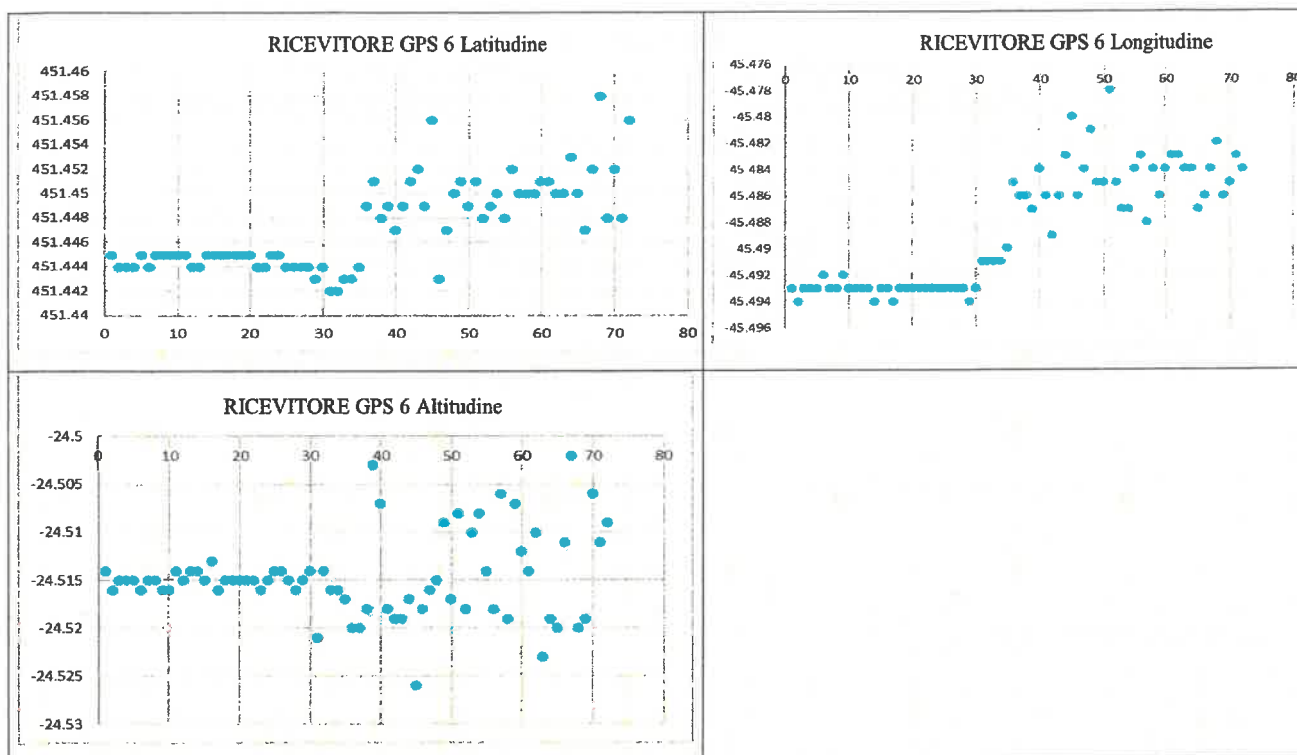


Foto : Installazione Ricevitore GPS n.6

RISULTATI





Monitoraggio in tempo reale Ricevitore GPS 3

3.4. MONITORAGGIO INCLINOMETRI

Il monitoraggio inclinometrico è stato eseguito mediante sistema inclinometrico B.R.A.IN (Borehole Readout Array for INclinometers) della Sisgeo, composto da una APP di gestione del sistema compatibile con dispositivi Android e Apple, un cavo graduato montato su rullo Bluetooth e una sonda inclinometrica biassiale MEMS. L'elettronica di comunicazione con la sonda è incorporata nel rullo e il protocollo Bluetooth BLE (Bluetooth Low Energy) permette la comunicazione con il dispositivo (cellulare o tablet) in modo sicuro, veloce e con un consumo di batterie ridotto. La APP B.R.A.IN, intuitiva e facile da utilizzare, permette all'utente di gestire le misure inclinometriche e spiralometriche, salvarne i dati sulla memoria del dispositivo o su un cloud, e di condividerli immediatamente attraverso alcune delle più popolari APP installate sul dispositivo stesso (ad esempio Dropbox, Whatsapp, Google DRIVE, OneDrive, iCloud Drive ecc...)



B.R.A.IN APP[®]



**RULLO BLUETOOTH CON
CAVO DI MISURA LIGHT
BLUETOOTH REEL
WITH LIGHT CONTROL CABLE**



**SONDA INCLINOMETRICA
INCLINOMETER PROBE**

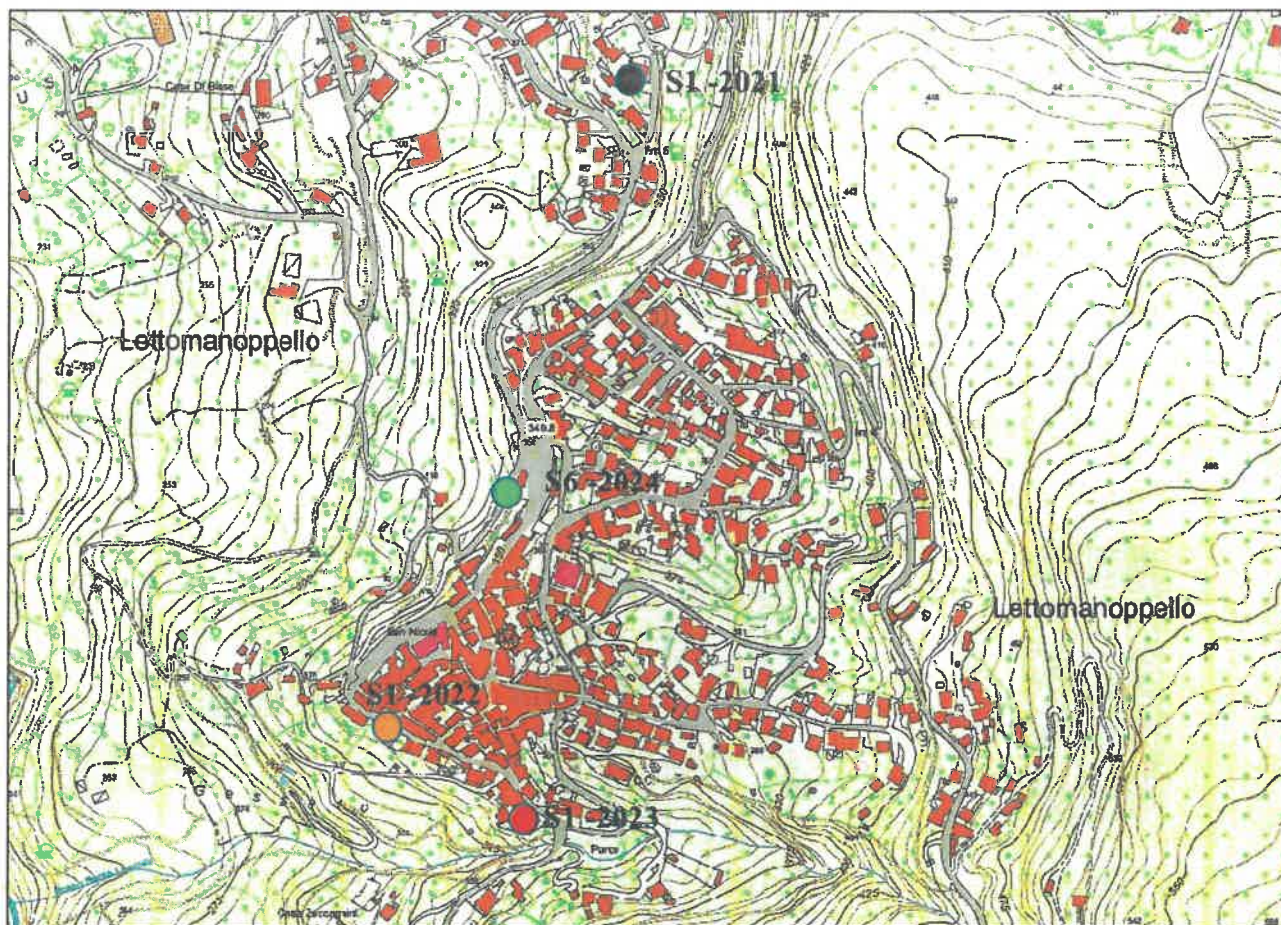
PRESTAZIONI SISTEMA INCLINOMETRICO VERTICALE VERTICAL INCLINOMETER SYSTEM PERFORMANCES

	Con sonda passo 500 mm <i>With 500 mm probe gauge length</i>	Con sonda passo 1000 mm <i>With 1000 mm probe gauge length</i>
Valore letto <i>Read value</i>	20000 sin alpha (K° sen alpha, gradi, mm/m e pollici/piede su richiesta) (K° sin alpha, degree, mm/m and inches/feet on request)	20000 sin alpha (K° sen alpha, gradi, mm/m e pollici/piede su richiesta) (K° sin alpha, degree, mm/m and inches/feet on request)
Risoluzione <i>Resolution</i>	0.011 mm / 500 mm	0.023 mm / 1000 mm
Ripetibilità (precisione) di una misura completa lungo una verticale ¹⁾ <i>Repeatability (precision) of a complete survey along a measuring line¹⁾</i>	± 15 mm / 30 m (passo di misura 500 mm) (reading step 500 mm)	± 2 mm / 30 m (passo di misura 1000 mm) (reading step 1000 mm)

¹⁾ Da normativa ISO 18674-3 è "la differenza tra due spostamenti cumulati di un punto posto a 30m dal punto di riferimento, considerando misure ripetute in condizioni di ripetibilità. (...) Il valore si riferisce alle misure sull'asse A. Comunque le misure sull'asse B sono meno precise".
As for ISO 18674-3, this is the "difference between the cumulated displacements of a measuring point relative to a reference point 30 m apart, when repeatedly carrying out the survey under repeatability conditions. (...) The values are specified for measurements in the A-axis. The B-axis measurements are commonly less accurate."

UBICAZIONE SONDAGGI

Le misurazioni sono state eseguite sui sondaggi ubicati di seguito, realizzati durante differenti campagne di indagini geognostiche :



-  Sondaggio: MESSA IN SICUREZZA VERSANTE NORD OCCIDENTALE DEL CENTRO STORICO DI LETTOMANOPPELLO – 2021
-  Sondaggio : MITIGAZIONE RISCHIO IDROGEOLOGICO C.DA GESSETO - 2022
-  Sondaggio : MITIGAZIONE RISCHIO IDROGEOLOGICO C.DA GESSETO LOTTO 2 - 2023
-  Sondaggio : *INTERVENTI DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO TORRENTE LAVINO E CORSO VITTORIO EMANUELE - COMPLETAMENTO*

STRATIGRAFIA SONDAGGI

Sondaggio S1-2021 “Via Prati di Tivo” (344.21 m s.l.m.)



<i>Profondità base strato (m)</i>	<i>Descrizione litologia</i>
1.00	Terreno vegetale
20.50	Detrito calcareo
25.00	Argilla grigia con clasti calcarei
26.00	Limi debolmente argillosi grigi
48.00	Gessi selenitici e gessi microcristallini con intercalazioni argillose
53.00	Argille e argille marnose
Tabella 1 – Sondaggio geognostico S1 “Via Prati di Tivo”	
Nota : Sondaggio strumentato con inclinometro	

Il sondaggio S1, eseguito lungo Via Prati di Tivo, è stato spinto fino alla profondità di 53.00 m dal piano campagna. L'analisi stratigrafica e litologica delle carote prelevate mette in luce la stratigrafia del sito, caratterizzato da un deposito detritico di natura calcarea fino alla profondità di 20.50 m dal p.c. ascrivibile al deposito di frana.

Proseguendo verso il basso si intercettano depositi della Formazione Gessoso Solifera.

Il foro S1 è stato strumentato con inclinometro e le risultanze del monitoraggio sono riportate in allegato fuori testo.

CASSETTE CATALOGATRICI

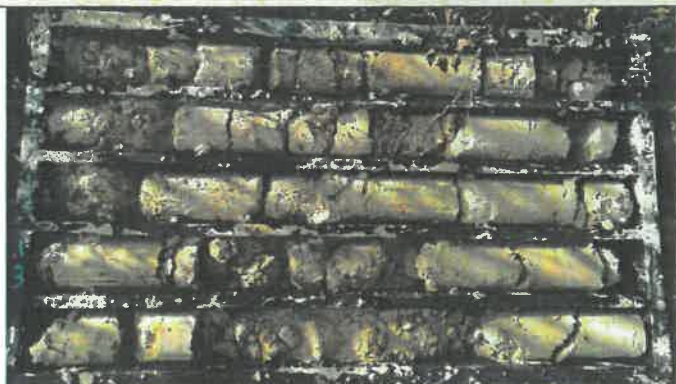
Sondaggio S1 "Via Prati di Tivo"



0.00 – 5.00 m



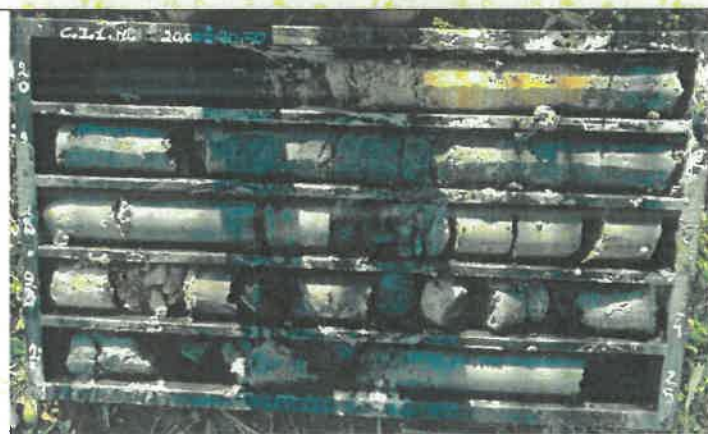
5.00 – 10.00 m



10.00 – 15.00 m



15.00 – 20.00 m

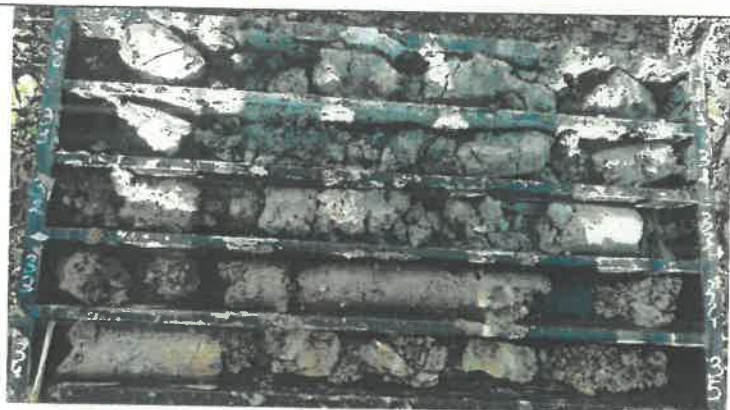


20.00 – 25.00 m



25.00 – 30.00 m

CASSETTE CATALOGATRICI
Sondaggio S1 "Via Prati di Tivo"



30.00 – 35.00 m



35.00 – 40.00 m



40.00 – 45.00 m



45.00 - 50.00 m



50.00 – 53.00 m

Sondaggio S2-2022
“Via Torrione”



Il sondaggio S2, eseguito lungo Via Torrione, è stato spinto fino alla profondità di 48.00 m dal piano campagna. L'analisi stratigrafica e litologica delle carote prelevate mette in luce la stratigrafia del sito, caratterizzato da un deposito detritico di natura calcarea fino alla profondità di 9 m dal p.c. ascrivibile a depositi gravitativi.

Proseguendo verso il basso si intercettano depositi dell'Associazione Gessosa (GESa) dalla Formazione Gessoso Solifera – Messiniano medio, costituita da argille, argille marnose e marne grigio scure, avana e giallastre in strati medi e sottili, con livelli di marne tripolacee sottilmente stratificate e sporadiche intercalazioni di calcari cristallini fetidi, calcareniti e rare arenarie torbidityche

Il foro S2 è stato strumentato con inclinometro e le risultanze del monitoraggio sono riportate in allegato fuori testo.

CASSETTE CATALOGATRICI

Sondaggio S2 "Via Torrione"



0.00 – 5.00 m



5.00 – 10.00 m



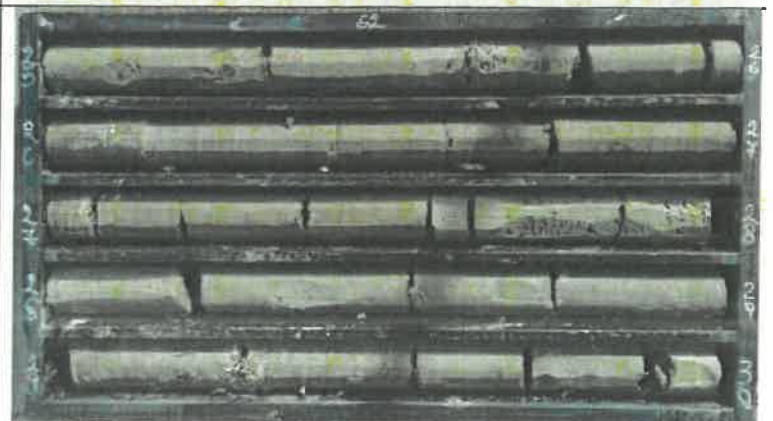
10.00 – 15.00 m



15.00 – 20.00 m



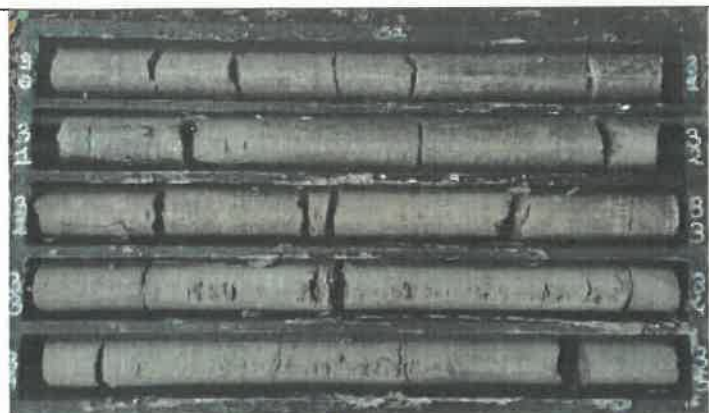
20.00 – 25.00 m



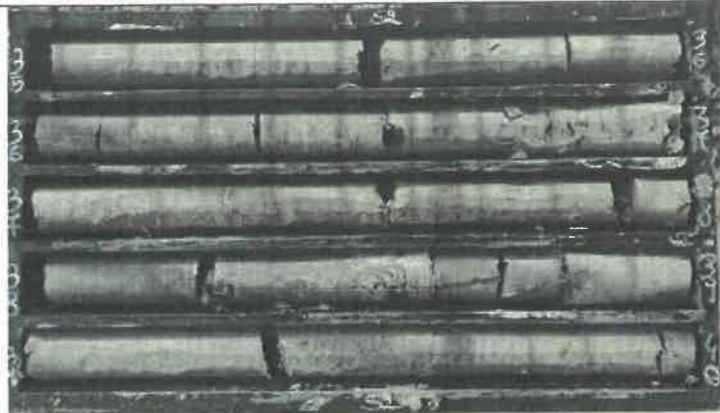
25.00 – 30.00 m

CASSETTE CATALOGATRICI

Sondaggio S2 "Via Torrione"



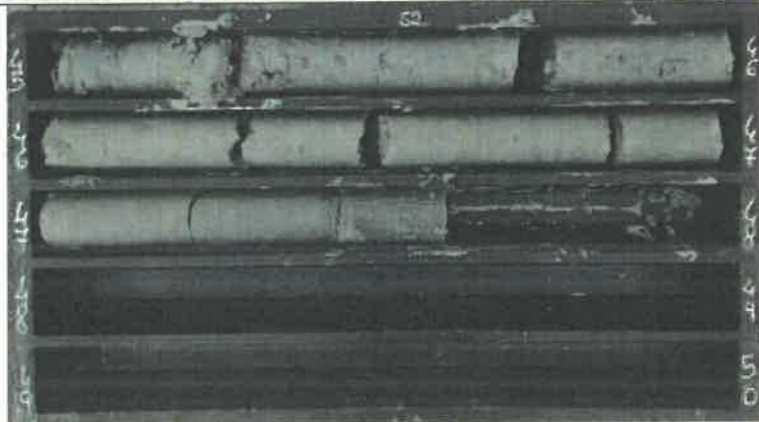
30.00 – 35.00 m



35.00 – 40.00 m



40.00 – 45.00 m



45.00 -50.00 m

Sondaggio S1 -2023
Via N. Bixio



Il sondaggio S1, eseguito a in Via Nino Bixio, è stato spinto fino alla profondità di 33.00 m dal piano campagna. L'analisi stratigrafica e litologica delle carote prelevate mette in luce la stratigrafia del sito, caratterizzato dalla presenza di circa 5 metri di terreno di riempimento grossolano che costituisce il piazzale dell'abitazione privata, poggiante su limi terrosi con intercalazioni di sabbia debolmente limosa con impregnazioni bituminose e detrito calcareo bituminoso e livello bituminoso con impregnazioni di zolfo che raggiunge i 17.60 m. poggianti su depositi attribuibili all'Associazione Calcareo (GESe) dalla Formazione Gessoso Solfifera – Messiniano medio, costituita da calcari micritici solfiferi di colore avana, nocciola o grigi, e calcari brecciati, calcari detritici, cariati e a luoghi friabili, mal stratificati e con intercalazioni di marne calcaree avana e marne argillose biancastre, grigie o brunastre. Gli affioramenti di questa associazione frequentemente caratterizzate da vegetazione di tipo boschivo, appaiono distribuiti in massi irregolari entro la successione argillosa o solo localizzati alla base della sequenza evaporitica o

parzialmente eteropici con (GESd) Lo spessore varia da alcune decine di metri fino ad un massimo di circa 100 metri.

Il foro S1 è stato strumentato con inclinometro e le risultanze del monitoraggio sono riportate in allegato fuori testo.

CASSETTE CATALOGATRICI

Sondaggio S1



0.00 – 5.00 m



5.00 – 10.00 m



10.00 – 15.00 m



15.00 – 20.00 m



20.00 – 25.00 m



25.00 – 30.00 m



30.00 – 35.00 m

Sondaggio S6-2024
“Corso Vittorio Emanuele - 350 m. s.l.m.”



Il sondaggio S6, eseguito appena a valle di Corso Vittorio Emanuele, ad una quota di 350 m. s.l.m. è stato spinto fino alla profondità di 50.00 m dal piano campagna.

L'analisi stratigrafica e litologica delle carote prelevate mette in luce la stratigrafia del sito, caratterizzato dalla presenza di circa 18,20 metri di detriti calcarei in abbondante matrice terrosa, in cui la percentuale di carotaggio è risultata minore del 50%, su limi argillosi attribuibili all'Associazione pelitico-marnosa Gesa della Formazione Gessoso Solfifera – Messiniano Medio, costituita da argille, argille marnose e marne grigie-scure, avana e giallastre in strati medi e sottili, con livelli di marne tripolacee sottilmente stratificate a partire da 35,40 metri risultano presenti intercalazioni di calcari cristallini fetidi, calcareniti e gessi cristallini, presenti fino a circa 42 metri.

Il foro S6 è stato strumentato con inclinometro.

CASSETTE CATALOGATRICI

Sondaggio S6



0.00 – 5.00 m



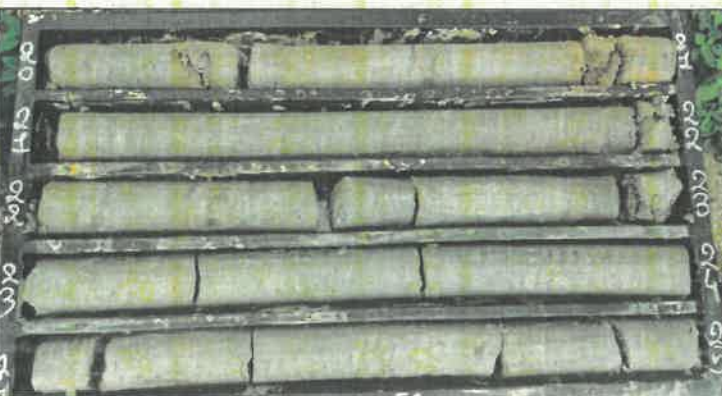
5.00 – 10.00 m



10.00 – 15.00 m



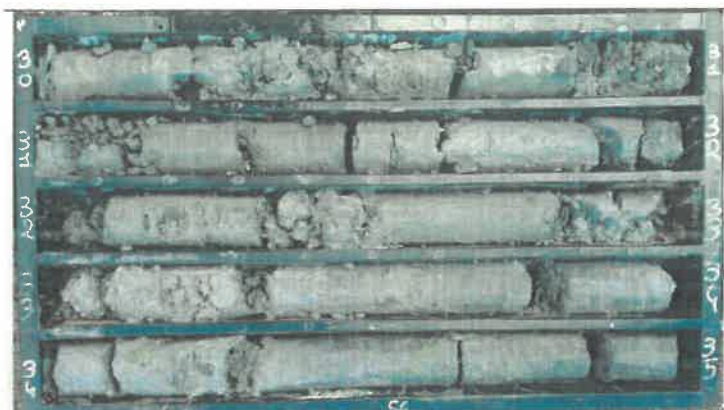
15.00 – 20.00 m



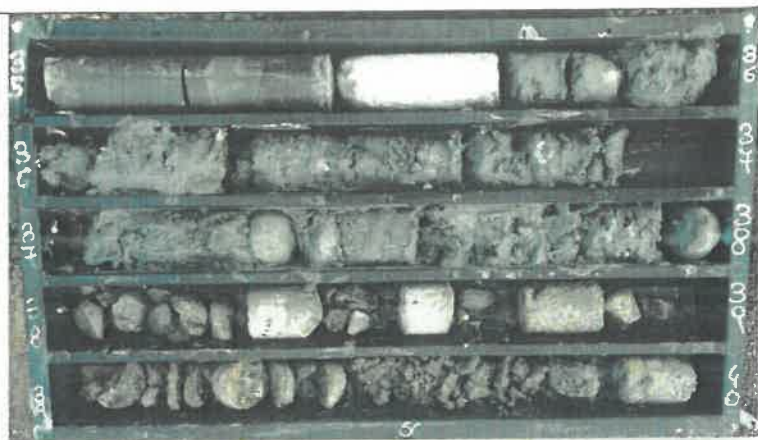
20.00 – 25.00 m



25.00 – 30.00 m



30.00 – 35.00 m



35.00 – 40.00 m



40.00 – 45.00 m



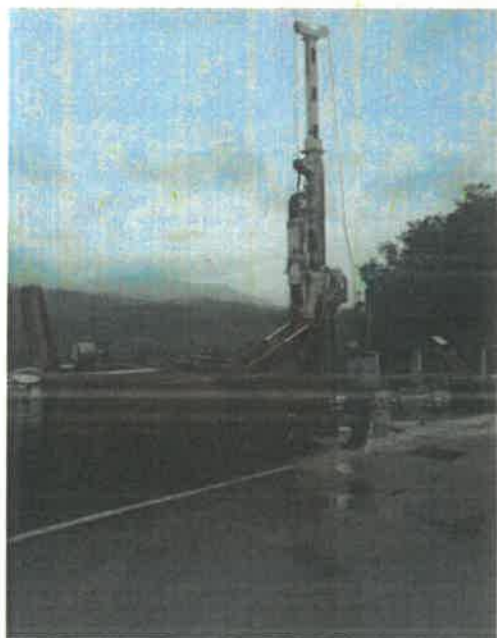
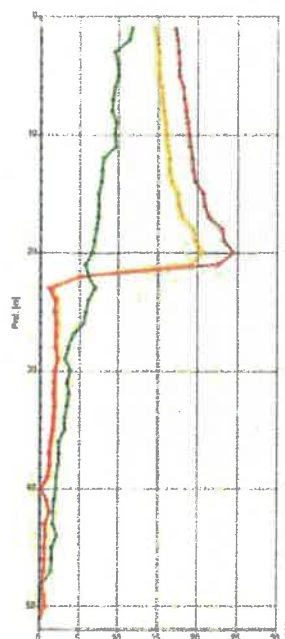
45.00 – 50.00 m

RISULTATI MONITORAGGIO INCLINOMETRICO

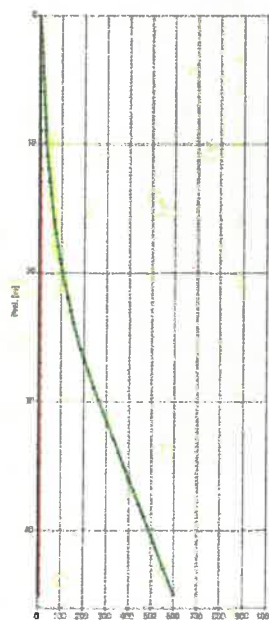
Di seguito si riportano le risultanze del monitoraggio eseguito nel periodo 2021-2024 per i seguenti inclinometri :



Sondaggio S1-2021
Via Prati di Tivo

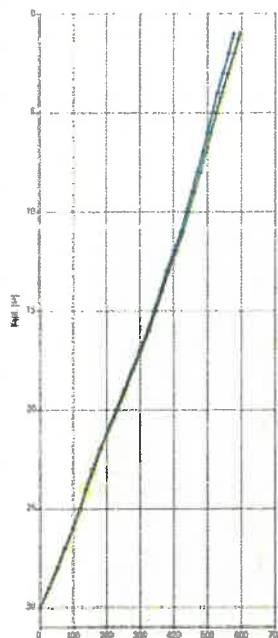


Sondaggio S2-2022
Via Torrione





Sondaggio S1-2023
Via N. Bixio

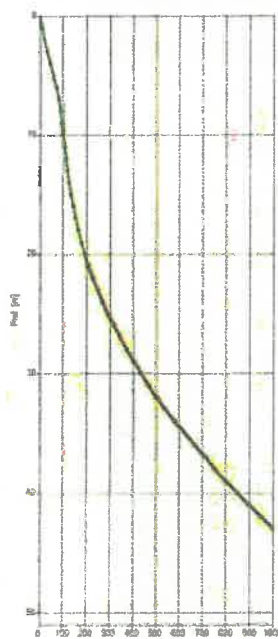


Possibile superficie di scorrimento -10 m.

- 10/10/2024
- 09/11/2023
- 07/09/2023



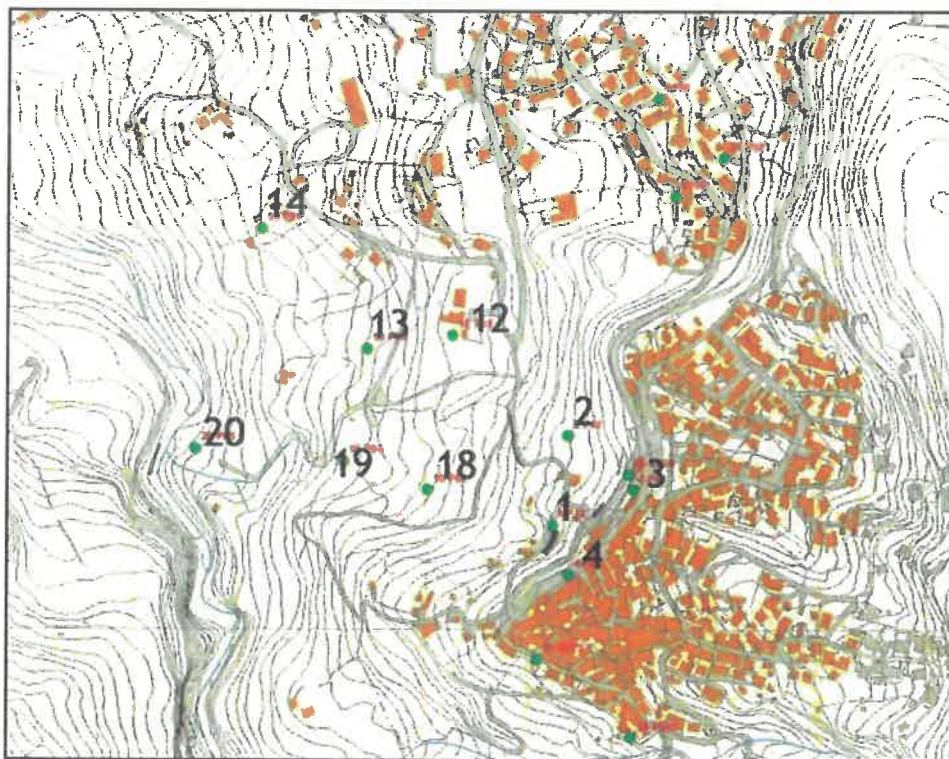
Sondaggio S6-2024
Corso Vittorio Emanuele



Possibile superficie di scorrimento -21 m.

- 22/10/2024
- 17/11/2023

Di seguito si riportano le risultanze del monitoraggio eseguito nel periodo 1989-1991 :



TUBO N.1 : Danneggiato da atti vandalici marzo 1989 nessun risultato apprezzabile;

TUBO N.2 : I dati evidenziano una deformazione a -17 metri con spostamento in testa di 8 cm;

TUBO N.3 : Fenomeno deformativo cessato da ottobre 1990;

TUBO N.4 : L'analisi della deformata evidenzia una superficie di scorrimento a -37 m. p.c. direzione di spostamento 270 gr, spostamento circa 10 mm in testa;

TUBO N.12 : Evidenzia un superficie di scorrimento a -26 m. p.c. spostamento circa 14 mm in testa;

TUBO N.13 : Evidenzia un superficie di scorrimento a -8 m. p.c. spostamento circa 40 mm in testa;

TUBO N.14 : Nessun spostamento;

TUBO N.18 : Nessun spostamento;

TUBO N.19 : Evidenzia un superficie di scorrimento a -10 m. p.c. spostamento circa 31 mm in testa;

TUBO N.20 : Nessun spostamento

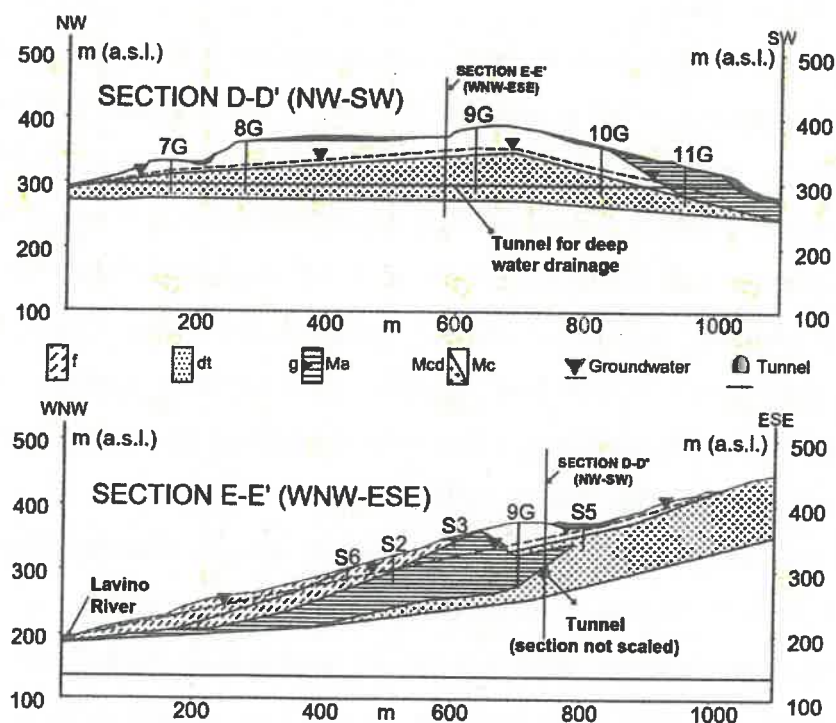
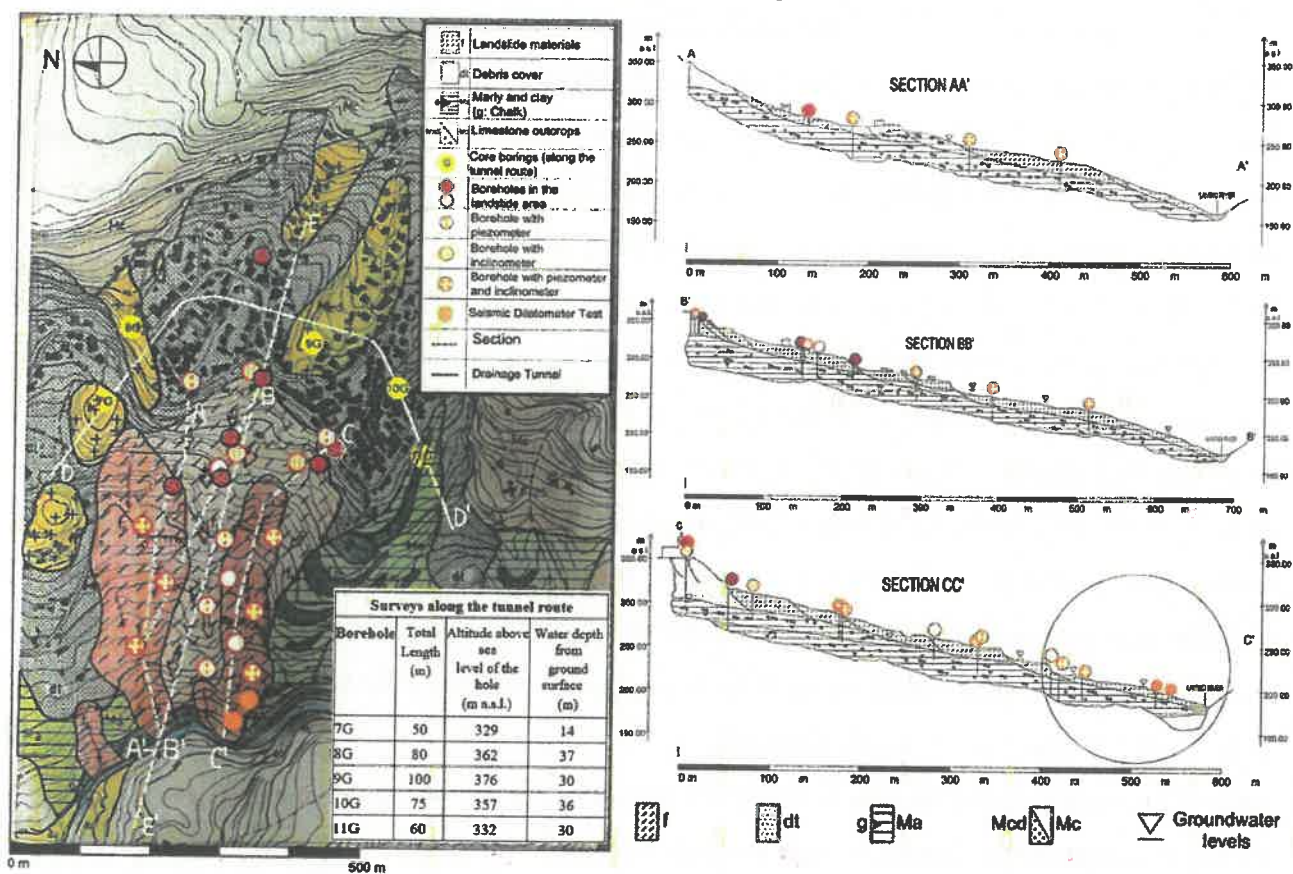
4. CONCLUSIONI

Le numerose indagini eseguite nel comune di Lettomanoppello e le risultanze delle attività di monitoraggio confermano come i fenomeni gravitativi siano attivi e caratterizzati da tipologie differenti, crolli e ribaltamenti, predisposti da diffusi sistemi di fratture, joints e clivaggi che interessano i litotipi calcarei presenti a monte del centro storico, scorrimenti e colate in corrispondenza di alternanze di materiali con caratteristiche litotecniche ed idrogeologiche diversificate da Via Valle a Largo Assunta fino al sottostante fiume Lavino con superfici di scorrimento che raggiungono i -37 m. p.c. e valori massimi di velocità confermati dall'analisi dei dati interferometrici eseguiti dall'I.N.G.V. di circa 10/15 mm/anno

La complessa situazione idrogeologica che caratterizza il Comune di Lettomanoppello, dovuta alla presenza di materiali detritici anche di grandi dimensioni provenienti prevalentemente dalla demolizione delle formazioni calcaree fra i quali è interposta una frazione a grana più minuta anch'essa di natura calcarea e di colore biancastro, in genere piuttosto abbondante e a luoghi nettamente prevalente sulla frazione più grossa il cui spessore è molto variabile (tra i 18 e 46 m) a seconda dell'andamento morfologico della superficie d'appoggio del basamento miocenico e dell'entità dei processi erosivi subiti in superficie, la grande estensione dell'area coinvolta e la complessità dei fenomeni richiede per la sua stabilizzazione sia le opere strutturali già previste ed in esecuzione e le opere di drenaggio superficiali, che viteranno il ruscellamento delle acque meteoriche e di sorgente lungo il versante interessato dal movimento franoso, efficaci nel breve-medio periodo finalizzate appunto alla riduzione/controllo delle effetti della frana e alla protezione degli edifici e delle infrastrutture esistenti ma risultano necessarie opere di drenaggio efficaci nel medio-lungo periodo finalizzate alla riduzione/contenimento delle principali cause della frana stessa quali la circolazione caotica delle acque sotterranee e l'eccessiva pressione interstiziale in caso di precipitazioni intense/prolungate.

Un primo intervento a medio-lungo termine proposto per mitigare la frana di Lettomanoppello è la realizzazione di una galleria di drenaggio profondo, proposta presente nel progetto del 1988 Prof. Totani e Prof. Bertini - Ordinanza del Ministero per il Coordinamento della Protezione Civile n.1433/FPC del 12 aprile 1988 che prevede la captazione delle acque sotterranee profonde circolanti nel (calcare ed eventualmente anche negli strati di gesso intercalati nel deposito argilloso marnoso) al fine di "tagliare" l'apporto idrico allo strato detritico interessato dalla frana direttamente nel substrato roccioso e anche di drenare l'infiltrazione da acque sotterranee superficiali circolanti dallo strato detritico, ipotizziamo un tratto di scavo del diametro di circa 4,50 m e un percorso a ferro di cavallo sottostante l'abitato per una lunghezza complessiva di circa 1 Km, con imboccature ad

un'altitudine di circa 290 m.s.l.m. Le figure sottostante mostrano il tracciato proposto per la galleria prevista e un tratto perpendicolare posto circa a metà della galleria.



Proposta progettuale che è stata rivista e aggiornata e che prevede le seguenti tipologie di opere :

- galleria di drenaggio

La galleria, munita di dreni sub orizzontali di piccolo diametro disposti a raggiera, permetterà la riduzione delle pressioni interstiziali all'interno del pendio stesso.

Con la galleria in progetto si intende realizzare un'opera di drenaggio che consenta la captazione delle acque circolanti nel sottosuolo che attualmente fuoriescono a quote diverse sul pendio a valle del paese contribuendo al persistere dei fenomeni franosi.

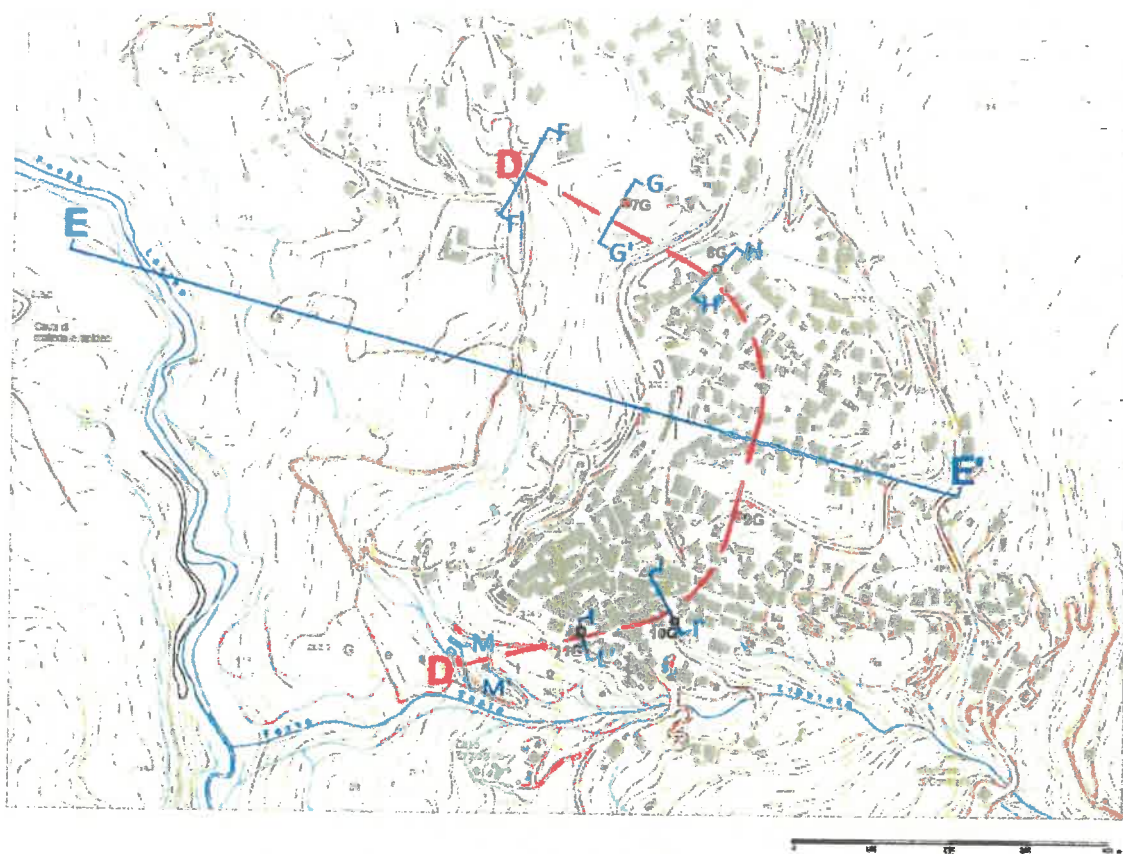
La bonifica idraulica del versante franoso appare al momento uno degli interventi più importanti e più efficaci per consentire di ristabilire, nell'arco di tempo di qualche anno, condizioni di stabilità accettabili sull'intero versante e sufficienti quindi a garantire, di riflesso, la sicurezza della parte di paese più direttamente minacciata dall'evolversi verso monte dei dissesti.

Come già sottolineato la situazione geologica ed idrogeologica esistente nel sottosuolo del centro abitato non è ancora sufficientemente nota e le ipotesi che possono farsi sono a favore di un'alimentazione idrica piuttosto cospicua che non può trarre origine dai soli apporti meteorici locali ma anche da serbatoi sotterranei di notevole capacità esistenti alle spalle del paese.

È da notare, inoltre, che le acque profonde, nel loro movimento verso il drenaggio naturale (cioè verso il Lavino), si disperdono nella copertura detritica, in parte emergendo subito a valle del paese, in parte proseguendo lungo il pendio con percorsi sotterranei molto capricciosi, in parte alimentando piccoli corsi d'acqua.

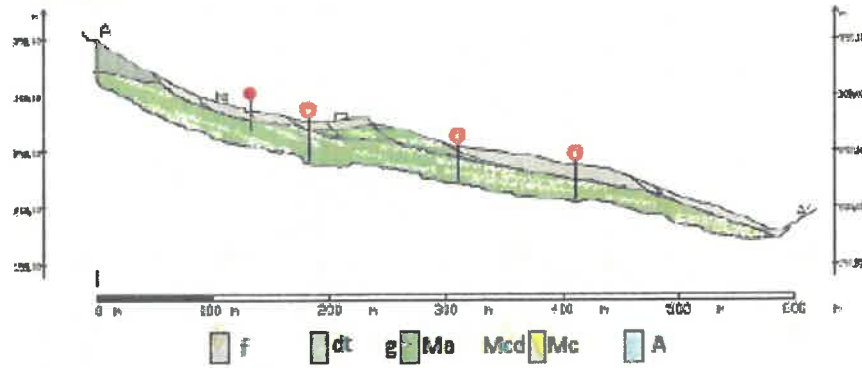
Una soluzione tecnica che consentisse di captare tutte queste acque prelevandole con modeste opere superficiali (alle emergenze o in prossimità di esse) e convogliandole verso valle, è stata parzialmente realizzata con l'intervento "Opera di protezione anti erosiva del Torrente Lavino ed interventi di captazione e convogliamento delle acque superficiali e di sorgente che affluiscono nel corpo di frana" finanziata con DELIBERA CIPE n.25 del 10/08/2016 Fondo Sviluppo e Coesione 2014-2020 – aree tematiche nazionali e obiettivi strategici-ripartizione ai sensi dell'art.1, comma 703 lettere b) e c) della L. n. 190/2014. Piani operativi. Area Tematica ambiente "Piano di interventi per la riduzione del rischio idrogeologico e dell'erosione costiera (SUD)" comprendenti il progetto per importo di € 750.000,00 codice Rendis 13IR161/G1.

In linea del tutto orientativa la galleria, con una sezione di scavo di diametro 4,50 m, dovrebbe avere un percorso a ferro di cavallo al di sotto dell'abitato, con imbocchi a q. 290 circa, ubicati rispettivamente sulla sponda destra della Valletta che scende dalla Stalla Fonte di Papa (imbocco sud) è all'altezza della strada comunale che scende verso il Lavino (imbocco nord).

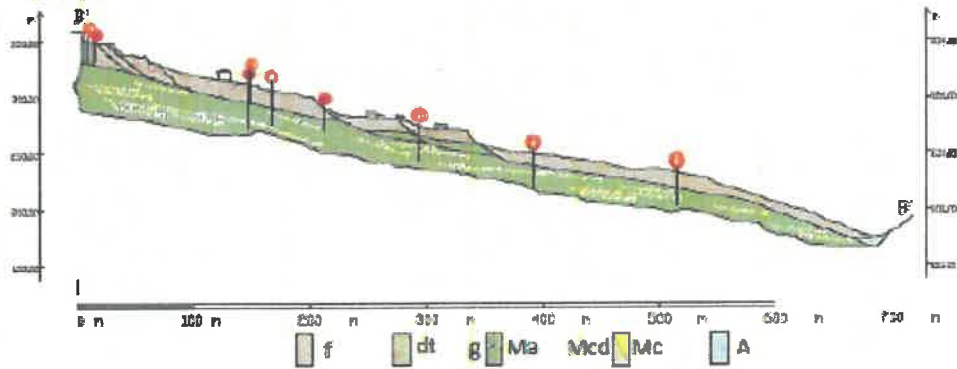


Con tale tracciato le coperture al volto sotto l'abitato sarebbero sempre notevoli e varierebbero da un minimo di 60 m ad un massimo di 100 m circa; sarebbero pertanto del tutto rassicuranti nei riguardi di possibili fenomeni di deformazione del terreno che dovessero propagarsi dall'interno dello scavo fino in superficie.

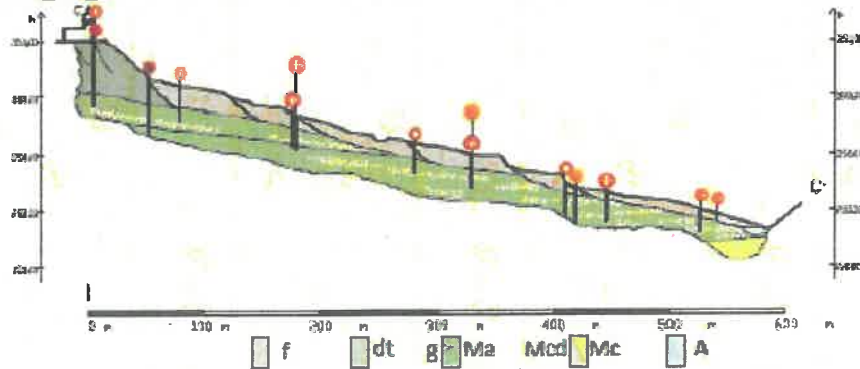
A-A'



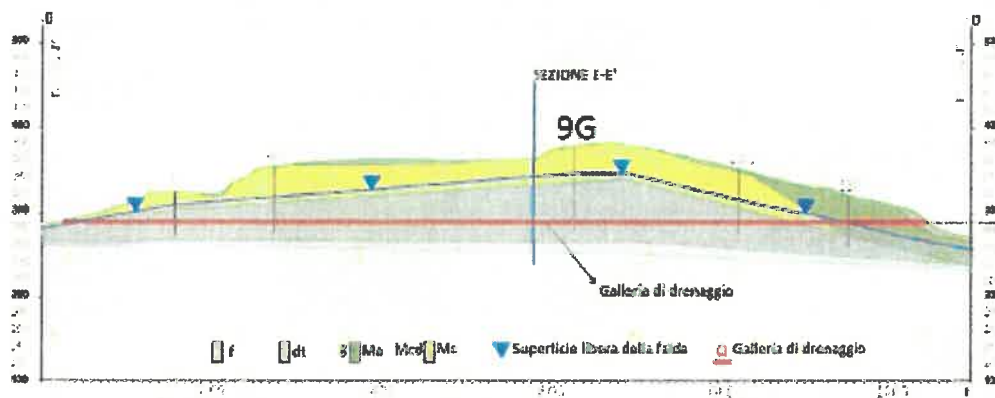
B-B'



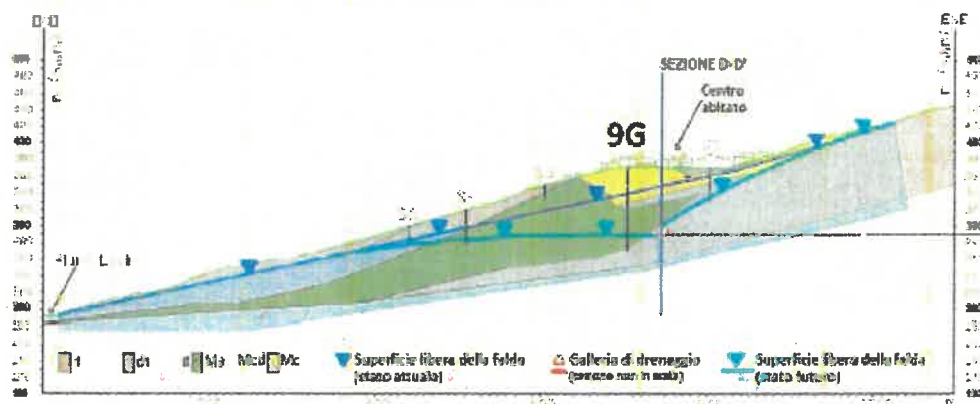
C-C'



D-D' sezione longitudinale della galleria di drenaggio



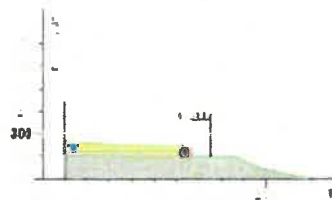
E-E' sezione trasversale della galleria di drenaggio



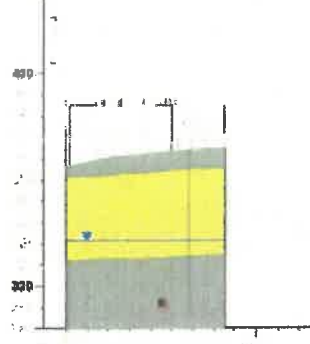
Legenda	Materiale	Peso specifico (kN/m ³)	Attrito (°)	Coesione (kPa)	Modulo elastico (MPa)
dt	Copertura detritica	19,5-21	21-25	15-25	10-15
f	Materiali rimaneggiati	15-17	30-40	0-5	3-4
Ma	Marna argilosa	19,5-21,5	25-30	20-50	25-40
g	Gesso	19,5-21,5	25-30	20-50	25-40
Mcd	Calcare affiorante	24	40	50	100

SEZIONI TRASVERSALI DELLA GALLERIA

F-F' (IMBOCCO GALLERIA)



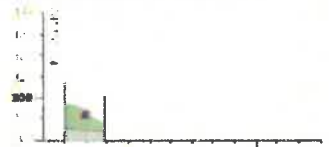
I-I'



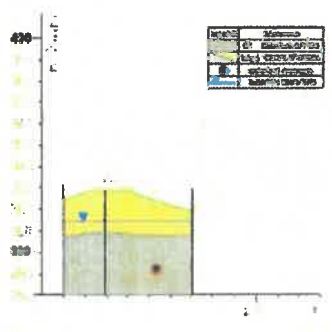
SONDAGGIO 10G
(990 m s.l.m.)



M-M' (SBOCCO GALLERIA)



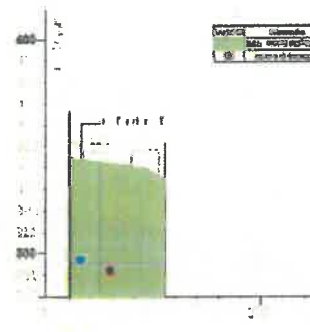
G-G'



SONDAGGIO 7G
(932 m s.l.m.)



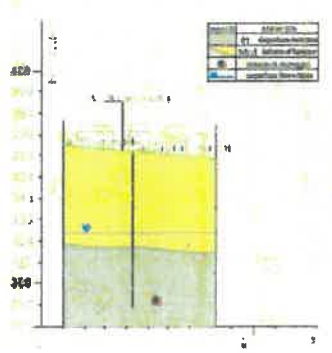
L-L'



SONDAGGIO 11G
(932 m s.l.m.)



H-H'



SONDAGGIO 8G
(922 m s.l.m.)



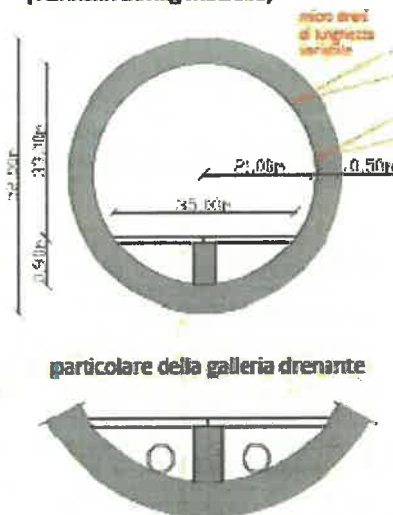
INDICAZIONI DEI BATTENTI D'ACQUA SOPRA LA GALLERIA E DELLE COPERTURE DAL PIANO CAMPAGNA

SONDAGGIO (profondità in metri)	Quota punto acqua in m s.l.m.	Quota copertura acqua in m s.l.m.	Quota copertura in m s.l.m.	Quota battenti acqua in m s.l.m.	Quota copertura in m s.l.m.
7G (90,00m)	332	280	280	25,00	42,00
8G (90,00m)	332	282		-	72,00
9G (90,00m)	337	285		30,00	67,00
10G (90,00m)	330	265		33,00	70,00
11G (90,00m)	330	270		-	62,00
21P (106,00m)	337	291		35,00	67,00

**SEZIONE DELLA GALLERIA
- SCAVO TRADIZIONALE**



**- SCAVO MEDIANTE TBM
(Tunnelin Boring Machine)**



Nell'ottica di stimare il costo della realizzazione dell'opera, è stato elaborato il seguente computo metrico :

- relativo al costo a ml della realizzazione della galleria;
- relativo al costo a metro lineare dei cunicoli.

Di seguito uno schema esplicativo :

	€/ml	lunghezza (m)	Totale
GALLERIA	6 495,18 €	1008	6.547.141,44 €
CUNICOLI	5 141,52 €	7*100	3.599.764,00 €

In definitiva, il costo complessivo calcolato per macro categorie, per la realizzazione del progetto risulta:

10.146.905,44 € (galleria e cunicoli)

Agli importi sopra riportati vanno aggiunte delle somme per le opere accessorie quali:

- Impianto di cantiere, realizzazione di opportuna pavimentazione stradale, impianto di illuminazione ed impianto di ventilazione stimabile in € 1.000.000;

La somma totale stimata per la realizzazione della galleria e dell'impianto è

(10.146.905,44 € + 1.000.000 € = 11.146.905,44 €)

Calcolo sommario della spesa

Importo totale del progetto		20.029.427,32
a	Importo a base di gara	11.146.905,44
	di cui per opere accessorie	1.000.000,00
	Costi sicurezza	200.000,00
b	Somme a disposizione della stazione appaltante	5.635.322,68
di cui:		
b.1, b.2	lavori in economia e imprevisti	400.000,00
b.3	rilievi, accertamenti, indagini	291.784,35
b.4	Progettazione, spese amministrative, di supporto e verifica	903.671,93
b.5.1	cassa Previdenziale Spese progettazione	36.531,72
b.6.1	IVA Spese progettazione	251.418,81
b.7	direzione lavori, collaudi	894.195,62
b.5.2	cassa Previdenziale D.L. e Collaudi	33.416,57
b.6.2	IVA D.L. e Collaudi	177.104,48
b.8. b.9	allacciamenti pp.ss., occupazioni, espropri	150.000,00
b.10	IVA Lavori	2.496.319,20
b.11	spese di gara	880,00