



RAPPORTI TECNICI INGV

Rilievo con laser scanning terrestre dei vulcani di fango della Riserva Naturale delle Salse di Nirano



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

448

Direttore Responsabile

Valeria DE PAOLA

Editorial Board

Luigi CUCCI - Editor in Chief (luigi.cucci@ingv.it)
Raffaele AZZARO (raffaele.azzaro@ingv.it)
Christian BIGNAMI (christian.bignami@ingv.it)
Viviana CASTELLI (viviana.castelli@ingv.it)
Rosa Anna CORSARO (rosanna.corsaro@ingv.it)
Domenico DI MAURO (domenico.dimauro@ingv.it)
Mauro DI VITO (mauro.divito@ingv.it)
Marcello LIOTTA (marcello.liotta@ingv.it)
Mario MATTIA (mario.mattia@ingv.it)
Milena MORETTI (milena.moretti@ingv.it)
Nicola PAGLIUCA (nicola.pagliuca@ingv.it)
Umberto SCIACCA (umberto.sciacca@ingv.it)
Alessandro SETTIMI (alessandro.settimi1@istruzione.it)
Andrea TERTULLIANI (andrea.tertulliani@ingv.it)

Segreteria di Redazione

Francesca DI STEFANO - Coordinatore
Rossella CELI
Robert MIGLIAZZA
Barbara ANGIONI
Massimiliano CASCONI
Patrizia PANTANI
Tel. +39 06 51860068
redazione@ingv.it

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.174 | 2014, 23 LUGLIO

© 2014 INGV Istituto Nazionale
di Geofisica e Vulcanologia
Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI
Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

RAPPORTI TECNICI INGV

Rilievo con laser scanning terrestre dei vulcani di fango della Riserva Naturale delle Salse di Nirano

Terrestrial laser scanning survey of mud Volcanoes in the Salse di Nirano natural reserve

Arianna Pesci¹, Fabiana Loddo¹, Giordano Teza², Nicola Cenni², Massimo Bacchetti³, Antonello Piombo³, Serena Venturoli³, Marzia Conventi⁴

¹INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna

²Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Geoscienze

³Università degli Studi di Bologna, Dipartimento di Fisica e Astronomia

⁴Comune di Fiorano (MO), Direzione della Riserva Naturale delle Salse di Nirano

Accettato 15 febbraio 2022 | Accepted 15 February 2022

Come citare | *How to cite* Pesci A., Loddo F., Teza G., Cenni N., Bacchetti M., Piombo A., Venturoli S., Conventi M., (2022). Rilievo con laser scanning terrestre dei vulcani di fango della Riserva Naturale delle Salse di Nirano. Rapp. Tec. INGV, 448: 1-22, <https://doi.org/10.13127/rpt/448>

In copertina | Vulcano di fango, riserva naturale Salse di Nirano, Fiorano Modenese, foto di L. Sagnotti | Cover *Mud volcano, Salse di Nirano natural reserve, Fiorano Modenese, picture by L. Sagnotti*

448

INDICE

Riassunto	7
<i>Abstract</i>	7
Introduzione	7
1. Progettazione delle misure	10
2. Rilievo	12
3. Risultati	15
4. Work in progress	18
Bibliografia	19

Riassunto

I vulcani di fango sono emissioni di fango generate dalla risalita di gas dai depositi profondi di idrocarburi. Il materiale che fuoriesce è costituito prevalentemente da metano, acqua salata fossile e argille, che si depositano intorno all'apertura generando le tipiche formazioni a cono e polla. Le Salse di Nirano costituiscono l'esempio più antico di vulcani di fango tutelati in Italia e tra i meglio conservati d'Europa.

In questo rapporto tecnico si descrive il rilievo con laser scanning terrestre (TLS) realizzato nel febbraio 2020 per ottenere un modello di riferimento ad alta precisione, mostrando le fasi di studio e preparazione della campagna di misura e mettendo in evidenza limiti e opportunità di tale approccio. Lo scopo è quello di contribuire allo studio ed alla comprensione di eventuali correlazioni tra i movimenti superficiali del terreno ed eventi di estrusione dei fanghi. In sostanza, è la prima fase di misura per il monitoraggio dell'area e per la ricerca di pattern di deformazione relativi ai fenomeni presenti.

Abstract

Mud volcanoes are mud emissions generated by the rising gas from deep hydrocarbon deposits. The extruded material is mainly composed of methane, fossil salt water and clays, and results deposited on the ground forming cones and pools. The Salse di Nirano reserve is one of the oldest and ancient example of geological protected area, in Italy and in Europe.

In this technical report it is widely described the terrestrial laser scanning (TLS) measurement campaign performed on February 2020 together with results and considerations/opportunities for planning an exhaustive monitoring of the area. The research aims at providing a reliable contribute in searching for possible correlations between areas movements and mud extrusions. In summary, this paper shows the first TLS observation carried out to start the monitoring of the studied phenomena.

Keywords Laser scanning terrestre (TLS); Salse di Nirano; Monitoraggio | Terrestrial laser scanning (TLS); Mud volcanoes; Monitoring.

Introduzione

Il Laser Scanning Terrestre (TLS) è una tecnica di rilievo che consente di ottenere una rappresentazione dettagliata e densa delle superfici fisiche. Si tratta di strumentazioni attive che inviano un segnale laser su direzioni note e calcolano la posizione del punto che lo ha riflesso a partire dalla misura del tempo di volo dell'impulso del segnale di ritorno, o della differenza di fase, a seconda dei modelli utilizzati.

Lo strumento qui impiegato è l'Optech ILRIS-3D-ER, già ampiamente descritto in numerosi lavori precedenti, sia su rivista internazionale [Pesci et al., 2011a; 2011b; 2011c; Pesci et al., 2013; Teza et al., 2015], sia su rapporti tecnici (ad esempio Pesci et al. [2015]), e le cui principali caratteristiche sono riassunte in Tabella 1. Le misure si realizzano posizionando lo strumento su alcuni punti, detti punti di stazione, dai quali si avviano le scansioni. Ogni scansione restituisce una nuvola di punti, cioè un insieme denso di coordinate di punti (x, y, z) misurati per ogni impulso inviato e retroriflesso, e sono corredati di un dato aggiuntivo che rappresenta l'intensità del segnale di ritorno e che, una volta che i dati sono trasformati dal formato proprietario

mediante software Optech Parser in modo da poter essere ispezionati ed elaborati con qualunque pacchetto software per dati TLS in formato ASCII, è espresso in forma di valori interi a 8 bit, dunque nella scala 0-255. Il dato di intensità “colora” le nuvole di punti mettendo in evidenza elementi caratterizzati da diverse rugosità o da differenti gradi di umidità, poiché il contenuto di acqua interferisce molto sulla energia del segnale di ritorno per questioni di assorbimento. Inoltre, qualora sia utilizzata una fotocamera applicata sullo strumento, al dato geometrico e a quello di intensità è possibile aggiungere, per ogni punto, il dato di colore RGB [Pesci et al., 2010]. Le nuvole di punti, che descrivono matematicamente le porzioni di superficie, vengono successivamente registrate in un unico sistema di riferimento ortogonale relativo che, a sua volta, potrà essere registrato in un riferimento esterno mediante semplici operazioni di rototraslazione. In questa fase è necessario estrarre dalla nuvola di punti TLS un set di coordinate corrispondenti a punti di controllo misurati nel sistema di riferimento desiderato, ad esempio mediante ricevitori GPS [Teza et al., 2015].

Parametro	Valore	Unità	Condizione
Lunghezza d'onda	1535	nm	-
Frequenza	2.5	kHz	-
Classe	1M	-	-
Campo visivo	40 x 40	°	-
Portata minima	3	m	-
Portata massima	1500	m	80% riflettività
	800	m	20% riflettività
	350	m	4% riflettività
Divergenza	0.17	mrاد	-
Spot	20.5	mm	100 m distanza
Precisione singolo punto	7	mm	100 m distanza
Precisione modello	3	mm	100 m distanza
Minimo passo angolare	0.002	mrاد	-
Minimo passo campionamento	2	mm	100 m distanza

Tabella 1 Caratteristiche principali dello strumento ILRIS 3D ER.
Table 1 ILSRIS 3D ER main technical data.

Le Salse di Nirano sono dei vulcani di fango ubicati nell'omonima Riserva Naturale Regionale nel territorio del Comune di Fiorano Modenese. Si tratta di un fenomeno di rilevanza internazionale che viene studiato in ambito geologico, paleontologico, chimico, botanico, storico ed archeologico [Castaldini et al., 2017]. Si tratta della prima riserva naturale istituita nel 1982 dalla Regione Emilia-Romagna e, dal 2004, è anche un Sito di Importanza Comunitaria [European Community, 2019]. Le Salse di Nirano rappresentano l'esempio più antico di vulcani di fango tutelati in Italia e ad oggi sono tra i meglio conservati d'Europa. Le salse sono delle emissioni di fango freddo prodotte dalla risalita in superficie di acqua salata e fangosa frammista a idrocarburi principalmente gassosi (metano) e, in piccola parte, liquidi (petrolio) prevalentemente lungo faglie e fratture del margine appenninico emiliano. Il nome “salsa” (dal latino *salsus*) deriva dall'alto contenuto di sale delle acque fangose. La salinità delle acque è dovuta prevalentemente alla presenza di cloruro di sodio (NaCl). Queste acque salate sono definite “connate”, cioè formatesi entro i sedimenti che si depositarono alcuni milioni di anni fa nell'antico Mare Adriatico; esse sono rimaste intrappolate in profondità nei sedimenti e sono pertanto considerate acque fossili. Gli idrocarburi presenti si sono generati anch'essi, come le acque salate, a grandi profondità dalla

decomposizione anaerobica di resti organici di origine vegetale e animale. I materiali limo-argillosi sono trascinati verso l'alto dai gas e dall'acqua essenzialmente lungo fratture e faglie. Successivamente, una volta in superficie, si depositano lungo i fianchi degli apparati lutivomi e rappresentano la testimonianza dei livelli rocciosi attraversati dai fluidi durante la loro risalita. I materiali limo-argillosi che fuoriescono dalle salse ricoprono il terreno circostante tramite colate, edificando anche degli apparati con una forma che dipende dalla tipologia dei fanghi estrusi, leggermente diversi tra loro dal punto di vista mineralogico e granulometrico.

La morfologia è in continua evoluzione: nuove bocche si aprono mentre altre cessano la loro attività. Essendo i vulcani di fango delle Salse di Nirano uno dei fenomeni di vulcanismo freddo meglio sviluppati su tutto il territorio italiano, e tra i maggiori d'Europa, hanno da sempre suscitato grande interesse scientifico e turistico: annualmente infatti le Salse di Nirano sono visitate da circa 70.000 persone.

Nel 2014, in un contesto diverso dal punto di vista geodinamico, l'esplosione di un vulcano di fango nella Riserva Naturale delle Macalube di Aragona, in provincia di Agrigento, travolse un uomo in visita alla riserva con i suoi due figli che rimasero uccisi. Tale fatto ha motivato una riflessione dell'Amministrazione di Fiorano Modenese sulla fruizione in sicurezza della zona integrale della Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano e quindi l'intensificarsi di studi a carattere multidisciplinare per il monitoraggio dell'area. Questo lavoro si colloca pertanto all'interno di una fase preliminare per la costruzione di un sistema di monitoraggio multidisciplinare delle Salse di Nirano.

L'area è protetta da una sorta di corona di calanchi ed ha una forma relativamente piatta con quote variabili tra i 200 m ed il 220 m s.l.m. La zona è estremamente vegetata ed il terreno è interessato sia da una copertura boschiva che da una vegetazione tipica dei litorali costieri. La copertura della vegetazione è rada e frammentata in prossimità delle bocche dei vulcanelli e delle colate di fango ma presto si fa densa e talvolta intricata coprendo, a sprazzi, ampie porzioni dell'area di interesse (Figure 1 e 2).

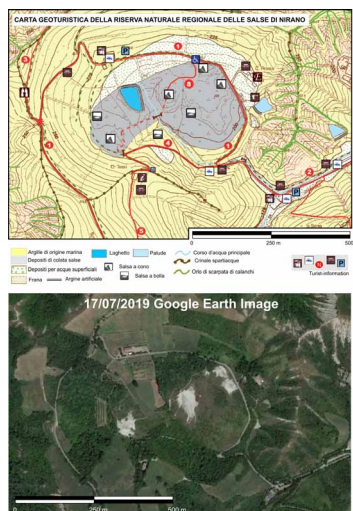


Figure 1 Mappa geologica-cartografica e immagine aerea delle Salse di Nirano e zone limitrofe, fornite con la stessa scala (www.fioranoturismo.it).

Figure 1 Geological map of Salse di Nirano and near areas and the corresponding aerial image from Google Maps (www.fioranoturismo.it).



Figure 2 Foto di conici di fango e polle.

Figure 2 Mud volcanoes and pools.

Queste caratteristiche naturali rendono complicato il rilievo TLS sia per questioni direttamente legate ai punti di osservazione che, oltre ad essere accessibili, devono garantire una vista non troppo tangenziale dell'area, nonché l'assenza o una bassa percentuale di ostacoli sul tragitto del fascio laser. Per preservare la bontà dell'allineamento delle scansioni, anche in presenza di rilievi in cui è presente una percentuale non trascurabile di area vegetata, la programmazione delle misure è un passo importante: bisogna garantire, infatti, che le parti libere da vegetazione e comuni a più scansioni siano sufficientemente ampie e ben distribuite da permettere un allineamento ottimale, limitando possibili propagazioni di errore causato da insufficiente sovrapposizione e/o carente rappresentazione.

In questo lavoro sono descritte le fasi progettuali del rilievo, le misure di campagna ed i risultati in termini di modelli tridimensionali (DTM) delle Salse per fornire un modello iniziale utile a fini di confronto, nel senso che sarà precisato nel seguito, con dati forniti da future misure e all'integrazione con misure esterne di tipo topografico e di livellazione allo scopo di attuare un monitoraggio del fenomeno. Si precisa che qui il termine "monitoraggio" è inteso nel significato più esteso di indagine ripetuta nel tempo, con adeguato periodo di ritorno, senza che ciò implichi necessariamente un rilievo continuo in tempo reale o quasi reale.

1. Progettazione delle misure

La riuscita di un rilievo TLS si basa su alcuni punti fondamentali, in particolare: 1) la geometria di rilievo; 2) il campo di osservazione; 3) gli ostacoli e le coperture dell'area; 4) la percentuale di sovrapposizione delle scansioni. La geometria di rilievo riguarda le distanze di lavoro e l'angolo di incidenza del fascio laser sulla superficie nelle varie parti di essa. La distanza governa la dimensione dello spot e quindi dell'area illuminata da ogni impulso laser sul terreno mentre l'angolo di incidenza è responsabile sia del fenomeno dello *spot spreading*, cioè della deformazione dell'impronta del fascio, sia della riduzione dell'intensità del segnale riflesso (che nei casi estremi può portare all'invisibilità dell'area corrispondente). Via via che la distanza aumenta, la risoluzione peggiora e nei casi in cui il punto di stazione non consenta di osservare le superfici con alti angoli di incidenza si ottiene una nuvola di punti caratterizzata da informazione degradata.

Il campo di osservazione è la porzione di superficie che può essere acquisita in una singola scansione e, nel caso specifico dello strumento ILRIS, è l'area corrispondente all'apertura angolare di $40^\circ \times 40^\circ$. Gli ostacoli e le coperture sono tutti quegli elementi che si trovano sulla traiettoria del fascio laser e che producono un effetto ombra poiché non permettono il passaggio del segnale. Essi disegnano pertanto il contorno di dato mancante (*gap*) sulle superfici sottostanti o retrostanti.

L'allineamento di tutte le nuvole di punti, al fine di ricostruire un modello completo dell'area, richiede un'adeguata sovrapposizione, almeno a due a due, delle singole scansioni. Le aree di sovrapposizione sono rilevate in due o più scansioni da viste differenti; nelle operazioni di misura effettuate in campagna è fondamentale avere una informazione a priori sulle distanze in gioco per garantire una certa omogeneità nella densità dei punti e nella precisione. La fase di progettazione delle misure è stata realizzata inizialmente con una ispezione dell'area mediante il software Google Earth [GE, Google, 2020] per individuare le zone adatte alle misure nell'intorno delle Salse sul cammino di crinale dove l'altezza e la posizione siano idonee ad una osservazione del fondo, ossia dell'area di interesse. In particolare sono stati scelti cinque punti virtuali per le misure ed è stata qualitativamente inquadrata l'area di scansione per definire, in base alle caratteristiche tecniche del TLS a disposizione, la quantità di scansioni necessarie per ottenere una corretta copertura dell'area (Figura 3).

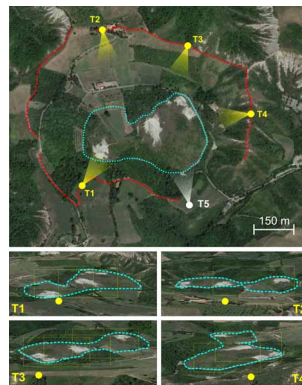


Figura 3 Ipotesi di rilievo TLS da navigazione GE. Viste e scelte dei punti di scansione. La linea rossa indica i sentieri percorsi. I punti in giallo da T1 a T4 sono quelli poi confermati dal sopralluogo mentre il punto T5 è stato scartato poiché non consentiva la vista delle Salse a causa della folta copertura boschiva. La linea tratteggiata azzurra indica la zona da rilevare di cui si intende ottenere il DTM ed i rettangoli gialli rappresentano le aree rilevabili da una singola scansione.

Figure 3 Measurement scheme from GE. Red line is the accessible path. Yellow points T1-T4 are the hypothesized locations for TLS measurements confirmed by inspection (T5 was rejected because of obstacles preventing scan sight). Blue line is the area for which a DTM should be generated while rectangles describe the Region of Interest for each scan.

A questa fase è seguito il sopralluogo per verificare l'ideoneità dei punti scelti, la reale accessibilità degli stessi ed eventuali problemi non prevedibili. Va sottolineato che lo studio virtuale di un sito tramite piattaforme di navigazione come GE ha un limite importante dovuto ai modelli digitali sui quali il dato di vegetazione viene "schiacciato", diventando una sorta di texture di superfici e non consente di comprendere se ci siano o meno ostacoli come alberi o boscaglia ad ostruire la vista reale delle aree sotto/sovrastanti (oltre, in alcuni casi, ad impedirne materialmente l'accesso). L'indagine in loco ha permesso quindi di confermare la scelta iniziale di quattro dei cinque punti di osservazione previsti e di organizzare la campagna di misura. Nella Figura 4 sono mostrate le viste dai punti Ti e sono riportate le immagini scattate per avere una visione completa dell'area da rilevare. Sono inoltre riportate le distanze effettive strumento-terreno al fine di agevolare la scelta dei settaggi per ottimizzare i tempi di scansione.

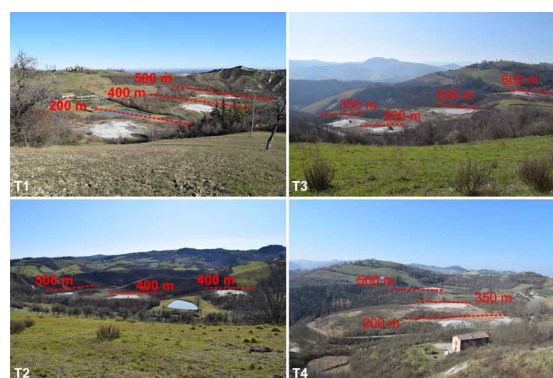


Figura 4 Viste dell'area dagli effettivi punti di scansione Ti. I tratteggi rossi ed i valori indicano la distanza strumento-oggetto per valutare in fase di misura il passo di campionamento più idoneo per garantire una buona copertura di punti su tutta l'area.

Figure 4 Images of the area taken from the scanning points Ti. Dotted lines and corresponding values show the instrument-target distances evaluated in order to determine the sampling step most suitable for a good representation of the whole area.

Nella Figura 5 è mostrato un grafico che riassume le caratteristiche strumentali, in termini di divergenza del fascio laser (cioè l'impronta a terra o spot) e passo di campionamento. In lavori precedenti [Pesci et al., 2011a] è stata affrontata la problematica relativa alla precisione delle scansioni o meglio alla risoluzione ottenibile, mettendo in evidenza che: 1) la risoluzione è legata alla divergenza ed al passo di campionamento; 2) c'è un limite non superabile di risoluzione pari a circa 1/3 dello spot.

Inoltre, vanno considerati i tempi della misura che avviene, in questo caso, con una frequenza di circa 2.5 kHz. I tempi di scansione sono un elemento fondamentale nella programmazione poiché devono essere tali da garantire la riuscita della campagna di rilievo compatibilmente con la durata delle batterie o delle fonti di alimentazione a disposizione degli operatori e, non di secondaria importanza, compatibilmente con il tempo a disposizione degli addetti ai lavori e accesso in sicurezza delle aree sterrate.

La scelta (arbitraria) di non superare tempi di 30-40 min per scansione e realizzare il rilievo in una giornata di lavoro comporta la scelta di un passo di campionamento 8-10 volte superiore a quello minimo (circa 1.8 mm per una distanza di acquisizione di 100 m), da cui nuvole di punti singolarmente caratterizzate da risoluzioni differenti in relazione alla distanza e direzione di acquisizione che, ai fini di analisi dati e allineamento, nella loro totalità potranno fornire una copertura abbastanza omogenea di punti con un passo di campionamento nell'intervallo 2-4 cm.

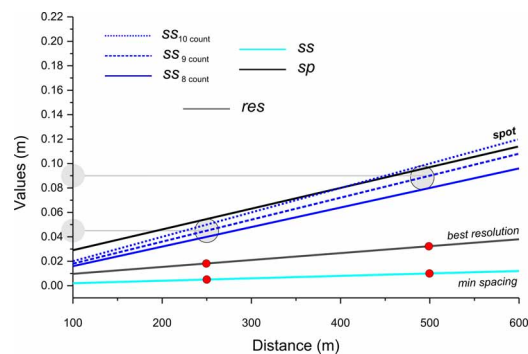


Figura 5 Nel grafico sono mostrati i valori, in base alla distanza di lavoro, della divergenza del fascio laser (sp), passo di campionamento minimo (ss) e multipli (ss_i) e risoluzione della nuvola di punti (res). Quest'ultimo valore rappresenta un limite non superabile di risoluzione a prescindere dal passo di campionamento utilizzato e vale per la strumentazione utilizzata. I pallini rossi ed i cerchi grigi corrispondono ai valori dei parametri su due distanze di riferimento di 250 m e 500 m. Questi elementi sono inseriti solo per aiutare il lettore a visualizzare i valori corrispondenti per distanze di lavoro tipiche in questa applicazione.

Figure 5 Laser beam divergence (sp), minimum sampling step (ss) and corresponding multiples (ss_i) and TLS point cloud resolution (res) plotted vs. acquisition distance. The latter value is a resolution limit that cannot be improved whatever the sampling step is. This value applies for the specific used instrument. Red and gray circles are inserted to better view the parameter values at 250 m and 500 m.

2. Rilievo

Il rilievo TLS è stato realizzato il 25 febbraio 2020. La strumentazione e gli accessori sono stati trasportati dagli operatori sul crinale per mettere lo scanner in stazione ed avviare le misure. Sono stati utilizzati: 1) lo strumento ILRIS 3D ER, trasportato con lo zaino omologato; 2) il gruppo elettrogeno Honda EU10i per l'alimentazione dello strumento; 3) treppiede e base in alluminio per lo strumento; 4) cavi, trasformatori e palmare per comandare lo strumento.



Figura 6 Strumentazione e trasporto sui punti di osservazione del crinale.

Figure 6 Instruments and packaging to each station point on the ridge.

Le scansioni sono state realizzate come da progettazione dai punti T_i già mappati in Figura 3 e le caratteristiche delle nuvole ottenute sono riassunte nella Tabella 2. Si noti come il passo di campionamento sia riferito alla distanza media strumento-oggetto, ragion per cui i valori, espressi in mm, rappresentano più che altro la copertura delle aree più lontane. Il contenuto di punti varia tra circa 2.5 e 7.5 milioni per scansione.

Posizione	ID	N	DR (m)	Count/Step (mm)	t (min)
T1	1	5650680	275.88	8/44.1	38
T1	2	2515760	370.28	8/59.2	17
T2	1	3080088	414.96	8/66.4	21
T3	1	2546481	226.24	10/45.2	17
T3	2	3349170	298.72	10/59.7	22
T3	3	3332580	393.40	9/70.8	22
T4	1	7581455	346.97	7/48.6	45
T4	2	3037180	312.40	9/56.2	20

Tabella 2 Riassunto dei dati principali inerenti al rilievo. Significato dei simboli: ID è il numero identificativo della scansione per ciascun punto di stazione, N è il numero di punti di ciascuna nuvola di punti; DR è la distanza media di acquisizione dal centro dello strumento; Count è il numero di unità angolari scelte per il campionamento; Step è il corrispondente passo di campionamento alla distanza DR.

Table 2 Point cloud main data. TLS station names, scan identification number (ID) for each station point, number of points measured in each scan (N), mean distance between instrument and measured surface (DR), angular multiple of minimum angular step (Count) and corresponding metrical value (Step) at the given distance and times for scanning (t) are summarized in this Table.

Le nuvole di punti sono presentate nelle figure seguenti, per ogni punto di stazione, al fine di mostrare la copertura effettiva delle aree osservate. Si noti come, in Figura 7 e 8, non sia stato acquisito alcun punto della superficie del laghetto artificiale. Ciò perché la lunghezza d'onda dello strumento TLS in dotazione (1535 nm) coincide con un picco di assorbimento da parte dell'acqua. Questo non è normalmente un problema e anzi, grazie all'assorbimento da parte dell'umor vitreo nel bulbo oculare, garantisce che lo strumento sia "eyesafe".

Dalle immagini di riferimento mostrate e dalle nuvole di punti si deduce altresì che le posizioni possibili per l'osservazione da terra non sono mai ottimali perché l'incidenza non è mai normale come sarebbe invece consigliabile. Nel contesto specifico sarebbe possibile operare in condizioni

di vista normale solo in caso di uso di laser scanning da drone pesante o da elicottero. Il sorvolo dell'area non è però consentito e richiederebbe pertanto specifica autorizzazione da parte dell'Autorità competente e, inoltre, richiederebbe oneri non indifferenti a causa della necessità di ricorrere ad Azienda esterna per il rilievo. In aggiunta, ciò impedirebbe l'attuazione di un rilievo speditivo. La rapidità del completamento del rilievo, dalla pianificazione all'esecuzione, e la sua indipendenza da dati o servizi offerti da terzi sarebbero pertanto compromesse.

Figura 7 Le due scansioni effettuate dal punto T1 (nome file P1-1, P1-2). In alto le ROI (Region of Interest), cioè le aree selezionate per la scansione (rettangoli verdi).

Figure 7 Scans from T1 (file name P1-1, P1-2) and corresponding point clouds. Green boxes describe each ROI (Region of Interest), i.e. the selected area for the scan process.

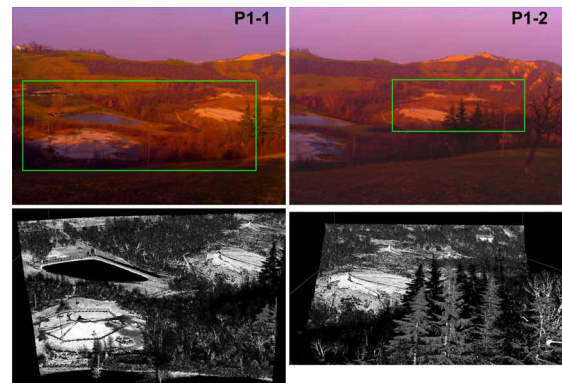


Figura 8 La scansione acquisita dal punto T2 (nome file P2-1). In alto la ROI. Notare che nessun punto della superficie del laghetto artificiale è restituito dal rilievo per via del picco di assorbimento dell'acqua descritto nel testo.

Figure 8 Scan from T2 (file name P2-1) and corresponding point cloud. The green box describes the ROI. Note the data gap corresponding to water in the pond due to electromagnetic absorption at TLS frequency.

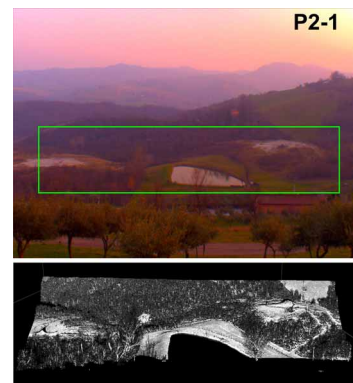


Figura 9 Le tre scansioni effettuate dal punto T3 (nome file P3-1, P3-2, P3-3), in cui sono specificate le ROI (rettangoli verdi).

Figure 9 Scans from T3 (file name P3-1, P3-2, P3-3) and corresponding point clouds. Green boxes describe the ROIs.

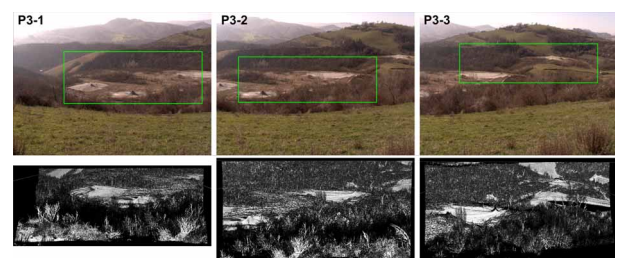
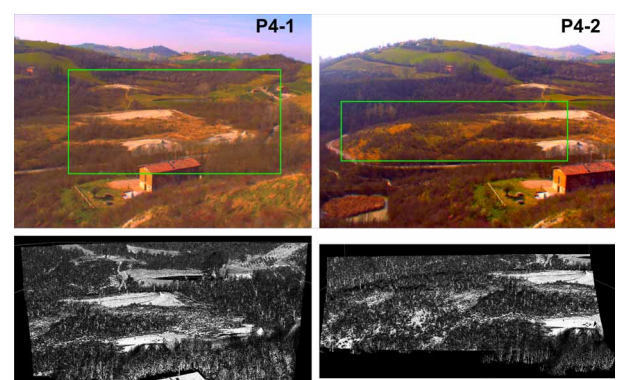


Figura 10 Le due scansioni effettuate dal punto T4 (nome file P4-1, P4-2). In alto le ROI (rettangolo verde).

Figure 10 Scans from T4 (file name P4-1, P4-2) and corresponding point clouds. Green boxes describe the ROI.



I dati sono stati processati mediante il software PolyWorks, secondo procedure ormai testate. Il dato è stato trattato ignorando i punti esterni all'area d'interesse e le zone interessate dalla fitta vegetazione al fine di semplificare le successive operazioni di allineamento e unione delle scansioni. Le nuvole di punti sono state allineate (tramite il modulo IMAlign) e unite insieme utilizzando l'algoritmo ICP (Iterative Closest Point) per creare un modello preliminare completo. La procedura è ormai ben conosciuta: si parte da un allineamento grossolano mediante il riconoscimento di punti omologhi su due immagini (nuvole di punti) e si procede alla rototraslazione. In seguito, si attua un ciclo di allineamenti automatici impostando il raggio di azione nell'intorno di ogni punto. Come meglio descritto in Pesci et al. [2007] il modulo di allineamento crea un modello 2.5D preliminare di lavoro (detto in PolyWorks "3D Image" anche se in effetti è un modello 2.5D, al pari di un DTM) e opera minimizzando le differenze tra gli elementi delle superfici considerate. Mediamente la precisione dell'allineamento, valutato di volta in volta durante le operazioni e estratto dalla statistica delle differenze tra le parti comuni alle scansioni rototraslate tra loro, è un valore più piccolo del passo di campionamento ed è di circa 6 mm (per confronto, il passo di campionamento è mediamente, nel caso qui descritto, 20-60 mm).

Nella Figura 11 è riportata la sequenza della fase di allineamento arbitrariamente scelta in base alla sovrapposizione tra le scansioni ed alla densità di punti.

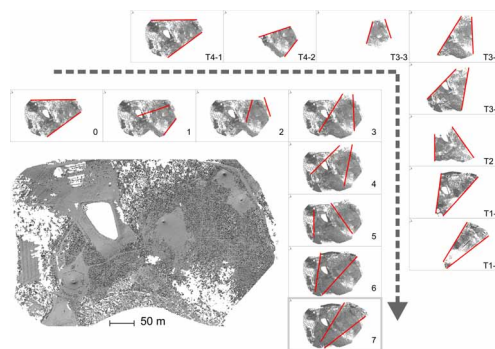


Figura 11 Allineamento delle scansioni. Le scansioni T_{ij} , dove i indica il punto di scansione e j il numero della scansione, vengono progressivamente allineate secondo la sequenza indicata in figura. Sotto, con i numeri da 0 a 7 (dove zero è la prima scansione) è la progressione di creazione della nuvola di punti totale composta, naturalmente, da tutte le scansioni allineate. Il modello finale, ingrandito a sinistra, è la copertura totale dell'area di studio.

Figure 11 Point cloud alignment sequence. The scans T_{ij} , where i states for the station point and j is the scan ID for the station point, are progressively aligned. The sequence of alignment/progressive generation of the whole point cloud is also shown in figure (please follow the arrow from 0 to 7). The final point cloud (left part of the figure) is the representation of the study area.

3. Risultati

È noto che un rilievo TLS fornisce punti in un sistema di riferimento locale. Lo strumento fornisce di per sé punti in coordinate polari, ma il software Optech Parser permette di ottenere dati espressi in un sistema cartesiano ortogonale. Per questo motivo occorre utilizzare informazioni esterne per fornire un risultato che sia inseribile in una banca dati GIS o comunque integrabile con rilievi di altra o simile natura. Alcuni strumenti (ad esempio i prodotti Teledyne Polaris o i Riegl della serie VZ) sono dotati di ricevitore GPS integrato per procedere alla georeferenziazione diretta, possibilmente mediante misure differenziali.

L'orientamento e la verticale del modello TLS dovrà essere ottenuto effettuando una rototraslazione con l'utilizzo di punti di coordinate note o, eventualmente, con procedure di allineamento su modelli precedentemente realizzati. Nel caso in cui lo scopo dello studio sia quello di ottenere, mediante il confronto di modelli multitemporali, un pattern di differenze non è necessario operare in un determinato e prestabilito sistema di riferimento esterno, ma è sufficiente operare in relativo. Tuttavia, la georeferenziazione è fondamentale quando le misure TLS debbano essere integrate da informazioni topografiche (GPS, livellazione, ecc.) al fine di realizzare uno studio multidisciplinare.

In questo lavoro preliminare la nuvola di punti totale delle Salse è stata georeferenziata estraendo dalla piattaforma GE le coordinate di 6 punti di riferimento visibili anche sul dato TLS e procedendo alla rototraslazione. Si ricorda che i dati TLS sono metrici e quindi non occorrono trasformazioni che comportino anche valutazioni di scala. Nella Figura 12 sono mostrati i 6 punti estratti da GE e i corrispondenti estratti dal modello TLS, poi roto-traslato nel sistema di riferimento WGS84 UTM32 (nel seguito detto semplicemente UTM).

Point	East (m)	North (m)	H (m)
O	644000	4930000	204
R1	644783	4930457	219
R2	644831	4930594	208
R3	644928	4930571	207
R4	644987	4930538	204
R5	645051	4930659	207
R6	645113	4930589	206

Tabella 3 Sei punti selezionati da GE per georeferire la nuvola di punti. Le coordinate sono fornite senza valori decimali perché è richiesta solo una registrazione grossolana.

Table 3 Coordinates of six selected points extracted from GE to roughly but quickly register TLS models into an external UTM reference frame.

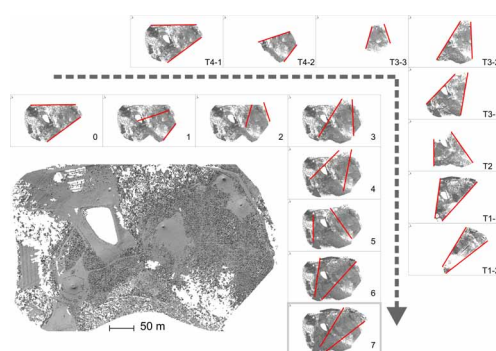


Figura 12 Individuazione di punti di riferimento estratti da GE e corrispondenti individuati nella nuvola di punti (immagini a sinistra e nuvole di punti a destra). Sotto, un dettaglio in merito ai punti R1 e P1. O indica una origine arbitraria utilizzata al fine di ridurre le cifre delle coordinate per consentire un corretto uso del software PolyWorks. Viene qui inserita per non perdere una informazione che potrebbe servire in futuro nella gestione di file di coordinate x, y, z.

Figure 12 Recognition of reference points extracted from GE and corresponding points recognized in the point cloud (images on the left and point clouds on the right). Below, a detail about R1 and P1, where O indicates an arbitrary origin used to contain the number of digits of the coordinate data for a correct use of PolyWorks. This origin is shown here in order not to lose information that could be used in the future management of coordinate files.

Riguardo alla fase preliminare di georeferenziazione appena descritta, va ancora sottolineato che i punti estratti con una precisione bassa sono serviti solo ed esclusivamente per inserire in modo grossolano il modello TLS nel sistema UTM. Ciò non altera la precisione e la bontà del dato TLS che conserva, internamente, la densità e la precisione di alcuni centimetri. In prima analisi è stata realizzata la mappa morfologica dell'area utilizzando un piano orizzontale come riferimento al fine di mettere in risalto i dislivelli presenti nell'assetto generale. Le altezze relative dei coni di fango, le aree libere da vegetazione nonché le aree fittamente vegetate, la presenza di un corso d'acqua e relativa depressione del terreno sono immediatamente evidenziate dalla mappa delle differenze punto-piano in Figura 13.

Le mappe delle differenze, o morfologiche, hanno un ottimo rapporto segnale/rumore, nel senso che permettono di osservare la disposizione dei punti nello spazio con una alta densità di informazione e di creare un *contouring* molto netto a descrivere la situazione all'epoca del rilievo.

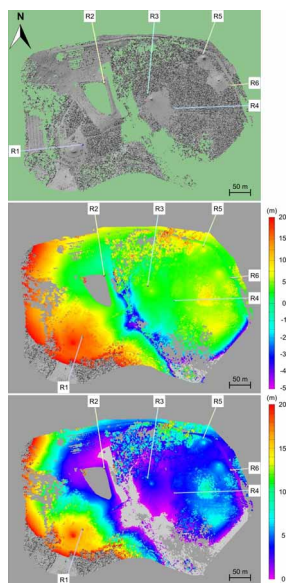


Figura 13 Morfologia dell'area presentata come mappa delle differenze tra i punti misurati ed un piano orizzontale e arbitrario di riferimento scelto per far risaltare le variazioni di quota e le depressioni di una zona prevalentemente piatta. Sono anche riportati i punti di riferimento Ri per permettere una migliore lettura delle mappe.

Figure 13 Morphology of the area shown as a map of the differences between the measured points and a horizontal, arbitrary reference plane chosen in order to bring out the variations in altitude and depressions of a predominantly flat area. In order to allow a better reading of the maps, the reference points Ri are also shown.

Una delle possibilità, nel monitoraggio, è proprio quella di confrontare le mappe morfologiche multi-temporali, ottenute dall'ispezione di DTM già tra loro allineati ed utilizzando la stessa primitiva (nel caso specifico un piano) di riferimento. Nel confronto diretto tra due modelli, cioè creando la mappa delle differenze tra i due modelli, ci si trova nella condizione di dovere interpretare un risultato affetto da un duplice errore (somma degli errori di ogni modello). Questo può essere un ostacolo non superabile nel caso in cui si cerchino piccole differenze che potrebbero essere nascoste dal rumore e rendere così non interpretabile, o meglio difficilmente interpretabile, il risultato. La questione è discussa ampiamente in Pesci et al. [2013]. Anche se tale lavoro si riferisce in effetti all'analisi morfologica di edifici in muratura antichi, le valutazioni espresse si applicano senza variazioni anche nel caso dell'analisi morfologica di superfici naturali. Nella Figura 14 si mostra l'approccio principale scelto per l'inizio dello studio dell'evoluzione nel tempo dell'area a partire dal modello di riferimento descritto in questo rapporto. La strategia si baserà sulla suddivisione dell'area in 4 zone specifiche che verranno trattate sia collettivamente, sia singolarmente per produrre le mappe dettagliate delle differenze punto-piano rispettivamente di tutta l'area e delle 4 sotto aree nell'intorno dei vulcanelli principali. In questo modo sarà possibile, utilizzando gli stessi piani di riferimento, controllare l'assetto del terreno e le variazioni nel tempo. Le zone di interesse comprendono ovviamente sia i principali punti di estrusione che un loro intorno di svariate decine di metri di lato per valutare non soltanto il fenomeno superficiale ma per comprendere se sia possibile osservare variazioni correlate come rigonfiamenti o depressioni precedenti agli eventi.

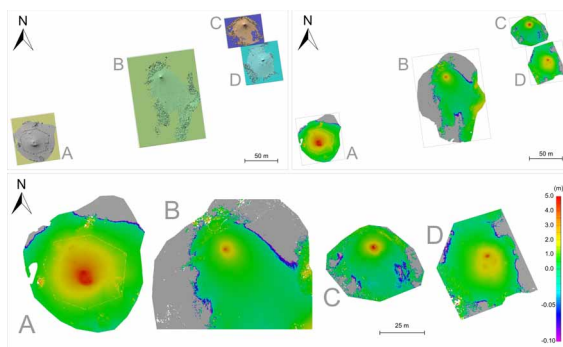


Figura 14 Mappa delle differenze punto-piano su 4 aree indipendenti nell'intorno dei vulcanelli.
Figure 14 Differences maps (point-plane differences) in the 4 main interesting zone of mud volcanoes.

4. Work in progress

Il lavoro presentato si colloca in una fase di studio preliminare per la messa a punto di una efficace metodologia di monitoraggio delle Salse di Nirano, basata su campagne di misura speditive, non invasive e ripetibili nel tempo.

È stata per questo istituita nei primi mesi dell'anno 2020 una rete di caposaldi (Rete Bacchetti) come riferimento per le varie campagne di misura geofisiche. Nella Figura 15 è mostrata schematicamente la rete GPS per le misure ed il monitoraggio puntuale di capisaldi monumentati nell'area di studio. Si tratta principalmente di pali di metallo e di legno inseriti nel terreno ad una profondità alcuni metri che possono essere misurati mediante campagne di misura discrete, cioè realizzate a cadenza regolare durante l'anno installandovi strumentazione GPS operante per sessioni giornaliere di acquisizione dati.

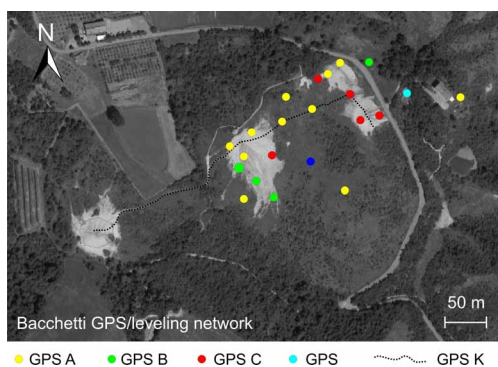


Figura 15 La Rete Bacchetti, istituita presso le Salse di Nirano. GPS A: pali metallici; GPS B: pali di legno; GPS C: pali Enel. Il cerchio azzurro rappresenta un punto monumentato su un grande ceppo presente nell'area e saldamente ancorato al terreno. La linea tratteggiata indica una traiettoria percorribile per rilievi GPS cinematici (GPS K).

Il cerchio blu rappresenta un ulteriore punto di riferimento per misure topografiche.

Figure 15 Bacchetti network for GPS and topographic measurements in the study area. GPS A: metal poles; GPS B: wood poles; GPS C: Enel's poles. The light blue circle is a point monumented on a natural big stump firmly anchored to the ground. Black dashed line is an example of possible path for kinematic GPS (GPS K) measurements.

The blue circle is another reference point for topographical measurements.

Compatibilmente con le condizioni di lavoro imposte in un momento di Emergenza Sanitaria nazionale e nel rispetto delle norme per combattere la diffusione del virus Sars-Cov-2 sono previste, entro fine 2020, le seguenti campagne di misura:

1. Campagna TLS mediante ILRIS 3D ER: ottobre 2020
2. Campagna TLS mediante strumento Polaris-Teledyne: novembre 2020
3. Campagna fotogrammetrica SfM (Structure from Motion): ottobre 2020
4. Campagna GPS: settembre-novembre 2020
5. Campagna di Livellazione: settembre-novembre 2020
6. Campagna gravimetrica: settembre-ottobre 2020

Il punto 2 prevede l'impiego di una strumentazione più evoluta rispetto al modello TLS in dotazione all'INGV. Si tratta di uno strumento estremamente veloce con una alta frequenza di acquisizione (superiore a 50 kHz per le distanze in gioco in questo rilievo) e con un campo visivo di 360° in orizzontale e 120° in verticale ma che, dal punto di vista del segnale utilizzato e delle peculiarità di divergenza del fascio laser e passo di campionamento è del tutto simile allo strumento ILRIS 3D ER. La scelta del periodo autunnale per la realizzazione delle campagne di misura è motivata dalla presenza meno invasiva della vegetazione.

Bibliografia

- Castaldini D., Coratza P., De Nardo M.T., (2017). *Geologia e Geomorfologia delle Salse di Nirano*. Atti Soc. Nat. Mat. Modena, 148 – Supplemento, 23-58.
- European Community, (2019). *Natura 2000, site IT4040007 "Riserva Naturale Regionale Salse di Nirano"*, disponibile al sito <https://natura2000.eea.europa.eu/natura2000/SDF.aspx?site=IT4040007> (ultimo accesso: 02.09.2020).
- Google, (2020). Sito web di Google Earth, disponibile al sito <https://www.google.com/earth/> (ultimo accesso: 03.09.2020).
- Pesci A., Bonali E., Teza G., Casula G., (2010). *TLS point clouds texturing: the manual of matching viewer software*. Rapporto Tecnico INGV 169, 13 pp.
- Pesci A., Bonelli F., Teza G., Perikleous A.L., (2015). *L'analisi morfologica di dati TLS per individuare variazioni ed irregolarità in relazione allo stato deformativo di un monumento: valutazione del metodo e applicazioni*. Rapporto Tecnico INGV 305, 27 pp.
- Pesci A., Loddo F., Conforti D., (2007). *The first terrestrial laser scanner application over Vesuvius: High resolution model of a volcano crater*. International Journal of Remote Sensing, 28(1), 203-219. <https://doi.org/10.1080/01431160500534473>
- Pesci A., Teza G., Bonali E., Casula G., Boschi E., (2013). *A laser scanning-based method for fast estimation of seismic-induced building deformations*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 79, 185-198. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.02.021>
- Pesci A., Teza G., Bonali E., (2011a). *Terrestrial laser scanner resolution: numerical simulations and experiments on spatial sampling optimization*. Remote Sensing, 3(1), 167-184. <https://doi.org/10.3390/rs3010167>
- Pesci A., Teza G., Casula G., Bonali E., Tarabusi G., Boschi E., (2011b). *Esperienza di misura mediante lo strumento Tromino per lo studio delle vibrazioni e delle sollecitazioni naturali e antropiche*. Rapporto Tecnico INGV 203, 31 pp.
- Pesci A., Teza G., Casula G., Loddo F., De Martino P., Dolce M., Obrizzo F., Pingue F., (2011c). *Multitemporal laser scanner-based observation of the Mt. Vesuvius crater: characterization of overall geometry and recognition of landslide events*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66(3), 327-336. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.12.002>
- Teza G., Pesci A., Trevisani S., (2015). *Multisensor surveys of tall historical buildings in high seismic hazard areas before and during a seismic sequence*. Journal of Cultural Heritage, 16(3), 255-266. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.06.008>

QUADERNI di GEOFISICA

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/quaderni-di-geofisica.html/>

I QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) accolgono lavori, sia in italiano che in inglese, che diano particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari che necessitano di rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. Per questo scopo la pubblicazione on-line è particolarmente utile e fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi. I QUADERNI DI GEOFISICA sono presenti in "Emerging Sources Citation Index" di Clarivate Analytics, e in "Open Access Journals" di Scopus.

QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) welcome contributions, in Italian and/or in English, with special emphasis on preliminary elaborations of data, measures, and observations that need rapid and widespread diffusion in the scientific community. The on-line publication is particularly useful for this purpose, and a multidisciplinary Editorial Board with an accurate peer-review process provides the quality standard for the publication of the manuscripts. QUADERNI DI GEOFISICA are present in "Emerging Sources Citation Index" of Clarivate Analytics, and in "Open Access Journals" of Scopus.

RAPPORTI TECNICI INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/rapporti-tecnici-ingv.html/>

I RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico come manuali, software, applicazioni ed innovazioni di strumentazioni, tecniche di raccolta dati di rilevante interesse tecnico-scientifico. I RAPPORTI TECNICI INGV sono pubblicati esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) publish technological contributions (in Italian and/or in English) such as manuals, software, applications and implementations of instruments, and techniques of data collection. RAPPORTI TECNICI INGV are published online to guarantee celerity of diffusion and a prompt access to published data. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

MISCELLANEA INGV

ISSN 2039-6651

http://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/miscellanea-ingv.html

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favorisce la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV. In particolare, MISCELLANEA INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli, ecc. La pubblicazione è esclusivamente on-line, completamente gratuita e garantisce tempi rapidi e grande diffusione sul web. L'Editorial Board INGV, grazie al suo carattere multidisciplinare, assicura i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi sottomessi.

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favours the publication of scientific contributions regarding the main activities carried out at INGV. In particular, MISCELLANEA INGV gathers reports of scientific projects, proceedings of meetings, manuals, relevant monographs, collections of articles etc. The journal is published online to guarantee celerity of diffusion on the internet. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

Coordinamento editoriale

Francesca DI STEFANO
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Progetto grafico

Barbara ANGIONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Impaginazione

Barbara ANGIONI
Patrizia PANTANI
Massimiliano CASCONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

©2022

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605
00143 Roma
tel. +39 06518601

www.ingv.it



Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA