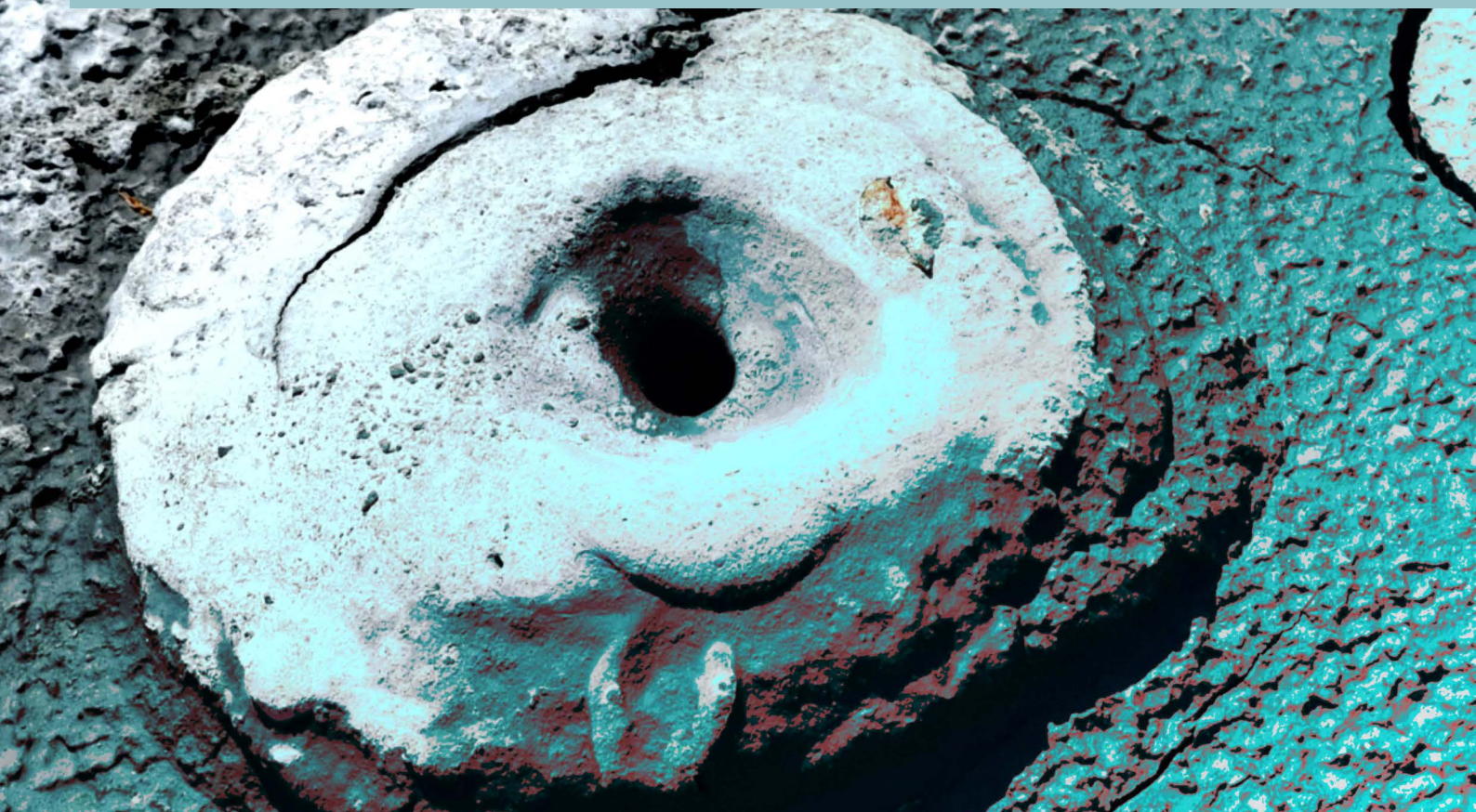




QUADERNI di GEOFISICA

Evoluzione morfologica della
Salsa del Dragone, vulcano di fango
dell'Appennino bolognese:
dati storici e indagini moderne



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

202

**Direttore Responsabile**

Daniela VERSACE

Editor in Chief

Milena MORETTI

Editorial Board

Laura ALFONSI

Sofia BARANELLO

Carla BARNABA

Christian BIGNAMI

Simona CARANNANTE

Maria Grazia CIACCIO

Luca COCCHI

Luigi CUCCI

Lorenzo CUGLIARI

Elisabetta D'ANASTASIO

Alessia DI CAPRIO

Roberto DI MARTINO

Domenico DI MAURO

Domenico DORONZO

Filippo GRECO

Alessandro IAROCCI

Mario MATTIA

Daniele MELINI

Anna NARDI

Lucia NARDONE

Marco OLIVIERI

Arianna PESCI

Stefano PINTORE

Pierangelo ROMANO

Paola SBARRA

Davide SCAFIDI

Maurizio SOLDANI

Sara STOPPONI

Umberto TAMMARO

David ZULIANI

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

© INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Rappresentante legale: Presidente INGV

Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma

Tutti i diritti riservati

www.ingv.it



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

QUADERNI di GEOFISICA

Evoluzione morfologica della
Salsa del Dragone, vulcano di fango
dell'Appennino bolognese:
dati storici e indagini moderne

*Morphological evolution of the
Salsa del Dragone mud volcano (Italy):
historical data and modern investigations*

Arianna Pesci*, Fabiana Loddo

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

*Corresponding author

Accettato 4 giugno 2026 | Accepted 4 June 2026

Come citare | How to cite Pesci, A., Loddo, F. (2026). Evoluzione morfologica della Salsa del Dragone, vulcano di fango dell'Appennino bolognese: dati storici e indagini moderne. *Quaderni di Geofisica*, 202, 30 pp. <https://doi.org/10.13127/qdg/202>

In copertina elaborazione grafica di una bocca di emissione della Salsa del Dragone, realizzata a partire da una fotografia di Arianna Pesci (autrice) | Cover graphic elaboration of a mud vent at the Salsa del Dragone, based on a photograph by the Arianna Pesci (author)

202

INDICE

Riassunto	7
<i>Abstract</i>	7
Introduzione	8
1. Cenni di Geologia	9
2. Le Memorie Geografiche	10
2.1 Osservazioni del Dragone (1906-1907)	11
3. Informazioni da telerilevamento	13
3.1 Allineamento dello schema planimetrico	14
4. Le informazioni da misure sismiche	15
5. Evidenze e Conclusioni	17
Ringraziamenti	18
Referenze	18
Sitografia	21

Riassunto

La Salsa del Dragone rappresenta un esempio emblematico di vulcano di fango in un contesto geologico complesso, quello dell'Appennino settentrionale italiano, dove fenomeni di emissione di fluidi e fanghi si manifestano in terreni argillosi poco consolidati e lungo sistemi di fratture permeabili. La rilettura in chiave moderna dei rilievi storici consente di ampliare l'intervallo temporale di studio, offrendo nuove evidenze sulla cinematica della salsa. I rilievi di Renato Biasutti (1906-1907) documentano la morfologia del sito, la disposizione delle bocche e le caratteristiche del fango, fornendo un prezioso riferimento per confronti con la situazione attuale.

Le campagne recenti, condotte tra il 2023 e il 2025 nell'ambito del progetto PROMUD (*PROtocol for MUD volcanoes*), hanno prodotto dati dettagliati della superficie interessata, grazie a rilievi UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) fotogrammetrici che hanno generato ortofoto e mappe precise. L'integrazione dei dati storici con quelli moderni ha permesso di individuare elementi comuni e di allineare le informazioni, confrontando la distribuzione superficiale del 1906-1907 con quella attuale.

L'incrocio con dati geofisici, ottenuti da misure sismiche passive e attive, ha consentito di formulare un'ipotesi sull'evoluzione della Salsa del Dragone, interpretata come un fenomeno di retrocessione del terreno circostante, confermando le ipotesi già avanzate da Biasutti nel 1907. I risultati offrono inoltre un punto di partenza solido per future campagne di misura, sia aeree sia terrestri.

Abstract

The Salsa del Dragone represents an emblematic example of a mud volcano in a complex geological setting, the northern Apennines of Italy, where fluid and mud emissions occur in poorly consolidated clayey soils and along permeable fracture systems. A modern reinterpretation of historical surveys allows the temporal range of study to be extended, providing new insights into the mud volcano's dynamics. The surveys by Renato Biasutti (1906-1907) document the site's morphology, the arrangement of vents, and the characteristics of the mud, offering a valuable reference for comparison with the current situation.

*Recent campaigns, carried out between 2023 and 2025 within the PROMUD (*PROtocol for MUD volcanoes*) project, produced detailed data on the affected surface using UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) photogrammetric surveys, generating precise orthophotos and maps. The integration of historical and modern data allowed common features to be identified and information to be aligned, comparing the surface distribution of 1906-1907 with the present-day configuration.*

Cross-referencing these data with geophysical measurements, obtained from both passive and active seismic surveys, enabled the formulation of a hypothesis on the evolution of the Salsa del Dragone, interpreted as a process of retreating terrain around the mud volcano, thus confirming hypotheses already suggested by Biasutti in 1907. These results also provide a solid starting point for future aerial and terrestrial survey campaigns.

Keywords Salsa del Dragone; Morfologia; Dati Storici | Salsa del Dragone; Morphology; Archival Data

Introduzione

I vulcani di fango sono particolari strutture geologiche generate dalla risalita verso la superficie di gas, fluidi e sedimenti fini provenienti dal sottosuolo. Il materiale emesso è generalmente costituito da metano, acqua salata e argille, o altri sedimenti a grana fine, con frammenti di roccia, che fuoriescono attraverso uno o più condotti emissivi. Questa miscela fluisce seguendo la morfologia del terreno in modo analogo alle colate dei vulcani magmatici [Mammìno, 2014].

La morfologia di un vulcano di fango dipende principalmente dalle caratteristiche del materiale estruso e una sequenza di colate può generare strutture coniche, con versanti più ripidi all'aumentare della viscosità del materiale, mentre emissioni ricche di acqua tendono a produrre morfologie più appiattite con estensione su aree più ampie. Alla sommità può essere presente una tipica depressione simile a una caldera, formata in seguito a eruzioni intense o a fenomeni di collasso e le dimensioni dei coni variano notevolmente, da pochi centimetri a diverse centinaia di metri, in campi che possono estendersi fino ad alcuni chilometri [Alyiev et al., 2002, 2024; Jung e Grasso, 2014].

Questi fenomeni si sviluppano generalmente in contesti tettonici compressivi o in bacini caratterizzati da elevati tassi di sedimentazione con una formazione legata alla presenza di sequenze di sedimenti fini poco consolidati che intrappolano fluidi sovra-pressurizzati. Processi tettonici, disidratazione delle argille e generazione di idrocarburi contribuiscono all'aumento della pressione dei fluidi, favorendo la fratturazione degli strati sovrastanti e la risalita verso la superficie di gas, acqua e sedimenti attraverso sistemi di fratture permeabili [Milkov et al., 2005; Bonini et al., 2009; Mazzini e Etiope, 2017].

In Italia queste manifestazioni sono concentrate principalmente in alcune aree dell'Appennino settentrionale e della Sicilia, in cui sono presenti significativi depositi argillosi. Il contesto geologico dell'Appennino settentrionale è legato alla tettonica compressiva che ha portato alla chiusura dell'Oceano ligure-piemontese, terminata nell'Eocene Medio e alla successiva formazione della catena appenninica a seguito della collisione tra le placche continentali Europea e Adriatica. Le litologie del margine adriatico sono state quindi progressivamente deformate e incorporate nella catena, costituita prevalentemente da unità carbonatiche mesozoiche e terziarie. Questo contesto strutturale ha favorito la presenza di emissioni di fluidi e gas lungo zone di discontinuità tettonica, come alcune importanti strutture trasversali [Vannoli et al., 2023], attraverso sistemi di fratture profondi. Nel settore meridionale, e in particolare in Sicilia, i vulcani di fango sono invece associati ai processi compressivi legati alla convergenza tra la placca africana e quella eurasiatica e alla presenza di potenti successioni argillose e evaporitiche, che favoriscono la migrazione di fluidi profondi verso la superficie [De Nardo, 2019]. Tra i siti più noti si ricordano le Salse di Nirano in Emilia-Romagna e le Maccalube di Aragona in Sicilia, dove emissioni di fango e gas rappresentano esempi spettacolari di questo fenomeno. Entrambi i siti costituiscono importanti geositi di interesse scientifico e naturalistico [Accaino et al., 2009; Lupi et al., 2016; Gattuso et al., 2021; Antunes et al., 2022; Madonia et al., 2025].

Nel periodo 2023-2025, l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia ha finanziato, nell'ambito del programma Pianeta Dinamico, un progetto finalizzato allo studio di questi fenomeni, con particolare attenzione allo sviluppo di un protocollo di monitoraggio (PROMUD – *PROtocol for MUD volcanoes*) e all'analisi dei meccanismi ad essi associati [1].

Uno dei principali soggetti dello studio è la Salsa del Dragone, una delle zone più iconiche e storicamente rilevanti dell'Appennino bolognese. Situata nel bacino del torrente Sillaro, in località Sassuno (territorio del comune di Monterenzio), questa formazione si inserisce nel contesto argilloso del margine adriatico, deformato e fratturato durante la compressione appenninica. Nota sin dall'antichità per le sue spettacolari "eruzioni", ha affascinato

viaggiatori e naturalisti per secoli, come ricorda Biasutti [1907], attingendo a una ricca storiografia naturalistica. Qui, tra i riferimenti storici più significativi si ricordano Molina [1821] e Bianconi [1840], che descrissero attività parossistiche impressionanti, tali da modificare visibilmente l'aspetto dell'area. Esiste anche una vasta bibliografia relativa a osservazioni e studi del XIX secolo, tra cui Ménard de la Groye [1818], Calindri [1829], Bombicci [1882] e Pagani [1900], che documenta sistematicamente le salse e le sorgenti di gas nel territorio emiliano.

Il presente contributo parte proprio dalla spedizione realizzata tra il 1906 e il 1907 da Biasutti [1907], che al momento del suo rilievo, descrisse la zona come un vasto campo di attività in cui, accanto a periodi di relativa calma, persisteva un'intensa esalazione di idrocarburi gassosi. Nelle pagine della sua relazione, l'autore elabora l'innovativa "teoria dell'ablazione", proponendo una visione della salsa non solo come apparato costruttivo (il cono), ma anche come potente agente di distruzione del rilievo. Le osservazioni portarono a comprendere come l'emissione continua di acque salse e gas agisse sulle "Argille Scagliose" come un solvente, rompendone la coesione e favorendo il dilavamento meteorico, fino alla formazione di ampie "cavità circoidi", anfiteatri naturali che testimoniano come la salsa letteralmente "divori" il versante dall'interno, provocando arretramenti morfologici e frane.

La raccolta di queste esperienze passate, tradotta in materiale quantitativo utilizzabile, può contribuire a estendere l'intervallo di osservazione e a comprendere l'evoluzione morfologica e l'attività della Salsa in un arco temporale di circa 120 anni, confrontando i rilievi storici di inizio secolo con i moderni dati ottenuti dalle campagne di telerilevamento e monitoraggio del progetto PROMUD.

1. Cenni di Geologia

Le Salse del Dragone sono situate nell'Appennino bolognese, poco a est del fiume Sillaro, in prossimità dell'abitato di Sassuno. L'area si colloca lungo il margine pedemontano del settore centro-settentrionale degli Appennini, caratterizzata dalla presenza della struttura trasversale Prato-Sillaro [Vannoli et al., 2014] e dove le unità interne del complesso piegato e sovrascorrente si affacciano verso la Pianura Padana. La geologia dell'area è caratterizzata dalla presenza di formazioni argillose tettonizzate appartenenti alle Argille Varicolori (Cretaceo inferiore - Eocene), intercalate con arenarie e marne della successione Epiligure, tra cui le formazioni di Loiano, Monte Piano, Antognola e Contignaco (Eocene - Miocene inferiore). Questi terreni, sottoposti a intensa deformazione tettonica, mostrano fratturazioni e faglie ad alto angolo che possono costituire percorsi preferenziali per la risalita dei fluidi profondi [Martinelli e Jude, 2004; Maestrelli et al., 2019].

Il plateau emissivo delle Salse del Dragone, alto circa mezzo metro rispetto al terreno circostante, poggia su depositi colluviali e detritici recenti, spesso associati a lenti movimenti del terreno e a colate di fango legate all'attività del vulcano stesso. Le emissioni storiche e recenti indicano una distribuzione concentrica delle bocche, mentre la carta geologica regionale [2] evidenzia la presenza di un possibile gradino topografico sul versante occidentale e di corpi marno-argillosi più rigidi a ovest e a nord-ovest.

La combinazione di substrato argilloso, colate recenti e importanti discontinuità strutturali, crea un contesto ideale per la formazione e la persistenza di questo tipo di "vulcano" sedimentario. La Figura 1 mostra la carta geologica dell'area di studio estratta dalla carta interattiva redatta dalla Regione Emilia-Romagna. La mappa evidenzia la presenza di depositi quaternari, frane attive e quiescenti e strutture tettoniche, che contribuiscono a definire il contesto geologico e geomorfologico nel quale si sviluppano i fenomeni lutivomi osservati.

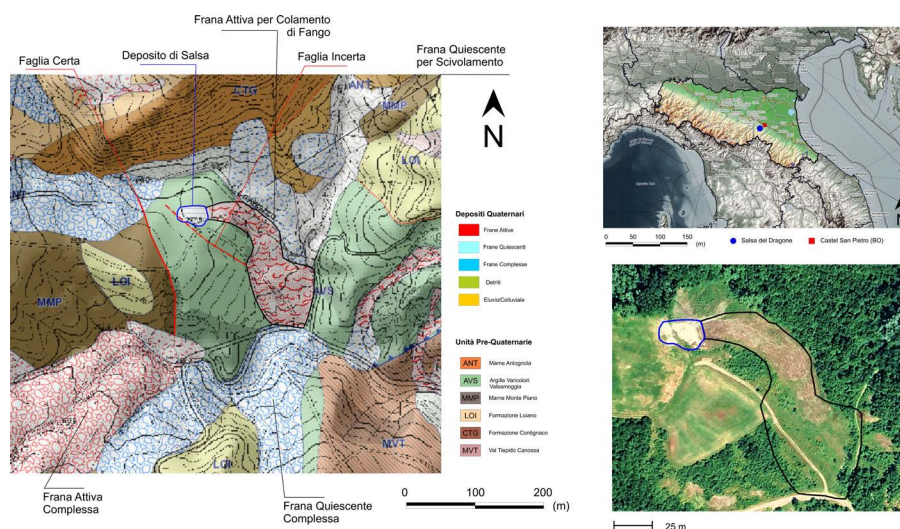


Figura 1 La geologia dell'area (Sassuno, Bologna) come riportata nel sito ufficiale della Regione Emilia Romagna [2] e un inquadramento geografico.

Figure 1 Geology of the area (Sassuno, Bologna) as reported on the official website of the Emilia-Romagna Region [2], along with a geographic overview.

2. Le Memorie Geografiche

Renato Biasutti, nel suo lavoro “Materiali per lo studio delle salse/Le salse dell’Appennino settentrionale”, pubblicato nel secondo numero delle “Memorie Geografiche” curate da Giotto Dainelli, propone un approccio scientifico rigoroso allo studio delle manifestazioni lutivome in Italia, integrando osservazioni dirette sul campo con un’ampia analisi bibliografica [Biasutti, 1907; Dainelli, 1907]. La sua opera assume un taglio marcatamente geografico e morfologico, concentrandosi sulle forme assunte dalle salse e sulle profonde modificazioni che esse apportano al paesaggio circostante.

La ricerca, condotta tra l’estate 1906 e la primavera 1907, censisce le salse delle province emiliane di Parma, Reggio Emilia, Modena e Bologna, con rilievi dettagliati per siti come Rivalta, Regnano, Nirano, Sassuolo e la celebre Salsa del Dragone. La relazione è articolata in tre sezioni: un catalogo descrittivo corredato di rilievi morfometrici, una sintesi tematica su nomenclatura e prodotti emessi, un’appendice geochimica curata dal dott. Grassini sulle analisi di fanghi e gas. Biasutti introduce una nomenclatura precisa per le forme superficiali (spiraglio, bocca lutivoma, cono, cavità circoide) e identifica nelle argille scagliose il “terreno produttore”.

Tuttavia, il contributo più originale risiede nella sua teoria dell’ablazione, che eleva la salsa ad agente geomorfologico attivo. Secondo Biasutti, l’attività non è solo costruttiva (formazione di coni), ma intrinsecamente erosiva: la salsa agisce come un solvente che “divora” il rilievo dall’interno.

Attraverso un processo che definiamo oggi di “ringiovanimento” del paesaggio, l’emissione di acque salse e gas altera la coesione delle argille, trasformandole in masse fluide facilmente asportabili dagli agenti meteorici. Questo meccanismo genera quelle che lui definisce le “cavità circoidi”, anfiteatri naturali in cui il versante arretra e il suolo si abbassa progressivamente. In quest’ottica, la salsa non si limita a sovrapporsi al paesaggio, ma ne determina lo smantellamento meccanico.

Le osservazioni di Biasutti, che confermano il carattere “freddo” delle emissioni e l’origine organica dei gas, forniscono un contesto ideale per confronti con dati attuali. In particolare, la sua analisi offre una chiave di lettura preziosa per valutare l’evoluzione della Salsa del Dragone, sito su cui, nonostante l’evidente dinamismo morfologico, la bibliografia moderna rimane tuttora frammentaria. Il lavoro di Biasutti permette così di ricostruire la “memoria” di questi luoghi, documentando fasi di attività e di erosione che altrimenti risulterebbero perdute. Nella Figura

2 sono riportati i passaggi della relazione originale relativi alla Salsa del Dragone. Le pagine sono presentate nel loro formato originale, mentre, per finalità di divulgazione e consultazione scientifica, la trascrizione in formato digitale editabile è fornita in Appendice.

Il paragrafo seguente riassume in una lista le principali evidenze riportate, tra cui localizzazione, contesto geologico, morfometria e composizione dei coni, per un quadro completo e più facilmente confrontabile con i rilievi attuali.

2.1 Osservazioni del Dragone (1906-1907)

La relazione storica sulle osservazioni della salsa offre un quadro geografico e geologico particolarmente chiaro e ben strutturato. Le informazioni contenute nel documento permettono di comprendere con precisione sia la disposizione spaziale delle salse, sia le caratteristiche principali del contesto ambientale e geologico in cui si inseriscono. Per facilitare la lettura e l'analisi dei dati presentati, tali osservazioni possono essere sintetizzate e organizzate attraverso una serie di punti chiave che mettono in evidenza gli aspetti più significativi emersi dalla relazione originale.

1. Localizzazione: 226 m s.l.m., su un ripiano a destra di un affluente del Rio di Sassuno (coordinate 44° 20' 10" N, 0° 59' 50" O), con argille scagliose, calanchi e frane circostanti; marne grigie mioceniche a nord.
2. Contesto geologico: la salsa è legata a una faglia trasversale con idrocarburi e sali nel sottosuolo, confermati da fonti d'acqua con velo di petrolio, sorgenti solfuree e un vecchio pozzo sotto la chiesa di Sassuno.
3. Morfometria: campo semicircolare inclinato verso valle, con gradino netto al margine superiore e spiragli piccoli paralleli al bordo. I coni attivi nel 1906 avevano una dimensione di circa 1.3 m di diametro alla base e 0.3 m di altezza, con inclinazione media di 22° e bocca di 10 cm.
4. Frana adiacente: a est, una "smotta" argillosa lunga 10-15 m distinta dal fango, identificata come materiale detritico di frana (Figura 3).
5. Attività: intermittente; dove ostruzioni artificiali dei coni provocavano la formazione immediata di nuovi conetti vicini; ipotesi di arretramento del versante.
6. Composizione: colate ricche di bitume che mostrano una temperatura simile a quella ambientale; composizione del "fango" nelle percentuali di 80.3% argilla, 19% sabbia e frammenti, 0.95% sostanze solubili (principalmente cloruro di sodio, tracce di acido solforico e calcio).

19. La salsa detta « Il Dragone », presso Sassuno. — (F. 88, Tav.: « Varignana Superiore »; 0° 59' 50" O., 44° 20' 10" N.). Pag. 145

La prima notizia per essere in As. MUSEO (Museo di Storia Naturale, Bologna, 1906), e nel Museo di la GROVE (op. cit. al § 1). Se si vuole poi il CULMINI (disegno statistico storico del piano della Salsa, Perugia, 1902), il BIANCONI (op. cit. al § 1, pag. 50 e segg.) e FORTI (disegno op. cit. al § 1), che ne analizzano il gas. Pochi più recenti sono il PIZZI (op. cit. al § 1, pag. 19), il BOUTIER (Montagne e valli del territorio Bologna, Bologna, 1902, pag. 181-82), l'ELIAS (Rivista dei paesi, ecc. (cit. al § 1) e U. PASCALI (Le acque sorgenti di gas nel Bolognese, e Rio. Geogr. It., 1906, F. seguita come una piccola depressione semicircolare nella tavolozza alluviale al 2500).

Pag. 145

La salsa si trova a 226 m. sul mare (tav.), su di un ripiano alla destra di un rio affluente del R. di Sassuno (F. Sillaro). Le valli di questo sono costituite da argille scagliose tipiche coi fianchi sovrastati da frane e lavine, e incisi in calanchi caratteristici.

L'altitudine su cui sta Sassuno, alzata a picco sul rio, scorge invece strati di marne grigie mioceniche (Bombicci) inclinati a nord, cioè verso la pianura; e gli strati ripassano alle spalle della salsa nei profili che cominciano a Piazza e a Foggiali, una con inclinazione discordante. Il luogo ha l'aspetto di una vera faglia traversale, quindi ne indico numero il Bombicci nelle vallate bolognesi.

Pag. 145

Il campo della salsa è a circa 60 m. dalla sponda del torrente (Fig. 187); e di forma semicircolare, dolemente inclinato a valle, e il suo margine dalla parte opposta al rio è segnato da un gradino che separa nettamente l'area coperta di detriti fangosi dal terreno a natiche circostante. Esternamente al margine, si osservava, quando fui sul luogo (8 settembre 1906), una foresta semicircolare concentrica al gradino. Nel campo limitate da questo anche gli spiragli sembravano disposti parallelamente ad esso: erano per lo più spiragli piccolissimi, aperti a fior di terra o con margini appena rialzati; con essi, due conetti geminati, assai alla base non più di 2 m. e alti m. 0,30, dei quali l'uno inattivo e con la bocca chiusa artificialmente da sassi e melassa, l'altro attivo e di formazione paleo-ventilistica (c.). Essi era certo dovuti alla chiusura dell'altre: solo infatti il materiale che lo costituiva, l'orifizio sottostante funzionava a gorgogliare con grosse bolle, mentre la bocca del cono recente era immediatamente le sue colate.

Pag. 146-147

Un po' più in basso, accanto ad un piccolo cono spento e sfiorato s'era aperto un orifizio attivo, diretto a ripetere probabilmente il fenomeno già osservato (b). Nessuna traccia di spiragli latitanti si scorgeva oltre questo punto, che è a 9 m. dal margine superiore. Ma a levante di esso, e dal campo stesso della salsa una smotta argillosa, a schiena d'asino, larga da 10 a 15 m., si levava (riguardo verso il rio. Questa « bsa » di fango giunta nel letto del torrente si sollevava occupandone la maggior parte. La smotta o almeno il suo rimangiamento sembravano essere recenti, e gli abitanti del luogo l'attribuivano a materiale emerso dalla salsa stessa, benché non avessero ricordo di un'attività molto maggiore da quella del momento. Ma era molto palese sul luogo la differenza fra il fango fine e compatto delle colate della salsa, col materiale detritico e variegato della smotta. Questa, affatto simile a tante altre osservate anche nelle valli vicine, era in relazione con la salsa solo in quanto il campo di essa pote fornire un punto di minore resistenza ove le acque elbero pressa per muovere il torrente fangoso.

Pag. 147

Le colate del cono recente erano ricche di sostanze bituminose, ciò che già il BIANCONI aveva osservato; e sono a lui mi si mostravano efflorescenze saline sulle colate asciutte. Le argille scagliose di questa valle sembrano essere petroliere e salifere in grado notevole: una fonte di acqua dolce con un velo di petrolio si trova poco prima di giungere alla salsa; sotto la chiesa di Sassuno in un vecchio pozzo di petrolio, sono stati di recente ripresi i lavori. Le efflorescenze saline coprono poi, per vaste estensioni, il letto del torrente. Sulla sponda sinistra del rio allucinate alla salsa, pochi metri a monte del luogo ove termina la smotta argillosa, c'è una sorgente solifera.

Pag. 148



Fig. 187. — Il « Dragone », di Sassuno. (1:100). Pag. 147
(Rilievo eseguito l'8 settembre 1906.)

Figura 2 Le pagine originali estratte dal volume [Biasutti, 1907; Dainelli, 1907] e relative alla Salsa del Dragone.

Figure 2 Original pages extracted from the volume, related to the Salsa del Dragone [Biasutti, 1907; Dainelli, 1907].

È importante sottolineare che i riferimenti altimetrici riportati da Biasutti nel 1906 non coincidono direttamente con quelli utilizzati oggi. All'epoca le altitudini erano misurate in metri sul livello medio del mare di Genova, che costituiva il riferimento nazionale in Italia fino agli anni '30, mentre oggi si utilizza il livello medio del mare di Trieste come quota zero ufficiale nazionale (IGM95, [3]). La differenza tra i due riferimenti è di circa 0.3-0.4 m, quindi un'altitudine riportata da Biasutti di 200 m s.l.m. corrisponderebbe oggi a circa 199.6-199.7 m secondo il livello di riferimento moderno.

Le quote attualmente usate nei rilievi GPS/GNNS [4] e nei dati satellitari sono riferite generalmente all'ellissoide WGS84 [5, 6], un modello matematico globale che approssima la forma della Terra. Rispetto al livello medio del mare di Trieste, le quote WGS84 presentano una deviazione tipica di circa 40-50 m nella zona dell'Appennino bolognese, dovuta alla differenza tra il geoide locale e l'ellissoide globale. Ciò significa che, ad esempio, un rilievo misurato oggi a 200 m sul mare di Trieste corrisponderebbe a circa 240-250 m sul WGS84.

Analogamente, le coordinate geografiche riportate da Biasutti erano calcolate rispetto al meridiano di Firenze e non al meridiano di Greenwich adottato oggi, comportando discrepanze longitudinali locali dell'ordine di qualche centinaio di metri. La latitudine, invece, era determinata tramite osservazioni astronomiche, con precisione di pochi secondi, equivalenti a qualche decina di metri. Perciò, quando si confrontano i rilievi storici con i dati moderni, è necessario tenere conto di questi scostamenti: le quote e le coordinate di inizio Novecento devono essere reinterpretate alla luce dei sistemi attuali, senza mai considerarli direttamente comparabili. Tuttavia, poiché l'errore sistematico potrebbe non essere trascurabile, un approccio di pura conversione numerica appare non praticabile per l'esigenza di confronto con i dati attuali. Una soluzione più funzionale consiste invece nella ricerca di elementi ancora oggi identificabili a scale direttamente osservabili sulle mappe o indicate nelle relazioni, per poi procedere a un allineamento locale mediante co-registrazione di forme geometriche e punti omologhi, che consenta di sovrapporre con precisione i dati storici e attuali nello stesso sistema di riferimento, anche qualora quest'ultimo sia di tipo relativo.



Fig. 18'. — Il "dragone" di Sassuno. (1:400).
(Rilievo eseguito l'8 Settembre 1906.)

Figura 3 Rappresentazione schematica della Salsa del Dragone tratta dalla pubblicazione del 1907. Sono evidenziati la freccia del Nord, il gradino morfologico, le semicirconferenze del campo e delle fratture, le piccole bocche e l'area di frana, con le frecce che indicano la direzione di movimento del materiale.

Figure 3 Schematic representation of the Salsa del Dragone from the 1907 publication. The north arrow, morphological step, semicircles of the field and fractures, small vents, and landslide area are highlighted, with arrows indicating the direction of material movement.

3. Informazioni da telerilevamento

Nel 2024, sempre nell'ambito del progetto PROMUD è stato realizzato un rilievo fotogrammetrico ad alta risoluzione dell'area della Salsa del Dragone mediante UAV e tecnica Structure from Motion (SfM) [Westoby et al., 2012; Pesci et al., 2025] per l'analisi dati. Il volo, condotto con un drone Matrice 350 equipaggiato con camera full-frame (ZenMuse P1), ha permesso di acquisire 167 immagini con oltre il 70% di sovrapposizione, garantendo copertura completa di un'area di circa 0.1 km². La georeferenziazione [Giordan et al., 2020] è stata effettuata con RTK-GNSS [7], ottenendo un'accuratezza orizzontale < 2 cm e verticale < 3 cm. In sostanza, le correzioni RTK possono essere ricevute in tempo reale da un dispositivo mobile (cellulare, tablet, ecc.) tramite un abbonamento a un servizio di correzione GNSS (in gergo, tipicamente basato su rete NTRIP e messaggi RTCM). Il dispositivo invia le correzioni al controller del drone, che le trasmette via Wi-Fi al drone che, grazie a queste informazioni, corregge continuamente la propria posizione, ottenendo precisione centimetrica necessaria per rilievi topografici, mappature geologiche e fotogrammetriche. Le operazioni di analisi sono state effettuate mediante il software Agisoft Metashape [8], ampiamente utilizzato per l'elaborazione fotogrammetrica di immagini UAV e la generazione di nuvole di punti 3D, modelli digitali del terreno e ortomosaici georeferenziati. Tali elaborati permettono di misurare distanze, superfici e volumi con precisione centimetrica [Elkhrachy, 2021; Sahin et al., 2025]. Dalla nuvola di punti tridimensionale ottenuta è stato quindi possibile analizzare in dettaglio la morfologia del sito, identificando:

1. la superficie dove insistono le bocche di emissione;
2. il gradino morfologico che separa il campo della salsa dai campi limitrofi;
3. le pendenze dei versanti e la distribuzione delle frane;
4. il contesto delle aree agricole e boschive adiacenti.

L'analisi morfologica si basa sul confronto punto-piano, utilizzando piani di riferimento per evidenziare variazioni altimetriche e forme del terreno [Pesci et al., 2018]. Questo approccio permette di interpretare con precisione la distribuzione spaziale di coni, colate e depositi, distinguendo le caratteristiche del terreno da eventuali coperture vegetali. In pratica, quando l'elemento di paragone ha un significato fisico, per esempio un piano che rappresenta la geometria di base e la pendenza dell'area, le mappe delle distanze punto-piano consentono di evidenziare piccole differenze nella distribuzione dei punti, rivelando allineamenti o forme che altrimenti sarebbero difficili da notare. I dati georeferenziati, combinando informazioni dal contenuto RGB del modello fotogrammetrico e dalle mappe punto-piano, hanno fornito un quadro dettagliato della morfologia attuale. Questo approccio è stato fondamentale per allineare e scalare lo schema planimetrico storico di Biasutti, determinando l'orientamento corretto rispetto al Nord e la posizione dei principali elementi planimetrici.

Nella Figura 4 sono riportate alcune evidenze significative ottenute dalla mappa punto-piano, realizzata utilizzando come primitiva di riferimento un piano orizzontale traslato fino a intercettare il pianoro dove oggi si concentrano le principali bocche e i piccoli conetti. Pur essendo arbitraria, questa scelta consente di definire con precisione la geometria locale della porzione studiata. La mappa evidenzia come il versante si abbassi rispetto al piano della salsa, mostrando fianchi ripidi e una chiara discontinuità geometrica, che sottolinea la forma piatta della zona di emissione attuale.

In aggiunta a quanto già pubblicato da Pesci et al. [2025] si nota che le parti in frana oggi visibili mostrano un corpo che scende verso SSE, mentre nella mappa di Biasutti la frana aveva direzione prevalente NNW. L'assenza di altre evidenze franose sul versante all'epoca della visita nel 1906 lascia pensare che non fossero presenti ulteriori fenomeni attivi di questo tipo. Si nota come oggi le zone sottostanti l'area di salsa abbiano una pendenza abbastanza rilevante e che le linee tracciate dalle colate recenti seguano un percorso aperto, cioè un percorso al

cui interno si nota un'isola di terreno con piccola presenza di verde e alberatura. Questo lascia pensare che nei decenni il materiale accumulato abbia formato una collinetta ai fianchi della quale scende il nuovo materiale.

3.1 Allineamento dello schema planimetrico

In questa sezione vengono presentati i risultati dell'allineamento tra le informazioni storiche del 1906 e i dati attuali. Per integrare e confrontare le due fonti sono stati utilizzati modelli fotogrammetrici e l'ortofoto derivata dall'analisi dei dati raccolti durante la campagna UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). I modelli fotogrammetrici hanno fornito informazioni quantitative sulla geometria, le dimensioni e le evidenze morfologiche della Salsa, consentendo di ricostruire con precisione la morfologia dei versanti e le variazioni topografiche. L'ortofoto rappresenta una fotografia aerea corretta geometricamente, in modo che ogni punto dell'immagine corrisponda esattamente a una posizione reale sul terreno [Remondino et al., 2006]. Grazie a questa correzione delle prospettive e delle distorsioni dovute alla fotocamera e alla topografia, l'ortofoto permette un'osservazione globale del sito e un confronto diretto tra dati storici e attuali, fornendo una base accurata per analisi morfometriche e studi di evoluzione morfologica. Questa combinazione di modelli fotogrammetrici e ortofoto consente quindi di collegare le osservazioni storiche con misurazioni moderne, estendendo la scala temporale di osservazione e permettendo un'analisi integrata dei cambiamenti della Salsa negli ultimi cento anni.

Per il confronto sono state utilizzate informazioni geometriche derivanti dallo schema storico, tra cui:

1. la forma della discontinuità del gradino;
2. l'orientamento del Nord;
3. la direzione della frana;
4. la posizione delle bocche e le linee di separazione tra la zona della Salsa e il resto del versante.

Tenendo conto di possibili fonti di errore, come la scala approssimativa dello schema, eventuali imprecisioni nell'indicazione del Nord e l'incertezza sulla natura qualitativa o rigorosa della rappresentazione originale, la mappa è stata prima digitalizzata e successivamente sovrapposta all'orto-foto ottenuta dalle analisi fotogrammetriche.

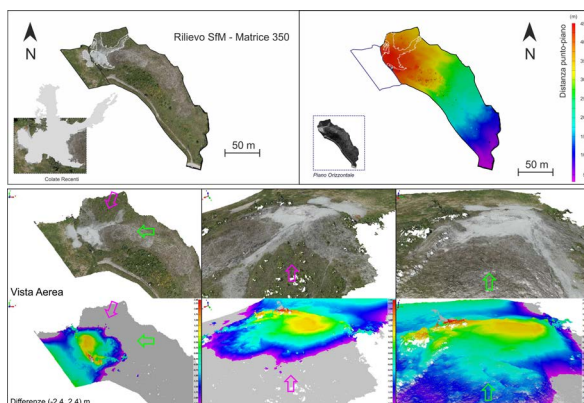


Figura 4 Nuvola di punti fotogrammetrica e confronto con due piani di riferimento orizzontali: il primo con origine alla base dell'area di frana; il secondo passante per la zona del gradino che separa la Salsa del Dragone dal campo coltivato.

Figure 4 Photogrammetric point cloud and comparison with two horizontal reference planes: the first with its origin at the base of the landslide area; the second passing through the step zone separating the Salsa del Dragone from the cultivated field.

Per evidenziare le differenze morfologiche e di copertura del terreno, l'immagine del pianoro è stata elaborata utilizzando il Psychedelic Tool di CorelDRAW [9]. Questo strumento assegna colori artificiali a valori crescenti di luminosità o tonalità, creando un contrasto molto marcato tra aree che, a occhio nudo, potrebbero sembrare simili. In questo modo è possibile distinguere immediatamente zone vegetate da zone più nude o terrose e mettere in evidenza dettagli difficilmente riconoscibili nelle immagini originali.

I risultati sono mostrati nei pannelli della Figura 5. L'analisi è stata eseguita applicando all'immagine iniziale (a) tre trasformazioni con parametri differenti. Con la prima impostazione (b), che utilizza valori bassi, sono immediatamente visibili le aree completamente vegetate (evidenziate da tonalità verde-scuro e turchese) rispetto a quelle scoperte o scarsamente vegetate (rappresentate da tonalità chiare tendenti al rosa e al bianco). La seconda trasformazione (c), con valori intermedi, permette di distinguere tra aree di bosco o boscaglia più fitte (toni verdi), zone vegetate più rade come prati e cespugli (toni azzurro-ciano) e porzioni di terreno nudo o poco coperto (toni rosa e arancio). Infine, la terza trasformazione (d), con valori più elevati, enfatizza ulteriormente le differenze all'interno delle stesse categorie, mettendo in evidenza variazioni locali nella densità della vegetazione e nelle caratteristiche superficiali del terreno attraverso un contrasto cromatico ancora più marcato.

L'immagine, tendenzialmente uniforme a prima vista, viene così trasformata in una mappa cromatica altamente leggibile e, pur essendo rappresentata in falsi colori, permette di identificare la zona di gradino, le colate, i diversi tipi di copertura vegetale, il pianoro e altri elementi morfologici di interesse. Il risultato è mostrato in Figura 5, dove lo schema planimetrico è sovrapposto sia all'immagine originale sia alle immagini trasformate.

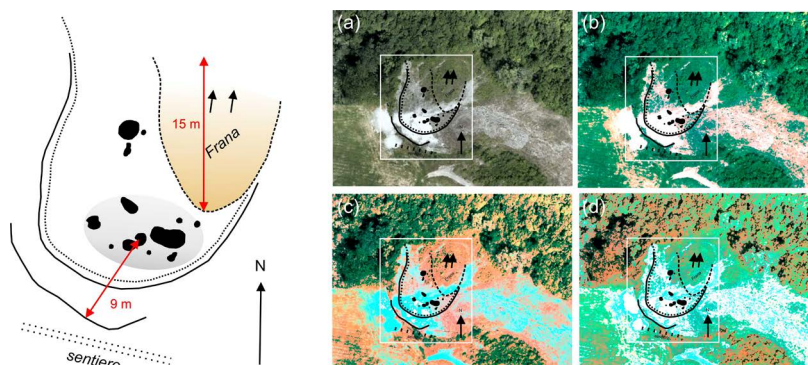


Figura 5 Schema planimetrico vettorializzato della Salsa del Dragone con gli elementi principali delle bocche di emissione evidenziati in nero (trasparente) e la frana in marrone. Le frecce rosse indicano le lunghezze interpretate dalla relazione storica. A sinistra: schema planimetrico; a destra: allineamento dello schema sull'ortofoto derivata dal rilievo fotogrammetrico, mostrata sia con colori naturali (a) sia con trasformazioni cromatiche "psichedeliche" (b, c, d) per evidenziare il contrasto tra vegetazione e terreno nudo o scarsamente vegetato.

Figure 5 Vectorized planimetric map of the Salsa del Dragone, with main vent elements highlighted in black (transparent) and the landslide in brown. Red arrows indicate distances interpreted from the historical report. Left: planimetric map; right: alignment of the map onto the photogrammetric orthoimage, shown both in natural colors (a) and in "psychedelic" color transformations (b, c, d) to enhance contrast between vegetation and bare or sparsely vegetated ground.

4. Le informazioni da misure sismiche

Nella sezione precedente sono state presentate evidenze superficiali, relative alla forma del terreno, alla tipologia degli elementi naturali (terreno, vegetazione) e alle caratteristiche

geometriche e cromatiche derivate dai modelli fotogrammetrici. In questa sezione, invece, si integrano informazioni relative al sottosuolo, utilizzando dati geofisici che permettono di indagare la struttura interna dei materiali e di evidenziare variazioni di rigidità, profondità degli strati e possibili condotti di fluidi.

Per completare l'analisi della Salsa del Dragone e integrare le osservazioni planimetriche e morfologiche con informazioni sul sottosuolo, sono stati considerati quindi i dati geofisici ottenuti da Paolucci et al. [2024] e Zanetti et al. [2024; 2025], parte dei quali già riportati in Pesci et al. [2025].

L'area è stata indagata attraverso una campagna di misure di microtremore ambientale, finalizzate a esplorare le caratteristiche del sottosuolo senza ricorrere a scavi o perforazioni del terreno. Le registrazioni, effettuate con strumenti a tre componenti ad alta precisione, hanno permesso di individuare le frequenze naturali di risonanza del terreno e quindi i contrasti di rigidità tra i diversi strati. Parallelamente, sono state eseguite prospezioni attive con onde di superficie, che hanno fornito informazioni sulla profondità dei principali strati e sulla loro capacità di trasmettere le onde sismiche.

L'elaborazione dei dati ha comportato innanzitutto la raccolta di punti georeferenziati nell'area di studio, ciascuno associato alle informazioni sismiche rilevate, come la profondità dei principali strati e le caratteristiche dei materiali presenti, ad esempio sedimenti recenti o frane. A partire da questa distribuzione di punti, che varia in densità a seconda delle zone, l'area è stata suddivisa schematicamente in settori, permettendo di evidenziare le principali variazioni strutturali e le zone di interesse per successive interpretazioni. Considerando l'insieme dell'area, è possibile osservare sia variazioni laterali che verticali delle caratteristiche del sottosuolo, individuando zone che potrebbero corrispondere a condotti di fluidi o a superfici di discontinuità, fornendo così preziose informazioni per l'analisi strutturale locale.

Nella Figura 6 è riportato un esempio parziale dei risultati delle analisi di sismica passiva, rappresentati tramite cerchi di diverso colore e dimensione per facilitarne l'interpretazione. Il colore dei cerchi indica la frequenza fondamentale F_0 , che è correlata alla profondità della principale discontinuità nel sottosuolo, mentre la dimensione rappresenta il valore dell'ampiezza del picco A_0 , legato al contrasto di impedenza tra strati e quindi alle caratteristiche di rigidità relativa degli stessi. La combinazione di colore e dimensione fornisce così una misura indiretta della profondità e della rigidità dei materiali presenti sotto la superficie.

Dall'osservazione della mappa così realizzata si osserva una distribuzione dei punti non casuale, ma che segue una logica coerente con la geometria del pianoro e del versante. Si nota una concentrazione di cerchi blu e azzurri (basse frequenze) nella zona del gradino occidentale, corrispondente al bordo dell'attuale pianoro di emissione, che suggerisce la presenza di un possibile condotto ben definito, associato ai materiali più deformabili o fluidi fino a profondità elevate.

Inoltre, nella porzione settentrionale del pianoro, la presenza di alcuni elementi verdi intercalati a punti gialli evidenzia una significativa variabilità delle profondità investigate, suggerendo un contrasto locale tra zone più profonde e settori più superficiali. Questa rappresentazione lascia immaginare una struttura complessiva del sottosuolo e fornisce un utile quadro preliminare per confrontare le evidenze geofisiche con la morfologia attuale e storica della salsa.

Osservando più nel dettaglio la distribuzione dei cerchi, emergono alcune informazioni interessanti sulla struttura del sottosuolo. In particolare, tra i pallini gialli, che indicano strati relativamente superficiali, compaiono alcuni pallini verdi più grandi. Questo suggerisce la presenza di zone più profonde e con caratteristiche più marcate rispetto al materiale circostante, corrispondenti probabilmente a residui dei condotti attivi in epoche precedenti a quella attuale. La loro posizione, allineata con le vecchie bocche documentate da Biasutti nel 1906, conferma che elementi oggi non più attivi del sistema di risalita dei fluidi possono essere ancora oggi individuati grazie a questo genere di prospezioni sismiche, anche se la parte superficiale dell'area è stata alterata da frane o depositi più recenti, che non ne consentono l'individuazione diretta sul terreno.

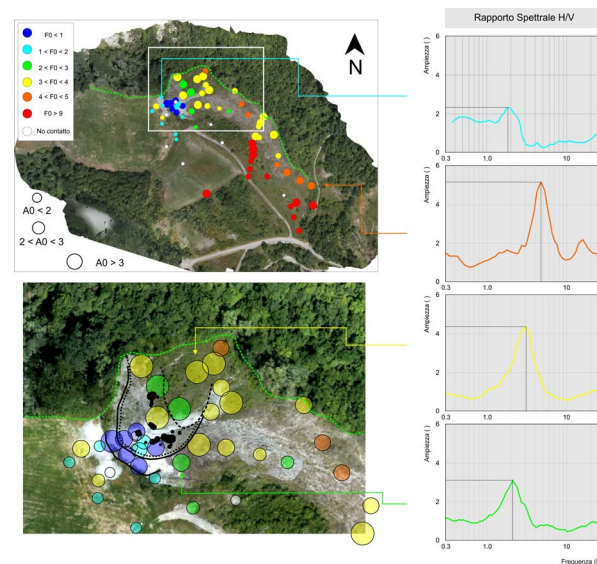


Figura 6 Localizzazione delle misure di sismica passiva e rappresentazione dei risultati dell'analisi HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio). I cerchi, di colore e dimensioni differenti, indicano rispettivamente la frequenza fondamentale (F0) e l'ampiezza del picco (A0). I valori di F0 sono correlati alla profondità della principale discontinuità nel sottosuolo, mentre le ampiezze A0 riflettono il contrasto di impedenza tra i materiali. In basso, un ingrandimento dell'area più prossima al campo della Salsa, con il dato sismico visualizzato in trasparenza. Dati estratti da Paolucci et al. [2025]. La linea verde tratteggiata marca il confine tra le zone boschive e quelle con assenza o scarsa vegetazione, oppure vegetazione leggera di copertura poco invasiva come boscaglia, siepi o altro. Sulla destra sono riportati alcuni esempi rappresentativi di rapporti spettrali H/V associati a punti di misura selezionati e a diverse classi di frequenza individuate nell'area di studio.

Figure 6 Location of passive seismic measurements and representation of HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) analysis results. Circles of different colors and sizes indicate the fundamental frequency (F0) and peak amplitude (A0), respectively. F0 values are related to the depth of the main subsurface discontinuity, while A0 amplitudes reflect the impedance contrast between materials. Below, a zoomed view of the area closest to the Salsa field shows the seismic data displayed in transparency. Data from Paolucci et al. [2025]. The dashed green line delineates the boundary between forested areas and zones with little or no vegetation cover, including shrubland, hedgerows, and other sparse vegetation. On the right, representative H/V spectral ratios of the different frequency classes identified within the study area are shown.

5. Evidenze e Conclusioni

Uno dei limiti principali nello studio dei processi geologici è la scala temporale: anche con le più avanzate tecnologie di monitoraggio, gli intervalli osservabili sono spesso troppo brevi per cogliere pienamente l'evoluzione di fenomeni complessi come le salse. In questo contesto, le fonti storiche e i dati d'archivio assumono un ruolo fondamentale, estendendo la prospettiva temporale oltre quella dei rilievi contemporanei. Pur considerando che 120 anni costituiscono ancora un intervallo limitato rispetto ai tempi geologici, la trasformazione delle informazioni storiche in dati quantitativi ha permesso di identificare evidenze significative sull'evoluzione della Salsa del Dragone.

L'analisi dei rilievi storici di Biasutti (1906-1907) ha consentito di ricostruire con precisione la geometria e l'evoluzione recente del campo di emissione, includendo il gradino di contorno, l'area semicircolare e la distribuzione delle bocche di emissione. La digitalizzazione e l'allineamento di questi dati con i modelli fotogrammetrici e l'ortofoto del 2024 hanno permesso di confrontare direttamente caratteristiche morfologiche storiche e attuali, evidenziando sia la persistenza di strutture principali sia modificazioni del terreno dovute a frane e colate recenti.

L'integrazione con le informazioni sismiche ha aggiunto una prospettiva sul sottosuolo, permettendo di individuare variazioni di rigidità e profondità degli strati e possibili condotti preferenziali per la risalita di fango e gas. La corrispondenza tra la distribuzione dei punti georeferenziati e le vecchie bocche documentate da Biasutti conferma che elementi del sistema di risalita dei fluidi oggi non più attivi possono essere ancora individuati, nonostante modificazioni superficiali. Queste evidenze supportano la visione storica secondo cui le salse agiscono sia come agenti costruttivi sia come agenti erosivi, contribuendo all'arretramento dei versanti e alla modellazione continua del paesaggio.

Il confronto tra posizioni storiche e attuali delle bocche consente di ipotizzare cedimenti e spostamenti dell'ordine di 4-5 metri, suggerendo un contributo graduale, ma costante, delle emissioni alla trasformazione del terreno. La combinazione di dati storici, fotogrammetrici e geofisici fornisce così una finestra temporale e strutturale più ampia, utile per interpretazioni integrate dei processi morfologici e per la pianificazione di studi futuri.

Nel loro insieme, i risultati finora ottenuti, sebbene ancora preliminari, possono essere sintetizzati come segue:

1. conferma della coerenza tra evidenze storiche e dati moderni;
2. indicazione di relazioni tra morfologia superficiale e struttura del sottosuolo;
3. definizione di un'ipotesi probabile dell'evoluzione e della dinamica delle emissioni di fango su scale temporali decennali;
4. ricostruzione un quadro quantitativo e visivo che può guidare ulteriori monitoraggi e interventi di tutela.

Da questa prospettiva, le salse si confermano non come fenomeni statici, ma come sistemi dinamici di erosione e rimodellamento del territorio, in accordo con l'ipotesi formulata da Biasutti nei primi studi del 1906, che le interpretava come strutture a carattere idrovoro.

Infine, è opportuno sottolineare che le evidenze qui presentate costituiscono un punto di partenza solido per la pianificazione di nuove campagne geofisiche e geochemiche. La combinazione di dati storici, rilievi UAV fotogrammetrici e misure sismiche fornisce ora un quadro preliminare che permette di indirizzare in modo mirato i rilievi futuri, che si concentreranno sulle aree di maggiore interesse. Gli approfondimenti previsti includeranno rilievi UAV dotati di sensori come magnetometri o termocamere integrate e misure a terra tramite profili di geo-elettrica, focalizzandosi sulle porzioni più significative per la struttura del sottosuolo e la risalita di fluidi del campo di emissione storico.

Ringraziamenti

Si ringrazia Paola Cusano, titolare del progetto PROMUD, per l'opportunità di studiare le salse dell'Appennino bolognese nell'ambito dell'unità di progetto WP2 della Sezione INGV di Bologna. Si ringraziano inoltre Giancarlo Tamburello per il volo TOPGUN col drone Matrice 350 e Martina Zanetti, Enrico Paolucci e Antonello Piombo per le preziose indicazioni geofisiche.

Referenze

- Accaino, F., Bratus, A., Conti, S., Fontana, D., & Tinivella, U. (2007). Fluid seepage in mud volcanoes of the northern Apennines: An integrated geophysical and geological study. *Journal of Applied Geophysics*, 63(2), 90-101. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2007.06.002>
- Aliyev, A. A., Guliyev, I. S., & Belov, I. S. (2002). *Catalogue of recorded eruptions of mud volcanoes of Azerbaijan (for period of years 1810–2001)*. Nafta-Press.

- Aliyev, A., Huseynov, D., Abbasov, O. R., Rashidov, T., & Kangarli, I. (2024). Mud volcanoes of Azerbaijan: The unique natural objects of the geoheritage. *Geoheritage*, 16(1), 20. <https://doi.org/10.1007/s12371-024-00931-3>
- Antunes, V., Planès, T., Obermann, A., Panzera, F., D'Amico, S., Mazzini, A., Sciarra, A., Ricci, T., & Lupi, M. (2022). Insights into the dynamics of the Nirano mud volcano through seismic characterization of drumbeat signals and V/H analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 431, 107619. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107619>
- Bianconi, G. (1840). *Storia naturale dei terreni ardenti, dei vulcani fangosi, delle sorgenti infiammabili, dei pozzi idropirici e di altri fenomeni geologici operati dal gas idrogeno e della origine di esso gas*. Tipi di Jacopo Marsigli.
- Biasutti, R. (1907). *Materiali per lo studio delle salse: Le salse dell'Appennino settentrionale*. In *Memorie Geografiche* (Vol. 2, pp. 101-255).
- Bombicci, L. (1882). *Montagne e vallate del territorio di Bologna: Cenni sull'oro-idrografia, geologia, litologia e mineralogia dell'Appennino bolognese e sue dipendenze con una carta geologica e una oro-idrografica*. Tipografia Forni.
- Bonini, M. (2009). Mud volcano eruptions and earthquakes in the northern Apennines and Sicily, Italy. *Tectonophysics*, 474(3-4), 723-735. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.05.018>
- Calindri, G. (1829). *Saggio statistico storico del Pontificio Stato*. Tipografia Garbinesi e Santucci.
- Dainelli, G. (1907). *Le salse dell'Appennino settentrionale*. *Memorie Geografiche*, 1. Supplemento alla Rivista Geografica Italiana.
- De Nardo, M. T. (2019). *Le salse dell'Emilia-Romagna: Cartografie a confronto*. Regione Emilia-Romagna.
- Elkhrachy, I. (2021). Accuracy Assessment of Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry. *Alexandria Engineering Journal*, 60(6), 5579-5590. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.04.011>
- Gattuso, A., Italiano, F., Capasso, G., D'Alessandro, A., Costantini, S., & [altri autori]. (2021). The mud volcanoes at Santa Barbara and Aragona (Sicily, Italy): A contribution to risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(11), 3407-3419. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-3407-2021>
- Giordan, D., Godone, D., & Everaerts, J. (2020). The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for engineering geology applications. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(7), 3437-3481. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01766-2>
- Jung, R. A., & Grasso, M. (2014). Mud volcano morphology and eruptive characteristics: Evidence from the Southern Apennines, Italy. *Geological Society of America Bulletin*, 126(7-8), 1035-1050. <https://doi.org/10.1130/B31087.1>
- Kopf, A. J. (2002). Significance of mud volcanism. *Reviews of Geophysics*, 40(2). <https://doi.org/10.1029/2000RG000093>
- Lupi, M., Ricci, B. S., Kenkel, J., Ricci, T., Fuchs, F., Miller, S. A., & Kemna, A. (2016). Subsurface fluid distribution and possible seismic precursory signal at the Salse di Nirano mud volcanic field, Italy. *Geophysical Journal International*, 204(2), 907-917. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv454>
- Madonia, P., Cusano, P., Petrosino, S., Costanza, A., Fertitta, G., & Gucciardo, D. (2025). *Preliminary results from the INGV-PROMUD project: Seismic and hydromorphological monitoring of Maccalube di Aragona mud volcano (Sicily, Italy)*. EGU General Assembly 2025, Vienna, Austria, 27 April-2 May 2025, EGU25-9144. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-9144>
- Maestrelli, D., Bonini, M., & Sani, F. (2019). Linking structures with the genesis and activity of mud volcanoes: Examples from Emilia and Marche (Northern Apennines, Italy). *International Journal of Earth Sciences*, 108(5), 1683-1703. <https://doi.org/10.1007/s00531-019-01730-w>
- Mammìno, P. (2014). *I vulcani di fango di Paternò e Belpasso sul versante sud-occidentale del Monte Etna (Sicilia): Mud volcanoes of Paternò and Belpasso on the south-western slope of Mount*

- Etna (Sicily, Italy). In *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia* (Vol. 102, pp. 171-182). https://www.isprambiente.gov.it/files2017/pubblicazioni/periodici-tecnici/memorie-descrittive-della-carta-geologica-ditalia/volume-102/memdes_102_mammينو3.pdf
- Martinelli, G., & Judd, A. (2004). Mud volcanoes of Italy. *Geological Journal*, 39(1), 49-61. <https://doi.org/10.1002/gj.943>
- Mazzini, A., & Etiope, G. (2017). Mud volcanism: An updated review. *Earth-Science Reviews*, 168, 81-112. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.03.001>
- Ménard de la Groye, F. J. (1818). Description de l'état des sables du Modénois dans l'été de l'année 1814: Indications d'effets semblables observés dans d'autres contrées; définition générale et rapprochements. *Journal de Physique, de Chimie et d'Histoire Naturelle*, 86, 254-275, 342-356, 417-434.
- Milkov, A. V. (2005). Global distribution of mud volcanoes and their significance in petroleum exploration as a source of methane in the atmosphere and hydrosphere and as a geohazard. In G. Martinelli & B. Panahi (Eds.), *Mud volcanoes, geodynamics and seismicity*, 51, 29-34. Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/1-4020-3204-8_3
- Molina, G. I. (1821). *Memorie di storia naturale lette in Bologna nelle adunanze dell'Istituto*. Tipografia Marsigli.
- Pagani, U. (1900). Su alcune sorgenti di gas nel Bolognese. *Rivista Geografica Italiana*, 7, 187-195.
- Paolucci, E., Zanetti, M., Antonellini, M., Armigliato, A., Carfagna, N., Zaniboni, F., & Piombo, A. (2024). Preliminary characterization of the area of the Salse del Dragone mud volcano (Northern Italy) through surface-wave seismic prospecting. In Proceedings of the GNGTS 2024. <https://gngts.ogs.it/atti/GNGTS2024/344/>
- Pesci, A., Amoroso, S., Teza, G., & Minarelli, L. (2018). Characterization of soil deformation due to blast-induced liquefaction by UAV-based photogrammetry and terrestrial laser scanning. *International Journal of Remote Sensing*, 39(22), 8317-8336. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1484960>
- Pesci, A., Tamburello, G., Teza, G., Paolucci, E., & Zanetti, M. (2025). Drone-based photogrammetry and morphological characterization of the Salse del Dragone mud volcanoes: Integrating multidisciplinary data for future exploration. *Annals of Geophysics*, 68(4), DM444. <https://doi.org/10.4401/ag-9292>
- Remondino, F., & El-Hakim, S. (2006). Image-based 3D modelling: A review. *The Photogrammetric Record*, 21(115), 269-291. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x>
- Sahin, C., Sahin, A., Bilucan, F., Ergun, B., & Ozer, D. (2025). Comparative Accuracy Assessment of Orthophotos Produced Using Different UAV and Photogrammetric Software. *Innovations in Smart Cities Applications*, 8, 102-115. Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-88653-9_11
- Vannoli, P., Martinelli, G., & Valensise, G. (2021). The seismotectonic significance of geofluids in Italy. *Frontiers in Earth Science*, 9, 579390. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.579390>
- Vannoli, P., Burrato, P., & Valensise, G. (2015). The seismotectonics of the Po Plain (Northern Italy): Tectonic diversity in a blind faulting domain. *Pure and Applied Geophysics*, 172(5), 1105-1142. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0873-0>
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Zanetti, M. (2024). *Mud volcanoes: Salse del Dragone study case (PhD thesis)*. Università di Bologna.
- Zanetti, M., Paolucci, E., Antonellini, M., Armigliato, A., Pesci, A., Zaniboni, F., & Piombo, A. (2025). Salse del Dragone mud volcano (Northern Italy): Characterization through surface wave seismic prospecting and stability analysis. In Book of abstracts of the 43rd National Conference of GNGTS – Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida (Bologna, Italy, 11-14 February 2025). GNGTS.

Sitografia (ultima consultazione 19.03.2026)

- [1] INGV. (2023-2025). PROMUD project. <https://progetti.ingv.it/en/promud>
- [2] Regione Emilia-Romagna. (n.d.). Cartografia geologica e banche dati - WebGIS cartografia geologica. <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it>
- [3] Istituto Geografico Militare. (n.d.). IGM - Istituto Geografico Militare. <http://www.igmi.org/>
- [4] National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing. (n.d.). Global Positioning System (GPS). <https://www.gps.gov/systems/gps/>
- [5] Istituto Geografico Militare. (n.d.). Altimetria e sistemi di riferimento geodetici in Italia. <https://www.igmi.org/servizi/cartografia/altimetria/>
- [6] National Geodetic Survey. (n.d.). World Geodetic System 1984 (WGS84). <https://www.ngs.noaa.gov/WGS84/>
- [7] Strumenti Topografici. (n.d.). DJI Matrice 350 RTK - RTK e correzioni differenziali. <https://help.strumentitopografici.it/droni/dji-matrice-350-rtk/rtk>
- [8] Agisoft LLC. (n.d.). Agisoft Metashape. <https://www.agisoft.com/>
- [9] Corel Corporation. (n.d.). CorelDRAW Graphics Suite. <https://www.coreldraw.com/>

APPENDICE

TRASCRIZIONE E INTERPRETAZIONE DELLE
PAGINE 145-148 DI BIASUTTI [1907]

Pagina 145

La salsa detta «Il Dragone», presso Sassuno. – (F. 88, Tav.: «Varignana Superiore»; 0° 59' 50" O., 44° 20' 10" N.).

Pagina 146

La prima notizia par essere in AB. Molina (*Memorie di Storia Naturale*, Bologna, 1821), e nel Ménard de la Groye (op. cit al § 1). Ne scrissero poi il Calindri (*Saggio statistico storico del pontificio Stato*, Perugia, 1829), il Bianconi (op. cit. al § 1, pag. 52 e segg.) e Forquè-Gorceix (op. cit al § 11), che ne analizzarono il gas. Fonti più recenti sono il Pilo (op. cit al § 1, pag. 19), il Bombicci (*Montagne e vallate del territorio Bolognese*, Bologna, 1882, pag. 181-82), l'Elenco dei pozzi, ecc. (op. cit al § 1) e U. Pagani: Su alcune sorgenti di gas nel Bolognese, «Riv. Geogr. It.», 1900.

È segnata come una piccola depressione semicircolare nella tavoletta militare la 25,000.

La salsa si trova a 226 m. sul mare (tav.), su di un ripiano alla destra di un rio affluente del R. di Sassuno (F. Sillaro). Le valli di questo sono costituite da argille scagliose tipiche coi fianchi sconvolti da frane e lavine, o incisi in calanchi caratteristici.

L'altura su cui sta Sassuno,alzata a picco sul rio, scopre invece strati di marne grigie mioceniche (Bombicci) inclinati a nord, cioè verso la pianura; e gli stessi riappaiono alle spalle della salsa nei pendii che conducono a Piazza e a Poggioli, ma con inclinazione discordante. Il luogo ha l'aspetto di una vera faglia trasversale, quali ne indicò numerose il Bombicci nelle vallate bolognesi.

Il campo della salsa è a circa 60 m. dalla sponda del torrente (Figura 18°): è di forma semicircolare, dolcemente inclinato a valle, e il suo margine dalla parte opposta al rio è segnato da un gradino che separa nettamente l'area coperta da detriti fangosi dal terreno a macchie circostante. Esternamente al margine, si osservava, quand'io fui sul luogo (8 settembre 1906), una fessura semicircolare concentrica al gradino. Nel campo limitato da questo anche gli spiragli sembrano disporsi parallelamente ad esso: erano per lo più spiragli piccolissimi, aperti a fior di terra o con margini appena rialzati: con essi due conetti geminati, ampi alla base non più di 2 m. e alti m. 0,30, dei quali l'uno inattivo e con la bocca chiusa artificialmente da sassi e melma, l'altro attivo e di formazione palesemente recentissima (a). Esso era certo dovuto alla chiusura dell'altro: tolto infatti il materiale che lo ostruiva, l'ori-

Pag. 147

fizio sottostante ricominciò a gorgogliare con grosse bolle, mentre la bocca del cono recente cessò immediatamente le sue colate.

Un po' più in basso, accanto a un piccolo cono spento e sformato, s'era aperto un orifizio attivo, diretto a ripetere probabilmente il fenomeno già osservato (b). Nessuna traccia di spiragli lutivomi si scorgeva oltre a questo punto, che è a 9 m. dal margine superiore. Ma a levante di esso, e dal campo stesso della salsa una smotta argillosa, a schiena d'asino, larga dal 10 a 15 m., si levava piegando verso il rio. Questa «boa» di fango giunta nel letto del torrente si biforcava occupandone la maggior parte. La smotta o almeno il suo rimaneggiamento sembravano essere recenti, e gli abitanti del luogo l'attribuivano a materiale emesso dalla salsa stessa, benché non avessero ricordo di un'attività molto maggiore da quella del momento. Ma era molto palese sul luogo la differenza fra il fango fine e compatto delle colate della salsa, col materiale detritico e variegato della smotta. Questa, affatto simile a tante altre osservate anche nelle valli vicinie, era in relazione con la salsa solo in quanto il campo di essa poté fornire un punto di minore resistenza ove le acque ebbero presa per smuovere il torrente fangoso.



Figura 18° – Il «dragone² di Sassuno. (1: 400). (Rilievo eseguito l'8 Settembre 1906.)

Pag. 148

Le colate del cono recente erano ricche di sostanze bituminose, ciò che già il Bianconi aveva osservato; e come a lui mi si mostrarono efflorescenze saline sulle colate asciutte.

Le argille scagliose di questa valle sembrano essere petroleifere e salifere in grado notevole: una fonte di acqua dolce con un velo di petrolio si trova poco prima di giungere alla salsa; sotto la chiesa di Sassuno in un vecchio pozzo di petrolio, sono stati di recente ripresi i lavori. Le efflorescenze saline coprono poi, per vaste estensioni, il letto del torrente.

Sulla sponda sinistra del rio adiacente alla salsa, pochi metri a monte del luogo ove termina la smotta argillosa, c'è una sorgente solfurea.

Interpretazione delle pagine 145-148

La descrizione del sito del "Dragone" presso Sassuno fornita da Biasutti rappresenta una delle prime analisi morfologiche e strutturali dettagliate di una salsa dell'Appennino bolognese, in cui osservazioni sul campo vengono integrate con considerazioni geologiche di tipo strutturale e stratigrafico. Il sito è collocato in un contesto dominato da argille scagliose fortemente deformate e marne mioceniche inclinate in modo discordante, interpretate dall'autore come possibile evidenza di discontinuità strutturali regionali.

Dal punto di vista geomorfologico, la salsa è descritta come una depressione semicircolare delimitata da un margine a gradino che separa nettamente l'area attiva di emissione fangosa dal terreno circostante. All'interno di questo campo si osserva una frattura semicircolare

concentrica al margine esterno, indicativa di deformazione progressiva del terreno legata alla dinamica dei fluidi nel sottosuolo. La zona emissiva principale è caratterizzata dalla presenza di piccoli coni e spiragli di fango, generalmente di dimensioni decimetriche in altezza e metriche in diametro, organizzati in modo sub-parallelo rispetto al margine del campo attivo.

Un elemento rilevante riguarda la delimitazione spaziale dell'attività emissiva: gli spiragli attivi risultano concentrati entro una fascia ristretta, estesa fino a circa 9 metri dal margine del gradino. Tale distanza rappresenta il limite interno della zona emissiva principale rispetto al bordo superiore della depressione e suggerisce una distribuzione spazialmente organizzata dei punti di degassamento, compatibile con una zona di degassazione relativamente localizzata e superficiale.

Il sito include inoltre un corpo di smotta argillosa distinto dalla salsa vera e propria, con larghezza dell'ordine di 10-15 metri. Questa colata viene interpretata come una frana superficiale indipendente, probabilmente innescata da condizioni di instabilità del versante in un contesto litologico saturo e plasticamente deformabile, e non come prodotto diretto dell'attività emissiva. La distinzione tra materiali della salsa, caratterizzati da fango fine e compatto, e quelli della smotta, più eterogenei e detritici, supporta questa interpretazione.

Dal punto di vista geochimico e idrogeologico, Biasutti segnala la presenza di sostanze bituminose e efflorescenze saline nelle colate asciutte, oltre alla presenza di sorgenti solfuree e tracce di idrocarburi nell'area circostante. Questi elementi indicano un sistema fluido complesso, in cui interagiscono componenti acquose mineralizzate, gas e frazioni organiche, coerente con la natura profondamente circolante dei fluidi tipici dei sistemi a salsa.

Nel suo complesso, il quadro descrive un sistema dinamico in cui la morfologia superficiale (depressione, gradino, fratture concentriche e coni emissivi) è strettamente controllata dalla risalita episodica di fluidi e gas, in interazione con un substrato argilloso deformabile e soggetto a instabilità gravitativa. La separazione tra processi emissivi e i processi di frana/smotta superficiale rappresenta un elemento di nota per le interpretazioni sulla cinematica del sito.



QUADERNI di GEOFISICA

ISSN 1590-2595

<https://collane-editoriali.ingv.it/index.php/qdg/it/index/>

QUADERNI di GEOFISICA è una rivista scientifica che pubblica dati, misurazioni e osservazioni geofisiche (anche preliminari) in italiano e inglese. L'obiettivo è una diffusione rapida e gratuita per la comunità scientifica, garantita da un processo di peer-review e da un Editorial Board multidisciplinare. La rivista è inclusa in "Emerging Sources Citation Index" di Clarivate Analytics e "Open Access Journals" di Scopus, e adotta il modello Diamond Open Access, che non prevede costi né per gli autori né per i lettori.

QUADERNI di GEOFISICA is a scientific journal that publishes geophysical data, measurements and observations, including preliminary results, in Italian and English. Its aim is to ensure rapid and free dissemination to the research community, supported by a peer-review process and by a multidisciplinary Editorial Board. The journal is included in the Emerging Sources Citation Index of Clarivate Analytics and it's included in the Open Access journals of Scopus. It follows the Diamond Open Access model, with no charges for either authors or readers.



RAPPORTI TECNICI INGV

ISSN 2039-7941

<https://collane-editoriali.ingv.it/index.php/rt/it/index>

RAPPORTI TECNICI INGV è una rivista tecnico-scientifica che mette in mostra le numerose attività tecnologiche e di ricerca condotte dai ricercatori e tecnici INGV, e non solo. Pubblicata in italiano e inglese, RAPPORTI TECNICI INGV è ideata per valorizzare anche quei lavori che offrono un contributo significativo dal punto di vista tecnico, operativo o documentale fondamentale per lo sviluppo dell'Ente. La rivista adotta il modello Diamond Open Access, che non prevede costi né per gli autori né per i lettori.

RAPPORTI TECNICI INGV is a technical-scientific journal that showcases the wide range of technological and research activities carried out by INGV researchers and technical staff, as well as by external contributors. Published in Italian and English, RAPPORTI TECNICI INGV is designed to highlight works that provide a significant contribution from a technical, operational, or documentary perspective, and that are essential to INGV development. The journal follows the Diamond Open Access model, with no charges for either authors or readers.



MISCELLANEA INGV

ISSN 2039-6651

<https://collane-editoriali.ingv.it/index.php/mi/it/index>

MISCELLANEA INGV rappresenta una tipologia di editoria non tradizionalmente catalogabile nelle ordinarie riviste scientifiche di settore. Pubblicata in lingua italiana e inglese, MISCELLANEA INGV offre uno spazio per la pubblicazione di materiali eterogenei che, pur non rientrando nei formati più strutturati delle altre Collane editoriali INGV, rivestono un interesse scientifico, tecnico o divulgativo. La rivista adotta il modello Diamond Open Access, che non prevede costi né per gli autori né per i lettori.

MISCELLANEA INGV represents a form of publishing that cannot be classified within the standard scientific journals. Published in Italian and English, MISCELLANEA INGV provides a venue for the publication of heterogeneous materials that are of scientific, technical or outreach interest, even though they do not fall within the more structured formats of the other INGV editorial series. The journal follows the Diamond Open Access model, with no charges for either authors or readers.

Progetto grafico
Barbara ANGIONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Ufficio Editoriale
Francesca DI STEFANO | Coordinatore

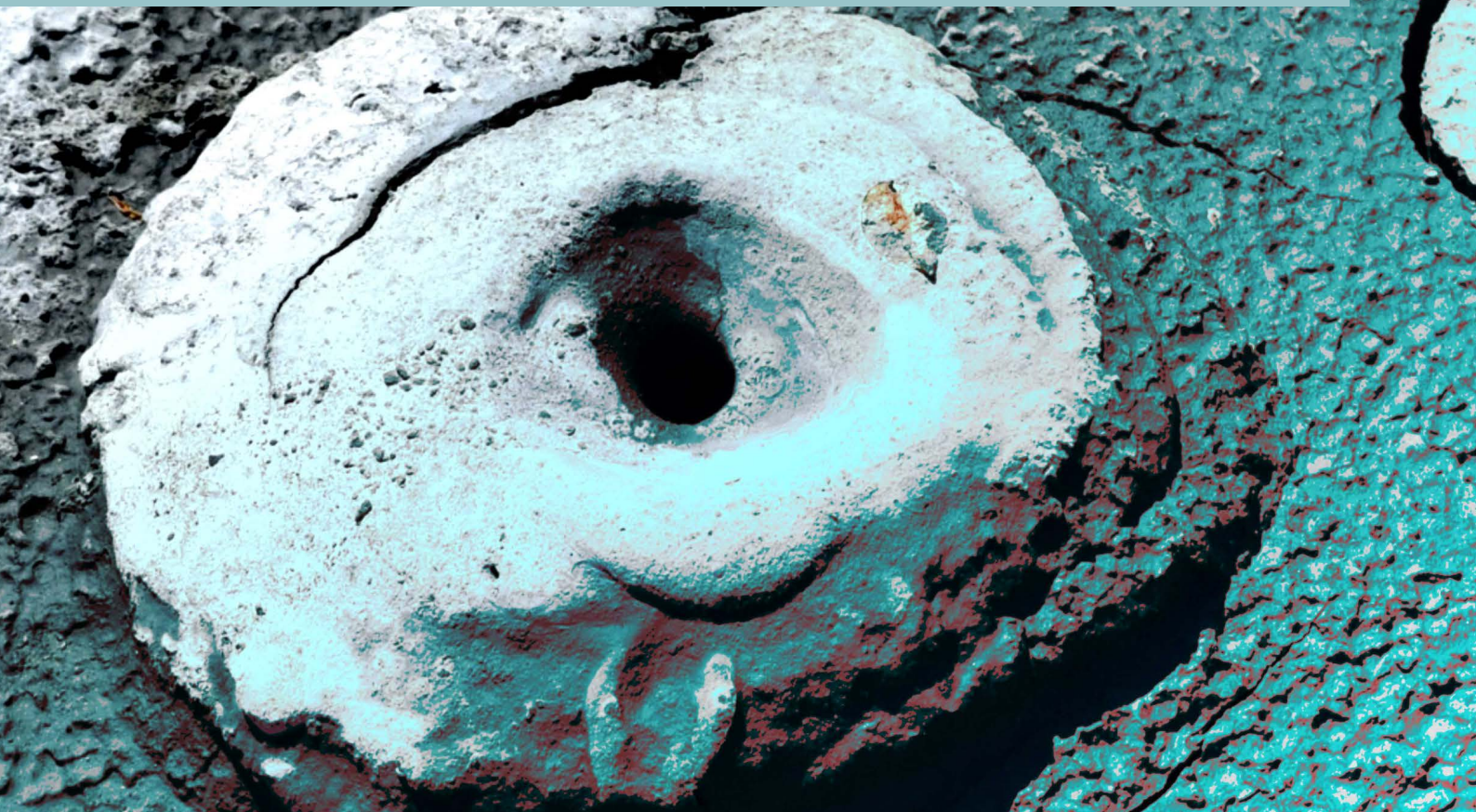
Segreteria di redazione
segreteria.collane-editoriali@ingv.it

Editing | Produzione | Grafica redazionale
Barbara ANGIONI
Massimiliano CASCONI
Francesca DI STEFANO
Patrizia PANTANI

© 2026 the Author(s). Open Access.
This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.



Creative Commons Attribution 4.0 International



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA