

# Studi interdisciplinari in Scienze della Terra per la fruizione in sicurezza della Riserva Naturale delle Salse di Nirano

a cura di Dorianò Castaldini, Marzia Conventi,  
Paola Coratza e Giovanni Tosatti



con il patrocinio di:



Comune di  
Fiorano Modenese



**PANARIA**group  
CERAMIC SURFACES

**Atti della Società dei Naturalisti e Matematici di Modena** è una rivista annuale, fondata nel 1866, che pubblica articoli originali riguardanti discipline scientifiche e ambientali (con particolare riguardo alla Regione Emilia-Romagna e all'Italia) e gli atti sociali. La rivista viene distribuita gratuitamente ai Soci e alle Società e Accademie corrispondenti, italiane e straniere, in tutte le parti del mondo. La rivista è indicizzata da: Bibliography and Index of Geology (USA), Biological Abstracts (USA), Chemical Abstracts (USA), Zoological Record (Gran Bretagna) e Referativnyi Zhurnal (Russia).

### **Consiglio Direttivo (2017-2019)**

*Presidente:* Prof.ssa Stefania Benvenuti

*Consiglieri:* Prof.ssa Tiziana Altiero, Dott.ssa Giovanna Barbieri, Dr.ssa Federica Calvi, Prof. Mario Panizza, Dott.ssa Giulia Squadrini, Prof. Giovanni Tosatti.

*Revisori dei Conti:* Dott. Fabrizio Buldrini, Prof.ssa Franca Cattelani, Prof.ssa Carla Fiori;  
*membro supplente:* Prof. Giampiero Ottaviani.

### **Norme per l'accettazione degli articoli**

Le comunicazioni sottomesse agli Atti della Società dei Naturalisti e Matematici di Modena per la pubblicazione, dopo che la Redazione abbia verificato la loro pertinenza con gli ambiti disciplinari della rivista, saranno sottoposte al giudizio di uno o due *referee* esterni, che valuteranno i lavori sia sotto l'aspetto dei contenuti sia sotto quello formale ed esprimeranno il loro parere vincolante circa l'accettabilità dei lavori stessi. Gli articoli presentati in inglese e gli *Abstract* saranno inoltre sottoposti a controllo linguistico da parte di docente madrelingua.

### **Settori disciplinari e relativi revisori scientifici**

**Meteorologia, Climatologia:** Prof. Dino Zardi (Università di Trento), Dr. Paolo Frontero (ARPA Veneto)

**Scienze della Terra:** Prof. Claudio Tellini (Università di Parma), Dr. Alessandro Pasuto (CNR-IRPI, Padova)

**Botanica, Agraria:** Prof.ssa Claudia Angiolini (Università di Siena), Prof.ssa Laura Sadori (Sapienza Università di Roma)

**Zoologia, Ecologia:** Prof.ssa Annamaria Volpi Ghirardini (Ca' Foscari Università di Venezia), Prof. Vincenzo Vomero (Direttore Musei Scientifici di Roma)

**Matematica:** Prof. Sergio Invernizzi (Università di Trieste)

**Fisica:** Prof.ssa Marisa Michelini (Università di Udine)

**Chimica, Scienze Farmaceutiche:** Prof. Gabriele Caviglioli (Università di Genova)

**Archeologia, Antropologia:** Dr. Marco Bettelli (CNR-ICEVO, Roma), Prof. Alessandro Vanzetti (Sapienza Università di Roma)

**Lingua Inglese:** Prof.ssa Andrea Mary Lord (già Università di Modena e Reggio Emilia)



Associato alla Unione  
Stampa Periodica Italiana

**ISSN 0365 - 7027**

Autorizzazione del Tribunale di Modena n. 387 del 10 agosto 1962

Direttore Responsabile: Giovanni Tosatti

Redazione: Atti della Società dei Naturalisti e Matematici di Modena

Via Università 4, 41121 MODENA, Italia

Codice Fiscale: 80016770366

sito web: [www.socnatmatmo.unimore.it](http://www.socnatmatmo.unimore.it)

e-mail: [john.tosatti@gmail.com](mailto:john.tosatti@gmail.com)



**Francesco Tosi\***

## **Prefazione**

Qualcuno mi ha chiesto se rientri nei compiti di un Comune promuovere pubblicazioni scientifiche e collaborare alla loro realizzazione. Ho risposto che dipende da alcuni fattori, in presenza dei quali considero virtuoso per una Amministrazione locale occuparsi anche di questo.

La conoscenza è la strada maestra di ogni attività dell'uomo e in particolare del progresso e del cambiamento; essa nelle svariate sue forme e modalità ha sempre un carattere positivo. Quando poi, come nel nostro caso, la conoscenza scientifica si coniuga con finalità pratiche, il cui raggiungimento rientra nei doveri etici e politici di chi ha la responsabilità di una comunità e di un luogo, allora la collaborazione con istituti accademici diventa virtuosa, pienamente funzionale alla attività di un Comune, vicina per così dire ai cittadini, lungi da un carattere di splendido isolamento di un sapere chiuso nelle mura di apparati scientifici.

È così che la cura e la passione con cui l'Amministrazione comunale di Fiorano Modenese (paese più noto nel mondo per essere il centro internazionale del distretto ceramico e per ospitare la pista di prova della Ferrari S.p.A.) rivolge da tempo a una particolarità naturale del proprio territorio, la Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano, ci ha indotti ad affrontare un tema fondamentale per i cittadini che la visitano e cioè il tema della sicurezza. Sono oltre 70.000 ogni anno i visitatori che entrano nella riserva per vedere e conoscere il singolare e suggestivo fenomeno naturale delle salse e tra questi molti sono bambini e ragazzi delle scuole.

Era per noi un dovere, specialmente dopo il dubbio generato dalla tragedia avvenuta in Sicilia in un ambiente naturale per alcuni versi simile al nostro, provare a chiarire in modo scientifico, con apporti ai massimi livelli, una questione profondamente delicata, vale a dire la fruizione del pubblico in piena sicurezza di questo bene ambientale che qualifica il nostro territorio.

Si è trattato di una bella occasione ed esperienza di collaborazione sul campo tra enti scientifici e istituzionali diversi, di cui abbiamo avuto modo di ap-

---

\* Sindaco del Comune di Fiorano Modenese, Piazza Ciro Menotti 1, 41042 FIORANO MODENESE (MO); e-mail: sindaco@fiorano.it.

prezzare i risultati della ricerca. Poi, come sempre, se lo studio e il sapere hanno un'origine contingente nascendo da occasioni particolari, ben presto i loro contenuti si liberano da finalità specifiche e si innalzano nel campo teorico capaci di fecondare altri elementi e di esserne a loro volta fecondati. Come sempre poi, ogni studio non chiude nessun capitolo del sapere e anzi apre nuove piste di ricerca e nuove pagine di quesiti. Questa utile esperienza, dunque, credo non possa dirsi conclusa.

Nel ringraziare tutti coloro che vi hanno partecipato, intendo dedicare una sincera parola di stima al personale dell'Ufficio Ambiente della mia Amministrazione, guidato dalla Dott.ssa Marzia Conventi, in quanto anche in questa occasione ha dimostrato come sia possibile per dei professionisti di un ente locale, dipendenti pubblici, coniugare la competenza e la serietà professionali con la passione positiva verso la cura e la valorizzazione di un gioiello della Natura a loro affidato.

Fiorano Modenese, 24 giugno 2017



**Doriano Castaldini\***, **Marzia Conventi\*\***, **Paola Coratza\***,  
**Giovanni Tosatti\*\*\***

## **Introduzione**

La presente raccolta di contributi scientifici tratta di molteplici aspetti riguardanti le Scienze della Terra, legati al fenomeno delle Salse di Nirano, che caratterizza una delle più importanti riserve naturali dell'Emilia-Romagna. L'occasione di raccogliere in un unico volume il lavoro di ricerca di numerosi esperti del settore è nata in seguito alla stesura di una Relazione tecnico-scientifica sollecitata dal Comune di Fiorano Modenese, nel quale ricade la Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano, per valutare in modo approfondito eventuali pericoli a carico di tutti coloro che, numerosi, visitano questa interessante riserva per scopi turistici o didattici.

Il 28 settembre 2014 nella Riserva Naturale delle Maccalube di Aragona, in provincia di Agrigento, l'esplosione di un vulcano di fango travolse un uomo in visita alla riserva con i suoi due figli che rimasero uccisi. Tale fatto, seppure verificatosi in un contesto localmente peculiare dal punto di vista geodinamico, ha reso necessaria una riflessione degli Amministratori di Fiorano Modenese sulla fruizione in sicurezza della zona integrale della Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano.

Pertanto nel 2015 venne siglato un Accordo di ricerca tra il Comune di Fiorano Modenese e il Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche dell'Università di Modena e Reggio Emilia che ha posto come obiettivo la definizione di un quadro conoscitivo, utile all'adozione da parte dell'Amministrazione di Fiorano Modenese di scelte finalizzate alla fruizione in sicurezza della zona integrale della Riserva Naturale delle Salse, di strategie di tutela e di valorizzazione del sistema di area dei vulcani di fango emiliani.

Lo studio, coordinato dal Prof. Doriano Castaldini del Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche dell'Università di Modena e Reggio Emilia, è stato realizzato attraverso una sinergia di ricerca tra Atenei, Istituti di ricerca

---

\* Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, Via Giuseppe Campi 103, 41125 MODENA; e-mail: doriano.castaldini@unimore.it; paola.coratza@unimore.it.

\*\* Responsabile Ufficio Ambiente e Direzione della Riserva Naturale delle Salse di Nirano, Via Vittorio Veneto 27/A, 41042 FIORANO MODENESE (MO); e-mail: mconventi@comune.fiorano-modenese.mo.it.

\*\*\* Direttore responsabile degli Atti della Società dei Naturalisti e Matematici di Modena, Via Università 4, 41121 MODENA; e-mail: john.tosatti@gmail.com.

ed Enti pubblici differenti<sup>1</sup> con alte competenze in materia di indagini diverse al fine di definire un quadro conoscitivo per l'adozione, da parte dell'Amministrazione comunale, di misure di salvaguardia della sicurezza dei fruitori della Riserva.

In particolare, lo studio è stato condotto attraverso numerose indagini sul terreno, eseguite sia separatamente sia congiuntamente dai ricercatori delle singole discipline partecipanti all'Accordo; i dati raccolti sono stati in seguito analizzati ed elaborati presso le varie sedi di afferenza dei ricercatori.

Le varie attività, descritte in dettaglio nei contributi di questo volume, sono qui riassunte preliminarmente.

Per gli aspetti geologico-geomorfologici è stato effettuato uno studio di dettaglio che ha portato all'elaborazione di una nuova carta geologico-geomorfologica del campo delle Salse di Nirano, con approfondimento sull'evoluzione dei punti di emissione e dei depositi attivi delle salse dal 1884 al presente, alla raccolta e interpretazione dei dati geologici del sottosuolo per la ricostruzione del modello geologico locale, oltre a un'esauritiva ricerca bibliografica che ha fornito un contributo originale per la lettura degli episodi di attivazione dei vulcani di fango del Pedepennino emiliano.

Per evidenziare le modifiche nella topografia delle salse è stato realizzato un rilevamento topografico dei principali apparati lutivomi. In questa parte dello studio sono stati utilizzati diversi strumenti quali stazione totale e strumentazione GPS per ottenere dati altimetrici e coordinate geografiche di punti noti installati come riferimento sia all'interno che all'esterno del campo, mentre veicoli aerei a pilotaggio remoto (droni) e laser scanner terrestri sono stati utilizzati per ottenere ricostruzioni tridimensionali dei principali apparati lutivomi.

È stato effettuato il monitoraggio dei flussi gassosi e la caratterizzazione geochimica delle componenti gassose nell'area totale delle Salse di Nirano, oltre ad analisi chimiche su campioni di suoli fangosi. È stato inoltre stimato il tasso di degassamento dell'area delle salse e i dati geochimici sono stati confrontati con dati di letteratura relativi ad altri vulcani di fango italiani. Ciò ha consentito di valutare le reali potenzialità delle Salse di Nirano sia in termini di rischio che di emissioni in atmosfera.

Sono state effettuate misurazioni in continuo di temperatura e livello del fango nell'apparato lutivomo denominato "Salsa D-La Giunta", dominato dal-

---

<sup>1</sup> Enti partecipanti allo studio: Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche dell'Università di Modena e Reggio Emilia; Dipartimento di Ingegneria Civile Chimica Ambientale e dei Materiali dell'Università di Bologna; Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna; ARPAE Emilia-Romagna - Sezione di Reggio Emilia; Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) - Sezione di Roma; Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente dell'Università di Siena; Dipartimento di Scienze Matematiche e Informatiche, Scienze Fisiche e Scienze della Terra dell'Università di Messina.

la fase liquida e scarsamente soggetto a variazioni morfologiche o di portata significative nel tempo. I dati misurati sono stati confrontati con la pressione atmosferica, le precipitazioni e i terremoti con magnitudo superiore a 2, rispettivamente in un raggio di 20 e 70 km. Nello stesso apparato è stato inoltre condotto un primo test di misura con idrofono.

Sono state eseguite analisi mineralogiche, calcimetriche e granulometriche dei fanghi estrusi, con lo scopo di determinare la composizione mineralogica e le proprietà fisiche degli stessi e di correlare tali informazioni con quelle ottenute da altri indagini della presente ricerca.

Nello studio in oggetto è stata anche effettuata, per la prima volta, un'analisi micropaleontologica dei fanghi delle salse che ha fornito dati preliminari interessanti riguardo la provenienza, più o meno profonda, dei fluidi in risalita.

Sono stati eseguiti monitoraggi sismici per valutare le variazioni temporali del flusso di gas che alimenta gli apparati lutivomi, per determinare la posizione dei condotti e dei serbatoi superficiali da cui gli apparati vengono alimentati e per stabilire delle procedure di monitoraggio sismico finalizzati alla misurazione delle variazioni delle modalità di emissione.

Sono state inoltre eseguite, per la prima volta, indagini sperimentali sulle caratteristiche reologiche dei fanghi delle salse finalizzate all'identificazione delle basi fisiche in grado di spiegare l'intermittenza, e perciò potenzialmente la violenza, del fenomeno eruttivo o delle modalità di gorgogliamento.

È stata anche misurata la composizione isotopica di stronzio, ossigeno, deuterio e trizio dei fluidi emessi dalle salse per determinarne l'origine e verificarne l'eventuale contaminazione da parte di acque meteoriche.

Infine la bibliografia, redatta a cura di tutti gli autori e che raccoglie oltre 200 citazioni nel settore delle Scienze della Terra, costituisce un ampio e utile riferimento per tutti coloro che si occupano dello studio del fenomeno dei vulcani di fango.

Durante lo svolgimento delle ricerche sono stati mantenuti regolari contatti con l'Amministrazione del Comune di Fiorano Modenese e i risultati ottenuti *in itinere* sono stati illustrati e discussi in occasione di due Workshop, svoltisi a Modena presso il Complesso Universitario di Largo Sant'Eufemia il 9 dicembre 2015 e il 27 aprile 2016. I risultati finali delle ricerche sono stati presentati alla cittadinanza e alla comunità scientifica presso il castello di Spezzano il 22 ottobre 2016 nell'ambito dell'iniziativa nazionale "Settimana del Pianeta Terra".





**Doriano Castaldini\* , Marzia Conventi\*\***

## **Inquadramento geografico e caratteristiche delle Salse di Nirano**

### **Riassunto**

*La Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano (Comune di Fiorano Modenese) è stata la prima riserva naturale istituita nel 1982 dalla Regione Emilia-Romagna e, dal 2004, è anche un Sito di Importanza Comunitaria. 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 e, in piccola parte, liquidi prevalentemente lungo faglie e fratture del margine appenninico emiliano. La forma degli apparati 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. Nel presente studio le salse sono state suddivise in otto gruppi identificati con una lettera da A a H, oltreché con una terminologia locale.*

### **Abstract**

**Geographic setting and characteristics of the Nirano Mud Volcano Nature Reserve.** *The Regional Nature Reserve of the Nirano mud volcanoes (Fiorano Modenese, Italy) was the first nature reserve established in 1982 by the Emilia-Romagna Region and, since 2004, it is also a Site of Community Importance of the EU. The Nirano mud volcanoes are the oldest example of protected mud volcanoes in Italy and to date they are among the best preserved in Europe. These pseudovolcanic apparatuses are emissions of cold mud produced by the rising to the surface of salty and muddy water mixed with gaseous and, to a lesser extent, liquid hydrocarbons mainly along faults and joints of the Emilia pede-Appennine margin. The shape of the various apparatuses depends mostly on the characteristics of the extruded muds, which differ from the mineralogical and particle-size viewpoint. The morphology of mud volcanoes is in constant evolution: new vents are formed whereas others stop their activity. In this study, the Nirano mud volcanoes have been subdivided into eight groups, identified by means of a letter; from A to H, and also according to a local terminology.*

**Parole chiave:** *Vulcani di fango, apparato lutivomo, faglie e fratture, margine appenninico emiliano, Nirano.*

**Key words:** *Mud volcanoes, mud ejection apparatus, faults and joints, Emilia pede-Appennine margin, Nirano.*

---

\* Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, Via G. Campi 103, 41125 MODENA; e-mail: doriano.castaldini@unimore.it.

\*\* Responsabile Ufficio Ambiente e Direzione della Riserva Naturale delle Salse di Nirano, Via Vittorio Veneto 27/A, 41042 FIORANO MODENESE (MO); e-mail: mconventi@comune.fiorano-modenese.mo.it.

## 1. Premessa

Le Salse di Nirano sono dei vulcani di fango ubicati nell'omonima Riserva Naturale Regionale che si trova al margine dell'Appennino nel territorio del Comune di Fiorano Modenese, nel cuore del distretto ceramico più importante al mondo, ed è facilmente raggiungibile da Modena, distante appena 30 km (Fig. 1). La superficie della Riserva si estende per un totale di 207 ha ed è compresa fra i 140 e i 308 m s.l.m.; l'area è suddivisa in tre zone a diverso grado di protezione: una più interna, a protezione integrale, un'area intermedia, a tutela ambientale generale, e una esterna di protezione che delimita l'area della Riserva.

La zona in cui sono ubicate le salse – l'area a Riserva Integrale – è posta a quote comprese fra i 200 e i 220 m s.l.m. e occupa un'area di circa 10 ha di proprietà pubblica.

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. Esse sono state descritte, assieme ad altre salse del Modenese, già da Plinio il Vecchio nella sua *Historia mundi naturalis*, scritta intorno al 75-79 d.C. Descrizioni delle salse furono fatte anche in secoli successivi ma le spiegazioni del fenomeno erano poco attendibili sul piano scientifico. Soltanto alla fine del XIX secolo la vera natura delle salse fu riconosciuta e descritta da Coppi (1875) e da Stoppani (1876) nella sua famosa opera "Il Bel Paese".

Sulle Salse di Nirano sono poi seguiti altri numerosissimi lavori che si sono occupati degli aspetti geologici, botanici e naturalistici. Per brevità, vengono di seguito citati solo gli studi realizzati nell'ultimo decennio nel settore delle Scienze della Terra: Accaino *et al.* (2007), Bertacchini (2009), Bonini (2008a, 2008b, 2009, 2012, 2013), Carobene & Gasperi (2008), Alagna & Pavignani, 2010, Castaldini *et al.* (2007, 2011a, 2011b, 2017a, 2017b), Liberatoscioli *et al.* (2011), Piacentini *et al.* (2011), Manga & Bonini (2012), Oppo *et al.* (2013, 2017), Frehner & Lupi (2014), Frehner *et al.* (2014), Lupi *et al.* (2014, 2016), Sciarra *et al.* (2015), Castaldini & Coratza (2017).

Per lungo tempo l'area delle Salse di Nirano è stata utilizzata per pratiche agricole e i coni di fango venivano parzialmente spianati; il fango era inoltre utilizzato per scopi terapeutici e questo impediva l'accrescimento degli apparati lutivomi. Con il "Progetto per l'istituzione di una Riserva Integrale in località Salse di Nirano", il Comune di Fiorano Modenese ha iniziato nel 1979 un percorso di salvaguardia dell'area e di acquisto dei terreni interessati dagli apparati lutivomi, che ha portato, nel 1982, all'istituzione della prima Riserva riconosciuta in Emilia-Romagna, con l'obiettivo di tutelare e conservare le caratteristiche geologiche e vegetazionali dell'area.

Nel 2004 la Commissione Europea, sulla base della direttiva "Habitat", ha individuato nell'intera area della Riserva, e in zone limitrofe, un "Sito di Im-

portanza Comunitaria” (SIC) grazie anche alla presenza di cinque habitat naturali e seminaturali considerati di interesse comunitario. Il SIC IT 4040007, che comprende interamente la Riserva, ha un’estensione di 371 ha e ospita l’habitat 1340\* – “Pascoli inondata continentali” a *Puccinellia fasciculata* (Fig. 2) – specie alofila dei litorali, capace di adattarsi in condizioni ambientali fortemente selettive per salinità e aridità del suolo, che nel campo delle Salse di Nirano trova la sola stazione di entroterra della “Rete Natura 2000”. *Puccinellia fasciculata* è pertanto assurta a simbolo e bandiera della Riserva, e ne è stata, sin dalla sua scoperta a Nirano, elemento trainante di istituzione della stessa, continuando a svolgere un ruolo prioritario nella scelta e nella definizione di misure di conservazione e di gestione delle Salse.

La dichiarazione di importanza del SIC è dovuta, oltre che alla peculiarità geologica del sito e alla presenza dell’habitat anzidetto, dalla capacità di ospitare, in questi territori, specie vegetali e animali e condizioni ecologiche ritenute prioritarie da proteggere in quanto uniche e faultrici di una specifica biodiversità. Infine la peculiarità della Riserva, legata alla presenza delle salse, unitamente al valore geologico-paesaggistico dei calanchi, che caratterizzano l’area, ha valso al territorio della Riserva e del SIC il riconoscimento di “Geosito” per la tutela del Patrimonio Geologico del nostro Paese. Dal 2016 la gestione della Riserva avviene in modo coordinato tra il Comune di Fiorano Modenese e l’Ente Parco dell’Emilia centrale.

Si può affermare che il diminuito impatto antropico, avviato dall’istituzione della Riserva, ha indubbiamente contribuito allo sviluppo e al consolidamento degli apparati lutivomi. Anche le aree circostanti la zona a protezione integrale, in passato utilizzate per pratiche agricole e di pastorizia, mostrano, grazie alla forma di tutela che valorizza la naturale evoluzione del territorio, un aumento della vegetazione, con conseguente diminuzione dei fenomeni di erosione accelerata. Attualmente l’intera Riserva si è attrezzata sia proteggendo gli apparati lutivomi sia allestendo camminamenti con passerelle in legno sopraelevate per consentire l’accesso ai disabili e permettere ai visitatori di avvicinarsi e osservare i fenomeni legati alle salse in modo ottimale e sicuro (“Itinerario siti aperti”, cfr. Castaldini *et al.*, 2011b).

In considerazione delle sue peculiarità ambientali la Riserva è stata anche inserita nell’ambito di escursioni di manifestazioni scientifiche internazionali. In particolare, nel 2011 è stata visitata da studenti e docenti di scuola superiore, provenienti da 34 paesi di tutto il mondo, partecipanti alla quinta edizione della “International Earth Science Olympiad” (IESO 2011) e nel 2013 dai partecipanti a una escursione della Conferenza mondiale di Geochimica “Goldschmidt” di Firenze (Sciarra *et al.*, 2015).

Dal 2016 la Riserva è inserita nell’itinerario della “Via dei vulcani di fango”, un percorso per tutti che collega luoghi ed eccellenze attraverso il feno-

meno dei vulcani di fango nei territori dei comuni emiliani di Maranello, Fiorano Modenese, Sassuolo, Castellarano, Scandiano, Viano (GeoMedia, 2017).



Fig. 1 – Ubicazione geografica dell'area della Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano (riquadro grigio).

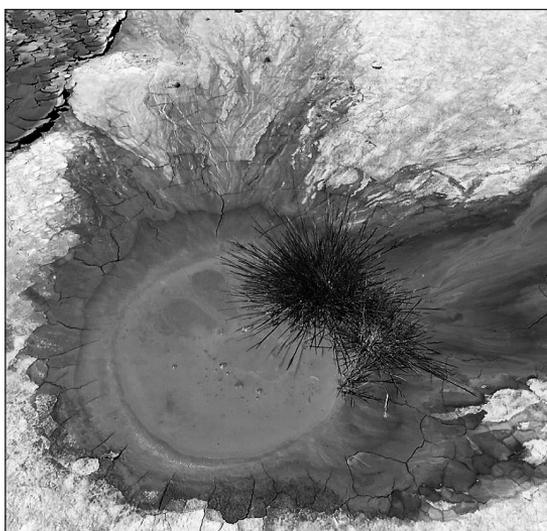


Fig. 2 – Esempari di *Puccinellia fasciculata* cresciuti attorno a un apparato lutivomo a "polla" (foto S. Magli).

## 2. Il fenomeno delle salse

Sulla base dei lavori precedentemente citati risulta che le “salse” – termine locale per indicare vulcani di fango – sono delle emissioni di fango freddo (la temperatura è prossima a quella ambiente: poco più alta in inverno e poco più bassa in estate) prodotte dalla risalita in superficie di acqua salata e fangosa frammentata a idrocarburi principalmente gassosi (metano) e, in piccola parte, liquidi (petrolio) prevalentemente lungo faglie e fratture del margine appenninico.

In Italia vi sono una sessantina di siti con presenza di vulcani di fango di cui una ventina in Emilia-Romagna (Martinelli & Judd, 2004; Castaldini & Coratza, 2017); questi fenomeni, vengono indicati localmente anche con altri termini tra cui “barboi”, “bollitori”, “maccalube”.

Il nome “salsa” (dal latino *salsus* che significa salato) deriva appunto dall’alto contenuto di sale delle acque fangose. La salinità delle acque è dovuta prevalentemente alla presenza di cloruro di sodio (NaCl) e tale presenza è facilmente verificabile quando il fango fuoriuscito si essicca e per evaporazione si formano in superficie veli ed efflorescenze bianche. Queste acque salate sono definite “connaate”, cioè formatesi entro i sedimenti che si depositarono alcuni milioni di anni fa nell’antico Mare Adriatico, che era ben più vasto dell’attuale. Esse sono rimaste intrappolate in profondità nei sedimenti e sono pertanto considerate acque fossili (cfr. Cipriani *et al.*, 2017 nel presente volume).

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. La loro presenza è facilmente verificabile grazie all’inflammabilità dei gas emessi (Fig. 3) e alle chiazze di petrolio di colore marrone. I serbatoi di provenienza dei materiali fangosi sembra si collochino tra i 500 e i 2000 m di profondità (cfr. anche Bonini 2007, 2008a, 2009, 2012, 2013; Oppo *et al.* 2017). I materiali limo-argillosi vengono 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. Studi precedenti (Conti *et al.*, 2003; Accaino *et al.*, 2007) avevano già evidenziato una stretta relazione tra la natura dei depositi estrusi dall’attività dei vulcani di fango e la natura del substrato, dimostrata dalla corrispondenza con depositi del substrato più superficiale; fatto che pone interrogativi sulle modalità di stazionamento dei fluidi nel sottosuolo.

Studi geofisici, descritti in Accaino *et al.* (2007), hanno tra l’altro permesso di ricostruire le strutture sepolte fino alla profondità di 30-50 m dal piano campagna, evidenziando i condotti superficiali di risalita del materiale e riconoscendo una camera di accumulo del fango alla profondità di 25 m dal piano campagna; tale camera non è in relazione con l’ambiente di formazione del fango, ma rappresenta un serbatoio sub-superficiale prima dell’emissione

finale che, in generale, può avvenire in corrispondenza delle più disparate discontinuità o attraverso terreni a diversa permeabilità.

Secondo la terminologia più accreditata (cfr. Higgings & Saunders, 1974; Kopf, 2002), la forma dei vulcani di fango, può essere praticamente piatta al livello del terreno circostante (*mud pie*) oppure a coni singoli (*mud dome*) o multipli, anche con coni avventizi (*gryphon*). Nel caso specifico, la forma degli apparati lutivomi dipende dalla tipologia dei fanghi estrusi leggermente diversi tra loro dal punto di vista mineralogico e granulometrico (cfr. Vezzalini *et al.*, 2017 nel presente volume). Si è verificata quindi la formazione di “coni” singoli (Figg. 8 e 10), doppi o multipli (Fig. 9 e 11) di altezza variabile da vari decimetri ad alcuni metri, e di “polle” a livello del terreno circostante (Fig. 12), o comunque meno sviluppate verticalmente, con diametri variabili da alcuni decimetri a pochi metri. In totale nel campo di fango si possono individuare quattro gruppi di apparati lutivomi “a cono” e numerosissime salse “a polla”.

Questo particolarissimo ambiente geologico presenta una morfologia in continua evoluzione: nuove bocche si aprono mentre altre cessano la loro attività. Ciò è dovuto all’alternarsi di periodi di intensa attività con altri di scarsa o nulla attività. Durante questi ultimi il fango seccandosi va ad ostruire il condotto di uscita e il fango deve necessariamente trovare nuove vie di fuoriuscita. Punti lutivomi di nuova generazione si sono formati nella zona dell’Ecomuseo Ca’ Rossa: nel boschetto a sud-ovest del caseggiato (Figg. 4 e 5), dopo i forti terremoti della sequenza sismica emiliana del 2012, e nel piccolo prato ad ovest nel maggio 2016.



Fig. 3 – La presenza di gas emessi dalle bocche dei vulcani di fango è testimoniata dalla loro infiammabilità la cui dimostrazione è consentita solo alle Guardie Ecologiche Volontarie che presidiano la riserva (foto D. Castaldini).

Le salse sono ubicate sul fondo di una depressione sub-circolare (caldera) di cui si dirà nel capitolo delle caratteristiche geomorfologiche.

I materiali limo-argillosi che fuoriescono dalle salse ricoprono il terreno circostante tramite colate; pertanto, con il ripetersi di questo fenomeno nel tempo, il fondo della conca è stato in gran parte ricoperto da depositi fangosi dello spessore di vari metri.

Il fango che fuoriesce dalle salse fluisce, lungo fossi e lungo il Rio delle Salse, nel Torrente Fossa che scorre a pochi chilometri di distanza.

### **3. Nomenclatura di riferimento delle Salse di Nirano**

Le varie attività di ricerca illustrate nella presente pubblicazione hanno previsto rilievi, monitoraggi, misurazioni e campionamenti di vario tipo sui principali punti lutivomi degli oltre quattrocento censiti dal 1884 al maggio 2016.

Pertanto, per facilitare l'individuazione degli apparati descritti nei successivi capitoli, si è ritenuto opportuno elaborare una "figura indice" con la nomenclatura di riferimento per le Salse di Nirano utilizzando anche la denominazione locale (Fig. 6).



Fig. 4 – Le Salse “C-Garfagnine” nel boschetto a SO di Ca’ Rossa nell’ottobre 2012 (foto D. Castaldini).



Fig. 5 – Le Salse “C-Garfagnine” nel boschetto a SO di Ca’ Rossa nel giugno 2016 (foto D. Castaldini).



Fig. 6 – Carta indice con nomenclatura di riferimento per le Salse di Nirano (da immagine Google earth del 28/09/2016).

Procedendo in senso orario dall'accesso principale del sentiero denominato "Siti aperti", le prime salse che si rinvencono sono quelle qui denominate "A-Nando Ovest": si tratta di piccole salse a cono, allineate tra loro, che alternano periodi di attività a periodi di stasi (Fig. 7). A pochi metri di distanza è ben visibile, anche dalla strada, la salsa qui denominata "B-Nando", si tratta di un bellissimo esempio di cono singolo attivo (Fig. 8). L'attività lutivoma particolarmente intensa che ha preceduto i sismi distruttivi della pianura modenese nel 2012, ha prodotto l'innalzamento del cono di alcuni decimetri. Attraversando la strada comunale Via Rio Salse (II tronco), si incontrano diversi apparati, con bocche più evidenti ubicate a sud-ovest dell'Ecomuseo di Ca' Rossa; si tratta delle salse denominate "C-Garfagnine" in quanto testimonianze locali affermavano che fossero comparse qualche giorno prima del sisma della Garfagnana di magnitudo = 4,8 del 25/01/2013 (informazione errata ripresa anche da Sciarra *et al.*, 2015). In realtà, alcune fotografie rinvenute recentemente hanno documentato che i punti lutivomi erano già presenti nell'ottobre 2012 sotto forma di alcuni piccoli punti di emissione dispersi nel boschetto (Fig. 4). Successivamente l'emissione di fango è aumentata concentrandosi in due apparati principali (Fig. 5). Durante gli eventi sismici del 2012 in Emilia l'emissione di fango da queste bocche era diventata così intensa da creare disagi alla viabilità stradale prospiciente; pertanto per far defluire il fango senza interessare la strada sono stati scavati dei fossi, all'interno della zona di emissione. Questa soluzione impedisce però uno sviluppo naturale degli apparati lutivomi "C-Garfagnine"; il fango accumulato sta inoltre causando la morte degli alberi. Nel maggio 2016 sono comparse altre piccole polle nel prato ad ovest della carreggiata che conduce a Ca' Rossa. Situata di fronte a Ca' Rossa (SSO), è ben visibile dalla Strada delle Salse l'apparato denominato "D-La Giunta"; esso è costituito da un complesso di oltre sei punti lutivomi, tra attivi e non, a forma di cono o di polla (Fig. 9). Il 26 maggio 2015, in una delle bocche lutivome è stata installata una sonda di monitoraggio in grado di misurare con sufficiente potere risolutivo i valori di livello dell'acqua fangosa e di temperatura (cfr. Martinelli & Dadomo, 2017 nel presente volume).

Per osservare le altre salse occorre percorrere la passerella dell'itinerario "Siti aperti" e proseguire oltre lungo il sentiero sterrato che conduce alla zona più elevata del campo delle salse. La salsa "E-Egidio" è costituita da un singolo apparato a forma di tronco di cono (Fig. 10) situato in posizione intermedia rispetto alle altre salse. Lasciando la passerella in legno di "Siti aperti" e proseguendo verso sud-ovest, si incontrano apparati effimeri e non visibili nella carta indice (Fig. 6), qui individuati con la lettera "F". Nel settore più elevato si trova la salsa "G-Fernando" che è l'apparato lutivomo più vecchio e più grande di tutto il campo delle salse (Fig. 11). Presenta complessivamente una forma a

tronco di cono con ampia parte superiore. È costituito da più punti di emissione di fango, alcuni attivi ed altri estinti, a forma di piccoli coni o polle.

Pochi metri a nord di “G-Fernando” sono ubicate quattro salse a polla, qui denominate “H-Polle alte” del diametro dell’ordine del metro (Fig. 12) che, per le loro ridotte dimensioni, non sono visibili nella Fig. 6.



Fig. 7 – Salse “A-Nando Ovest”: piccole salse a cono allineate; sullo sfondo “D-La Giunta” (maggio 2016, foto D. Castaldini).



Fig. 8 – Salsa “B-Nando”, bellissimo esempio di cono singolo attivo (novembre 2016, foto D. Castaldini).



*Fig. 9 – Sommità della Salsa “D-La Giunta”, costituita da un complesso di più punti lutivomi a cono e a polla. In secondo piano la “Salsa B-Nando” (marzo 2017, foto D. Castaldini).*



*Fig. 10 – La Salsa “E-Egidio” situata al centro del campo delle salse (novembre 2016, foto D. Castaldini).*



Fig. 11 – La Salsa “G-Fernando”: l’apparato lutivomo più vecchio e più grande di tutto il campo delle salse costituito da un complesso di più punti di emissione a cono e a polla (maggio 2016, foto L. Callegari).

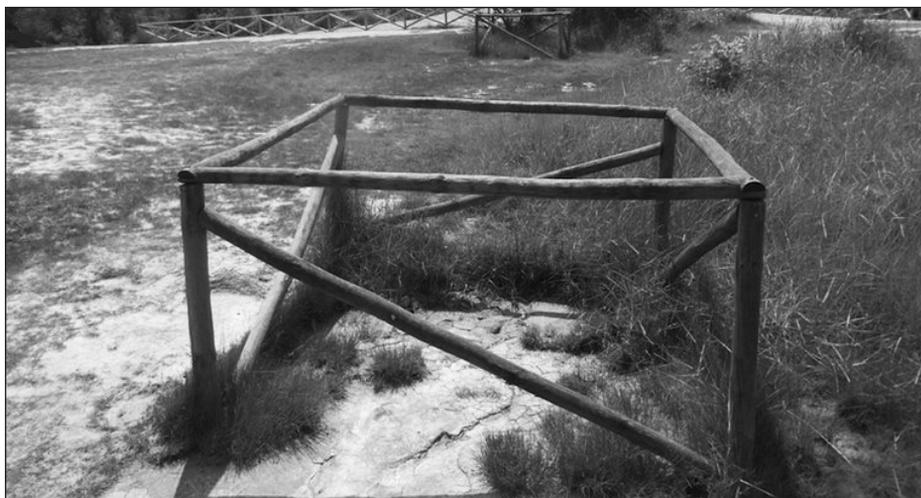


Fig. 12 – Una delle quattro salse dette “Polle alte-H” ubicate a nord di “G-Fernando” (maggio 2016, foto D. Castaldini).

### **Ringraziamenti**

Gli autori ringraziano il Prof. Stefano Conti per il prezioso lavoro di revisione del manoscritto.



**Doriano Castaldini\***, **Paola Coratza\***,  
**Maria Teresa De Nardo\*\***

## **Geologia e Geomorfologia delle Salse di Nirano**

### **Riassunto**

*Attraverso ricerche bibliografiche, fotointerpretazione di immagini telerilevate multiscalarari e multitemporali e rilevamenti di dettaglio è stato condotto un approfondimento sull'evoluzione delle caratteristiche dei punti di emissione e dei depositi attivi delle Salse di Nirano. Sono stati inoltre raccolti e interpretati dati geologici del sottosuolo per la ricostruzione del modello geologico locale. Queste ricerche hanno portato all'elaborazione di una Carta geologico-geomorfologica alla scala 1:5000 dell'area delle Salse di Nirano. In essa, tra gli altri aspetti, sono indicati tutti i punti lutivomi distinti in coni e polle e gli allineamenti principali che caratterizzano le bocche lutivome e che corrispondono a sistemi di fratture utilizzati per la fuoriuscita dei fanghi mescolati a gas.*

### **Abstract**

***Geological and geomorphological characteristics of the Nirano mud volcanoes.** An in-depth study was carried out on the evolution of the emission points and active deposits of the Nirano mud volcanoes (Italy) by means of bibliographic research, photo-interpretation of multiscalar and multitemporal remote sensing imagery and detailed field survey. In addition, subsurface geological data were collected and interpreted for reconstructing the local geological model. These investigations led to the elaboration of a geological-geomorphological map, at a 1:5000 scale, of the Nirano mud volcano area. Among various features, this map shows all the emission points, distinguished as cones and pools, and the main alignments that characterise the mud volcanoes and correspond to joint systems through which mud mixed with gas comes to the surface.*

**Parole chiave:** *Vulcani di fango, cartografia geologica e geomorfologica, evoluzione delle salse, immagini telerilevate, Nirano.*

**Key words:** *Mud volcanoes, geological and geomorphological mapping, mud volcano evolution, remote sensed imagery, Nirano, Italy.*

---

\* Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, Via G. Campi 103, 41125 MODENA; e-mail: doriano.castaldini@unimore.it; paola.coratza@unimore.it.

\*\* Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, Viale della Fiera 8, 40127 BOLOGNA; e-mail: mariateresa.denardo@regione.emilia-romagna.it.

## 1. Introduzione sugli studi geologici e geomorfologici

Nell'ambito della ricerca promossa dal Comune di Fiorano Modenese è stato eseguito l'approfondimento e l'aggiornamento della cartografia geologica e geomorfologica disponibile riguardante l'area delle Salse di Nirano, anche attraverso una collaborazione stabilita tra il Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche dell'Università di Modena e Reggio Emilia e il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

In particolare, le attività svolte sono state le seguenti:

- 1) Rilevamento geologico e geomorfologico di dettaglio, che ha portato all'elaborazione di una Carta geologico-geomorfologica alla scala 1:5000 dell'area delle Salse di Nirano (Tav. 1).
- 2) Approfondimento sull'evoluzione delle caratteristiche dei punti di emissione e dei depositi attivi dei vulcani di fango, con restituzione cartografica a scala variabile da 1:5000 a 1:2000, tramite i suddetti rilevamenti e l'interpretazione di immagini telerilevate multitemporali e multiscalari. Questa attività ha permesso di ottenere, per la prima volta, un quadro conoscitivo dettagliato sull'evoluzione dell'ubicazione dei punti di emissione e delle forme dei depositi attivi (ovvero non vegetati) degli apparati lutivomi, in un arco di tempo dal 1884 all'attuale, con un maggiore dettaglio a partire dagli anni '50 del secolo scorso.
- 3) Raccolta e interpretazione di dati geologici del sottosuolo, per la ricostruzione del modello geologico locale, che ha permesso di contribuire all'interpretazione delle strutture che facilitano la risalita dei fluidi in superficie, affiancandosi alla letteratura esistente (ad es. le sintesi in Bonini, 2008b; 2012).

## 2. Inquadramento geologico

Nella zona della Riserva Naturale delle Salse di Nirano affiorano rocce limo-argillose di origine marina del Pliocene inferiore-Pleistocene inferiore appartenenti alla Formazione delle Argille Azzurre (FAA). Si tratta di peliti, di colore grigio, che hanno un aspetto solo apparentemente omogeneo in affioramento mentre, ad un'osservazione più attenta, rivelano una certa stratificazione, seppure mal percepibile a causa della bioturbazione dovuta all'azione degli organismi che vivevano sul fondo marino all'epoca della sedimentazione dell'unità. Sono ricche di fossili, tra cui gusci di lamellibranchi e gasteropodi.

Dal punto di vista strutturale (Bonini, 2012) la depressione ovale è situata sulla cresta di un'anticlinale la cui traccia assiale ha direzione NO-SE (Gasperi *et al.*, 2005) che piega depositi del Pleistocene inferiore (riportata nella Carta geologico-geomorfologica come dato bibliografico). L'assetto è comunque a generale monoclinale con immersione a NE degli strati, l'inclinazione dei quali aumenta fortemente verso il margine, in corrispondenza di una piega a

flessura ben documentata in letteratura (flessura Veggia-Fiorano, Gasperi *et al.*, 2005).

L'area è interessata dalla presenza di sistemi di faglie ad alto angolo, con direzione NO-SE (sistema a direzione appenninica) e, trasversalmente a quest'ultimo, con direzioni SO-NE ed ENE-OSO (sistemi a direzione antiappenninica). Come rappresentato nella carta di sintesi di Fig. 1 (Bonini, 2012), una faglia trasversale, sub-verticale, ad orientazione antiappenninica s.l. è cartografata nella valle della Fossa di Spezzano. Analogamente a quanto si osserva in molti settori dell'Appennino settentrionale, la faglia fa parte di svincoli che interrompono la continuità degli accavallamenti (sovrascorrimenti) in genere nord-vergenti, attraverso cui è costituita la catena. Questi continuano nella pianura antistante il margine collinare, dove sono coperti dai depositi alluvionali del Pleistocene superiore ed Olocene del Fiume Secchia e dei suoi affluenti (Gasperi *et al.*, 1989, 2005).

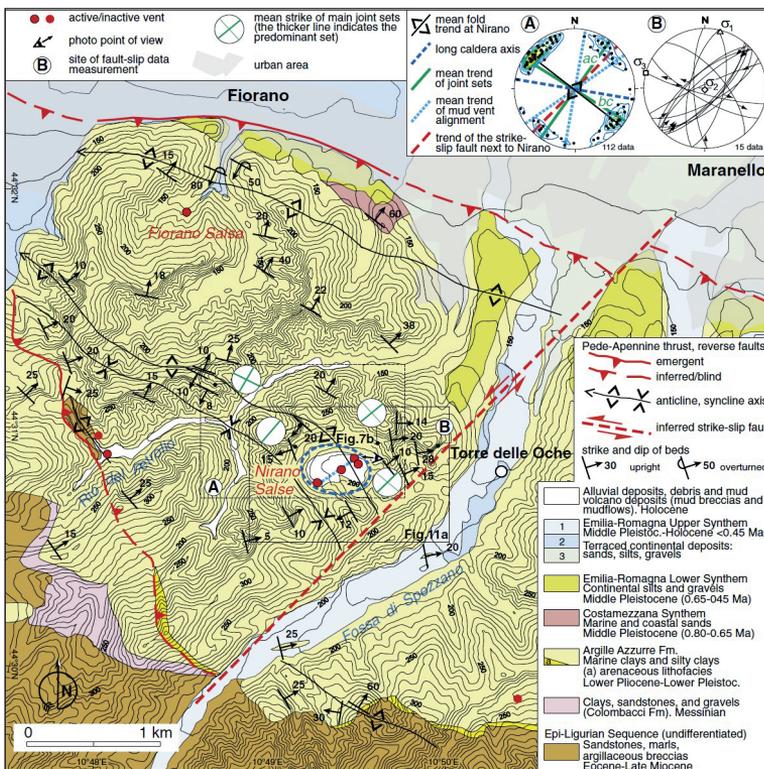


Fig. 1 – Carta geologico-strutturale del margine appenninico modenese circostante la Riserva Naturale delle Salse di Nirano (da Bonini, 2012).

Le strutture tettoniche del margine appenninico sono attive, come testimoniato dai terremoti storici con epicentro soprattutto nella zona di passaggio tra la collina e la montagna e che collocano il comune di Fiorano Modenese tra i sette comuni a media pericolosità sismica (classe 2) della provincia di Modena. Tra i sismi più forti con epicentro in questa zona si ricordano i terremoti del 1438 (Intensità di VIII MCS), 1501 (VIII-IX), 1547 (VIII), 1818 (VII-VIII), 1971 (VII-VIII) ([www.ingv.it](http://www.ingv.it)). Già a partire dal XIX secolo diversi studiosi hanno notato una corrispondenza tra intensa attività delle salse del pede-Appennino e terremoti (Stohr, 1869; Pantanelli & Santi, 1896; Pellegrini *et al.*, 1982; Gorgoni *et al.*, 1988; Gorgoni, 1998, 2003), basandosi tuttavia su osservazioni in occasione di singoli eventi o casi di studio. Tra gli episodi del passato, è di particolare importanza quello attribuito, in base alla descrizione, ad un'eruzione delle salse presso il margine appenninico modenese (Nirano o Montegibbio). Si tratta dell'evento descritto da Plinio il Vecchio nella sua *Historia mundi naturalis* (75-79 d.C. circa), associato in letteratura a un sisma locale e distruttivo del 91 a.C., riportato da antiche fonti etrusche (Guidoboni, 1989).

In recenti lavori, diversi Autori (Bonini, 2009, 2012 e 2013; Manga & Bonini, 2012; Sciarra *et al.*, 2015) pongono in relazione un incremento dell'attività eruttiva delle salse con eventi sismici aventi epicentro a diversi chilometri di distanza.

Nel caso specifico delle Salse di Nirano la possibile correlazione tra eventi sismici e attività dei vulcani di fango è stata indagata installando una sonda in una bocca lutivoma, per il monitoraggio in continuo di temperatura e livello del fango; tale relazione non è stata accertata in quanto nel periodo di registrazione (circa 13 mesi) non si sono verificati terremoti con magnitudo  $>3,5$  nel raggio di 70 km (Martinelli & Dadomo 2017, in questo volume).

### 3. Inquadramento geomorfologico

Le Salse di Nirano rappresentano un classico esempio di “convergenza geomorfologica”, intendendo con questo termine forme simili ma di genesi diversa (Panizza, 1992). Infatti, premesso che esistono vulcani a fluidi caldi (quelli che emettono magma e che sono i “soli” tipi di vulcani secondo la “percezione” comune) ed altri a fluidi freddi (vulcani di fango), le Salse di Nirano, che danno luogo a coni e colate e sono ubicate sul fondo di una conca simile a una caldera, non hanno nulla a che vedere con il vulcanismo “caldo”. Una spiegazione a questa particolare morfologia è che la conca che ospita le salse (a forma leggermente ovale con asse maggiore di circa 500 m e asse minore di circa 350 m) sia il risultato di un progressivo collasso gravitativo per il continuo svuotamento di fango emesso dagli apparati lutivomi (Bonazzi & Tosatti, 1999). Un'altra ipotesi è che tale depressione sia il risultato di un collasso per gravità in corrispondenza di un diapiro di fango al termine o in una fase di stasi della sua attività di sollevamento (Castaldini *et al.*, 2005). L'ipotesi formulata da Bonini (2008a; 2008b) è che la depressione di Nirano si sia formata

per collasso della copertura legato al degassamento e all'emissione di fango e di fluidi e quindi concorda con quella di Bonazzi & Tosatti (1999).

Per quanto riguarda l'idrografia, i corsi d'acqua della Riserva sono tutti a regime intermittente. Il campo delle Salse è attraversato dal Rio Salse che convoglia le sue acque verso est nel Torrente Fossa. Vi sono inoltre diversi specchi d'acqua artificiali costruiti negli anni '60 del XX secolo per l'irrigazione. Nell'area di studio si rinvencono uno specchio d'acqua e due piccole paludi. Un alto specchio d'acqua è stato completamente colmato da depositi palustri e quindi scomparso dal paesaggio.

Nella Riserva si possono osservare quasi ovunque calanchi che sono una delle più spettacolari forme di erosione che interessano i terreni argillosi del margine appenninico. Essi sono caratterizzati da un reticolo idrografico ad alta densità in cui i singoli impluvi sono separati tra loro da creste sottili a "lama di coltello". Le acque di ruscellamento tendono ad assottigliare le creste grazie anche al fondamentale "contributo" di frane superficiali per colata e scivolamento che hanno la loro testata nella parte alta del versante. In pratica, oggi l'evoluzione dei calanchi avviene soprattutto a causa delle frane che provocano un rapido arretramento della testata dei calanchi e ne colmano gli impluvi con i loro depositi. Nell'area delle salse i calanchi con frane attive negli impluvi si osservano nel settore orientale (Fig. 2 e Fig. 26), dove hanno interessato anche un percorso escursionistico. Alcune frane quiescenti sono state individuate sul versante nord del campo.

Le forme antropiche sono situate nei pressi dell'ingresso orientale; si tratta di una spianata sopraelevata su cui sorgeva un allevamento di esche vive per la pesca (dismesso in seguito all'istituzione della Riserva) e dell'area ora adibita a parcheggio pubblico.



Fig. 2 – *Panoramica aerea della depressione a forma di conca ovale in cui sono ubicate le Salse di Nirano. I coni lutivomi corrispondono alle aree di colore chiaro. In primo piano un'area a calanchi (foto L. Callegari).*

## 4. Evoluzione degli apparati lutivomi

### 4.1. La situazione attuale

Nell'affrontare lo studio delle Salse di Nirano, risulta di fondamentale importanza individuare con sicurezza i principali raggruppamenti di apparati lutivomi. Per comodità questi sono stati indicati con lettere dell'alfabeto, secondo suddivisioni che solo in parte coincidono con quelle descritte nel secolo scorso da Biasutti (1907), dove gli apparati erano indicati con numeri romani, e da Gorgoni (2003) nel secolo attuale. Nel loro complesso le Salse di Nirano presentano una morfologia in continua evoluzione, con nuove bocche che si aprono e altre che cessano la loro attività nel corso di pochi mesi, anche nell'ambito di raggruppamenti che hanno conservato una loro identità nel tempo.

Nella Carta geomorfologica di Tav. 1, descritta nel capitolo 5, sono stati cartografati i punti di emissione dei fanghi (differenziati tra coni e polle) e i depositi attivi aggiornati al maggio 2016, sulla base dei rilevamenti sul terreno. Per "depositi attivi" si intendono le aree dove è in atto la deposizione dei fanghi per effetto di colate successive, tali da impedire di formarsi di una copertura vegetale stabile, anche data dalle sole piante alofile.

In questo studio gli apparati sono indicati, procedendo da est verso ovest, con le lettere A, B, C, D, E, F, G, H, come evidenziato in Fig. 3 che è la stessa adottata da Castaldini & Conventi (2017), Vezzalini *et al.* (2017) e Papazzoni (2017) in questo volume.

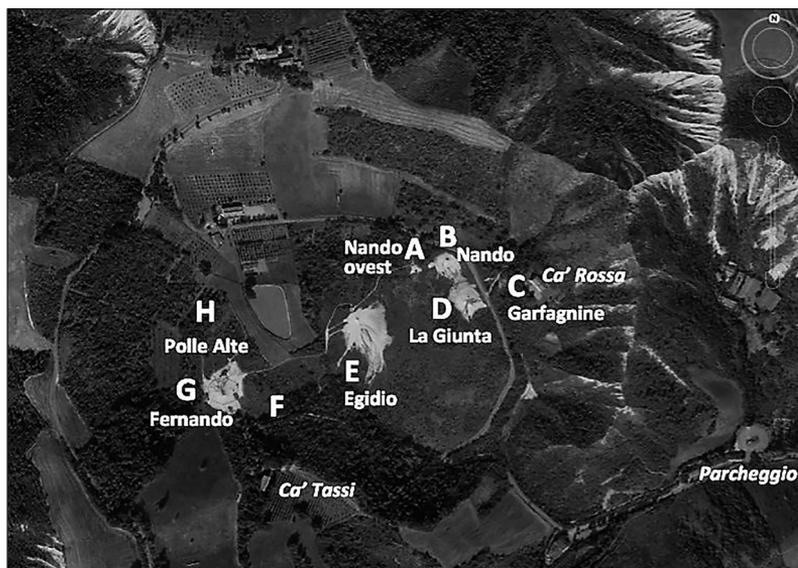


Fig. 3 – Carta indice con nomenclatura di riferimento per le Salse di Nirano (da immagine Google earth del 28/09/2016).

#### 4.2. *Analisi storica ed evolutiva: punti di emissione e depositi attivi*

Sono stati per la prima volta analizzati e confrontati, con l'uso di programmi GIS, i dati sulle Salse di Nirano, derivanti da cartografie storiche, pubblicazioni e immagini telerilevate. Nelle tabelle a seguire sono descritte le fonti bibliografiche e le immagini telerilevate multiscalari e multitemporali utilizzate.

<b>Cartografia</b>	<b>Anno</b>	<b>Scala originale cartaceo</b>
Carta topografica IGM del Regno d'Italia (I edizione)	1884	1:25.000
Biasutti	1907	1:2800
Mucchi	1966	1:1700 circa
Gorgoni (anno di rilevamento 1999)	2003	1:3000 circa

Tab. 1– *Rassegna delle cartografie utilizzate con le relative scale, da bibliografia.*

<b>Volo</b>	<b>Anno</b>	<b>Scala originale cartaceo</b>
Volo GAI	1954	1:33.000
Volo RER	1973	1:13.000
Volo RER	1976-78	1:13.000
Volo RER	1985	1:35.000
Volo Italia	1987-88	1:70.000 (anche in Geoportale Nazionale)
Volo Italia	1994	1:70.000 (anche in Geoportale Nazionale)

Tab. 2– *Foto aeree utilizzate e scale degli originali.*

<b>Ortofoto digitali</b>	<b>Anni</b>
Aima	1997
Agea	2000, 2008, 2011
da Geoportale Nazionale	1988, 1994, 2000, 2006, 2012
<b>Riprese satellitari</b>	<b>Anni</b>
Quickbird	2001
Google earth	2003, 2011, 2014, 2016
I - Stella	1988, 1998, 2007, 2008, 2010, 2011

Tab. 3 – *Rassegna delle ortofoto digitali e delle riprese satellitari utilizzate, disponibili in formato digitale.*

Le immagini telerilevate utilizzate coprono un arco di tempo di circa 60 anni; in particolare, per gli ultimi 20 anni sono disponibili riprese effettuate ogni due anni.



nell'uso del suolo dovuti all'abbandono dell'uso agricolo e all'istituzione della Riserva Naturale nel 1982. Prima dell'istituzione della Riserva, la forma era condizionata dall'uso agricolo, in quanto le arature tendevano a "spalmare" i fanghi arealmente secondo la geometria dei solchi. Le riprese successive al 1982 dimostrano la graduale evoluzione della forma dei depositi per tutti gli apparati, verso lo stato di naturalità attuale. Gli apparati B e, soprattutto, D sono stati condizionati nella loro espansione dall'incisione del corso d'acqua adiacente alla strada di accesso, attraverso il quale una parte delle colate di fango viene allontanata dal settore a SO di Ca' Rossa a salvaguardia della viabilità locale.

Sono stati quindi elaborati i dati numerici sulla superficie dei depositi attivi, per ciascuno degli apparati individuati, in relazione all'anno della documentazione.

Le fonti informative utilizzate sono per la maggior parte quelle indicate nelle Tab. 1, 2 e 3, suddivise tra pubblicazioni, foto aeree, ortofoto e riprese satellitari, secondo la corrispondenza della Tab. 4. A tale fine sono state selezionate le riprese di migliore qualità, nel caso ve ne fossero dello stesso anno (ad es. è stato il caso del 2003 e del 2011). Per completezza, sono state consultate anche le immagini del sito "I Stella", alcune delle quali coincidono come data con quelle di altri siti web.

Le variazioni di superficie dei depositi attivi (generalmente con tendenza all'aumento) risultano più marcate fino al 1985, anno della prima ripresa effettuata dopo l'istituzione della Riserva agli inizi degli anni '80. Per tutti gli apparati, le foto aeree del 1994 sovrastimano le superfici, per effetto della qualità delle immagini, anche motivata dalla ridotta scala originale (1:70.000). Nonostante dunque non possano essere considerate un dato affidabile, sono state utilizzate per completezza.

Il grafico in Fig. 5 rappresenta le variazioni tra minimo, massimo e media dei valori delle superfici dei depositi attivi degli apparati principali, riferiti agli ultimi trent'anni, ossia dopo che l'istituzione della Riserva ha consentito uno sviluppo naturale degli apparati lutivomi.

Dal confronto emerge che negli ultimi trent'anni:

- i) Le superfici degli apparati A, B, D sono state soggette a variazioni più contenute rispetto a quelle di E e G (escludendo il dato del 1994).
- ii) Gli apparati E e G, sono corredati da gruppi di punti di emissione isolati, i cui depositi attivi si sono ridotti nel tempo. Negli ultimi trent'anni, nei settori occidentale e centrale dell'area delle Salse, la risalita di fluidi si è piuttosto manifestata attraverso gli apparati E e G, i cui depositi attivi hanno le superfici più estese, per i quali è ipotizzabile una connessione diretta e più efficiente con il *reservoir* di fluidi in profondità, rispetto ai punti isolati limitrofi.

iii) A differenza da quanto accade per gli altri apparati, caratterizzati da una molteplicità di punti di fuoriuscita (anche effimeri), i depositi dell'apparato E sono alimentati da una singola bocca luvivoma, la cui posizione ha subito solo poche variazioni nel tempo.

<b>Anno</b>	<b>Fonte</b>	<b>Tipo</b>
1907	Biasutti	Pubblicazioni
1966	Mucchi	
1973	Foto aeree	Ortofoto e riprese satellitari
1976 (-78)		
1985		
1987 (-88)		
1994		
1997	Ortofoto AIMA	
2000	AGEA	
2001 (non più recente di)	Quickbird	
2003 (riprese 22 aprile)	Google earth	
2006	Geo Portale Nazionale	
2008	AGEA	
2011	AGEA e Google earth	
2012	Geo Portale Nazionale	
2014	Google earth	

Tab. 4 – *Corrispondenza tra anni e documentazione utilizzata per un confronto numerico sulle aree dei depositi attivi storicamente documentati.*

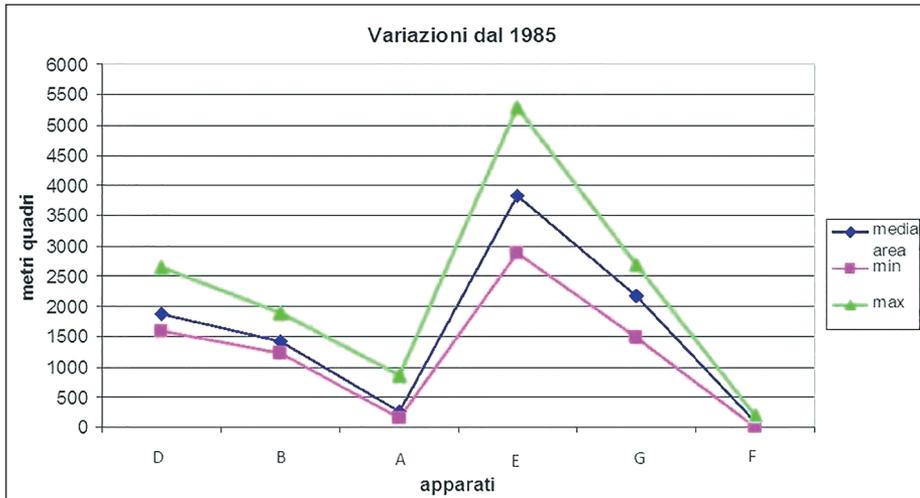


Fig. 5 – Variazioni della superficie dei depositi attivi negli ultimi trent'anni: confronto tra i valori minimo, massimo e medio, per i principali apparati.

### 4.3. Studio della distribuzione dei punti di emissione

Dalle analisi descritte in precedenza, emerge come i punti di emissione del fango descrivano dei raggruppamenti con caratteristiche persistenti nel tempo, al di là del fatto che singoli punti possano avere carattere effimero. L'insieme dei raggruppamenti si dispone secondo un allineamento, che viene studiato prima con un metodo "deterministico" e poi con criterio geologico, mettendone a confronto i risultati.

I punti di emissione censiti dal 1884 al 2016 (432 in totale), sono rappresentati nel grafico di Fig. 6, attraverso le loro coordinate piane X e Y, calcolate secondo il sistema di riferimento geografico attualmente in uso nella Regione Emilia-Romagna, denominato UTMREER.

È stata studiata la curva di tendenza della distribuzione, le cui caratteristiche indicano l'esistenza o meno di una correlazione tra i punti e quindi di una sistematicità nella loro disposizione in pianta. Sono state tracciate curve di tendenza di vario tipo (tutte con coefficiente di correlazione alto), approssimabili ad una retta come appunto in Fig. 6.

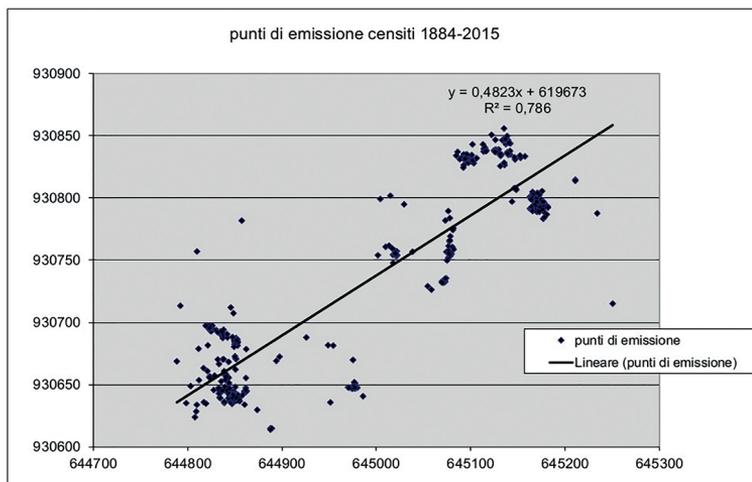


Fig. 6 – *Punti di emissione censiti da bibliografia e immagini telerilevate (anni 1884-2016), rappresentati in funzione delle loro coordinate piane, espresse in metri. È rappresentata la retta di regressione lineare, che approssima il risultato della altre possibili linee di correlazione, tutte caratterizzate da alti coefficienti di correlazione R2.*

Riconducendo il risultato ad un ambito geografico, esiste una correlazione nella posizione (in pianta), delle bocche lutivome, la cui disposizione è governata da un allineamento approssimabile ad una retta con azimuth di 60° circa.

Lo stesso procedimento è stato seguito anche prendendo in considerazione, separatamente, i punti di emissione per ciascuna delle varie serie storiche documentate dal 1884 al 2016. In ciascuno dei grafici ottenuti, le linee di tendenza delle distribuzioni di punti (di emissione) censiti hanno andamento analogo a quella generale di Fig. 6; questo tranne che per la serie 1985, basata su foto aeree di qualità tale da rendere difficoltosa la georeferenziazione dei punti. Per tutte le altre serie, la distribuzione dei punti di emissione censiti presenta linee di correlazione approssimabili a rette con orientazione analoga a quella del grafico di Fig. 6 e con azimuth compresi tra 57° e 66°.

L'esistenza di un allineamento preferenziale si può studiare in modo maggiormente attinente con la geologia, attraverso la rappresentazione con diagrammi "a rosa". Il diagramma "a rosa" rappresenta la misura della frequenza degli allineamenti con una data orientazione (quindi con un dato azimuth).

Applicato al caso di studio e dato che i punti di emissione censiti si riferiscono a serie storiche, i diagrammi a rosa esprimono anche la persistenza nel tempo della geometria descritta dagli allineamenti dei punti di emissione.

Dal confronto tra le serie storiche documentate nelle Tab. 1, 2 e 3, si individuano, tra i punti di emissione, quelli più stabili nel tempo, approssimandone i gruppi a "punti principali" (rombi in Fig. 7).

Sono state tracciate le rette congiungenti tutti i punti principali, in modo da rappresentare gli allineamenti ricavabili applicando un criterio puramente geometrico; per ciascun allineamento è stato calcolato l'azimut come in figura.

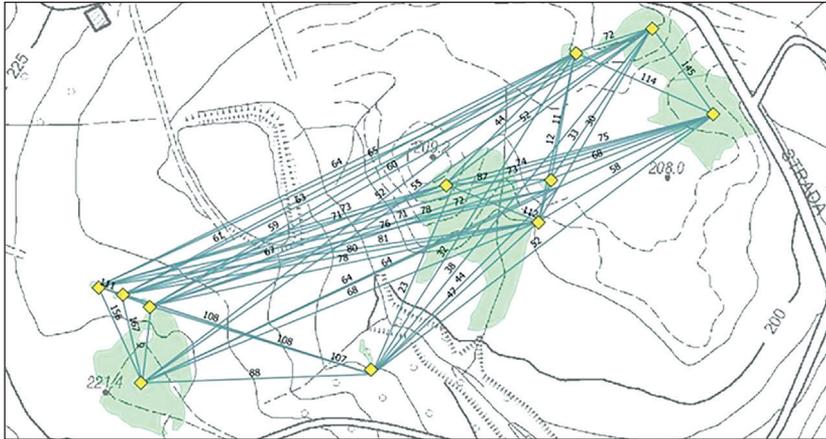


Fig. 7 – Gruppi di punti di emissione “stabili” e attivi nelle serie storiche considerate (rombi grigi). Sono tracciate le congiungenti possibili, con i rispettivi azimut.

È stato ottenuto il diagramma a rosa delle rette (Fig. 8), la maggior parte di esse ha azimut compreso tra 40° e 80°, concentrandosi nell'intervallo 70°-80°. Il valore medio degli azimut è 64°, corrispondente a quello della retta interpolatrice ottenuta nel grafico di Fig. 6.

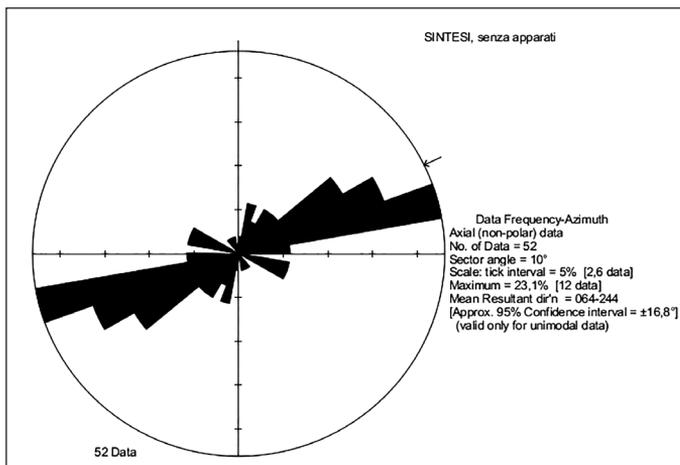


Fig. 8 – Diagramma a rosa degli allineamenti tracciati in Fig. 7 (52 dati utilizzati).

La conclusione è che i punti di emissione si distribuiscono in prevalenza secondo allineamenti con orientazione compresa tra SO-NE e OSO-ENE. È quindi lecito individuare una struttura “intermedia” con tale orientazione, o meglio sistemi di faglie/fratture ad alto angolo con questo allineamento che costituiscono vie preferenziali per la risalita dei fluidi in superficie.

Lo stesso metodo è stato applicato allo studio degli allineamenti delle bocche lutivome, per ciascun apparato o per gruppi di apparati, secondo le denominazioni loro attribuite in questo studio. Per ciascuno di essi, sono state considerate le serie storiche dei punti di emissione e, per ognuna, sono state tracciate le rette congiungenti, espressione degli allineamenti possibili. Si riportano i più significativi, anche per numero di dati elaborati.

Il diagramma a rosa di Fig. 9 mostra come gli apparati A, B, D presentino allineamenti con direzioni comprese tra ESE-ONO e SSE-NNO ed azimuth medio di 125°; l’allineamento SO-NE, pure rappresentato, si riferisce all’insieme degli apparati A, B.

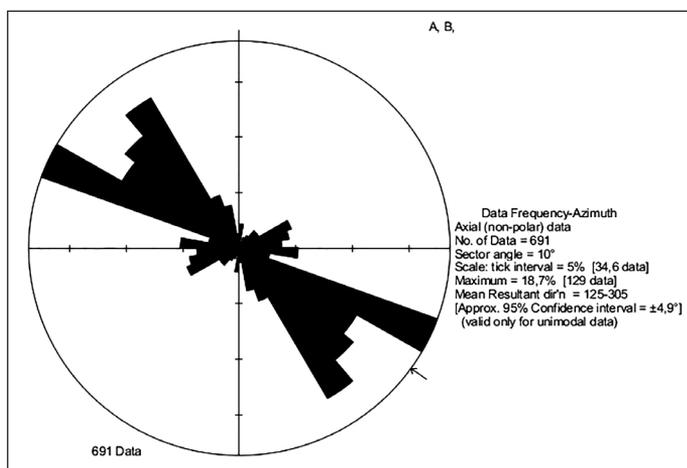


Fig. 9 – Diagramma a rosa, allineamenti dei punti di emissione censiti nei vari anni, apparati A, B, D (691 dati utilizzati).

La Fig. 10 mostra gli allineamenti ricavati entro il gruppo costituito dall’apparato “E-Egidio”, comprensivo dei punti di emissione isolati. Questi ultimi sono caratterizzati dal marcato orientamento NNE-SSO, gli allineamenti ENE-OSO e SE-NO coinvolgono l’insieme.

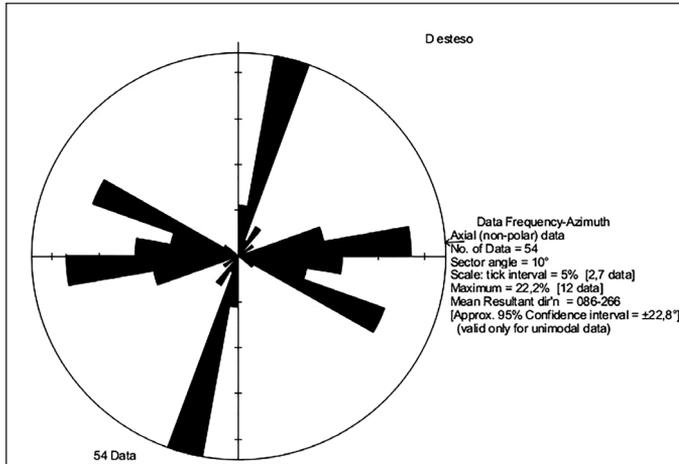


Fig. 10 – Diagramma a rosa, allineamenti dei punti di emissione censiti nei vari anni, apparato “E-Egidio” (54 dati utilizzati).

La maggiore dispersione negli allineamenti ricavabili dallo studio, si osserva nell'apparato “G-Fernando” (Fig. 11), in cui spiccano gli orientamenti NO-SE e N-S.

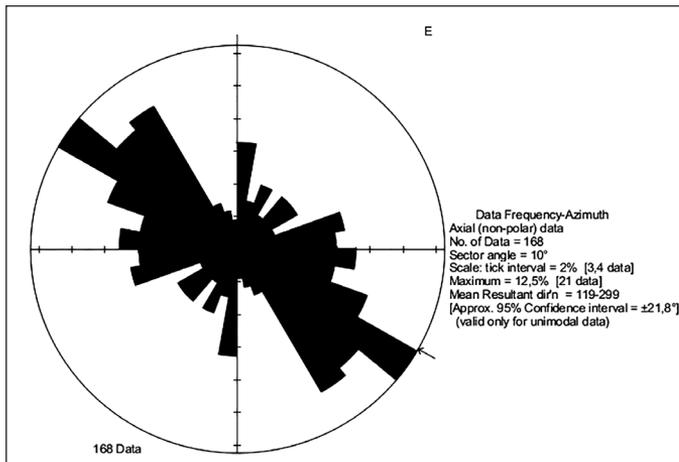


Fig. 11 – Diagramma a rosa, allineamenti dei punti di emissione censiti nei vari anni, apparato “G-Fernando” (168 dati utilizzati).

Le bocche lutivome dell'apparato “H-Polle Alte” sono decisamente iso-orientate in direzione ONO-ESE, come da Fig. 12.

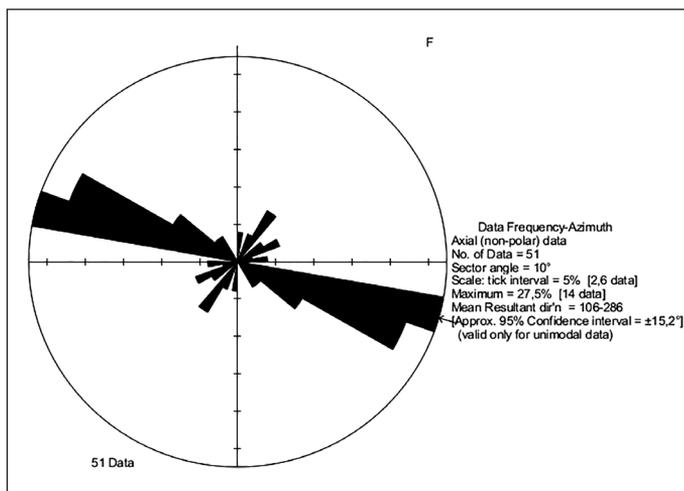


Fig. 12 – Diagramma a rosa, allineamenti dei punti di emissione censiti nei vari anni, apparato “H-Polle Alte” (51 dati utilizzati).

In conclusione, si osserva che:

- Tra gli allineamenti ricavabili dallo studio della distribuzione dei punti di emissione censiti (attuali e da serie storiche) si possono selezionare alcune orientazioni preferenziali, caratterizzate da un’elevata frequenza e dalla corrispondenza con i tracciati di faglie documentate nella Carta Geologica d’Italia a scala 1:50.000, Foglio 219 Sassuolo (Gasperi *et al.*, 2005). Tali allineamenti selezionati si possono ragionevolmente associare all’esistenza di faglie/fratture ad alto angolo, non affioranti in quanto sepolte dai depositi delle Salse.
- L’allineamento principale delle bocche lutivome, nel complesso dei vari apparati, è approssimabile ad una retta con azimut di  $64^\circ$ , espressione di una serie di faglie/fratture allineate e con tale orientazione.
- Tale geometria si riscontra in analoghe strutture con orientamento antiappenninico, rappresentate nel Foglio 219 Sassuolo (Gasperi *et al.*, 2005), e interpretabili come trascorrenti sinistre, in base al rigetto del limite stratigrafico basale della Formazione delle Argille Azzurre.
- Considerando invece gli allineamenti delle bocche lutivome entro ciascun apparato, si osserva come abbiano orientamento prevalentemente appenninico. La localizzazione dei punti di risalita può essere quindi riconducibile all’intersezione tra questi sistemi di faglie/fratture ad alto angolo e il sistema che governa il principale allineamento degli apparati, in modo da creare condizioni favorevoli alla locale risalita dei fluidi. Un caso analogo si verifica, ad esempio, per le acque a circuito profondo

che alimentano le terme di Bagno di Romagna (A. Ricci, comunicaz. pers.).

- Come rappresentato in Fig. 13 e nella Carta geologico-geomorfologica di Tav. 1, il dato sulle faglie e fratture è stato espresso attraverso la simbologia che ne esprime la condizione “non affiorante”.

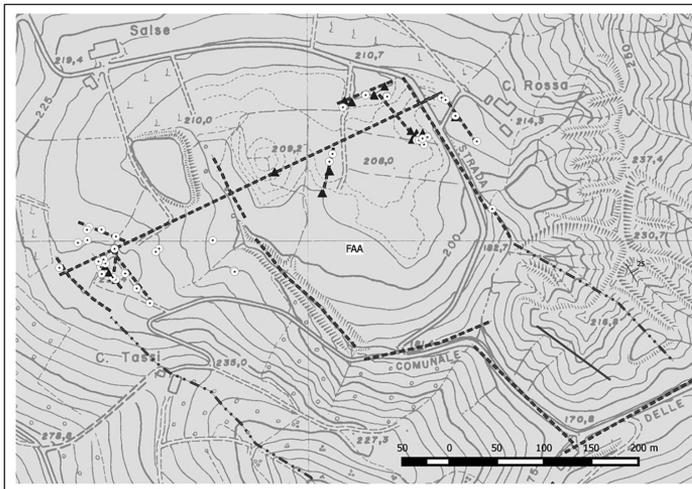


Fig. 13 – Allineamenti preferenziali (tratteggio) delle bocche lutivome, (cerchi e triangoli, rispettivamente polle e coni principali), interpretabili come riconducibili a faglie/fratture ad alto angolo. L’allineamento principale SO-NE è ricondotto per semplicità ad una singola struttura. Si tratta di strutture non affioranti, in quanto sepolte dai depositi delle salse, qui non cartografati. In punto e linea, le faglie incerte, dedotte da fotointerpretazione.

## 5. Carta geologico-geomorfologica delle Salse di Nirano

### 5.1. Metodo di studio e criteri di elaborazione della Carta geologico-geomorfologica

Lo scopo di questa parte dello studio è stato quello di elaborare una “Carta geologico-geomorfologica” (Tav. 1) per un’accurata conoscenza, appunto, delle caratteristiche geologiche e geomorfologiche dell’area delle Salse di Nirano.

La base topografica utilizzata è l’edizione più recente della CTR della Regione Emilia-Romagna a scala 1:5000, Elemento 219062.

Per illustrare le caratteristiche geomorfologiche sono state rappresentate, oltre alle rocce presenti, le forme del terreno e i depositi superficiali che li hanno generati e il loro stato di attività (attivo o quiescente).

Per quanto riguarda la componente geologica, è stato svolto un rilevamento di campagna che ha approfondito la cartografia disponibile presso il Servizio Geologico Regionale, tratta dalle banche dati geologiche a scala 1:10.000 e

25.000. Rispetto a quest'ultima, sono stati rappresentati i depositi delle salse, differenziandoli dagli altri depositi quaternari continentali. Sono state quindi infittite le misure degli assetti della stratificazione e dei sistemi di fratture in affioramento. In una fase di lavoro successiva, si è proceduto al periodico rilevamento delle bocche lutivome, i cui risultati sono stati utilizzati anche per le analisi descritte nelle pagine precedenti.

La Carta geologico-geomorfologica di Tav. 1 è stata realizzata tenendo in considerazione carte geomorfologiche realizzate in precedenza, eseguendo l'interpretazione di immagini telerilevate multiscalari e multitemporali (cfr. Tabb. 2 e 3) ed effettuando numerosi rilevamenti sul terreno (Fig. 14).

La Carta geologico-geomorfologica è stata realizzata utilizzando il *software* GIS ArcGIS 10.1 ed è stata eseguita, con opportune modifiche, sulla base dei criteri e delle legende proposte in lavori di cartografia geomorfologica realizzati nella stessa zona (Castaldini *et al.*, 2003, 2007, 2013; Castaldini & Coratza, 2011). In essa sono stati indicati i principali elementi dell'idrografia attuale e le caratteristiche litologiche del campo delle Salse di Nirano, distinguendo il substrato roccioso dai depositi superficiali; questi ultimi indicati solo dove superano il metro di spessore. Nell'area di studio affiorano, come già detto, le rocce argillose di origine marina del Pliocene inferiore-Pleistocene inferiore appartenenti alla Formazione delle Argille Azzurre.

Per quanto riguarda gli aspetti geomorfologici è stato attribuito il colore assegnato al principale e significativo agente morfogenetico che li ha generati.



Fig. 14. Rilevamento sul terreno lungo la vallecola a sud di Ca' Rossa che ha consentito di individuare una salsa a polla mai rilevata in precedenza (foto D. Castaldini, 09/11/2015).

Un aspetto importante ha riguardato il “concetto di attività” da applicare nella definizione della dinamica dei processi geomorfici (e relative forme e depositi), in generale, e dei fenomeni di dissesto, in particolare.

Come noto, se da un lato esistono molteplici definizioni di processo “attivo”, “quiescente” “non attivo” (e, molto frequentemente, di frana “attiva”, “quiescente” “non attiva”), anche perché si tratta di un problema di notevole interesse in campo applicativo, dall’altro il termine in oggetto viene frequentemente usato senza specificarne il significato.

Non intendendo qui inoltrarci in una rassegna bibliografica dell’argomento, ci si limita ad indicare che, nel presente studio è stata adottata la definizione della Carta del Dissesto del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP) del 2009 (Provincia di Modena, 2009):

- “Aree interessate da Frane Attive”: corpi di frana, compresi i relativi coronamenti, in atto o verificatesi nell’arco degli ultimi 30 anni, comprese le frane di crollo.
- “Aree interessate da Frane Quiescenti”: corpi di frana che non hanno dato segni di attività negli ultimi 30 anni, compresi i relativi coronamenti, e per le quali il fenomeno può essere riattivato dalle sue cause originali.

Dalle suddette distinzioni di attività sono state ovviamente escluse le forme antropiche, in quanto non dipendenti da fenomeni naturali, e le forme poligenetiche in quanto legate a processi differenti con tempi di evoluzione anche notevolmente diversi.

### **5.2. Descrizione della Carta geologico-geomorfologica**

La Carta geologico-geomorfologia indica come nell’area delle Salse di Nirano affiorino esclusivamente “Argille debolmente marnose, localmente siltose, grigio-azzurre a stratificazione mal distinguibile, con locali stratificazioni di sabbie fini” appartenenti alla Formazione delle Argille Azzurre (FAA) del Pliocene Inferiore-Pleistocene Inferiore (Gasperi *et al.*, 2005). L’aspetto dell’unità è rappresentata in Fig. 15 che si riferisce alla parte stratigraficamente più alta della formazione.

L’assetto di FAA è dato da una monoclinale immergente verso la pianura. Nell’area della Riserva, l’inclinazione degli strati passa da 15° a 28°, configurando una blanda ondulazione antiforale, che prelude all’aumento dell’inclinazione degli strati (fino a 60°) che caratterizza il margine appenninico, in prossimità della base stratigrafica della Formazione delle Sabbie Gialle (SGI). Questa è sedimentata in discontinuità al tetto di FAA ed è rappresentativa dei depositi marini di età quaternaria. Gli assetti della stratificazione cambiano ad ovest della Cascina Gazzolo, come per effetto di una rotazione in senso orario rispetto alla giacitura media. Questo, unito ai risultati della fotointerpre-

tazione e all'osservazione di famiglie di fratture negli affioramenti alle testate dei calanchi occidentali, ha indotto a tracciare una faglia ad alto angolo con orientazione NNE-SSO. Altre faglie subverticali sono state cartografate in Tav. 1, aventi orientazione analoga, oltre che NE-SO e NO-SE. Alcune di queste faglie sono di natura incerta (quindi presunte), avvalorate dalla sola fotointerpretazione; altre faglie sono invece sepolte dai depositi quaternari continentali alluvionali o di versante e sono ad esempio avvalorate dalla presenza di pervasivi sistemi di fratture negli affioramenti più prossimi.

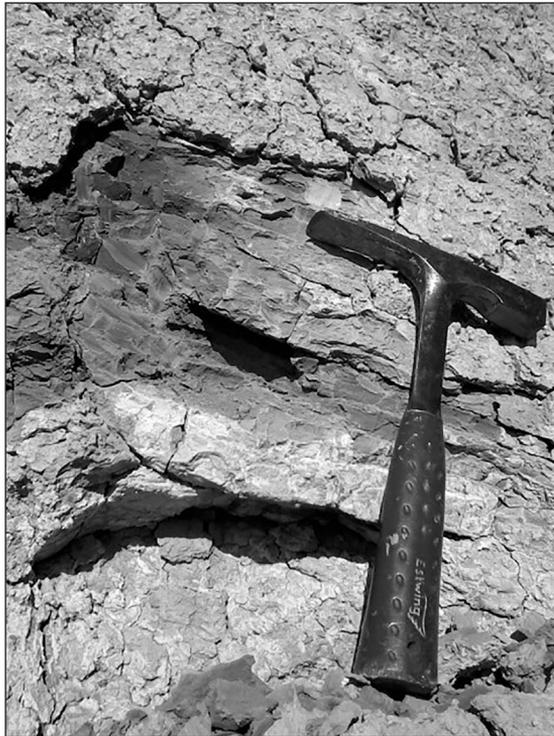


Fig. 15 – Dettaglio della Formazione delle Argille Azzurre (Pliocene inf.-Pleistocene inf.) in affioramento (foto M.T. De Nardo).

I depositi delle salse (fanghi), invece, mascherano i sistemi di fratture descritti nel paragrafo 4.3 e che governano la fuoriuscita dei fluidi risalenti dalle profondità. Solo per una necessaria semplificazione, in Tav. 1 si è compiuta l'approssimazione di rappresentare con lo stesso simbolo le faglie incerte o sepolte, comprendendovi anche il concetto di frattura nel caso delle salse.

Le caratteristiche geometriche delle strutture con orientazione trasversale o antiappenninica, ivi compreso l'allineamento dei principali apparati lutivomi,

le rendono concordanti con i sistemi di faglie rappresentati nel Foglio 219 Sassuolo (Gasperi *et al.*, 2005), che dislocano il limite inferiore stratigrafico di FAA secondo un rigetto indicativo di una trascorrenza sinistra che spiegherebbe anche la rotazione degli assetti della stratificazione sopra descritta.

Nella Carta Geologico-geomorfologica, sono stati indicati per la prima volta in assoluto tutti i singoli punti di emissione, distinguendo le forme “a cono” da quelle “a polla”, sulla base degli studi di dettaglio descritti nel capitolo 4.

Come già descritto in precedenza, le salse sono ubicate sul fondo di una depressione a forma leggermente ovale (asse maggiore di circa 500 m e asse minore di circa 350 m) non dissimile a quella di una caldera (cfr. Fig. 2) probabilmente formatasi per collasso della copertura legato al degassamento e all'emissione di fango e di fluidi e svuotamento di camere o serbatoi di fango superficiali. La geometria ellittica della conca potrebbe derivare sia dalla distorsione sia dalla deformazione tettonica delle strutture che delimitano il bordo della depressione stessa, sia dalla forma del sottostante serbatoio di fluidi che si sviluppa nella direzione dello *stress* tettonico orizzontale (Bonini, 2008a, 2008b).

I materiali argillosi che fuoriescono dalle salse vanno a ricoprire il terreno circostante; pertanto, con il ripetersi di questo fenomeno nel tempo, il fondo della depressione delle salse è stato in gran parte ricoperto da depositi di colate fangose dello spessore di alcuni metri.

Gli apparati lutivomi più recenti (salse a polla comparse nella zona di Ca' Rossa nell'ottobre 2012 e nel maggio 2016) hanno contribuito e stanno contribuendo ad allargare verso NE l'area coperta dai depositi di fango.

In dettaglio, le salse a polla comparse nell'ottobre 2012 sono ubicate nel bosco a SO di Ca' Rossa; hanno il nome locale di “Garfagnine” in quanto testimonianze locali affermavano che fossero comparse qualche giorno prima del sisma della Garfagnana di  $M = 4,8$  del 25/01/2013 (informazione errata ripresa anche da Sciarra *et al.*, 2015). In realtà, alcune immagini acquisite recentemente hanno documentato punti di emissione di fango già presenti nel bosco nell'ottobre 2012 (cfr. Castaldini & Conventi, 2017, in questo volume). Inizialmente erano diversi piccoli punti di emissione successivamente concentrati in due apparati principali (Fig. 16). L'emissione di fango era così intensa che andava a ricoprire la sede stradale prospiciente; pertanto per far defluire il fango senza interessare la strada sono stati scavati dei fossi, all'interno della zona di emissione, che però impediscono uno sviluppo naturale degli apparati lutivomi.

Le salse comparse nel maggio 2016 sono alcune piccole polle manifestatesi nel prato ad ovest della carreggiata che conduce a Ca' Rossa; nonostante il loro breve periodo di attività hanno già coperto di fango una certa estensione di terreno (Fig. 17).



Fig. 16 – Depositi di fango delle due salse a polla nel bosco a SO di Ca' Rossa (giugno 2016). In alto a destra si nota la salsa a cono denominata "B-Nando" (foto D. Castaldini).



Fig. 17 – Depositi di fango delle salse a polla nel prato a O di Ca' Rossa (foto D. Castaldini, giugno 2016).

A seguire sono riportate alcune immagini del passato dei principali apparati lutivomi da cui è possibile apprezzare qualitativamente la loro evoluzione morfologica nel tempo. In Castaldini & Conventi (2017, in questo volume) è riportata una loro recente immagine.

In Fig. 18 si può notare come la Salsa “B-Nando”, abbia accentuato la sua forma a cono e un piccolo apparato sia cresciuto su un fianco. Secondo le testimonianze delle Guardie ecologiche pare sia anche aumentata in altezza in seguito alla copiosa emissione di fango seguita ai forti sismi del maggio 2012 nella bassa pianura modenese.

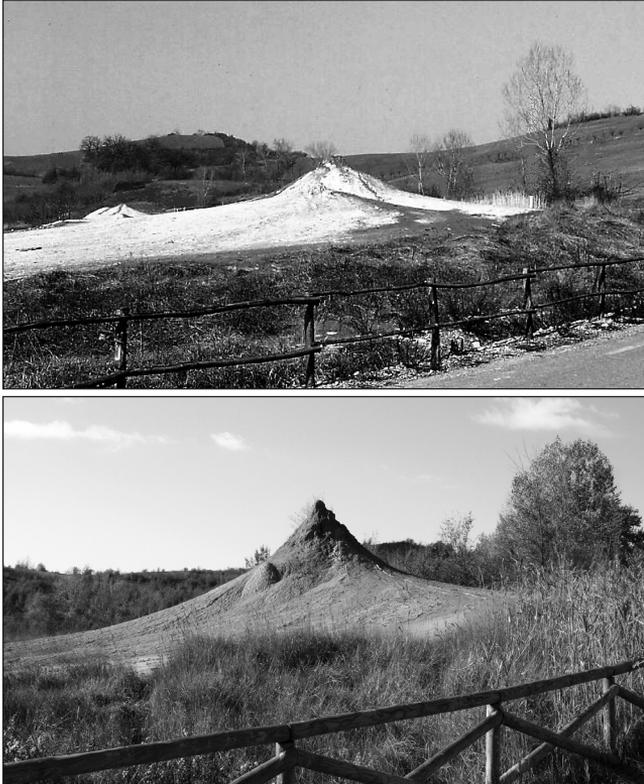


Fig. 18 – Salsa “B-Nando” vista dalla Strada delle Salse (da NE). In alto immagine del 1994 (foto L. Callegari); in basso nel 2013 (foto M. Reghizzi).

Le immagini di Fig. 19 documentano come la salsa “D-La Giunta” sia sempre stata costituita da un complesso di più punti lutivomi a cono e a polla. Nel settembre 2013 si è verificato il collasso di un cono che si è modificato in polla.

Le immagini di Fig. 20 sono relative alla salsa “G-Fernando”, l’apparato più vecchio, più grande e più alto del campo di Nirano anch’esso costituito da più bocche lutivome a cono e a polla. Si può notare come, per impedire l’accesso diretto alle bocche lutivome, l’area sia stata nel tempo circonscritta con una staccionata.

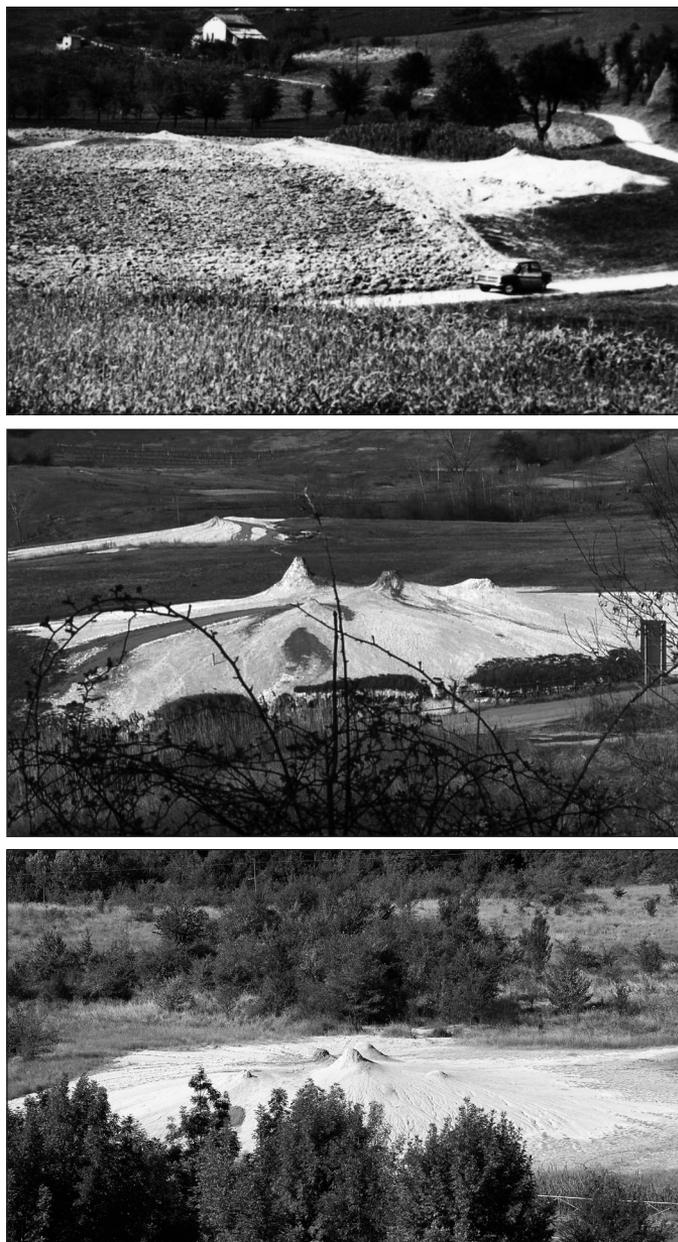


Fig. 19 – Salsa “D-La Giunta” vista dalla zona di Ca’ Rossa (da NE). In alto immagine del 1960, al centro del 1995 e in basso del 2007 (foto L. Callegari).



Fig. 20 – Salsa “G-Fernando” vista da est. Dall’alto in basso: immagini del 1960, del 1992 (foto L. Callegari), del 2006 e del 2011 (foto D. Castaldini).

Passando agli altri elementi rappresentati nella Carta geologico-geomorfologica di Tav. 1, per quanto riguarda l'idrografia superficiale, come già detto, il corso d'acqua che drena la conca delle salse è l'omonimo Rio delle Salse, che dopo aver ricevuto le acque dal suo affluente Rio Serra, sfocia nel Torrente Fossa; questi corsi d'acqua sono a regime intermittente e nel periodo estivo sono a volte privi di acqua nel loro alveo. Le acque del Rio delle Salse hanno spesso un colore lattiginoso a causa dei fanghi degli apparati lutivomi trasportati in sospensione (Fig. 21).

Nella Riserva sono presenti alcuni specchi d'acqua, costruiti negli anni '60 del secolo scorso per l'irrigazione, la cui origine artificiale è evidenziata dal terrapieno che li chiude a valle. Sulle fotografie aeree del 1973, si contano dieci specchi d'acqua e due paludi di piccole dimensioni. In seguito all'istituzione della Riserva, gli specchi d'acqua hanno perso la loro funzione e hanno potuto evolversi in modo naturale.



Fig. 21 – Rio delle Salse le cui acque hanno spesso un colore lattiginoso a causa dei fanghi degli apparati lutivomi trasportati in sospensione (foto D. Castaldini).

Nell'area di studio sono attualmente presenti uno specchio d'acqua (sul fondo della conca delle salse, Fig. 22) e due paludi, tra cui è significativa quella ubicata a SSE di Ca' Rossa (Fig. 23). Un'altra palude era presente nei pressi dell'area produttiva dismessa ed è stata successivamente colmata da depositi palustri.

L'acqua presente nei corsi d'acqua e nei laghi suddetti sembra, apparentemente, che non possa dar luogo a problemi di rischio idraulico anche se, in realtà, nella notte tra il 13 e il 14 giugno 2008 si è verificato un fenomeno di

esondazione lungo la valle del Rio Serra che ha causato notevoli danni (cfr. Castaldini & Coratza, 2011).



Fig. 22 – *Specchio d'acqua artificiale all'interno della conca delle salse (foto D. Castaldini).*



Fig. 23 – *Palude ubicata a SSE di Ca' Rossa (foto D. Castaldini).*

Le forme antropiche sono situate nel settore orientale; si tratta di una spianata sopraelevata su cui sorge un'area produttiva dismessa (allevamento di esche vive per la pesca) e dell'area adibita a parcheggio pubblico. Nel settore a

est di Ca' Rossa si possono osservare i calanchi la cui evoluzione, come detto in precedenza, avviene anche, e soprattutto, a causa delle frane che colmano gli impluvi con i loro depositi argillosi (Fig. 24). Dal rilevamento sul terreno e dall'interpretazione delle immagini telerilevate più recenti al confronto con la base topografica CTR è stato in particolare riscontrato un ulteriore arretramento degli orli di scarpata dei calanchi come già evidenziato da Castaldini *et al.* (2007, 2011).

Nella Carta geologico-geomorfologica i calanchi sono stati distinti in attivi e quiescenti a seconda che il processo di erosione per ruscellamento e/o per frana sia o meno in atto.

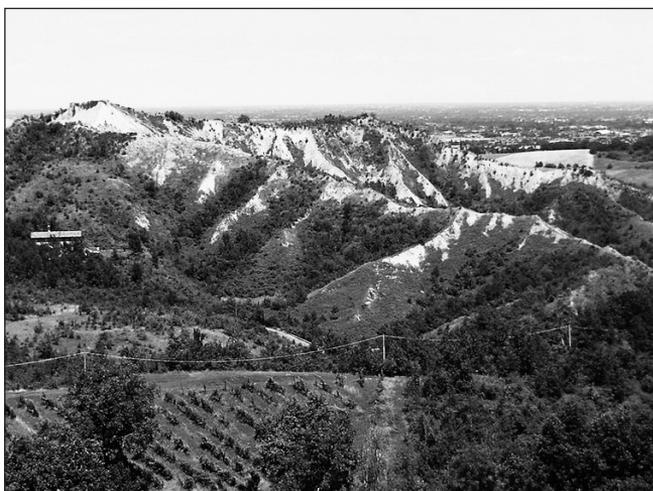


Fig. 24 – Panoramica dell'area a calanchi a est di Ca' Rossa modellati nella Formazione delle Argille Azzurre (Pliocene inf.-Pleistocene inf.); sullo sfondo la pianura a sud di Modena (foto D. Castaldini).

Tra le forme dovute alle acque correnti superficiali vi sono anche alcuni solchi di ruscellamento concentrato. In particolare, le acque di ruscellamento, non più regimate, hanno scavato fossi lungo la carrareccia (ora abbandonata) che conduce all'area produttiva dismessa ubicata nei pressi dell'ingresso orientale della Riserva.

Per quanto attiene i depositi originati dalle acque correnti superficiali, sono stati distinti i depositi dei corsi d'acqua principali (granulometria dalle sabbie alle argille) e i depositi colluviali, dovuti dallo scorrimento diffuso delle acque superficiali sui versanti (granulometria dai limi alle argille). Depositi colluviali sono diffusi nella parte bassa del versante settentrionale della conca delle Salse.

Per quanto riguarda le “Forme e depositi gravitativi” risaltano le numerosissime frane in corrispondenza delle aree calanchive nel settore orientale. Si tratta di frane attive, prevalentemente per colata ma anche per scivolamento, che alla testata causano la retrocessione degli orli di scarpata dei calanchi e con i loro depositi occupano gli impluvi dei calanchi stessi.

La frana attiva della Riserva che da alcuni anni dà più problemi è quella ubicata sul versante sinistro del Rio delle Salse, a NE del Pub “Arnold’s”, nel tratto tra il parcheggio all’ingresso est della Riserva e la confluenza con il Rio Serra. Si tratta di una frana che si sviluppa dalla parte più alta del versante (quota di circa 215 m) sino al fondo del Rio Serra (a quota di circa 170 m) (Fig. 25). Questa frana già in passato aveva dato luogo a problemi poiché al piede aveva interessato un tratto del “sentiero del Riccio” (percorso n. 2) e un palo della linea elettrica che aveva dovuto essere rimosso dall’ENEL per evitarne la caduta. Questa frana ha continuato a muoversi interessando nuovamente il suddetto sentiero e pertanto il Comune di Fiorano ha finanziato degli studi geognostici di dettaglio (Maccaferri, 2016). Tali studi hanno concluso che si tratta per lo più un modesto movimento per colata, che ha comportato un movimento verso valle della porzione più superficiale del terreno, in quanto, già ad 1 m si sono rilevati terreni in posto molto compatti.



Fig. 25 – Panorama della frana sul versante sinistro del Rio delle Salse, a NE del Pub “Arnold’s”. Sul ripiano a metà versante si trovava il laghetto artificiale tutt’ora indicato sulla CTR a scala 1:5000, n. 219062.

Le immagini telerilevate e i rilevamenti sul terreno hanno altresì consentito di cartografare alcune frane quiescenti sul versante a nord dell’area delle Salse di Nirano.

Nella Carta geologico-geomorfologica, tra le forme e i processi gravitativi di versante, sono state indicate anche alcune aree interessate da soliflusso, in quanto questo fenomeno morfogenetico, pur superficiale, va considerato tra le cause di aree potenzialmente instabili. Quest'ultimo processo, tipico delle litologie fini, è diffuso sui versanti della Riserva dove il suolo non è coperto da vegetazione arborea e/o arbustiva ed è reso evidente da decorticazioni e piccoli smottamenti della parte più superficiale del terreno o fessurazioni lungo le strade. Tra queste ultime, particolarmente evidenti le fessurazioni lungo la strada di accesso a Cascina Gazzolo che potrebbero anche evolversi in un fenomeno franoso (Fig. 26).

Nel marzo 2017, presumibilmente in seguito all'evoluzione di uno di questi fenomeni, si è verificato il collasso di un breve tratto di strada tra il Pub "Arnold's" e Ca' Rossa che ha rischiato di interrompere il traffico lungo la Strada delle Salse.

Infine, i crinali e spartiacque sono stati cartografati come forme poligenetiche. Infatti, mentre il crinale a forma sub-circolare che circonda la conca delle salse è legato ad un collasso gravitativo, altri spartiacque sono stati determinati dall'erosione regressiva delle testate dei calanchi per ruscellamento delle acque correnti superficiali e/o per gravità.



Fig. 26 – Fessurazioni lungo la strada di accesso a Cascina Gazzolo che possono anche evolversi in fenomeno franoso.

## 6. Dati di sottosuolo e sezioni geologiche

In questa parte dello studio, partendo dai dati di superficie, si è proceduto alla raccolta di dati di sottosuolo, facendo riferimento principalmente alle stratigrafie dei pozzi per la ricerca di idrocarburi documentate nell'archivio dell'Ufficio Nazionale Minerario per gli Idrocarburi e le Georisorse (UNMIG) del Ministero dello Sviluppo Economico, consultabili nel sito <http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/> o acquisite dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (Tab. 5).

Sono state anche acquisite le interpretazioni di tre linee sismiche relative ai permessi di ricerca "Maranello" (1997), "Fiume Secchia" (1997) e "Appennino Orientale" (1996), entro i quali sono localizzati i pozzi più interessanti dell'elenco in Tab. 5.

Pozzo	Ditta	Profondità (m)	Anni
Montegibbio 2, 3, 4	AGIP	da 188 a 190	1933-34
Spezzano 2	AGIP	1002,3	1942
Levizzano 1, 2	AGIP	3131; 2294	1960,2
Maranello 1	AGIP	1803	1966
Savignano 1	ENI	1851	2004
Solignano 1, 2	SPI	1260; 1530,5	1959
Castelvetro 3	AGIP	1251	1959
San Martino 1, 2, 3	AGIP	1207; 1008; 1204	1987
Portile	AGIP	1205	1987

Tab. 5 – Elenco dei pozzi consultati da archivio UNMIG; in corsivo i pozzi le cui stratigrafie sono state utilizzate direttamente (proiettandole) per ottenere le sezioni geologiche interpretative descritte nel testo.

I pozzi sono tutti definiti "sterili" in quanto non hanno raggiunto unità geologiche sede di idrocarburi liquidi, individuate nelle formazioni mioceniche della Successione Umbro-Marchigiana-Romagnola, fermandosi nelle unità geologiche (più antiche) che ricoprono tettonicamente queste ultime. Le mineralizzazioni incontrate sono date da metano e acque salate.

Sulla base di questi dati, sono state disegnate due sezioni geologiche interpretative a scala 1:10.000; è stata posta attenzione, mediamente, ai primi 500 m circa di profondità, con l'obiettivo di fornire un inquadramento delle strutture, tra cui quelle responsabili della risalita dei fluidi attraverso l'attività delle salse, utile anche per le indagini geofisiche (in corso o da programmare) che dettagliano la presenza di gas ed acque salate entro le prime decine di metri dal piano campagna. Questa profondità è infatti di grande interesse ai fini della sicurezza.

La sezione ortogonale alle strutture compressive e agli accavallamenti orientati parallelamente al margine appenninico, tratta dalle Note Illustrative del Foglio 219 Sassuolo (Gasperi *et al.*, 2005), approfondisce i dati di letteratura, esemplificati in Fig. 27; il riquadro indica la porzione di sottosuolo interpretata.

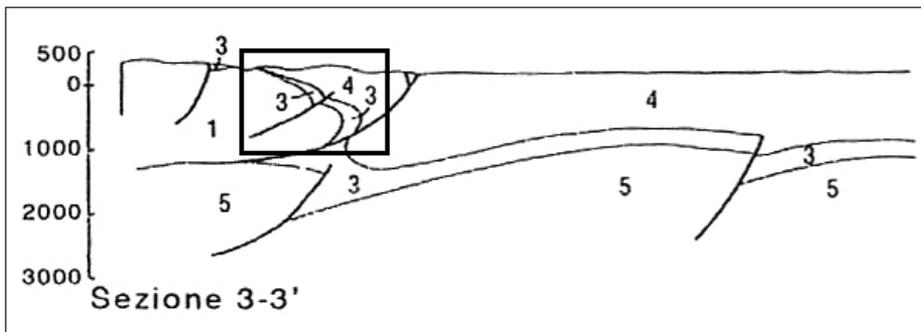


Fig. 27 – Sezione geologica pubblicata nella Note Illustrative del Foglio 219 Sassuolo (Gasperi *et al.*, 2005). Legenda: 1. Unità Liguri ed Epiliguri (a queste ultime appartiene la Formazione del Termina, citata nel testo); 2. Unità evaporitiche (assenti nel caso di studio e, ove presenti, date dalla Formazione Gessoso-solfifera); 3. Unità post-evaporitiche messiniane (Formazione a Colombacci) e del Pliocene inferiore; 4. Unità del Pliocene-Quaternario (formazioni delle Argille Azzurre e Sabbie Gialle); 5. Unità mioceniche della Successione Umbro-Marchigiano-Romagnola. Nel riquadro l'interpretazione estrapolabile anche per l'area di studio.

Le unità plio-pleistoceniche, indicate con “3” e “4” in Fig. 27 (Formazione delle Argille Azzurre, FAA) appoggiano, localmente in discontinuità, su quelle tardo-messiniane, date dalla Formazione a Colombacci (FCO). La base stratigrafica di FCO corrisponde a una discontinuità di importanza regionale, su un substrato dato dalle unità tortoniane della Successione Epiligure (Formazione del Termina, TER), indicata con “1” in Fig. 27. Nelle aree limitrofe a quelle di studio, la Formazione Gessoso-solfifera (GES, di età messiniana, indicata con “2”), si rileva solo nella stratigrafia di alcuni pozzi (es. Levizzano 2). FAA ha strati con inclinazione che aumenta procedendo verso il margine, a formare la “flessura di Veggia-Fiorano” citata nell’inquadramento geologico. L’aumento dell’inclinazione degli strati di FAA seguendo la direttrice SO-NE si osserva anche nell’area delle Salse. Presso il margine, queste unità sono sollevate da una struttura sepolta di importanza regionale, nota come *Pede-Apennine Thrust Front* (PTF), presso il margine appenninico (Bonini, 2008a).

La seconda sezione ha permesso di studiare le faglie antiappenniniche che costituiscono svincoli trasversali rispetto ai fronti di accavallamento della catena. Come già detto nei paragrafi dedicati allo studio degli allineamenti delle salse e ai contenuti geologici della carta di Tav. 1, nell’area di studio è impor-

tante il ruolo delle faglie trasversali con orientazione OSO-ENE. Tra queste ultime, importante è la trascorrente sinistra ricavabile dalla dislocazione dei limiti geologici, prima tra tutti della base di FAA. In questa ipotesi, le salse si collocano entro una fascia di taglio sinistra, dove la risalita dei fluidi è favorita dalle caratteristiche schematizzate in Fig. 28, con il relativo campo di sforzi. Tale fascia di taglio può anche essere messa in relazione con le strutture che favoriscono la risalita di acque mineralizzate delle terme della Salvarola (presso Sassuolo) e che giustificano la presenza delle vicine Salse di Montegabbio.

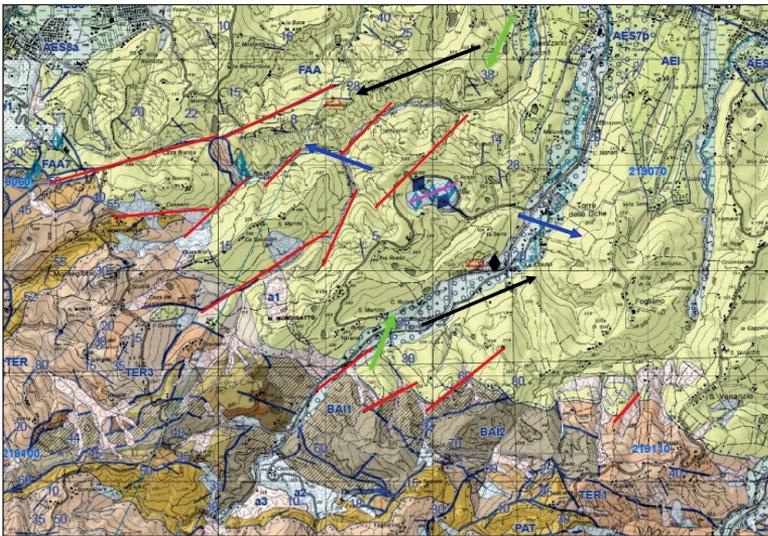


Fig. 28 – Faglie trasversali ad alto angolo, con rigetto cartografico indicativo di una trascorrenza sinistra (simboleggiata dalle frecce nere), in parte interpretate dalla cartografia geologica 1:25.000 di inquadramento dell'area di studio (Foglio 219 Sassuolo, Gasperi et al., 2005). Le frecce verdi e blu schematizzano, rispettivamente, l'orientazione della compressione massima e minima (o estensione) del campo di sforzi ipotizzabile da questa interpretazione.

Collocare le salse entro una fascia di taglio sinistra è coerente anche con alcune delle considerazioni di Bonini (2012), collegate anche all'interpretazione della peculiare forma ellittica della depressione delle salse, che viene posta in relazione con le direzioni di sforzo.

Gli allineamenti studiati nell'area delle Salse (par. 4.3) e ricondotti a sistemi di fratture, sono resi “materializzando” quello principale e proponendo un'interpretazione attraverso la presenza di una faglia trasversale, a cinematica trascorrente sinistra (presumibilmente transpressiva), che taglia lo spessore dei depositi pliocenici. Emerge anche l'importanza del sistema di faglie ad alto

angolo di Rio del Petrolio, che delimita a NO l'area delle Salse, corrispondente anche a variazioni nell'assetto di FAA.

Successivamente alle sezioni geologiche interpretative, è stata posta particolare attenzione alle mineralizzazioni segnalate nelle stratigrafie dei pozzi di Tab 5, data la presenza di metano ed acque salate tra i prodotti di emissione delle salse.

Nell'area delle Salse di Nirano il metano è segnalato a 190 m di profondità (pozzo Montegibbio 3); pochi chilometri ad ovest venute di metano si hanno a 81 m circa dal piano campagna (pozzi Montegibbio 2 e 4).

Le acque salate sono segnalate costantemente in corrispondenza delle unità tardo-messiniane che costituiscono la base stratigrafica dei depositi plio-pleistocenici e, meno frequentemente, a diverse altezze entro FAA. Prevalgono le segnalazioni secondo le quali si rinvencono nei depositi tardo-messiniani che formano la base stratigrafica di FAA, cartografati in affioramento come FCO.

## 8. Considerazioni finali sulle ricerche geologico-geomorfologiche

Nell'ambito degli studi geologico-geomorfologici trattati in questo articolo, sono stati raggiunti i seguenti risultati:

- i) Per la prima volta è stata studiata l'evoluzione areale dei depositi attivi degli apparati lutivomi, in un intervallo comprendente gli ultimi 70 anni, rilevando come l'istituzione della Riserva abbia condotto ad uno stato di naturalità degli stessi. Negli ultimi diciotto anni le superfici dei depositi attivi degli apparati A, B, D ("Nando Ovest", "Nando" e "La Giunta"), sono state soggette a variazioni più contenute rispetto a quelle di E ("Egidio") e G ("Fernando").
- ii) È stata documentata con cartografie dettagliate la distribuzione dei punti di emissione del passato e la loro evoluzione areale dal 1884 all'attuale, segnalando salse antiche, anche scomparse, fino a quelle recentissime di maggio 2016. Relativamente alla documentazione sulle attivazioni del passato, si rimanda a Bonaposta & De Nardo (2017) in questo volume.
- iii) Sono stati studiati in modo analitico gli allineamenti principali che caratterizzano le bocche lutivome degli apparati e che corrispondono a sistemi di fratture utilizzati per la fuoriuscita dei fanghi. Ciò potrebbe servire per indirizzare eventuali approfondimenti con metodi geofisici, per lo studio delle caratteristiche delle prime decine di metri di sottosuolo.
- iv) Lo studio dei dati di sottosuolo ha permesso la ricostruzione di un modello geologico locale di prima approssimazione, riferito ai primi 500 m circa di profondità; nell'area delle Salse, in base ai dati di pozzo la presenza di gas metano è documentata a varia profondità entro la Formazione della Argille Azzurre (80, 180 m). Le acque salate sono documentate in pozzi profondi di aree limitrofe, è il caso dei pozzi Spezzano 2, Le-

vizzano 1 e 2, Maranello 1 (Fig. 5). Le acque salate sono documentate presso la base stratigrafica di FAA, prevalentemente in unità pelitiche tempo-equivalenti alla Formazione a Colombacci degli affioramenti. Secondo i dati di Bonini (2009), invece, le rocce magazzino sarebbero da collocarsi al tetto della Successione Umbro-Romagnola (corrispondente alla Formazione Marnoso-Arenacea; ancora più profonda sarebbe quindi la roccia madre). Considerazioni sulla profondità di un *reservoir* di metano, o di acque salate di provenienza più profonda saranno possibili solo disponendo di dati isotopici.

v) Tra le evidenze di terreno utili ai fini della messa in atto di buone pratiche per la sicurezza, si può notare quanto segue:

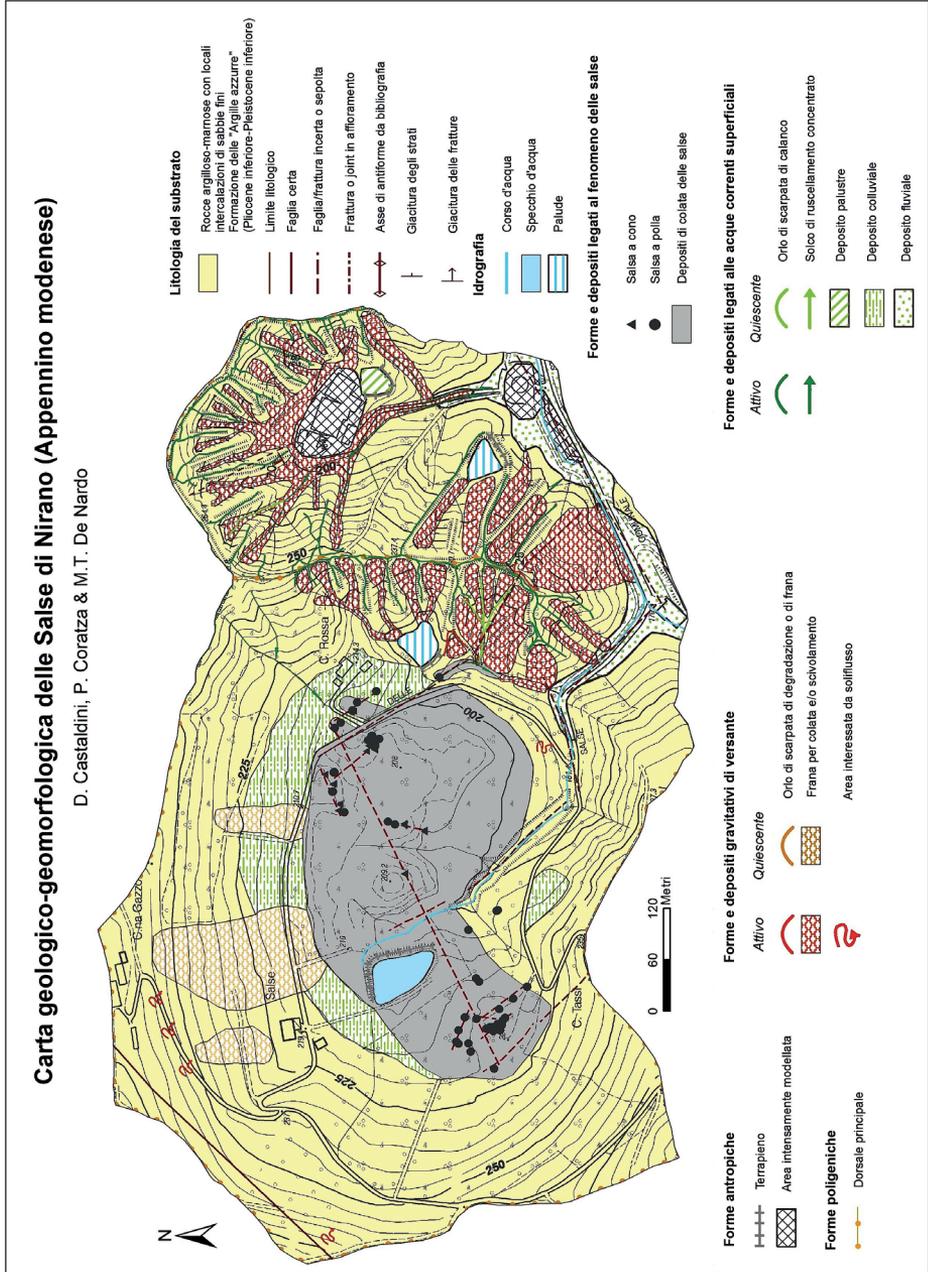
1) Alcune delle salse sviluppatasi presso Ca' Rossa a partire dal 2012 sono effettivamente di neoformazione in quanto non documentate nell'analisi storica. Non sono associate agli apparati lutivomi principali e "consolidati" dell'area delle salse; si sono attivate in un bosco di impianto artificiale e in un prato (nel 2016) in un settore mai interessato in precedenza da manifestazioni lutivome. Pur essendo le meno "prevedibili" come sviluppo, hanno un'ubicazione e una disposizione che segue gli allineamenti ricavabili dall'analisi condotta sugli apparati già presenti.

2) Le salse nel bosco a sud di Ca' Rossa non possono evolversi "naturalmente" nel senso di acquisire una loro forma propria in quanto il fango viene evacuato da scoli artificiali.

3) La comparsa di salse negli ultimi anni (dopo il 2012) non documentate in precedenza, evidenziano l'importanza di una sorveglianza e di un presidio quotidiano della Riserva. A ciò si unisce la necessità di sorvegliare l'evoluzione di un fenomeno geologico attivo, che si esprime con una fuoriuscita costante di gas e fanghi in acque salate sotto forma di colate e, seppure in rare occasioni (ma documentate nella letteratura storica o in foto), con proiezione di lacerti fangosi (cfr. Bonaposta & De Nardo, in questo volume). L'attivazione di tale presidio è utile anche per disporre di una registrazione (con l'ausilio delle moderne tecnologie di posizionamento) della dinamica degli apparati, già come forma di monitoraggio di primissimo livello, su cui basare altri tipi di monitoraggi "parametrici" e con strumentazioni dedicate.

### **Ringraziamenti**

*Gli autori ringraziano il Prof. Stefano Conti per il prezioso lavoro di revisione del manoscritto.*



Tav. 1 – Carta geologico-geomorfologica dell'area delle Salse di Nirano (2016).



Daniele Bonaposta\*, Maria Teresa De Nardo\*\*

## Attivazioni storicamente documentate delle salse del margine appenninico modenese e reggiano

### Riassunto

Sono state intraprese ricerche sulla documentazione storica riguardante l'attività dei vulcani di fango dell'Appennino modenese e reggiano, con particolare riguardo alla Riserva Naturale delle Salse di Nirano. I documenti storici esaminati sono stati suddivisi in due gruppi: 1) pubblicazioni prevalentemente storiche dal 1966 al 2004; 2) relazioni storico-scientifiche di Autori del 18°, 19° e 20° secolo. Sono state prese in considerazione anche attivazioni di questo fenomeno geologico descritte in tempi antichi (epoca romana, 16° e 17° secolo). Per la prima volta, grazie a tecniche di indagine GIS, sono state raccolte e analizzate informazioni sulla posizione degli apparati lutivomi, gli anni di documentata attivazione e i tipi di episodi eruttivi, considerando anche carte di diverse età sulla distribuzione dei vulcani di fango. Sono stati tracciati grafici relativi al numero di attivazioni per anno. I gruppi di salse presenti a Montegibbio e a Regnano sono quelli caratterizzati dal più alto numero di attivazioni documentate, con episodi esplosivi dovuti all'accumulo di gas. Nella Riserva di Nirano i fanghi e i gas fuoriescono dagli apparati in modo più regolare e continuo, anche se fasi esplosive sono state documentate in tempi recenti, come in una foto scattata nel 1937. Sono state infine eseguite elaborazioni GIS sull'attivazione esplosiva descritta dal naturalista romano Plinio il Vecchio, che sarebbe stata osservata dalla "Via Emilia" romana nel 91 a.C. Considerando la distanza dell'osservazione, potrebbe trattarsi dei vulcani di fango di Montegibbio, a condizione che fin da allora il campo delle Salse di Nirano si trovasse in una zona altimetricamente depressa come è attualmente.

### Abstract

*Historically documented activations of the Northern Apennine mud volcanoes.* A research on records of mud volcano activity, as reported in historical literature, was carried out. The analysis deals with the Nirano Nature Reserve and, in general, with similar geological phenomena in the Modena and Reggio Emilia Apennines (Italy). The literature was divided into two parts: i) quasi-historical publications, from 1966 to 2004; ii) scientific-historical reports written by Authors from the 18<sup>th</sup> to early 20<sup>th</sup> century. Activations documented in more ancient times (Roman Age, 16<sup>th</sup>, 17<sup>th</sup> centuries) were quoted as well. For the first time, information on positioning, years of recorded activations and type of episodes were collected and analyzed by means of GIS techniques. Maps of mud volcano distribution were drawn up and the documented number of activations was reported. Graphs showing the number of activations per year were produced. Mud volcano groups in Montegibbio and Regnano

---

\* Libero professionista, esperto in elaborazioni e cartografia GIS. Via Don G. Minzoni 13A, 40121 BOLOGNA; e-mail: daniele.bonaposta@gmail.com.

\*\* Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, Viale delle Fiera 8, 40127 BOLOGNA; e-mail: mariateresa.denardo@regione.emilia-romagna.it.

*show the highest numbers of recorded activations, characterized by explosive episodes due to gas accumulation. In the Nirano area, mud and gases flow out of the vents with a more regular and continuous pattern, though mud extrusions are documented even in recent times, e.g. by a photo taken in 1937. GIS elaborations on the explosive activation described by the Roman scientist Pliny the Elder along the Roman "Via Emilia" and referred to 91 BCE were carried out. Considering the distance of the observation point, these may be related to the Montegibbio mud volcanoes, if the Nirano field was already in a depressed area, as it is nowadays.*

**Parole chiave:** *Vulcani di fango, bibliografia storica, elaborazioni cartografiche GIS.*

**Key words:** *Mud volcanoes, historical references, GIS mapping.*

## 1. Premessa

Per le finalità dello studio sulle Salse di Nirano, è stata svolta una ricerca sulle attivazioni (come definite nel cap. 2) documentate nella letteratura geologica recente (ultimi 50 anni). Ciò è stato accompagnato da un percorso conoscitivo basato su pubblicazioni più antiche, di argomento geologico e naturalistico, che avessero attinenza con il fenomeno delle salse dell'Appennino modenese e aree limitrofe.

Avvalendosi della bibliografia citata da Bonini (2008a), sono stati individuati i principali lavori di questo tipo, per acquisire i quali si è fatto principalmente riferimento alla biblioteca del Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche dell'Università di Modena e Reggio Emilia. Lo scopo era quello di acquisire dati geologici originali da pubblicazioni del passato, sulla localizzazione delle salse e sulla loro attività, con riferimento a quelle di Nirano e delle aree limitrofe.

Per la prima volta tali notizie ("rilette" in chiave geologica) sono state trattate non solo come citazione ma con gli strumenti offerti dai moderni programmi GIS, per formare una base informativa geografica in grado di offrire un quadro cartografico di prima approssimazione, utile agli scopi dello studio e, per la sua novità, suscettibile di approfondimenti sulla natura degli episodi documentati.

## 2. Le informazioni ricavabili dalla letteratura consultata

Sono stati consultati lavori storici, direttamente o da citazioni integrali riportate in pubblicazioni di Autori più moderni, tra cui la recente monografia "Nirano, una comunità, la sua storia" (AA.VV., 2012).

Gli Autori a cui si è fatto riferimento sono: Spallanzani (1795), Bianconi (1840), Stoppani (1876), Stöhr (1867), Coppi (1875), Ferretti (1878), Malagoli (1883), Biasutti (1907), Govi (1906, 1908), Camerana (1926). Tra i moderni,

si ricordano: Mucchi (1966), Scicli (1972), Ferrari & Vianello (1985), Gorgoni (2003), Martinelli & Judd (2004), Castaldini & Coratza (2017) e le citazioni documentate in Bonini (2008a, 2012). Queste pubblicazioni possono anche riportare testimonianze di altri Autori più antichi, risalenti al '500 e '600. A questi va aggiunta la più antica testimonianza letteraria per quanto riguarda le osservazioni naturalistiche di fenomeni riconducibili verosimilmente all'attività delle salse emiliane: quella di Plinio il Vecchio, che negli anni immediatamente prima della sua morte, avvenuta durante l'eruzione del Vesuvio del 79 d.C., descrive un fenomeno verificatosi nell'area modenese, risalente al 92 o al 91 a.C., come meglio si dirà in seguito attraverso un'elaborazione apposita.

Per quanto riguarda la localizzazione dei principali vulcani di fango nella Riserva di Nirano e nelle altre aree emiliane, si è partiti dalle pubblicazioni di più antica data, in modo da poter verificare, migliorare ed eventualmente consolidare i posizionamenti man mano che la documentazione più recente veniva acquisita. Questo ha permesso di avere un dato più affidabile per ciascun sito.

I documenti più antichi hanno permesso una localizzazione di massima, dal momento che non ben raramente vi sono indicati riferimenti cartografici e che le descrizioni potevano talora avere un carattere romanzato. Tutte le informazioni ricavate dalla letteratura consultata sono state digitalizzate in un GIS, con una geometria puntuale e con la struttura dati tabellare in merito a: i) attivazioni, ii) tipo di materiale, iii) attendibilità, iv) fonti documentali.

Alla conclusione dello studio dei testi storici, ogni punto digitalizzato è stato confrontato con le moderne ortofoto satellitari, così da verificare la sua eventuale attuale esistenza e, successivamente, il corretto posizionamento. In Fig. 1 ogni punto è classificato in base alla qualità della sua localizzazione. Da notare i punti nominati "Montegibbio": in questo caso, diversi Autori parlano di differenti siti, tutti con alto grado di affidabilità per quanto riguarda il posizionamento in quanto sede di manifestazioni riconducibili a salse, ma gravati da incertezza come corrispondenza ai toponimi attuali<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Ad esempio, la Salsa della Lama è oggi più nota come Salsa di Ospitaletto e rappresenta un geosito di rilevanza locale. È costituita da due apparati lutuvomi attivi, che emettono acqua salata con poco fango, e uno storico estinto (Salsa dello Spino), sviluppati lungo il contatto tettonico tra Argille varicolori e Mélange di Coscogno. La Salsa storica della Guana (Fig. 1) è riportata nella bibliografia geologica e paleontologica di Malagoli (1883), che cita a sua volta Coppi (1875). Quest'ultimo parla delle «... Salse di Nirano, di Pujanello d'Ospitaletto e della polla d'acqua salata detta Guana in San Venanzio».

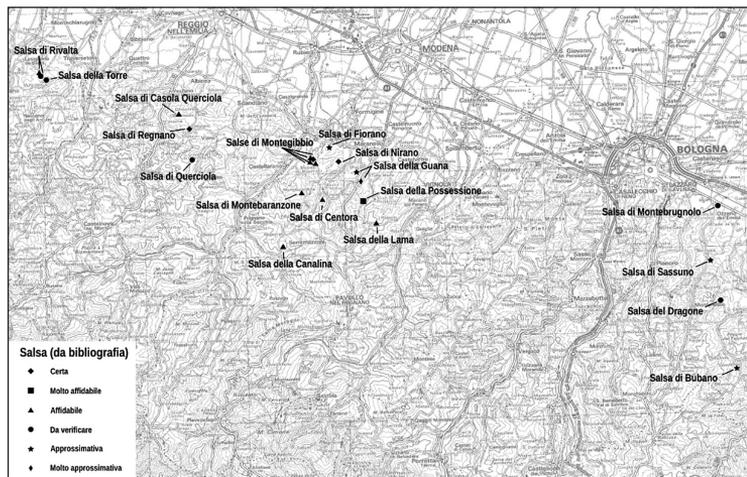


Fig. 1 – Localizzazione delle salse presenti nell’Appennino emiliano, da riscontro con la bibliografia storica.

La Fig. 2 mostra, per il medesimo gruppo di dati, il numero di attivazioni che per ogni sito è documentabile dalle fonti bibliografiche consultate. Per “attività” o “attivazioni” s’intendono le emissioni di fango e idrocarburi che hanno attirato, per il loro carattere di straordinarietà, l’attenzione degli Autori, che in molti casi riportano testimonianze dei locali. Un’attivazione può essere quindi una fuoriuscita di gas e fango particolarmente abbondante che, solo in alcuni casi, può anche avere anche un carattere violento, parossistico, fino a esplosivo.

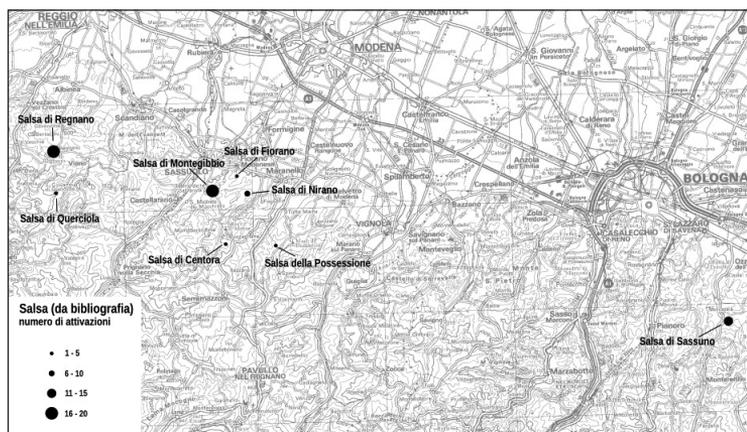


Fig. 2 – Classificazione delle salse in base al numero delle attivazioni documentate nella bibliografia consultata. Si rimanda al testo per il concetto di “attivazione”.

La registrazione delle attivazioni non è, nella gran maggioranza dei casi, la descrizione di un fenomeno osservato direttamente da un Autore, quanto piuttosto il riferimento a notizie pregresse. La citazione può quindi risentire della soggettività e della cultura di ogni Autore. Per forza di cose, alcuni di questi studiosi possono essersi recati sui siti basandosi su scritti già esistenti, concentrandosi sul caso locale e senza una ricerca estesa a un contesto geografico più generale. I siti con manifestazioni meno “eclatanti”, non parossistiche, a carattere continuativo e costante, sono stati oggetto di attenzioni minori da parte degli studiosi.

Esiste quindi inevitabilmente un margine di incertezza nelle informazioni che si rinvengono nella letteratura storica, di cui bisogna essere coscienti.

La Fig. 2 e il grafico di Fig. 3 mostrano come, dalla documentazione acquisita, le salse siano classificabili in base al numero di attivazioni che, in ordine decrescente, interessano i seguenti siti: Regnano (RE), Montegibbio (MO, intese come gruppo, vedi Fig. 1), Sassuno (BO), Nirano (MO), Querciola (RE); Fiorano e Puianello (MO), Centora (MO).

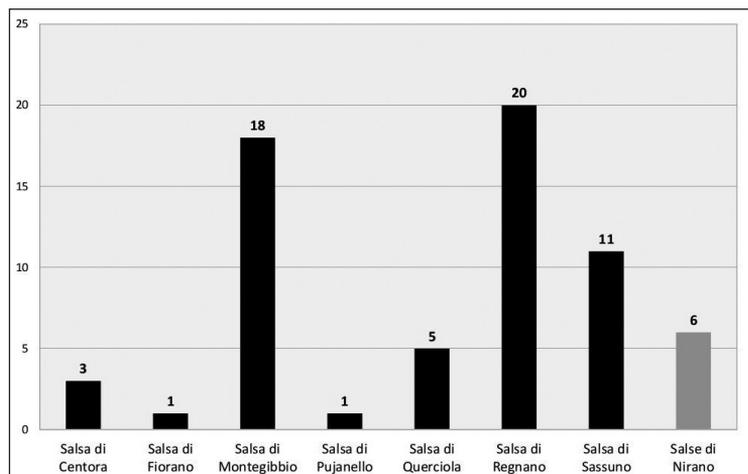


Fig. 3 – Grafico sul numero di attivazioni per ciascun sito interessato da salse storicamente documentate, in grigio sono evidenziate quelle di Nirano. I numeri delle colonne si riferiscono agli eventi, verificatisi in anni diversi, documentati nella bibliografia consultata.

Non è un caso che le salse con maggiore numero di osservazioni siano appunto quelle di Montegibbio (intese come gruppo, localizzato a sud di Sassuolo) e Regnano, accomunate dal fatto di essere (o essere state) caratterizzate da attività esplosiva, con proiezione di materiale litoide eterogeneo ed eterometrico.

Come documentato da Biasutti (1907), per Montegibbio l'attività esplosiva è avvenuta a intervalli di tempo (vedi anche grafico in Fig. 5), mentre è quasi

la norma per Regnano. Si ricorda che il gruppo delle salse sassolesi di Montegibbio e dintorni è attualmente quiescente; solo la documentazione storica permette di avere nozione della dinamica che le ha contraddistinte.

Lo stesso Autore, citando gli studiosi della seconda metà dell'Ottocento (Bianconi, 1840; Stoppani, 1876), attribuisce alle Salse di Nirano uno stile di attivazione diverso, caratterizzato da emissioni di fango, per lo più senza proiettili litoidi. Ricorda però che: «*sia la presenza di materiale roccioso come il regime parossismico sono fenomeni comuni a tutte le salse, che esse presentano a seconda dei vari luoghi e momenti, solamente in gradi di diversa intensità*» (Biasutti, 1907 pag. 189).

Nel grafico di Fig. 4 è rappresentato il numero di attivazioni documentate nella bibliografia consultata, in funzione degli anni a cui si riferiscono le segnalazioni (dal 92 a.C. al 1999); in grigio sono evidenziati gli anni per cui sono documentati eventi riguardanti le Salse di Nirano.

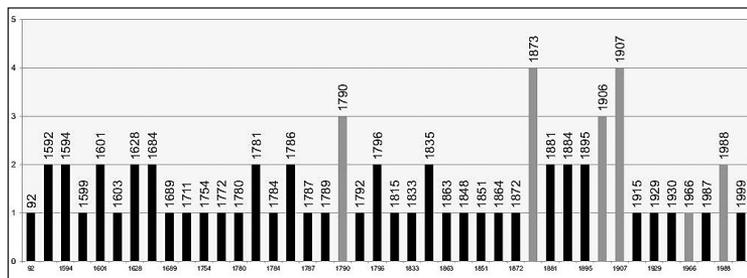


Fig. 4 – Grafico sul numero di attivazioni per ciascun anno (da bibliografia), sono evidenziati in grigio gli eventi che riguardano le Salse di Nirano.

Per queste ultime, si è scelto di considerare come eventi storici più recenti le osservazioni derivanti dall'ultimo monitoraggio geochimico annuale del sito, condotto alla fine degli anni '80 da Gorgoni e collaboratori. Sono descritte fuoriuscite di fango in proporzione maggiore, seppure solo visivamente stimata, negli anni 1790, 1873, 1906, 1907, 1966 e 1988, con almeno due eventi per anno.

A conclusione di questo paragrafo, nel grafico di Fig. 5 viene presentato un confronto tra le Salse di Montegibbio (intese come gruppo) e quelle di Nirano, per quanto riguarda gli anni delle attivazioni documentate.

Per le Salse di Nirano, Biasutti (1907) documenta attivazioni nel 1906 e 1907 legate a una più copiosa emissione di fango rispettivamente della "Salsa Alta" (G, in questo lavoro) e del gruppo degli apparati più orientali (da A a D). Coppi documenta un periodo di attivazione superiore (sempre come emissioni di colate di fango) che vuole correlare a un terremoto del 1873 in area modenese. La segnalazione del 1790 è dubbia, in quanto potrebbe essere piuttosto riferita alla Salsa di Montegibbio.

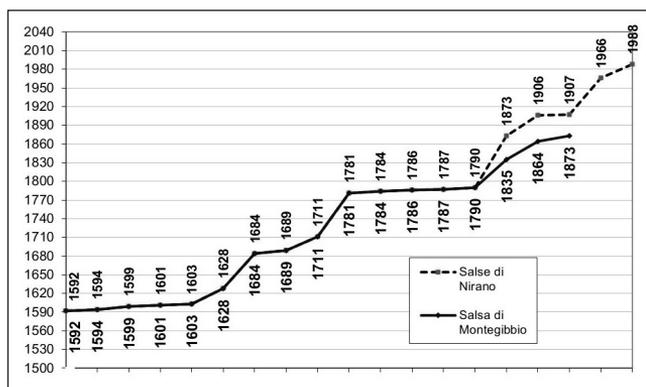


Fig. 5 – Grafico sugli anni di attivazioni storicamente documentate, per le salse di Montegibbio (tratto continuo) e Nirano (in tratteggio).

Si è trovata inoltre traccia di una segnalazione di eruzione con getto di fango, a un'altezza di qualche metro, verificatasi nel 1863 (Stoppani, 1876), senza altro riscontro.

Lo stesso vale per un getto di fango proiettato da uno degli apparati non identificato, documentato in una foto del 1937, che si riporta nella Fig. 6 tratta da Scicli (1972) che la cita a sua volta da De Buoi (1937). Data la mancanza di altre informazioni, questi due ultimi eventi non sono stati messi a confronto con quelli descritti in modo più particolareggiato.

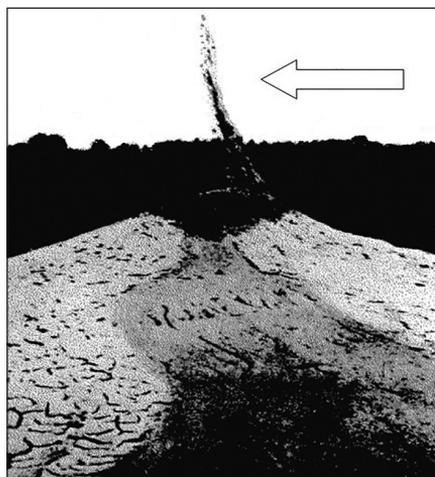


Fig. 6 – Foto tratta da Scicli (1972), che riporta la documentazione di un episodio parossistico di attivazione e la proiezione di un getto di fango alto 2 m (freccia) da parte di uno degli apparati lutuosi del campo di Nirano (foto De Buoi, 1937).

Per le Salse di Montegibbio, dalla fine del ‘500 alla fine del ‘700, sono documentabili cicli di attivazione della durata di 30 anni circa intervallati da stasi; nell’800 questo stile non è più evidente, fino allo stato attuale di quiescenza. Maggiore continuità nel tempo è attribuibile alle Salse di Nirano.

### 3. La segnalazione del naturalista Plinio il Vecchio

*«È avvenuto una volta – come personalmente riscontro nei testi della dottrina etrusca – un enorme prodigio di terre nella regione di Modena, sotto il consolato di Lucio Marcio e Sesto Giulio. Due montagne, cioè, si scontrarono con grandissimo fragore, balzando avanti e retrocedendo, e tra di loro fiamme e fumo salivano al cielo in pieno giorno; assisteva dalla via Emilia, una gran folla di cavalieri romani, con il loro seguito, e di viaggiatori. Per l’urto furono distrutte tutte le case di quelle campagne, e moltissime bestie, che si trovavano nel mezzo, rimasero uccise: si era un anno prima della guerra sociale, che potrei definire più funesta per questa terra d’Italia anche rispetto alle guerre civili» (...).*

Plinio il Vecchio – *Historia mundi naturalis* (Libro II-85, circa 77-78 d.C.)

Questo brano è la più antica testimonianza di un fenomeno geologico parossistico, tradizionalmente collegato alla presenza di salse prossime al margine appenninico nel settore modenese. La manifestazione descritta è datata al 92-91 a.C, sulla base del riferimento alle “Guerre Sociali” tra Roma e le popolazioni italiche; il riferimento geografico è quello dell’antica “Via Æmilia” nei pressi di “Mutina” (cfr. Casoli, 2001).

Non c’è modo di individuare con precisione e in modo univoco quale dei siti con salse storiche, digitalizzati in questo lavoro, sia il responsabile di tale straordinario evento; ad ogni modo, i siti maggiormente conosciuti e attivi, situati nelle aree limitrofe al tratto modenese della Via Emilia, sono le Salse di Montegibbio e Nirano. Gli strumenti cartografici moderni permettono di esplorare queste possibilità, ammettendo che:

- l’orografia dei tempi di Roma repubblicana non sia cambiata, nei suoi tratti salienti, rispetto ad oggi; sotto questa ipotesi, il modello digitale del terreno attuale è da considerarsi rappresentativo anche della morfologia del passato;
- gli eventi “prodigiosi” che Plinio descrive abbiano fatto sviluppare lingue di fuoco e nubi di gas solo nell’intorno del punto in cui si sono verificati.

Con queste premesse, si dà alla componente geometrica maggior peso rispetto ad altri aspetti per cui è possibile eseguire un’analisi di visibilità, applicando le funzioni dei programmi GIS: dato un punto sul Modello Digitale del Terreno (DTM della Regione Emilia-Romagna con risoluzione di 5 m) si ottiene l’area da cui quel punto risulta visibile.

La Fig. 7 illustra il risultato dell'analisi di visibilità; sono indicati in toni di grigio i settori visibili secondo due ipotesi e con una linea (che attraversa obliquamente l'immagine) la Via Emilia attuale, potendo considerare quest'ultima come un riferimento stabile nel suo tracciato anche per i tempi antichi.

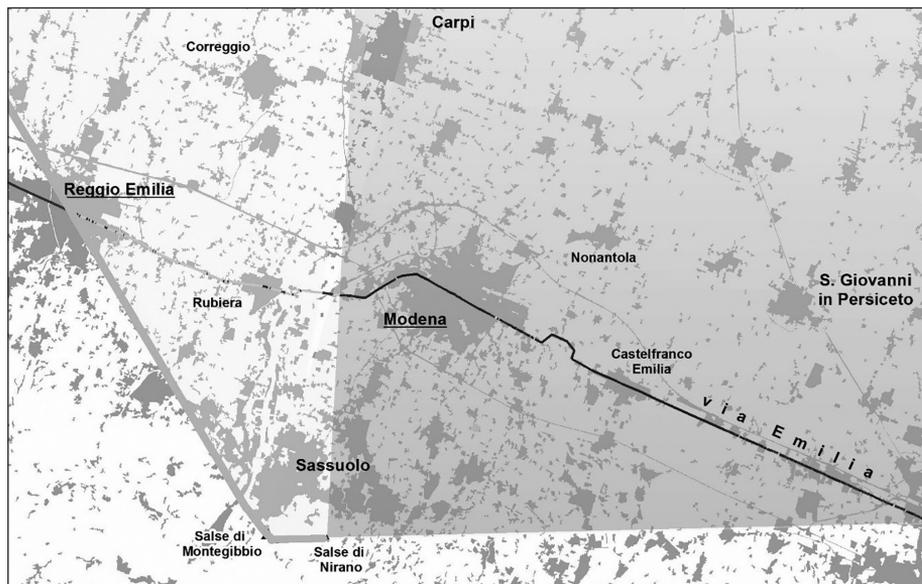


Fig. 7 – Analisi di visibilità estrapolata dal brano di Plinio il Vecchio descritto nel testo.

Dall'analisi di visibilità risultano due scenari:

- 1) Nell'ipotesi che, all'epoca della manifestazione, le Salse di Nirano si trovassero esattamente nello stesso punto in cui si trovano oggi, entro una depressione morfologica, l'unica visibile (dai cavalieri romani) dalla Via Emilia nel tratto compreso tra Reggio e Bologna, risulterebbe essere quella di Montegibbio (area in grigio chiaro).
- 2) Nell'ipotesi che le Salse di Nirano non si trovassero nella posizione in cui le vediamo oggi, ma ad una quota di circa 100 m più alta della conca attuale, il fenomeno del 92-91 a.C. potrebbe avere un'altra origine. Posizionando, quindi, le Salse di Nirano a un'altitudine maggiore, l'analisi di visibilità ottenuta evidenzia come queste sarebbero state visibili da Bologna fino alla località "La Bruciata", compresa tra Modena e Rubiera (area in grigio scuro).

Il primo scenario si basa sulla premessa che la morfologia attuale rispecchi quella antica: il risultato è che il resoconto pliniano sia riferibile alle Salse di Montegibbio.

Il secondo si basa invece sull'idea che, fatta salva la conservazione della morfologia generale, le Salse di Nirano si trovino alla quota attuale a causa della locale subsidenza, indotta dal materiale espulso nel corso del tempo. In questo caso, anche le manifestazioni delle Salse di Nirano (poste a quota superiore all'attuale) sarebbero state visibili dalla Via Emilia.

Come considerazione di chi scrive, se si attribuisce alle Salse di Montegibbio lo stile di attivazione comunemente accompagnato da esplosioni, segnalato in più epoche da Autori diversi e associato anche all'esistenza di estesi depositi rilevati dalla moderna cartografia geologica, la prima ipotesi risulterebbe quella maggiormente verosimile.

### ***Ringraziamenti***

*Si ringraziano il Dott. Raffaele Pignone e l'Ing. Gabriele Bartolini, che si sono avvicendati nel ruolo di Responsabile del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli nel periodo 2014-2016, durante il quale il Servizio ha partecipato allo svolgimento dello studio sulle Salse di Nirano oggetto del presente volume.*



Tommaso Santagata<sup>\* \*\*</sup>, Marco Ennio Camorani<sup>\*\*</sup>

## Rilevamento topografico dei vulcani di fango della Riserva delle Salse di Nirano

### Riassunto

*In questo capitolo vengono descritti i risultati del rilevamento topografico dei principali apparati delle Salse di Nirano. Le ricerche sono state condotte utilizzando diversi tipi di strumenti topografici e nuove tecnologie di rilievo tridimensionale. In particolare la stazione totale e la strumentazione GPS hanno permesso di ottenere dati altimetrici e coordinate geografiche di punti noti installati come riferimento sia all'interno che all'esterno delle aree interessate dall'attività lutivoma. L'utilizzo di nuove tecnologie quali veicoli aerei a pilotaggio remoto (droni) e laser scanner terrestre hanno permesso di ottenere dettagliate ricostruzioni tridimensionali dei principali apparati. Le operazioni di monitoraggio topografico sono state divise in diverse fasi. In primo luogo sono stati posizionati undici capisaldi fissi per ricavare quote altimetriche e coordinate geografiche di punti fissi tramite misurazioni con stazione totale e GPS. In seguito è stata eseguita la prima campagna di rilievo con laser scanner e rilievo fotogrammetrico con drone e GPS nel periodo maggio-giugno 2015 che ha portato alla prima realizzazione di modelli tridimensionali dei principali apparati oggetto di studio. Le fasi successive hanno riguardato una nuova serie di campagne di rilievo con GPS, drone e laser scanner, nel periodo marzo-giugno 2016, per ricavare dati che sono stati confrontati con i rilievi eseguiti precedentemente. Attraverso l'utilizzo di diverse tecnologie di rilievo è stato possibile acquisire e confrontare dati utili per valutare la sicurezza e la fruibilità delle aree della Riserva. I dati acquisiti rappresentano una ottima base di partenza per ulteriori monitoraggi e confronti al fine di controllare le variazioni morfologiche e topografiche.*

### Abstract

*Topographic survey of the mud volcanoes of the Nirano Nature Reserve. The methodologies applied for topographic survey of the Regional Nature Reserve of Nirano mud volcanoes (Italy) are discussed. In this work, several types of topographic instruments and new technologies for three-dimensional survey were used: a total station and GPS equipment were used to obtain detailed measurements (coordinates and altitude) of fixed points installed inside and outside the monitored areas. At the same time, drones and laser scanning technology have produced a detailed 3D reconstruction of the main cones. Field survey operations were divided into different phases. The first stage was dedicated to the positioning of eleven fixed points to obtain the precise elevations and coordinate measurements by means of a total theodolite station and GPS equipment. After this first phase, the first major laser scanner and photogrammetric survey by drone and GPS were carried out in the May-June 2015*

---

\* La Venta Esplorazioni Geografiche, Via Priamo Tron 35/F, 31100 TREVISO; e-mail: tommy.san84@gmail.com.

\*\* Gruppo Servizi Topografici s.n.c., Via Pistelli 5, 42123 REGGIO EMILIA.

period, which led to the creation of three-dimensional models of the main study apparatuses. Subsequently, a new series of major campaigns with GPS, drone and laser scanners was carried out (March-June 2016) to obtain data comparable with the previously performed surveys. By applying important new technologies, it was possible to acquire and compare useful data for assessing the safety and fruition of the Reserve area on a geomorphological and topographic level. The acquired data are a good starting point for further monitoring and comparisons in order to control morphological and topographic changes.

**Parole chiave:** Rilevamento topografico, GPS, drone, laser scanner, fotogrammetria, Salse di Nirano.

**Key words:** Topographic survey, GPS, drone, laser scanner, photogrammetry, Nirano mud volcanoes, Italy.

## 1. Introduzione

Nell'ambito degli studi interdisciplinari delle Salse di Nirano, è stato realizzato un rilevamento topografico dei principali apparati presenti all'interno della omonima Riserva Naturale.

La particolare conformazione del territorio e le rapide variazioni morfologiche a cui sono sottoposte le aree delle salse hanno indotto a utilizzare diversi metodi e strumenti di misura quali stazione totale, GPS, droni e laser scanner, per garantire l'acquisizione di dati confrontabili in un breve arco di tempo (circa un anno). Infatti, attraverso l'utilizzo di strumenti di misura ad alta precisione come il laser scanner terrestre ed il confronto tra i dati ottenuti precedentemente, è stato possibile ottenere informazioni importanti e dati utili per studiare l'evoluzione topografica e morfologica delle Salse di Nirano.

Da alcuni decenni lo sviluppo di nuove tecnologie nell'ambito del rilievo tridimensionale sta producendo molti vantaggi anche in ambito geologico. Strumenti come droni e laser scanner sono ormai sempre più utilizzati per il rilievo e il monitoraggio di strutture geologiche.

In questo lavoro, l'integrazione tra diverse tecnologie di rilievo è risultata fondamentale per ottenere diversi tipi di dati utili sia per monitorare le variazioni topografiche delle aree rilevate sia per studiare i meccanismi di micro-fratturazione ed evoluzione morfologica degli apparati lutivomi principali, realizzando inoltre una dettagliata documentazione fotografica e tridimensionale della Riserva.

## 2. Metodi e strumenti utilizzati

Nelle fasi preliminari di questo studio sono state eseguite principalmente ricerche cartografiche tramite l'analisi di fotografie aeree, carte geomorfologiche, carte tecniche regionali e altri tipi di elaborati utili per comprendere lo

stato dei lavori prodotti negli anni precedenti in modo da scegliere il tipo di strumentazione da utilizzare in base alle finalità richieste.

Attraverso l'utilizzo di diverse tecnologie è stato possibile ricavare dati utili per effettuare confronti sulle variazioni topografiche e morfologiche, nonché indagini più approfondite sulla superficie dei principali apparati lutivomi. L'integrazione di tecniche di rilievo classiche e a scansione laser consente di finalizzare il rilievo di strutture anche complesse non solo a scopo documentario ed informativo, ma anche per fornire l'informazione metrica necessaria per un'analisi strutturale e geometrica.

Il rilievo con laser scanner è quello che sicuramente ha fornito i dati più interessanti, attraverso i quali è stato possibile analizzare le superfici degli apparati lutivomi misurando anche fratture di pochi centimetri. Le scansioni sono state eseguite da una distanza molto ravvicinata dagli apparati dei vulcani di fango con una risoluzione di 12 mm, e in alcuni casi è stato possibile misurare anche l'altezza del materiale presente all'interno effettuando scansioni dalle parti più alte dei cono dei vulcani di fango. Oltre alle coordinate spaziali acquisite, è stata eseguita un'accurata analisi sulla riflettanza, parametro che indica la proporzione di luce incidente che una data superficie è in grado di riflettere e ha quindi un significato fisico ben preciso essendo il suo valore legato alle caratteristiche del materiale di cui è costituita la superficie scansionata (Sgrogan & Vassena, 2007).

Le fotografie aeree, realizzate con un quadricottero e diversi voli di circa 25 minuti l'uno da altezze inferiori ai 60 m, hanno permesso di ottenere modelli tridimensionali dei principali apparati oggetto di studio e il confronto di questi dati con quelli acquisiti tramite laser scanner.

Le analisi dei dati acquisiti nelle due distinte campagne di rilievo con l'utilizzo di laser scanner e drone hanno permesso di ottenere dettagliati modelli tridimensionali sotto forma di nuvole di punti da cui sono stati derivati altri tipi di elaborati topografici (modelli digitali del terreno, orto-foto immagini, planimetrie e sezioni 2D) che sono stati confrontati tra loro.

### **2.1. Rilievi eseguiti con stazione totale e GPS**

I rilievi eseguiti con drone e laser scanner sono stati georeferenziati utilizzando i capisaldi installati nelle fasi preliminari. In particolare, per ottenere misure statiche su punti fissi (capisaldi installati sia all'interno che all'esterno delle aree oggetto di studio), sono stati utilizzati GPS e stazione totale. Le misure ottenute su questi punti hanno rappresentato le basi per i rilievi successivi eseguiti con altri strumenti.

La stazione totale utilizzata (modello Trimble 5603) è dotata di una accuratezza di circa 3 mm a una distanza di 200 m, mentre come GPS è stato utilizzato un Leica RTK RX1200 a tripla frequenza.

L'installazione dei capisaldi è stata necessaria per definire l'area di studio; di conseguenza, per ricavare precise misure altimetriche e coordinate spaziali di punti fissi, sono stati utilizzati stazione totale e GPS. In particolare sono stati posizionati otto picchetti in legno all'interno delle aree recintate ed oggetto di monitoraggi e due chiodi in acciaio in aree esterne e lontani dalle salse, in modo da acquisire misure anche in aree non soggette a variazioni. I capisaldi sono stati misurati più volte nel corso del periodo di monitoraggio maggio 2015 – giugno 2016 anche durante le fasi di rilievo con laser scanner e drone.

## **2.2. Rilievi eseguiti con laser scanner**

La tecnica del laser scanning rappresenta un nuovo ed efficiente metodo per la digitalizzazione e la modellazione di oggetti e di porzioni di territorio aventi qualsiasi forma e dimensione. Questa tecnica si basa sul metodo di misurazione delle distanze per mezzo di onde elettromagnetiche, anche noto con il nome LIDAR. La digitalizzazione avviene attraverso la misurazione della posizione di un elevato numero di punti.

In questo studio, per realizzare modelli tridimensionali dei principali apparati lutivomi, è stato utilizzato un laser scanner marca Leica modello HDS 7000 (Fig. 1), strumento topografico in grado di acquisire una grande quantità di dati (misure) a 360° rispetto alla sua posizione fino a una distanza maggiore di 100 m e con precisioni inferiori al centimetro in un intervallo di tempo molto ristretto (meno di 3 min per singola scansione). Inoltre è stata utilizzata una fotocamera (Nikon D7000) per ricavare fotografie panoramiche da utilizzare nel processo di colorazione dei punti ottenuti da laser scanner.

I rilievi topografici con laser scanner sono stati eseguiti in due campagne in un periodo di circa un anno (giugno 2015 – maggio 2016), realizzando 26 scansioni nella prima e 28 durante la seconda. Per ogni scansione sono state realizzate 8 fotografie (432 in totale) da cui sono state ottenute 54 panoramiche a 360°.

I dati sono stati elaborati con diversi tipi di software per modellazione tridimensionale e disegno tecnico (CAD). In primo luogo, le singole scansioni sono state importate sotto forma di nuvole di punti ed allineate utilizzando il software Leica Cyclone con cui sono stati realizzati tre modelli tridimensionali divisi a seconda delle seguenti tre aree della Riserva (Settore salsa “G-Fernando”, Settore salsa “E-Egidio”, Settori salse “A-Nando Ovest”, “B-Nando” “D-La Giunta”). Grazie alle fotografie panoramiche a 360° scattate da ogni singola stazione di scansione è stato possibile applicare *texture* corrispondenti alle nuvole di punti, ottenendo quindi modelli tridimensionali con colori reali.

I modelli ottenuti sono stati georeferenziati attraverso le coordinate GPS dei capisaldi con lo scopo di ricavare orto-foto immagini e modelli digitali del terreno, mentre altre elaborazioni con software CAD sono state eseguite per realizzare piante e sezioni in 2 e 3 dimensioni.



Fig. 1 – Il laser scanner Leica HDS 7000 in fase di acquisizione dei dati durante la prima campagna di rilievo del settore “Salsa E-Egidio” (giugno 2015).

### 2.3. Fotogrammetria aerea

La fotogrammetria è una tecnica di rilievo che consente di definire la posizione, la forma e le dimensioni degli oggetti sul terreno utilizzando informazioni ottenute tramite immagini fotografiche acquisite da diversi punti di vista (Cannarozzo *et al.*, 2009). Questa tecnica ha visto una notevole diffusione negli ultimi anni soprattutto grazie allo sviluppo dei veicoli aerei a pilotaggio remoto, meglio conosciuti come “droni”.

Il primo rilievo fotogrammetrico con drone delle tre aree delimitate della Riserva di Nirano è stato eseguito nel luglio 2015 (Fig. 2) con lo scopo di realizzare modelli tridimensionali e fotografie aeree documentative nei tre settori precedentemente descritti, mentre il secondo rilievo per ottenere dati di confronto è stato effettuato nel mese di giugno 2016.



Fig. 2 – Immagine aerea della Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano scattata durante il volo fotogrammetrico con drone del luglio 2015.

Per compiere queste operazioni è stato utilizzato un multirotores (quadricottero) in fibra di carbonio del peso di circa 1,8 kg dotato di sistema GPS e altimetro, equipaggiato con una fotocamera Canon Powershot. Tra le due campagne di rilievo sono stati eseguiti dodici voli per una durata variabile dai 15-25 min per ogni volo e da altezze inferiori ai 60 m da terra, ottenendo un buon dettaglio fotografico che ha permesso di realizzare modelli con precisioni inferiori a 12 cm.

Attraverso la misurazione di punti a terra (*marker*) con un GPS RTK a tripla frequenza (modello descritto precedentemente) è stato possibile ottenere fotografie georeferenziate al fine di realizzare modelli tridimensionali in scala reale durante la fase di *post-processing* (Fig. 3).

L'elaborazione dei dati avviene tramite l'analisi dei fotogrammi mediante l'utilizzo di software definiti di "*structure from motion*". Il risultato è dato da un modello tridimensionale sotto forma di una nuvola di punti (Fig. 4) a cui è possibile applicare riferimenti metrici per scalare correttamente il modello (Del Vecchio *et al.*, 2017).

Come per le elaborazioni dei dati acquisiti con laser scanner, anche per le nuvole di punti ottenute dal drone la fase di restituzione grafica ha portato alla realizzazione di elaborati quali orto-foto immagini e modelli digitali del terreno corrispondenti ai tre settori principali della Riserva, con risoluzioni notevolmente inferiori rispetto ai dati ottenuti con laser scanner. Tuttavia questo tipo di elaborazione può risultare molto utile per valutare variazioni morfologiche in aree medio-grandi ottenendo precisioni variabili tra 10 e 30 cm.

### 3. Elaborazione e analisi dei dati

Le campagne di rilievo eseguite hanno portato all'acquisizione di una notevole quantità di dati, diversi a seconda del tipo di strumentazione utilizzata. I dati acquisiti con stazione totale e GPS sono stati gestiti tramite fogli di calcolo elettronico in modo da realizzare un database con le misure registrate sui capisaldi. Le nuvole di punti acquisite dal laser scanner e attraverso la fotogrammetria eseguita con il drone hanno invece portato alla realizzazione di diversi modelli tridimensionali divisi in base alle tre maggiori aree presenti all'interno della Riserva su cui sono state successivamente eseguite diversi tipi di analisi.

#### 3.1. Settore Salsa "G-Fernando"

Per effettuare i monitoraggi topografici nell'area di questa salsa sono stati installati due capisaldi di riferimento ed eseguiti due rilievi con drone e laser scanner.

L'elaborazione dei dati ottenuti ha permesso di ricostruire la superficie considerata con precisioni centimetriche soprattutto attraverso le scansioni realizzate con il laser scanner.

Tramite l'analisi delle nuvole di punti ottenute è stato possibile identificare le variazioni morfologiche e altimetriche degli edifici eruttivi presenti. Questo confronto ha evidenziato un leggero spostamento in direzione N-NW della parte superiore dell'apparato principale nell'ordine di 6-8 cm.

L'analisi della pendenza della superficie ha inoltre permesso di evidenziare piccole variazioni altimetriche (inferiori a 8 cm) nella parte superiore del cono principale. Anche per quanto riguarda la vegetazione, tramite ulteriori confronti tra i rilievi eseguiti, è stato possibile valutare la variazione della presenza vegetazionale nei dintorni degli apparati vulcanici nel periodo considerato.

I dati acquisiti hanno mostrato una diminuzione della presenza di vegetazione in questo settore del campo delle salse, mentre non hanno evidenziato particolari variazioni altimetriche o spostamenti morfologici. In ogni caso queste variazioni risultano molto variabili a seconda di parametri esterni, quali precipitazioni e temperature, inoltre per effettuare un monitoraggio continuo della vegetazione sarebbe necessario eseguire rilievi a intervalli stagionali al fine di ricavare dati confrontabili anche per questi tipi di analisi.

Tramite l'analisi dei dati acquisiti e il confronto tra diverse scale di colore (RGB e scala in base al grado di riflettività registrata dallo strumento) è stato possibile identificare le diverse colate e distinguerle in base allo stato di attività.

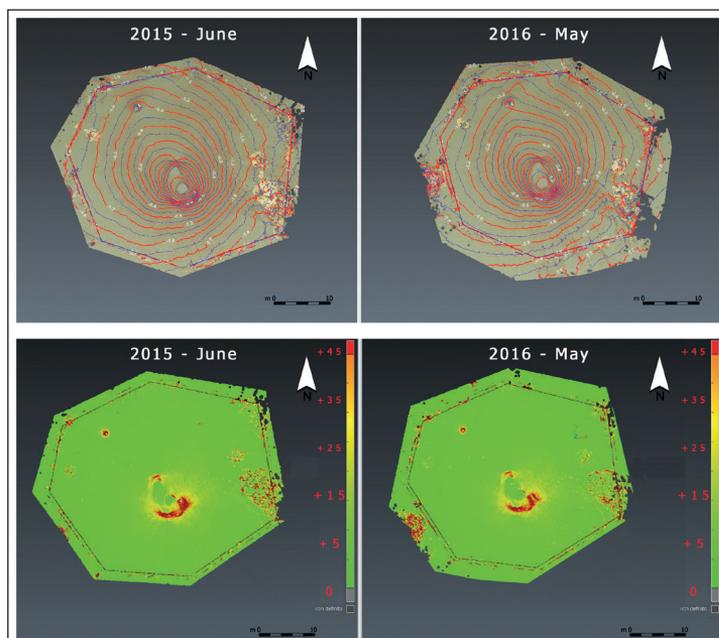


Fig. 3 – Settore Salsa “G-Fernando”. Confronto tra curve di livello con intervallo di 40 cm, indicate in rosso (figure in alto) e modelli digitali del terreno (figure in basso).

### 3.2. Settore Salsa “E-Egidio”

Questo settore, situato al centro del campo delle salse, presenta un’area di estensione delle colate superiore a 1000 m<sup>2</sup>, che risulta essere più ampia rispetto agli altri complessi a causa della maggiore pendenza del cono di fango. In questo settore è presente un apparato lutivomo principale di notevoli dimensioni (altezza superiore a 2,65 m) che risulta essere uno degli apparati più attivi della Riserva.

I risultati ottenuti dai confronti tra i rilievi 2015-16 non hanno messo in mostra variazioni significative a livello morfologico e altimetrico. Tuttavia, da un’analisi più dettagliata eseguite anche sulla rugosità delle superfici, risulta evidente una variazione della morfologia del cono principale, caratterizzato in particolare da uno spostamento in direzione N-NO della parte sommitale e una diminuzione altimetrica (10-12 cm).

La rugosità è stata confrontata considerando le differenze di elevazione e di risoluzione. Questo parametro è importante per studi di carattere morfometrico e geomorfologico e per la modellazione del processo naturale nel caso di modellazione idraulica (Rutzinger *et al.*, 2013).

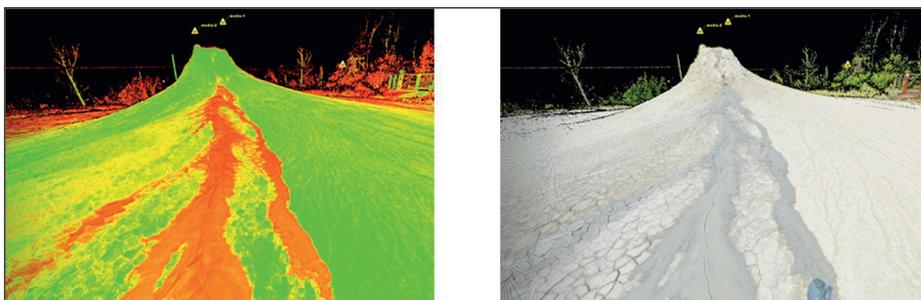


Fig. 4 – Confronto delle nuvole di punti. A) in giallo e rosso le nuvole di punti in base alla scala di riflettività; B) nuvole di punti in scala di colore RGB.

### 3.3. Settori Salse “A-Nando Ovest”, “B-Nando” “D-La Giunta”

L’area delle salse “A-Nando Ovest”, “B-Nando” “D-La Giunta” si trova a quote inferiori rispetto alle altre; localizzata in prossimità della strada principale, comprende diversi apparati estesi su un territorio di circa 3000 m<sup>2</sup>.

Per eseguire il rilievo topografico di questo settore, sono stati posizionati quattro picchetti di riferimento ed effettuate 12 scansioni durante la prima uscita (giugno 2015) e 14 per il secondo rilievo con laser scanner (maggio 2016).

Anche in quest’area sono stati effettuati confronti degli indici di rugosità ed analisi dei poligoni da disseccamento (*mud cracks*) per evidenziare variazioni morfologiche e della vegetazione in prossimità degli edifici dei vulcani di fango (Fig. 5).

Queste analisi hanno evidenziato una diminuzione dell'indice di rugosità e più in generale una contrazione dei poligoni da disseccamento considerati. Queste variazioni sono sempre da correlare a vari fattori esogeni quali soprattutto piovosità e temperatura, che incidono fortemente sui valori degli indici ottenuti e sulle deformazioni che subiscono i poligoni da disseccamento.



Fig. 5 – Tipici poligoni da disseccamento (mud cracks) nei fanghi delle salse di Nirano (foto L. Callegari).

#### 4. Conclusioni

Attraverso i rilevamenti topografici eseguiti con l'utilizzo di diverse tecnologie di rilievo è stato possibile acquisire e confrontare dati utili per valutare la sicurezza e la fruibilità delle aree della Riserva a livello geomorfologico e topografico. Sono state inoltre ricavate informazioni molto utili per sviluppare nuovi studi e monitoraggi riguardanti la distribuzione della vegetazione nell'area delle Salse di Nirano.

Come descritto in precedenza, i dati ottenuti non hanno evidenziato variazioni altimetriche significative del campo delle salse, mentre risultano evidenti variazioni morfologiche di poche decine di cm in prossimità degli apparati lutivomi principali che, in considerazione dei fenomeni esogeni che li modellano, risultano tuttavia rientrare nella normalità.

Per quanto riguarda i fenomeni geologici di questo tipo, la documentazione acquisita grazie a strumenti come laser scanner e veicoli aerei non ha prece-

denti nella Riserva e rappresenta quindi una risorsa molto importante per futuri studi e monitoraggi.

Elaborati tecnici, modelli tridimensionali e fotografie aeree realizzate con l'utilizzo del drone costituiscono una serie di informazioni utili per descrivere e analizzare dettagliatamente l'attività delle Salse di Nirano nel periodo di studio (giugno 2015 – maggio 2016). Considerando la brevità del periodo in cui è stato effettuato il rilevamento topografico (circa 1 anno), i dati acquisiti rappresentano essenzialmente un'ottima base di partenza per ulteriori monitoraggi e confronti da eseguirsi nei prossimi anni al fine di controllare le variazioni morfologiche e topografiche ad una scala temporale più consona.

### ***Ringraziamenti***

*Gli autori ringraziano il Prof. Diego Arosio per la revisione del manoscritto.*



Alessandra Sciarra\*§, Barbara Cantucci\*,  
Marzia Conventi\*\*, Tullio Ricci\*

## Caratterizzazione geochemica e monitoraggio dei flussi e delle componenti gassose nella Riserva delle Salse di Nirano

### Riassunto

*I vulcani di fango della Riserva Naturale delle Salse di Nirano, localizzata nel settore occidentale dell'Appennino modenese, rappresentano uno degli esempi meglio sviluppati di tutto il territorio italiano e tra i più grandi d'Europa. Un'estesa prospezione geochemica dei gas nei suoli ( $CO_2$ ,  $CH_4$ , Rn, He,  $H_2$  e idrocarburi leggeri) è stata effettuata al fine di identificare settori ad elevata permeabilità potenzialmente associati a vie preferenziali di risalita, quali sistemi di faglie e/o fratture. Sulla base dei dati ottenuti, è stata stimata la quantità di gas che fuoriesce in atmosfera attraverso il calcolo dei flussi di  $CO_2$  e di  $CH_4$ . È stata infine determinata la composizione chimica e isotopica del gas libero emesso dagli apparati attivi, situati in diversi settori della Riserva Naturale delle Salse di Nirano, per discriminarne l'origine. Il degassamento dal suolo ha evidenziato due zone con valori di concentrazione e di flusso elevati, localizzate nel settore sud-ovest e nord-est della Riserva. In particolare, la zona nord-est è quella dove l'attività delle salse è più recente (Ca' Rossa). Questo suggerisce la presenza di zone a maggiore permeabilità e/o caratterizzate da sistemi di fratturazione. Il gas libero,  $CH_4$  dominante, mostra un'origine termogenica legata alla risalita dei fluidi dal serbatoio profondo. Questo studio dimostra che la tecnica dei gas nei suoli, attraverso un monitoraggio temporale, può essere in grado di determinare aree a maggior permeabilità dove è più facile si verifichino nuove emissioni.*

### Abstract

*Geochemical characterisation and monitoring of fluxes and gaseous components in the Reserve of Nirano Mud Volcanoes. The Nirano Mud Volcano Nature Reserve, located in the western sector of the Modena Apennines (Italy), is one of the best-developed mud-volcano phenomena in Italy and among the largest in Europe. For the first time, an extensive geochemical soil gas survey ( $CO_2$ ,  $CH_4$ , Rn, He,  $H_2$ , and light hydrocarbons) was carried out in this area, with the aim of identifying enhanced permeability sectors possibly linked to preferential leakage pathways, such as fault and/or joint systems. Moreover, the micro- and macro-seepage budget for both  $CO_2$  and  $CH_4$  fluxes was also estimated. Finally, chemical and isotopic composition of free gas released from active apparatuses located in different sectors of the study area was detected in order to identify fluid origin. Soil*

---

\* Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Sezione di Roma 1, Via di Vigna Murata 605, 00143 ROMA; e-mail: [alessandra.sciarra@ingv.it](mailto:alessandra.sciarra@ingv.it).

§ Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria, Via Salaria 300, 00015 MONTEROTONDO (RM).

\*\* Responsabile Ufficio Ambiente e Direzione della Riserva Naturale delle Salse di Nirano, Via Vittorio Veneto 27/A, 41042 FIORANO MODENESE (MO); e-mail: [mconventi@comune.fiorano-modenese.mo.it](mailto:mconventi@comune.fiorano-modenese.mo.it).

degassing highlights two zones characterised by high concentration and flux values, localised in the SW and NE of the area. In particular, in the latter sector (Ca' Rossa), mud emission activity is more recent, thus suggesting the presence of a more permeable and fractured zone. CH<sub>4</sub>-dominated free gas shows thermogenic origin, linked to fluid uprising from the deep reservoir. This study demonstrates that soil gas monitoring allows areas of high permeability, potentially able to create new emission points, to be identified.

**Parole chiave:** *Prospezione dei gas nei suoli, flussi di CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>, stima del degassamento, Salse di Nirano.*

**Key words:** *Soil gas survey, CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> fluxes, output, Nirano mud volcanoes, Italy.*

## 1. Introduzione

La presenza di vulcani di fango nell'area di Fiorano Modenese è nota fin dall'antichità ed è stata oggetto di numerose indagini da parte di studiosi, storici (Stoppani, 1873; Coppi, 1875; Pantanelli & Santi, 1896; Biasutti, 1907; Barbieri, 1947; Mucchi, 1966, 1968) e scienziati appartenenti a diverse discipline, come: i) mineralogia (Ferrari & Vianello, 1985); ii) vulcanismo sedimentario correlato all'attività tettonica (Gorgoni *et al.*, 1988; Gorgoni, 2003; Bonini 2008a, 2009, 2012; Manga & Bonini, 2012; Lupi *et al.*, 2016); iii) geologia e geomorfologia (Bonazzi & Tosatti, 1999; Castaldini *et al.*, 2003, 2007, 2011, 2017a; Castaldini & Coratza, 2017); iv) microbiologia (Heller *et al.*, 2011, 2012; Kokoschka *et al.*, 2015), contribuendo a creare un'importante documentazione sulla loro formazione ed evoluzione.

Da un punto di vista geochimico gli studi effettuati hanno evidenziato che il gas emesso dagli apparati lutivomi è costituito principalmente da metano con minore quantità di altri idrocarburi leggeri (20 differenti composti ciclici), anidride carbonica e azoto (cfr. Etiope *et al.*, 2007; Tassi *et al.*, 2012). La composizione isotopica del metano suggerisce un'origine termogenica ( $\delta^{13}\text{C} = -46\%$ ,  $\delta\text{D} = -186\%$ ). Studi relativi al degassamento (Etiope *et al.*, 2007) hanno inoltre stimato la quantità di metano che viene emessa in atmosfera. D'altra parte, nessuno di questi studi ha investigato la distribuzione dei gas nei suoli in relazione a possibili discontinuità tettoniche. La geochimica dei gas nei suoli è una tecnica ampiamente accettata per definire la migrazione dei gas e identificare vie preferenziali di risalita lungo sistemi di faglia e fratture. Questo metodo si rivela affidabile soprattutto in aree caratterizzate da spesse coperture argillose (cfr. Baubron *et al.*, 2002; Ciotoli *et al.*, 1998, 1999, 2005; Quattrocchi *et al.*, 2012; Sciarra *et al.*, 2015; Ciotoli *et al.*, 2016).

L'obiettivo di questo studio è quello di discriminare i processi di migrazione delle varie specie gassose e quantificare i flussi di esalazione di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>) dai suoli e dagli apparati lutivomi attivi.

Per raggiungere questo obiettivo il lavoro è stato svolto nel corso di varie campagne tra maggio 2015 e marzo 2016, effettuando 227 misure di flusso dal suolo di anidride carbonica e metano con misure ogni 20 m, 148 misure di concentrazione del gas nel suolo e 5 campionamenti di fluidi dai conetti caratterizzati da emissioni più significative. In questi ultimi campioni sono state eseguite analisi chimiche e isotopiche delle fasi gassose.

## 2. Metodologia

### 2.1. Gas del suolo

La prospezione dei gas del suolo consiste nella raccolta di campioni di gas dalla zona non satura per misurare la concentrazione delle specie gassose che permeano i pori del suolo. La tipologia di campionamento e analisi utilizzata si basa sulla metodologia proposta negli anni '70 del secolo scorso dall'U.S. Geological Survey (Roberts *et al.*, 1975; Brady & Rice, 1977; Reimer, 1980, 1990) e successivamente utilizzata anche in Italia (Lombardi *et al.*, 1984; Ciotoli *et al.*, 1998, 1999, 2007; Voltattorni *et al.*, 2009; Sciarra *et al.*, 2012, 2013, 2015).

Il gas presente nei pori interstiziali del suolo viene raccolto per mezzo di una sonda portatile (lunga circa 70 cm) alla cui estremità superiore viene collegato un setto in gomma impermeabile al gas che consente di chiudere ermeticamente tale estremità e, contemporaneamente, di aspirare i gas contenuti nella sonda mediante l'uso di una siringa con ago ipodermico. L'estremità inferiore della sonda è dotata di una serie di piccoli fori (circa 1 mm di diametro) che permettono il passaggio del gas al suo interno.

La sonda viene infissa nel terreno a una profondità di circa 70 cm mediante l'azione di un martello; con una siringa in plastica da 60 cc viene quindi aspirata l'aria contenuta nel suolo. Dopo una preliminare rimozione dell'aria atmosferica contenuta nella sonda stessa, viene aspirato un campione da 60 ml di gas. Il campione viene iniettato e conservato per le analisi di laboratorio in un apposito campionatore (dove è stato preventivamente generato un vuoto di circa  $10^{-2}$  mbar) costituito da un cilindro di acciaio e da una valvola a tenuta di gas (Swagelok®).

La profondità di infissione della sonda di campionamento è determinata principalmente da due fattori: la profondità della frangia capillare e la profondità fino a cui si risente dell'influenza dell'aria atmosferica. Nel presente studio la sonda è stata infissa nel terreno a una profondità compresa tra 70 e 100 cm, a seconda della consistenza del terreno e spessore; questa profondità è considerato al di sotto della maggiore influenza delle variabili meteorologiche (Hinkle, 1994; Segovia *et al.*, 1987; Fig. 1).

Alla sonda viene in seguito collegato uno spettrometro alfa RAD7 DurrIDGE® per misurare radon e thoron (Angelone *et al.*, 2004). Tale strumento è costituito da una camera elettrostatica avente un volume sensibile di 0,7 l ed

è dotato di un rivelatore a stato solido. Radon e thoron vengono immessi nello strumento per mezzo di una pompa a membrana da 1 l/min. Il decadimento del radon e del thoron genera isotopi del polonio caricati positivamente che vengono raccolti sulla superficie sensibile del rivelatore per l'azione del campo elettrico. La misura consiste in un tempo minimo di 15 min, in quanto il radonometro registra ogni 5 min le particelle alfa emesse dal decadimento del  $^{218}\text{Po}$  e del  $^{216}\text{Po}$  e dei loro figli, e soltanto alla terza misura si può considerare attendibile il valore registrato dallo strumento, avendo pulito il sistema con le misure precedenti. La minima attività rivelabile dal radonometro è di  $500 \text{ Bq/m}^3$ .

La corretta risposta dello strumento è garantita dal mantenimento del livello di umidità al di sotto del 10% attraverso l'impiego di sostanze essiccanti (drierite).

La strumentazione portatile e i tempi di misura contenuti permettono di investigare aree abbastanza vaste, con la densità di campionamento voluta, in tempi relativamente brevi.

Le successive analisi di laboratorio (concentrazione delle seguenti specie gassose: He, Ne, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CO<sub>2</sub>) sono state effettuate tramite gascromatografo CP 4900 della Varian. Tale strumento, in grado di effettuare analisi chimiche quantitative di gas liberi, è configurato per l'utilizzo di He o Ar come *carrier gas*, ed è equipaggiato con due colonne capillari che lavorano in serie. Il campione viene prelevato dalle bombolette porta-campione e iniettato nello strumento tramite una pompa dove viene inviato contemporaneamente alle due colonne. Attraverso le colonne, i differenti gas della miscela vengono separati e inviati in tempi diversi all'analizzatore (*Thermal Conductivity Detector*) che risponde alle differenze in conducibilità termica fra il *carrier* e il gas in questione.

La concentrazione del gas è stabilita sulla base di miscele di gas standard, con concentrazioni delle varie specie variabili fra pochi parti per milione (ppm) e il 100%.

## 2.2. Metodologia di campionamento geochimico dei flussi

Le misure di flusso di CO<sub>2</sub> e di CH<sub>4</sub> dal suolo ( $\phi\text{CO}_2$  e  $\phi\text{CH}_4$ ) sono state eseguite con il metodo speditivo della "camera di accumulo" (Chiodini *et al.*, 1995, 1998, 2000; Norman *et al.*, 1997; Rogie *et al.*, 2000; Brombach *et al.*, 2001; Cardellini *et al.*, 2003). Nello strumento viene azionata una ventola posta all'interno della camera d'accumulo, si posiziona la camera sul terreno e, tramite una pompa, si crea una circolazione di aria tra la camera stessa e un sensore IRGA (*Infra-Red Gas Analyzer*) esterno. L'aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub> (o del metano) in funzione del tempo, è proporzionale al flusso di CO<sub>2</sub> (o di metano) moltiplicato per un fattore di calibrazione dato dal volume e dall'area circolare della camera, dalla temperatura e dalla pressione atmosferica. Questo permette di passare dall'*output* dello strumento (ppm/s) all'unità fisica (g/m<sup>2</sup> giorno).

Tale metodo assicura una bassa velocità di *mixing* con l'atmosfera, un equilibrio di pressione tra l'esterno e l'interno della camera di accumulo e la misura in tempo reale con memorizzazione del dato su palmare portatile. Per misurare il flusso di anidride carbonica viene utilizzato un sensore portatile Li-COR® (modello LI820) sufficientemente sensibile (limite di detenzione 5 g/m<sup>2</sup> giorno) e per il metano un sensore West System™ (WS-CH4-TLD) con sensibilità 0,5 mmol/m<sup>2</sup> giorno (8 mg/m<sup>2</sup> giorno). L'errore causato dall'interferenza del segnale dell'acqua (generato dall'umidità normalmente eliminata con un essiccante di perclorato di magnesio) è stato valutato come minore dell'1%. Il metodo usato è in linea di principio non dipendente dalle proprietà fisiche del suolo e permette di ottenere una misura sufficientemente precisa e speditiva (da pochi s a 5 min) del flusso di CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> dal suolo.

L'incremento di concentrazione nel tempo registrato all'interno della camera di accumulo, unitamente ad altri parametri quali volume e superficie della camera, permettono di calcolare il flusso della CO<sub>2</sub> dal terreno mediante l'equazione di Hutchinson & Livingstone:

$$F = (C_1 - C_0) / T * (V/A)$$

dove  $C_1$  = concentrazione di CO<sub>2</sub> o CH<sub>4</sub> alla fine della misura;  
 $C_0$  = concentrazione di CO<sub>2</sub> o CH<sub>4</sub> all'inizio della misura;  
 T = tempo di misura;  
 V = volume della camera;  
 A = area della camera.

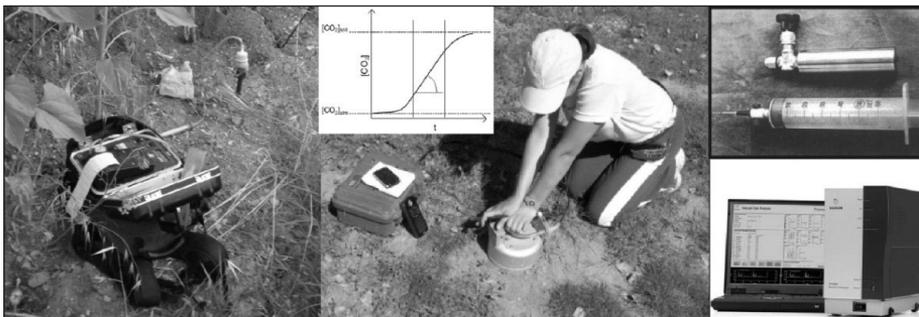


Fig. 1 – Immagini esplicative della strumentazione utilizzata nel corso delle campagne geochimiche (da sinistra verso destra): radonometro usato per effettuare misure di concentrazione di radon nei suoli (esprese in Bq/m<sup>3</sup>); spettrometro IR connesso alla camera d'accumulo per effettuare le misure dei flussi di CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> (esprese in ppm/s) ed esempio di curva di accumulo di gas nel tempo; campionatori in acciaio inox in cui viene stoccato il gas estratto dal suolo e siringa connessa al rubinetto a tenuta per evitare contaminazione atmosferica durante il campionamento del gas stesso; gascromatografo (micro GC 4900) utilizzato per effettuare le analisi chimiche dei gas in laboratorio.

### 2.3. Gas libero

La tecnica di campionamento del gas libero consiste nel prelevare e stoccare i gas che fuoriescono naturalmente dai coni tramite un imbuto, che viene collegato ad un campionatore di vetro a doppio rubinetto (Fig. 2). L'imbuto viene posto sul punto di emissione in superficie del gas ed è collegato tramite un tubo in silicone al campionatore in vetro, il quale a sua volta è connesso a un altro tubo che viene immerso in acqua. Il passaggio del gas attraverso il sistema produce gorgogliamento attraverso cui è possibile verificare la chiusura del sistema. Dopo avere verificato che ci sia un flusso tra il gas che fuoriesce dal suolo e il sistema di estrazione del gas, il sistema viene chiuso e il gas viene intrappolato nel campionatore di vetro per le successive analisi gascromatografiche e isotopiche.

Le analisi isotopiche ( $\delta^{13}\text{C-TDIC}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ,  $^3\text{He}/^4\text{He}$ ) sono state effettuate con metodi spettrometrici.



Fig. 2 – Immagine della tecnica utilizzata nel campionamento del gas libero presso la salsa “D-La Giunta”.

## 3. Risultati

### 3.1. Analisi statistiche dei gas nei suoli e dei flussi

Sono state effettuate 227 misure di flusso di gas dal suolo e 148 misure di concentrazione dei gas nei suoli, su di un'area di 78.742 m<sup>2</sup>. In Tab. 1 sono mostrati i principali parametri statistici dei dati analizzati nel corso delle prospezioni geochimiche alle Salse di Nirano, in cui sono stati omessi i valori di concentrazione dell'ossigeno e dell'azoto, in quanto le loro concentrazioni rientrano nella composizione tipica dell'atmosfera (rispettivamente 20,95% e 78,08%; Hermansson *et al.*, 1991; Etiopia, 1995).

Tra le specie gassose analizzate quelle che hanno fornito i risultati più interessanti sono l'elio (He), il neon (Ne), l'idrogeno (H<sub>2</sub>), il radon (Rn), l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e il metano (CH<sub>4</sub>). In Tab. 1 sono riportate anche le misure di flusso di CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>.

I principali parametri statistici del flusso di metano, della concentrazione di metano e di radon, e in minor misura del flusso di anidride carbonica (Tab. 1), mostrano una distribuzione dei dati molto ampia, come evidenziato dagli elevati valori della deviazione standard. D'altra parte, il flusso di CO<sub>2</sub>, il Rn e le concentrazioni di CH<sub>4</sub> mostrano una vasta gamma di valori ma sono associati ad alti valori di asimmetria, indicanti la presenza di *outliers*<sup>1</sup>. Nel caso del flusso di metano, invece, si ha un valore di asimmetria che indica una netta dispersione dei dati, con i valori più elevati che possono essere considerati anomali. Lo stesso discorso, anche se in misura minore, vale per l'elio e per l'idrogeno.

	φCO <sub>2</sub> (g/m <sup>2</sup> giorno)	φCH <sub>4</sub> (mg/ m <sup>2</sup> giorno)	He (ppmv/v)	Ne (ppmv/v)	H <sub>2</sub> (ppmv/v)	CH <sub>4</sub> (ppmv/v)	CO <sub>2</sub> (%v/v)	<sup>222</sup> Rn (Bq/m <sup>3</sup> )
<b>N° campioni</b>	227	227	148	148	148	148	148	148
<b>Media</b>	17,9	220,9	5,83	13,3	2,7	290,9	0,92	3362
<b>Mediana</b>	16,68	0,01	5,5	13,8	1,4	21,4	0,78	838
<b>Minimo</b>	0,00	-7,27	2,8	2,85	0,08	0,44	0,04	0,00
<b>Massimo</b>	91,41	3208,5	17,9	26,9	38,8	6212,1	5,5	28800
<b>Quartile inferiore</b>	9,33	0,003	5,2	12,4	0,9	4,6	0,3	202
<b>Quartile superiore</b>	22,7	0,028	6,3	15,3	2,7	355,8	1,1	2625
<b>Varianza</b>	165	6489667	1	19	20	389744	1	37519204
<b>Deviazione Standard</b>	12,9	2547,5	0,9	4,3	4,5	624,3	0,86	6125,3
<b>Asimmetria</b>	2,15	13,55	4,84	-0,16	5,48	3,86	2,58	2,66

Tab. 1 – Principali parametri statistici relativi ai flussi di CO<sub>2</sub> e di CH<sub>4</sub> ed alle concentrazioni di He, Ne, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> e Rn alle Salse di Nirano.

<sup>1</sup> *Outlier* è un termine utilizzato in statistica per definire, in un insieme di osservazioni, un valore anomalo chiaramente distante dal resto dei dati disponibili.

### 3.2. I gas nel suolo

Le misure dei gas dei suoli sono di norma effettuate nella stagione estiva, perché rispetta le condizioni ideali per campionare, con temperatura e pressione atmosferica pressoché costanti. La stagione invernale, invece, non risulta favorevole, a causa delle basse temperature, delle abbondanti piogge, del possibile gelo e del conseguente stato di saturazione del suolo, che a sua volta influenza la permeabilità ai gas del suolo e rende incerta l'interpretazione dei dati.

Le misure di concentrazione dei gas nel suolo sono state trattate da un punto di vista statistico, tramite i diagrammi di probabilità cumulata (*Normal Probability Plot*, NPP) utilizzati per distinguere le diverse popolazioni secondo il metodo di Sinclair (1974, 1991). Il diagramma normale di probabilità è un diagramma di frequenza cumulata che solitamente è utilizzato per verificare di quanto la distribuzione dei dati si discosta da quella Gaussiana. Viene usato soprattutto per distinguere diversi segmenti o sub-popolazioni, corrispondenti in sostanza a differenti processi di trasporto di geogas verso la superficie (Chiodini *et al.*, 1995, 1998, 2000; Ciotoli *et al.*, 1998, 1999; Brown, 2000; Rogie *et al.*, 2000; Brombach *et al.*, 2001; Chiodini & Frondini, 2001; Annunziatellis *et al.*, 2003; Cardellini *et al.*, 2003; Voltattorni *et al.*, 2009; Sciarra *et al.*, 2015).

In particolare la curva costruita evidenzia, tramite flessi e/o *gap*, dei segmenti che rappresentano le diverse classi nelle quali i valori di flusso e concentrazione dei gas del suolo possono essere suddivisi rispettivamente in: tenore di fondo (*background*), anomalie, forti anomalie e *outliers*. Tali classi di anomalie sono associabili a un differente mezzo/processo di trasporto a seconda del contesto geologico, idrogeologico e geochimico dell'area oggetto di studio.

I dati ottenuti sono usualmente rappresentati attraverso mappe di localizzazione o mappe a curve di livello, in cui vengono definiti il *background* e la soglia di anomalia.

Il grafico di probabilità cumulata della CO<sub>2</sub> (Fig. 3a), mostra una curva di distribuzione dei dati caratterizzata da una prima classe di valori che variano da 0 a 0,5% (*background*), una seconda classe di popolazione compresa tra 0,5 e 1% (soglia di anomalia), una terza classe tra 1 e 2% (anomalie locali), una quarta classe con un andamento pressoché lineare fino al 4% (valori anomali) e l'ultima classe di popolazione caratterizzata da valori compresi tra 5 e 6% (valori fortemente anomali).

Il grafico di probabilità cumulata dell'idrogeno (Fig. 3b) evidenzia invece una distribuzione meno gaussiana dei dati, passando da una prima classe di popolazione compresa tra 0 e 5 ppm (*background*), una seconda tra 5 e 10 ppm (soglia di anomalia) e poi un grosso salto con valori direttamente maggiori di 25 ppm (valori anomali).

Per quanto riguarda il grafico del metano (Fig. 3c) è possibile notare la presenza di diverse popolazioni, con la prima compresa tra i valori minimi e i 40

ppm (soglia di anomalia) e le altre classi comprese tra i valori di 40 ppm (anomalie locali) e >2000 ppm (*outliers*).

Il grafico di probabilità cumulata relativo al radon (Fig. 3d) evidenzia una distribuzione dei dati simile a quella del metano, con una prima popolazione compresa tra 0 e 2500 Bq/m<sup>3</sup> (soglia di anomalia), la seconda tra 2500 e 8000 Bq/m<sup>3</sup> (anomalie locali), la terza tra 8000 e 18.000 Bq/m<sup>3</sup> (deboli anomalie) e la quarta caratterizzata da valori superiori a 25.000 Bq/m<sup>3</sup> (valori anomali).

Il grafico relativo all'elio (Fig. 3e) mostra una prima classe di popolazione compresa tra 2 e 5 ppm (anomalie negative locali), la seconda una classe tra 5 e 5,5 (soglia di anomalia), la terza tra 5,5 e 6,5 (anomalie locali), la quarta tra 6,5 e 8 ppm (valori debolmente anomali), e la quinta costituita da valori maggiori di 9 ppm (valori anomali). Va comunque detto che prendendo come riferimento il valore di elio naturalmente presente nell'atmosfera, pari a 5,2 ppm, i valori che eccedono tale concentrazione sono considerati anomali.

Il grafico relativo al neon (Fig. 3f) ha un andamento meno lineare, con soglia di anomalia che sembrerebbe essere posta a circa 10 ppm, ma anche in questo caso considerando che la concentrazione naturalmente presente nell'aria è circa 18 ppm, il valore di soglia viene quindi stabilito in corrispondenza di tale valore.

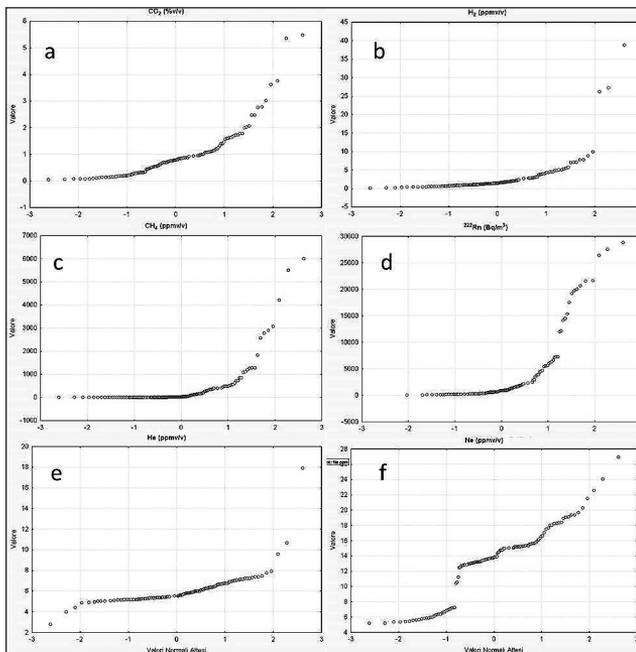


Fig. 3 – Diagrammi di probabilità cumulata relativi ai valori di concentrazione di CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, Rn, He e Ne.

I principali parametri statistici di Rn, CO<sub>2</sub>, He e CH<sub>4</sub> campionati e analizzati nell'area delle Salse di Nirano sono stati messi a confronto con il *database* del laboratorio di Geochimica dei Fluidi dell'Università di Roma Sapienza (Ciotoli *et al.*, 2007 per il radon; Annunziatellis *et al.*, 2008, per le altre specie gassose) al fine di avere dei termini di paragone per le specie maggiormente significative. Le concentrazioni di radon e CO<sub>2</sub> mostrano valori di media e mediana più bassi rispetto ai valori del *database* italiano, per l'elio sono appena inferiori ai valori medi nazionali, mentre quelli relativi al metano sono nettamente maggiori (Tab. 2). I valori di Rn per la zona di studio hanno infatti una media di 3362 Bq/m<sup>3</sup> contro i 19.100 Bq/m<sup>3</sup> dei bacini di avanfossa, quelli di CO<sub>2</sub> a Nirano hanno dei valori medi pari a 0,92% mentre sul territorio italiano sono circa 1,93 %. I valori di concentrazione di CH<sub>4</sub> hanno invece un valore medio pari a 290 ppm e mediana pari a 21,4 ppm, mentre i valori a scala nazionale mostrano una media pari a 14,65 ppm e mediana pari a 1,83 ppm. L'elio evidenzia un lieve incremento dei dati a Nirano, passando da 5,48 ppm sul territorio nazionale, a 5,83 ppm.

Considerando che il radon è generalmente utilizzato come un gas tracciante al fine di avere un'idea qualitativa del processo di trasporto del gas verso la superficie, che la CO<sub>2</sub> e il CH<sub>4</sub> agiscono come *carrier* per altri gas (quali Rn e He), che l'elio e l'idrogeno vengono usati come segnali superficiali delle emissioni crostali lungo dei sistemi di faglia (King *et al.*, 1993; Ciotoli *et al.*, 2005; Lombardi & Voltattorni, 2010; Voltattorni *et al.*, 2012, 2014; Sciarra *et al.*, 2015), si ritiene che nel caso delle Salse di Nirano il metano agisca come un tracciante di discontinuità tettonica e non soltanto come indicatore biogenico di depositi di materia organica.

Nirano	N	Media	Mediana	Min	Max	Deviaz. std	Database Sapienza	N	Media	Mediana	Min	Max	Deviaz. std
CO <sub>2</sub> (%v/v)	148	0,92	0,78	0,04	5,5	0,86	CO <sub>2</sub> (%v/v)	16301	1,93	0,83	0,03	100	6,09
CH <sub>4</sub> (ppmv/v)	148	290,9	21,4	0,44	6212,1	624,3	CH <sub>4</sub> (ppmv/v)	11945	14,65	1,83	0,01	19396,14	263,10
He (ppmv/v)	148	5,83	5,5	2,8	17,9	0,9	He (ppmv/v)	38060	5,48	5,31	1,20	315,22	2,95
Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	148	3362	838	0	28800	2,66	Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	2359	19100	12900	370	241200	22900

Tab. 2 – Confronto con i principali parametri statistici dei gas nei suoli collezionati a Nirano, con i valori di CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, He misurati in differenti scenari geologici sul territorio italiano (Annunziatellis *et al.*, 2008) e i valori di Rn misurati nei bacini di avanfossa (Ciotoli *et al.*, 2007).

Sulla base della classificazione degli NPP dei valori misurati per le concentrazioni delle varie specie gassose (<sup>222</sup>Rn, He, Ne, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) sono state costruite le mappe 3D di isoconcentrazione (Fig. 4). In Fig. 4a è riportata l'area oggetto di indagine e i conetti campionati (1-5).

Dalla mappa dei valori della  $\text{CO}_2$  (Fig. 4b), elaborata sulla base delle varie campagne di prospezione geochimica, si può notare la presenza di un settore con valori elevati (>2% in volume) localizzata ad est della zona di studio, tra la fine della recinzione della Riserva e Ca' Rossa. Sono inoltre visibili dei punti caratterizzati da valori debolmente anomali nella parte limitrofa al laghetto.

Nella mappa del Rn (Fig. 4c) sono evidenti due zone con valori anomali (>14000 Bq/m<sup>3</sup>). La prima, posizionata ad est della zona di studio tra la fine della recinzione e Ca' Rossa; la seconda, localizzata nella parte occidentale dell'area esaminata, si estende nel settore ovest del laghetto e a sud della Salsa Alta.

Dalla mappa del  $\text{CH}_4$  (Fig. 4d) si può notare invece, come questo gas sia presente in concentrazioni elevate (forti anomalie >2000 ppm) nel settore centro-orientale dell'area di studio e a Ca' Rossa. Va ricordato che i valori di concentrazione del metano riscontrati nell'area esaminata sono di un ordine di grandezza maggiore dei valori medi in Italia (Annunziatellis *et al.*, 2008).

La mappa relativa all'elio (Fig. 4e) evidenzia un andamento molto simile a quello del metano con la parte caratterizzata dai valori più elevati nel settore nord-est e a Ca' Rossa.

Nella mappa dell'idrogeno (Fig. 4f) si può notare la presenza di valori anomali (>16 ppm) distribuiti in maniera puntuale, con la presenza di tre punti di *outliers* localizzati nel settore est, ovest e a nord-est. Questi punti anomali sono confrontabili con le zone in cui sono presenti anche anomalie delle altre specie gassose.

La mappa del neon (Fig. 4g) evidenzia degli allineamenti preferenziali che ricadono nella fascia compresa tra i conetti principali della parte est e nel settore nord-occidentale. La distribuzione del neon è importante perché è indicativa dei percorsi di circolazione dei fluidi più superficiali.

La distribuzione spaziale relativa ai valori anomali di  $\text{CO}_2$ , Rn,  $\text{CH}_4$ , He e  $\text{H}_2$  evidenzia una buona correlazione nei settori est ed ovest dell'area studiata. La caratteristica sovrapposizione di più specie gassose supporta la teoria che i gas maggiori, in questo caso  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ , agiscano da *carrier* per i gas in traccia come Rn, He e  $\text{H}_2$  (Beaubien *et al.*, 2003b; Sciarra *et al.*, 2013, 2015). La presenza di *outliers* (specialmente  $\text{CH}_4$ , ma anche  $\text{H}_2$ , Rn e  $\text{CO}_2$ ) indica una via di fuga collegata con gli strati più profondi, probabilmente connessi alla presenza di vie preferenziali di risalita dei gas, come un sistema di fratturazione e/o fagliazione.

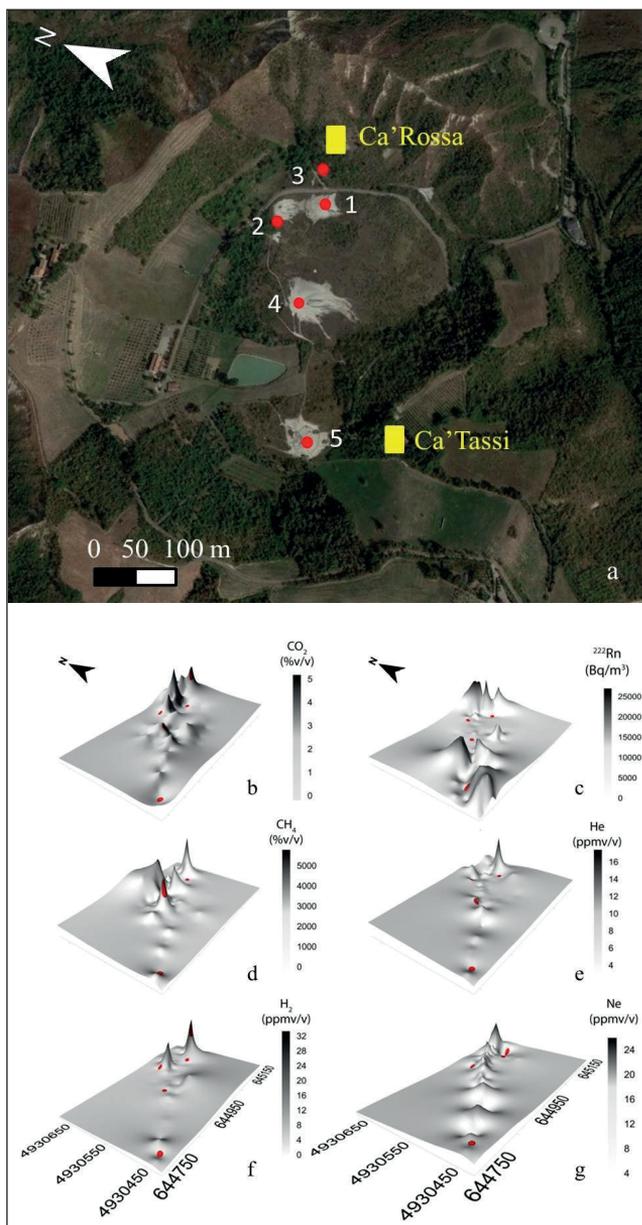


Fig. 4 – a) Immagine delle Salse di Nirano con la localizzazione degli apparati litivomi principali; mappe 3D di isoconcentrazione per le seguenti specie gassose: b) CO<sub>2</sub>; c) <sup>222</sup>Rn; d) CH<sub>4</sub>; e) He; f) H<sub>2</sub>; g) Ne. I punti rossi rappresentano le salse principali (Datum UTM-WGS84).

### 3.3. Degassamento diffuso dal suolo

Sono state effettuate 209 misure di flusso di  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  dal suolo, su un'area di  $78.742 \text{ m}^2$ . Al fine di determinare i valori di *background* dell'area sono state effettuate 18 misure di flusso al di fuori della parte caratterizzata dalla presenza dei vulcani di fango.

Le misure di flusso di  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  dal suolo sono state trattate da un punto di vista statistico, tramite i diagrammi di probabilità cumulata (NPP), per distinguere le diverse popolazioni, così come per i gas nel suolo, e ottenere una stima della quantità totale di gas che viene rilasciato direttamente dal suolo (*output*) dell'area investigata.

#### 3.3.1. Elaborazione statistica e grafica del flusso di $\text{CO}_2$

L'analisi statistica eseguita dal NPP del  $\phi\text{CO}_2$  (Fig. 5) evidenzia la presenza di diverse popolazioni, in particolare, la prima compresa tra 0 e  $20 \text{ g/m}^2$  giorno definisce il *background*, l'ultima con valori superiori a  $80 \text{ g/m}^2$  giorno (valori fortemente anomali).

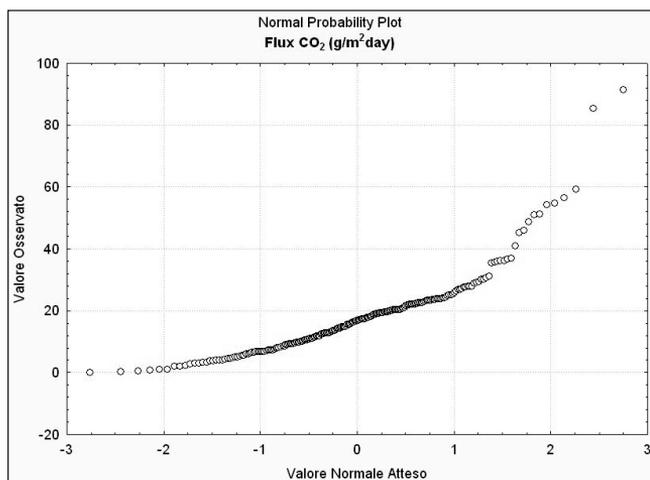


Fig. 5 – Grafico di Probabilità Cumulata relativo al flusso di  $\text{CO}_2$ .

La mappa 3D del flusso di  $\text{CO}_2$  (Fig. 6), evidenzia la presenza di due aree anomale localizzate nel settore est (in corrispondenza della parte nord-ovest di Ca' Rossa) ed ovest (ad ovest della Salsa "G - Fernando") e una terza area anomala caratterizzata dalla presenza di due *outliers* nella parte centrale (in corrispondenza del laghetto e di una scarpata morfologica). Le misure di flusso, eseguite al di fuori della zona caratterizzata dalla presenza dei vulcani di fango sono caratterizzate da valori compresi tra 4 e  $20,22 \text{ g/m}^2$  giorno, quindi ricadenti pienamente all'interno dei valori di *background* dell'area.

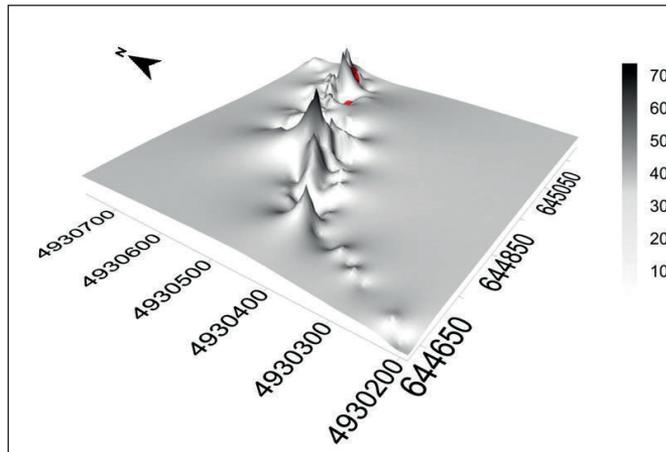


Fig. 6 – Mappa di distribuzione del flusso di  $\text{CO}_2$ , espresso in  $\text{g/m}^2$  giorno. I punti rossi rappresentano le saline principali (Datum UTM-WGS84).

I valori di flusso di  $\text{CO}_2$  dal suolo evidenziano valori relativamente bassi e nel range tipico della respirazione del suolo di una pianura coltivata (Baldocchi & Meyers, 1991; Norman *et al.*, 1992; Klusman, 1993; Kicklighter *et al.*, 1994; Conen & Smith, 2000; Beaubien *et al.*, 2003a; Jones *et al.*, 2003, 2005; Strutt *et al.*, 2003, 2004). La media dei valori misurati (circa  $16 \text{ g/m}^2\text{giorno}$ ) non è molto differente rispetto a quella riscontrata in generale nei suoli del territorio italiano ( $<100 \text{ g/m}^2\text{giorno}$ ; Chiodini *et al.*, 1995, 1998, 2000), e simile alla media dei flussi giornalieri del suolo forestale europeo e nord-americano ( $10\text{-}25 \text{ g/m}^2\text{giorno}$ ; Baldocchi & Meyers, 1991).

In accordo con l'equazione proposta da Chiodini & Frondini (2001), i risultati delle misure di flusso sono state usate per valutare la quantità totale di gas che viene rilasciato direttamente dal suolo. Considerando l'area effettivamente campionata,  $A_{\text{tot}} = 0,0787 \text{ km}^2$ , il budget totale emesso di  $\text{CO}_2$  è pari a:

$$\Phi\text{CO}_2 = 299,3 \text{ t/anno} = 3801,06 \text{ t/km}^2 \text{ anno}$$

È necessario ricordare che nel calcolo del bilancio totale del flusso di  $\text{CO}_2$  non viene considerata l'aliquota dovuta alla componente di  $\text{CO}_2$  organica/legata alla respirazione (*background*).

Confrontando il valore di *output* per il flusso di  $\text{CO}_2$  con quello di un'area coltivata in provincia di Modena, compresa tra San Felice sul Panaro e Massa Finalese (pari a  $3010 \text{ t/anno/km}^2$ ; Sciarra *et al.*, 2013), si può notare che i valori sono molto simili.

3.3.2. Elaborazione statistica e grafica del flusso di  $CH_4$

L'interpretazione dei flussi di  $CH_4$  dal suolo, effettuata tramite il diagramma di probabilità cumulata (Fig. 7), permette di distinguere varie classi di popolazione, di cui la prima compresa tra i valori negativi e 44  $mg/m^2$  giorno (*background*) e quelle con valori molto anomali compresi tra 205 e 700 ppm (anomalie), tra 700 e 1000 ppm (forti anomalie) e con valori >2000 ppm entrambe caratterizzate da *outliers*.

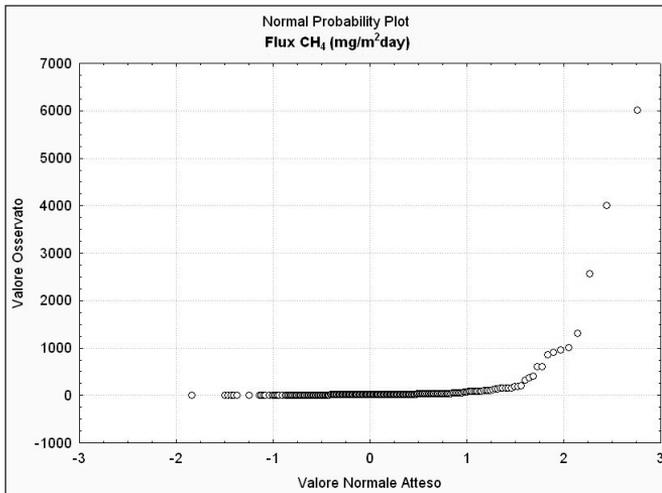


Fig. 7 – Grafico di Probabilità Cumulata relativo al flusso di  $CH_4$

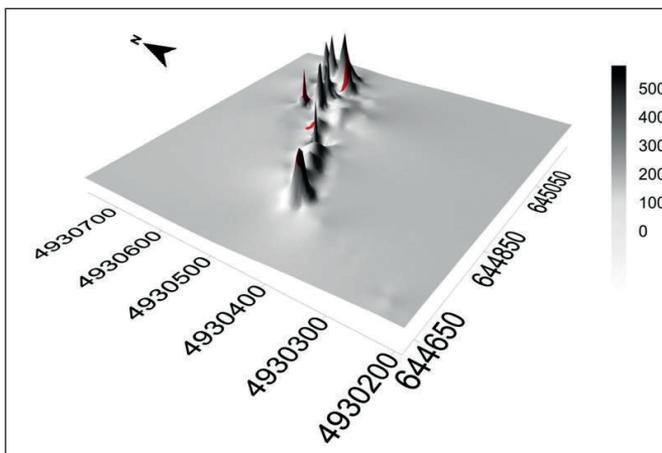


Fig. 8 – Mappa di distribuzione del flusso di  $CH_4$ . I punti rossi rappresentano le salse principali (Datum UTM-WGS84).

La mappa del flusso di CH<sub>4</sub> (Fig. 8) evidenzia la presenza di tre allineamenti anomali. Il primo è localizzato nel settore est con direzione NNE-SSO, che passando ad est di Ca' Rossa arriva fino a sud delle Salse "A-Nando Ovest", "B-Nando" e "D-La Giunta" dove è stato misurato un valore elevato. Gli altri due allineamenti tagliano quasi longitudinalmente tutta la parte interessata dai vulcanetti di fango. In particolare, uno inizia ad ovest della Salsa "G-Fernando" con un valore elevato e arriva ad ovest della Salsa "E-Egidio" con un altro *outlier*; l'altro passa al centro tra le due salse "B-Nando" e "D-La Giunta" sempre con la stessa direzione (NE-SO). Le misure di flusso eseguite al di fuori della zona interessata dalla risalita di fluidi sono caratterizzate, come nel caso della CO<sub>2</sub>, da valori di *background* (tra 2,38 e 42,61 mg/m<sup>2</sup> giorno) riscontrati per l'area di studio.

L'*output* del flusso di metano calcolato sull'area misurata di 0,078 km<sup>2</sup> è pari a:

$$\Phi\text{CH}_4 = 2,13 \text{ t/anno} = 27,09 \text{ t/km}^2 \text{ anno}$$

Anche in questo caso non viene considerata l'aliquota legata al *background* nel calcolo del bilancio totale del flusso di CH<sub>4</sub>.

Esistono diversi lavori in letteratura sui vulcani di fango; uno abbastanza completo che prende in considerazione vari siti in Italia è il lavoro di Etiope *et al.* (2007), nel quale è stato valutato l'*output* derivante dai *macroseeps* (crateri dei vulcani di fango e grifoni, *bubbling pools* e *dry vents*), dal *microseepage* (degassamento diffuso invisibile) circostante e dalle zone lontane rispetto ai *macroseeps* stessi. In tale lavoro, tra i vari siti vengono presi in considerazione anche Nirano, Regnano e le Maccalube della Sicilia. In questi siti gli autori hanno calcolato sia il *budget* di metano emesso direttamente dai crateri sia quello derivante dal *microseepage* (Tab. 3).

Come si può notare i valori del *microseepage* calcolati da Etiope *et al.* (2007) sono molto differenti da quelli ottenuti in questo studio, cioè 26,4 t/anno rispetto a 2,13 t/anno. Le motivazioni per una differenza così netta dei valori di *output* dipendono in parte dalla densità di campionamento (6 misure in 10.000 m<sup>2</sup> contro circa 210 misure in 78.000 m<sup>2</sup> del nostro studio) e quindi dalla diversa precisione nel dato, e in parte dalla distanza di misurazione rispetto al conetto di fango. Questa incertezza sul confronto dei dati, ci porta ad effettuare una comparazione con aree in cui abbiamo la certezza di avere usato la stessa modalità di misurazione. Confrontando il valore di *output* del flusso di CH<sub>4</sub> con l'area coltivata in provincia di Modena, compresa tra San Felice sul Panaro e Massa Finalese, possiamo notare che i valori di Nirano sono più bassi; infatti il flusso nel Modenese è risultato pari a 86,75 t/anno km<sup>2</sup> (Sciarra *et al.*, 2013).

Sito	Area misurata (m <sup>2</sup> )	n. Vents	Macroseep output (t/anno)	Microseepage output (t/anno)	Output totale (t/anno)
Regnano	5800	8	5	29 [11]	34
Nirano	10.000	18	6	26,4 [6]	32,4
Maccalube	1.400.000	69	20	374 [9]	394

Tab. 3 – Stima del flusso di metano dai macroseeps e dai microseepage correlati (Etiopie et al., 2007). Il numero di misurazioni sui microseepage è tra parentesi quadra.

Se confrontiamo poi il valore del flusso di metano con altri vulcani di fango nel mondo, possiamo notare che a Nirano abbiamo dei valori di flusso di un ordine di grandezza inferiore. Come esempio possiamo prendere il sistema di vulcani di fango di Salton Sea, in California, che ha un *output* di 320 t/anno km<sup>2</sup> (Mazzini *et al.*, 2011).

Per quanto riguarda la quantità di gas che viene emesso dai singoli condotti (*macroseeps*), è stata stimata la venuta soltanto del recente vulcanetto riattivatosi nel boschetto a SO di Ca' Rossa (Fig. 9, vedi cap. 4).

In questo sito è stata effettuata una serie di misure con un imbuto posizionato sul punto di gorgogliamento del gas. L'imbuto è stato collegato con un tubo a una bottiglia da 1,5 l riempita di acqua ed è stato calcolato il tempo che impiegava la bottiglia a riempirsi di gas. Tale prova è stata ripetuta più volte, e alla fine è stata fatta una media tra le singole misure. Considerando un tempo di 27 min, sono state misurate una media di 19 venute di gas gorgogliante, per un totale di 64,8 l/h, ossia  $1,8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ .



Fig. 9 – Immagine relativa al sito nel boschetto a SO di Ca' Rossa, in cui è stata stimata la quantità di gas rilasciato nel tempo.

#### 4. Analisi chimiche e isotopiche delle emissioni dagli apparati lutivomi

Sono stati campionati ed analizzati i gas di cinque siti che rappresentano i punti caratterizzati da maggiore risalita lungo i condotti dei vulcani di fango. I punti 1-5 sono stati campionati direttamente nel condotto principale dei singoli vulcani di fango (Fig. 4a).

Allo scopo di stabilire l'origine dei fluidi analizzati sono state effettuate analisi della composizione chimica e isotopica della fase gassosa campionata nei siti 1, 3, 5, nei quali è stato possibile effettuare il prelievo, per la presenza di gorgogliamento più intenso.

I siti sono stati campionati sia nel periodo maggio-ottobre 2015 che nel marzo 2016, al fine di avere un confronto temporale ed eseguire le analisi isotopiche dei gas nobili (in particolare elio ed argon). Le analisi chimiche evidenziano che i vulcani di fango sono a metano dominante, con valori superiori al 90%, e in minima parte hanno aliquote di anidride carbonica (circa 1%) e idrocarburi leggeri ( $C_2H_6$  compreso in un campo tra 90 e 600 ppm).

Prendendo in considerazione la quantità di gas emesso nel singolo vulcano di fango misurato in prossimità di Ca' Rossa (1,552 m<sup>3</sup>/giorno), e conoscendo la composizione del gas che fuoriesce (97% CH<sub>4</sub> e 1% CO<sub>2</sub>), abbiamo calcolato l'*output* di CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> che viene emesso giornalmente dal condotto in atmosfera. Tale valore è pari a 3,299 x 10<sup>-5</sup> t/giorno di anidride carbonica e 1,08 x 10<sup>-3</sup> t/giorno di metano.

Anche in questo caso, non possiamo fare un confronto con altri dati presenti in letteratura (cfr. Etiope *et al.*, 2007), poiché il vulcanetto di fango si è formato in un tempo successivo alla pubblicazione dei suddetti lavori.

Da un punto di vista isotopico i campioni analizzati mostrano valori per l'argon molto simili a quelli atmosferici (<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar = 295,5) e un rapporto isotopico per l'elio di chiara origine crostale. L'elio, infatti, è un elemento che viene prodotto in seguito a decadimento radioattivo nella crosta e nel mantello; in quest'ultimo può essere presente anche elio primordiale (<sup>3</sup>He). La velocità di migrazione dell'elio dalla crosta è inferiore alla sua velocità di produzione, così che la crosta stessa costituisce una zona di accumulo per questo elemento. Le acque in movimento nel sottosuolo possono costituire un veicolo per l'accumulo locale di elio dove esistano trappole adeguate. Ad esempio, esso è presente nel fluido in pressione in concentrazioni fino a qualche decina di ppm nei gas del suolo (Bertrami *et al.*, 1984). Nei confronti invece di un gas che risale dal basso, un acquifero freddo agisce in senso opposto, assorbendo i gas più solubili o reattivi e lasciando invece filtrare i più inerti e meno solubili (come l'elio).

L'origine prevalentemente crostale dell'elio è provata dai rapporti <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He, compresi tra 0,20 e 2,8 volte il valore dell'atmosfera, ed He/Ne, oscillante tra 9 ed oltre 400 (Bertrami *et al.*, 1984). I valori riportati in Tab. 6 mostrano un rap-

porto R/Ra che si aggira intorno a 0,024, dove R è il rapporto  $^3\text{He}/^4\text{He}$  misurato e Ra è il rapporto  $^3\text{He}/^4\text{He}$  in aria ( $1,39 \times 10^{-6}$ ; Mamyrin & Tolstikhin, 1984).

I dati isotopici dei campioni analizzati mostrano dei valori di  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  e  $\delta\text{D}-\text{CH}_4$  compresi tra -47,5 e -41,4‰ V-PDB e tra -184 e -177‰ V-SMOW, rispettivamente. Tali valori confermano un'origine termogenica del  $\text{CH}_4$ . L'origine termogenica dei vulcani di fango presenti in Emilia risulta avere una differente origine rispetto ad altre realtà presenti nel territorio modenese, compresi tra -60 e -78‰ V-PDB e tra -150 e -230‰ V-SMOW (Sciarra *et al.*, 2012, 2013).

In Pianura Padana il metano profondo, inteso come metano termogenico, è generato per maturazione termica delle rocce madri petrolifere triassiche ed è normalmente ospitato in depositi pre-pliocenici che sono caratterizzati da valori di  $\delta^{13}\text{C}_1$  compresi da -31 a -51‰ e da presenza di  $\text{C}_{2+}$  (ossia da altri composti del carbonio con almeno due atomi di C, come gli idrocarburi).

L'origine termogenica del  $\text{CH}_4$  indica che tale specie gassosa è il prodotto dalla decomposizione della materia organica sepolta nei sedimenti a  $T > 100^\circ\text{C}$  (cfr. Whiticar & Suess, 1990). Questi dati sono in accordo con quelli riportati da altri autori (Minissale *et al.*, 2000; Capozzi & Picotti, 2002; Grassa *et al.*, 2004; Etiope *et al.*, 2007) per la maggior parte dei gas indagati sui vulcani di fango. Queste emissioni ricche di  $\text{CH}_4$  presenti in Appennino romagnolo sono alimentate da fonti organiche situate a profondità  $\geq 3000$  m, in un ambiente geneticamente caratterizzato da alte pressioni e temperature tra  $100-120^\circ\text{C}$  (Tassi *et al.*, 2012).

I valori del  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ , essendo in un ambiente a  $\text{CH}_4$  dominante, si attestano intorno ai +21‰ V-PDB. La firma isotopica del  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  estremamente positivo suggerisce che la  $\text{CO}_2$  sia legata all'ossidazione anaerobica di idrocarburi pesanti (Pallasser, 2000), seguita nella maggior parte dei casi da metanogenesi secondaria, in particolare per quei campioni di gas caratterizzati da elevati valori di  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  ( $> 10\%$  V-PDB; Tassi *et al.*, 2012). Questo processo, che dipende dal tipo di comunità microbiche e dalle condizioni fisico-chimiche del giacimento (Wang *et al.*, 2005), è in grado di arricchire fortemente la  $\text{CO}_2$  residua in  $^{13}\text{C}$  (Etiope *et al.*, 2009).

## 5. Conclusioni

La prospezione dei gas nei suoli, caratterizzata da un'estesa copertura areale all'interno dell'area integrale della Riserva delle Salse di Nirano, è stata effettuata al fine di identificare i processi di migrazione dei gas e stimare l'*output* di degassamento dal suolo e dagli apparati attivi.

Le misure di concentrazione dei gas nei suoli evidenziano due fasce caratterizzate da valori anomali, che fanno presupporre la presenza di aree ad elevata permeabilità. In particolare, nel settore nord-est si nota l'associazione di più specie gassose, indice che questa zona è quella attualmente interessata dalla maggiore attività di risalita.

Il CH<sub>4</sub> mostra bassi flussi di degassamento diffuso dal suolo, inferiori rispetto a zone coltivate presenti nel Modenese, mentre i flussi di CO<sub>2</sub> sono rappresentativi di un suolo ricco di vegetazione.

Le analisi chimiche e isotopiche dei gas campionati confermano l'origine termogenica del metano.

Alla luce dei rilievi effettuati e delle misurazioni sul tasso di emissione del gas dagli apparati lutivomi, le Salse di Nirano mostrano un tasso di emissione ridotta/moderata rispetto ad altri vulcani di fango riportati in letteratura (Etiopia *et al.*, 2007). D'altra parte, le misure dei tassi di emissione dalle salse sono sempre state effettuate in periodi di "quiete".



Giovanni Martinelli\*, Andrea Dadomo\*\*

## Misura in continuo di temperatura e livello del fango in una emissione selezionata delle Salse di Nirano

### **Riassunto**

È stata effettuata un'attività di monitoraggio con tecniche automatiche di una emissione fangosa nella zona delle Salse di Nirano. L'attività ha compreso la misurazione della temperatura e del livello dell'acqua fangosa. Le attività svolte hanno permesso di confermare che la strumentazione adottata è in grado di svolgere attività di monitoraggio in ambienti ritenuti non favorevoli. Le prime indicazioni ottenute dai dati sperimentali suggeriscono che esiste una possibile dipendenza dei valori rilevati con parametri di carattere atmosferico ma non con parametri di carattere mareale. Eventuali sviluppi nelle attività di monitoraggio dovranno considerare anche possibili variazioni nel tempo del flusso di gas.

### **Abstract**

*Automatic measurements of temperature and level of muddy water in a selected vent of the Nirano mud volcanoes. Automatic monitoring techniques were utilized in the area of the Nirano mud volcanoes. Research activities included measurements of temperature and the level of muddy water. Automatic monitoring confirmed the suitability of the technologies used in unfavourable environmental locations. Preliminary data show possible dependence of the parameters monitored on atmospheric parameters and the lack of dependence with tidal parameters. Further research developments should consider possible variations of gas flow rate with time.*

**Parole chiave:** *Vulcani di fango, serie storiche, sismicità, monitoraggio fluidi sotterranei.*

**Key words:** *Mud volcanoes, time series, seismicity, underground fluid monitoring.*

---

\* ARPAE Emilia-Romagna, Sezione di Reggio Emilia, Via G. Amendola 2, 42122 REGGIO EMILIA; e-mail: giovanni.martinelli15@gmail.com.

\*\* Geologo libero professionista, Via P. Mattarella 7, 29017 FIORENZUOLA D'ARDA (PC).

## 1. Introduzione

Sono state sviluppate attività di ricerca e sperimentazione relative a misurazioni di carattere automatico nell'emissione fangosa denominata "D-La Giunta" nell'area delle Salse di Nirano. In particolare è stata scelta un'emissione dominata dalla fase liquida e scarsamente soggetta a variazioni morfologiche o di portata significative nel tempo. L'emissione è caratterizzata da un diametro di circa 150 cm. La profondità stimata è di circa 200 cm. La portata della fase liquida è di circa 100 cm<sup>3</sup>/s mentre la portata della fase gassosa gorgogliante è di circa 10 cm<sup>3</sup>/s (la fase gassosa e la fase liquida sono state analizzate in dettaglio e i risultati sono riportati nei capitoli 4 e 10 della Relazione tecnico-scientifica redatta per il Comune di Fiorano Modenese, cfr. AA.VV., 2016).

L'idea di misurare i valori di livello e di temperatura nei vulcani di fango è conseguenza delle acquisizioni scientifiche più recenti secondo le quali:

- i) I vulcani di fango sono costituiti da fluidi ritenuti privi di attinenza con l'ambiente atmosferico. La fase liquida non è soggetta a ricarica di carattere meteorologico (Conti *et al.*, 2000) mentre la fase gassosa è costituita prevalentemente da metano di origine profonda (Etiope *et al.*, 2007).
- ii) La fase solida è costituita prevalentemente da minerali argillosi. La sospensione costituita da acqua salmastra, gas disciolti e minerali argillosi è caratterizzata, in emissioni selezionate, da valori di viscosità e densità simili a quelli dell'acqua.
- iii) L'acqua sotterranea in condizioni di confinamento può essere utilizzata come misuratore di deformazione crostale naturale (Bredenhoeft, 1967; Bodvarsson, 1970). Se il serbatoio da cui proviene la maggior parte della fase fluida è isolato dall'ambiente esterno esistono le condizioni per potere osservare eventuali variazioni di volume del serbatoio. Ciò è dovuto alla quasi incompressibilità dell'acqua e dalla portata trascurabile della fase gassosa che è, in principio, compressibile. La bassa portata della fase gassosa rispetto a quella dell'acqua fa sì che si possa considerare il fluido emesso come quasi tutta acqua.

## 2. La strumentazione utilizzata

Il 26 maggio 2015 è stata installata una sonda di monitoraggio di tipo STS in grado di misurare con sufficiente potere risolutivo i valori di livello dell'acqua (risoluzione  $\geq 0,1$  mm) e di temperatura (risoluzione  $> 0,1$  °C).

La sonda è stata inserita nella polla indicata in Fig. 1 a circa 1,4 m di profondità.

Il tasso di acquisizione dei dati è stata regolato come segue:

- 1 misura/ 60 min fino al 26/06/2015,
- 1 misura/ 30 min dal 26/05/2015 al 13/10/2015,
- 1 misura/10 min dal 13/10/2015 al 15/03/2016.



Fig. 1 – Polla del complesso luvivomo “D-La Giunta” in cui è installata la sonda di livello e temperatura. In evidenza il cavo per l’acquisizione a distanza dei dati.

### 3. I dati registrati

In Fig. 2 è mostrato il grafico dei valori registrati.

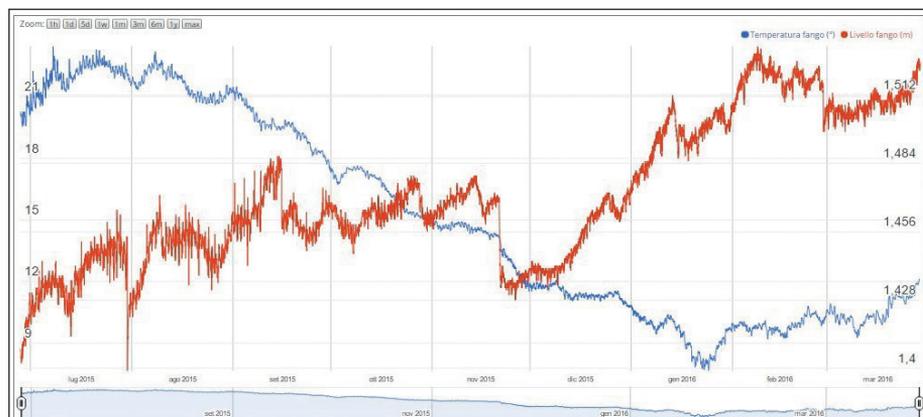


Fig. 2 – Grafico dei dati registrati da luglio 2015 a marzo 2016. In blu la temperatura del fango (°C); in rosso il livello del fango (m).

In occasione di uno scarico dati (21 aprile 2016), è stato condotto un primo test di misura con idrofono della durata di circa 13 min. L’intera traccia registrata e il suo spettro sono mostrati in Fig. 3.

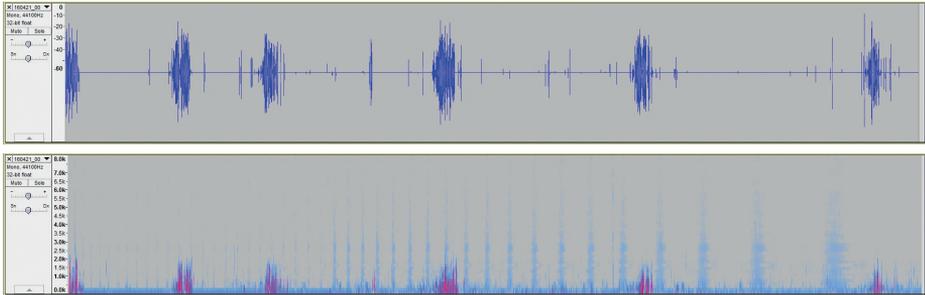


Fig. 3 – Traccia audio registrata mediante un idrofono nello stesso vulcanetto monitorato mediante la sonda di livello (ogni variazione di colore blu corrisponde a una bolla di metano) e corrispondente spettro in frequenza.

Di tutta la serie registrata è stato isolato il segnale prodotto da una singola bolla e di questo è stata verificata l'analisi spettrale (Fig. 4).

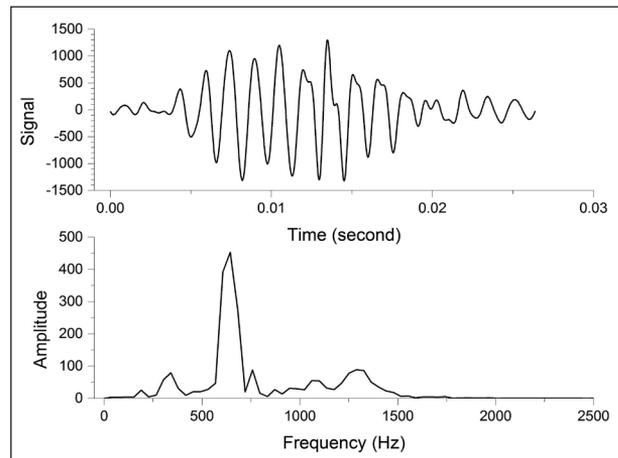


Fig. 4 – Segnale audio prodotto da una singola bolla (con valori in millivolt) e suo contenuto spettrale.

La breve durata della registrazione non permette di valutare effetti dovuti a pressione atmosferica, temperatura, variazioni di portata ecc., tuttavia appare promettente se connessa con un sistema automatizzato per il conteggio delle bolle e per l'analisi del contenuto spettrale.

#### 4. Valutazioni sui dati osservati

Tamrazyan (1972) ha osservato che in coincidenza delle maree di carattere sizigiale esistono maggiori possibilità di eventi di carattere eruttivo nei vulcani

di fango dell'Azerbaijan. L'evento eruttivo descritto è da attribuire, in questo caso, a piccole variazioni nel volume del serbatoio contenente le fasi fluide di tipo incompressibile dei vulcani di fango. Questo tipo di osservazione ha fatto sì che progetti di ricerca di carattere evoluto fossero orientati a verificare la costanza o la variabilità nel tempo della attività dei vulcani di fango (Delisle *et al.*, 2010; Kopf *et al.*, 2010). In particolare Kopf *et al.* (2010) hanno registrato in continuo eventuali variazioni nel flusso di gas di due vulcani di fango in Azerbaijan. È stato rilevato che fasi eruttive significative hanno seguito alcuni terremoti significativi. Delisle *et al.* (2010) hanno rilevato che uno dei due vulcani di fango considerati è risultato sensibile a maree terrestri con ciclicità di circa 24 ore. Non sono state rilevate altre ciclicità e ciò ha permesso agli Autori di ritenere che i vulcani di fango non sono sensibili a eventuali ciclicità di carattere atmosferico mentre sono sensibili a ciclicità di carattere mareale. Le ciclicità di carattere mareale sono generalmente dovute a impercettibili variazioni nella geometria del serbatoio indotte dalle deformazioni crostali a loro volta causate dal moto della terra e dalla luna. Ciò significa che, in principio, i vulcani di fango possono essere utilizzati come possibili sensori di deformazioni crostali. La mancanza di eventi sismici con magnitudo  $>4,5$  in prossimità del punto di osservazione utilizzato da Delisle *et al.* (2010) e da Kopf *et al.* (2010) ha inibito conclusioni di carattere più preciso. Anche nel caso delle Salse di Nirano sono state ricercate possibili correlazioni tra l'occorrenza di eventi sismici nelle vicinanze e valori registrati nel livello dell'acqua presente nella polla selezionata. I dati misurati non hanno consentito il confronto dei livelli del fango con forti terremoti (rispettivamente nel raggio di 20 e 70 km), in quanto nel periodo di monitoraggio non si sono verificati eventi sismici con magnitudo  $>3,5$  (Fig. 5).

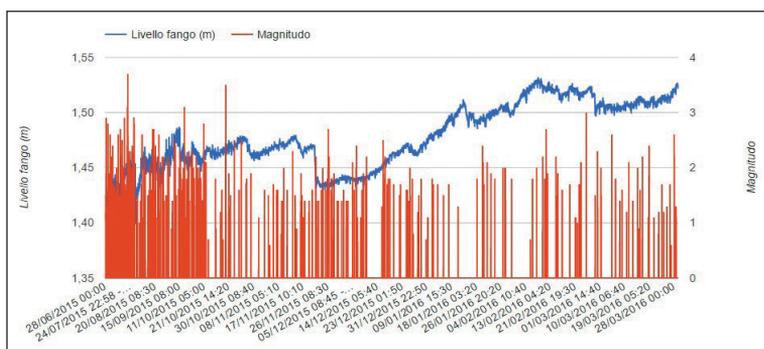


Fig. 5 – Andamento del livello del fango in relazione ai terremoti (INGV) avvenuti entro un raggio di 70 km.

Nel caso delle Salse di Nirano è stata osservata una possibile periodicità a 24 h e una possibile periodicità a 12 ore nel livello del fango; mentre non è stata

osservata alcuna periodicità certa di tipo lunare, cioè di circa 28 giorni. Nei valori di pressione atmosferica registrati nella vicina stazione meteorologica ARPAE di Formigine, distante una decina di km, sono state osservate periodicità di 12 e 24 ore coincidenti con quelle osservate alle Salse di Nirano. In questi casi il segnale ciclico del livello è spesso ritenuto dalla letteratura scientifica non ascrivibile a fenomeni terrestri ma atmosferici. Per confronto è stato inserito anche il contenuto spettrale derivato da misure di livello dell'acqua in un pozzo ARPAE - Rete Automatica ubicato in provincia di Parma che intercetta un acquifero certamente confinato (acquifero C) e in cui è riscontrabile un segnale mareale significativo. La differenza con la registrazione ottenuta alle Salse di Nirano indica una possibile sensibilità del pozzo nel Parmense a fenomeni di marea terrestre e una possibile insensibilità a maree terrestri nel livello del fango delle salse di Nirano. Questa eventuale insensibilità (da confermare con ulteriori registrazioni) è accompagnata da una relativa sensibilità alla pressione atmosferica. Va osservato che le esperienze condotte da Delisle *et al.* (2010) e da Kopf *et al.* (2010), che hanno permesso di identificare segnali mareali nei vulcani di fango, hanno preso in considerazione il parametro flusso del gas metano registrato congiuntamente con altri parametri ambientali mentre le esperienze condotte alle Salse di Nirano hanno considerato il solo parametro livello dell'acqua.

Risulta pertanto consigliabile proseguire le attività di ricerca tramite idrofono o anche stazioni sismografiche in grado di permettere una stima della quantità di gas espulso (flusso), continuando le misurazioni di livello in grado di indicare il grado di dipendenza di eventuali fenomeni osservati con la pressione atmosferica e la temperatura. Serie storiche di maggiore durata potranno permettere maggiori indicazioni sui fenomeni osservati.



**Giovanna Vezzalini\***, **Simona Marchetti Dori\***,  
**Simona Quartieri\*\***

## **Analisi mineralogiche e granulometriche dei fanghi delle Salse di Nirano**

### **Riassunto**

*In questo lavoro vengono riportati i risultati di uno studio sulla composizione mineralogica, chimica e granulometrica dei fanghi estrusi dagli apparati presenti presso la Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano, situata alle pendici dell'Appennino Modenese nel territorio del Comune di Fiorano Modenese. In questa zona è presente un regime compressivo associato a grandi spessori sedimentari i quali, a causa della velocità con cui si sono messi in posto, hanno trattenuto le acque connate in interstrato che, a loro volta, danno origine alla formazione dei vulcani di fango. Nonostante il fenomeno dei vulcani di fango abbia da sempre attirato l'attenzione di numerosi studiosi, si nota la quasi completa assenza di studi inerenti la composizione mineralogica qualitativa e quantitativa dei fanghi estrusi. In questo lavoro, in seguito ad analisi mineralogiche qualitative e semi-quantitative, analisi granulometriche e calcimetriche, e dal confronto dei dati ottenuti con dati bibliografici, si è giunti alla conclusione che le bocche degli apparati di Nirano estrudono fanghi di composizione mineralogica piuttosto simile, ma leggermente diversi tra loro dal punto di vista delle percentuali relative delle varie fasi. I dati mineralogici sono compatibili con quelli della Formazione plio-pleistocenica delle Argille Azzurre; formazione piuttosto eterogenea per quanto riguarda i rapporti quantitativi delle fasi mineralogiche a causa della presenza di intercalazioni sabbiose e marnose. Dividendo i campioni in base alla morfologia degli apparati (coni e polle) si può concludere che, generalmente, i coni hanno granulometria più fine delle polle.*

### **Abstract**

*Mineralogical and particle-size analyses on the muds of the Nirano mud volcanoes. The results of a study on the mineralogical, chemical and particle-size composition of muds emitted at the Nature Reserve of the Nirano mud volcanoes (Modena, Italy) are reported. The study area is located near Fiorano Modenese, at the northern margin of the Apennines. Although mud volcanoes have attracted the attention of several authors of various disciplines, up to now there has been an almost complete lack of qualitative and quantitative mineralogical data on the muds emitted. The results of this work aim to contribute to fill this gap and show that the Nirano mud volcanoes extrude very similar materials from the mineralogical viewpoint, but slightly different in the percentages of the diverse mineralogical phases. As for the geological origin of the muds, the mineralogical results, compared*

---

\* Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, Via G. Campi 103, 41125 MODENA; e-mail: mariagiovanna.vezzalini@unimore.it; simona.marchettidori@unimore.it.

\*\* Dipartimento di Scienze Matematiche e Informatiche, Scienze Fisiche e Scienze della Terra, Università di Messina, Viale Ferdinando Stagno d'Alcontres 31, 98166 MESSINA - SANT'AGATA; e-mail: squartieri@unime.it.

with available reference data, are compatible with those of the Plio-Pleistocene “Argille Azzurre” Formation. By ranking the samples based on the morphology of the vents (cones and pools), it can be said that usually the cones show a particle-size composition finer than the pools.

**Parole chiave:** Salse di Nirano, analisi mineralogica, analisi granulometrica.

**Key words:** Nirano mud volcanoes, Italy, mineralogical analysis, particle-size analysis.

## 1. Introduzione

Nell’ambito del progetto “Studio ed indagini finalizzate alla definizione di un quadro conoscitivo utile alla fruizione in sicurezza dell’area integrale delle Salse di Nirano”, finanziato dal Comune di Fiorano Modenese (AA.VV., 2016), sono state eseguite analisi mineralogiche, calcimetriche e granulometriche sui materiali estrusi dai vulcani di fango presenti nella Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano (Fiorano Modenese), allo scopo di definire la formazione geologica d’origine del materiale stesso. Infatti, nonostante il fenomeno dei vulcani di fango abbia da sempre attirato l’attenzione di numerosi studiosi, va sottolineata la quasi completa assenza di studi inerenti la composizione mineralogica qualitativa e quantitativa del fango estruso. Gli unici dati bibliografici risalgono ad uno studio del 1985 ad opera di Ferrari e Vianello i quali hanno usato tecniche di diffrazione a raggi X per studiare la composizione dei fanghi nel margine pede-appenninico compresa la zona delle Salse di Nirano (Ferrari & Vianello, 1985).

I vulcani di fango di Nirano (Martinelli & Judd, 2004; Castaldini *et al.*, 2007; Bonini, 2008a,b;) emettono una miscela di fluidi freddi quali: fango, acque salate fossili, miscele di gas, nelle quali domina il metano ( $\text{CH}_4$ ) e a volte la  $\text{CO}_2$ , idrocarburi liquidi provenienti da grandi profondità ed elementi litici rappresentativi delle rocce incontrate durante la risalita. L’estrusione del fango dalle bocche è dovuta all’espansione termica del metano durante la risalita, alla conseguente diminuzione di densità dei fluidi rispetto alle rocce circostanti e all’aumento della loro pressione. Lo scopo specifico di questo lavoro è di ottenere informazioni dettagliate sulla composizione mineralogica e sulle proprietà fisiche del materiale estruso nell’area indagata, anche in funzione della variabilità stagionale (primavera/estate e inverno), e di correlare tali informazioni con quelle ottenute da altri indagini, in particolare quelle paleontologiche e viscosimetriche, eseguite da altri autori nell’ambito di questo stesso progetto e riportate nel presente volume (cfr. Papazzoni, 2017; Macini & Mesini, 2017).

## 2. Modalità di campionamento

Sono state campionate entrambe le tipologie degli apparati di emissione presenti nella zona (Fig. 1): a) i coni, strutture alte alcuni metri e con fianchi

ripidi, che ricordano strettamente gli apparati vulcanici magmatici e che si formano quando la viscosità è elevata; b) le polle, strutture a livello del terreno circostante le cui dimensioni dipendono dalla viscosità del fango, ma che comunque si formano quando la viscosità è bassa.



Fig. 1 – Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano: a) apparato di emissione dei fanghi con morfologia a cono; b) apparato con morfologia a polla.



Fig. 2 – Area di campionamento e denominazione delle strutture campionate (base da Google earth).

In data 15/05/2015 e 22/06/2015 sono stati complessivamente prelevati campioni di fango da diversi apparati presenti nella Riserva Naturale (Fig. 2).

Per ognuno dei vulcani di fango sono state prelevate diverse tipologie di campioni:

- a) Campione di fango molto fluido, raccolto dal centro della bocca (Fig. 3). La campionatura è avvenuta immergendo nella bocca del vulcano un recipiente di capienza pari a 1 litro.
- b) Campione di fango relativamente denso, raccolto dalle pareti interne del cono. Per la campionatura è stato utilizzato un recipiente con capienza di 200 ml con il quale si è asportato il fango più denso dalle pareti interne del vulcano.
- c) Campione di fango secco (crosta) raccolto sul terreno a distanza dal cratere.

Allo scopo di determinare eventuali influenze stagionali sulla composizione dei fanghi, nel febbraio 2016 sono stati ripetuti alcuni campionamenti. In Tab. 1 sono riportati, per ogni campione, le seguenti informazioni: sigla del campione, tipologia dell'apparato da cui è stato prelevato, ubicazione/nome dell'apparato. Ulteriori informazioni dettagliate sulle fasi di campionamento sono riportate nella tesi di laurea di Talami (2015).



Fig. 3 – Fase di campionamento dall'interno di un cono di fango.

Sigla del campione	Tipologia dell'apparato di provenienza	Denominazione dell'apparato di provenienza	Sigla dell'apparato
C1	Cono	Nando Ovest	A
C2	Cono	Nando	B
C3	Polla	Nando	B
C4	Crosta	Nando	B
C5	Polla	La Giunta	D
C6	Polla	La Giunta	D
C7	Crosta	La Giunta	D
C8	Polla	Garfagnine	C
C9	Crosta	Garfagnine	C
C10	Cono	Egidio	E
C11	Crosta	Egidio	E
C12	Cono	Fernando	G
C13	Cono	Fernando	G
C14	Cono	Fernando	G
C15	Cono estinto	Fernando	G
C16	Polla	Polle alte	H

Tab. 1 – *Dati dei campioni prelevati: sigla del campione, tipologia dell'apparato di provenienza, denominazione dell'apparato di provenienza e sigla corrispondente riportata in Fig. 2.*

### 3. Metodi analitici

#### 3.1. *Analisi mineralogica semi-quantitativa in diffrazione da polveri*

Le misure in diffrazione di raggi X su polveri (XRPD) sono state eseguite presso il C.I.G.S. (Centro Interdipartimentale Grandi Strumenti) dell'Università di Modena e Reggio Emilia su un diffrattometro Bragg-Brentano  $\theta$ - $\theta$  Panalytical, modello X'Pert-Pro. I diffrattogrammi, ottenuti nell'intervallo angolare  $3^\circ < 2\theta < 45^\circ$ , sono poi stati elaborati tramite il programma X'Pert HighScore Plus. Per tali analisi sono stati utilizzati i campioni relativamente più densi raccolti dalle pareti interne dei coni. I campioni sono stati fatti seccare a temperatura ambiente; successivamente circa 200 g di campione sono stati inseriti in una giara con un'eguale quantità di sfere di allumina e acqua e il tutto è stato inserito nel mulino a giare e macinato ad umido per 20 min. In seguito il contenuto è stato raccolto in un recipiente ed essiccato in stufa ad una temperatura inferiore a 60 °C.

Una volta essiccato, il campione è stato macinato in mortaio di agata fino ad ottenere una polvere impalpabile adatta alla diffrazione a raggi X. Al fine di ridurre al minimo i fenomeni di orientazione preferenziale dei cristalliti – frequenti nei campioni ricchi di minerali fillosilicatici – la polvere è stata inserita nel porta-campioni tramite caricamento laterale. L'analisi qualitativa delle fasi minerali identificate nei diffrattogrammi è stata eseguita attraverso il programma X'Pert HighScore Plus.

### **3.2. Trattamenti con glicole etilenico ed in temperatura**

Al fine della precisa identificazione dei minerali argillosi presenti nei fanghi, si è resa necessaria un'indagine accurata dei picchi di diffrazione a 14 Å e 7 Å, per valutare la presenza di caolinite, clorite e smectite. I riflessi principali di tali fasi, infatti, si sovrappongono, non consentendo quindi l'immediata identificazione. Quest'ultima può essere ottenuta attraverso trattamento con glicole etilenico. A tale scopo sono stati selezionati due campioni rappresentativi (C14 e C16 in Tab. 1) e per ognuno sono stati preparati tre vetrini copri-oggetto su cui il campione è stato disperso ad umido in modo da ottenere una superficie il più omogenea possibile. Il primo vetrino non è stato trattato ulteriormente, al fine di avere uno standard di riferimento. Sul secondo è stato eseguito il trattamento con glicole etilenico: seccato il campione sul vetrino, il tutto è stato inserito per 72 ore a temperatura ambiente in un essiccatore di vetro contenente glicole etilenico. Tale trattamento è stato condotto per distinguere la clorite dalle fasi smectitiche. Tutte queste fasi presentano un picco a 14 Å, ma quelle smectitiche tendono ad assorbire il glicole etilenico in interstrato, aumentando le distanze dei piani reticolari (001) a 15-16 Å, mentre la clorite non subisce variazioni. Quindi, dopo tale trattamento, nel diffrattogramma si vedrà il picco a 14 Å inalterato se è presente solo clorite, totalmente spostato se è presente solo smectite, oppure due picchi con intensità ridotte (rispettivamente a circa 15-16 Å e 14 Å) se sono presenti entrambe le fasi. Il terzo vetrino è stato trattato termicamente alla temperatura di 500 °C per 30 min per distinguere il contributo al picco a 7Å della clorite (picco relativo alla distanza interplanare del piano reticolare (002) da quello della caolinite (piano reticolare (001)). A tale temperatura la caolinite, al contrario della clorite, si decompone e quindi dall'entità della diminuzione di intensità del picco (o dalla sua totale scomparsa) è possibile determinare la presenza o meno delle due fasi. Sui tre vetrini è stata eseguita l'analisi in diffrazione da polveri nell'intervallo 3 – 14° 2θ.

### **3.3. Analisi calcimetrica**

Il contenuto di carbonato presente nei campioni è stato ottenuto tramite una misura gas-volumetrica che permette di determinare il volume di CO<sub>2</sub> prodotta dalla reazione fra acido cloridrico e i carbonati contenuti nei campioni analizzati. Si è utilizzato un calcimetro modello Dietrich-Fruhling, seguendo la procedura riportata in ASTM D4373 (2002) e in Jonstraibizer (1970). Due composti standard di riferimento a composizione nota in CaCO<sub>3</sub> (50% e 75%) sono stati preparati miscelando opportunamente quarzite e carbonato di calcio al fine di ottenere un fattore di correzione. Le calcimetrie sono state eseguite sugli stessi campioni di fango usati per e analisi XRPD. Occorre sottolineare che la CO<sub>2</sub> che si sviluppa dalla reazione può derivare anche dalla presenza di eventuale di altri carbonati oltre la calcite.

### **3.4. Analisi granulometriche**

Sono stati complessivamente analizzati 17 campioni di fango provenienti da diverse tipologie di apparato, prelevati in due diversi periodi dell'anno al fine di valutare eventuali effetti di stagionalità.

La percentuale di sabbia ( $\varnothing > 0,0625$  mm) è stata determinata usando un setaccio a maglie 0,0625 mm, mentre sulle frazioni più fini, quali limo ( $0,0020$  mm  $< \varnothing < 0,0625$  mm) e argilla ( $\varnothing < 0,0020$  mm) sono state eseguite analisi granulometriche per sedimentazione utilizzando il densimetro secondo la normativa ASTM D422 (2007). Secondo questa metodologia 50 g di campione rappresentativo, precedentemente dispersi in un mezzo anti-flocculante quale esametafosfato di sodio al 5% [(NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>], vengono accuratamente agitati e successivamente lasciati decantare. Durante la sedimentazione la densità della sospensione diminuisce e viene misurata con un densimetro a intervalli di tempo crescenti. Utilizzando la legge di Stokes è possibile calcolare il diametro delle particelle in sospensione al tempo  $t$  di lettura e la loro percentuale, ottenendo una curva cumulativa che permette di descrivere la distribuzione granulometrica nel campione.

## **4. Risultati**

### **4.1. Diffrazione X su polveri**

In Fig. 4 sono riportati alcuni diffrattogrammi rappresentativi dei campioni studiati. Dal punto di vista della composizione mineralogica, tutti i campioni risultano qualitativamente molto simili. Le fasi presenti sono: calcite, caolinite, clorite, dolomite, K-feldspato, mica/illite, plagioclasio, quarzo. Ai picchi di queste fasi, si aggiungono in alcuni casi dei riflessi molto deboli, attribuiti a K-feldspato e a rutilo/anatasio. Le analisi mineralogiche semi-quantitative sono riportate in Tab. 2.

La Fig. 5 mostra i diffrattogrammi relativi ai campioni C14 e C16, tal quali e dopo i trattamenti, precedentemente descritti, con glicole etilenico e in temperatura. Per entrambi i campioni, il picco a 7Å risulta fortemente ridotto in intensità dopo il trattamento a 500 °C, ma non scompare del tutto. Questo indica la presenza prevalente di caolinite e di una piccola percentuale di clorite. Nei diffrattogrammi relativi ai campioni trattati con glicole etilenico, si nota inoltre la formazione di una debole gobba a circa 16Å, che indica la presenza di una piccola percentuale di smectite oltre a clorite. Si può quindi assumere per tutti i campioni la presenza prevalente delle tre fasi fillosilatiche caolinite, clorite e smectite.

Al fine di effettuare un confronto semi-quantitativo tra i vari campioni, i risultati diffrattometrici di tre campioni selezionati (nello specifico C1, C8 e C16) sono stati normalizzati rispetto al quarzo e alla mica/illite (Tab. 3).

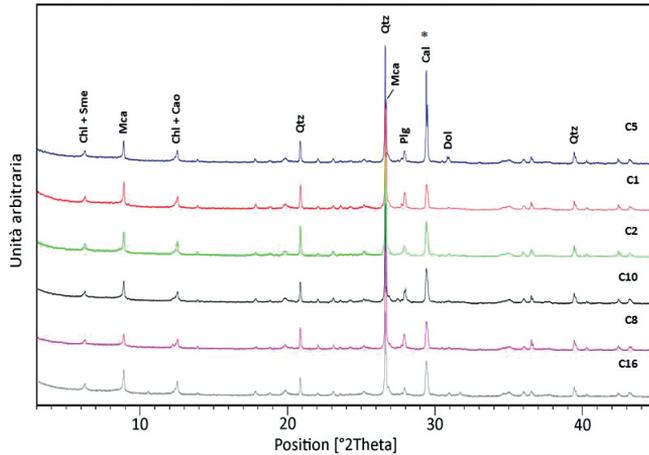


Fig. 4 – Diffratogrammi dei campioni C5 ( blu); C1 (rosso); C2 (verde); C10 (nero); C8 (violetta) e C16 (grigio). Cao= Caolinite; Chl = Clorite; Dol= Dolomite; Mca= Mica/Illite; Plg= Plagioclasio; Qtz= Quarzo; Sme= Smectite; Cal=Calcite. \*L'elevata intensità del picco della calcite nel campione C5 è probabilmente attribuibile alla presenza di un cristallo grossolano mal macinato.

Campione	C1	C2	C3	C5	C6	C8	C10	C12	C13	C14	C16
<b>Fasi identificate</b>											
Calcite	XXX	XXX	XXX	9X *	XXX	XXX	XXX	XXX	XXXX	XXX	XXXX
Caolinite	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	XX
Clorite	tracce										
Dolomite	tracce										
K-feldspato	-	-	-	tracce	tracce	-	-	-	tracce	-	tracce
Mica/Illite	XXX	XXX	XX	XXX	XXX	X	XX	XXX	XXX	XX	XXX
Plagioclasio	XX	X	X	X	X	XX	XX	X	X	X	X
Quarzo	10X										
Rutilo/Anatasio	-	-	tracce	-	-	-	tracce	-	tracce	-	-
Smectite	tracce										

Tab. 2 – Analisi mineralogiche semi-quantitative. Per ogni campione le intensità sono riferite al proprio picco più intenso (in tutti i casi quarzo); il numero delle X è proporzionale all'intensità del picco principale della fase considerata; le fasi con picchi di bassa intensità sono state indicate come tracce. \*L'elevata intensità del picco della calcite nel campione C5 è probabilmente dovuto alla presenza di un cristallo grossolano mal macinato.

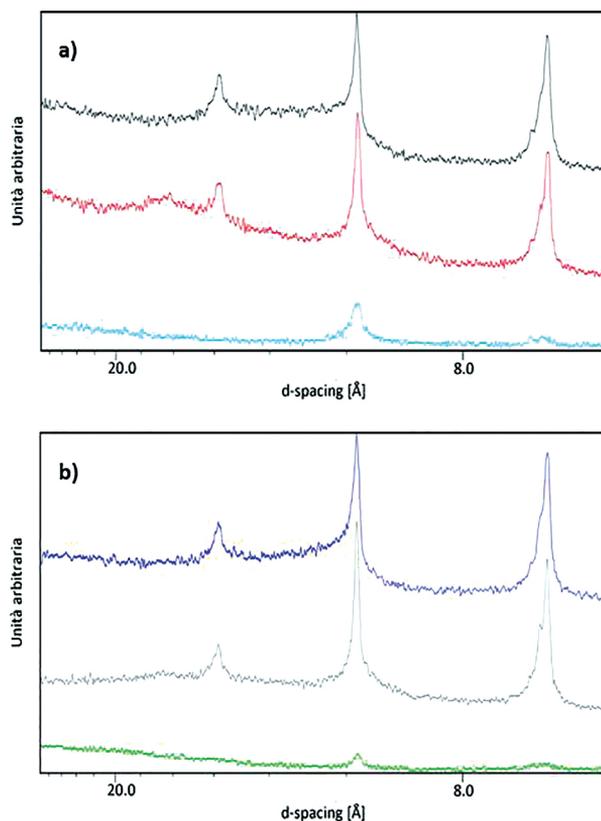


Fig. 5 – a) Campione C14 tal quale (in alto), trattato con glicole etilenico (al centro) e a 500 °C (in basso); b) Campione C16 tal quale (in alto), trattato con glicole etilenico (al centro) e a 500 °C (in basso).

Campione	Calcite	Caolinite	Clorite/ Smectite	Dolomite	K-feldspato	Mica/ Illite	Plagioclasio	Quarzo	Rutilo / Anatasio
<b>Quarzo norm</b>									
C1	2X	1,5X	1,5X	tracce	-	3X	2X	10X	-
C8	2X	X	X	tracce	-	1,5X	1,5X	10X	-
C16	4X	2X	1,5X	X	tracce	3X	1,5X	10X	-
<b>Mica/Illite norm</b>									
C1	3X	1,5X	1,5X	tracce	-	3X	2X	10X	-
C8	5X	2X	2X	tracce	-	3X	3X	20X	-
C16	4X	1,5X	1,5X	tracce	tracce	3X	X	8X	-

Tab. 3 – Analisi mineralogiche semi-quantitative di tre campioni selezionati ottenute dagli spettri di diffrazione normalizzati secondo il quarzo e secondo la mica/illite.

Dai risultati normalizzati sul quarzo si osserva che il fango C8 contiene meno fasi argillose. I risultati normalizzati sulla mica/illite evidenziano che C8 contiene molto più quarzo e calcite degli altri due campioni.

#### 4.2. Analisi calcimetriche

I campioni di fango contengono percentuali di carbonato che vanno dal 17,8% al 22,3%, corrispondenti a una variabilità del 4,5% (Tab. 4). Tale variabilità è compatibile con quella osservata in altre analisi di argille azzurre (vedi cap. Discussione).

Campione	C1	C2	C3	C5	C6	C8	C10	C12	C13	C14	C16
% CaCO <sub>3</sub>	17,8	20,8	20,8	19,4	20,2	19,3	21,6	21,8	22,1	18,7	22,3

Tab. 4 – Percentuali di carbonato di calcio ottenute dalle analisi calcimetriche.

#### 4.3. Analisi granulometriche

I risultati delle analisi granulometriche (riportati in Tab. 5 e in Fig. 6) denotano che i fanghi campionati nei cono sono tendenzialmente caratterizzati da granulometrie più fini. Viceversa i fanghi provenienti dalle polle sono più grossolani. In particolare, il campione con granulometria più grossolana proviene dalla polla C16 (zona “Polle Alte H” in Fig. 2), stabile fin dagli anni ‘70 del secolo scorso e mai evoluta in cono. Inoltre, con l’eccezione dei campioni C12 e C16, i dati non evidenziano significativi effetti della stagionalità sulle distribuzioni granulometriche dei campioni.

Campione	Tipologia apparato	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)
C1 maggio 2015	cono	0,8	56,9	42,4
C2 maggio 2015		9,2	66,4	24,5
C2 febbraio 2016		8,1	64,3	27,6
C10 maggio 2015	cono	7,0	64,9	28,1
C10 febbraio 2016		6,2	63,4	30,4
C12 maggio 2015	cono	6,3	63,9	29,8
C12 febbraio 2016		0,8	64,1	35,2
C5 maggio 2015	polla	6,1	65,3	28,6
C5 febbraio 2016		8,1	65,7	26,2
C6 maggio 2015	polla	2,3	69,6	30,4
C6 febbraio 2016		0,8	68,5	31,5

C8 maggio 2015	polla	8,1	62,4	29,6
C8 febbraio 2016		6,0	62,2	31,8
C16 maggio 2015	polla	2,2	69,7	28,1
C16 febbraio 2016		3,3	74,7	22,0

Tab. 5 – Risultati delle analisi granulometriche relative alle due date di campionamento.

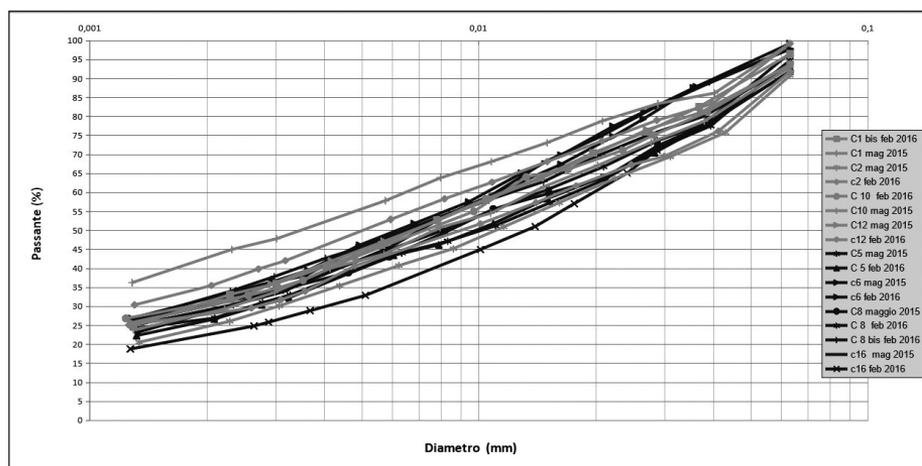


Fig. 6 – Curve granulometriche dei campioni di fango. In grigio sono riportati i campioni prelevati dai coni e in nero quelli prelevati dalle polle.

## 5. Discussione

Dalle analisi mineralogiche semi-quantitative riportate in Tab. 2 risulta che le composizioni dei fanghi, qualitativamente simili tra loro, differiscono nelle percentuali con cui i vari minerali si presentano. In particolare, i campioni sono composti da quarzo, calcite, mica/illite, plagioclasio, caolinite, clorite, dolomite, smectite, rutilo/anatasio e K-feldspato. In ogni campione il quarzo è il minerale più abbondante, seguito dalla calcite e da mica/illite (all'incirca in uguali percentuali) e plagioclasio. Clorite, dolomite, smectite, rutilo/anatasio e K-feldspato sono presenti in tracce o assenti.

Nonostante non si possa fare un confronto quantitativo tra i vari campioni, si può comunque notare il basso contenuto di mica/illite nel campione C8 e il tenore relativamente più alto di caolinite nel campione C16. Per quanto riguarda i minerali argillosi, per tutti i campioni si può assumere il seguente ordine di abbondanza: illite>caolinite>clorite, smectite.

I dati diffrattometrici dei tre campioni C1, C8 e C16 – selezionati per la normalizzazione rispetto al quarzo e alla mica/illite (Tab. 3) – evidenziano

come C8, fango proveniente dalla polla recentemente formatasi in zona “Garfagnine” (C in Tab. 1 e Fig. 2), contenga meno fasi argillose e molto più quarzo e calcite degli altri due fanghi. Dai risultati delle analisi granulometriche (Tab. 5) emerge che C1 e C16 si possono classificare come “limo con argilla”, mentre C8 come “limo con argilla debolmente sabbioso” (A.G.I., 1977). L’analisi granulometrica del campione C1 – caratterizzato dalla più alta percentuale di argilla (42,4%) – ben si accorda con la composizione mineralogica, caratterizzata da una percentuale elevata di mica/illite, caolinite e clorite. Il campione C8 risulta quello con il maggiore contenuto di sabbia (8,1%) e ciò è in accordo con i dati ottenuti dalle analisi mineralogiche normalizzate alla mica/illite, dove si nota che questo campione contiene più quarzo, plagioclasio e calcite degli altri. Il campione C16, con il massimo contenuto di limo e il minimo di argilla fra i tre, si presenta granulometricamente come campione intermedio tra C8 e C1 (Tab. 5).

Va ricordato che il campione C1, a più alta percentuale di frazione argillosa, appartiene al cono del sistema “Nando Ovest”, mentre quello più povero in frazione argillosa e più ricco in limo è stato raccolto nella polla C16, stabile almeno dagli anni ‘70 del XX secolo e mai evoluta in cono. Il campione C8, a più alto contenuto sabbioso rispetto agli altri due, corrisponde alla polla “C-Garfagnine”, di recente formazione e in fase di evoluzione verso il cono. Le analisi granulometriche hanno evidenziato che nelle Argille Azzurre plio-pleistoceniche affioranti a Nirano la classe granulometrica dominante non è quella dell’argilla bensì del limo.

Dal confronto tra le granulometrie e le diffrazioni si nota che alcuni risultati non sono del tutto concordanti. In particolare ciò si verifica per il campione C16. Dagli spettri normalizzati al quarzo risulta essere il campione con più minerali argillosi, mentre dalle granulometrie risulta essere quello con meno argilla. Parte di queste incongruenze possono essere dovute al fatto che le analisi in diffrazione e le analisi granulometriche sono state eseguite su fanghi probabilmente campionati in punti differenti del cono. I fanghi usati per le analisi diffrattometriche, prelevati dalle pareti interne del cono, sono stati macinati e resi quindi inutilizzabili per le analisi granulometriche. Queste ultime sono state probabilmente eseguite su campioni raccolti più vicino al centro della bocca del vulcano, dove il fango può essere più fluido.

È interessante tentare di individuare un’eventuale relazione tra granulometria e viscosità dei fanghi e morfologia degli apparati. A questo scopo, si fa riferimento alla Fig. 15 del contributo di Macini & Mesini (2017, in questo volume) in cui sono riportate le curve reologiche di nove campioni di fango confrontate con la viscosità dell’acqua alla stessa temperatura e pressione. Mentre un gruppo di campioni mostra caratteristiche reologiche molto simili a quelle dell’acqua (le polle C3, C5, C6 e C16 e il cono C1), un altro (costituito

dai campioni C12, C2, C10 e C8) ha un comportamento più pseudo-plastico. Tre di questi fanghi (C12, C2 e C10) sono emessi da coni (riportati rispettivamente come “G-Fernando”, “B-Nando” ed “E-Egidio” in Fig. 2), mentre il quarto fango C8 è stato campionato in una polla di recente formazione (C in Fig. 2) che in pochi mesi successivi al campionamento si stava già trasformando in un piccolo cono. Questi risultati suggeriscono l’esistenza di una relazione tra viscosità del fango e morfologia dell’apparato.

Al fine di stabilire la formazione da cui provengono i fanghi estrusi dagli apparati di Nirano, i risultati ottenuti dalle analisi mineralogiche di questo studio sono stati confrontati sia con i dati quantitativi ottenuti da Carpenito (2007) su un campione di Argille Azzurre plio-pleistoceniche raccolto sul Torrente Tiepido a Gorzano (MO), sia con quelli di Gualtieri (comunicazione personale) eseguite su un campione di Argille Azzurre plio-pleistoceniche raccolte nell’area di Nirano.

I dati di Tab. 6 indicano che i fanghi delle Salse di Nirano qui studiati presentano una composizione mineralogica simile dal punto di vista qualitativo a quella delle Argille Azzurre plio-pleistoceniche di Gorzano, con valori di calcite confrontabili, contenuti inferiori di minerali argillosi e superiori di quarzo.

	Quarzo	Albite	K-felds	Mu-illite	Clorite	Caolinite	Smectite	Calcite/Dolomite	Fase amorfa
<b>Fasi (peso%)</b>									
<b>TOPAS-A</b>	25,2 (2)	5,7 (2)	2,1 (1)	24,7 (3)	12,7 (3)	6,2 (2)	-	17,6 (1) / 2,8 (1)	3,0 (1,4)
<b>GSAS</b>	25,3 (1)	5,8 (2)	1,9 (2)	25,1 (3)	12,6 (3)	6,0 (3)	-	17,7 (1) / 2,7 (1)	2,9 (1,5)

Tab. 6 – *Analisi mineralogica quantitativa eseguita tramite i programmi TOPAS-A e GSAS sul campione 10 appartenente alle Argille Azzurre plio-pleistoceniche raccolto a Gorzano (MO) sul torrente Tiepido (Carpenito, 2007).*

Dal confronto con le Argille Azzurre di Nirano analizzate da Gualtieri (Tab. 7) si nota che i fanghi di Nirano presentano una simile composizione mineralogica anche se clorite, K-feldspato e calcite sono meno abbondanti e il quarzo è più abbondante. In particolare, la variabilità nel contenuto di carbonati dei fanghi qui analizzati (17,8 - 22,3%) è più bassa di quella delle analisi di Gualtieri (23,2 - 31,9%).

Campioni	1	2	3	4	5	6
	Fasi (peso %)					
Calcite	20,3	21,0	23,1	30,1	24,7	28,3
Caolinite	9,5	4,2	4,9	5,6	1,1	8,4
Clorite	7,8	11,2	12,4	11,4	6,9	5,5
Dolomite	2,9	2,9	2,9	1,8	2,5	1,1
K-Feldspato	8,5	7,7	10,4	10,8	2,0	8,5
Muscovite/Illite	16,1	15,8	3,3	2,4	19,5	16,8
Plagioclasio	5,9	6,5	5,9	3,9	8,1	3,1
Quarzo	26,5	30,3	35,5	31,0	24,2	26,5
Smectite	2,4	0,4	1,6	2,9	1,1	1,7

Tab. 7 – *Analisi mineralogiche quantitative eseguite su sei campioni delle Argille Azzurre plio-pleistoceniche nella zona delle Salse di Nirano (da A. Gualtieri, comunicazione personale).*

## 6. Conclusioni

In seguito ad analisi mineralogiche qualitative e semi-quantitative, analisi granulometriche e chimiche (calcimetrie) e dal confronto dei risultati ottenuti con dati bibliografici, si è giunti alla conclusione che le bocche degli apparati di Nirano estrudono fanghi molto simili dal punto di vista della composizione mineralogica, ma leggermente diversi tra loro dal punto di vista quantitativo. In particolare, le differenze maggiori si riscontrano nel contenuto di quarzo, calcite e minerali argillosi. I dati mineralogici sono compatibili con quelli ottenuti da studi sulla Formazione delle Argille Azzurre plio-pleistoceniche, formazione piuttosto eterogenea per quanto riguarda i rapporti quantitativi delle fasi mineralogiche, a causa della presenza di intercalazioni sabbiose e marnose. Questa conclusione è in accordo con i risultati dello studio micropaleontologico eseguito da Papazzoni (2017, in questo volume) sugli stessi campioni di fanghi. È inoltre compatibile con il modello suggerito da Albarello (2017, in questo volume), secondo cui l'attività degli apparati di Nirano è legata a un flusso di gas originato in profondità, che attraversa e trascina verso l'alto lo strato argilloso – sostanzialmente fermo rispetto al mezzo incassante – che riempie il condotto.

Con l'eccezione di un paio di campioni, non si osservano effetti significativi di stagionalità nella distribuzione granulometrica dei fanghi studiati.

Dividendo i campioni in base alla morfologia degli apparati (coni e polle) si può concludere che, generalmente, i coni hanno granulometria più fine delle polle. In particolare, la polla C16, nella zona delle "Polle Alte", avente la granulometria più grossolana, è stabile da oltre 40 anni e non si è mai evoluta in un cono.

### ***Ringraziamenti***

*Si ringraziano la Dott.ssa Francesca Talami per la collaborazione prestata durante le fasi di campionamento e i Proff. Stefano Conti, Maurizio Mazzucchelli e Giovanni Tosatti per il prezioso lavoro di revisione e di editing del manoscritto.*





Cesare Andrea Papazzoni\*

## Studio micropaleontologico dei fanghi delle Salse di Nirano

### **Riassunto**

*I fanghi estrusi dalle Salse di Nirano sono stati per la prima volta esaminati allo scopo di determinarne il contenuto in microfossili. L'analisi di 14 campioni prelevati da coni, polle e colate, più uno di confronto prelevato nella stessa area ma al di fuori della zona di attività lutivoma, ha permesso di isolare una fauna a foraminiferi (bentonici e planctonici) piuttosto ricca e diversificata, comprendente 97 specie e 50 generi diversi. Le associazioni fossili sono piuttosto omogenee e tutte compatibili con l'età plio-pleistocenica della Formazione delle Argille Azzurre che affiora al margine appenninico. I dati di questa prima analisi sembrano suggerire che la produzione dei fanghi avvenga entro un serbatoio relativamente superficiale.*

### **Abstract**

*Preliminary micropalaeontological study of the muds of the Nirano mud volcanoes. A micropalaeontological analysis of the muds of the Nirano mud volcanoes was carried out in order to determine their microfossil content. Fourteen samples were taken from cones, level-pool mud vents and mud flows, whereas a fifteenth sample was collected for comparison outside the mud volcano area. Overall, they revealed a rich and diversified foraminiferal fauna (both benthic and planktonic), with 97 species and 50 different genera. The fossil assemblages are fairly homogeneous and all consistent with the Plio-Pleistocene age of the "Argille Azzurre" Formation cropping out at Pede-Apennines. Therefore, these data suggest that mud production takes place within a relatively superficial reservoir.*

**Parole chiave:** Foraminiferi bentonici, foraminiferi planctonici, Argille Azzurre, Pliocene, Pleistocene.

**Key words:** Benthic foraminifera, planktonic foraminifera, "Argille Azzurre" Formation, Pliocene, Pleistocene.

---

\* Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, Via G. Campi 103, 41125 MODENA; e-mail: cesareandrea.papazzoni@unimore.it.

## 1. Introduzione

Le Salse di Nirano rappresentano una delle più importanti manifestazioni del fenomeno dei vulcani di fango in Italia, con la prima documentazione risalente addirittura a Plinio il Vecchio (I secolo d.C.). Attualmente esse sono protette da una Riserva Naturale, istituita nel 1982 dalla Regione Emilia-Romagna.

Il Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche dell'Università di Modena e Reggio Emilia, in collaborazione con l'Amministrazione comunale di Fiorano Modenese, ha intrapreso un progetto di studio interdisciplinare del complesso delle Salse di Nirano (Castaldini *et al.*, 2017 nel presente volume). All'interno di questo progetto rientra anche, per la prima volta, un'analisi del contenuto micropaleontologico dei fanghi delle Salse di Nirano.

## 2. Inquadramento geologico-stratigrafico

Le Salse di Nirano sono interamente contenute in un'area nella quale affiora unicamente la Formazione delle Argille Azzurre (FAA), di età compresa tra il Pliocene inferiore e il Pleistocene inferiore (Gasperi *et al.*, 2005). Poiché però i fluidi in risalita sono alimentati da rocce magazzino a profondità tuttora non identificata e non è esclusa la presenza di più serbatoi a diverse profondità, si deve considerare preliminarmente una possibile provenienza di microfossili anche dalle formazioni sottostanti.

Secondo Oppo *et al.* (cfr. Fig. 3C in Oppo *et al.*, 2013) Nirano si troverebbe su una struttura di sovrascorrimento, con le Unità Liguri e Subliguri (Giurassico-Oligocene) ed Epiliguri (Eocene-Burdigaliano) alla base della FAA; al di sotto delle Liguridi si trovano di nuovo unità mioceniche che Bonini (cfr. Fig. 2E in Bonini, 2008a) ascrive alla Formazione Marnoso-Arenacea (FMA). Secondo lo stesso Autore, i fluidi degli apparati lutivomi di Nirano potrebbero avere un serbatoio profondo (a circa 2 km) proprio entro la FMA, ed uno più superficiale (entro i 200-300 m) nelle formazioni della Successione Epiligure.

Tutte le formazioni sopra citate possono, in linea di principio, contribuire ad "inquinare" i fanghi in risalita con particelle, clasti e microfossili, se il serbatoio principale si trova a profondità significativa. Inoltre, data la sicura migrazione dei fluidi a partire da una ancora più profonda roccia madre, esiste la possibilità che materiali ancora più antichi possano essere contenuti nei fluidi in risalita.

## 3. Materiali e metodi

L'analisi micropaleontologica dei fanghi delle Salse di Nirano è stata eseguita allo scopo di verificare la presenza e la composizione delle associazioni a microfossili nella parte solida in sospensione entro i fluidi eiettati da coni e polle.

Sono stati prelevati campioni da diversi punti dell'area di studio, sia direttamente dai condotti di risalita dei fanghi, sia dalle colate superficiali. È stato inoltre prelevato un campione di confronto (NIR 03) vicino a Strada Riola, nei pressi di un fronte di cava abbandonato, a circa 1,9 km a nord dell'area delle Salse di Nirano, in Argille Azzurre non interessate da emissioni di fango. In totale sono stati esaminati 15 campioni (Fig. 1).

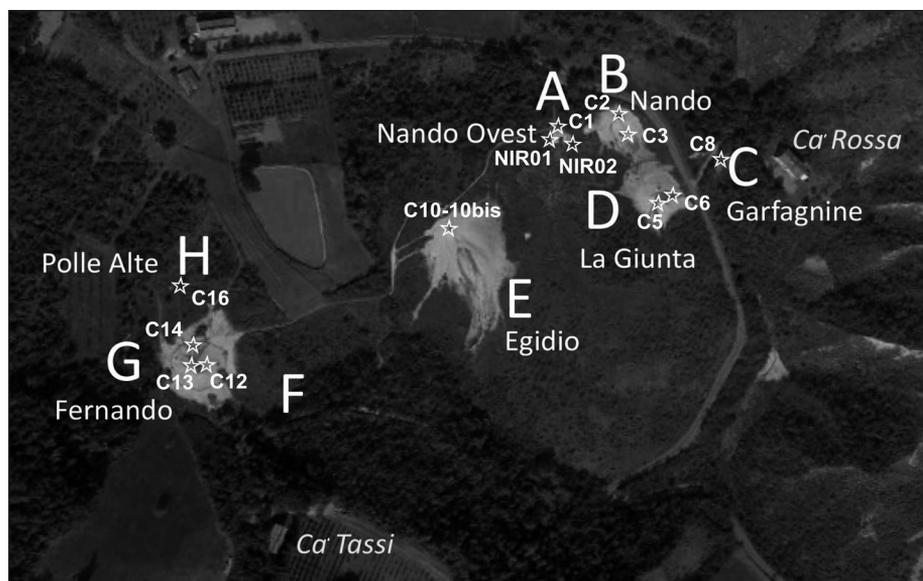


Fig. 1 – Ubicazione dei campioni studiati (base da Google earth). Per la posizione del campione NIR03 si veda il testo.

Tutti i campioni sono stati trattati con perossido di idrogeno ( $H_2O_2$ ), lavati e setacciati seguendo le tecniche standard per ottenere frazioni granulometriche utili al riconoscimento e separazione dei microfossili. La separazione e il riconoscimento dei microfossili hanno permesso di ottenere dati utili per l'interpretazione e di supporto alle altre ricerche in corso nell'area delle Salse. In ognuno dei campioni sono stati trovati microfossili in quantità sufficiente per ricostruire un'associazione confrontabile con gli altri campioni.

Per l'identificazione dei foraminiferi si è fatto riferimento principalmente ad Agip (1982).





## 5. Discussione e conclusioni

Secondo l'interpretazione di Bonini (2008a), le risalite di fluidi (acqua e idrocarburi) alle Salse di Nirano sarebbero da ricondurre a un serbatoio profondo, situato entro la Formazione Marnoso-Arenacea, composta principalmente da arenarie e siltiti di età miocenica. La presenza di sovrascorrimenti delle più antiche Unità Liguri e Subliguri (Giurassico-Oligocene) fungerebbe da copertura, interrotta dalle faglie inverse attraverso le quali i fluidi potrebbero risalire fino alle formazioni della Successione Epiligure (Eocene-Miocene) immediatamente sottostanti la Formazione delle Argille Azzurre, dove si troverebbe il serbatoio più superficiale, delimitato appunto dalle argille plio-pleistoceniche.

L'analisi micropaleontologica era quindi finalizzata a individuare la presenza di elementi estranei al Plio-Pleistocene, per ottenere indizi di eventuale risalita di materiale da profondità significative. Tuttavia, come sopra riportato, non è stato identificato alcun elemento sicuramente riferibile a età più antiche e quindi nessun indizio di mescolanza di materiale proveniente da profondità diverse.

In conclusione, lo studio micropaleontologico dei fanghi delle Salse di Nirano, eseguito per la prima volta in modo sistematico, anche se quantitativamente limitato, ha fornito dati preliminari interessanti che sembrano indicare la produzione di fango da serbatoi prevalentemente superficiali, entro le Argille Azzurre plio-pleistoceniche, cioè la formazione affiorante in loco, confermando le conclusioni preliminari di Accaino *et al.* (2007). Tale indicazione, tuttavia, risulta limitata dalla ridotta quantità di campioni esaminati, nonché dalla possibilità che la parte liquida sia risalita da profondità più elevate senza trascinare materiale solido (e quindi microfossili). Risulta perciò necessaria l'integrazione con i dati ottenuti in modo indipendente dall'analisi delle altre caratteristiche dei fluidi per giungere ad un modello coerente con tutte le osservazioni fin qui svolte.

### **Ringraziamenti**

*Si ringrazia il Dott. Giovanni Ferrarini per il lavoro di separazione dei microfossili eseguito durante lo svolgimento della propria tesi di Laurea triennale in Scienze Geologiche. Un ringraziamento particolare va alla Dott.ssa Claudia Grillenzoni per la determinazione dei foraminiferi planctonici. Ringrazio infine il Prof. Stefano Conti per i preziosi suggerimenti riguardanti la geologia dell'area delle Salse.*



**Dario Albarello\***

## Misure sismiche nell'area delle Salse di Nirano

### **Riassunto**

*La nota descrive i risultati preliminari ottenuti dal monitoraggio sismico condotto nell'area delle Salse di Nirano. In particolare sono state condotte misure velocimetriche con sensori tri-direzionali allo scopo di monitorare possibili fenomeni di gorgogliamento nel reservoir presumibilmente presente al di sotto dell'area di studio e responsabile delle emissioni superficiali. L'ipotesi di fondo è che l'emissione dei vulcani di fango sia determinata dalla risalita di bolle di gas che si propagano lungo il condotto fino alla superficie e che nel loro moto queste bolle emettano onde acustiche nella banda subsonica la cui frequenza è indicativa delle dimensioni della bolla stessa. I risultati ottenuti sembrano incoraggianti anche se, al momento, di difficile interpretazione.*

### **Abstract**

*Seismic measurements at the Nirano mud volcanoes. The preliminary results from seismic monitoring carried out at the Nirano mud volcanoes are described. In particular, velocimetry measurements by means of three-directional sensors were performed in order to monitor possible bubbling phenomena in the reservoir that is presumably present beneath the study area and which is responsible for surface emissions. The mud volcanoes' activity is likely to be caused by the uprising of gas bubbles that propagate along conduits up to the surface. During their movements, these bubbles emit acoustic waves in the subsonic band; their frequency is indicative of the dimensions of the bubbles. The results so far obtained are encouraging, although at present their interpretation is difficult.*

**Parole chiave:** monitoraggio sismico, misure velocimetriche, vulcani di fango, Nirano.

**Key words:** seismic monitoring, velocimetry measurements, mud volcanoes, Nirano, Italy.

---

\* Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente - Università degli Studi di Siena, Via Laterina 8, 53100 SIENA; e-mail: dario.albarello@unisi.it.

## 1. Introduzione

Uno degli elementi maggiore interesse nello studio della dinamica dei vulcani di fango è la valutazione delle variazioni di flusso a cui le emissioni gassose sono soggette nel corso del tempo (Albarello, 2005; Kopf *et al.*, 2010). Questo tipo di misura è assai complesso a causa del carattere distribuito dei centri di emissione e della loro tendenza alla migrazione nel corso del tempo (cfr. Martinelli *et al.*, 1995; Albarello *et al.*, 2003). Tali caratteristiche rendono complessa la messa in opera di sistemi di captazione diretta del flusso gassoso e poco rappresentativi i risultati ottenuti. Per superare questi problemi è stata recentemente proposta una nuova tecnica di monitoraggio basata sulla misura di segnali sismici nella banda subsonica (Albarello *et al.*, 2005, 2007, 2012).

## 2. Modello di riferimento

A fondamento di questa tecnica sta il modello di vulcano di fango illustrato in Fig. 1.

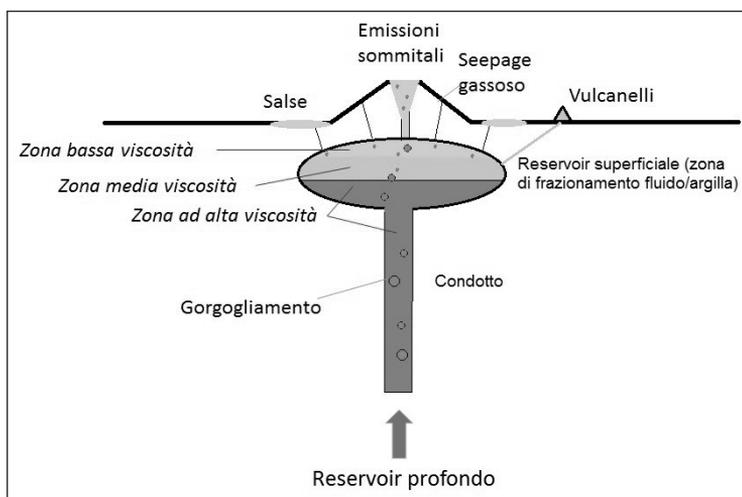


Fig. 1 – *Modello di riferimento per le emissioni gassose di un vulcano di fango* (Albarello, 2005).

Le principali caratteristiche di questo modello (Albarello, 2005) sono le seguenti:

- i) L'attività degli apparati è essenzialmente legata al flusso di gas originato in profondità: l'argilla che riempie il condotto è sostanzialmente ferma rispetto al mezzo incassante e viene trascinata verso l'alto dal flusso gassoso.

- ii) I cambiamenti nell'attività del vulcano sono quindi legati a variazioni del flusso di gas indotti da variazioni di pressione nel *reservoir* profondo che alimenta gli apparati.
- iii) Data la sostanziale impermeabilità dell'argilla, il flusso di gas avviene per gorgogliamento ovvero mediante treni di bolle gassose che risalgono per galleggiamento lungo il condotto di alimentazione.
- iv) Le bolle riescono a risalire solo quando raggiungono una dimensione sufficiente a vincere la viscosità del fluido che riempie il condotto.

### 3. Monitoraggio sismico

In questo modello, la dinamica del gorgogliamento (ovvero della formazione e risalita delle bolle di gas) risulta essere centrale nello studio dei vulcani di fango. D'altro canto, le bolle in movimento all'interno di una sostanza fluida esibiscono una importante proprietà che offre nuove possibilità nel monitoraggio dalla superficie delle attività in corso all'interno del vulcano di fango. Infatti, quando soggette ad una perturbazione (per esempio al distacco dalle pareti del condotto o quando soggette a coalescenza), le bolle di gas subiscono variazioni di forma che producono emissioni acustiche (risonanza) a una frequenza che è circa proporzionale alle dimensioni della bolla (Albarello *et al.*, 2012).

Ci si aspetta che queste emissioni acustiche si trasmettano al mezzo incassante e generino onde sismiche circa monocromatiche polarizzate linearmente in direzione radiale (onde di compressione) che possono propagarsi nel mezzo circostante ed essere quindi misurate mediante sismografi posti alla superficie del terreno.

Se il sismografo è abbastanza vicino alla sorgente e il mezzo è con buona approssimazione omogeneo, dallo studio della polarizzazione dei segnali ottenuti è possibile risalire alla dimensione della bolla e alla sua posizione (in termini di azimut e angolo di immersione) rispetto al sensore.

Questa tecnica di monitoraggio è stata applicata durante campagne di misura (2006 e 2007) svolte sul vulcano di fango Dashgil in Azerbaigian, i cui risultati sono discussi in Albarello *et al.* (2012). Un esempio di questa applicazione è riportato in Fig. 2.

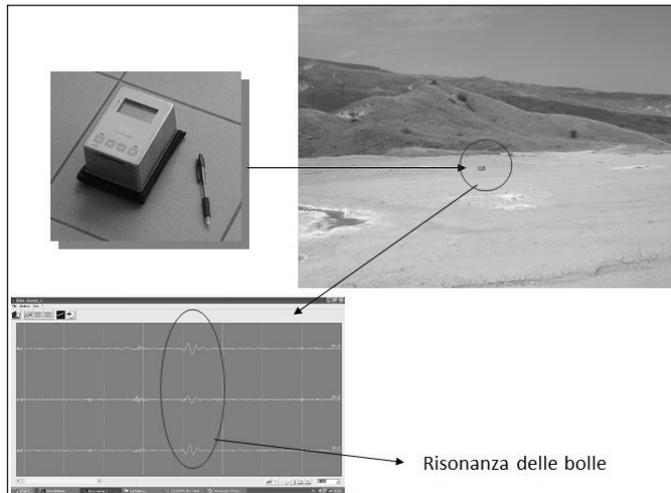


Fig. 2 – Esempio di applicazione della tecnica di monitoraggio sismico del vulcano di fango Dashgil (Azerbaijan). In alto a sinistra il tromografo digitale mod. Tromino<sup>®</sup> utilizzato per le misure (a destra in alto). In basso a sinistra è riportato il segnale sismico interpretato come rappresentativo della risonanza di una bolla.

#### 4. Campagne di misura nell'area di Nirano e modalità di analisi

La tecnica di monitoraggio descritta sopra è stata applicata nell'area delle Salse di Nirano. In particolare, sono stati identificati quattro siti di misura, ubicati nella zona degli apparati lutivomi orientali, e sono state eseguite cinque campagne di acquisizione (Fig. 3). Le misure sono state condotte utilizzando lo stesso apparato (tramite sismografo digitale tri-direzionale modello Tromino<sup>®</sup>) orientando lo strumento verso nord e campionando il segnale sismico per 20 min in ogni sito di misura.

L'analisi dei dati ha avuto come obiettivo quello di indentificare le tracce della risonanza delle bolle generate nei diversi centri di emissione. In particolare l'analisi è stata rivolta alla:

- a. Identificazione dei segnali potenzialmente generati dalle bolle mediante analisi di polarizzazione e identificazione di marker spettrali specifici.
- b. Stima delle direzioni di emersione dei segnali polarizzati (azimut e immersione).
- c. Identificazione dei centri di emissione combinando dati da misure condotte in modo asincrono.

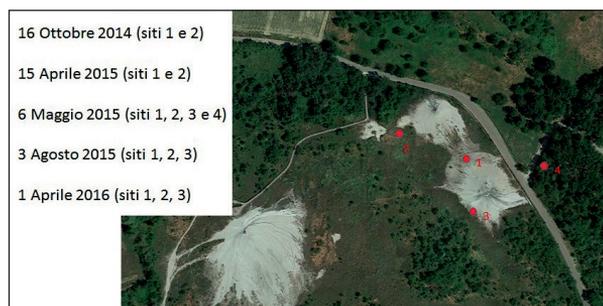


Fig. 3 – Posizione dei siti di misura per il monitoraggio sismico dell'attività nell'area di Nirano e campagne di misura effettuate fra il 2014 ed il 2016 (base da Google earth).

Nella Fig. 4 è riportato un esempio delle analisi preliminari effettuata in un sito di misura. L'analisi ha come elemento chiave la valutazione del livello di linearità della polarizzazione relativa al segnale: solo segnali caratterizzati da un elevato livello di polarizzazione lineare vengono considerati rappresentativi dell'attività di gorgogliamento. Su questi segnali viene poi valutata la direzione di polarizzazione e quindi identificata la direzione di provenienza. In Fig. 5 è riportata un'altra rappresentazione dei risultati ottenuti allo stesso sito e volta a mettere in evidenza le proprietà statistiche dei segnali registrati (e le relative ambiguità).

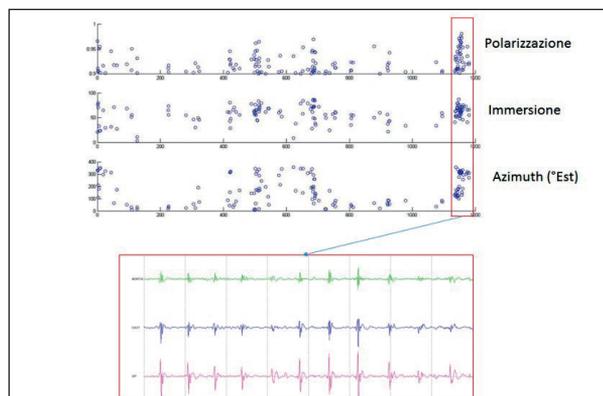


Fig. 4 – Esempio di analisi del segnale sismico prodotto dal gorgogliamento (misure condotte il 16 ottobre 2014 al Sito 1 in Fig. 3). In alto sono riportati (in forma di punti in funzione del tempo in secondi) gli andamenti di alcuni parametri potenzialmente rappresentativi dell'attività di gorgogliamento. In particolare, i tre grafici in alto nella figura rappresentano rispettivamente la linearità della polarizzazione, l'immersione e la direzione di provenienza dei singoli impulsi (nella rappresentazione è stata fissata una soglia minima del 90% per la linearità della polarizzazione). Nel riquadro in basso viene riportato un esempio del segnale registrato durante un breve intervallo temporale: si noti il carattere impulsivo dei segnali osservati.

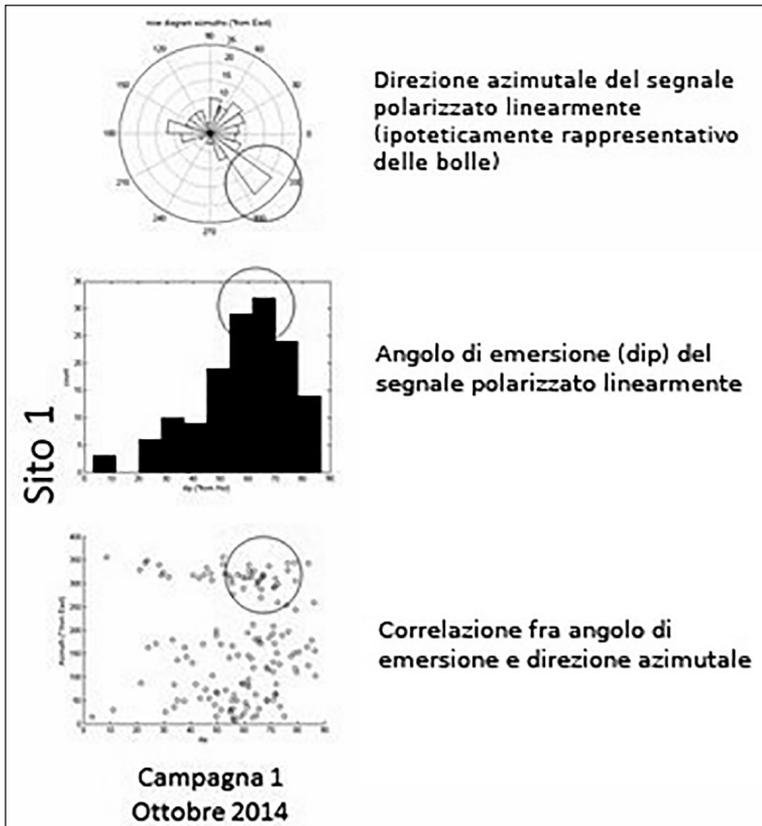


Fig. 5 – Statistiche relative ai segnali registrati il 16 ottobre 2014 al Sito 1 e mostrati in Fig. 4. A sinistra la distribuzione azimutale della direzione di polarizzazione (il cerchio indica la direzione prevalente). Il grafico al centro riporta la distribuzione in frequenza dell'angolo di emersione della direzione di polarizzazione osservata. L'ultimo grafico a sinistra riporta la correlazione fra l'angolo di emersione e la direzione di provenienza dei segnali: una concentrazione di punti in questo grafico indica la persistenza di un unico centro di emissione.

Nelle figure che seguono (Figg. 6, 7 e 8) sono riportati alcuni risultati preliminari relativi alle analisi condotte finora relativamente ai diversi siti considerati nelle campagne di misura condotte fra il 2014 e il 2016. In particolare, vengono messi a confronto i risultati ottenuti nei diversi siti nel corso delle diverse campagne. Questo tipo di confronto risulta utile per valutare il livello di persistenza dei risultati e quindi la persistenza dei potenziali centri di emissione del segnale registrato e quindi della presenza di specifiche zone di gorgogliamento potenzialmente associate a condotti diversi o ai possibili *reservoir* superficiali ipotizzati nel modello di riferimento (Fig. 1).

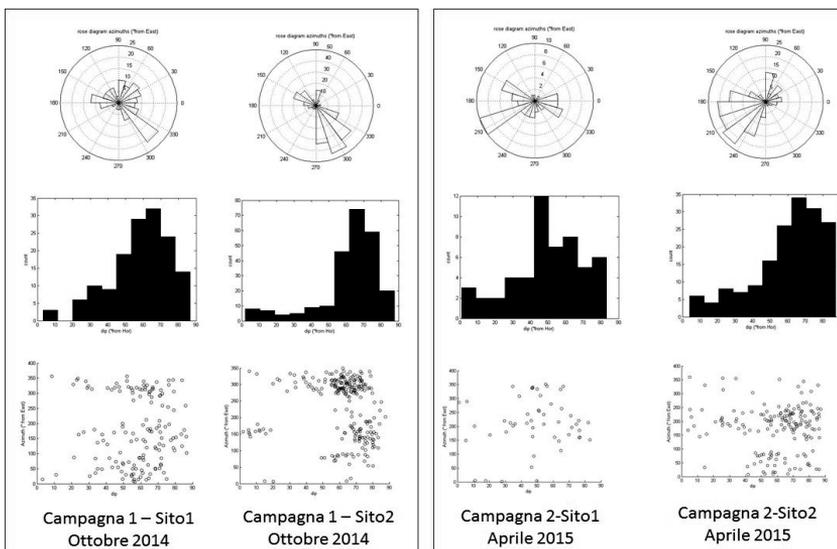


Fig. 6 – Confronto fra i risultati ottenuti nei siti 1 e 2 a poche ore di distanza nel corso delle prime due campagne di misura.

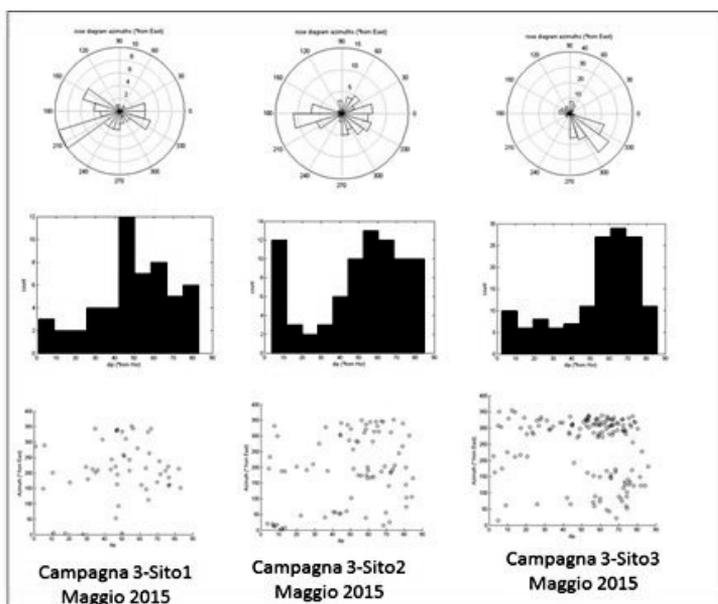


Fig. 7 – Confronto fra i risultati ottenuti nei siti 1, 2 e 3 a poche ore di distanza nel corso della terza campagna di misura.

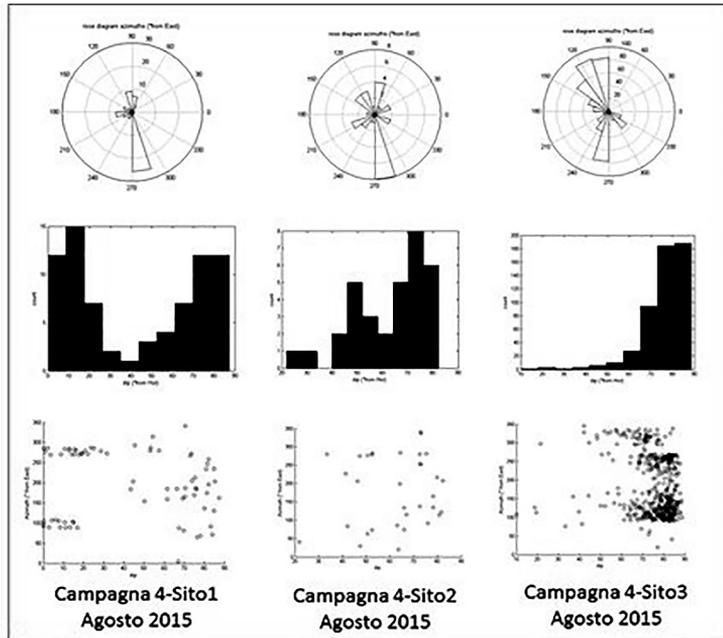


Fig. 8 – Confronto fra i risultati ottenuti nei siti 1, 2 e 3 a poche ore di distanza nel corso della quarta campagna di misura.

## 5. Conclusioni

Le indicazioni ottenute dalle campagne di misura effettuate finora indicano la presenza di segnali sismici di potenziale interesse per lo studio delle emissioni gassose dei vulcani di fango nell'area di Nirano. Anche se solo a livello preliminare, il livello di polarizzazione mostra che quanto registrato può essere l'effetto di emissioni acustiche provenienti da bolle in movimento nel sottosuolo. Anche se le analisi finora effettuate non hanno ancora dato indicazioni coerenti riguardo alla possibile collocazione dei centri di emissione, i risultati sono incoraggianti, suggerendo la presenza di sorgenti diverse che cambiano nel corso del tempo anche in termini di intensità di emissione. Le analisi condotte finora potranno in futuro essere raffinate adottando specifiche tecniche di filtraggio digitale finalizzate alla riduzione del rumore generato da sorgenti diverse da quelle oggetto di studio.



Paolo Macini\*, Ezio Mesini\*

## Indagini sperimentali sulle caratteristiche reologiche di alcuni fanghi emergenti dalle Salse di Nirano

### **Riassunto**

Le indagini di questo lavoro hanno riguardato l'esecuzione di misure di laboratorio volte a una caratterizzazione reologica dei fanghi emergenti dalle Salse di Nirano, che si presentano come una sospensione instabile di minerali argillosi in acqua salata. Tale caratterizzazione nasce dall'interesse a poter identificare le basi fisiche che potrebbero spiegare l'intermittenza e l'intensità dei fenomeni emissivi (e perciò potenzialmente anche il rischio, in termini di sicurezza per la fruizione del sito a scopo ricreativo e didattico), le modalità fisiche dell'efflusso di fango e gas dai vari apparati eruttivi, nonché la variazione del livello piezometrico e di portata dei singoli apparati. In via preliminare, si è visto che il comportamento reologico dei campioni analizzati non si discosta sensibilmente da quello dell'acqua. Alcuni fanghi mostrano un comportamento interpretabile come pseudoplastico con soglia di scorrimento, sebbene quest'ultima caratteristica necessiti di ulteriori approfondimenti sperimentali, così come lo studio di modalità di campionamento che possano assicurare la rappresentatività del fango presente nelle vie di flusso profonde.

### **Abstract**

*Experimental investigations on the rheological characteristics of some muds ejected at the Nirano mud volcanoes. Laboratory studies aimed at the rheological characterisation of emission products emerging at the Nirano mud volcanoes (Italy) were carried out. These are unstable suspensions of clayey minerals dispersed in salty water. These investigations arose from the interest in identifying the physical bases that could explain the intermittence and intensity of the emissive phenomena, and potentially the hazard in terms of safety for recreational and educational use. The physics of mud and gas flow from various vents of emission clusters, as well as the variation of the piezometric and flow rate of the individual vents, are other issues under investigation. The preliminary results show that the rheological behaviour of the mud samples does not differ significantly from that of water, with limited pseudoplastic behaviour and with a measurable yield point registered only in a few samples. However, this behaviour needs further laboratory investigations, also considering sampling methods that could ensure the representativeness of the mud actually existing in the subsurface conduits that feed the vents.*

**Parole chiave:** Reologia fanghi, fluidi pseudoplastici, soglia di scorrimento, vulcani di fango, Nirano.

**Key words:** Mud rheology, pseudoplastic fluids, yield point, mud volcanoes, Nirano, Italy.

---

\* Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, *Alma Mater Studiorum*, Università di Bologna, Sede di Via U. Terracini 28, 40131 BOLOGNA; e-mail: paolo.macini@unibo; ezio.mesini@unibo.

## 1. Introduzione

La Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano si trova in un territorio collinare, a quote comprese fra 140 e 300 m s.l.m. circa, al margine dell'Appennino, a circa 30 km da Modena. Il sito è visitato annualmente da circa 70.000 persone, e oggi costituisce un geosito di importanza regionale (Castaldini *et al.*, 2007). La Riserva è stata istituita nel 1982 come prima Riserva Naturale dell'Emilia-Romagna con l'obiettivo di tutelare e conservare le caratteristiche geologiche e ambientali dell'area. Il campo dei vulcani di fango di Nirano, tra i più importanti d'Italia e tra i maggiori in Europa, ha da sempre suscitato grande interesse naturalistico e scientifico (Castaldini *et al.*, 2011).

Nel sito si individuano diversi apparati emissivi (gli *spiragli lutivomi* di Lorenzi, 1902) di dimensioni variabili: il campo è molto attivo e le emissioni dei vari tipi di apparati sono più o meno intense, anche in relazione ai periodi stagionali. Attualmente, il complesso degli apparati delle Salse di Nirano occupano un'area di circa 55.000 m<sup>2</sup>. La morfologia dell'area emissiva è in continua evoluzione, poiché periodicamente si aprono nuovi apparati emissivi (come ad es. nel maggio del 2016) e si ha quindi la formazione di nuovi conetti o nuove polle, mentre altri apparati esauriscono la loro attività (Ferrari & Vianello, 1985; Martinelli & Rabbi, 1998; RER, 2010).

I vulcani di fango (localmente detti "salse") sono forme endogene, ossia emissioni di fango freddo prodotte dalla risalita in superficie di acqua salata e fangosa lungo faglie e discontinuità delle formazioni geologiche. Il fluido emesso dalle salse (da qui in poi indicato semplicemente come "fango") è una sospensione di minerali argillosi in acque salate fossili (e/o frammista ad acque meteoriche), spesso associata a idrocarburi, principalmente gassosi, in cui normalmente predomina il gas naturale, spesso associato a CO<sub>2</sub>, e più raramente idrocarburi liquidi. Queste forme endogene in Italia sono principalmente presenti lungo il margine esterno della catena appenninica, nel lato padano-adriatico, fino in Sicilia; a volte sono apparati singoli, ma più spesso formano gruppi (detti "campi") di varia estensione e importanza (Martinelli & Judd, 2004; Bonini, 2008a; Castaldini & Coratza, 2017).

La specifica indagine di questo lavoro ha riguardato l'esecuzione di misure di laboratorio volte alla caratterizzazione reologica dei fanghi delle Salse di Nirano, che si presentano come una sospensione instabile di minerali argillosi in acqua salata. Tale caratterizzazione nasce dall'interesse a identificare le basi fisiche che potrebbero spiegare l'intermittenza e l'intensità dei fenomeni emissivi (e perciò potenzialmente anche la loro violenza, nei termini di sicurezza per la fruizione del sito a scopo ricreativo e didattico), le modalità fisiche dell'efflusso di fango e gas dai vari apparati emissivi, nonché la variazione del livello piezometrico e di portata dei singoli apparati (Accaino *et al.*, 2007; Bonini, 2008b; Albarello, 2005; Manga & Bonini, 2012).

Il comportamento reologico di un liquido, e in particolare le sue caratteristiche di tissotropia, il suo comportamento reologico, di tipo (presumibilmente) non newtoniano e la presenza effettiva di una soglia di scorrimento (ancorché piccola), potrebbero aiutare a formulare modelli fisici più precisi circa la vera natura del fenomeno delle salse.

Le sospensioni di minerali argillosi in acqua, sia quelle naturali, sia quelle appositamente modificate dal punto di vista chimico, fisico e reologico, sono ampiamente studiate in svariati ambiti applicativi. Si ricorda, ad esempio, il loro utilizzo in campo civile e minerario, per lo studio delle formulazioni e il controllo di campo dei fluidi di perforazione, lo studio e l'analisi idro-meccanica delle colate di argilla ecc. Proprio per questo motivo, il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali dell'Università di Bologna, presso cui sono state eseguite le misure, possiede esperienza e attrezzature avanzate per la caratterizzazione reologica delle sospensioni di minerali argillosi in acqua.

## 2. Caratteristiche reologiche delle sospensioni di minerali argillosi in acqua

La reologia è la scienza che studia gli sforzi e le deformazioni che si generano all'interno di un fluido in moto. Da un punto di vista pratico, i fluidi reali possono essere divisi in due grandi classi: i fluidi newtoniani (o perfettamente viscosi) e i fluidi non-newtoniani.

Il moto di un fluido è la risultante delle azioni di scorrimento di un filetto fluido sull'altro. Per mantenere il moto è necessario un continuo apporto di energia. Lo scorrimento dei filetti fluidi genera sforzi di taglio all'interno del fluido, la cui intensità dipende dalla velocità e dalla viscosità del fluido stesso. La viscosità è la proprietà che controlla l'entità degli sforzi di taglio che si sviluppano quando un filetto fluido scorre sull'altro, e può essere vista come una sorta di misura della resistenza interna offerta dalle forze coesive esistenti tra le molecole del fluido in moto. Considerando un moto laminare tra due filetti fluidi, di cui uno è fermo e l'altro è in moto e soggetto ad una forza  $F$  agente su di un'area  $A$ , essi scivolano uno relativamente all'altro con un gradiente di velocità noto come deformazione di taglio (*shear rate*), definito come il rapporto tra la differenza di velocità infinitesima  $dv$  tra i due filetti e la distanza infinitesima  $dr$  che li separa. Si definisce sforzo di taglio (*shear stress*) il seguente rapporto:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Nel caso di fluidi newtoniani in moto laminare, a parità di pressione e temperatura, il rapporto tra sforzi e deformazioni di taglio è costante, e non di-

pende né dal gradiente di velocità, né dal suo tempo di applicazione, ma solo dal tipo di fluido, dalla temperatura e dalla pressione. Si può quindi scrivere la seguente espressione:

$$\frac{\tau}{\frac{dv}{dr}} = \mu = \text{const} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

In questo caso, la costante  $\mu$  è definita come viscosità del fluido. Nel Sistema Internazionale, l'unità di misura della viscosità è  $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , ovvero  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ . Nel sistema tecnico è spesso utilizzata l'unità di misura detta Poise (P), con dimensioni  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . Nella pratica è molto utilizzato il centiPoise, poiché la viscosità dell'acqua a temperatura ambiente è circa 1 centiPoise. Si ricorda che 1 centiPoise =  $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ .

Alcuni fluidi (acqua, oli leggeri, gas ecc.) si comportano come fluidi newtoniani, e per essi vale la seguente legge costitutiva lineare, nota come legge di Newton o di Newton-Stokes (il segno negativo dipende dal sistema di riferimento):

$$\tau = \mu \left( -\frac{dv}{dr} \right) = \mu \dot{\gamma}$$

Per i fluidi non newtoniani la situazione è più complessa. A temperatura e pressione costanti, i fluidi non newtoniani non presentano un rapporto costante tra sforzo di taglio e gradiente di velocità. Tali fluidi sono caratterizzati da valori di viscosità (detta apparente, o effettiva, per distinguerla dalla viscosità dei fluidi newtoniani) che dipendono dalla velocità di scorrimento, dal gradiente di velocità, dalle caratteristiche chimico-fisiche del fluido e da altri parametri quali temperatura, pressione, tempo di riposo e tempi di applicazione degli sforzi di taglio. I fluidi non newtoniani si dividono inoltre in due categorie, con caratteristiche dipendenti o indipendenti dal tempo.

### ***2.1. Fluidi non-newtoniani con caratteristiche indipendenti dal tempo d'applicazione dello sforzo di taglio***

In questo primo caso, il rapporto tra sforzi e deformazioni di taglio, definito come viscosità apparente  $\mu_a$ , è una funzione non lineare delle deformazioni di taglio, Fig. 1).

$$\frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \mu_a$$

Sono noti fluidi in cui la viscosità apparente  $\mu_a$  cresce all'aumentare della deformazione di taglio (fluidi dilatanti) e fluidi in cui la viscosità apparente  $\mu_a$  cala all'aumentare della deformazione di taglio (fluidi pseudoplastici).

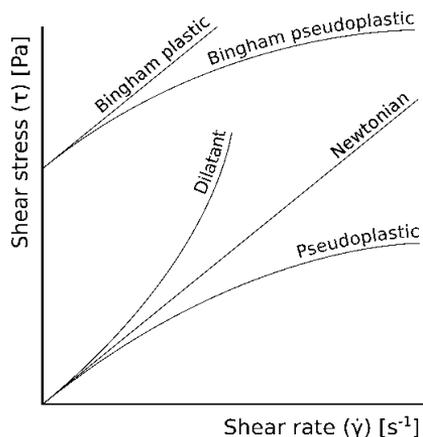


Fig. 1 – Classificazione reologica, in funzione di sforzi e deformazioni di taglio, di fluidi newtoniani e non newtoniani con caratteristiche indipendenti dal tempo d'applicazione dello sforzo di taglio.

Le sospensioni di minerali argillosi in acqua, in particolare quelle contenenti bentonite (miscela di minerali argillosi particolarmente rigonfianti in acqua), hanno un comportamento reologico di tipo pseudoplastico, schematizzabile con il modello reologico di Bingham (Fig. 1), caratterizzato da una soglia di scorrimento  $\tau_y$  (*yield point*) e da una viscosità plastica  $\mu_p$  (*plastic viscosity*), espresso dalla relazione:

$$\tau = \tau_y + \mu_p \left( -\frac{dv}{dr} \right) = \tau_y + \mu_p \dot{\gamma}$$

La correlazione tra viscosità/temperatura nei fluidi non newtoniani è spesso complessa. Nelle misure reologiche è quindi fondamentale controllare la temperatura, tenendo anche conto del fatto che una sollecitazione all'interno di un materiale può generare un suo riscaldamento. In generale, invece, l'effetto della pressione viene trascurato, perché considerato meno significativo.

## 2.2. Fluidi non-newtoniani con caratteristiche dipendenti dal tempo d'applicazione dello sforzo di taglio

Tali fluidi possono essere ulteriormente classificati in: a) fluidi tissotropici, che, sottoposti ad un gradiente di velocità costante, mostrano una diminuzione degli sforzi di taglio all'aumentare del tempo di applicazione del gradiente di velocità; b) fluidi reopettici, a comportamento contrario, che mostrano un aumento degli sforzi di taglio all'aumentare del tempo di applicazione del gradiente di velocità.

Si ricorda che in generale la tissotropia è l'attitudine di un fluido a sviluppa-

re nel tempo una forza di gel, configurandosi come una struttura relativamente “rigida” quando il fluido si trova in stato di quiete; il fluido torna però allo stato fluido in seguito all’applicazione di una forza (ad es. per agitazione meccanica o per applicazione di un differenziale di pressione all’interno di un condotto).

La maggior parte delle sospensioni di minerali argillosi in acqua ha un comportamento pseudoplastico, con la viscosità apparente che diminuisce all’aumentare del gradiente di velocità. Si ricorda che la viscosità apparente è funzione di tre fattori: a) viscosità della fase continua; b) dimensioni, forma e numero delle particelle solide nel fluido di perforazione; c) forze interparticellari, che sviluppano il fenomeno dello *yield point*. Le sospensioni colloidali di minerali argillosi in acqua sono fluidi pseudoplastici con proprietà tissotropiche: tuttavia, nello studio del moto permanente essi possono essere trattati come pseudoplastici puri, perché l’effetto tissotropico si esaurisce dopo un breve tempo d’applicazione del gradiente di velocità.

Per spiegare tali comportamenti, bisogna analizzare la composizione chimica e la struttura interna delle diverse tipologie di fluidi. Le particelle disperse nel fluido mostrano interazioni molecolari e supermolecolari (cioè tra aggregati di più molecole) di tipo ionico che portano alla formazione di agglomerati di maggiori dimensioni e di reticoli tridimensionali. L’applicazione di un gradiente di velocità o di uno sforzo di taglio tende a rompere o rafforzare questi legami e a portare il materiale a una configurazione legata all’entità della sollecitazione.

Nel caso dei fluidi pseudoplastici, all’aumentare del gradiente di velocità si nota una dissociazione e un orientamento delle particelle nella direzione del flusso che porta a una diminuzione di viscosità: tale comportamento è la conseguenza della rottura di legami secondari deboli. Si ottiene il processo inverso, cioè l’aumento di viscosità, quando il gradiente di velocità diminuisce. Ciò è dovuto a una parziale ricostruzione della struttura distrutta in precedenza. Per i fluidi dilatanti, che vedono aumentare la viscosità all’aumentare del gradiente di velocità, vale il contrario. Diverso è il caso dei fluidi tissotropici, poiché, a gradiente di velocità costante, la dissociazione e l’orientamento delle particelle nella direzione del flusso non sono istantanei, per cui vi è una diminuzione della viscosità con il tempo verso un valore asintotico. Nei fluidi reopettici il comportamento è opposto: applicando un gradiente di velocità costante, si ha una graduale formazione di una struttura interna, con aumento della viscosità. Tale comportamento è verificato per moderati valori di scorrimento, inferiore a un valore di soglia, oltre il quale la struttura formata si distrugge.

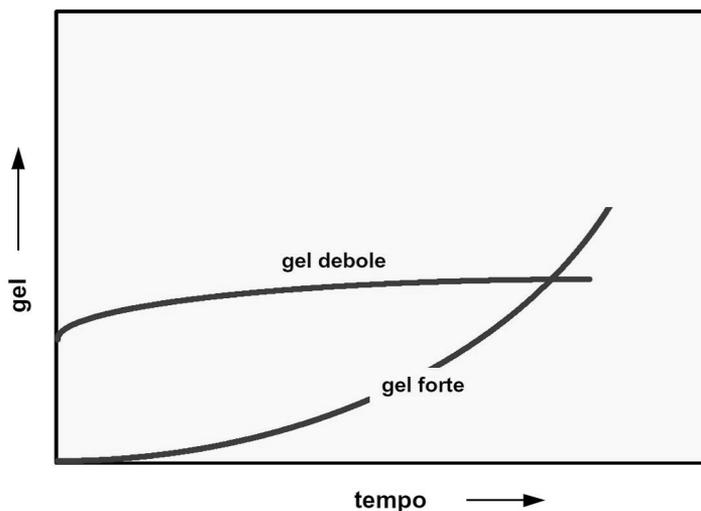


Fig. 2 – Andamento qualitativo di gel forti e gel deboli in funzione del tempo.

### 2.3. Forza di gel

Se la soglia di scorrimento misura le forze attrattive di un fluido in condizioni di flusso, la forza di gel misura tali forze in condizioni statiche. Nel caso di sistemi tissotropici, maggiore è il tempo di quiete, maggiore è la forza di gel.

Si distinguono due tipi di gel (Fig. 2): a) gel debole (*fragile gel strength* o *weak gel strength*) quando la forza aumenta lentamente nel tempo; b) gel forte (*progressive gel strength* o *strong gel strength*) quando l'aumento è più veloce. Quest'ultimo comportamento nelle sospensioni di materiali argillosi in acqua è dovuto all'aumento della concentrazione delle particelle argillose nella dispersione.

### 2.4. Modelli reologici

Il comportamento reologico delle sospensioni di minerali argillosi in acqua è stato studiato anche con modelli diversi rispetto al citato modello di Bingham (Fig. 1). In questo caso, la soglia di scorrimento è l'intercetta positiva sull'asse degli sforzi di taglio: a differenza dei fluidi a comportamento newtoniano, i fluidi "tipo Bingham" non scorrono finché lo sforzo di taglio applicato non supera tale valore. Dopo di che, per successivi incrementi dello sforzo di taglio, incrementa il gradiente di velocità, in modo proporzionale alla viscosità plastica.

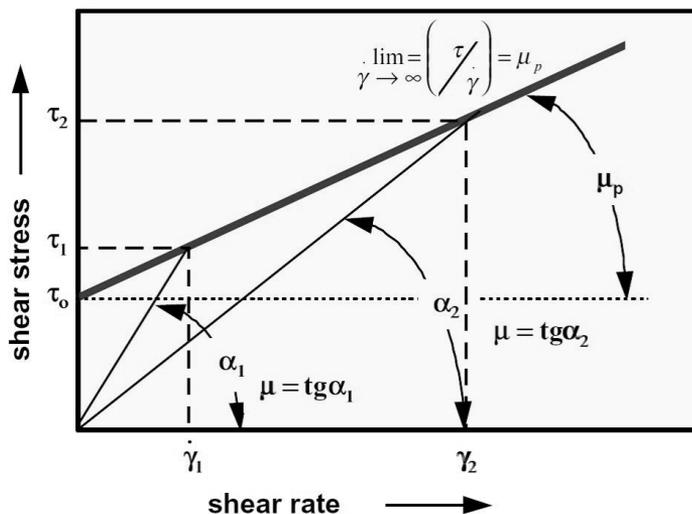


Fig. 3 – Viscosità apparente per un fluido tipo Bingham.

La viscosità apparente è definita come il rapporto tra sforzo e deformazione di taglio, ed è data dalla pendenza della linea che congiunge l'origine con un generico punto della curva che rappresenta il modello di Bingham. Con riferimento alla Fig. 3, la viscosità apparente è data, per i differenti valori del gradiente di velocità, dalle relazioni seguenti:

$$\mu_1 = \operatorname{tg} \alpha_1 \quad \mu_2 = \operatorname{tg} \alpha_2$$

Si può notare che la viscosità apparente diminuisce all'aumentare del gradiente di velocità, fino a raggiungere il valore della viscosità plastica ( $\mu_p$ ) quando il gradiente di velocità tende all'infinito: tale fenomeno è chiamato *shear thinning* (Fig. 4). Si può quindi scrivere:

$$\frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \mu_a$$

Applicando il modello di Bingham:

$$\mu_a = \frac{\tau_y + \mu_p \dot{\gamma}}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + \mu_p,$$

che al limite diviene:

$$\lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \mu_a = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \left( \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + \mu_p \right) = \mu_p$$

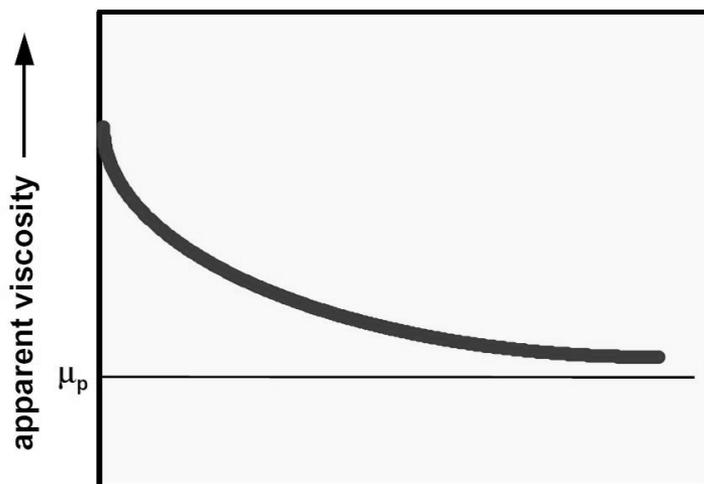


Fig. 4 – Shear thinning: per alti valori del gradiente di velocità, il valore della viscosità apparente tende al valore della viscosità plastica.

Il modello di Bingham è stato, ed è ancora, ampiamente usato nell'industria petrolifera poiché è facile da usare e rappresenta abbastanza bene il comportamento di alcuni fluidi di perforazione comunemente usati fino ad alcuni anni fa (come ad esempio i fanghi di tipo bentonitico). L'uso di tale modello era talmente diffuso nei tempi passati che uno dei più importanti strumenti di misura per determinare i parametri reologici, il viscosimetro rotazionale Fann (vedi § 4.1), fu progettato e tarato esclusivamente per la diretta determinazione dei parametri del modello di Bingham. Purtroppo, tale modello non riflette la realtà poiché esso non rappresenta in modo molto accurato l'andamento della gran parte dei fluidi di perforazione attualmente usati e soprattutto a bassi valori di *shear rate*, od anche, a bassi valori della portata di flusso. Attualmente, infatti, sono usati altri modelli reologici che tengono conto anche di tali andamenti.

Oltre al modello di Bingham, si ricordano infatti il modello di Herschel-Bulkley e quello di Ostwald-de Waele (o modello di potenza, *power law*, a due parametri costanti) (Chilingarian & Vorabutr, 1981; Ancy & Jorrot, 2001; Nguyen & Boger, 1992). Posto  $K$  = indice di consistenza;  $n$  = indice del comportamento di flusso, quest'ultimo modello è rappresentato dall'equazione (Fig. 5):

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n$$

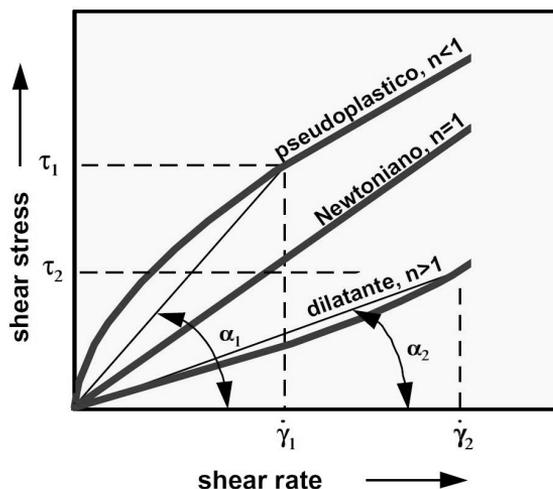


Fig. 5 – Modello reologico di Ostwald e De Waele o di potenza (power law).

L'indice di consistenza  $K$  è una sorta di misura della viscosità, mentre l'indice del comportamento di flusso  $n$  esprime il comportamento di un fluido non newtoniano: maggiore è lo scostamento del valore di  $n$  dall'unità (in entrambe le direzioni), più pronunciate sono le caratteristiche non newtoniane del fluido:  $0 < n < 1$ , fluido pseudoplastico,  $n = 1$ , fluido newtoniano,  $n > 1$ , fluido dilatante.

Il modello *power law* è oggi ampiamente utilizzato in numerosi settori tecnologici (come lo studio dei fluidi di perforazione), ed ha sostituito il più comune modello di Bingham, poiché è di semplice utilizzo e si presta bene per analisi di tipo grafico. Questo modello, pur simulando bene il comportamento dei fluidi a bassi gradienti di velocità, non include il valore della soglia di scorrimento, e pertanto è poco preciso per rappresentare i fluidi di perforazione. Per tale motivo è stato elaborato da Herschel e Bulkley un modello reologico che include il valore della soglia di scorrimento, rappresentato dall'equazione:

$$\tau = \tau_y + K(\dot{\gamma})^n$$

Dove il significato dei simboli è quello utilizzato in precedenza. La rappresentazione grafica del modello di Herschel-Bulkley è riportata nella Fig. 6. Oggigiorno il modello di Herschel-Bulkley è quello più utilizzato per descrivere il comportamento di flusso di un fluido di perforazione a base di acqua e bentonite. Gran parte degli altri modelli sono casi particolari del precedente (come i modelli di Newton, Bingham e Ostwald-de Waele), oppure presentano delle formulazioni matematiche differenti, approssimando meglio l'andamento dei dati di laboratorio.

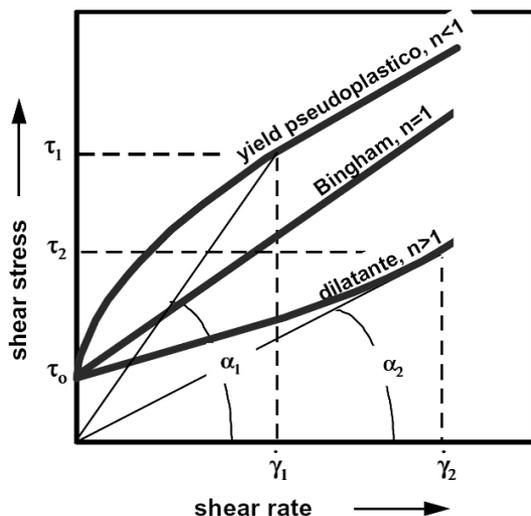


Fig. 6 – Modello reologico di Herschel-Bulkley.

### 2.5. Regimi di flusso

Il comportamento reologico e i principali parametri di una sospensione di minerali argillosi in acqua in movimento in un circuito idraulico devono essere associati alle condizioni di moto del sistema. Le condizioni di moto del fluido possono essere: 1) flusso a tappo (*plug flow*); 2) flusso laminare; 3) flusso nella zona di transizione; 4) flusso turbolento.

Il flusso a tappo si realizza solamente per i fluidi che presentano una soglia di scorrimento, come i fluidi a comportamento plastico e *yield pseudoplastico*, mentre per i fluidi a comportamento newtoniano e pseudoplastico tale tipo di flusso non si presenta. Nel flusso a tappo il fluido si muove essenzialmente come un singolo ed indisturbato corpo solido, o tappo (*plug*). Il movimento è reso possibile dallo scivolamento di una sottile lamina di fluido lungo la parete del condotto. Tale tipo di flusso interviene generalmente a portate molto basse e soprattutto quando il fluido possiede caratteristiche plastiche molto spiccate con elevati valori dello sforzo di taglio. Generalmente esso interviene per numeri di Reynolds piccoli, di norma compresi tra 100 e 300, o anche meno.

La Fig. 7 mostra la differente distribuzione della velocità nei diversi tipi di flusso.

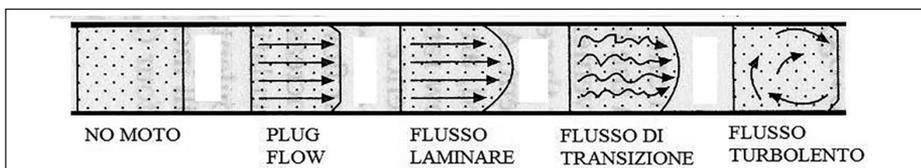


Fig. 7 – Distribuzione della velocità nei diversi tipi di flusso.

Il criterio fondamentale per la transizione da moto a tappo a moto laminare, e dalla zona di transizione verso un flusso di tipo turbolento, è rappresentato dai valori critici del numero di Reynolds, definito come il rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscosi. La sua espressione in condotti a sezione circolare, in unità di misura del Sistema Internazionale, è la seguente:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot d_i}{\mu}$$

Analogamente, per una sezione anulare si ha:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot (D_i - d_e)}{\mu}$$

dove:  $d_i$  = diametro interno del condotto a sezione circolare,  $D_i$  = diametro maggiore del condotto a sezione anulare,  $d_e$  = diametro minore del condotto a sezione anulare,  $V$  = velocità media di flusso,  $\rho$  = densità del fluido,  $\mu$  = viscosità del fluido. Studi sul flusso di acqua in un condotto circolare hanno verificato che la turbolenza inizia a un valore prossimo a  $Re = 2100$ .

Dalla relazione precedente, si può notare come le caratteristiche del flusso siano determinate non solo dalla velocità media ma, in eguale importanza, dalla geometria del sistema, dalla densità e dalla viscosità del fluido. L'incremento del numero di Reynolds fa sì che il moto passi da tappo a turbolento secondo dei valori appropriati, dipendenti dal tipo di fluido preso in considerazione.

Per flusso laminare si intende il tipo di flusso in cui i filetti fluidi infinitamente sottili sono in moto l'uno rispetto all'altro; lo strato adiacente alla superficie del condotto si può considerare fermo e solidale alla parete del condotto, mentre gli altri scivolano con velocità crescente fino a raggiungere un valore massimo, secondo superfici parallele all'asse del condotto. In un condotto di sezione circolare, per un fluido newtoniano, il profilo di velocità è una curva del secondo ordine.

Al crescere del numero di Reynolds il flusso non è più laminare, poiché si generano dei vortici in prossimità delle pareti del condotto che aumentano di frequenza e dimensione. Il flusso turbolento, che avviene per elevate velocità di flusso e per bassa viscosità del fluido, è caratterizzato da un movimento caotico e disordinato delle particelle fluide. In questo caso, il profilo medio di

velocità tende ad essere uniforme lungo quasi tutta la sezione trasversale, tranne in prossimità della parete, dove la velocità decresce rapidamente.

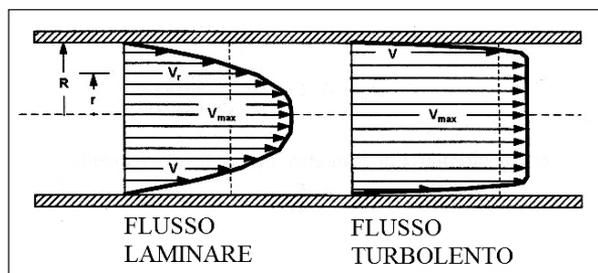


Fig. 8 – Distribuzione della velocità secondo il tipo di flusso.

Le norme per la misura delle caratteristiche reologiche dei fluidi di perforazione applicate principalmente in campo petrolifero (API, 2014; Chilingarian & Vorabutr, 1981) stabiliscono il tipo di flusso secondo il valore del numero di Reynolds:  $Re \leq 2100$ , flusso laminare,  $Re \geq 2100$ , flusso turbolento. La Fig. 8 mostra la differente distribuzione delle velocità nei due casi di flusso laminare e turbolento.

Nel flusso laminare, la velocità è massima in corrispondenza dell'asse del condotto. Viceversa, nel moto turbolento la velocità massima si mantiene pressoché costante lungo quasi tutto il raggio del condotto, eccetto le zone più vicine alla parete.

Il flusso di transizione è caratterizzato da un graduale passaggio dalle caratteristiche di flusso laminare a turbolento. Inizialmente, quando il flusso presenta ancora caratteristiche di laminarità, si nota una destabilizzazione casuale delle lamine o dei cilindri concentrici che scorrono adiacenti uno all'altro, dovuto alla presenza di movimenti vorticosi e caotici disposti casualmente. Aumentando la portata, e quindi la velocità di flusso, aumenta anche la quantità di movimenti vorticosi e caotici nel fluido fino a quando essi diventano preponderanti facendo scomparire quasi del tutto le caratteristiche laminari del flusso. In questo caso si entra nel flusso turbolento. L'andamento del profilo della velocità di flusso in questo tipo di regime è difficilmente rappresentabile, per via della casualità dei vortici.

Il regime di flusso influenza notevolmente le caratteristiche reologiche del fluido. Infatti, nel caso di un fluido newtoniano, la legge di Newton è valida in caso di moto laminare: se il moto è turbolento, il comportamento del fluido si discosta dalla linearità, e apparentemente la sua viscosità aumenta. Lo stesso vale per un fluido pseudoplastico.

Si ricorda infine che spesso, le proprietà reologiche dei fluidi di perforazione nelle condizioni di pressione e temperatura del sottosuolo possono es-

sere molto differenti da quelle misurate in condizioni di pressione e temperatura ambiente. Infatti a profondità elevate la pressione idrostatica sul fango è funzione della profondità stessa, mentre la temperatura dipende dal gradiente geotermico, che è dell'ordine di 30 °C ogni 1000 m di profondità. In queste condizioni i fanghi in profondità possono essere più o meno viscosi di quello misurato in superficie.

### 3. Campionamento dei fanghi

Nell'estate 2015 sono stati campionati nove apparati lutivomi, diversi tra loro per forma, dimensione e aspetto del fango. I campioni sono stati convenzionalmente denominati C1 Nando-1, C2 Nando-2, C3 polla, C5 polla, C6 polla, C8 polla, C10, C12, C16 polla, rispettivamente. Si tratta della stessa campagna di campionamento utilizzata per lo studio di Vezzalini *et al.* (2017, nel presente volume).

La Fig. 9 raffigura alcuni campioni di fango tal quale, agitati manualmente pochi minuti prima dello scatto della foto. Infatti, in laboratorio si è notato che tutti i campioni mostrano una tendenza alla sedimentazione veloce (da poche ore a pochi giorni) della fase solida, che si separa completamente dalla fase liquida, lasciandola perfettamente limpida. La Fig. 10 mostra gli stessi campioni della figura precedente, lasciati a riposo per 40 giorni. Nella Fig. 10 si può notare anche il diverso spessore del sedimento, che è naturalmente un indice qualitativo del diverso contenuto in solidi del fango stesso.



Fig. 9 – Campioni di fango agitati manualmente pochi minuti prima dello scatto della foto.



Fig. 10 – Gli stessi campioni di Fig. 9 dopo essere stati lasciati per 40 giorni a riposo a temperatura ambiente.

## 4. Misure di viscosità

### 4.1. Misure con viscosimetri analogici per fanghi bentonitici ad uso civile e minerario

Per le indagini di laboratorio, nella prima fase della campagna di misure sono stati usati viscosimetri rotazionale analogici. In prima battuta, per acquisire la necessaria sensibilità strumentale e procedurale (non era infatti ancora noto il comportamento reologico dei fanghi oggetto della misura), si è operato con uno strumento relativamente semplice e robusto, il viscosimetro Fann modello 35SA (API, 2014), che è normalmente utilizzato per misure speditive nei laboratori fanghi dei cantieri di perforazione. In particolare, si tratta di un viscosimetro rotazionale a lettura ottica diretta per gradienti di velocità discreti.

Lo strumento è costituito da due cilindri coassiali accoppiati meccanicamente da un sottile *annulus* del fluido da testare (Fig. 11). Il cilindro esterno può ruotare a varie velocità, mentre quello interno è collegato ad una molla tarata, che trasmette ad un quadrante graduato i valori di torsione cui è sottoposta. Lo scorrimento del fluido nello strumento a cilindri coassiali (come nel viscosimetro tipo Fann modello 35SA) è paragonabile a due superfici cilindriche in moto relativo l'una rispetto all'altra.

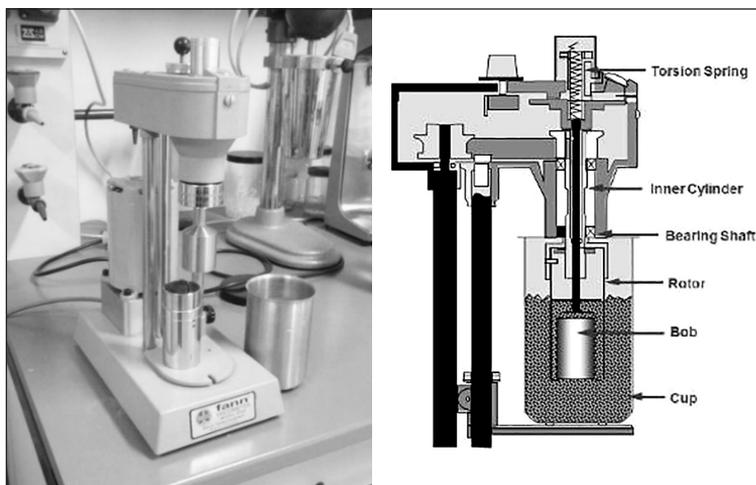


Fig. 11 – Viscosimetro analogico per laboratori di cantiere utilizzato per misure speditive su fluidi pseudoplastici.

Il principio di misura è basato sulla proporzionalità tra la torsione indotta sulla molla tarata e la viscosità del fluido di perforazione. Solitamente si rilevano due misure: una a 600 giri al minuto primo ( $\theta_{600}$ ), l'altra a 300 giri al minuto primo ( $\theta_{300}$ ). Il viscosimetro Fann modello 35SA (strumento standard nel campo dei fanghi di perforazione petrolifera, API, 2014) è tarato in modo

che la viscosità plastica  $\mu_p$ , espressa in centiPoise (cP), sia pari alla differenza tra la lettura a 600 giri e quella a 300 giri. La soglia di scorrimento è pari invece alla differenza tra la lettura a 300 giri e il valore della viscosità plastica in centiPoise:

$$\begin{aligned}\mu_p &= \theta_{600} - \theta_{300} \text{ (centiPoise)} \\ \tau_y &= \theta_{300} - \mu_p = 2 \theta_{300} - \theta_{600} \text{ (lb/100 sqft)} \quad \tau_y = 0,48 (2 \theta_{300} - \theta_{600}) \text{ (Pa)}.\end{aligned}$$

La misura, eseguita soltanto su 3 campioni (C3 polla, C5 polla, C6 polla), ha evidenziato una viscosità di poco superiore a quella dell'acqua, nell'ordine dei pochi cP (tra i 2 e i 3 cP, ovvero tra 2 e 3 mPa·s).

Apparentemente, le misure con il viscosimetro di Fann non sono in grado di evidenziare la presenza di un'eventuale valore di soglia di scorrimento. Essendo però sia le misure di viscosità, sia quelle di soglia di scorrimento, entrambe prossime al fondo scala dello strumento utilizzato, vista anche l'incertezza della lettura analogica (eseguita su quadrante graduato) di coppie di valori molto prossimi tra loro, si è deciso di eseguire le stesse misure anche con un viscosimetro analogico di maggior precisione (viscosimetro Fann modello 39), a misura continua, munito di *plotter* grafico per il tracciamento su carta della curva reologica (Fig. 12).

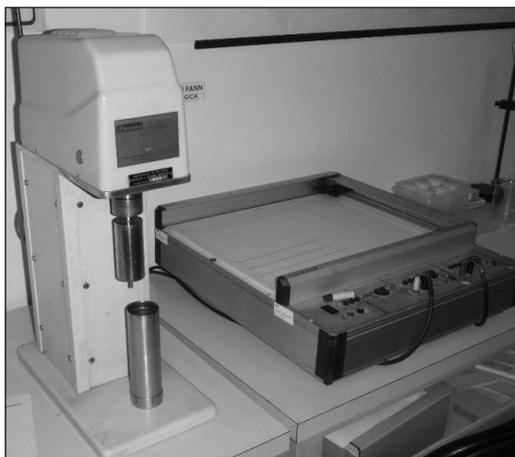


Fig. 12 – Viscosimetro analogico di laboratorio a misura continua.

La misura con tale strumento ha confermato l'ordine di grandezza misurato con lo strumento speditivo. La Fig. 13 mostra la curva reologica misurata sul campione C3 polla, C5 polla, C6 polla. Il comportamento non è perfettamente newtoniano, la viscosità è misurabile, ma non si riesce ad indagare la presenza di possibili proprietà tissotropiche, forza di gel, e soglia di scorrimento. Si è

pensato di tarare lo strumento e aumentare la sensibilità del *plotter* (operazione comunque complessa), ma si è poi preferito procedere con apparecchiature più moderne e sofisticate ad acquisizione dati completamente digitale.

Si riportano di seguito alcuni commenti preliminari relativi alle misure con viscosimetri analogici: 1) la viscosità dei fanghi delle Salse di Nirano è molto simile a quella dell'acqua (dell'ordine di pochi cP); 2) il comportamento reologico del fango si discosta ben poco da quello newtoniano: si tratta di un comportamento verosimile, poiché la quantità di solidi nel fango è bassa; 3) per i motivi di cui sopra, si ravvisa la necessità di approfondire le indagini con apparati a maggior precisione.

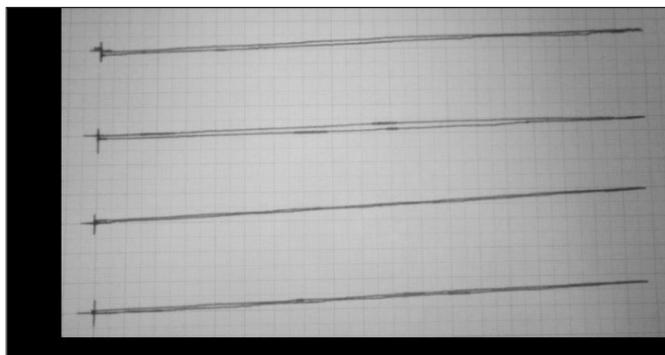


Fig. 13 – Curva di flusso di alcuni campioni di fango misurato sui campioni C3 polla, C5 polla e C6 polla con il viscosimetro analogico mostrato in Fig. 12. In basso: curva reologica misurata su un campione di acqua dolce.



Fig. 14 – Reometro digitale utilizzato nella campagna di misure.

#### 4.2. Misure con reometro digitale

Si è quindi voluto ripetere le misure tramite un reometro digitale, che permette, rispetto ai reometri analogici, di indagare con maggior precisione il comportamento del fluido anche a piccoli valori di deformazioni di taglio. Lo strumento è illustrato in Fig. 14. Si tratta del reometro “Physica MCR 301”, con motore elettrico sincrono EC (*Electronically Commuted*), cuscinetto ad aria ad attrito ridotto e sensore della forza normale ottimizzati per le prove su fluidi di diversa natura reologica. Con questo reometro è possibile effettuare varie combinazioni di test reologici, sia in modalità rotazionale che oscillatoria, e permette il controllo della temperatura e della pressione.

Le misure eseguite col reometro digitale “Physica MCR 301”, in modalità rotazionale, ha sostanzialmente confermato le misure fatte con gli strumenti analogici classici.

La Fig. 15 illustra le curve reologiche di tutti i nove campioni, insieme alla curva reologica dell’acqua, riportata come riferimento. La Fig. 16 illustra gli stessi dati, ma con un ingrandimento sulle piccole deformazioni di taglio (gradiente di velocità) delle curve reologiche di otto campioni di fango, insieme alla curva reologica dell’acqua, riportata come riferimento. Si è escluso il campione C12 perché fuori scala in questa figura.

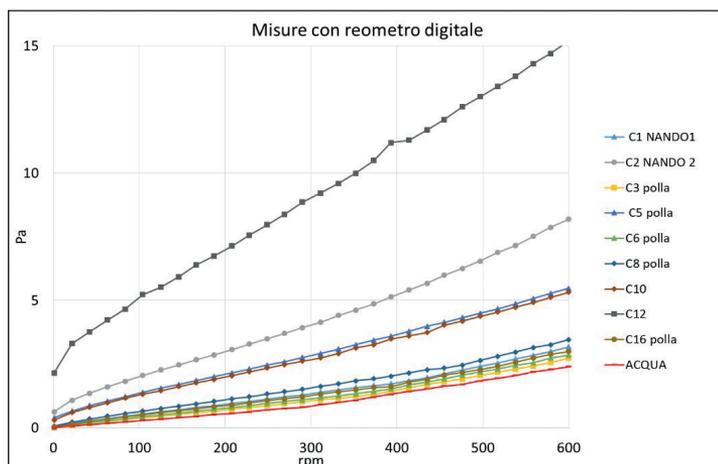


Fig. 15 – Curve reologiche dei nove campioni di fango e misura viscosità di acqua alla stessa temperatura e pressione (curva più in basso senza simboli indicatori).

Un primo gruppo di campioni (C1 Nando-1, C3 polla, C5 polla, C6 polla, C16 polla) mostra caratteristiche reologiche a comportamento molto prossimo a quelle dell’acqua, con spiccate caratteristiche di fluido newtoniano, apparentemente senza soglia di scorrimento. A questo proposito, si rileva che durante

l'esecuzione delle misure, sono state rilevate notevoli difficoltà sperimentali dovute alla rapida sedimentazione del campione, che potrebbero aver alterato le misure, in particolare per questo gruppo di campioni.

Un secondo gruppo (C2 Nando-2, C8 polla, C10) mostra un comportamento più pseudoplastico, e sembra possibile individuare un piccolo valore di soglia di scorrimento (comunque minore di 1 Pa). Vista l'esiguità di tale valore, occorre ulteriormente indagare se esso sia effettivamente una caratteristica reologica intrinseca del fluido.

Infine, il campione C12 mostra un comportamento ben classificabile come fluido a comportamento reologico tipo "Herschel-Bulkley", con soglia di scorrimento.

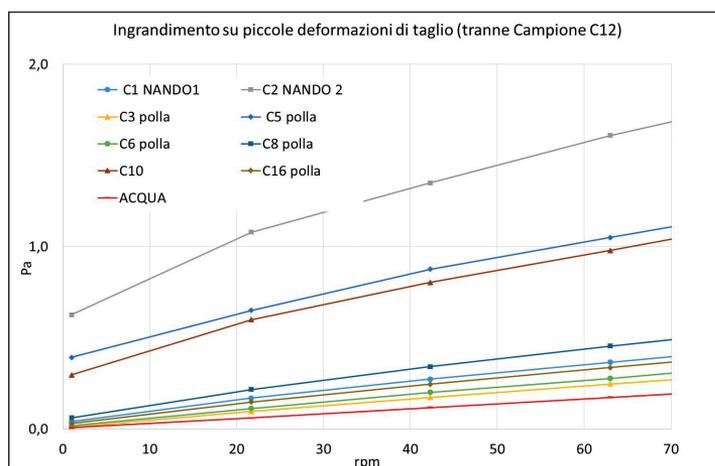


Fig. 16 – Ingrandimento sulle piccole deformazioni di taglio (gradiente di velocità) delle curve reologiche di 8 campioni di fango e misura viscosità di acqua alla stessa temperatura e pressione (curva più in basso senza simboli indicatori). Si è escluso il campione C12 perché fuori scala in questa figura.

## 5. Conclusioni

Le indagini sperimentali eseguite per la caratterizzazione reologica dei fanghi emergenti dagli apparati lutivomi delle Salse di Nirano, campionati manualmente in superficie all'interno dei medesimi, sono da considerarsi come preliminari, vista anche la difficoltà di esecuzione delle misure. Lo scopo dell'indagine è di chiarire il comportamento reologico di tali fanghi, e in particolare di indagare le possibili caratteristiche di tissotropia, il comportamento reologico, di tipo presumibilmente non newtoniano e la presenza effettiva di una soglia di scorrimento, ancorché piccola. Sono stati utilizzati, in sequenza: a) un viscosimetro analogico Fann modello 35SA, normalmente utilizzato per misure speditive nei laboratori fanghi dei cantieri di perforazione; b) un visco-

simetro analogico Fann modello 39 a misura continua e munito di *plotter* grafico (di maggior precisione rispetto al precedente); c) un reometro “Physica MCR 301”, con acquisizione dati di tipo digitale, caratterizzato da maggior precisione rispetto ai viscosimetri digitali, specialmente per bassi valori di deformazione di taglio.

I risultati delle indagini di laboratorio eseguite con i due viscosimetri analogici hanno messo in luce che, nelle condizioni di campionamento utilizzate: 1) la viscosità dei fanghi delle Salse di Nirano è molto simile a quella dell’acqua (dell’ordine di pochi cP). 2) Il comportamento reologico del fango si discosta ben poco da quello di un fluido newtoniano, comportamento verosimile, poiché la quantità di solidi nel fango è bassa. 3) Per i motivi di cui sopra, si è ravvisata la necessità di approfondire le indagini con apparati a maggior precisione.

I risultati delle indagini di laboratorio eseguite con il reometro digitale hanno confermato i valori di viscosità ottenuti con gli strumenti analogici. Inoltre, in prima approssimazione, il comportamento reologico dei fanghi è molto prossimo a quello di un fluido newtoniano. Alcuni campioni sembrano mostrare anche un comportamento di flusso con soglia di scorrimento (ancorché piccola), e tali fanghi si potrebbe modellizzare come fluido a comportamento reologico tipo “Herschel-Bulkley”, con soglia di scorrimento. Infine, durante l’esecuzione delle misure, sono state rilevate notevoli difficoltà sperimentali dovute alla rapida sedimentazione del campione.

In via preliminare, si è visto che il comportamento reologico di questi nove campioni di fango non si discosta sensibilmente da quello dell’acqua. Ci si continua comunque a chiedere se il fango risorgente dagli apparati emissivi sia rappresentativo del materiale fluido contenuto in profondità, o servono altre indagini per chiarire questo punto, al fine di dare senso alle misure sperimentali.

Per il futuro della ricerca, sembra utile poter eseguire una campagna sistematica di misure con reometro digitale. Sono ancora da risolvere alcune difficoltà relative alle procedure sperimentali, dovute sia alla complessità nel maneggiare piccoli campioni di fluido, sia alla rapida sedimentazione del campione. Infatti, il reometro digitale utilizza campioni di soli pochi cm<sup>3</sup>. Eventualmente, sarà possibile fare anche misure in pressione, per studiare il comportamento del fango in profondità. Infatti, lo strumento è in grado di misurare i parametri reologici riportando i campioni in condizioni idrostatiche equivalenti a 400 m di profondità. Inoltre, vi potrebbe essere ampio spazio di approfondimento sperimentale, perché è possibile migliorare i settaggi dello strumento e i sensori utilizzati, adattandoli in modo più accurato alla tipologia di fluido in studio.

Infine, in futuro, potrebbe essere utile approfondire le indagini su: a) comportamento non-newtoniano, se presente; b) misura della soglia di scorrimento, se presente in più campioni; c) misura della forza di gel, se misurabile su qualche campione. Sembra inoltre utile poter eseguire anche misure di: i) densità; ii) tempo di sedimentazione; iii) misure reologiche in pressione.



**Anna Cipriani\*§, Federico Lugli\*, Giovanni Martinelli\*\*,  
Alessandra Sciarra\*\*\***

## **Analisi isotopiche ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , $\delta^{18}\text{O}$ , $\delta\text{D}$ e trizio) delle Salse di Nirano**

### **Riassunto**

*In questo contributo allo studio delle Salse di Nirano è stata misurata la composizione isotopica di stronzio, ossigeno, deuterio e trizio dei fluidi emessi dai vulcani di fango per determinarne l'origine e verificarne l'eventuale contaminazione da parte di acque meteoriche. I dati confermano l'origine marina fossile delle acque campionate a Nirano e l'assenza di mescolamenti con acque meteoriche recenti (<40 anni). I fluidi emessi a Nirano sono probabilmente singenetici alla formazione plio-pleistocenica delle Argille Azzurre affiorante nella zona.*

### **Abstract**

*Isotopic analyses ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  and tritium) of the Nirano mud volcanoes. The isotopic composition of strontium, oxygen, deuterium and tritium in fluid emissions at the Nirano Mud Volcanoes (Modena, Italy) was measured in order to determine the origin of these fluids and verify the possible contribution of meteoric water. Our data confirm the connate origin of the water and the absence of mixing with recent meteoric water (<40 years). The fluids are probably syngenetic with the Plio-Pleistocene "Argille Azzurre" Formation cropping out in the study area.*

**Parole chiave:** *Isotopi, fluidi, vulcani di fango, Sr-O-D, trizio, Salse di Nirano.*

**Key words:** *Isotopes, fluids, mud volcanoes, Sr-O-D, tritium, Salse di Nirano, Italy.*

---

\* Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, Via G. Campi 103, 41125 MODENA; e-mail: anna.cipriani@unimore.it; federico.lugli@unimore.it.

§ Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University, PALISADES 10964 NY, USA.

\*\* ARPAE Emilia-Romagna, Sezione di Reggio Emilia, Via G. Amendola 2, 42122 REGGIO EMILIA; e-mail: giovanni.martinelli15@gmail.com.

\*\*\* Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Sezione di Roma 1, Via di Vigna Murata 605, 00143 ROMA; e-mail: alessandra.sciarra@ingv.it.

## 1. Introduzione

I vulcani di fango sono strutture superficiali che emettono fluidi dal sottosuolo, la cui formazione e sviluppo temporale sono controllati sia da fattori tettonici che geochimici e sono strettamente legati alla provenienza di fluidi e gas che mobilizzano determinate successioni sedimentarie.

Le Salse di Nirano sono situate lungo il margine compressionale esterno della catena appenninica settentrionale e, da un punto di vista tettonico, sono legate alla collisione tra la placca europea e la placca adriatica. Composizionalmente, le Salse di Nirano sono caratterizzate da emissioni di fango, acqua, idrocarburi e gas.

Ad oggi, i pochissimi dati isotopici di stronzio, ossigeno e deuterio (Conti *et al.*, 2000) presenti in letteratura non hanno permesso di caratterizzare in maniera definitiva se le acque emesse a Nirano siano fossili di origine profonda o se presentino contaminazione da parte di una componente superficiale e/o meteorica. In questo lavoro viene caratterizzata in dettaglio l'impronta isotopica dei fluidi emessi al fine di determinarne la provenienza.

## 2. Isotopi dello stronzio, ossigeno, idrogeno e trizio: campionamento e metodologie analitiche

### 2.1. Isotopi dello stronzio

Quattro campioni di salse di Nirano sono stati selezionati per l'analisi del rapporto isotopico dello stronzio, sulla base di alcune differenze osservate nella granulometria, nel tipo di emissione di gas e nella morfologia dei vulcani stessi.

Il campione C5 è stato recuperato da uno dei meglio formati vulcani di fango, ovvero "La Giunta" (apparato D). C12 e C13 sono stati campionati da "Fernando" (apparato G), il quale mostra diversi tipi di emissioni gassose da una bocca all'altra. C16 è stato prelevato da una delle "Polle Alte", a nord di "Fernando", la quale mostra una diversa granulometria dei sedimenti rispetto agli altri vulcani di fango.

La frazione acquosa di ognuno dei quattro campioni è stata separata per decantazione e contiene i cationi trasportati dall'acqua stessa. Tale frazione dovrebbe anche contenere i sali solubili e gli ioni debolmente adsorbiti dal sedimento in sospensione. Questi campioni sono stati rinominati aggiungendo la lettera "W" al termine del nome. Successivamente sono stati raccolti 40 cc del sedimento rimanente di ogni campione; questi sono stati trattati con un procedimento di lisciviazione sequenziale in due passaggi, seguendo la procedura descritta da Chester & Hughes (1967). Il primo passaggio ha previsto l'utilizzo di una soluzione *buffer* di acetato di sodio ( $\text{CH}_3\text{COONa}$ ) al fine di estrarre i cationi scambiabili co-precipitati con i carbonati. Tali campioni sono stati rinominati aggiungendo la dicitura L1 al nome del campione originale,

ovvero C5 L1, C12 L1 ecc. Il secondo passaggio di lisciviazione ha previsto invece l'utilizzo di una soluzione *buffer* 1M di cloridrato di idrossilammina ( $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ ) al fine di estrarre la porzione ferro-manganesifera del sedimento, quindi i cationi adsorbiti dagli ossidi di ferro e manganese. Questi campioni sono stati rinominati aggiungendo la dicitura L2 al nome del campione originale, ovvero C5 L2, C12 L2 ecc.

Le tre frazioni raccolte (W, L1 e L2) di ogni campione sono state poi asciugate e dissolte in 3 ml di acido nitrico. Lo stronzio è stato separato tramite colonne cromatografiche con un volume da 300  $\mu\text{l}$ , utilizzando una resina Sr specifica (Eichrom). Le resine e le colonne sono state pulite con diversi passaggi di acqua MilliQ<sup>®</sup> prima dell'inserimento del campione. Il campione è stato poi purificato dai vari cationi con diversi passaggi di acido nitrico e infine lo Sr è stato estratto dalla resina con acqua MilliQ<sup>®</sup>.

Il rapporto isotopico  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dei campioni è stato misurato tramite uno spettrometro di massa al plasma multicollettore (MC-ICPMS, Thermo Fisher Scientific - Neptune<sup>TM</sup>) situato presso i laboratori del Centro Interdipartimentale Grandi Strumenti (CIGS) dell'Università di Modena e Reggio Emilia. Sette dei nove detector Faraday, attrezzati con relativi resistori a  $10^{11}\ \Omega$  e  $10^{12}\ \Omega$ , sono stati utilizzati per raccogliere i segnali delle seguenti masse:  $^{82}\text{Kr}$ ,  $^{83}\text{Kr}$ ,  $^{84}\text{Sr}$ ,  $^{85}\text{Rb}$ ,  $^{86}\text{Sr}$ ,  $^{87}\text{Sr}$ ,  $^{88}\text{Sr}$ . Le soluzioni di Sr sono state diluite a 200 ppb e introdotte nello spettrometro tramite una *spray chamber* in quarzo e un nebulizzatore da 100  $\mu\text{l}/\text{min}$ . Il segnale relativo all'isotopo  $^{88}\text{Sr}$  nei campioni, dopo la diluizione a 200 ppb, era di  $\sim 15\ \text{V}$ . Il segnale della soluzione di bianco ( $0,5\ \text{M}\ \text{HNO}_3$ ) era invece al di sotto degli 0,02 V. I campioni e gli standard sono stati analizzati tramite singoli blocchi di 100 cicli, con un tempo di integrazione di 8 s per ciclo. Al fine di monitorare eventuali derive analitiche dello strumento, è stata utilizzata una sequenza di *bracketing* con standard e bianchi.

I dati relativi alle masse 82 e 83 sono stati raccolti al fine di monitorare la presenza di kripton come impurità dell'argon e di correggere i dati utilizzando un rapporto  $^{86}\text{Kr}/^{83}\text{Kr}$  1,505657. Il segnale della massa 85 è stato utilizzato per correggere la presenza del Rb, isobaro dell'isotopo  $^{87}\text{Sr}$ , utilizzando un rapporto  $^{87}\text{Rb}/^{85}\text{Rb}$  di 0,3856656. La normalizzazione del *mass bias* strumentale è stata effettuata tramite legge esponenziale, utilizzando un rapporto  $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  di 8,375209. Sia per Kr che per Rb si è assunto lo stesso frazionamento di Sr.

I rapporti  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  sono stati corretti per un valore dello standard NBS-987 di  $0,710260 \pm 0,000020$  (Ehrlich *et al.*, 2004; Lugli *et al.*, 2017). Analisi ripetute dello standard NBS-987 hanno reso un rapporto  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  pari a  $0,710262 \pm 0,000028$  ( $2\sigma$ ;  $n = 13$ , corrisponde ad una riproducibilità esterna di 39 ppm). La riproducibilità a lungo termine dello strumento per quanto riguarda il rapporto  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  è  $0,710270 \pm 0,000020$  ( $2\sigma$ , cfr. Durante *et al.*, 2015).

## 2.2. Isotopi stabili di O e H

I rapporti  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  e  $^2\text{H}/^1\text{H}$  delle acque dei fanghi di Nirano (espresso come  $\delta^{18}\text{O}\text{-H}_2\text{O}$  e  $\delta\text{D}\text{-H}_2\text{O}\text{‰}$  V-SMOW) sono stati determinati in parte tramite spettrometria di massa (IRMS) presso l'INGV di Roma e in parte dal Laboratorio ISO4 di Torino. Gli isotopi dell'ossigeno all'INGV sono stati misurati con un sistema di combustione tipo Gas Bench accoppiato ad uno spettrometro Thermo Delta V. Per l'analisi del deuterio invece un sistema TC-EA è stato interfacciato ad uno spettrometro di massa Thermo Delta XP. L'errore analitico è di  $\pm 0,1\text{‰}$  per il  $\delta^{18}\text{O}$  e inferiore al  $\pm 1\text{‰}$  per il  $\delta\text{D}$ .

Al laboratorio ISO4 i risultati di O e H sono stati ottenuti mediante tecnologia WS-CRDS (*Wavelength-Scanned Cavity Ring Down Spectroscopy*). L'errore analitico è di  $\pm 0,2\text{‰}$  per il  $\delta^{18}\text{O}$  e inferiore al  $\pm 1\text{‰}$  per il  $\delta\text{D}$ .

## 2.3. Trizio

L'analisi di trizio è stata effettuata al laboratorio ISO4 seguendo il protocollo analitico LSC (*Liquid Scintillation Counting*) – ISO 9698/1989. I risultati sono certificati dal laboratorio “*Hydroisotop GmbH – Laboratorium zur Bestimmung von Isotopen in Umwelt und Hydrologie*” di Schweitenkirchen in Baviera (DIN EN ISO 14001).

## 3. Risultati

I rapporti isotopici dello stronzio dei campioni di acqua e delle due frazioni di fango di Nirano trattati con lisciviazione sono presentati in Fig. 1.

I campioni di acqua (campioni W) mostrano i rapporti  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  più elevati, con un valore medio di  $0,70875 \pm 0,00021$ . Le frazioni trattate con lisciviazione per l'estrazione dei cationi adsorbiti dagli ossidi di ferro e manganese (campioni L2) mostrano invece i rapporti  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  più bassi, con un valore medio di  $0,70833 \pm 0,00015$ . Lo stronzio proveniente dalla frazione carbonatica (campioni L1) mostra rapporti isotopici intermedi tra i due precedenti, con un valore medio di  $0,70854 \pm 0,00005$ .

Tra i quattro campioni di acqua, il campione C16W proveniente da una delle Polle Alte a nord di “Fernando” (apparato G) mostra il rapporto di  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  più elevato di tutti e nettamente diverso dalle altre salse. I campioni C12W e C13W provengono entrambi dalla salsa “Fernando” (apparato G) e presentano un diverso rapporto isotopico dello Sr. Il campione dalla salsa “La Giunta” (C5W, apparato D) ha un rapporto  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  identico ad uno dei campioni della salsa “Fernando” (apparato G).

La composizione isotopica dello Sr della frazione carbonatica è pressoché costante in tutti e quattro i campioni, mentre il rapporto  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  della frazione ferro-manganesifera è variabile e segue le differenze riscontrate nella frazione acquosa.

Gli isotopi dell'ossigeno e del deuterio sono stati misurati esattamente sullo stesso campione esclusivamente per il campione C5W proveniente dalla salsa "La Giunta" (apparato D). Gli altri due campioni provengono invece da un precedente campionamento della salsa "Fernando" (apparato G) e da una delle polle "Garfagnine" (apparati C) formatesi nel bosco a sud-ovest di Ca' Rossa. Il  $\delta^{18}\text{O}$  e il  $\delta\text{D}$  di "La Giunta" (campione C5W) e "Garfagnine" sono estremamente simili, con un valore medio di  $\delta^{18}\text{O}$  di  $5,25\% \pm 0,03$  e di  $\delta\text{D}$  di  $9,53\% \pm 0,33$ . Invece, poco più basso risulta essere il  $\delta^{18}\text{O}$ , mentre più alto il  $\delta\text{D}$  della salsa "Fernando" (apparato G).

Il valore misurato della concentrazione in trizio nel campione C5W dalla salsa "La Giunta" (apparato D) è minore di 0,6 TU.

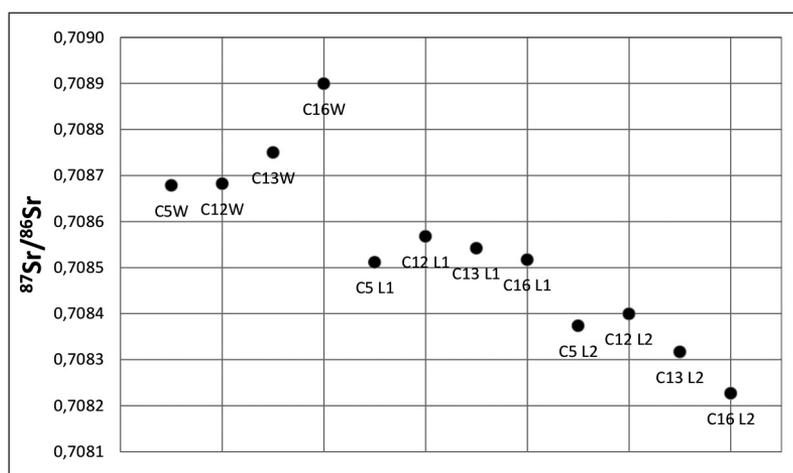


Fig. 1 – Composizione isotopica dello stronzio delle tre diverse frazioni estratte dai campioni di Salse di Nirano. W è l'acqua decantata direttamente dai campioni di fanghi delle salse, L1 la frazione estratta durante il primo passaggio di lisciviazione, L2 la frazione estratta durante il secondo passaggio di lisciviazione.

#### 4. Discussione

Le concentrazioni delle specie ioniche principali presenti nelle acque dei fanghi di Nirano presenti in letteratura rivelano un'origine marina delle acque stesse (Oppo, 2012, Oppo *et al.*, 2017; Conti *et al.*, 2000).

Una delle possibili ipotesi è che tali acque saline derivino da acque piovane che hanno mobilizzato la Formazione delle Argille Azzurre poiché, in regioni vicino al mare, le acque piovane acquisiscono una composizione isotopica dello stronzio che deriva per la maggior parte da *sea-spray* e in minor parte dagli aerosol di origine terrestre dissolti nelle acque piovane. In linea di massima, è possibile escludere che i campioni qui presentati derivino da acque marine mo-

derne (0,7092) poiché la loro composizione isotopica dello Sr risulta essere più bassa. Se l'acqua che ha mobilizzato le emissioni dei vulcani di fango fosse di origine meteorica, si sarebbe dovuta mescolare con acqua meno radiogenica o aver scambiato cationi con rocce o sedimenti con una composizione isotopica dello Sr meno radiogenica.

Una seconda ipotesi è che le acque di Nirano siano acque connate, rimaste intrappolate nella sequenza sedimentaria e successivamente mobilizzate a formare i vulcani di fango. Diverse sono le formazioni sedimentarie dell'area appenninica intorno a Nirano in cui le acque si sarebbero potute preservare: la Formazione delle Argille Azzurre, i sedimenti messiniani (la Formazione Ghioli di Letto o *Shales* euxinici) e la Formazione Marnoso-Arenacea. Di seguito i dettagli delle tre alternative:

- 1) I sedimenti plio-pleistocenici delle Argille Azzurre di cui si trovano numerosi microfossili nei fanghi di Nirano potrebbero essere i contenitori delle acque connate di interesse, ma sulla base della curva della composizione isotopica dello Sr dell'acqua marina di McArthur *et al.* (2001), acque connate plio-pleistoceniche dovrebbero mostrare una composizione isotopica compresa tra 0,709019 e 0,709175. Le acque qui analizzate presentano valori significativamente meno radiogenici: per raggiungere tali valori si dovrebbe ipotizzare uno scambio di Sr con la frazione silicatica dei sedimenti stessi.
- 2) I sedimenti messiniani precedenti la crisi di salinità (cioè la Formazione dei Ghioli di Letto o *Shales* euxinici) sono un secondo candidato ideale per la presenza di acque connate; tuttavia, per le stesse ragioni esposte per le Argille Azzurre, tali sedimenti non mostrano una composizione isotopica sufficientemente bassa da poter essere associati alle acque dei fanghi di Nirano. Se queste acque connate intrappolate in sedimenti pre-messiniani fossero invece le acque d'origine di Nirano allora anch'esse avrebbe dovuto scambiare Sr con la frazione silicatica dei sedimenti stessi e quindi avere raggiunto bassi rapporti isotopici dello Sr. È possibile affermare con certezza che le acque connate di Nirano non contengono dissolti i sali messiniani, come in realtà ipotizzato in pubblicazioni precedenti. Difatti, tali sali non sono stati rinvenuti nella sequenza sedimentaria dell'area: la loro presenza è relegata alle sole porzioni profonde del Mediterraneo durante la crisi di salinità, lontano dalla regione appenninica di interesse.
- 3) Un'ultima possibilità è rappresentata dai sedimenti pre-messiniani della Formazione Marnoso-Arenacea (da 7,25 a 17 milioni di anni). L'ipotesi che questi sedimenti contengano acque connate e che queste siano le acque mobilizzate a Nirano è supportata dai rapporti  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dell'acqua dei fanghi locali. Invero, in accordo con la curva dell'acqua marina di

McArthur *et al.* (2001), la datazione di suddetta acqua dei fanghi corrisponde a un intervallo di età tra i 9 e i 17 milioni di anni, ben dentro all'intervallo di età di formazione della Marnoso-Arenacea.

Per verificare se l'impronta isotopica dei fluidi emessi dai vulcani di fango di Nirano è compatibile con le acque di aree circostanti, i dati di questo lavoro devono essere confrontati con valori di letteratura. La letteratura scientifica disponibile riporta spesso valori caratterizzati da elevata dispersione nelle acque degli Appennini e della Pianura Padana: di conseguenza, non è sempre possibile condurre studi di dettaglio come quelli della zona di Nirano. Sono stati considerati i valori bibliografici di  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  riportati da Conti *et al.* (2000), Boschetti *et al.* (2011) e Italiano *et al.* (2012).

Nella Fig. 3 vengono confrontati i valori misurati di  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  con la concentrazione in cloruri. L'ambiente dei vulcani di fango preso in considerazione nel grafico di Fig. 2, che comprende le Salse di Regnano, Ospitaletto e Nirano, è caratterizzato da valori in  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  compresi tra 0,708683 e 0,709180 (dati di questo studio e di Conti *et al.*, 2000). A questi rapporti isotopici dello Sr corrispondono concentrazioni in cloruri di 5-8 g/l (questo studio e Conti *et al.*, 2000). In Italiano *et al.* (2012) vengono presi in considerazione campioni di acque di origine meteorica raccolti nella coltre quaternaria della zona di Finale Emilia (campione "Bellentani", basso valore di cloruri, 0,3 g/l) e campioni di acque raccolti alla base della coltre quaternaria a contatto con sedimenti pliocenici (campione "Mirandola", valori compresi tra 7-11 g/l). I valori del campione "Mirandola", particolarmente ricco di cloruri, sono simili a quelli del campione di Nirano ed evidenziano quindi origini prossime a un'età pliocenica o pleistocenica. I valori del campione "Bellentani" appaiono rappresentativi delle acque ospitate nei sedimenti quaternari padani con possibili deboli contaminazioni dai sottostanti sedimenti pliocenici. Non risultano indizi sufficienti per potere ipotizzare contaminazioni o derivazioni da sedimenti pre-pliocenici mentre la dispersione dei valori ottenuti può certamente indicare possibili processi di scambio con la matrice silicatica dei sedimenti della zona.

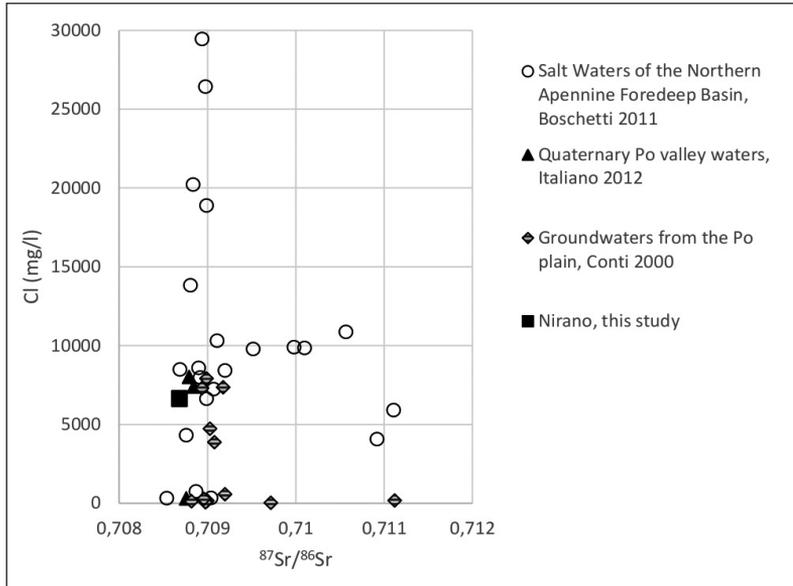


Fig. 2 – Rapporto fra la composizione isotopica dello stronzio e le concentrazioni in cloruri delle acque di Nirano, messi a confronto con i dati presenti in letteratura in Pianura Padana. I dati di letteratura sono tratti da Boschetti et al. (2011), Italiano et al. (2012), Conti et al. (2000).

Nella Fig. 3 sono illustrati i valori isotopici dell'ossigeno in rapporto con quelli dell'idrogeno. Sono distinguibili due famiglie principali. La prima è costituita da valori misurati in acque di origine meteorica, i cui valori sono allineati lungo la GMWL rappresentativa delle precipitazioni mondiali (Craig, 1961). La retta delle precipitazioni locali nota come LMWL, tratta da Longinelli & Selmo (2003), praticamente ricalca la GMWL. Una seconda famiglia è caratterizzata da valori positivi nel rapporto  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  e identifica acque fossili prossime ai rapporti isotopici dell'acqua di mare (SW in Fig. 3). I dati di letteratura delle Salse di Nirano ( $\delta^{18}\text{O}$  variabile da 4,69 a 5,51‰,  $\delta\text{D}$  variabile da -2,02 a 4,03‰), Regnano ( $\delta^{18}\text{O}$  variabile da 2,93 a 3,58‰,  $\delta\text{D} = -2,24$ ‰) e Ospitaletto ( $\delta^{18}\text{O}$  variabile da 4,62 a 5,93‰,  $\delta\text{D}$  variabile da 3,27 a 9,05‰) sono consistenti con i nuovi dati di Nirano.

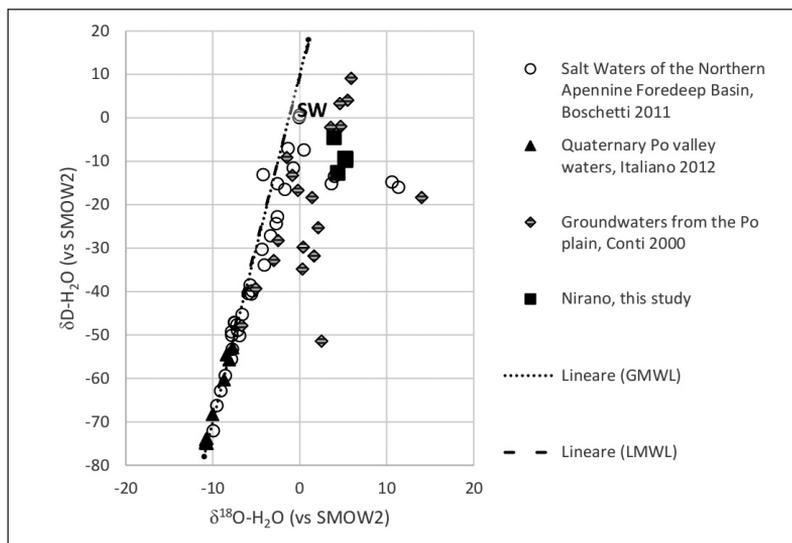


Fig. 3 – Rapporto fra la composizione isotopica dell'ossigeno e dell'idrogeno delle acque prelevate dai campioni di Nirano, messi a confronto con i dati presenti in letteratura in Pianura Padana. I dati di letteratura sono tratti da Boschetti et al. (2011), Italiano et al. (2012), Conti et al. (2000). GMWL è la Global Meteoric Water Line (Craig, 1961). La LMWL è la Local Meteoric Water Line (Longinelli & Selmo, 2003).

La Fig. 4 permette di confrontare i valori di concentrazione in cloruri con quelli del  $\delta^{18}\text{O}$  per tutto il database considerato. Il campione selezionato di Nirano (C5-La Giunta) plotta vicino ai dati di letteratura delle Salse di Nirano, Ospitaletto e Regnano (in media 7517 mg/l di cloruri e 4,54‰ di  $\delta^{18}\text{O}$ , Conti et al., 2000) ed è distinguibile da altri campioni poiché ben connotato dai valori positivi in  $\delta^{18}\text{O}$  che confermano l'assenza di mescolamenti delle acque con acque di carattere meteorico.

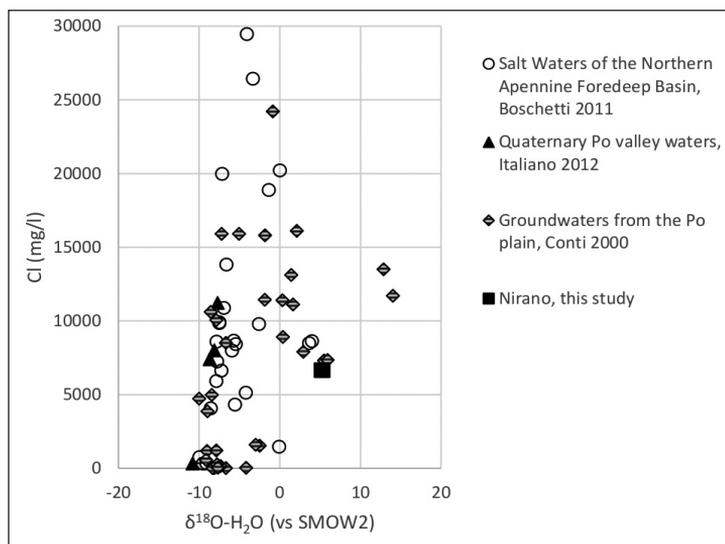


Fig. 4 – Rapporto fra la composizione isotopica dell'ossigeno e le concentrazioni in cloruri delle acque di Nirano, messi a confronto con i dati presenti in letteratura in Pianura Padana. I dati di letteratura sono tratti da Boschetti et al. (2011), Italiano et al. (2012), Conti et al. (2000).

La Fig. 5 permette il confronto tra i valori isotopici dell'ossigeno e dello stronzio ottenuti da acque campionate nell'ambiente dei sedimenti quaternari padani e nell'ambiente dei vulcani di fango anche dedotti dalla letteratura scientifica considerata. È riscontrabile l'esistenza di due famiglie di campioni. I campioni ottenuti da vulcani di fango risultano caratterizzati da  $\delta^{18}\text{O}$  sempre  $>0$ . I campioni derivanti dalla coltre quaternaria padana risultano invece sempre caratterizzati da valori in  $\delta^{18}\text{O} < -6$ . Ciò avviene anche a parità di rapporti isotopici dello stronzio che risulta quindi diagnostico solo se utilizzato congiuntamente con altri parametri chimici e isotopici.

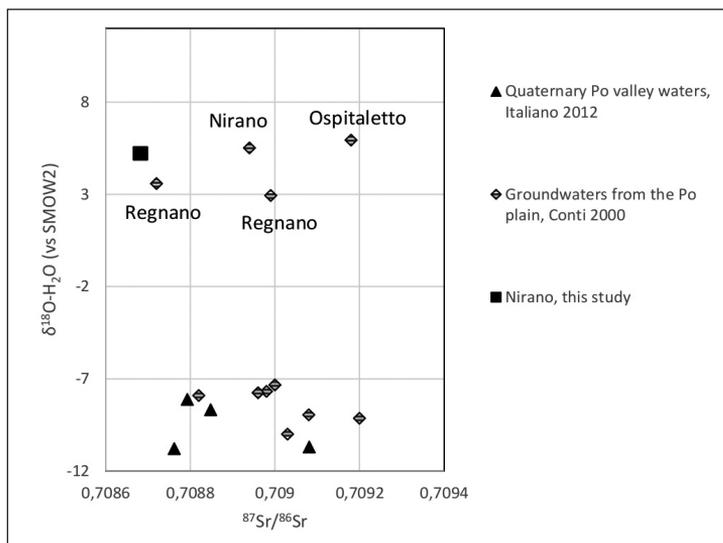


Fig. 5 – Rapporto fra la composizione isotopica dello stronzio e dell'ossigeno delle acque prelevate dai campioni di Nirano, messi a confronto con i dati di letteratura derivanti dalla coltre quaternaria padana. I dati di letteratura sono tratti da Italiano et al. (2012) e Conti et al. (2000).

## 5. Conclusioni

I valori nei rapporti isotopici dell'ossigeno e dell'idrogeno incrociati con i dati di cloruri e rapporti isotopici dello stronzio confermano l'origine marina fossile delle acque campionate a Nirano. Il valore misurato della concentrazione in trizio ( $<0,6$  TU) conferma l'assenza di mescolamenti con acque meteoriche recenti ( $<40$  anni). I fluidi emessi dalle Salse di Nirano risultano quindi probabilmente singenetici alla formazione argillosa plio-pleistocenica affiorante nella zona di studio, anche se la composizione isotopica dello Sr permette di ipotizzare la possibile presenza di una componente di acqua conata più antica, proveniente dai sedimenti pre-messiniani della Formazione Marnoso-Arenacea.





**Doriano Castaldini\***, **Marzia Conventi\*\***, **Paola Coratza\***,  
**Giovanni Tosatti\*\*\***

con il contributo di tutti gli Autori

## **Considerazioni conclusive sugli studi interdisciplinari delle Salse di Nirano**

### **Risultati ottenuti**

Premesso che un anno di ricerche per analizzare da un punto di vista interdisciplinare un fenomeno naturale così complesso come quello dei vulcani di fango è troppo breve, in questo paragrafo vengono sintetizzati i principali risultati delle ricerche svolte ponendo particolare attenzione agli obiettivi delle ricerche stesse, vale a dire alla comprensione e all'analisi dei meccanismi geologici del fenomeno delle salse anche ai fini della fruizione in sicurezza dell'area integrale della Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano.

Sono stati svolti studi geologici e geomorfologici di dettaglio alcuni dei quali mai condotti in precedenza. In particolare, è stata studiata l'evoluzione areale dei depositi attivi degli apparati lutivomi negli ultimi 70 anni circa, rilevando come l'istituzione della Riserva abbia condotto a uno stato di naturalità degli stessi. È stata documentata la distribuzione e l'evoluzione delle singole bocche lutivome dal 1884 ad oggi, segnalando anche salse scomparse o non note in precedenza. Sono stati studiati in modo analitico gli allineamenti delle bocche lutivome, individuando quelli corrispondenti a sistemi di discontinuità utilizzati per la fuoriuscita dei fanghi.

La comparsa di salse nel boschetto antistante Ca' Rossa a partire dal 2012 è stata affrontata impedendo al pubblico l'accesso a questi apparati tramite una recinzione. Altre piccole emissioni si sono manifestate nel 2016 nell'area prativa a ovest di Ca' Rossa. In entrambi i casi, si tratta di vulcani di fango di neoformazione, che si sono attivati in un settore non interessato in precedenza da tali manifestazioni; queste salse hanno un'ubicazione e una disposizione che concorda con l'analisi degli allineamenti condotta sugli apparati già presenti.

---

\* Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, Via Giuseppe Campi 103, 41125 MODENA; e-mail: doriano.castaldini@unimore.it; paola.coratza@unimore.it.

\*\* Responsabile Ufficio Ambiente e Direzione della Riserva Naturale delle Salse di Nirano, Via Vittorio Veneto 27/A, 41042 FIORANO MODENESE (MO); e-mail: mconventi@comune.fiorano-modenese.mo.it.

\*\*\* Direttore responsabile degli Atti della Società dei Naturalisti e Matematici di Modena, Via Università 4, 41121 MODENA; e-mail: john.tosatti@gmail.com.

Per quanto riguarda i rilevamenti topografici nell'area dei vulcani di fango, eseguiti con l'utilizzo di diverse tecnologie di rilievo (stazione totale e strumentazione GPS, drone, laser scanner), i dati acquisiti non hanno evidenziato variazioni altimetriche indotte da processi endogeni, mentre risultano minime variazioni morfologiche degli apparati lutivomi principali, verosimilmente indotte dai processi esogeni che modellano gli stessi.

Per quanto attiene il monitoraggio dei flussi gassosi e la caratterizzazione geochemica delle componenti gassose nell'area totale, le misure di concentrazione dei gas nei suoli evidenziano la presenza di due fasce caratterizzate da valori maggiormente elevati, che potrebbero far presupporre la presenza di aree ad elevata permeabilità. In particolare, nel settore di Ca' Rossa si nota l'associazione di più specie gassose, indice che questa zona è quella attualmente interessata da una maggiore risalita di gas. Si tratta dell'area in cui si sono manifestate nuove salse dal 2012 con punti lutivomi di neoformazione anche nel maggio 2016.

Le misurazioni di temperatura e livello del fango in una delle bocche lutivome della Salsa "D-La Giunta" fanno ritenere che i vulcani di fango di Nirano siano sensibili a eventuali ciclicità di carattere atmosferico ma non a ciclicità di carattere mareale.

Le analisi mineralogiche, calcimetriche e granulometriche hanno dimostrato che le bocche degli apparati lutivomi di Nirano emettono fanghi di composizione mineralogica piuttosto simile, compatibile con quella della Formazione delle Argille Azzurre plio-pleistoceniche, ma leggermente diversi tra loro dal punto di vista delle percentuali relative delle varie fasi. La morfologia degli apparati lutivomi appare condizionata dalla granulometria dei fanghi: le granulometrie più fini danno luogo a coni mentre quelle più grossolane a polle. Le analisi granulometriche hanno inoltre evidenziato che la classe granulometrica dominante non è quella dell'argilla bensì del limo.

Dallo studio micropaleontologico dei campioni di fango risulta che le associazioni a microfossili sono quasi identiche a quelle delle Argille Azzurre del Plio-Pleistocene, cioè la formazione affiorante nell'area pedemontana. I dati di questa analisi sembrano suggerire che i fanghi, almeno nel loro ultimo tratto di risalita, provengano da un serbatoio relativamente superficiale.

Le indicazioni ottenute dalle campagne di monitoraggio sismico indicano la presenza di segnali sismici di potenziale interesse per lo studio delle emissioni gassose dei vulcani di fango. Anche se solo a livello preliminare, riguardo alla possibile collocazione dei centri di emissione, i risultati suggeriscono la presenza di sorgenti diverse che cambiano nel corso del tempo anche in termini di intensità di emissione.

Le indagini sperimentali sulle caratteristiche reologiche dei fanghi delle salse, mai eseguite in precedenza, hanno individuato le basi fisiche in grado

di spiegare l'intermittenza, e perciò potenzialmente la violenza, del fenomeno eruttivo o delle modalità di gorgogliamento. I risultati delle misure analogiche indicano che la viscosità dei fanghi delle salse di Nirano è molto simile a quella dell'acqua, mentre alcuni fanghi mostrano un comportamento interpretabile come pseudoplastico.

Per quanto riguarda le analisi isotopiche delle acque delle salse i dati ottenuti confermano l'origine marina fossile delle acque campionate e l'assenza di mescolamenti con acque meteoriche. I fluidi emessi dalle Salse di Nirano risultano quindi probabilmente singenetici alle Argille Azzurre del Plio-Pleistocene affioranti nell'area di studio. Tuttavia, sulla base della composizione isotopica dello stronzio, non si può escludere una componente di acqua connata più antica, proveniente dai sedimenti pre-messiniani della Formazione Marnoso-Arenacea.

Stante quanto sopra esposto, si ritiene che allo stato attuale e alla luce degli accorgimenti gestionali assunti dall'Amministrazione comunale di Fiorano (ad es. recinzione degli apparati lutivomi, adozione di procedure di emergenza e vigilanza attiva) non sussistano motivi ostativi alla fruizione della Riserva da parte di visitatori.

### **Futuri approfondimenti**

Per quanto detto in precedenza, tutte le ricerche effettuate richiederebbero ulteriori approfondimenti.

Ad esempio, sarebbe di fondamentale importanza acquisire nuovi dati per la ricostruzione del modello geologico locale attraverso indagini geofisiche. In particolare sarebbe essenziale realizzare indagini attive di sismica a riflessione ad alta risoluzione per identificare le strutture geologiche che caratterizzano l'area delle salse fino ad alcune centinaia di metri di profondità e che eventualmente possono determinare fenomeni di rischio ambientale.

Per quanto riguarda la prosecuzione delle indagini sin qui realizzate si auspica la continuazione delle seguenti ricerche:

- Geologia e geomorfologia: studio e cartografia di dettaglio dell'evoluzione delle singole bocche lutivome anche in considerazione degli apparati di neoformazione presso Ca' Rossa.
- Rilevamento topografico: misurazione periodica delle variazioni topografiche dei principali apparati.
- Monitoraggio dei flussi gassosi e caratterizzazione geochemica: monitoraggio temporale dei gas nei suoli che può essere in grado di determinare aree a maggior permeabilità dove è più facile si verificano nuove emissioni.
- Per le misurazioni di temperatura e livello del fango si dovrebbero proseguire le attività di monitoraggio con la sonda già installata e tramite idrofono in grado di permettere una stima della quantità di gas espulso.

- Le rilevazioni sismiche potranno in futuro essere raffinate adottando specifiche tecniche di filtraggio digitale finalizzate alla riduzione del rumore generato da sorgenti diverse da quelle oggetto di studio.
- Per le indagini sperimentali sulle caratteristiche reologiche occorrerebbe approfondire le ricerche su: i) comportamento non-newtoniano, se esiste; ii) misura della soglia di scorrimento, se esiste; iii) misura della forza di gel, se misurabile. Eseguire inoltre misure di densità, tempo di sedimentazione e misure reologiche in pressione.
- Per quanto riguarda le analisi isotopiche, sarebbe utile eseguire analisi della composizione isotopica di stronzio, ossigeno, deuterio e trizio di campioni di acque di altre bocche lutivome.

Infine è fondamentale sottolineare che la comparsa di vulcani di fango di neoformazione nella zona di Ca' Rossa evidenzia l'importanza di una sorveglianza e di un presidio quotidiano della Riserva.

A ciò si unisce la necessità di sorvegliare l'evoluzione di un fenomeno geologico attivo, che si esprime con una fuoriuscita costante di gas e fanghi in acque salate sotto forma di colate e, seppure in rare occasioni documentate nella letteratura storica e in foto, con proiezione di lacerti fangosi. L'attivazione di tale presidio sarebbe utile anche per disporre di una registrazione (se possibile supportata dalle moderne tecnologie di posizionamento ecc.) della dinamica degli apparati, già come forma di rilevazione di primissimo livello, su cui basare altri tipi di monitoraggi "parametrici" e con strumentazioni dedicate.

### **Ringraziamenti**

*Si ringrazia la Guardia ecologica volontaria della Riserva Naturale delle Salse di Nirano Sig. Luciano Callegari per l'assistenza e la collaborazione mostrate durante tutte le fasi della ricerca e per la ricca documentazione fotografica messa a disposizione degli Autori. Si ringraziano inoltre i Proff. Maurizio Mazzucchelli, Stefano Conti e Diego Arosio del Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche dell'Università di Modena e Reggio Emilia per la lettura critica dei manoscritti e gli utili suggerimenti. Un ringraziamento particolare alla ditta Panariagroup Industrie Ceramiche S.p.A. per la sponsorizzazione del volume.*



## Bibliografia generale

(a cura di tutti i partecipanti alla ricerca)

- AA.VV., 2012 – *Nirano, la sua storia*. Incontri Editrice, Sassuolo, 144 pp.
- AA.VV., 2016 – *Accordo per la realizzazione di studi ed indagini finalizzati alla definizione di un quadro conoscitivo utile alla fruizione in sicurezza dell'area integrale delle Salse di Nirano*. Relazione tecnico-scientifica sull'attività svolta (rapporto interno inedito), Comune di Fiorano Modenese, 186 pp.
- ACCAINO F., TINIVELLA U., BARADELLO L., BRATUS A., 2005 – *Risultati dei rilievi geofisici in località Sasso Streghe e Nirano*. Rapporto 79/2005 e 44/2005 GDL.
- 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**, pp. 90-101.
- A.G.I. (ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA), 1977 – *Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche*. Tipografia Nicoletti, Roma.
- AGIP, 1982 – *Foraminiferi padani (Terziario e Quaternario)*. 2ª ed., Agip S.p.A., 52 tavv., Milano.
- ALAGNA F., PAVIGNANI R., 2010 – *Nuovi strumenti di programmazione e regolamentazione per la gestione di due riserve naturali in Provincia di Modena: Salse di Nirano e Sassoguidano*. Geologia dell'Ambiente, n. **3**, pp. 22-26.
- ALBARELLO D., 2005 – *Mud volcanoes as natural strain meters: a working hypothesis*. In: G. Martinelli & B. Panahi (eds.) "Mud Volcanoes, geodynamics and seismicity", NATO Science Series IV, vol. **51**, Kluwer, pp. 239-249.
- ALBARELLO D., 2017 – *Misure sismiche nell'area delle Salse di Nirano*. Suppl. Atti Soc. Nat. Mat. di Modena, **148** (nel presente volume).
- ALBARELLO D., LAPENNA V., MARTINELLI G., TELESCA L., 2003 – *Extracting quantitative dynamics from <sup>222</sup>Rn gaseous emissions of mud volcanoes*. Environmetrics, **14**, pp. 63-71.
- ALBARELLO D., GULYIEV I., MARTINELLI G., PANAH B., TRAMUTOLI V., 2007 – *Strain field variations from ground-based and remote sensing monitoring of mud volcano gaseous emissions: a pilot NATO C.L.G. project*. Proc. International Workshop on "Natural cataclysms and global problems of modern civilization", Baku, September 24-27, 2007, pp. 377-381.
- ALBARELLO D., PALO M., MARTINELLI G., 2012 – *Monitoring methane emission of mud volcanoes by seismic tremor measurements: a pilot study*. Natural Hazards and Earth System Sciences (NHES), **12**, pp. 3617-3629, doi: 10.5194/nhess-12-1-2012.
- ALLISON L.E., BERNSTEIN L., BOWER C.A., BROWN J.W., FIREMAN M., HATCHER J.T., HAYWARD H.E., PEARSON G.A., REEVE R.C., RICHARDS A., WILCOX L., 1954 – *Diagnosis and Improvement of saline and alkali soils*. In: L.A. Richards (ed.), United States Salinity Laboratory Staff, US Depart. of Agriculture, Washington, D.C.
- ANCEY C., JORROT H., 2001 – *Yield stress for particle suspensions within a clay dispersion*. Journ. of Rheology, **45**, pp. 297-320.
- ANGELONE M., GASPARINI C., GUERRA M., LOMBARDI S., PIZZINO L., QUATTROCCHI F., SACCHI E., ZUPPI G.M., 2004 – *Fluid geochemistry throughout the Sardinian Rift-Campidano Graben: fault segmentation, seismic quiescence of geochemically «active» faults and new constrains for the selection of the CO<sub>2</sub> storage sites*. Applied Geochemistry, **20**, pp. 317-340.
- ANNUNZIATELLIS A., CIOTOLI G., LOMBARDI S., NOLASCO F., 2003 – *Short- and long-term gas hazard: the release of toxic gases in the Alban Hills volcanic area (central Italy)*. Journ. Geoch. Exploration, **77**, pp. 93-108.
- ANNUNZIATELLIS A., BEAUBIEN S.E., BIGI S., CIOTOLI G., COLTELLA M., LOMBARDI S., 2008 – *Gas migration along fault systems and through the vadose zone in the Latera caldera (central Italy): Implications for CO<sub>2</sub> geological storage*. Internat. Journ. Greenhouse Gas Control, **2**(3), pp. 353-372.
- API RP 13-B1, 2014 – *Recommend Practice for Field Testing Water-Based Drilling Fluids*. 5<sup>th</sup> edition, American Petroleum Industry (API) Washington, D.C.
- ASTM D4373-02, 2002 – *Standard Test Method for Rapid Determination of Carbonate Content of Soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D422-63, 2007 – *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

- BALDOCCHI D.D., MEYERS T.P., 1991 – *Trace gas exchange above the floor of a deciduous forest. Evaporation and CO<sub>2</sub> flux*. Journal of Geophysical Research, **96**, pp. 7271-7285.
- BARBIERI G., 1947 – *Nuove osservazioni sulle salse emiliane*. Riv. Geogr. It., **54**, pp. 172-185.
- BAROZZINI E., BERTOOGNA I., CASTALDINI D., DALLAI D., DEL PRETE C., CHIRIAC C., GORGONI C., ILIES D.C., SALA L., VALDATI J., 2004 – *Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano: Carta Turistico-Ambientale*. Comune di Fiorano, Assessorato Ambiente, Eliofofotecnica Barbieri, Parma.
- BAUBRON J.C., RIGO A., TOUTAIN J.P., 2002 – *Soil gas profiles as a tool to characterize active tectonic areas: the Jaut Pass example (Pyrenees, France)*. Earth and Planetary Science Letters, **196**, pp. 69-81.
- BEAUBIEN S., STRUTT M.H., JONES D.G., BAUBRON C., CARDELLINI C., LOMBARDI S., QUATTROCCHI F., PENNER L., 2003a – *D20 Report: soil gas surveys in the Weyburn oil field 2001-2003*. British Geological Survey, Commissioned Report no. CR/04/030.
- BEAUBIEN S.E., CIOTOLI G., LOMBARDI S., 2003b – *Carbon dioxide and radon gas hazard in the Alban Hills area (central Italy)*. Journ. Volcanol. Geotherm. Res., **123**, pp. 63-80.
- BERTACCHINI M. (a cura di), 2009 – *GEO-Benessere. La Geologia tra Salute e Wellness*. Edizioni Artestampa, Modena. 131 pp.
- BERTACCHINI M., GIUSTI C., PELLEGRINI M., TOSATTI G., 1999a – *Le Salse di Puianello*. In: “I Beni Geologici della Provincia di Modena”, Dipart. Scienze della Terra, Università di Modena e Reggio E. - Assess. Difesa del Suolo e Tutela dell’Ambiente, Provincia di Modena, Artioli Ed., Modena, **41**, pp. 50-51.
- BERTACCHINI M., GIUSTI C., PELLEGRINI M., 1999b – *La Salsa della Cintora o Centora o di Montardone o di Rocca Santa Maria*. In: “I Beni Geologici della Provincia di Modena”, Dipart. Scienze della Terra, Università di Modena e Reggio E. - Assess. Difesa del Suolo e Tutela dell’Ambiente, Provincia di Modena, Artioli Ed., Modena, **44**, p. 52.
- BERTOLANI M., 1980 – *Fiorano e il suo territorio*. Documenti e Ricerche del Comune di Fiorano Modenese, pp. 1-24.
- BERTRAMI R., CECCARELLI A., LOMBARDI S., 1984 – *L’elio dei gas del suolo nella prospezione geotermica*. Rend. Soc. Ital. Mineral. Petrogr., **39**, pp. 331-342.
- BIANCONI G., 1840 – *Storia naturale dei terreni ardenti, dei vulcani fangosi, delle sorgenti infiammabili, dei pozzi idropinici e di altri fenomeni geologici operati dal gas idrogeno*. Tipografia Jacopo Marsigli, Bologna, 215 pp.
- BIASUTTI R., 1907 – *Le salse dell’Appennino settentrionale*. Mem. Geogr., **2**, pubbl. suppl. Riv. Geogr. It.
- BOCCALETTI M., BONINI M., CORTI G., GASPERINI P., MARTELLI L., PICCARDI L., SEVERI P., VANNUCCI G. con contributi di MORATTI G. & SARTI G., 2004 – *Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna, scala 1:250.000*. SELCA, Firenze.
- BOCCONE P., 1684 – *Osservazioni naturali attorno i fuochi sotterranei osservati nel Modenese*. Bologna.
- BODVARSSON G., 1970 – *Confined fluids as strain meters*. Journ. Geophys. Res., **7**, pp. 2711-2718.
- BONAPOSTA D., DE NARDO M.T., 2017 – *Attivazioni storicamente documentate delle salse del margine appenninico modenese e reggiano*. Suppl. Atti Soc. Nat. Mat. di Modena, **148** (nel presente volume).
- BONAZZI U., TOSATTI G., 1999 – *Le Salse di Nirano*. In: “I Beni Geologici della Provincia di Modena”, Dipart. Scienze della Terra, Università di Modena e Reggio E. - Assess. Difesa del Suolo e Tutela dell’Ambiente, Provincia di Modena, Artioli Ed., Modena, **40**, pp. 48-50.
- BONAZZI U., BERTACCHINI M., GIUSTI C., PELLEGRINI M., 1999 – *La Salsa di Montegibbio*. In: “I Beni Geologici della Provincia di Modena”, Dipart. Scienze della Terra, Università di Modena e Reggio E. - Assess. Difesa del Suolo e Tutela dell’Ambiente, Provincia di Modena, Artioli Ed., Modena, **45**, pp. 52-53.
- BONINI M., 2007 – *Interrelations of mud volcanism, fluid venting, and thrust-anticline folding: Examples from the external northern Apennines (Emilia-Romagna, Italy)*. J. Geophys. Res., **112**, B08413, doi: 10.1029/2006JB004859.
- BONINI M., 2008a – *Elliptical mud volcano caldera as stress indicator in an active compressional setting (Nirano, Pede-Apennine margin, northern Italy)*. Geology, **36**, pp. 131-134.
- BONINI M., 2008b – *I vulcani di fango emiliani: retrospettiva e prospettive*. Geoitalia, **22**, pp. 12-21.
- BONINI M., 2009 – *Mud volcano eruptions and earthquakes in the Apennines, Italy*. Tectonophysics, **474**(3), pp. 723-735.
- BONINI M., 2012 – *Mud volcanoes: Indicators of stress orientation and tectonic controls*. Earth-Science Reviews, **115**, pp. 121-152.
- BONINI M., 2013 – *Fluid seepage variability, across the external Northern Apennines (Italy): structural controls with seisomotectonic and geodynamic implications*. Tectonophysics, **590**, pp. 151-174.

- BORELLI C., FANTONI L., 2010 – *Relazione geologica e indagine geognostica in località Ca' Rossa del Comune di Fiorano Modenese*. Relazione tecnica inedita, Servizio Lavori Pubblici del Comune di Fiorano Modenese.
- BOSCHETTI T., TOSCANI L., SHOUAKAR-STASH O., IACUMIN P., VENTURELLI G., MUCCHINO C., FRAPE S.K., 2011 – *Salt Waters of the Northern Apennine Foredeep Basin (Italy): Origin and Evolution*. *Aquat. Geochem.*, **17**, pp. 71-108, doi: 10.1007/s10498-010-9107-y.
- BRADY B.T., RICE R.S., 1977 – *Helium determinations as an exploration technique at the Ambrosia Lake uranium district, McKinley County, New Mexico*. Open-File Report, pp. 77-669.
- BREDEHOEFT J.D., 1967 – *Response of well-aquifer systems to Earth tides*. *J. Geophys. Res.*, **72**, pp. 3075-3087.
- BROMBACH T., HUNZIKER J.C., CHIODINI G., CARDELLINI C., 2001 – *Soil diffuse degassing and thermal energy fluxes from the southern Lakki Plain, Nisyros (Greece)*. *Geophysical Research Letters*, **28**(1), pp. 69-72.
- BROWN A., 2000 – *Evaluation of possible gas micro-seepage mechanism*. *AAPG Bulletin*, **184**(11), pp. 1775-1789.
- CALEGARI M., CANESTRINI G., 1867 – *Storia della salsa di sopra presso Sassuolo, della sorgente della Salvarola e dei pozzi oleiferi di Montegibito*. *Annuario Soc. Nat. in Modena*, **2**, pp. 147-168.
- CAMERANA E., 1926 – *Le manifestazioni di idrocarburi dell'Emilia*. *Mem. Descr. Carta Geol. It.*, **20**, pp. 21-69.
- CANESTRINI G., 1865 – *Il petrolio nel Modenese e in alcune località attigue del Reggiano*. Appendice del giornale "Il Panaro" n. 275, 1° dicembre 1865, Modena.
- CANEVA A., 1958 – *Ricerche geofisiche sulla Salsa di Regnano (Prov. di Reggio Emilia)*. *Geofis. Meteorol.*, **6**, pp. 71-84.
- CANNAROZZO R., CUCCHIARINI L., MESCHIERI W., 2009 – *Misure, rilievo, progetto*. Vol. 2, Zanichelli, Bologna, 576 pp.
- CAPASSO G., INGUAGLIATO S., 1998 – *A simple method for the determination of dissolved gases in natural water: an application to thermal water from Vulcano Island*. *Applied Geochemistry*, **13**, pp. 631-642.
- CAPOZZI R., PICOTTI V., 2002 – *Fluid migration and origin of a mud volcano in the northern Apennines (Italy): the role of deeply rooted normal faults*. *Terra Nova*, **14**, pp. 363-370.
- CARDELLINI C., CHIODINI G., FRONDI F., 2003 – *Application of stochastic simulation to CO<sub>2</sub> flux from soil: mapping and quantification of gas release*. *Journ. Geophys. Research*, **108** (B9), pp. 2425-2438.
- CAROBENE L., GASPERI G., 2008 – *Vulcanetti di fango a Nirano (Modena)*. *Geoitalia*, **25**, pp. 42-43.
- CARPENITO G., 2007 – *Indagini archeometriche di ceramiche "d'impasto" provenienti dalla terramara di Gorzano (Modena)*. Tesi di dottorato di ricerca, Università di Modena e Reggio Emilia, inedita.
- CASOLI S., 2001 – *Su un fenomeno naturale descritto da Plinio (nat. 2, 199) accaduto nel territorio modenese*. In: L. Quilici & S. Quilici "Urbanizzazione delle campagne nell'Italia antica", pp. 63-70, L'Erma di Bretschneider, Roma.
- CASTALDINI D., CHIRIAC C., ILIES D.C. con la collaborazione di BAROZZINI E., 2003 – *Documenti digitali per la conoscenza integrata dei Geositi: l'esempio della Riserva Naturale delle Salse di Nirano*. In S. Piacente & G. Poli (a cura di) "La Memoria della Terra. La Terra della Memoria", Regione Emilia-Romagna, Ed. L'inchiostroblu, Bologna, pp. 121-127.
- CASTALDINI D., VALDATI J., ILIES D.C., CHIRIAC C. with contributions by BERTOGLIA I., 2005 – *Geo-Tourist Map of the Natural Reserve of Salse di Nirano (Modena Apennines), Northern Italy*. *Il Quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences*, **18**(1), Special Volume, pp. 245-255.
- CASTALDINI D., CONTI S., CONVENTI M., DALLAI D., DEL PRETE C., FAZZINI M., FONTANA D., GORGONI C., GHINOI A., RUSSO A., SALA L., SERVENTI P., VERRI D., BARBIERI M., 2007 – *Le Salse di Nirano*. CD ROM, Enciclopedia Multimediale, Comune di Fiorano Modenese.
- CASTALDINI D., VALDATI J., ILIES D.C., 2009 – *Geomorphological and Geotourist Maps of the Upper Tagliole Valley (Modena Apennines, Northern Italy)*. *Mem. Descr. Carta Geol. It.*, **86**, pp. 29-38.
- CASTALDINI D., CORATZA P., 2011 – *Accordi per la "Realizzazione di studi e documenti scientifici per la promozione turistico-ambientale della Riserva Naturale delle Salse di Nirano"*. Rapporto Interno, Comune di Fiorano Modenese.
- CASTALDINI D., CONVENTI M., CORATZA P., LIBERATOSCIOLI E., con il contributo di DALLAI D., SALA L., BULDRINI F., 2011a – *La "Nuova" Carta Turistico-Ambientale della Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano (Appennino modenese, Italia settentrionale)*. *Bollettino A.I.C.* nr. **143**/2011, ISSN 00449733, pp. 275-289.

- CASTALDINI D., CONVENTI M., CORATZA P., DALLAI D., LIBERATOSCIOLI E., SALA L., BULDRINI F., 2011b – *Carta Turistico-Ambientale della Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano. Comune di Fiorano Modenese*. Tipolitografia Notizie, Modena, ISBN 978-88-906052-0-8.
- CASTALDINI D., CORATZA P., LIBERATOSCIOLI E., TOSATTI G., 2013 – *Accordo per l'implementazione di studi e documenti scientifici quali indagini conoscitive propedeutiche alla redazione di progetti di sviluppo per la Riserva Naturale delle Salse di Nirano e propedeutiche alla redazione di progetti di risanamento ambientale*. Rapporto Interno, Comune di Fiorano Modenese.
- CASTALDINI D., CORATZA P., 2017 – *Mud volcanoes in the Emilia-Romagna Apennines: small landforms of outstanding scenic and scientific value*. In: M. Soldati & M. Marchetti (eds.) "Landscapes and Landforms of Italy", Springer International Publishing AG, pp. 225-234, doi: 10.1007/978-3-319-26194-2.
- CASTALDINI D., CONVENTI M., 2017 – *Inquadramento geografico e caratteristiche delle Salse di Nirano*. Suppl. Atti Soc. Nat. Mat. di Modena, **148** (nel presente volume).
- CASTALDINI D., FIORONI C., SOLDATI M., 2017a – *I vulcani di fango più spettacolari d'Italia: visita guidata alle Salse di Nirano (Appennino modenese)*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **102** (2014), pp. 7-16, ISSN 0536-0242.
- CASTALDINI D., CORATZA P., DE NARDO M.T., 2017b – *Geologia e geomorfologia del campo delle Salse di Nirano*. Suppl. Atti Soc. Nat. Mat. di Modena, **148** (nel presente volume).
- CHESTER R., HUGHES M.J., 1967 – *A chemical technique for the separation of ferro-manganese minerals, carbonate minerals and adsorbed trace elements from pelagic sediments*. Chemical Geology, **2**, pp. 249-262.
- CHILINGARIAN G.C., VORABUTR P., 1981 – *Drilling and Drilling Fluids*. Elsevier, Amsterdam.
- CHIODINI G., COMODI P., GIAQUINTO S., 1988 – *Ammonia and boric acid in steam and water: Experimental data from geothermal wells in the Phlegrean Fields, Naples, Italy*. Geothermics, **17**, pp. 711-718.
- CHIODINI G., FRONDI F., PONZIANI F., 1995 – *Deep structures and carbon dioxide degassing in Central Italy*. Geothermics, **24**, pp. 81-94.
- CHIODINI G., FRONDI F., CARDELLINI C., PARELLO C., PERUZZI L., 2000 – *Rate of diffuse carbon dioxide. Earth degassing estimated from carbon balance of regional aquifers: the case of the central Apennines, Italy*. Journal of Geophysical Research, **105** (B4), pp. 8423-8434.
- CHIODINI G., FRONDI F., 2001 – *Carbon dioxide degassing from the Albani Hills volcanic region, central Italy*. Chemical Geology, **177**, pp. 67-83.
- CHIODINI G., CALIRO S., CARDELLINI C., FRONDI F., INGUAGGIATO S., MATTEUCCI F., 2011 – *Geochemical evidence for and characterization of CO<sub>2</sub> rich gas sources in the epicentral area of the Abruzzo 2009 earthquakes*. Earth Planet. Sci. Lett., **304**, pp. 389-398.
- CIOTOLI G., GUERRA M., LOMBARDI S., VITTORI E., 1998 – *Soil gas survey for tracing seismogenic faults: a case study in the Fucino Basin, Central Italy*. Journal of Geophysical Research, **103**, pp. 23781-23794.
- CIOTOLI G., ETIOPE G., GUERRA M., LOMBARDI S., 1999 – *The detection of concealed faults in the Ofanto Basin using the correlation between soil-gas fracture surveys*. Tectonophysics, **301**, pp. 321-332.
- CIOTOLI G., LOMBARDI S., MORANDI S., ZARLENGA F., 2005 – *A multidisciplinary statistical approach to study the relationships between helium leakage and neo-tectonic activity in a gas province. The Vasto Basin, Abruzzo-Molise (central Italy)*. Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., **88**, pp. 355-372.
- CIOTOLI G., LOMBARDI S., ANNUNZIATELLIS A., 2007 – *Geostatistical analysis of soil gas data in a high seismic intermontane basin: Fucino Plain, central Italy*. Journ. Geophys. Res., **112**, B05407, doi: 10.1029/2005JB004044.
- CIPRIANI A., LUGLI F., MARTINELLI G., SCIARRA A., 2017 – *Analisi isotopiche (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr, <sup>δ</sup><sup>18</sup>O, δD e trizio) delle Salse di Nirano*. Suppl. Atti Soc. Nat. Mat. di Modena, **148** (nel presente volume).
- CONEN F., SMITH K.A., 2000 – *An explanation of linear increases in the gas concentration under closet chambers used to measure gas exchange between soils and the atmosphere*. European Journal of Soil Science, **51**, pp. 111-117.
- CONTI A., SACCHI E., CHARLE M., MARTINELLI G., ZUPPI G.M., 2000 – *Geochemistry of the formation waters in the Po Plain (Northern Italy): an overview*. Appl. Geoch., **15**, pp. 51-65.
- CONTI S., FONTANA D., GUBERTINI A., BUSSI P., 2003 – *The Modena-Reggio mud volcanoes (northern Italy): an actualistic model for the interpretation of Miocene authigenic carbonates related to fluid expulsion*. GeoActa, vol. **2**, pp. 167-180, Bologna.
- COPPI F., 1875 – *Brevi note sulle Salse modenesi*. Bollettino del R. Comitato Geologico, **6**, n. 7-8, pp. 1-7.
- CRAIG H., 1961 – *Isotopic variations in meteoric waters*. Science, **133**, pp. 1702-1703.

- DE BUOI L., 1937 – *Su alcuni fenomeni eruttivi osservati nelle salse di Nirano Modenese e considerazioni ed ipotesi sul meccanismo eruttivo delle salse emiliane*. Reggio Emilia.
- DE LA GROYE MENARD F.J.B., 1818 – *Description de l'état des salses du Modenais dans l'été de l'année 1814; indications d'effets semblables qui ont été observés dans d'autres contrées; définition générale et rapprochement*. Journal de Physique, Vol. LXXXVI, Paris.
- DELISLE G., TESCHNER M., FABER E., PANABI B., GULIEV I., ALIEV C., 2010 – *First approach in quantifying fluctuating gas emissions of methane and radon from mud volcanoes*. American Association of Petroleum Geologists Memoir, M 93, pp. 211-224.
- DEL VECCHIO U., DAMIANO N., SANTAGATA T., 2017 – *Rilievo 3D in grotta: comparazione di diverse metodologie*. Atti III Convegno Regionale di Speleologia “Campania Speleologica 2017”, Napoli.
- DI PIETRO P. (a cura di), 1985 – *Lazzaro Spallanzani: viaggi nell'Appennino modenese e reggiano*. Boni, Bologna, 266 pp.
- DURANTE C., BASCHIERI C., BERTACCHINI L., BERTELLI D., COCCHI M., MARCHETTI A., MANZINI D., PAPOTTI G., SIGHINOLFI S., 2015 – *An analytical approach to Sr isotope ratio determination in Lambrusco wines for geographical traceability purposes*. Food Chemistry, **173**, pp. 557-563, doi: 10.1016/j.foodchem.2014.10.086.
- EHRlich S., BEN-DOR L., HALICZ L., 2004 – *Precise isotope ratio measurement by MCICP-MS without matrix separation*. Canadian Journal of Analytical Sciences and Spectroscopy, **49**, no. 3, pp. 136-147.
- ETIOPE G., 2003 – *A new estimate of global methane flux to the atmosphere from onshore and shallow submarine mud volcanoes*. XVI INQUA Congress, Reno, July 25, 2003, Geological Society of America.
- ETIOPE G., LOMBARDI S., 1995 – *Evidence for radon transport by carrier gas through faulted clays in Italy*. Journ. Radioanalyt. Nucl. Chem., **193**(2), pp. 291-300.
- ETIOPE G., MARTINELLI G., CARACAUSI A., ITALIANO F., 2007 – *Methane seeps and mud volcanoes in Italy: gas origin, fractionation and emission to the atmosphere*. Geophysical Research Letters, **34**, doi: 10.1029/2007GL030341.
- ETIOPE G., FEYZULLAYEV A., BACIU C.L., 2009 – *Terrestrial methane seeps and mud volcanoes: a global perspective of gas origin*. Marine and Petroleum Geology, **26**, pp. 333-344.
- FERRARI C., VIANELLO G., 1985 – *Le salse dell'Emilia-Romagna*. In: P. Testoni (a cura di) “Collana naturalistica”, Assessorato Ambiente e Difesa del Suolo, Regione Emilia-Romagna, Bologna, 148 pp.
- FERRARINI G., 2015 – *Studio micropaleontologico dei prodotti dell'attività dei vulcani di fango delle Salse di Nirano (Fiorano Modenese, MO)*. Tesi di Laurea triennale (inedita) in Scienze Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, a.a. 2014-15, Relatore Dr. Cesare A. Papazzoni, Correlatori Prof. D. Castaldini e Dr. C. Grillenzoni, 110 pp.
- FERRETTI A., 1878 – *Sopra i vulcani di fango e le argille scagliose del Modenese*. Bollettino del R. Comitato Geologico, **5-6**, pp. 174-187.
- FRASSONI A., 1660 – *De thermarum Montis Gibii natura, usu, atque praestantia*. Tractatus, Mutinae.
- FREHNER M., LUPI M., 2014 – *Earthquake-induced seismic tremor explained by Krauklis wave resonance in fractured reservoir rocks: a case study of Salse di Nirano mud volcanic field (Italy)*. EGU General Assembly, April 27 - May 2 2014, Vienna.
- FREHNER M., RITA SHIH P.J., LUPI M., 2014 – *Initiation of Krauklis waves by incident seismic body waves: numerical modeling, laboratory perspectives, and application for fracture-size estimation*. SEG Technical Program Expanded Abstracts, pp. 3422-3427, doi: 10.1190/segam2014-0144.
- FUCHS K., 1876 – *Les volcans et les tremblements de terre*. Paris, p. 168.
- GASPERI G., CREMASCHI M., MANTOVANI UGUZZONI M.P., CARDARELLI A., CATTANI M., LABATE D., 1989 – *Evoluzione plio-quadernaria del margine appenninico modenese e dell'antistante pianura. Note illustrative alla Carta geologica*. Mem. Soc. Geol. It., **39** (1987), pp. 375-431.
- GASPERI G., BETTELLI G., PANINI F., PIZZIOLI M., BONAZZI U., FIORONI C., FREGNI P., VAIANI S.C., 2005 – *Note illustrative e Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio n. 219 Sassuolo*. SELCA, Firenze.
- GEO MEDIA, 2017 – *Via dei Vulcani di Fango. Carta escursionistica (scala 1:25.000)*. Grafiche Sagi, Bagnolo in Piano (RE).
- GNGFG (GRUPPO NAZ. GEOGRAF. FISICA E GEOMORF.), 1987 – *Cartografia della pericolosità connessa ai fenomeni di instabilità dei versanti*. Boll. Soc. Geol. It., **196**, pp. 199-221.
- GORGONI C., 1988 – *La previsione dei terremoti*. In: “Rotary International 207° Distretto”, n. **11**, maggio 1988.
- GORGONI C., 1998 – *Le salse di Nirano e le altre salse emiliane ed acque salate padane. Geochimica, genesi ed importanza per la previsione sismica*. Comune di Fiorano Modenese, 135 pp.

- GORGONI C., 2003 – *Le salse di Nirano e le altre salse emiliane. I segreti di un fenomeno tra mito e realtà*. Comune di Fiorano Modenese, Tip. ABC, Sesto Fiorentino (FI), 128 pp.
- GORGONI C., LOMBARDI S., MARTINELLI G., SIGHINOLFI G.P., 1987 – *Fluidi di origine profonda nelle salse emiliano-romagnole come indicatori di eventi sismici*. Convegno Soc. Geol. It., Modena, 25-28 maggio 1987.
- GORGONI C., BONORI O., LOMBARDI S., MARTINELLI G., SIGHINOLFI G.P., 1988 – *Radon and helium anomalies in mud volcanoes from Northern Apennines (Italy). A tool for earthquake prediction*. *Geochemical Journal*, **22**, pp. 265-273.
- GOVI S., 1906 – *Appunti su alcune salse e fontane ardenti della Provincia di Modena*. *Rivista Geografica Italiana*, **13**, pp. 425-431.
- GOVI S., 1908 – *Di alcune salse delle province di Modena e Reggio*. *Rivista Geografica Italiana*, **15**, pp. 265-280.
- GRASSA F., CAPASSO G., FAVARA R., INGUAGGIATO S., FABER E., VALENZA M., 2004 – *Molecular and isotopic composition of free hydrocarbon gases from Sicily, Italy*. *Geophysical Research Letters*, **31**, L06607, doi: 10.1029/2003GL019362.
- GRUPPO DI LAVORO CPTI, 1999 – *Catalogo parametrico di terremoti italiani*. ING-GNDT-SGA-SSN, Bologna, 88 pp. (versione disponibile sul sito web).
- GUIDOBONI E. (a cura di), 1989 – *I terremoti prima del Mille in Italia e nell'area mediterranea: storia, archeologia, sismologia*. Istituto Nazionale di Geofisica - Storia Geofisica Ambiente, Bologna, 766 pp.
- HELLER C., BLUMENBERG M., KOKOSCHKA S., WREDE C., HOPPERT M., TAVIANI M., REITNER J., 2011 – *Geomicrobiology of Fluid Venting Structures at the Salse di Nirano Mud Volcano Area in the Northern Apennines (Italy)*. *Earth Sciences*, **131**, pp. 189-200, Springer-Verlag, doi: 10.1007/978-3-642-10415-2\_14.
- HELLER C., BLUMENBERG M., HOPPERT M., TAVIANI M., REITNER J., 2012 – *Terrestrial mud volcanoes of the Salse di Nirano (Italy) as a window into deeply buried organic-rich shales of Plio-Pleistocene age*. *Sedimentary Geology*, vol. **263-264**, pp. 202-209.
- HERMANSSON H.P., AKERBLUM G., CHYSSLER J., LINDEN A., 1991 – *Geogas: a Carrier or a Tracer*. SKN Report no. **51**, National Board for Spent Nuclear Fuel, Stockholm, pp. 1-66.
- HIGGINS G.E., SAUNDERS J.B., 1974 – *Mud volcanoes - their nature and origin*. *Verh. Naturforsch. Ges.*, **84**, Basel, pp. 101-152.
- HINKLE M., 1994 – *Environmental conditions affecting concentrations of He, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> in soil gases*. *Appl. Geochem.*, **9**, pp. 53-63.
- HUTCHINSON G.L., LIVINGSTON G.P., HEALY R.W., STRIEGL R.G., 2000 – *Chamber measurement of surface-atmosphere trace gas exchange: numerical evaluation of dependence on soil, interfacial layer and source/sink properties*. *Journal of Geophysical Research*, **105** (D7), pp. 8865-8875.
- INGV (ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA), 2017 – *Terremoti*. Sito web: <http://www.ingv.it/>.
- ITALIANO F., LIOTTA M., MARTELLI G., MARTINELLI M., PETRINI R., RIGGIO A., RIZZO A.L., SLEJKO F., STENNI B., 2012 – *Geochemical features and effects on deep-seated fluids during the May-June 2012 southern Po Valley seismic sequence*. *Ann. Geophys.*, **55**(4), pp. 815-821, doi: 10.4401/ag-6151.
- JONES D.G., BAUBIEN S., STRUTT M.H., BAUBRON C., CARDELLINI C., LOMBARDI S., QUATTROCCHI F., PENNER L., 2003 – *Additional Soil Gas Monitoring at the Weyburn unit 2003*. Task 2.8 Report. British Geological Survey, Commissioned Report CR/ 03/326, EC Project Weyburn, Contract no. ENK5-2000-00304, EC (Sustainable Development and Energy) Brussels, Belgium.
- JONES D.G., BAUBIEN S., BAUBRON C., CINTI D., DAVIS J.R., EMERY C., FASCETTI A., LOMBARDI S., MICHEL K., MORGANTINI N., PENNER L., QUATTROCCHI F., STRUTT M.H., 2005 – *Continued soil gas monitoring at the Weyburn Unit in 2004*. British Geological Survey, Commissioned Report no. CR/05/033, 68 pp.
- JONSTRAIBIZER P., 1970 – *Determinazione rapida di calcite e dolomite per via gasvolumetrica nei sedimenti*. *Boll. Soc. Geol. It.*, **89**, pp. 401-413.
- KICKLIGHTER D.W., MELILLO J.M., PETERJOHN W.T., RASTETTER E.B., MCGUIRE A.D., STEUDLER P.A., 1994 – *Aspects of spatial and temporal aggregation in estimating regional carbon dioxide fluxes from temperate forest soils*. *Journal of Geophysical Research*, **99**, pp. 1303-1315.
- KING C.Y., ZHANG W., KING B.S., 1993 – *Radon anomalies on three kind of faults in California*. *Pure and Applied Geophysics*, **141**, pp. 111-124.
- KLUSMAN R.W., 1993 – *Soil gas and related methods for natural resources exploration*. Wiley, New York, 483 pp.
- KOPF A., 2002 – *Significance of mud volcanism*. *Review of Geophysics*, **40**(2), pp. 2-52.

- KOPF A., DELISLE G., FABER E., PANAHİ B., ALIYEV C.S., GULIYEV I., 2010 – *Long-term in situ monitoring at Dashgil mud volcano, Azerbaijan: a link between seismicity, pore pressure transients and methane emission*. Internat. Journ. Earth Sci. (Geol. Rundsch.), **99** (Suppl. 1), pp. 227-240.
- LIBERATOSCIOLI E., CASTALDINI D., CONVENTI M., CORATZA P., 2011 – *Elaborazioni GIS 3D per la lettura del territorio: un esempio per la Riserva Naturale delle Salse di Nirano (Appennino modenese)*. Atti 15<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA, Reggio di Colorno (PR), 15-18 novembre 2011, pp. 1409-1417.
- LOMBARDI S., DI FILIPPO M., ZANTEDESCHI L., 1984 – *Helium in the Phlegrean Fields soil gases*. July 20<sup>th</sup>-26<sup>th</sup>, September 19<sup>th</sup>-25<sup>th</sup>, Bull. Volcanol., **47**, pp. 259-265.
- LOMBARDI S., VOLTATTORNI N., 2010 – *Rn, He and CO<sub>2</sub> soil gas geochemistry for the study of active and inactive faults*. Appl. Geochem., **25**, pp. 1206-1220.
- LONGINELLI A., SELMO E., 2003 – *Isotopic composition of precipitation in Italy: a first overall map*. Journ. Hydrology, **270**, pp. 75-88.
- LORENZI A., 1902 – *Intorno ad alcune salse del Modenese*. Rivista Geografica Italiana, **9**, pp. 409-506.
- LUGLI F., CIPRIANI A., PERETTO C., MAZZUCHELLI M., BRUNELLI D., 2017 – *In situ high spatial resolution <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratio determination of two Middle Pleistocene (c.a. 580 ka) Stephanorhinus hundsheimensis teeth by LA-MC-ICP-MS*. International Journal of Mass Spectrometry, **412**, pp. 38-48, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijms.2016.12.012>.
- LUPI M., FUCHS F., PACHECO J.F., 2014 – *Fault reactivation due to the M 7.6 Nicoya earthquake at the Turrialba-Irazú volcanic complex, Costa Rica: effects of dynamic stress triggering*. Geophys. Res. Lett., **41**(12), pp. 4142-4148.
- LUPI M., SUSKI RICCI B., 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*. Geophys. Journ. Internat., **204**(2), pp. 907-917, doi: 10.1093/gji/ggv454.
- MACCAFERRI A., 2016 – *Relazione geologica inerente un modesto movimento franoso interessante un'area ricompresa nella Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano*. Relazione geologica inedita, Comune di Fiorano Modenese.
- MACINI P., MESINI E., 2017 – *Indagini sperimentali sulle caratteristiche reologiche di alcuni fanghi emergenti dalle Salse di Nirano*. Suppl. Atti Soc. Nat. Mat. di Modena, **148** (nel presente volume).
- MALAGOLI M., 1883 – *Bibliografia geologica e paleontologica della Provincia di Modena*. Atti Soc. Nat. di Modena, **17**, pp. 165-218.
- MAMYRIN B.A., TOLSTIKHIN I.N., 1984 – *Helium Isotopes in Nature*. Elsevier, Amsterdam, ISBN 9781483289809.
- MANCINI C., QUATTROCCHI F., GUADONI C., PIZZINO L., PORFIDIA B., 2000 – *<sup>222</sup>Rn study throughout different seismotectonic areas: comparison between different techniques for discrete monitoring*. Annali di Geofisica, **43**, pp. 1-28.
- MANGA M., BRUMM M., RUDOLPH M.L., 2009 – *Earthquake triggering of mud volcanoes*. Marine and Petroleum Geology, **26**, pp. 1785-1798.
- MANGA M., BONINI M., 2012 – *Large historical eruptions at subaerial mud volcanoes, Italy*. Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., **12**, pp. 3377-3386.
- MARTINELLI G., 1999 – *Mud volcanoes of Italy: a review*. G. Geol., **61**, pp. 107-113.
- MARTINELLI G., FERRARELLO D., 1991 – *Earthquake forerunners in a selected area of Northern Italy: recent developments in automatic geochemical monitoring*. Tectonophysics, **193**, pp. 397-410.
- MARTINELLI G., DADOMO A., 2003 – *Geochemical model of mud volcanoes from reviewed worldwide data*. In: G. Martinelli & B. Panahi (eds.) "Mud Volcanoes, Geodynamics and Seismicity", Proc. NATO Advanced Research Workshop on Mud Volcanism, Geodynamics and Seismicity, Baku, pp. 211-220.
- MARTINELLI G., JUDD A., 2004 – *Mud volcanoes of Italy*. Geological Journal, **39**, pp. 49-61.
- MARTINELLI G., DADOMO A., 2017 – *Misura in continuo di temperatura e livello del fango in una emissione selezionata delle Salse di Nirano*. Suppl. Atti Soc. Nat. Mat. di Modena, **148** (nel presente volume).
- MARTINELLI G., ALBARELLO D., MUCCIARELLI M., 1995 – *Radon emission from mud volcanoes in Northern Italy: possible connection with local seismicity*. Geophys. Res. Lett., **22**(15), pp. 1989-1992.
- MASOTTI G., 2007 – *Progetto preliminare di ristrutturazione edilizia di fabbricati dismessi siti in Fiorano Modenese, fraz. Spezzano, Loc. Ca' Rossa*. Relazione geologica-geotecnica (inedita), CD rom.
- MAZZINI A., SVENSEN H., ETIOPE G., ONDERDONK N., BANKS D., 2011 – *Fluid origin, gas fluxes and plumbing system in the sediment-hosted Salton Sea Geothermal System (California, USA)*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, **205**, pp. 67-83.

- McARTHUR J.M., HOWARTH R.J., BAILEY T.R., 2001 – *Strontium isotope stratigraphy: LOWESS version 3, best fit to the marine Sr-isotope curve for 0-509 Ma and accompanying look-up table for deriving numerical age*. Journ. of Geology, **109**(2), pp. 155-170.
- MERCALLI G., 1883 – *Vulcani e fenomeni vulcanici in Italia*. Parte terza, Milano.
- MILLER R.O., KISSEL D.E., 2010 – *Comparison of soil pH methods on soils of North America*. Soils Science Society of American Journal, **74**, pp. 310-316.
- MINISALE A., MAGRO G., MARTINELLI G., VASELLI O., TASSI F., 2000 – *A fluid geochemical transect in the northern Apennines (central-northern Italy): fluid genesis and migration and tectonic implications*. Tectonophysics, **319**, pp. 199-222.
- MUCCHI A.M., 1966 – *Il fenomeno delle salse e le manifestazioni del Modenese*. Atti Soc. Nat. Mat. di Modena, **97**, pp. 1-31.
- MUCCHI A.M., 1968 – *Le salse del Modenese e del Reggiano*. L'Universo, **48**(3), pp. 421-436.
- NGUYEN Q.D., BOGER D.V., 1992 – *Measuring the fluid properties of yield stress fluids*. Ann. Rev. Fluid Mech., **24**, pp. 47-88.
- NORMAN J.M., GARCIA R., VERMA S.B., 1992 – *Soil surface CO<sub>2</sub> fluxes and the carbon budget of a grassland*. Journal of Geophysical Research, **97**, pp. 18845-18853.
- NORMAN J.M., KUCHARIK C.J., GOWER S.T., BALDOCCHI D.D., CRILL P.M., RAYMENT M., SAVAGE K., STRIEGL R.G., 1997 – *A comparison of six methods for measuring soil surface carbon dioxide fluxes*. Journal of Geophysical Research, **102**, pp. 28771-28777.
- OPPO D., 2011 – *Studio dei vulcani di fango per la definizione della migrazione dei fluidi profondi*. Dottorato di ricerca in Scienze della Terra, XXIV ciclo, 207 pp.
- OPPO D., CAPOZZI R., PICOTTI V., 2013 – *A new model of the petroleum system in the Northern Apennines, Italy*. Marine and Petroleum Geology, **48**, pp. 57-76.
- OPPO D., CAPOZZI R., PICOTTI V., PONZA A., 2015 – *A genetic model of hydrocarbon-derived carbonate chimneys in shelf fine-grained sediments: The Enza River field, Northern Apennines (Italy)*. Marine and Petroleum Geology, <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.03.002>.
- OPPO D., VIOLA I., CAPOZZI R., 2017 – *Fluid sources and stable isotope signatures in authigenic carbonates from the Northern Apennines, Italy*. Marine and Petroleum Geology, **86**, pp. 606-619.
- PALLASSER R.J., 2000 – *Recognizing biodegradation in gas/oil accumulations through the  $\delta^{13}C$  compositions of gas components*. Organic Geochemistry, **31**, pp. 1363-1373.
- PANIZZA M., 2007 – *Geomorfologia*. Pitagora Ed. (3ª ediz.), Bologna, 368 pp., ISBN 8837116578.
- PANTANELLI D., SANTI V., 1896 – *L'Appennino modenese*. Ed. L. Cappelli, Rocca San Casciano, Ristampa 1996, Ed. Iaccheri, Pavullo nel Frignano.
- PAPAZZONI C.A., 2017 – *Studio micropaleontologico dei fanghi delle Salse di Nirano*. Suppl. Atti Soc. Nat. Mat. di Modena, **148** (nel presente volume).
- PAPOTTI D., 2002 – *Riflessioni preliminari ad una standardizzazione della simbologia per l'escursionismo*. Bollettino dell'A.I.C., n. **114-115**, pp. 55-66.
- PELLEGRINI M., BRAZZOROTTO C., FORTI P., FRANCAVILLA F., RABBI E., 1982 – *Idrogeologia del margine pede-appenninico emiliano-romagnolo*. In: G. Cremonini & F. Ricci Lucchi (a cura di) "Guida alla geologia del margine appenninico-padano", Guida Geol. Reg., Soc. Geol. It., Bologna, pp. 183-189.
- PELLEGRINI G.B., CARTON A., CASTALDINI D., CAVALLIN A., D'ALESSANDRO L., DRAMIS F., GENTILI B., LAURETI L., PRESTININZI A., RODOLFI G., SAURO U., SORRISO VALVO M., SPAGNA V., 1993 – *Proposta di legenda geomorfologica ad indirizzo applicativo*. Geogr. Fis. Din. Quat., **16**, pp. 129-152, Torino.
- PIACENTINI T., CASTALDINI D., CORATZA P., FARABOLLINI P., MICCADEI E., 2011 – *Geotourism: Some Examples in Northern-Central Italy*. GeoJournal of Tourism and Geosites, IV(2), vol. **8**, pp. 240-262.
- PILO M., 1882 – *Le salse dell'Emilia - saggio geologico*. Reggio Emilia.
- PLINIO IL VECCHIO, 75-79 d.C. (circa) – *Storia naturale (Historia mundi naturalis)*. Libro II-85 (6 Voll. con testo latino a fronte), 1997, "I Millenni", 928 pp., Einaudi, Milano.
- PROVINCIA DI MODENA, 2009 – *PTCP - Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale, Documenti di Piano*. Approvato con Delibera del Consiglio Provinciale n° 46 del 18/03/2009, Rischio da frana: carta del dissesto e Atlante delle aree a rischio elevato e molto elevato, Area programmazione e Pianificazione Territoriale, DVD.
- RAMAZZINI B., 1698 – *De petroleo Montis Zibinii*. Mutinae.
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 2010 – *Cartografia geologica on-line in scala 1:10.000 della Regione Emilia-Romagna*. Consultabile al sito web: [www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/cartografia/sito\\_cartografia/sito\\_cartografia.htm](http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/cartografia/sito_cartografia/sito_cartografia.htm).

- REIMER G.M., 1980 – *Use of soil-gas helium concentrations for earthquake prediction: limitations imposed by diurnal variation*. Journ. Geophys. Res., **85**, pp. 3107-3114.
- REIMER G.M., 1990 – *Reconnaissance techniques for determining of soil-gas radon concentrations: an example from Prince George County, Maryland*. Geophys. Res. Lett., **17**(6), pp. 809-812.
- ROBERTS A.A., FRIEDMAN I., DONOVAN T.J., DENTON E.H., 1975 – *Helium survey, a possible technique for locating geothermal reservoirs*. Geophys. Res. Letters, **2**, pp. 209-212.
- ROGIE J.D., KERRICK D.M., CHIODINI G., FRONDI F., 2000 – *Flux measurements of non-volcanic CO<sub>2</sub> emission from some vents in central Italy*. Journal of Geophysical Research, **105**, B4, pp. 8435-8445.
- RUTZINGER M., BREMER M., RAGG H., 2013 – *Roughness Estimation from Point Clouds - A Comparison of Terrestrial Laser Scanning and Image Matching by Unmanned Aerial Vehicle Acquisitions*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, EGU2013-9286, 2013 EGU General Assembly.
- SANTAGATA T., CAMORANI M., 2017 – *Rilevamento topografico delle Salse di Nirano*. Suppl. Atti Soc. Nat. Mat. di Modena, **148** (nel presente volume).
- SCHOELL M., 1980 – *The hydrogen and carbon isotopic composition of methane from natural gases of various origins*. Geochimica et Cosmochimica Acta, **44**, pp. 649-661.
- SCIARRA A., CANTUCCI B., BUTTINELLI M., GALLI G., NAZZARI M., PIZZINO L., QUATTROCCHI F., 2012 – *Soil-gas survey of liquefaction and collapsed caves during the Emilia seismic sequence*. Annals of Geophysics, **55**(4), doi: 10.4401/ag-6122.
- SCIARRA A., CINTI D., PIZZINO L., PROCESI M., VOLTATTORNI N., MECOZZI S., QUATTROCCHI F., 2013 – *Geochemistry of shallow aquifers and soil gas surveys in a feasibility study at the Rivara natural gas storage site (Po Plain, Northern Italy)*. Applied Geochemistry, **34**, pp. 3-22.
- SCIARRA A., CANTUCCI B., CASTALDINI D., PROCESI M., CONVENTI M., 2015a – *Between history, work and passion: medieval castle, mud volcanoes and Ferrari*. GFT - Geological Field Trips, Goldschmidt Conference, Florence, 2013, Fiorano Modenese, 31 August - 1 September 2013, doi: 10.3301/GFT.2015.01, ISSN 2038-4947, 42 pp.
- SCIARRA A., FASCETTI A., MORETTI A., CANTUCCI B., PIZZINO L., LOMBARDI S., GUERRA I., 2015b – *Geochemical and radiometric profiles through an active fault in the Sila Massif*. Journal of Geoch. Explor., **148**, pp. 128-137, doi: 10.1016/j.gexplo.2014.08.015.
- SCIARRA A., CANTUCCI B., CONVENTI M., RICCI T., 2017 – *Caratterizzazione geochimica e monitoraggio dei flussi e delle componenti gassose nella Riserva delle Salse di Nirano*. Suppl. Atti Soc. Nat. Mat. di Modena, **148** (nel presente volume).
- SCICLI A., 1972 – *L'attività estrattiva e le risorse minerarie della Regione Emilia-Romagna*. Artioli Ed., Modena, 626 pp.
- SEGOVIA N., SEIDEL J.L., MONNIN M., 1987 – *Variations of radon in soils induced by external factors*. Journ. Radioanalyt. Nucl. Chem. Lett., **119**, pp. 199-209.
- SGREGANZIOLI M., VASSENA G.P.M., 2007 – *Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner*. Starrylink Ed., Brescia, ISBN 978-88-89720-73-8.
- SINCLAIR A.J., 1974 – *Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs*. Journal of Geochemical Exploration, **3**, pp. 129-149.
- SINCLAIR A.J., 1991 – *A fundamental approach to threshold estimation in exploration geochemistry: probability plots revisited*. Journ. Geochem. Explor. **41**, pp. 1-22. [http:// dx.doi.org/10.1016/0375-6742\(91\)90071-2](http://dx.doi.org/10.1016/0375-6742(91)90071-2).
- SPALLANZANI L., 1795 – *Viaggi alle Due Sicilie e in alcune parti dell'Appennino*. Stamperia B. Comini, Pavia, 371 pp.
- STÖHR E., 1867 – *Schiarimenti intorno alla carta delle salse e delle località oleifere di Montegibbio*. Annuario Soc. Nat. in Modena, **2**, pp. 169-178.
- STÖHR E., 1869 – *Intorno agli strati terziari superiori di Montegibbio e vicinanze*. Annuario Soc. Nat. in Modena, **4**, pp. 271-281.
- STOPPANI A., 1866 – *Carta della zona petrolifera dell'Emilia*. Il Politecnico, Milano.
- STOPPANI A., 1876 – *Il Bel Paese*. Milano, 678 pp.
- STRUTT M.H., BAUBRON J.C., BEAUBIEN S.E., BRACH M., CARDELLINI C., GRANIERI D., JONES D.G., LOMBARDI S., BENNER L.A., QUATTROCCHI F., VOLTATTORNI N., 2003 – *Soil gas as a monitoring tool of deep geological sequestration of carbon dioxide: preliminary results from the PanCanadian EOR project in Weyburn, Saskatchewan (Canada)*. In: J. Gale & Y. Kaya (eds.) "Proc. 6<sup>th</sup> Internat. Conf. Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6)", vol. I, Elsevier, pp. 391-396.

- STRUTT M., BAUBRON J.C., BEAUBIEN S.E., CARDELLINI C., GRANIERI D., JONES D.G., LOMBARDI S., PENNER L., QUATTROCCHI F., 2004 – *Soil gas as a monitoring tool of deep geological sequestration of carbon dioxide: results from the three-year monitoring of the Encana Eor Project, Weyburn, Saskatchewan (Canada)*. In: Proc. VII Internat. Conf. “Green House Gases Technologies” (GHGT-7), Vancouver, Canada, September 2004, <http://www.ghgt7.ca>.
- TALAMI F., 2015 – *Analisi mineralogiche e granulometriche dei fanghi delle Salse di Nirano (MO)*. Tesi di laurea triennale, Università di Modena e Reggio Emilia (inedito).
- TAMRAZAN G.P., 1972 – *Peculiarities in the Manifestation of Gaseous-Mud Volcanoes*. *Nature*, **240**, pp. 406-408.
- TASSI F., BONINI M., MONTEGROSSI G., CAPECCHIACCI F., CAPACCIONI B., VASELLI O., 2012 – *Origin of light hydrocarbons in gases from mud volcanoes and CH<sub>4</sub>-rich emissions*. *Chem. Geol.*, **294-295**, pp. 113-126.
- TOSATTI G., 2002 – *The Mud Volcanoes of Salse di Nirano*. In: P. Coratza & M. Marchetti (eds.) “Geomorphological Sites: Research, Assessment and Improvement”, Workshop Proceedings, pp. 95-97, June 2002, Modena.
- TOSATTI G., 2004 – *The Nature Reserve of the Nirano Mud Volcanoes*. In: “Geo-diversity in the landscape of Emilia-Romagna (northern Italy), Geosites in the Apennines between Modena and Reggio Emilia”, 32<sup>nd</sup> Internat. Geol. Congress, Florence 2004, Pre-congress Field-trip, pp. 11-13.
- VANDELLI D., 1760 – *Analisi di alcune acque medicinali del Modenese*. Padova, pp. 114-118.
- VECCHIONI P.E., 1900 – *La salsa di Nirano*. In: “In giro pel mondo”, **2**(3), Bologna.
- VEZZALINI G., MARCHETTI DORI S., QUARTIERI S., 2017 – *Analisi mineralogiche e granulometriche dei fanghi delle Salse di Nirano*. *Suppl. Atti Soc. Nat. Mat. di Modena*, **148** (nel presente volume).
- VOLTATTORNI N., SCIARRA A., CARAMANNA G., CINTI D., PIZZINO L., QUATTROCCHI F., 2009 – *Gas geochemistry of natural analogues for the studies of geological CO<sub>2</sub> sequestration*. *Appl. Geochem.*, **24**, pp. 1339-1346.
- VOLTATTORNI N., QUATTROCCHI F., GASPARINI A., SCIARRA A., 2012 – *Soil gas degassing during the 2009 L'Aquila earthquake: study of the seismotectonic and fluid geochemistry relation*. *Italian Journal of Geosciences*, **131**(3), pp. 440-447, doi: 10.3301/IJG.2012.19.
- VOLTATTORNI N., CINTI D., PIZZINO L., SCIARRA A., 2014 – *Statistical approach for the geochemical signature of two active normal faults in the western Corinth Gulf Rift (Greece)*. *Applied Geochemistry*, **51**, pp. 86-100.
- WANG W.C., ZHANG L.Y., LIU W.H., KANG Y., REN J.H., 2005 – *Effects of biodegradation on the carbon isotopic composition of natural gas - a case study in the Bamianhe oil field of the Jiyang Depression, Eastern China*. *Geochemical Journal*, **39**, pp. 301-309.
- WHITICAR M.J., SUES E., 1990 – *Hydrothermal hydrocarbon gases in the sediments of King George Basin, Bransfield Strait, Antarctica*. *Applied Geochemistry*, **5**(1-2), pp. 135-147, doi: 10.1016/0883-2927(90)90044-6.



## **Elenco Soci anno 2017**

1981. ACCORSI Prof.ssa Carla Alberta, via Marco Emilio Lepido 62, 40132 Bologna
1963. ALBASINI Prof. Albano, lungadige Matteotti 15, 37126 Verona
2012. ALTIERO Prof.ssa Tiziana, Dip. di Educazione e Scienze Umane, Università di Modena e Reggio Emilia, via Allegri 9, 42121 Reggio Emilia
1994. ANDREOLI Sig. Giovanni, via FONDA 111, 41053 Maranello (MO)
2005. ANGELONE Sig. Giovanni, Dip. di Scienze Fisiche, Informatiche e Matematiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 213/A, 41125 Modena
1988. ANSALONI Prof. Ivano, Dip. di Scienze della Vita, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 213/D, 41125 Modena
2013. ARACRI Dott.ssa Raffaella via Carleri, 30, 42124 Reggio Emilia
1994. BACCHILEGA Sig.ra Diana, via Segantini 60, 41124 Modena
1982. BAGNI Dott. Giuseppe, via Caravaggio 19/2, 41124 Modena
1983. BALBONI Dott. Sergio, c.so Libertà 8, 41029 Sestola (MO)
2005. BALESTRAZZI Dott.ssa Brunella, via Monfalcone 7, 41125 Modena
2009. BALOCCHI Dott. Paolo, via Maria Regina Pedena Nord 43, 41123 Modena
1968. BARALDI Dott. Fulvio, via F.lli Bandiera 33, 46100 Mantova
1970. BARALDI Prof. Pietro, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2007. BARBARINI Prof.ssa Elisetta, via Emilia Est 133, 41121 Modena.
1997. BARBIERI Dott.ssa Giovanna, Orto Botanico – Dip. di Scienze della Vita, Università di Modena e Reggio Emilia, v.le Caduti in Guerra 127, 41121 Modena
2016. BARBIERI Prof.ssa Rosella, via Bonesi 1, 41058 Vignola (MO)
1993. BARLOCCO Prof.ssa Daniela, Dip. di Scienze Farmaceutiche, Università di Milano
1974. BAROZZI Dott. Giancarlo, via dell'Olivo 29, 41012 Fossoli - Carpi (MO)
2016. BAROZZI Dott. Marco, viale Vittorio Veneto 119, 41124 Modena
2009. BARTOLOTTI Sig.ra Gabriella, via Donati 95, 41122 Modena
1990. BASCHIERI Sig. Leonardo, via Boccaletti 15, 41012 Carpi (MO)
2000. BATTISTUZZI Dott. Gianantonio, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1976. BELLEI Dott.ssa Silvia, via Marzabotto 116, 41125 Modena
1974. BELLESIA Prof. Franco, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2008. BELLINI Dott.ssa Alessia, via del Perugino 65, 41125 Modena
1979. BENASSI M.llo Mario, via Curie 9, 41126 Modena
2011. BENASSI Dott.ssa Silvia, via Rossini 210, 41121 Modena
1999. BENATTI Prof.ssa Rosarita, v.le Gramsci 372, 41122 Modena

2016. BENVENUTI Prof.ssa Raffaella, strada Saliceto Panaro 211, 41122 Modena
1986. BENVENUTI Prof.ssa Stefania, Dip. di Scienze della Vita – Farmacia, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1982. BERNARDI Prof. Roberto, via Sigonio 92, 41124 Modena
1983. BERTACCHINI Dott.ssa Milena, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2001. BERTELLI Dott. Davide, Dip. di Scienze della Vita – Farmacia, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1996. BERTOLANI Prof. Roberto, via Corassori 83, 41043 Formigine (MO)
1993. BETTELLI Prof. Giuseppe, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1976. BIANCHI Prof. Alberto, strada Zarroto 1, 43123 Parma
2009. BIANCHI Dott. Mario, via Baraldi 51, 41124 Modena
2009. BISANTI Dott. Matteo, via Monte Grappa 50, 41121 Modena
1974. BOGGIA Dott. Giorgio, via Montesole 16, 41053 Maranello (MO)
1994. BONACCORSI Dott. Primo, via Risorgimento 23, 41040 Spezzano (MO)
1990. BONATTI Prof.ssa Piera, v.le Verdi 106, 41121 Modena
2015. BORELLI Sig. Massimo, via Berchet 15, 34127 Trieste
2000. BORSARI Dott. Marco, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1992. BORTOLANI Dott.ssa Caterina, rua Pioppa 94, 41121 Modena
2009. BORTOLI Dott.ssa Chiara, via Canaletto 710/5, 41122 Modena
1998. BOSI Prof.ssa Giovanna, Orto Botanico – Dip. di Scienze della Vita, Università di Modena e Reggio Emilia, v.le Caduti in Guerra 127, 41121 Modena
2010. BOTTICELLI Sig.ra Laura, strada Morane 76/4, 41125 Modena
2008. BRAGA Dott.ssa Maura, via Brunatti 22, 41037 Mirandola (MO)
2009. BRANDOLI Dott.ssa Maria Teresa, via degli Schiocchi 71, 41125 Modena
1998. BRUNACCI Col. Luigi, via Baden Powell 1, 41126 Modena
2001. BULDRINI Dott. Fabrizio, via Piero della Francesca 71/1, 41124 Modena
2015. BULDRINI Federico, via Piero della Francesca 71/1, 41124 Modena
1992. BULGARELLI Dott.ssa Elisabetta, v.le Indipendenza 58, 41122 Modena
1997. BURANI Dott. Aldo, via Nardi 8, 41121 Modena
1997. BURSARI Arch. Lucia, via Crociale 33, 41053 Maranello (MO)
2013. CABRINI Sig. Gianni, via Carrobio 28, 42019 Arceto (RE)
1998. C.A.I. – Sez. di Modena, via IV Novembre 40/c, 41123 Modena
2009. CAIUMI Dott.ssa Loredana, via Cividale 181, 41125 Modena
1996. CALANDRA Prof. Sebastiano, Dip. di Scienze Biomediche – Sez. Patologia Generale, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 287, 41125 Modena
2012. CALVI Dott.ssa Federica, via Matteotti 297/F, 41017 Ravarino (MO)
1975. CAMPI Dott.ssa Luisa, c.so Adriano 9, 41121 Modena

2001. CAMPISI Dott. Alessio, via Quarti 8/1, 42023 Cadelbosco di Sotto (RE)
2016. CAMURRI Dott.ssa Maria Teresa, viale Buon Pastore 126, 41124 Modena
1990. CAPITANI Dott. Marco, via Milano 286, 41058 Vignola (MO)
1973. CARDACI Dott. Giuseppe, via San Lazzaro 1/A, 46100 Mantova
2005. CARDARELLI Andrea, Dip. Scienze Antichità, Università “La Sapienza”, p.le Moro 5, 00185 Roma
2005. CASELLI Prof.ssa Monica, Dip. di Scienze e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1980. CASTALDINI Prof. Dorianò, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1989. CATTELANI Prof.ssa Franca, Dip. di Scienze Fisiche, Informatiche e Matematiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 213/B, 41125 Modena
2000. CAVEDONI Sig.ra Franca, via Allegretti 43, 41125 Modena
1967. CECCHI Prof. Rodolfo, Dip. di Ingegneria “Enzo Ferrari” – Osservatorio Geofisico, Università di Modena e Reggio Emilia, strada Vignolese 905, 41125 Modena
1973. CERVI Arch. Giuliano, via Frank 11/a, 42122 Reggio Emilia
1967. CHIESSI Dott. Eugenio, via Togliatti 52, 42122 Reggio Emilia
1993. CHINCA Prof.ssa Gabriella, via Polo 19, 41050 Montale Rangone (MO)
1959. CIGARINI BERTOCCHI Dott.ssa Tiziana, via Gaddi 40, 41124 Modena
2013. CIRCOLO DEGLI ARTISTI, via Castel Maraldo 19/C, 41121 Modena
2016. CLÒ Sig.ra Eleonora, via Tincani Martelli 76, 41126 Modena
1973. COLTELLACCI Sig. Marco Maria, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2011. CONZO Dott. Francesco, strada Panni 184/5, 41125 Modena
1973. COPPI Prof. Gilberto, Dip. di Scienze della Vita – Farmacia, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2002. COPPI Sig.ra Giovanna, v.le Newton 35, 41126 Modena
2002. COPPI Sig.ra Lucia, via Gadaldino 3, 41124 Modena
2000. CORATZA Prof.ssa Paola, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1993. CORRADINI Ing. Brenno, via Keplero 9/2, 41126 Modena
1967. CORRADINI Prof. Domenico, piazza Martiri 36, 41049 Sassuolo (MO)
2009. CORRADINI Dott.ssa Elena, Dip. di Ingegneria “Enzo Ferrari” – Università di Modena e Reggio Emilia, strada Vignolese 905, 41125 Modena
1990. CORSINOTTI Sig. Paolo, via Franklin 52, 41124 Modena
1987. COSTANTINO Prof. Luca, Dip. di Scienze della Vita – Farmacia, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1990. COSTI Dott.ssa Maria Paola, Dip. di Scienze della Vita – Farmacia, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2015. C.R.A. Unità per la Suinicoltura, Via Beccastecca 345, 41018 San Cesario (MO)

2003. CRAMAROSSA Prof.ssa Maria Rita, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1997. CUOGHI Dott.ssa Barbara, via Tagliazucchi 46, 41121 Modena
2006. CUOGHI Dott. Gianluca, via Nadi 5, 41043 Formigine (MO)
2013. CUOGHI Dott. Ivan, via Peretti 21, 41125 Modena
2009. CURTI Sig.ra Maria, via Goldoni 49, 41049 Sassuolo (MO)
2003. DALLAGLIO Sig.ra Mariella, via Avanzini 17, 41126 Modena
1990. DALLAI Prof. Daniele, Orto Botanico – Dip. di Scienze della Vita, Università di Modena e Reggio Emilia, v.le Caduti in Guerra 127, 41121 Modena
2001. DAL ZOTTO Dott. Matteo, via Bellini 58, 41121 Modena
2013. DAVID Sig.ra Paola, via Carrobbio 28, 42019 Arceto (RE)
2000. DAVOLI Prof. Paolo, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2009. DAVOLIO Prof. Giovanni, via Portofino 58, 41125 Modena
1981. DEL PENNINO Prof. Umberto, Dip. di Scienze Fisiche, Informatiche e Matematiche, Università di Modena e Reggio Emilia
1993. DEL PRETE Prof. Carlo, via degli Allori 17, 56128 Tirrenia (PI)
2013. DE ROBERTIS Sig.ra Liuba, via Scanaroli 34/1, 41124 Modena
1997. DINI Prof.ssa Paola, via Venturi 13, 41124 Modena
1905. DIPARTIMENTO DI SCIENZE CHIMICHE E GEOLOGICHE, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1997. DOMENICHINI Sig. Alberto, via Carmelitane Scalze 7, 41121 Modena
1995. DOMENICHINI Sig. Massimo, via D'Annunzio 20, 42123 Reggio Emilia
2009. FAGHERAZZI COLÒ Sig. Filippo, via Puccini 71, 41126 Modena
2002. FERRARI Ing. Gianni, via Valdrighi 135, 41124 Modena
1974. FERRARI Dott. Massimo, v.le Gramsci 285, 41122 Modena
1994. FERRARI Sig.ra Monica, via Borsara 11, 41030 Bastiglia (MO)
2008. FERRARI Dott.ssa Patrizia, l.go Nobel 145, 41126 Modena
2009. FERRARI Sig. Renzo, via Tre Olmi 109, 41123 Modena
2017. FERRARI Dr.ssa Stefania, Dip. di Scienze della Vita – Farmacia, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2016. FERRETTI Prof.ssa Annalisa, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1996. FERRI Dott. Mauro, via San Remo 140, 41125 Modena
1990. FIANDRI Dott. Filiberto, via Giardini 10, 41124 Modena
2007. FIOCCHI Prof.ssa Cristina, rua Muro 80, 41121 Modena
1997. FIORI Prof.ssa Carla, Dip. di Scienze Fisiche, Informatiche e Matematiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 213/B, 41125 Modena
1986. FIORONI Prof.ssa Chiara, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena

2009. FLORENZANO Dott.ssa Assunta, v.le Monastero 141, 85040 Rivello (PZ)
1970. FONDELLI Prof. Mario, via Nardi 50, 50132 Firenze
1976. FONTANA Prof.ssa Daniela, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1999. FONTANESI Prof. Claudio, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2016. FORNACIARI Dott.ssa Beatrice, via Guerra 5, 42025 Cavriago (RE)
2009. FORTI Dott. Luca, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1976. FRANCHINI Prof. Giancarlo, via Bergianti 9, 42019 Arceto (RE)
2009. FRANCHINI Dott.ssa Silvia, Dip. di Scienze della Vita – Farmacia, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1976. FRANCHINI Prof. Walter, via Costa 51, 41027 Pievepelago (MO)
1974. FRATELLO Prof. Bernardo, v.le Vittorio Veneto 59, 41121 Modena
2004. FRIGIERI ADANI Sig.ra Marta, via Venturi 70, 41124 Modena
2016. FURIA Sig.ra Elisa, via S. Pietro 31, 37067 Valeggio sul Mincio (VR)
2001. GALLI Dott.ssa Elisabetta, Dip. di Scienze Ginecologiche Ostetriche, Pediatriche – Sez. di Pediatria, Università di Modena e Reggio Emilia
2011. GALLI Prof. Ermanno, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, l.go S. Eufemia 19, 41121 Modena
1983. GALLI Prof. Maurizio, v.le Vittorio Veneto 290, 41058 Vignola (MO)
2009. GAMBARELLI Dott. Andrea, Museo di Zoologia, Università di Modena e Reggio Emilia
1998. GANASSI Dott.ssa Sonia, Dip. di Scienze della Vita, Università di Modena e Reggio Emilia via Campi 213/D, 41125 Modena
1998. GASPARINI Dott.ssa Elisabetta, via Bulgarelli 33, 41012 Carpi (MO)
1999. GASPARINI Dott. Giorgio, via San Martino 4, 41030 Bastiglia (MO)
2009. GATTI Dott. Enrico, via II Giugno 3, 41011 Campogalliano (MO)
2009. GHELFI Dott. Luca, via Pisacane 29, 41012 Carpi (MO)
2010. GHINOI Dott. Alessandro, via Cortina d'Ampezzo 17, 41125 Modena
2016. GIACOBBE Dott.ssa Carlotta, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1999. GIGANTE Dott. Massimo, via Cascino 8, 42122 Reggio Emilia
1976. GIUSTI Dott. Arrigo, via Cesari 18, 42019 Scandiano (RE)
1974. GNOLI Prof. Maurizio, via Togliatti 16, 41043 Casinalbo (MO)
2004. GOVI Rag. Renato, via Lagrange 10, 41126 Modena
2008. GRANDI Sig. Mauro, v.le Monte Kosica 11, 41121 Modena
2000. GRANI Dott.ssa Paola, via Refice 9, 41049 Sassuolo (MO)
1992. GRAZIOSI Prof. Gianni, via Foscolo 136, 41058 Vignola (MO)
2016. GRUPPO CULTURALE “Al Palesi”, piazza Carducci 9, 41058 Vignola (MO)
2006. GRUPPO MODENESE SCIENZE

- NATURALI, via Barchetta 240, 41123 Modena
1996. GRUPPO NATURALISTICO MODENESE c/o Polisportiva San Faustino, via Wiligelmo 72, 41124 Modena
1995. GUANDALINI Arch. Emilio, v.le Menotti 80, 41121 Modena
2008. GUARDASONI Sig.ra Giovanna, v.le Menotti 114, 41121 Modena
1997. GUERRIERI Sig.ra Elisa, via San Giacomo 24, 41121 Modena
2009. GUERZONI Prof. Pietro, via Soliani 19, 41121 Modena
2004. GUIDETTI Prof. Roberto, Dip. Scienze della Vita, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 213/D, 41125 Modena
1990. IANNUCELLI Dott.ssa Valentina, Dip. di Scienze della Vita – Farmacia, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1993. IMPERIALE Dott. Aldo, via Della Cella 89, 41124 Modena
2008. INVERNIZZI Prof. Sergio, loc. Padriciano 282, 34149 Basovizza (TS)
2015. LASELVA Dott. Onofrio, via Scarnoli 56/2, 41124 Modena
1990. LENZI Dott. Giuseppe, via Roma 14, 53100 Siena
1997. LEO Prof.ssa Eliana Grazia, Dip. di Scienze della Vita – Farmacia, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1976. LEURATTI Dott. Enrico, via Ronchetti 1358, 41038 San Felice sul Panaro (MO)
2000. LIBERTINI Prof.ssa Emanuela, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2012. LIM Dott.ssa Gloria Meizhen, via Mar Ligure 11, 41122 Modena
1996. LODESANI Sig. Umberto, via Tasso 57, 41049 Sassuolo (MO)
1998. LOMBROSO Dott. Luca, Dip. di Ingegneria “Enzo Ferrari” – Osservatorio Geofisico, Università di Modena e Reggio Emilia, strada Vignolese 905, 41125 Modena
2010. LORICI Dott. Gianni, via Bocchetti 1, 41015 Castelnuovo Rangone (MO)
2009. LOSI Sig. Franco, via Etna 17, 41012 Carpi (MO)
2001. LUGLI Prof. Mario Umberto, rua Muro 88, 41121 Modena
2011. LUGLI Prof. Stefano, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2006. LUPPOLINI Dott. Alex, via Mandrìo 2, 42015 Correggio (RE)
2001. LUZZARA Dott. Mirko, via Confalonieri 45, 41125 Modena
1990. MACCAFERRI Dott. Alessandro, v.le Montegrappa 78, 41121 Modena
2004. MAFFETTONE Dott. Luigi, Orto Botanico – Dip. di Scienze della Vita, Università di Modena e Reggio Emilia, v.le Caduti in Guerra 127, 41121 Modena
2013. MALFERRARI Dott. Daniele, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2007. MALMUSI Sig. Mauro, via Albareto 222/8, 41122 Albareto (MO)
1998. MANDRIOLI Dott. Mauro, Dip. di Scienze della Vita, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 213/D, 41125 Modena

2016. MANFREDI Giovanna, via Guagnellina 1/A, 41037 Mirandola (MO)
1996. MANICARDI Dott. Gian Carlo, Dip. di Scienze della Vita, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 213/D, 41125 Modena
2002. MANTOVANI Sig.ra Gabriella, via Biondo 2, 41051 Castelnuovo Rangone (MO)
1996. MANZINI Sig.ra Eleonora, via Bellaria 55/1, 41124 Modena
1973. MANZINI Prof.ssa Maria Luisa, p.le Risorgimento 57, 41124 Modena
1993. MARAMALDO Dott.ssa Rita, Musei Anatomici, Università di Modena e Reggio Emilia
2004. MARCHETTI Prof. Andrea, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2013. MARETTI Dott.ssa Eleonora, strada statale Cisa 59, 46047 Portomantovano (MN)
2011. MARGHERITA Dott. Lucio, 195 bv. Malesherbes, 75017 Parigi (F)
1970. MARI Prof.ssa Marisa, via Sauro 35, 41121 Modena
1996. MARINI Prof.ssa Milena, via Baden Powell 1, 41126 Modena
1998. MARTELLI BRUNACCI Dott.ssa Rita, via Baden Powell 1, 41126 Modena
2007. MASSAMBA N'SIALA Dott.ssa Gloria, via Jacopone da Todi 46, 41123 Modena
1993. MAZZANTI Prof.ssa Marta, Orto Botanico – Dip. di Scienze della Vita, Università di Modena e Reggio Emilia, v.le Caduti in Guerra 127, 41121 Modena
2010. MAZZI Sig.ra Liliana, via Ugo da Carpi 26, 41124 Modena
1964. MELEGARI Prof. Michele, via Curie 8, 41126 Modena
1997. MELETTI Dott. Eros, Dip. di Scienze Biomediche – Sez. Patologia Generale, Università di Modena e Reggio Emilia
1979. MELOTTI Prof.ssa Paola, via Cattelani 22, 41121 Modena
2005. MENZIANI Dott.ssa Giovanna, via Rangoni 99, 4124 Modena
1990. MERCURI Prof.ssa Anna Maria, Orto Botanico – Dip. di Scienze della Vita, Università di Modena e Reggio Emilia, v.le Caduti in Guerra 127, 41121 Modena
1990. MEZZACQUI Rag. Costantino, via Giardini 10/1, 41124 Modena
2009. MINARELLI Dott. Stefano, via Costa 45, 41012 Carpi (MO)
1993. MOLA Prof.ssa Lucrezia, Dip. di Scienze della Vita, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 213/D, 41125 Modena
2005. MONDINI Dott. Ettore, via San Martino 37, 46010 Curtatone (MN)
2012. MONTECCHI Dott.ssa Maria Chiara, v.le Corassori 52, 41124 Modena
1998. MONTORSI Sig.ra Elisabetta, via Chiesa 19/13, 41050 Montale Rangone (MO)
2016. MORSELLI Prof. Ivano, via S. Giovanni 46, 41057 Spilamberto (MO)
2008. MUNICIPIO DI VIGNOLA, via Bellucci 1, 41058 Vignola (MO)
1990. MURANO Dott. Gennaro, stradello del Fiume 5, 41123 Modena
2005. MUSCATELLO Prof. Umberto, Dip. di Scienze Biomediche, Università di Modena e Reggio Emilia
1928. MUSEI CIVICI DI REGGIO EMILIA, via Spallanzani 1, 42121 Reggio Emilia

2007. MUSEO CIVICO ARCHEOLOGICO ETNOLOGICO, v.le Vittorio Veneto 5, 41124 Modena.
1996. MUSEO CIVICO DI VIGNOLA, via Cantelli 4, 41058 Vignola (MO)
2011. NERI Dott. Mirco, via Pellegrini 2/20, 41058 Vignola (MO)
1974. NORA Dott. Eriuccio, via Anzio 70, 41125 Modena
2005. ONESTI Ing. Nicola, via Serafini 2, 41125 Modena
1905. ORTO BOTANICO, Dip. di Scienze della Vita, Università di Modena e Reggio Emilia, v.le Caduti in Guerra 127, 41121 Modena
2000. OTTAVIANI Prof. Giampiero, Dip. di Scienze Fisiche, Informatiche e Matematiche, Università di Modena e Reggio Emilia
2007. PACCHIAROTTI Prof.ssa Nicoletta, Dip. di Scienze Fisiche, Informatiche e Matematiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 213/B, 41125 Modena
2007. PADOVANI Sig. Luciano, str. Battaglia 123, 41122 Modena
2012. PADOVANI Dott.ssa Veronica, via Nervi 52, 41125 Modena
1967. PAGLIAI Prof.ssa Anna Maria, via Genova 5, 41126 Modena
2011. PAGLIAI Dott. Davide, loc. Ghiare 10, 19015 Levanto (SP)
1977. PALMIERI Dott. Daniele, via Canaletto 35, 41030 San Prospero (MO)
2000. PALYI Prof. Gyula, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1982. PANINI Prof. Filippo, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1967. PANIZZA Prof. Mario, via Taglio 24, 41121 Modena
2016. PAOLINO Dott.ssa Rossella, via Bontempelli 259, 41058 Vignola (MO)
2000. PAPAZZONI Prof. Cesare Andrea, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2007. PARADISI Sig.ra Carmen, via Bonaccini 24, 41052 Campogalliano (MO)
1976. PARENTI Prof. Carlo, Dip. di Scienze della Vita – Farmacia, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1994. PASUTO Dott. Alessandro, IRPI – CNR, c.so Stati Uniti 4, 35127 Padova
2008. PEDERZANI Sig. Fernando, via Landoni 35, 48121 Ravenna
1995. PEDERZOLI Prof.ssa Aurora, Dip. di Scienze della Vita, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 213/D, 41125 Modena
2011. PELLACANI Sig. Alderigi, via Giorgi 42, 41124 Modena
2008. PELLACANI Dott. Andrea, via degli Inventori 48, 41122 Modena
1963. PELLACANI Prof. Giancarlo, via Emilia 231, 41121 Modena
2004. PELLATI Dott.ssa Federica, Dip. di Scienze della Vita – Farmacia, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2004. PETRUCCI Dott.ssa Raffaella, via Emilia Est 305, 41121 Modena
2003. PIACENTINI Dott.ssa Daniela, via Montegrappa 46, 41026 Pavullo (MO)

1997. PIAGGI Prof.ssa Vilma, via Bonacini 304/1, 41121 Modena
1997. PINETTI Prof. Adriano, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2016. PIVA Dott.ssa Carlotta, via Giacobazzi 17, 41049 Sassuolo (MO)
1976. PLESSI Prof.ssa Maria, Dip. di Scienze della Vita – Farmacia, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1997. PO BIANCANI Prof.ssa Maria Letizia, via Giardini 250, 41124 Modena
1993. PO Dott.ssa Marilena, v.le Muratori 137, 41121 Modena
2011. POLI Dott. Emanuele, via Pasubio 13, 37057 San Giovanni Lupatoto (VR)
1986. PONZANA Dott. Luigi, via Zurlini 127, 41125 Modena
2009. POPPI Sig. Ivano, via Marenzio 52, 41121 Modena
1992. POZZI Arch. Fabio Massimo, c.so Canal Chiaro 26, 41121 Modena
1993. PREITE Dott. Francesco, via Moscati 10, 41049 Sassuolo (MO)
1974. PRETI Prof. Carlo, via Emilia Est 15/G, 42048 Rubiera (RE)
1996. PRETI Dott. G. Gaetano, via Galeno 78, 41126 Modena
1996. PREVEDELLI Prof.ssa Daniela, Dip. di Scienze della Vita, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 213/D, 41125 Modena
1997. PRO NATURA VAL D'ENZA, via Carso 8, 42021 Bibbiano (RE)
2015. PULINI Dott.ssa Ilaria, Museo Civico Archeologico Etnologico, v.le Vittorio Veneto 5, 41124 Modena
1989. QUATTROCCHI Prof. Pasquale, via Firenze 31, 41126 Modena
2001. QUATTROCCHI Dott. Salvatore, via Pelloni 91, 41125 Modena
1993. RAIMONDI Dott. Claudio, via Indipendenza 95, 41049 Sassuolo (MO)
2009. RAIMONDI Sig. Mauro, via Bacone 33, 41126 Modena
2009. RATTIGHIERI Dott.ssa Eleonora, via Motta 140, 41012 Carpi (MO)
2011. REBECCHI Sig. Christian, via Spagna 11, 41014 Castelvetro (MO)
1996. REBECCHI Prof.ssa Lorena, Dip. di Scienze della Vita, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 213/D, 41125 Modena
2007. REBUCCI Sig. Franco, via Leopardi 67/1, 41123 Modena
2004. REGGIANI Dott. Alberto, via Maestra Rubbiara 1, 41015 Nonantola (MO)
2007. REMAGGI Prof.ssa Francesca, via Mascagni 28/2, 41121 Modena
1967. RINALDI Prof.ssa Marcella, Dip. di Scienze della Vita – Farmacia, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2012. RINALDI Dott.ssa Rossella, via San Faustino 155/4, 41125 Modena
1958. ROMPIANESI Sig. Pietro, via Camaiore 107, 41125 Modena
2005. RONCHI Dott. Stefano, via Mosca 142, 41043 Formigine (MO)
1983. ROSSI Dott. Giuliano, vicolo di Mezzo 17, 46100 Mantova
2010. ROSSI Sig. Giuseppe, via Lulli 91, 41125 Modena
1996. ROTTEGLIA Prof. Antonio, via Mantegna 133, 41125 Modena
1993. SABATINI Prof.ssa Maria Agnese, Dip. di Scienze della Vita, Università

- di Modena e Reggio Emilia, via Campi 213/D, 41125 Modena
2013. SACCHETTI Dott.ssa Francesca, Dip. di Scienze della Vita – Farmacia, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1998. SALA Dott.ssa Giovanna, via Nievio 6, 41124 Modena
1996. SALA Prof. Luigi, Dip. di Scienze della Vita, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 213/D, 41125 Modena
2004. SALA Dott.ssa Nicoletta, via Monchio 2, 41012 Carpi (MO)
2010. SALTINI Dott. Alessandro, c.so Adriano 9, 41121 Modena
2007. SALTINI Geom. Lucio, via Livatino 6, 41123 Cittanova (MO)
2008. SALVIOLI Dott. Paolo, v.le Menotti 114, 41121 Modena
1993. SANTI Prof. Luigi, via Matteotti 3, 41058 Vignola (MO)
1997. SANTINI Dott. Claudio, via Sant'Orsola 7, 41121 Modena
1990. SARGENTI Dott. Daniele, via Santa Croce 485, 41021 Fanano (MO)
1991. SASSO Dott. Franco, via Stadio 2, 41029 Sestola (MO)
2011. SAVIOZZI Sig. Enrico, via Galletta 50, 40068 San Lazzaro (BO)
1963. SCAGLIONI Dott. Antonio, via Pietrasanta 15, 41125 Modena
2004. SCAGLIONI Dott.ssa Giulia, via Giardini Nord 9189, 41020 Serramazzoni (MO)
1998. SCAVAZZA Dott. Antonio, via Wagner 138, 41122 Modena
2010. SELMI Sig. Enrico, via Cesane 7, 41125 Modena
1975. SERAFINI Rag. Pier Luigi, via Monte Rondinara 37, 41029 Roncoscaglia (MO)
1981. SERGI Sig. Santo, Dip. di Scienze della Vita – Farmacia, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1959. SERPAGLI Prof. Enrico, v.le Monteverdi 67/B, 41049 Sassuolo (MO)
2002. SERVENTI Dott. Paolo, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2007. SETTI Dott.ssa Sara, via Villa Inferiore 83, 46029 Suzzara (MN)
1993. SGARBI Prof.ssa Elisabetta, Dip. di Scienze della Vita, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 213/D, 41125 Modena
2007. SILINGARDI Sig. Giancarlo, via Luosi 156, 41124 Modena
2006. SIMONCELLI Dott.ssa Antinisca, v.le Asiago 10, 46100 Mantova
1996. SIMONINI Sig. Fausto, via Tavoni 13/1, 41058 Vignola (MO)
1997. SIMONINI Dott. Roberto, Dip. di Scienze della Vita, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 213/D, 41125 Modena
2005. SITTA Dott. Nicola Giovanni, loc. Farnè 39, 40042 Lizzano in Belvedere (BO)
1997. SOCIETÀ REGGIANA DI SCIENZE NATURALI "C. IACCHETTI", c/o Maurizio Scacchetti, via Tosti 1, 42124 Reggio Emilia
1987. SOLDATI Prof. Mauro, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1997. SPAGGIARI Prof. Marga, via Caduti sul Lavoro 16, 41049 Sassuolo (MO)
2013. SQUADRINI Dott.ssa Giulia, Sistema Bibliotecario di Ateneo, Area Scien-

- tifico-Naturalistica, via Campi 213/C, 41125 Modena
2014. STORARI Sig. Ferdinando, v.le Cittadella 41/1, 41123 Modena
2015. TABARRONI Alessandro, via Mura Anteo Zamboni 1, 40126 Bologna
1970. TADDEI Prof. Ferdinando, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1997. TAGLIATI Rag. Tosca, via del Casone 8, 41010 Magreta (MO)
2003. TAIT Prof.ssa Annalisa, Dip. di Scienze della Vita – Farmacia, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1996. TARUGI Dott.ssa Patrizia, Dip. di Scienze Biomediche – Sez. Patologia Generale, Università di Modena e Reggio Emilia
2000. TASSI Prof. Lorenzo, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2002. TAVERNI Dott.ssa Ivana, via Scarnaroli 34/1, 41124 Modena
2009. TEPEDINO Dott. Ciro, Musei Anatomici, Università di Modena e Reggio Emilia
2016. TEREZIANI Sig.ra Rita, via Speri 12, 41015 Castelnuovo Rangone (MO)
1992. TERMANINI Ing. Dezio, via Monteverdi 12, 41049 Sassuolo (MO)
2005. TIOZZO Prof.ssa Roberta, Dip. di Scienze Biomediche, Università di Modena e Reggio Emilia
2017. TONDI Prof.ssa Donatella, Dip. di Scienze della Vita – Farmacia, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
1997. TORRI Dott.ssa Paola, Orto Botanico – Dip. di Scienze della Vita, Università di Modena e Reggio Emilia, v.le Caduti in Guerra 127, 41121 Modena
1981. TOSATTI Prof. Giovanni, via Nervi 78, 41125 Modena
1990. TREVISAN Dott.ssa Giuliana, via Giardini 378, 41124 Modena
2008. VACCARI Sig. Luciano, via Giusti 23, 41043 Formigine (MO)
1972. VAMPA Prof.ssa Gabriella, via Curie 8, 41126 Modena
1991. VANDELLI Prof.ssa Maria Angela, Dip. di Scienze della Vita – Farmacia, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2000. VECCHI Dott. Fabrizio, via Isonzo 270, 41028 Serramazzoni (MO)
1963. VECCHI Dott.ssa Tiziana, via Emilia Est 18/1, 41124 Modena
2009. VENTURELLI Dott. Alberto, Dip. di Scienze della Vita – Farmacia, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2001. VERONESI Rag. Pietro, v.le Muratori 185, 41121 Modena
2009. VIANI Sig.ra Fiorella, v.le Medaglie d'Oro 45, 41124 Modena
2007. VIOTTI Dott.ssa Giulia, via Boito 48, 41121 Modena
1975. VISCO Sig. Luigi, strada Vignolese 1071/1, 41126 Modena
2013. YATSUKOVICH Ing. Tatyana, via Giovanni XXIII 25, 42046 Reggiolo (RE)
2008. ZANINI Sig. Mauro, via del Carretto 3, 25127 Brescia
1996. ZANNINI Prof. Paolo, Dip. di

- Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena
2009. ZINI Sig.ra Silvana, via San Giovanni Bosco 78, 41121 Modena
2002. ZUCCHI Dott.ssa Claudia, Dip. di Scienze della Vita, Università di Modena e Reggio Emilia, via Campi 103, 41125 Modena

---

## Indice

Francesco Tosi, Sindaco di Fiorano <i>Prefazione</i>	pag.	5
Doriano Castaldini, Marzia Conventi, Paola Coratza, Giovanni Tosatti <i>Introduzione</i>	pag.	7
Doriano Castaldini, Marzia Conventi <i>Inquadramento geografico e caratteristiche delle Salse di Nirano</i>	pag.	11
Doriano Castaldini, Paola Coratza, Maria Teresa De Nardo <i>Geologia e Geomorfologia delle Salse di Nirano</i>	pag.	23
Daniele Bonaposta, Maria Teresa De Nardo <i>Attivazioni storicamente documentate delle salse del margine appenninico modenese e reggiano</i>	pag.	59
Tommaso Santagata, Marco Ennio Camorani <i>Rilevamento topografico dei vulcani di fango della Riserva delle Salse di Nirano</i>	pag.	69
Alessandra Sciarra, Barbara Cantucci, Marzia Conventi, Tullio Ricci <i>Caratterizzazione geochimica e monitoraggio dei flussi e delle componenti gassose nella Riserva delle Salse di Nirano</i>	pag.	79
Giovanni Martinelli, Andrea Dadomo <i>Misura in continuo di temperatura e livello del fango in una emissione selezionata delle Salse di Nirano</i>	pag.	99
Giovanna Vezzalini, Simona Marchetti Dori, Simona Quartieri <i>Analisi mineralogiche e granulometriche dei fanghi delle Salse di Nirano</i>	pag.	105
Cesare Andrea Papazzoni <i>Studio micropaleontologico dei fanghi delle Salse di Nirano</i>	pag.	121
Dario Albarello <i>Misure sismiche nell'area delle Salse di Nirano</i>	pag.	127

---

Paolo Macini, Ezio Mesini <i>Indagini sperimentali sulle caratteristiche reologiche di alcuni fanghi emergenti dalle Salse di Nirano</i>	pag. 135
Anna Cipriani, Federico Lugli, Giovanni Martinelli, Alessandra Sciarra <i>Analisi isotopiche (<math>^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}</math>, <math>\delta^{18}\text{O}</math>, <math>\delta\text{D}</math> e trizio) delle Salse di Nirano</i>	pag. 155
Doriano Castaldini, Marzia Conventi, Paola Coratza, Giovanni Tosatti <i>Considerazioni conclusive sugli studi interdisciplinari delle Salse di Nirano</i>	pag. 167
<i>Bibliografia generale</i>	pag. 171
<i>Elenco soci</i>	pag. 181



---

I periodici posseduti dalla **Società dei Naturalisti e Matematici di Modena** sono presenti nel “*Catalogo automatizzato dell’Università di Modena e Reggio Emilia*” e in Internet all’indirizzo:

**[www.unimo.it/cisab/catalog.htm](http://www.unimo.it/cisab/catalog.htm)** selezionando “**il catalogo dell’Università**”

e inoltre nel “*Catalogo Nazionale dei periodici delle scienze matematiche, fisiche, informatiche e tecnologiche*”, gestito dall’Università del Salento (Lecce) e consultabile all’indirizzo:

**[siba2.unile.it](http://siba2.unile.it)** al “**CatalogoDSM**” o “**Catalogo Nazionale dei periodici delle Scienze Matematiche**”

Il posseduto della Società è indicato in corrispondenza della Sigla MO026 che è il codice C.N.R. assegnato alla nostra Biblioteca.

Per qualsiasi informazione o problema relativi a tali collegamenti è possibile rivolgersi a: CISAB, Università di Modena e Reggio Emilia.

**Istruzioni per gli Autori** – I contributi scientifici devono essere inviati direttamente alla Società, indirizzandoli alla sede di redazione di Via Università 4, 41121 Modena oppure all’indirizzo e-mail del redattore: [john.tosatti@gmail.com](mailto:john.tosatti@gmail.com).

L’accettazione degli articoli sarà subordinata al parere favorevole del Consiglio Direttivo e da parte dei Revisori scientifici che eventualmente proporranno all’Autore le opportune modifiche. La responsabilità scientifica dei contributi resta comunque a carico degli Autori. Le spese di stampa sono a parziale carico degli Autori o Enti Finanziatori; solo in casi particolari la rivista potrà concedere la stampa gratuita del lavoro.

**Manoscritti** – I lavori presentati per la pubblicazione devono essere scritti in italiano o in inglese, inviati tramite posta elettronica o consegnati su CD-R in formato “.docx” modificabile (sistema scrittura “Word” per Windows, scritto con carattere Times New Roman), accompagnati da accluse tabelle, tavole e figure in b/n o a colori in formato “.jpg” (no “.pdf” o “PowerPoint”). Soltanto i lavori dove compaiono molte formule matematiche o figure geometriche complesse possono essere inviati in formato “.pdf” (spazio pagina utile: 12x18 cm). I testi e le figure restano di proprietà della rivista. Le *espressioni latine* e i *termini stranieri* devono essere scritti in corsivo. Non sono ammesse le sottolineature né l’inserimento di interruzioni di pagina o di sezione.

#### **Modello prescritto**

- *Autore*: in alto a sinistra; nome e cognome (corpo 14 pt. in grassetto, in maiuscolo solo le lettere iniziali). Il Dipartimento o Ente di appartenenza, completo di indirizzo, viene riportato come nota a piè pagina.

- 
- *Titolo*: conciso; scritto in grassetto; in maiuscolo solo la lettera iniziale (corpo 18 pt.).
  - *Riassunto/Abstract*: in italiano e in inglese (corpo 10 pt.) senza andate a capo o citazioni.
  - *Parole chiave/Key words*: massimo 5, in italiano e in inglese (corpo 10 pt.).
  - *Testo*: Le memorie di una certa lunghezza devono essere suddivise in capitoli (corpo 11 pt.).
  - *Paragrafo*: interlinea multipla = 1,15.

Le *Citazioni bibliografiche* vanno inserite tra parentesi, indicando il cognome dell'Autore e l'anno di pubblicazione (es. Neri & Verdi, 2007); nel caso in cui gli Autori siano più di due, al nome del primo seguirà l'abbreviazione in corsivo "*et al.*" (es. Bianchi *et al.*, 2009).

Le *Table* (con righe verticali ridotte a quelle essenziali), *Figure*, *Fotografie*, esenti da *copyright*, devono essere numerate e complete di didascalie nella lingua del testo oppure sia in italiano sia in inglese. Si consiglia di indicare con chiarezza dove si desidera siano posizionate nel testo.

Nei limiti del possibile il Comitato di Redazione terrà conto dei desideri degli Autori.

- *Eventuali Ringraziamenti*.

- *Bibliografia*: limitata ai soli lavori citati nel testo e redatta in ordine alfabetico d'autore secondo il seguente schema (corpo 10 pt.):

ROSSI G. (in maiuscoletto), 2015 – *Titolo per esteso* (in corsivo). In: D. Neri "Titolo del volume", pp. 321-336, Editore, Luogo di Edizione.

BIANCHI A., ROSSI G., VERDI T. (in maiuscoletto), 2012 – *Titolo della Monografia* (in corsivo).

Nome della Rivista, Numero del volume (in grassetto), Numero pp., (Editore), Luogo di Edizione.

Esempio: ALESSI B., GIGLIOLI F.E. & PARENTI P., 2003 – *I tunnel di lava della Valle del Bove (CT)*. Geologica Romana, **39**, pp. 127-146, Roma.

ATTI DELLA SOCIETÀ DEI NATURALISTI  
E MATEMATICI DI MODENA  
*Supplemento al umero 148 (2017)*

Finito di stampare nel mese di novembre 2017  
presso Mc Offset - Modena - Italia



