



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 multi-temporali 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).

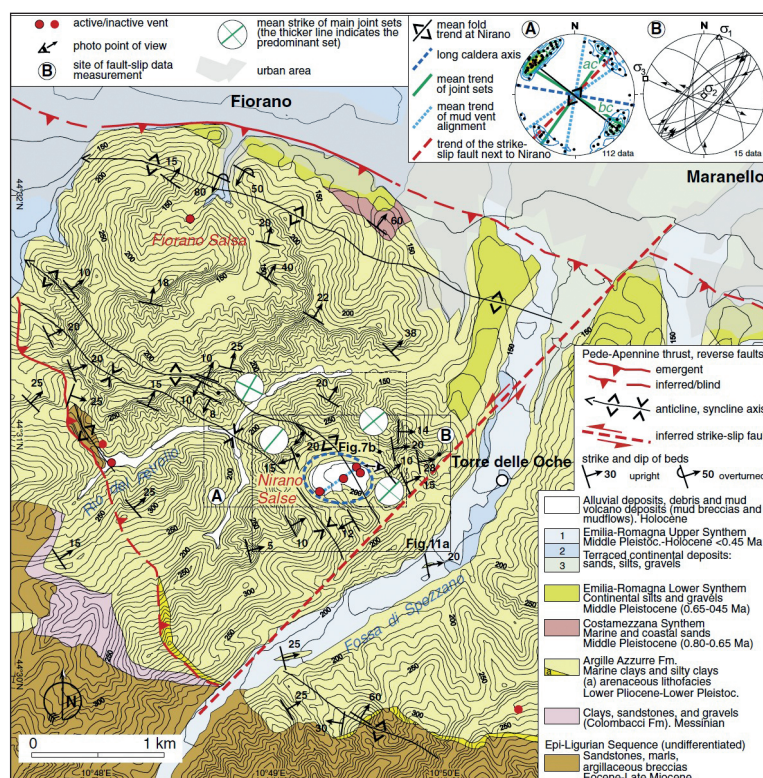


Fig. 1 – Carta geologico-strutturale del margine appenninico modenese circostante la Riserva Naturale delle Salse di Nirano (da Bonini, 2012).

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). 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 rinvengono 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 il formarsi di una copertura vegetale stabile, anche data dalle sole piante alofile.

In questo studio gli apparati sono indicati, procedendo in senso orario 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.

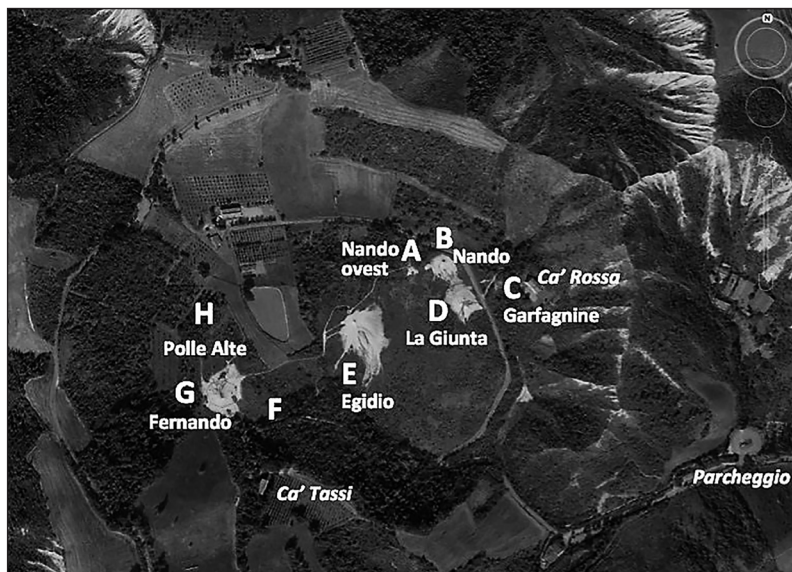


Fig. 3 – Carta indice con nomenclatura di riferimento per le Salse di Nirano (da immagine Google Earth del 28/09/2016).

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.

Cartografia	Anno	Scala originale cartaceo
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.*

Volo	Anno	Scala originale cartaceo
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.*

Ortofoto digitali	Anni
Aima	1997
Agea	2000, 2008, 2011
da Geoportale Nazionale	1988, 1994, 2000, 2006, 2012
Riprese satellitari	Anni
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.

Attraverso questa documentazione è stato possibile cartografare i punti di emissione e i depositi attivi, per i diversi apparati. Il risultato è schematizzato in Fig. 4; per un confronto, sono rappresentate anche le bocche lutivome rilevate sul terreno nel 2015-2016.

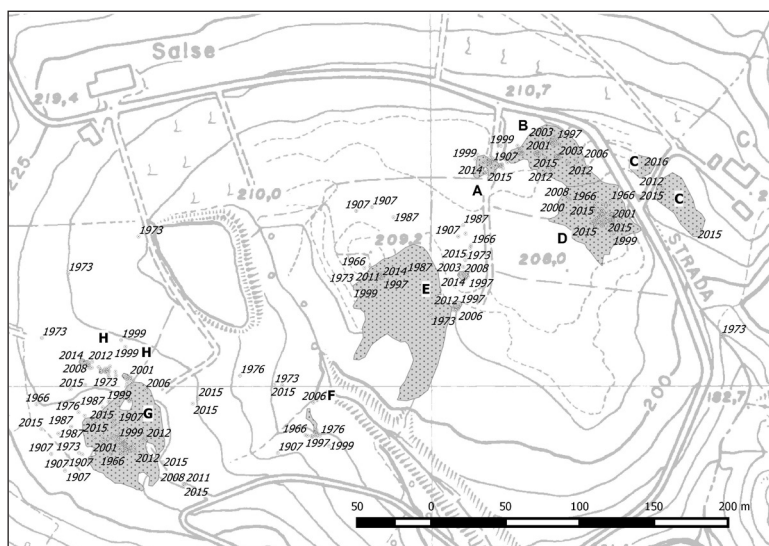


Fig. 4 – Punti di emissione storicamente censiti attraverso le cartografie in bibliografia e le immagini telerilevate descritte nelle tabelle, riferite all'intervallo di tempo compreso tra il 1884 e il 2016.

La maggior parte delle segnalazioni si concentra entro i poligoni che rappresentano i depositi attivi dei vari apparati. Fanno eccezione le segnalazioni del:

- 1907, a ovest dell'apparato G e a nord di quello E, che potrebbero contenere qualche errore di posizionamento, dovuto alla difficoltà di georeferenziazione della cartografia originale;
- 1973, a nord dell'apparato G, tutte documentate da foto aeree;
- 2012 e 2015-2016, a occidente di Ca' Rossa. Queste salse hanno la particolarità di essere tra le più recenti e le uniche ad interessare un settore "intatto", privo di segnalazioni storiche, tra quelle considerate in questo studio.

Successivamente sono stati cartografati i depositi attivi riferiti alle varie fonti, dalle pubblicazioni alle immagini telerilevate. La cartografia più vecchia utilizzata è quella di Biasutti (1907) in quanto la carta IGM topografica d'Italia del 1884 (Tav. 86 I SO Sassuolo), la più antica disponibile, riporta solo le bocche lutivome ma non i depositi. Dal confronto risulta evidente un'evoluzione della forma dei depositi attivi, governata in una prima fase dai cambiamenti

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 lutivoma, la cui posizione ha subito solo poche variazioni nel tempo.

Anno	Fonte	Tipo
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.*

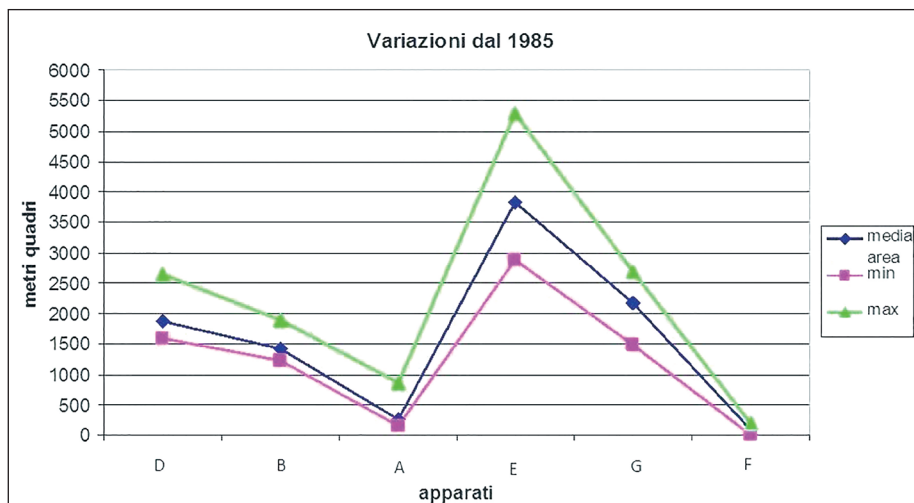


Fig. 5 – Variazioni della superficie dei depositi attivi negli ultimi trent'anni: confronto tra i valori minimo, massimo e medio, per i principali apparati.

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.

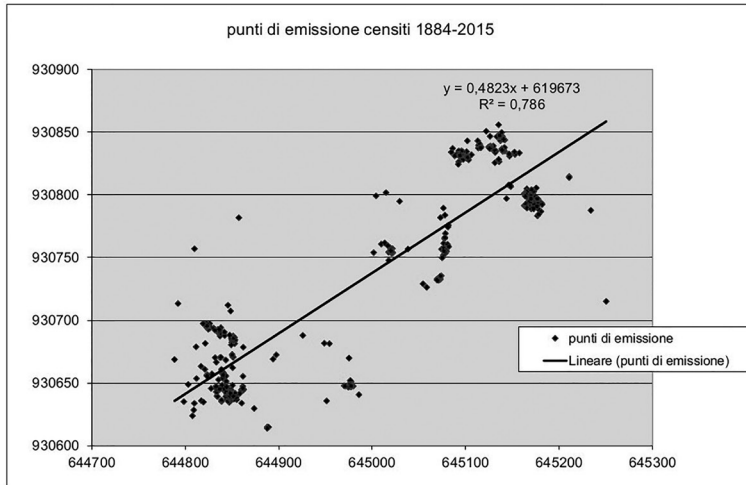


Fig. 6 – *Punti di emissione censiti da bibliografia e immagini telerilevate (anni 1884-2016), rappresentati in funzione delle loro coordinate piane, espresse in metri. È rappresentata la retta di regressione lineare, che approssima il risultato della altre possibili linee di correlazione, tutte caratterizzate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

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 Tabb. 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 allineanti ricavabili applicando un criterio puramente geometrico; per ciascun allineamento è stato calcolato l'azimut come in figura.

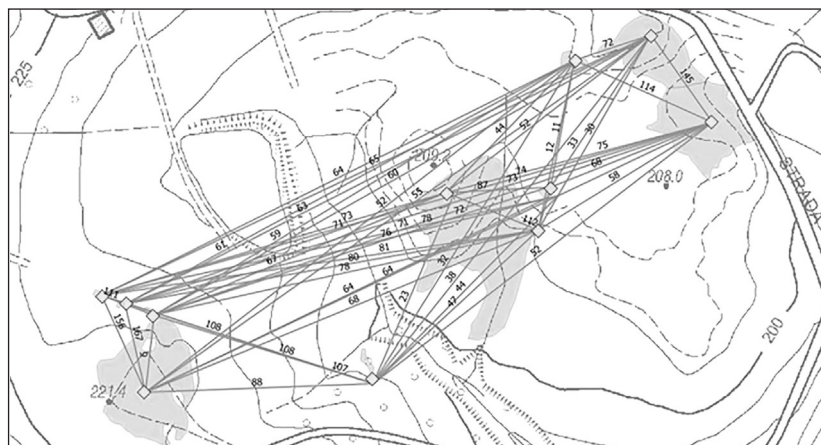


Fig. 7 – Gruppi di punti di emissione “stabili” e attivi nelle serie storiche considerate (rombi grigi). Sono tracciate le congiungenti possibili, con i rispettivi azimut.

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.

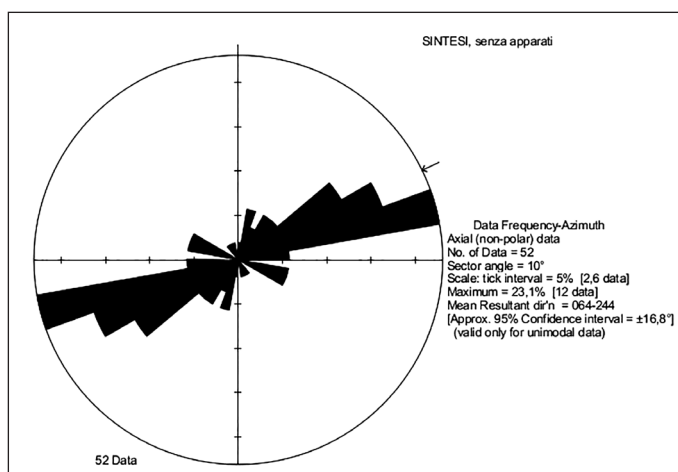


Fig. 8 – Diagramma a rosa degli allineamenti tracciati in Fig. 7 (52 dati utilizzati).

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.

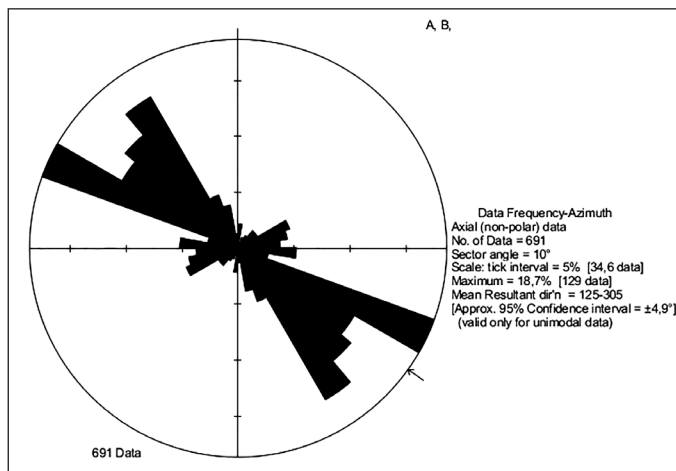


Fig. 9 – Diagramma a rosa, allineamenti dei punti di emissione censiti nei vari anni, apparati A, B, D (691 dati utilizzati).

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.

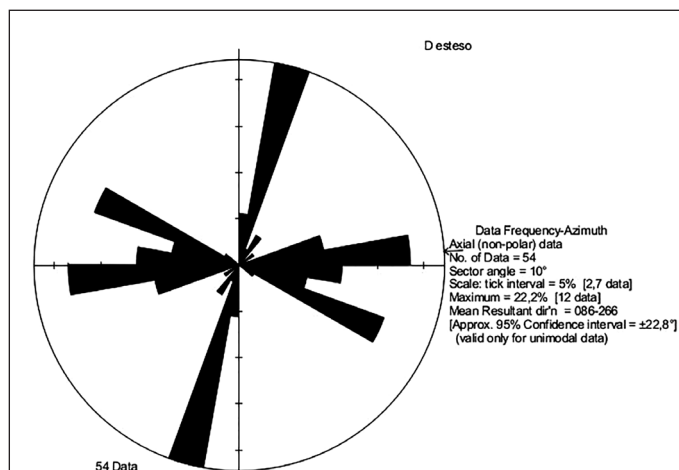


Fig. 10 – Diagramma a rosa, allineamenti dei punti di emissione censiti nei vari anni, apparato "E-Egidio" (54 dati utilizzati).

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.

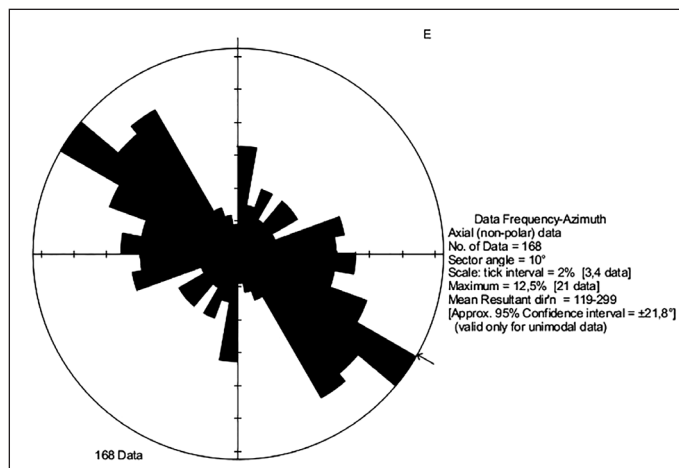


Fig. 11 – Diagramma a rosa, allineamenti dei punti di emissione censiti nei vari anni, apparato "G-Fernando" (168 dati utilizzati).

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

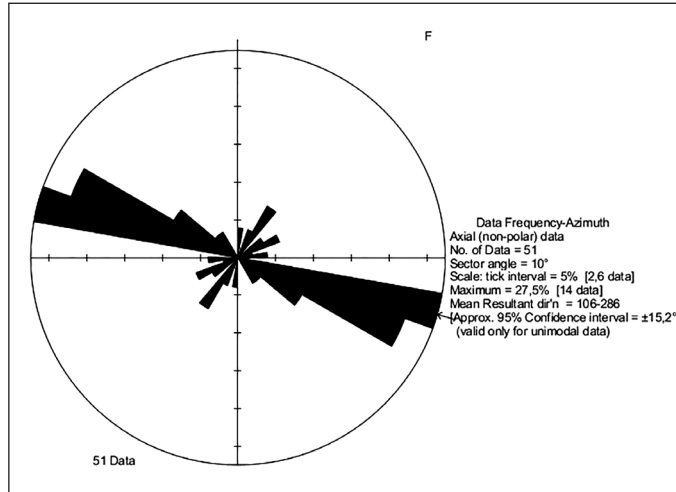


Fig. 12 – Diagramma a rosa, allineamenti dei punti di emissione censiti nei vari anni, apparato “H-Polle Alte” (51 dati utilizzati).

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°, espressione di una serie di faglie/fratture allineate e con tale orientazione.
- Tale geometria si riscontra in analoghe strutture con orientamento anti-appenninico, 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”.

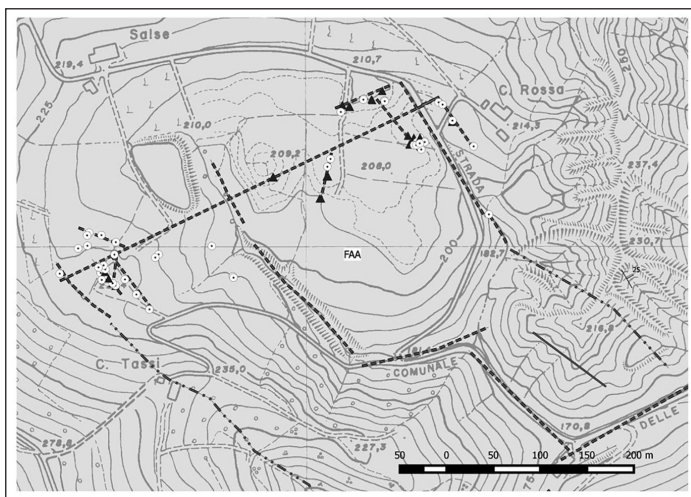


Fig. 13 – Allineamenti preferenziali (tratteggio) delle bocche lutivome, (cerchi e triangoli, rispettivamente polle e coni principali), interpretabili come riconducibili a faglie/fratture ad alto angolo. L'allineamento principale SO-NE è ricondotto per semplicità ad una singola struttura. Si tratta di 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 multiscalarì 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 vallecòla 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 antiforme, 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.

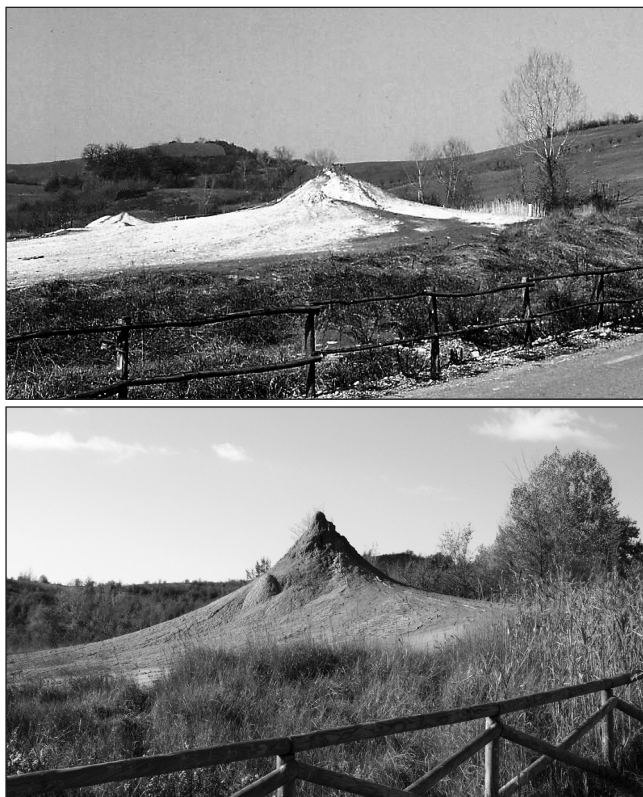


Fig. 18 – Salsa “B-Nando” vista dalla Strada delle Salse (da NE). In alto immagine del 1994 (foto L. Callegari); in basso nel 2013 (foto M. Reghizzi).

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 circoscritta con una staccionata.

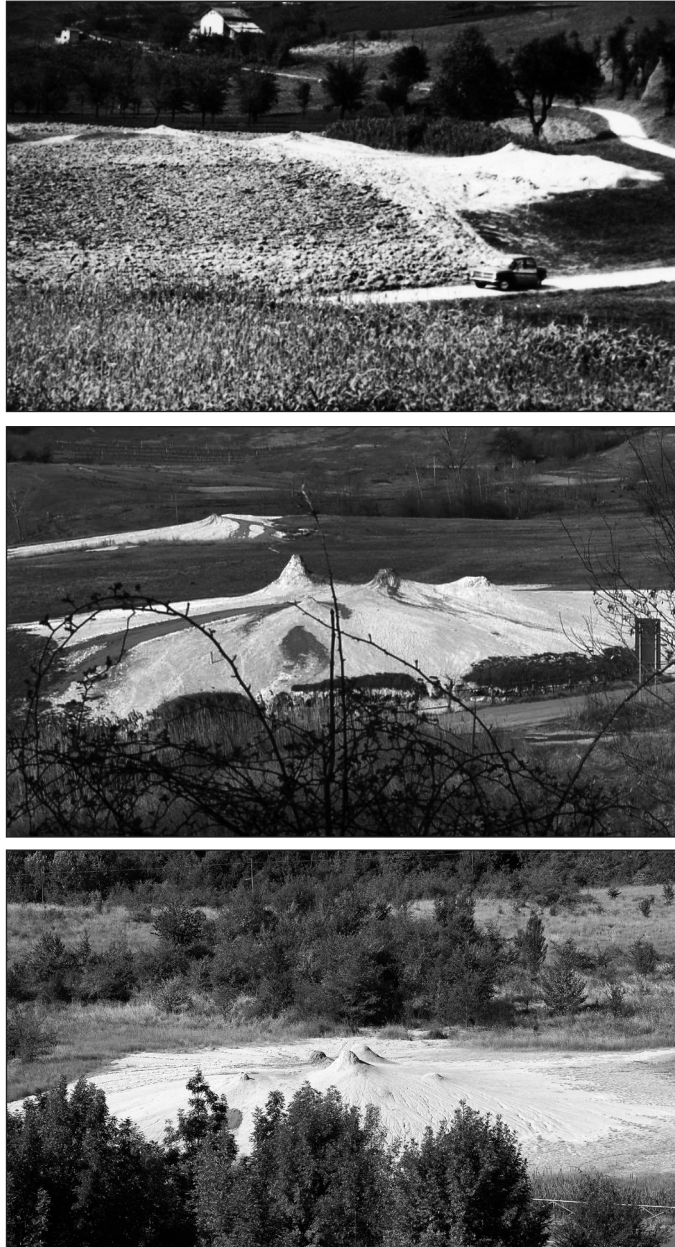


Fig. 19 – Salsa “D-La Giunta” vista dalla zona di Ca’ Rossa (da NE). In alto immagine del 1960, al centro del 1995 e in basso del 2007 (foto L. Callegari).



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).

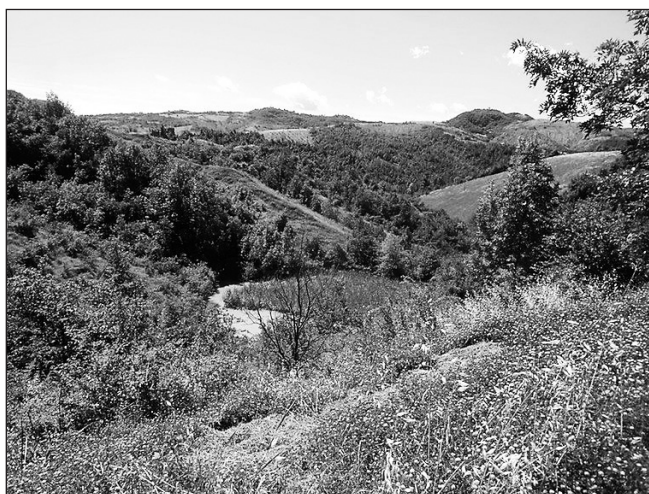


Fig. 23 – Palude ubicata a SSE di Ca’ Rossa (foto D. Castaldini).

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.

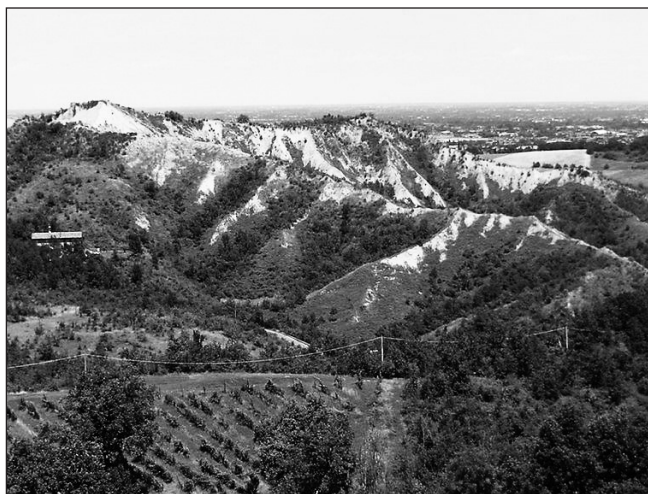


Fig. 24 – Panoramica dell'area a calanchi a est di Ca' Rossa modellati nella Formazione delle Argille Azzurre (Pliocene inf.-Pleistocene inf.); sullo sfondo la pianura a sud di Modena (foto D. Castaldini).

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 di un modesto movimento per colata, che ha comportato uno spostamento 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. Il soliflusso, 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.sviluppo-economico.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.

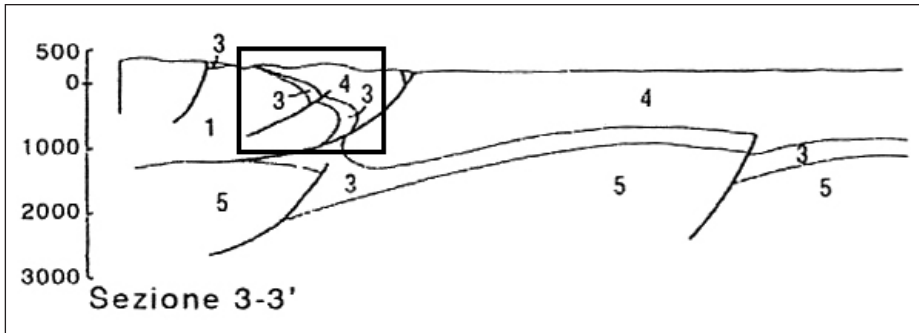


Fig. 27 – Sezione geologica pubblicata nella Note Illustrative del Foglio 219 Sassuolo (Gasperi *et al.*, 2005). *Legenda:* 1. Unità Liguri ed Epiliguri (a queste ultime appartiene la Formazione del Termina, citata nel testo); 2. Unità evaporitiche (assenti nel caso di studio e, ove presenti, date dalla 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-Romagnolo. 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 Montegibbio.

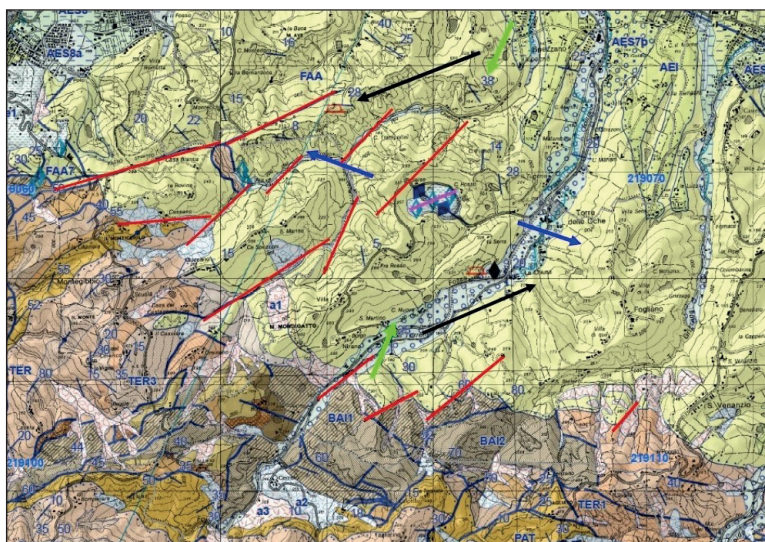


Fig. 28 – Faglie trasversali ad alto angolo, con rigetto cartografico indicativo di una trascorrenza sinistra (simbologgiata dalle frecce nere), in parte interpretate dalla cartografia geologica 1:25.000 di inquadramento dell'area di studio (Foglio 219 Sassuolo, Gasperi et al., 2005). Le frecce verdi 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 rinvenivano 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:

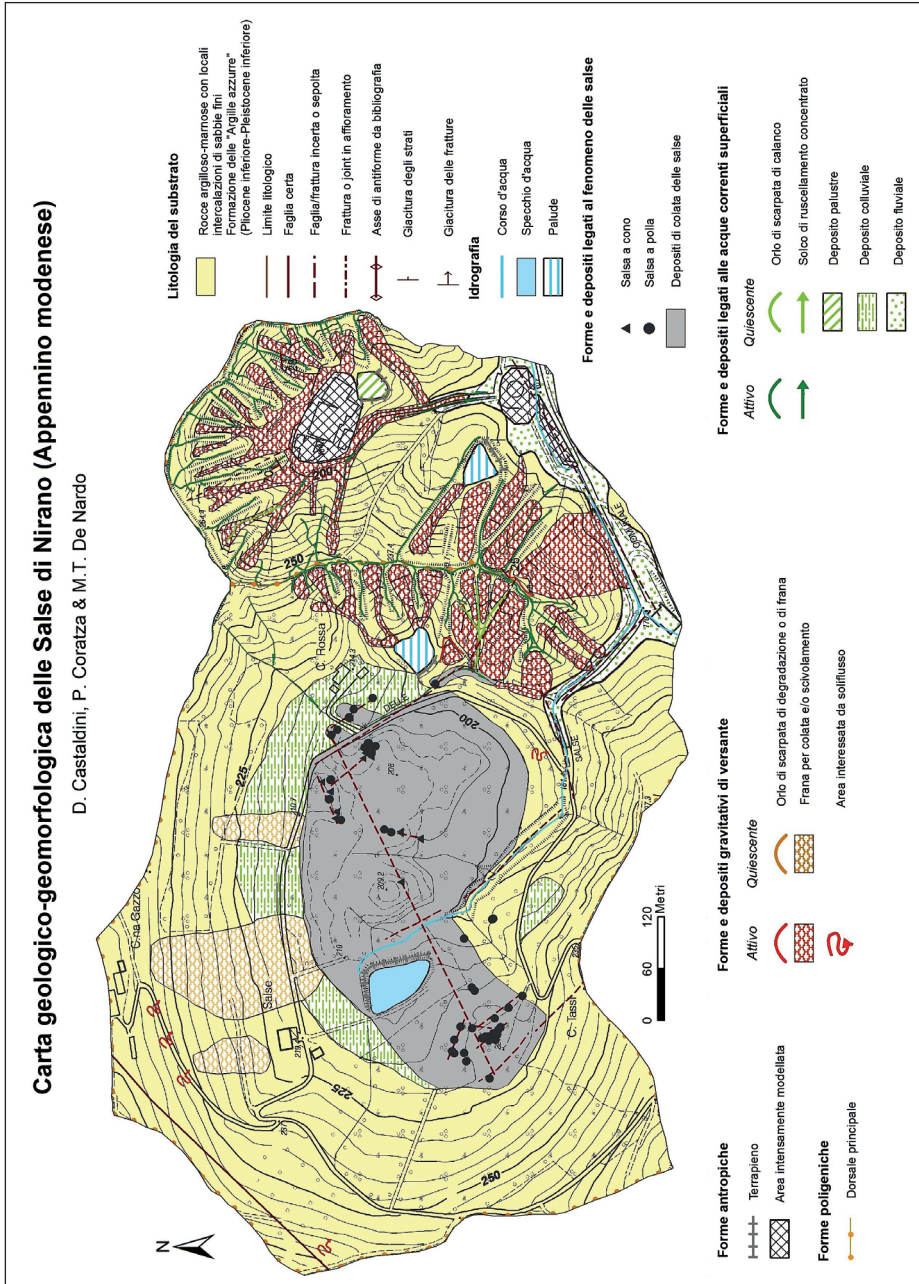
1) Alcune delle salse sviluppatasi presso Ca' Rossa a partire dal 2012 sono effettivamente di neoformazione in quanto non documentate nell'analisi storica. Non sono associate agli apparati lutivomi principali e "consolidati" dell'area delle salse; si sono attivate in un bosco di impianto artificiale 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, 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 (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).