

# Geologia dell'Ambiente

Periodico trimestrale della SIGEA  
Società Italiana di Geologia Ambientale



## 2/2012

ISSN 1591-5352

Poste Italiane S.p.A. - Spedizione in Abbonamento Postale - D.L. 353/2003 (conv. in L. 27/02/2004 n° 46) art. 1 comma 1 - DCB Roma





Geologia dell'Ambiente  
Periodico trimestrale della SIGEA  
Società Italiana di Geologia Ambientale

N. 2/2012  
Anno XX - aprile-giugno 2012

Iscritto al Registro Nazionale della Stampa n. 06352  
Autorizzazione del Tribunale di Roma n. 229  
del 31 maggio 1994

*Comitato scientifico*

Mario Bentivenga, Aldino Bondesan,  
Giancarlo Bortolami, Aldo Brondi,  
Felice Di Gregorio, Giuseppe Gisotti,  
Giancarlo Guado, Gioacchino Lena,  
Giacomo Prosser, Giuseppe Spilotro

*Consiglio Direttivo nazionale 2010-2013*

Davide Baioni, Domenico Bartolucci,  
Federico Boccalaro, Giancarlo Bortolami,  
Paolo Cortopassi, Antonio Fiore (*Tesoriere*),  
Fabio Garbin (*Segretario*), Francesco Geremia,  
Giuseppe Gisotti (*Presidente*), Maria Grotta,  
Gioacchino Lena (*Vice Presidente*),  
Massimo Massellani, Vincent Ottaviani,  
Andrea Vitturi, Francesco Zarlenga

*Comitato di redazione*

Federico Boccalaro, Giorgio Cardinali,  
Giovanni Conte, Gioacchino Lena,  
Paola Mauri, Maurizio Scardella

*Direttore responsabile*  
Giuseppe Gisotti

*Procedura per l'accettazione degli articoli*

I lavori sottomessi alla rivista dell'Associazione,  
dopo che sia stata verificata la loro pertinenza  
con i temi di interesse della Rivista, saranno  
sottoposti ad un giudizio di uno o più Referees.

*Redazione*

SIGEA: tel./fax 06 5943344  
Casella Postale 2449 U.P. Roma 158  
info@sigeaweb.it  
www.sigeaweb.it

*Progetto grafico e impaginazione*

Fralerighe  
tel. 0774 554497 - fax 0774 2431193  
info@fralerighe.it  
www.fralerighe.it

*Pubblicità*  
SIGEA

*Stampa*

Tipolitografia Acropoli, Alatri - FR

Abbonamento annuale: Euro 30,00

# Sommario

I vulcanelli di fango sul bordo orientale della Fossa  
Bradana (confine Basilicata-Puglia) 2  
FILOMENA CANORA, DOLORES FIDELIBUS, GIUSEPPE SPILOTRO

Problematiche costiere e ripascimenti:  
il caso della spiaggia di Terracina 11  
FABIO GARBIN, RICCARDO GINANNI CORRADINI, LUIGI TRAMONTI

Geomorfologia, geologia ambientale e tettonica:  
le cascate del torrente Barvi, evidenza morfologica  
della faglia di Cittanova (Calabria) 17  
ENZO CUIULI

Una procedura automatica tramite GIS  
per l'individuazione delle aree potenzialmente  
idonee all'attività estrattiva 23  
ALDO CLERICI, TATIANA ZINELLI

Utilizzo di software open source e gratuito  
per la ricostruzione del modello ambientale di un sito 29  
MARCO CECCHETTI

A questo numero è allegato il supplemento  
**DISSESTO IDROGEOLOGICO**  
*Il pericolo geoidrologico e la gestione del territorio in Italia*  
scaricabile all'indirizzo web [www.sigeaweb.it/supplementi.html](http://www.sigeaweb.it/supplementi.html)

**In copertina:** Cascata "Galasia", la cascata più a monte del gruppo di cascate del Torrente Barvi,  
evidenza morfologica della faglia di Cittanova (Calabria).

# I vulcanelli di fango sul bordo orientale della Fossa Bradanica (confine Basilicata-Puglia)

FILOMENA CANORA

Dip. di Strutture, Geotecnica, Geologia Applicata,  
Università della Basilicata, Potenza

DOLORES FIDELIBUS

Dip. di Ingegneria delle Acque e di Chimica,  
Politecnico di Bari, Bari

GIUSEPPE SPILOTRO

Dip. di Strutture, Geotecnica, Geologia Applicata,  
Università della Basilicata, Potenza

## RIASSUNTO

I vulcani di fango, nelle loro varie tipologie e dimensioni, sono l'espressione di complesse fenomenologie ampiamente diffuse nel mondo, che determinano la fuoriuscita sulla superficie della terra o sul fondo del mare di fluidi e fango, in differenti contesti sedimentari e tettonici. Molti sono i vulcanelli di fango individuati e studiati anche in Italia nelle ultime decadi. La presenza, l'origine e le dinamiche evolutive di tali singolari morfologie e delle loro emissioni sono state riferite ad attività tettonica e sismica, alla presenza di gas nel sottosuolo, alla formazione di sovrappressioni nei fluidi sotterranei. I vulcanelli di fango presenti al confine tra i territori pugliese e lucano costituiscono argomento finora inesplorato. Essi risultano posizionati in prossimità del bordo orientale della Fossa Bradanica, punto di convergenza complesso di tre domini: il substrato carbonatico, con ampie distensioni in direzione W, i domini appenninici in sovrascorrimento verso NE, il riempimento clastico della fossa, caratterizzato da una successione plio-pleistocenica di argille azzurre e depositi costieri, coinvolto parzialmente nei processi deformativi dei due termini precedenti. Nel settore E della Fossa Bradanica lungo la fascia perimurgiana, compresa tra Matera, in Basilicata, e Gravina, in Puglia, sono stati individuati due vulcanelli di fango, uno nel territorio del Comune di Gravina in Puglia, l'altro nel Comune di Matera (Basilicata). La fenomenologia è sicuramente più ampia nei territori di tale bordo, ma priva di segnalazioni che permettano una loro precisa localizzazione e identificazione. Le prime osservazioni compiute sui vulcanelli presenti nelle argille azzurre hanno permesso di evidenziare una caratteristica lenta e continua attività del fenomeno eruttivo, connessa alla presenza di fanghi pressurizzati, riconducibili all'ingresso e al movimento di fluidi attraverso sistemi di fratture profonde nell'ammasso argilloso. Il presente lavoro fornisce una prima segnalazione ed interpretazione dei fenomeni di vulcanesimo sedimentario identificati in questi territori, con l'obiettivo di evidenziare la specificità dei sistemi nei quali essi si sviluppano, la coerenza di queste fenomenologie con altre rilevate nei territori in esame. Infine

si ritiene molto importante promuovere tali fenomenologie come singolarità geologiche, da ascrivere al patrimonio naturale delle regioni che le ospitano.

**Parole chiave:** Vulcani di fango, Fossa Bradanica, Geodiversità, Geositi, Conservazione e tutela.

## INTRODUZIONE

I vulcani di fango attualmente identificati sulla superficie terrestre, sia in ambiente continentale che marino, sono almeno duemila; la loro presenza rappresenta l'espressione in superficie di una fenomenologia geologica conosciuta come vulcanesimo sedimentario, che tuttavia si può associare a contesti e meccanismi spesso diversi. Tali strutture sono generalmente a morfologia tronco-conica, generate dall'emissione di fanghi veicolati da fluidi liquidi e/o gassosi, talvolta associati a idrocarburi e a frammenti litici rappresentativi delle rocce attraversate durante il percorso fino al punto di fuoriuscita.

La natura dei fanghi dipende fortemente dalle condizioni geologico - strutturali e idrauliche del sottosuolo, che determinano i processi di formazione del fango, della loro amalgama con i fluidi vettori, della loro pressurizzazione e conseguente fuoriuscita.

La morfologia di superficie dipende dal grado di mobilitazione del fango defluente determinato dalle pressioni presenti a livello interstiziale, dalla frequenza e dalle caratteristiche della loro attività, dalla viscosità, nonché dalla topografia. Quindi, sebbene la maggior parte dei vulcani di fango abbia una tipica forma conica, essi possono assumere geometria variabile caratterizzata e denominata a seconda della grande varietà di forme e dimensioni (mud cones, mud diapirs, mud pies, mud pools, etc.). L'evoluzione morfologica, invece, risulta indotta dall'azione degli agenti esogeni e, talvolta, dall'intervento antropico. I coni, essendo costituiti prevalentemente dal fango, subiscono drenaggio, essiccamento e formazione di fratture; conseguentemente le acque di precipitazione possono innescare processi erosivi (Dimitrov, 2002; Kopf, 2002).

La pressurizzazione dei fluidi che riemergono veicolando fanghi può essere di diver-

si tipi. Il più banale, deriva da differenze di carico, in presenza di morfologie erose (caso comune nei vulcanelli nelle argille plio-pleistoceniche della fascia adriatica); altri meccanismi prevedono contesti tettonici o deformativi in grado di determinare e trasmettere stati di compressione, con rilascio di fluidi pressurizzati, in corrispondenza di faglie e pieghe; infine, ampie zolle di rocce sedimentarie porose, nelle quali possono svilupparsi sovrappressioni, e dove sono ampiamente rinvenibili discontinuità, le quali costituiscono percorsi preferenziali per i fluidi profondi che risalgono e raggiungono la superficie (Jakubov *et al.*, 1971; Higgins et Saunders, 1974; Brown, 1990; Milkov, 2000; Kopf, 2002; Mazzini, 2009) (Fig. 1). Studi recenti evidenziano la presenza di vulcani di fango in superficie causati da fenomeni di subsidenza, a seguito dello sviluppo di sacche nel sottosuolo e, talvolta, al collasso di caldere (Davies et Stewart 2005; Stewart et Davies 2006; Evans *et al.*, 2007, 2008).

Il particolare comportamento e la spettacolare morfologia dei vulcani di fango hanno affascinato molti studiosi fin dall'antichità, anche se gli studi e le conoscenze spesso non sono andati oltre la citazione storica e la descrizione morfologica (Plinio Il Vecchio, circa AD 60; Spallanzani, 1795; Stohr, 1869; Stoppani, 1873).

Inizialmente questi fenomeni hanno attratto l'attenzione di molti ricercatori perché considerati importanti indicatori di giacimenti di idrocarburi (Camerana, 1926; Higgins et Saunders, 1974); successivamente sono diventati un interessante e stimolante argomento di ricerca multidisciplinare; infatti, investigazioni e studi dettagliati relativi ai fenomeni di vulcanesimo di fango, presenti in diverse parti del mondo, sono stati condotti nelle ultime decadi (Barber *et al.*, 1986; Brown, 1990; Camerlenghi *et al.*, 1992; Milkov, 2000; Dimitrov, 2002; Kholodov, 2002; Kopf, 2002; Martinelli et Judd, 2004; Mazzini *et al.*, 2009; Bonini et Mazzarini, 2010), in particolar modo riguardo il contributo dei gas emessi dai vulcani di fango rispetto all'effetto serra e al riscaldamento globale (Milkov, 2005; Milkov et Etiope, 2005; Etiope et Milkov, 2004; Etiope *et al.*, 2004; Etiope et Klusman, 2002; Etio-

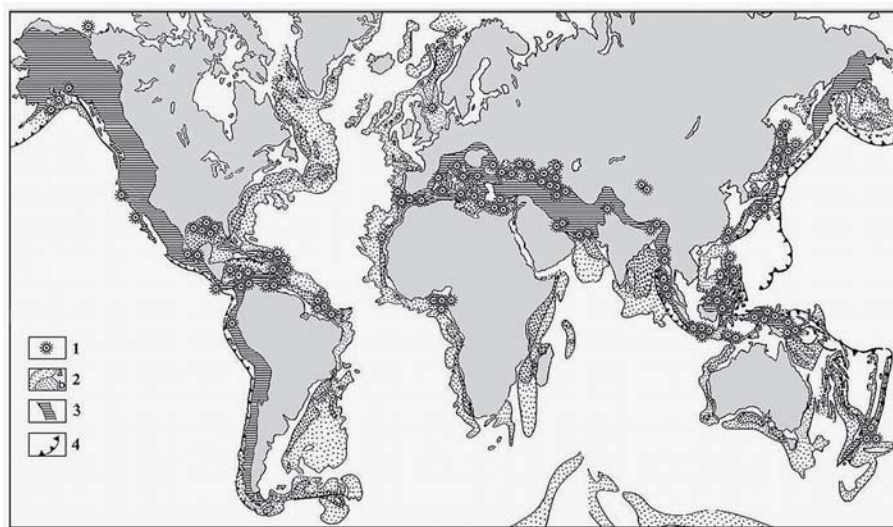


Figura 1 – Distribuzione geografica mondiale dei vulcani di fango: 1 - Vulcani di fango singoli, cinture e aree separate di vulcani di fango; 2 - Spessori di sedimenti nelle aree fuori delle piattaforme continentali: a) da 1 a 4 km, b) > 4 km; 3 - Aree compressive attive; 4 - Zone di subduzione (da Dimitrov, 2002, mod.).

pe *et al.*, 2008; Kopf, 2003), nonché al ruolo svolto come potenziali precursori di terremoti o in risposta ad essi (Bonini, 2009; Manga *et al.*, 2009; Manga, 2007; Mazzini *et al.*, 2007; Mellors *et al.*, 2007; Panahi, 2005).

Numerose sono state anche le ricerche relative ai vulcani di fango sottomarini diffusamente distribuiti quanto gli omologhi subaerei, contraddistinte da approfondite indagini e dall'analisi di dati ricavati dall'applicazione di metodologie geofisiche condotte ad esempio nel Mar Caspio (Davies et Stewart, 2005; Yusifov, 2004; Huseynov et Guliyev, 2004), nel mar Adriatico (Hovland et Curzi, 1989; Geletti *et al.*, 2008), nel Mar Ionio in corrispondenza dell'Arco Calabro (Ceramicola et Praeg, 2007; Praeg *et al.*, 2009; Gamberi et Rovere, 2010) e nel mar Mediterraneo (Zeppilli *et al.*, 2011; Camerlenghi et Pini, 2009; Savini *et al.*, 2009).

Sebbene gli apparati vulcanici abbiano spesso piccole dimensioni, dimensioni notevoli sono tuttavia riportate in letteratura sia per vulcani di fango terrestri che sottomarini (Dimitrov, 2002; Kopf, 2002; Martinelli et Judd, 2004; Mazzini *et al.*, 2009; Etiope *et al.*, 2007). Le innumerevoli esperienze relative ai vulcani di fango, nel mondo, hanno evidenziato che anche lo stile delle eruzioni è fortemente variabile: sono possibili piccole discontinue o lente e continue emissioni di fluidi e fango, ma perfino violente esplosioni eruttive, caratterizzate dal rilascio di migliaia o persino svariati milioni di metri cubi di fango mescolato a frammenti di roccia e idrocarburi liquidi e grandi quantità di gas. Numerose eruzioni in Azerbaijan, Indonesia e Trinidad, verificatesi con l'emissione di fluidi, fango e brecce accompagnata da esplosione e combustione di metano, hanno causato notevoli danni alle infrastrutture e vittime (Aliyev *et al.*, 2002; Deville et Guerlais, 2009; Mazzini *et al.*, 2007).

Tra le più recenti, si ricordi la straordinaria eruzione del vulcano di fango LUSI (LUmpur "mud"- Sldoarjo) in Indonesia, la cui incessante emissione di vapore acqueo e fango ad alta temperatura ha comportato l'evacuazione in massa della popolazione con la distruzione di molte infrastrutture (Manga, 2007; Mazzini *et al.*, 2007; Cyranoski, 2007; Mazzini *et al.*, 2009). Eruzioni di considerevole rilevanza sono frequentemente associate ad eventi sismici che, in funzione della loro intensità, possono influenzare apparati vulcanici situati anche a distanze notevoli (Mellors *et al.*, 2007). Alla luce di ciò, è lecito considerare tali fenomeni nel contesto della pericolosità geologica (Manga *et al.*, 2009; Mazzini, 2009; Kopf, 2008).

#### ORIGINE E MECCANISMI DI FORMAZIONE DEI VULCANI DI FANGO

Gli eventi di vulcanesimo di fango e la loro distribuzione spaziale si correlano con numerosi fattori, dei quali, i più ricorrenti vanno ricercati tra: (a) lo spessore di sequenze di argille marine depositatesi rapidamente, (b) l'età geologica; (c) i processi isostatici e strutture impilate o stressate per assetto tettonico e/o attività sismica, (d) la presenza di strutture diapiriche, elevati contrasti di densità nelle sequenze, sovrappressioni, gradienti di pressione elevatissimi originanti flussi nei sedimenti in prossimità di zone di frattura; (e) la geochimica degli idrocarburi in profondità e dei fluidi associati; (f) gli assemblaggi polimittici di sedimenti sovrastanti le formazioni plastiche (Milkov, 2000; Kopf, 2002; Dimitrov, 2002), (g) i flussi di fluidi pressurizzati sotto elevati gradienti, incanalati in percorsi profondi lungo fratture tettoniche, almeno in parte attraverso ammassi argillosi o argillitici.

Secondo Milkov (2000) le condizioni necessarie per lo sviluppo di tali fenomeni sono: gli elevati spessori di sedimenti argillosi

plastici e la compressione laterale tettonica attiva. Tutte le altre condizioni necessarie per la formazione di vulcani di fango (inversione densità, faglie, migrazione di fluidi liquidi e gassosi, ecc.) risultano da queste due ragioni principali (Milkov, 2000). In ogni caso, i fattori di controllo sopra indicati sono condizioni necessarie, a scale anche molto diverse, ma non sufficienti per la formazione di un vulcano di fango, in quanto da soli non spiegano i meccanismi di formazione.

Altri studi associano il vulcanesimo sedimentario al diapirismo di argille sottoconsolidate e/o fanghi (Brown, 1990; Milkov, 2000; Dimitrov, 2002; Kopf, 2002), processo attraverso il quale si verifica la risalita del materiale sedimentario profondo non consolidato, che intrude verticalmente, anche lungo piani di debolezza strutturale, nelle formazioni sovrastanti.

I vulcani di fango sviluppano il loro meccanismo di formazione a partire da queste strutture diapiriche, anche se i diapiri possono risalire, senza necessariamente forare completamente la copertura sedimentaria.

La formazione dei vulcani in associazione ai meccanismi diapirici dipende dal consolidamento del materiale diapirico, impedito da alte pressioni intergranulari, dalla granulometria, e dalla migrazione dei fluidi. Nelle condizioni descritte, anziché l'intera struttura diapirica, può emergere un flusso più o meno concentrato di acqua, fanghi non consolidati e gas, che determinano le condizioni di stabilizzazione del diapiro sottostante, depressurizzandolo in tempi più o meno lunghi.

Altre forme diapiriche nelle argille possono essere prodotte da deformazioni plastiche, da una spinta di galleggiamento causata da un afflusso laterale di fluidi a bassa densità, dalla variazione delle dinamiche sedimentarie, dalla formazione di idrocarburi, da processi diagenetici e metamorfici, o da processi tettonici e sismici.

È in tali contesti che si sviluppano maggiormente i vulcani di fango; tipicamente nelle formazioni plastiche argillose o argillo-scistose (Kopf, 2002; Milkov, 2000). L'elevata pressione interstiziale dei sedimenti argillosi è una caratteristica costante di tutte le aree in cui si verifica il vulcanesimo di fango, che può superare più di due volte la pressione idrostatica e anche essere superiore al peso dello strato di copertura (pressione litostatica) (Dimitrov, 2002).

In molti casi, i meccanismi di accumulo delle sovrappressioni che contribuiscono al fenomeno eruttivo delle unità sedimentarie profonde includono le reazioni geochimiche fortemente controllate dai gradienti di temperatura elevata, e soprattutto nei terreni caratterizzati da bassa permeabilità e plasticità (Feyzullayev et Lerche, 2009).



Condizione necessaria per dare origine ai vulcani di fango è la liquefazione (e fluidificazione) dei materiali, un processo indotto dall'elevata pressione del fluido interstiziale (Owen, 1996).

In particolare, i sedimenti non consolidati possono essere liquefatti attraverso la disidratazione dei minerali (soprattutto quelli argillosi), l'espansione dei gas, o gli stress tettonici, l'afflusso esterno di fluidi (Maltman et Bolton, 2003). L'elevato contenuto di acqua fa diminuire drasticamente il peso specifico apparente, il modulo di taglio e la viscosità dei sedimenti, i quali perdono resistenza e si comportano come un fluido viscoso (Pralle et al., 2003). Inoltre, il metano, se presente, produce un'espansione termica durante la risalita, con conseguente diminuzione della densità e aumento della pressione dei fluidi, che in misura maggiore favorisce l'estrusione superficiale del fango (Brown, 1990). La formazione un vulcano di fango, quindi, è direttamente relazionata alla crescita di una struttura con le caratteristiche di un diapiro, che può interessare diverse unità sedimentarie, con una risalita di materiale auto-sostenuta dalla spinta di galleggiamento e dall'accumulo di sovrappressioni le quali comportano una diminuzione/annullamento della coesione, la liquefazione/fluidificazione del mezzo, cosicché i fluidi in sovrappressione e il fango possono risalire lungo le discontinuità geologiche, trascinare altro materiale ed essere espulsi in superficie.

Sulla base di quanto esposto, anche per i vulcanelli di fango presenti in Italia, la genesi, la dinamica evolutiva, gli aspetti e le caratteristiche morfologiche sono differenti in relazione alle diverse condizioni geologiche, strutturali ed idrogeologiche delle aree in cui i essi si manifestano.

## I VULCANI DI FANGO IN ITALIA

In Italia la distribuzione geografica dei vulcani di fango subaerei è relativa a tre gruppi principali nel nord, nel centro Italia, e Sicilia; alcuni altri sono segnalati nel sud Italia, e diversi anche offshore (Martinelli et Judd, 2004; Bonini, 2009; Geletti et al., 2008) (Fig. 2). Le cause e i processi di formazione dei vulcani di fango e delle emissioni associate e connesse a tali morfologie, spesso riferite agli stress tettonici e all'attività sismica, alla presenza di gas nel sottosuolo, alla formazione di sovrappressioni nei fluidi sotterranei, sono state oggetto di numerosi studi, sia tipicamente morfologici che di analisi qualitative e quantitative (Gorgoni et al., 1988; Capozzi et Picotti, 2002; Etiope et Milkov, 2004; Martinelli et Judd, 2004; Accaino et al., 2007; Bonini, 2007; Etiope, 2009).

I vulcani di fango più conosciuti in Italia sono le "Salse" dell'Emilia Romagna e le "Ma-

calube" presenti in Sicilia. I fenomeni che si manifestano lungo il margine pedemontano appenninico Emiliano-Romagnolo sono legati all'assetto dell'Appennino Settentrionale considerato sede di deformazione compressiva attiva legata a rampe frontali e laterali di thrust, le quali definiscono le modalità con cui i fluidi si muovono attraverso le formazioni sedimentarie fino in superficie (Pellegrini et al., 1982; Nanni et Zuppi, 1986; Martinelli et Judd, 2004; Carobene et Gasperi, 2008; Accaino et al., 2007; Bonini, 2007, 2008).

Le Salse di Nirano (Modena) rappresentano l'esempio più noto fra i vulcani di fango emiliani, tanto che nel 1982 è stata istituita la Riserva Regionale delle Salse di Nirano; esse presentano apparati morfologici disposti in gruppi, al centro di tre ampie regioni fangose; la morfologia dell'area, all'interno della quale sono presenti due pozze dalle quali fuoriescono gas e acqua torbida salata, è il risultato del progressivo cedimento del suolo causato dalla continua emissione di materiale argilloso. La struttura sepolta coinvolge terreni del Messiniano coperti dalle argille azzurre plio-pleistoceniche. Le acque salate ed i gas risalgono attraverso le strut-

ture a causa di dislocazioni create dal regime compressivo esistente determinato dal fronte del sovrascorrimento plio-pleistocenico (Carobene et Gasperi, 2008). Le Salse di Nirano quindi, non rappresentano solo strutture di grande interesse naturalistico (Castaldini et al., 2005), ma anche una manifestazione delle tettonica quaternaria attiva, lungo il fronte della catena appenninica, confermata dalla sismicità dell'area (Bonini, 2008, 2009).

In Sicilia, l'attività di eruzione dei vulcanelli in alcune aree è costante, in altre l'attività è sporadica; essi si verificano in un contesto geologico-strutturale caratterizzato da un prisma di accrezione dominato da un asimmetrico thrust belt, caratterizzato da fronti compressivi ed estensionali e da subduzione oceanica attiva (Martinelli et Judd, 2004; Bonini, 2009).

Periodicamente le *Macalube* manifestano eruzioni esplosive, dovute alla pressione esercitata da ammassi di gas, costituiti essenzialmente da metano, accumulatisi nel tempo, con espulsione di materiale argilloso misto a gas ed acqua, con l'eccezione delle Salinelle di Paternò dove domina il diossido di carbonio proveniente dall'attività ignea

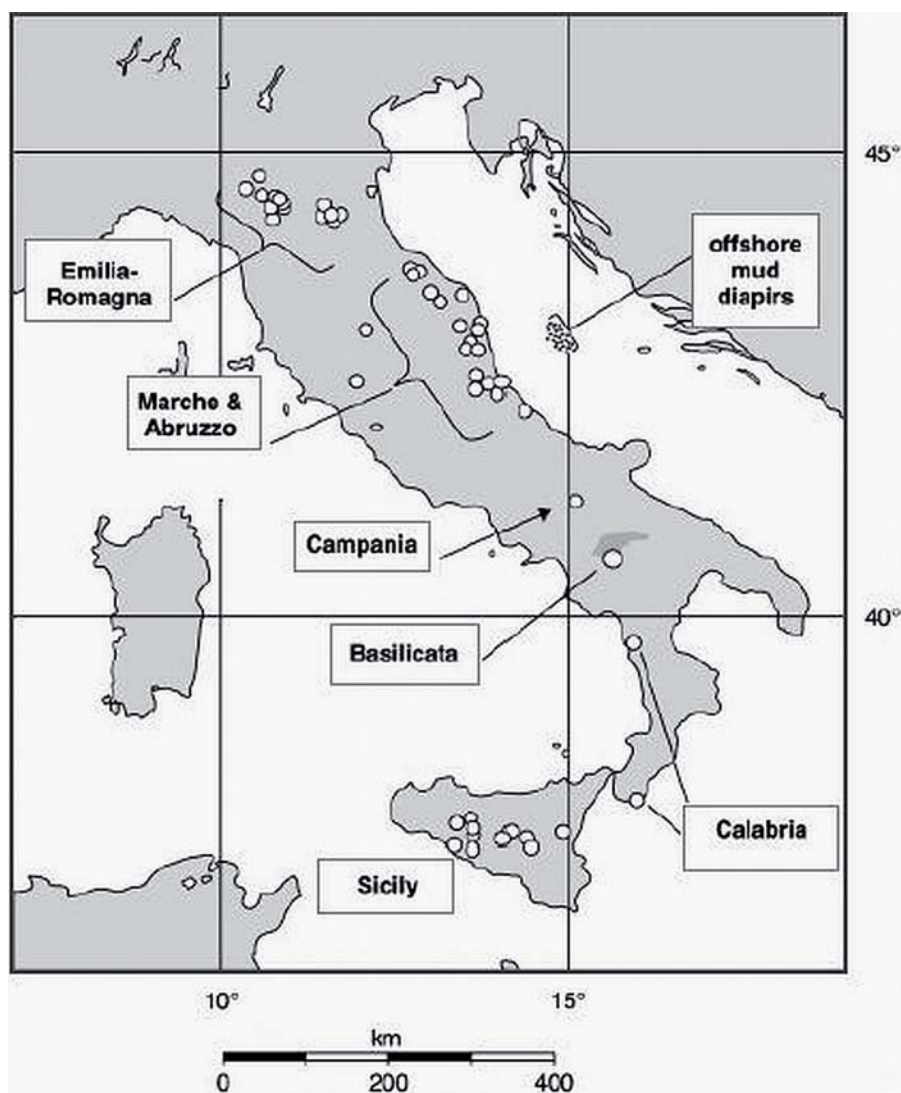


Figura 2 – Distribuzione geografica dei vulcani di fango in Italia (da Martinelli et Judd, 2004, mod.)

del vicino vulcano Etna (Etiope *et al.*, 2002; Martinelli et Judd, 2004).

I vulcanelli di fango ben rappresentati, come tipologia, numero ed estensione, sono stati osservati anche nell'area periadriatica delle regioni abruzzese e marchigiana, caratterizzata dall'affioramento di depositi terrigeni pliocenici e pleistocenici (Farabollini *et al.*, 2003; Scalella et Di Francesco, 2004). Diversi vulcani di fango noti in letteratura sono estinti e non se ne conserva traccia: molti infatti, si manifestano per brevi periodi e poi si esauriscono.

È questo il caso dei vulcanelli di fango scoperti subito dopo il terremoto dell'Aquila (Abruzzo) del 2009, dei quali dopo circa un mese dal violento evento sismico, restavano soltanto le tracce. In diverse località dei comuni vicini subito dopo la scossa del 6 aprile, comparvero numerosi vulcanelli di fango che ribollivano acqua e fango (www.tuttoraiano, 2009). Il meccanismo della liquefazione di terreni incoerenti saturi sotto sollecitazioni sismiche è ben noto ed attribuito al collasso ed assestamento della struttura granulare, con incremento delle pressioni interstiziali. Tali sovrappressioni possono determinare gradienti di carico e quindi flusso del materiale liquefatto.

### I VULCANELLI DI FANGO DEL CONFINE APPULO-LUCANO

In Basilicata, è citato in letteratura un solo vulcanello di fango (Martinelli et Judd, 2004; Lazzari et Losasso, 2010) individuato nel Comune di Cancellara (PZ) in località Bufete, nei pressi di una sorgente di acqua solfurea. L'area di localizzazione di tale struttura, a forma di polla che emette gas e fango (finora non analizzati), è appenninica e tettonicamente attiva.

I vulcanelli di fango individuati al confine Appulo-Lucano costituiscono pertanto argomento finora inesplorato. Queste fenomenologie sono relazionate all'assetto strutturale conferito da una tettonica essenzialmente distensiva ai sedimenti fini del ciclo sedimentario Plio-Pleistocenico della Fossa Bradanica (Ciaranfi *et al.*, 1979; Tropeano *et al.*, 1994) e a specifici ambienti idrogeologici e idrodinamici che si generano in tale contesti.

Diverse sono le segnalazioni relative alla presenza di vulcanelli di fango nell'area bradanica, ma solo tre sono stati individuati al confine tra i territori pugliese e lucano; essi risultano posizionati in prossimità del bordo orientale della Fossa Bradanica, punto di convergenza complesso di tre domini: la piattaforma carbonatica, con ampie distensioni nella parte sepolta in direzione SW, i domini appenninici in sovrascorrimento verso E, il riempimento clastico della fossa, caratterizzata da una successione plio-pleistocenica

di argille azzurre e depositi costieri, coinvolta con meccanismi complessi nei processi deformativi dei due termini precedenti. I tre vulcanelli di fango esaminati sono localizzati uno (Vulcanello V1) nel territorio del Comune di Gravina (Puglia), il secondo (Vulcanello V2), che dista dal primo 5 km, in località Timmari presso Matera (Basilicata) e l'ultimo (Vulcanello V3) nel comune di Ferrandina (Matera, Basilicata) manifestatosi all'interno di una galleria ferroviaria sulla linea Matera – Ferrandina ormai da tempo dismessa (Fig. 3).

molto fluidi (e ricchi in frazione argillosa) al contrario generano polle e colate di fango, che fuoriescono da crateri di modesta altezza (mud pools), quantunque ampi.

Il vulcanello di Gravina è caratterizzato da emissioni di fango denso e costruzione di un edificio di forma tronco-conica, a pianta ellittica, con diametro maggiore di circa 60 m, diametro minore di circa 35 m, altezza massima di circa 4 m (mud pie) (Fig. 4a). Tale morfologia si deve considerare tuttavia "giovane", in quanto periodicamente l'apparato del vulcanello viene smantellato e rasato

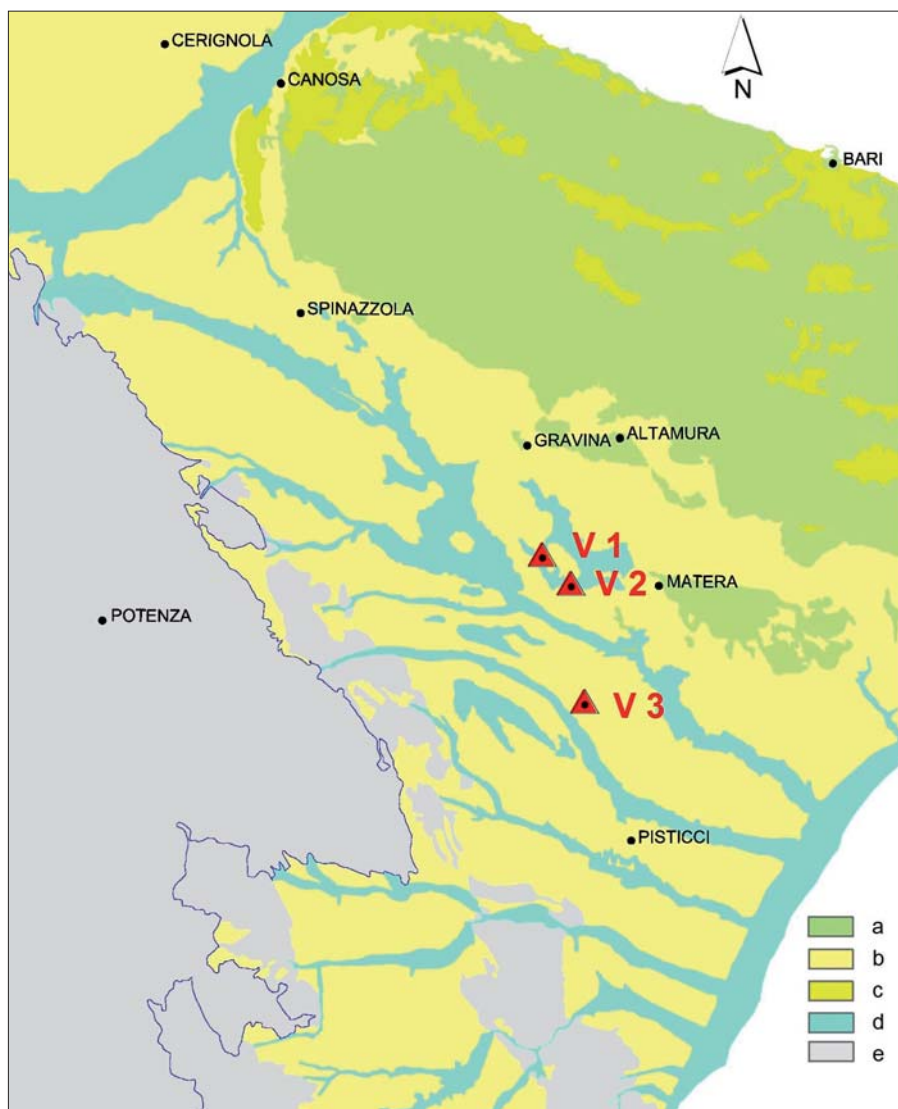


Figura 3 – Schema geologico dell'area di interesse con ubicazione dei vulcanelli censiti. Legenda: a - Calcarei e calcari dolomitici di piattaforma (giurassico – cretaceo); b - depositi marini trasgressivi sul termine precedente (pleistocene); c - depositi marini dell'avanfossa bradanica e del bacino di S. Arcangelo (plio-pleistocene); d - depositi alluvionali, lacustri e costieri (pleistocene – olocene); e - depositi appenninici di vari ambienti ed età; V1, V2, V3: posizione dei vulcanelli (da Cotecchia et Manfredini, 1982, mod.).

La forma degli apparati di emissione dei vulcanelli di fango dipende dalla densità del fango: in presenza di un fango denso, condizione che si determina per drenaggio rapido dopo l'eruzione e in presenza di materiali granulometricamente arricchiti nelle frazioni grossolane, si costituiscono edifici di forma conica o tronco-conica, con diametro di svariati metri e altezze rapportate al diametro (mud cones and mud pies); fanghi

a zero dall'attività agricola.

La morfologia è in continua evoluzione: il vulcanello è caratterizzato da più crateri, con nuove bocche che si aprono e altre che cessano la loro attività nel tempo. La forma di questi crateri è relativamente complessa, il fondo è ribassato ma intorno ad essi si assiste alla costruzione di un vero e proprio edificio festonato, soggetto a collassi, con allineamenti su fratture locali (Fig. 4b).





Figura 4a – Edificio del vulcanello di fango di Gravina di forma tronco-conica a pianta ellittica.



Figura 4b – Morfologia dell'apparato con bocche e strutture festonate dalle quali fuoriesce e scorre il fango.



Figura 5 – Particolare della colata del vulcanello di fango presente in località Timmari (Basilicata, Matera).

Il secondo vulcanello, presente in località Timmari, presso Matera, a causa dell'alta fluidità, appare come una colata di fango che fuoriesce da un basso cratere (mud pool); l'intorno è in gran parte ricoperto da depositi di colata di modesto spessore (Fig. 5).

Il terzo vulcanello (V3) è una manifestazione classificabile come mud pool, con la sola particolarità che la sua formazione e rinvenimento sono avvenuti all'interno di una galleria ferroviaria sulla linea Matera-Ferrandina (MT), dismessa da circa 50 anni, a circa 800 m dall'imbocco dal lato Ferrandina (Fig. 6).

Il ricoprimento in tale sezione è di circa 200 m e la litologia di attraversamento è interamente nelle argille azzurre sub-appennine. Anche in questo caso, l'emissione di fango è associata ad abbondante emissione di acqua.

Da notare che non si ha notizia del fenomeno nei tempi in cui la galleria era ancora in esercizio.

Considerata l'importanza geologica e ambientale di tali vulcanelli di fango, per la particolare ed atipica conformazione rispetto al contesto geomorfologico e strutturale nel quale si manifestano, ne deriva un motivato interesse di ricerca e un'urgente necessità di salvaguardia e tutela dettata dalla loro elevata vulnerabilità.

## ASSETTO GEOLOGICO

I vulcani di fango individuati si inseriscono nel contesto geologico regionale della Fossa Bradanica ed in particolare, nel suo bordo orientale al confine con la struttura carbonatica della Murgia.

La Fossa Bradanica (Migliorini, 1937; Selli, 1962) rappresenta il bacino di sedimentazione plio-pleistocenico compreso fra l'Appennino Meridionale ad ovest, e l'Avampese Apulo ad est (Ricchetti, 1980; Ricchetti et Mongelli, 1980) (Fig. 3).

La successione stratigrafica riconosciuta è rappresentata dal Calcare di Altamura (Cretaceo sup.), dalle Calcareni di Gravina (Pleistocene inf.), dalla Formazione delle Argille sub-appennine (Pleistocene inf.), da depositi clastici grossolani, recentemente riclassificati come depositi costieri (Pleistocene med.), dalle Calcareni di Monte Castiglione (Calabrian-Tirreniano). Negli specifici contesti sono presenti depositi marini terrazzati e sabbie di spiaggia attuali, depositi continentali eluvio-colluviali, alluvionali e palustri (Ciaranfi *et al.*, 1996).

Il contesto è particolarmente vivace sotto l'aspetto dei processi di origine tettonica, fisica, idrogeologica e geochimica che si sono verificati in tempi antichi e più recenti, e dei quali i vulcanelli di fango costituiscono contemporaneamente un aspetto fenomenologico derivato e di conferma degli stessi,





Figura 6 – Vulcanello del fango presente in una galleria ferroviaria sulla linea Matera – Ferrandina (MT).

offrendo, peraltro, una ulteriore possibilità di studio e verifica.

### CARATTERISTICHE DEL FANGO DI ESPULSIONE

La maggior parte dei vulcani di fango si localizza in aree caratterizzate dalla presenza di argille marine plio-pleistoceniche, notoriamente impermeabili alla grande scala. Nell'area bradanica, al confine appulo-lucano essi testimoniano circolazioni di fluidi, essenzialmente acqua con fanghi argilloso limosi, lungo estesi circuiti sotterranei che si sviluppano lungo fratturazioni tettoniche.

La roccia madre dei fanghi espulsi dai vulcanelli nell'area di interesse è costituita dalle argille azzurre subappennine.

Le argille azzurre granulometricamente sono costituite da particelle argillose ( $D < 0.002$  mm) per circa il 50-60%, da frazione limosa per circa il 30-40% e da frazione sabbiosa per circa il 10-20%. Nelle parti bordiere del bacino di sedimentazione si possono avere frequenti intercalazioni sabbiose, che preludono a variazioni sempre più consistenti di granulometria fino al passaggio alle sabbie. La mineralogia delle argille è definita da minerali della classe della illite e della caolinite; marginale è la presenza di smectite e di altre famiglie di minerali argillosi; notevole è la presenza di carbonati (superiore al 20%) in forma di piccoli cristalli dalle varie forme di cristallizzazione e da frammenti di gusci di organismi; la frazione non argillosa è riconducibile a numerosi minerali, dal quarzo ai feldspati. Sono infine presenti, sia in forma di precipitati, sia nelle acque interstiziali sali ed ossidi di ferro e manganese, oltre ovviamente a cloruri, e soprattutto solfati. In condizioni di flusso capillare per essiccamento, la precipitazione dei solfati dà luogo alla formazione di cristalli di gesso, anche di grosse dimensioni.

L'analisi granulometrica del fango emesso mostra una composizione costituita per circa il 30-35% da particelle argillose, da frazione limosa per circa il 55-60% e da frazione sabbiosa per circa il 5-10%. La granulometria dei fanghi emessi risulta essere sostanzialmente quella di un'argilla azzurra subappennina, con debole perdita della componente argillosa (Fig. 7) e profondamente destrutturata.

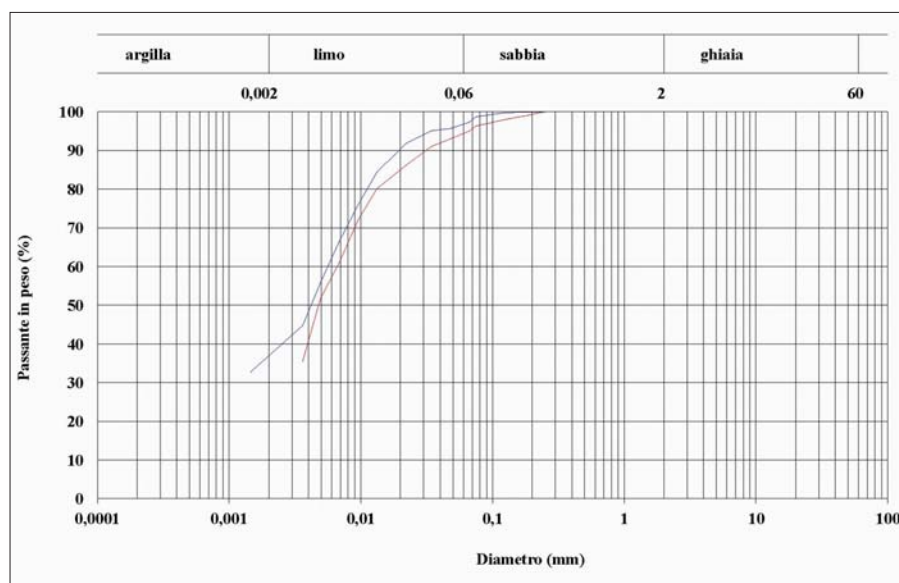


Figura 7 – Curve granulometriche dei fanghi emessi dal vulcanello V1.

Dal punto di vista mineralogico - petrografico sezioni sottili preparate dai fanghi del vulcanello V1, analizzate direttamente ed a luce polarizzata, hanno consentito l'identificazione di frammenti litici, minerali opachi e di minerali sialici, quali il feldspato, il plagioclasio, il quarzo (campione n. 1 a componente fina), mentre un secondo campione prelevato in una zona di accumulo presenta grana più grossa ed è costituito da biotite, mica bianca, calcite, K-feldspato, plagioclasio e quarzo.

Gli elementi distintivi di quest'analisi sono comparabili con le caratteristiche mineralogiche delle argille sub-appennine della Fossa Bradanica riportate in diversi studi (Dell'Anna, 1969; Garavelli et Nuovo, 1975; Di Pierro, 1981; Dell'Anna et Laviano, 1982).

### LE ACQUE DI ESPULSIONE

L'approccio geochimico funzionale alla comprensione delle complesse fenomenologie che determinano le caratteristiche delle acque espulse dai vulcanelli di fango richiede analisi chimiche su un ampio set di parametri e analisi isotopiche. In ragione della dinamica delle emissioni fluide, è evidente che tali analisi andrebbero ripetute nel tempo in conformità a un piano di campionamento o monitoraggio appropriato. Per il presente studio si è proceduto ad un solo campionamento di acque dal Vulcanello V1 al fine di avere un'indicazione di massima sulle caratteristiche delle acque emesse, ben consci della limitata rappresentatività dei dati in rapporto alla possibile variabilità nel tempo delle emissioni fluide; il campione è stato sottoposto a una analisi con ICP-Plasma (Ca, Mg, Na, K, B, Li, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr tot., Cr (VI), Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Tl, V, Zn) e all'analisi dei cloruri.

L'acqua, con conducibilità elettrica di 4.84 mS/cm, quindi lievemente salmastra, e

con pH 8.65, è risultata di chiara facies cloruro-sodica, con rapporto molare Na/Cl pari a 1.3 (con Na pari a 49.9 mM/L e Cl 39 mM/L) e molto più basse concentrazioni di potassio (0.82 mM/L), calcio (0.14 mM/L), e magnesio (0.45 mM/L). Il bilancio ionico indica che i bicarbonati e i solfati, non analizzati, sono in bassa concentrazione. Il Boro è pari a 9 ppm.

Dall'esame della letteratura disponibile risulta che le acque dei vulcani di fango sono frequentemente di facies Na-Cl o Na-Cl-



$\text{HCO}_3^-$ , con concentrazioni di cloruri variabili tra poche centinaia di ppm (Kopf *et al.*, 2003) sino a 33.000 ppm (Planke *et al.*, 2003), superiori a quelle delle acque di mare (mediamente 19.000 ppm). Nella maggior parte dei casi il rapporto molare  $\text{Na}/\text{Cl}$  è superiore al rapporto in acqua di mare (pari a 0.85).

Le concentrazioni del calcio e del magnesio sono normalmente basse, con rapporti molari  $\text{Na}/\text{Ca}$  e  $\text{Na}/\text{Mg}$  quasi sempre superiori a quelli in acqua di mare. Oltre ai cloruri, i bromuri, gli ioduri e il boro sono utilizzati quali traccianti dell'origine dei fluidi, della profondità di circolazione e delle interazioni acqua-roccia. Le alte concentrazioni di Boro sono l'elemento più distintivo: nelle acque dei vulcani di fango di Trinidad si raggiungono contenuti di Boro tra 3.3 e 128 ppm (Dia *et al.*, 1999); in quelle di Taiwan il Boro varia tra 1 e 108 ppm (Gieskes *et al.*, 1992) mentre in Azerbaijan la variazione è tra 50 e 254 ppm (Planke *et al.*, 2003); nelle acque saline termali da vulcani di fango nell'area del Mar Nero (Lagunova, 1976) il Boro raggiunge anche i 919 ppm. Va ricordato che nelle acque marine il Boro presenta concentrazioni medie di 0,5 ppm.

Tali concentrazioni elevate di boro sembrano essere in relazione al desorbimento di Boro da minerali argillosi (You *et al.*, 1996). Più in generale, all'origine di tali caratteristiche composizioni chimiche sono identificati processi quali la disidratazione di minerali, l'adsorbimento e il desorbimento su minerali argillosi, reazioni di precipitazione e dissoluzione, redox, e di degradazione di materiale organico; l'origine delle acque emesse dai vulcani di fango è di norma ipotizzata come miscelamento tra acque profonde e acque di origine meteorica (Lagunova, 1976; You *et al.*, 1993; Martin *et al.*, 1996; Dia *et al.*, 1999; Kopf *et al.*, 2002).

Considerando per confronto sia le caratteristiche delle acque emesse da vulcanelli di fango desunte dalla letteratura, sia quelle delle acque marine, è possibile collocare l'acqua del Vulcanello 1 nell'ambito delle prime. Infatti, nella Fig. 8, che riporta il rapporto molare  $\text{Na}/\text{Ca}$  rispetto al rapporto  $\text{B}/\text{Cl}$  (due rapporti che significativamente contraddistinguono le acque dei vulcanelli di fango), il Vulcanello V1 si situa centralmente rispetto a questi e sicuramente distante rispetto alla posizione definita dalle acque di mare attuali.

È evidente che tale dato è indicativo e consente solo di evidenziare che alcune caratteristiche anomalie riscontrate generalmente nelle acque dei vulcanelli di fango sono presenti anche nelle acque del Vulcanello V1. Più difficile è interpretare il ruolo degli altri elementi analizzati, le cui singolarità dovrebbero essere riguardate primariamente rispetto al fondo ambientale locale; il rapporto  $\text{Ba}/\text{Cl}$ , in ogni caso, è anormalmente alto nelle acque

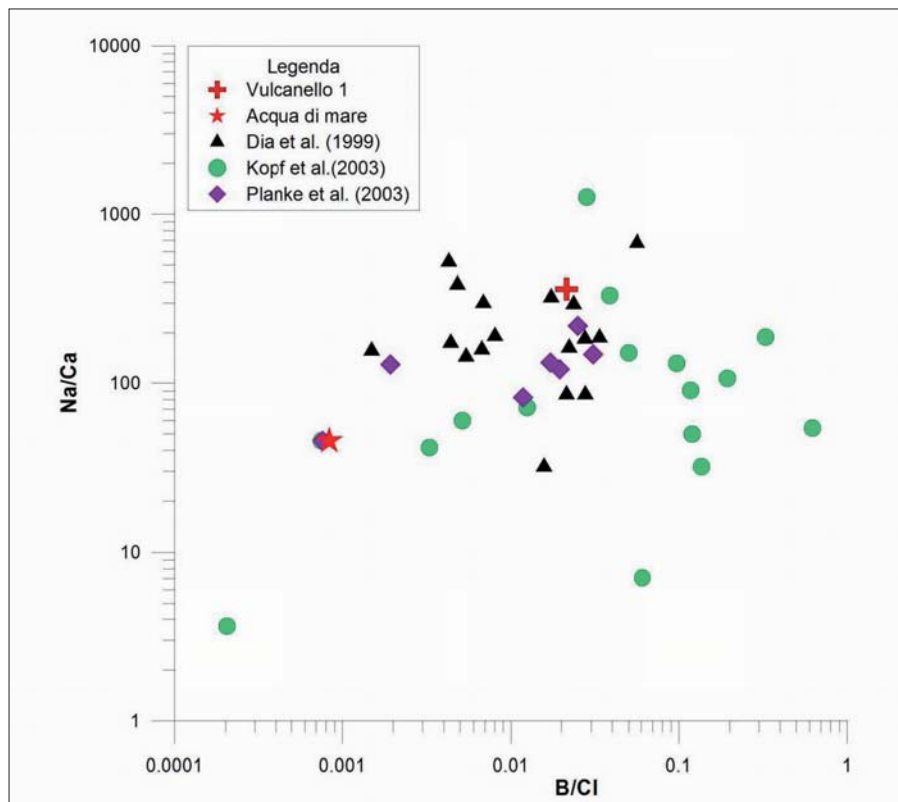


Figura 8 – Rapporto molare  $\text{Na}/\text{Ca}$  rispetto al rapporto  $\text{B}/\text{Cl}$  nelle acque di vulcanelli di fango.

del Vulcanello V1 così come in tutte le acque descritte in letteratura.

#### INTERPRETAZIONE FENOMENOLOGICA

Il meccanismo di formazione e funzionamento dei vulcanelli di fango esaminati rientra tra quelli riconosciuti alla base di tali manifestazioni fenomenologiche, ma, anche in ragione della loro più modesta intensità, derivante da processi meno profondi.

La formazione e l'attività di un vulcanello di fango richiedono la concomitanza di tre elementi: a – un meccanismo di generazione del fango e la sua associazione ad un fluido, liquido o gassoso, vettore; b – l'energizzazione del materiale così creato, di regola per pressurizzazione (della quale si è visto nei paragrafi precedenti, la diversa possibile origine); infine la discontinuità preesistente o determinata dalla pressione del fluido, che consente al fluido vettore di raggiungere la superficie topografica, punto a potenziale minore dal punto di vista fluidodinamica.

I vulcanelli di fango individuati al confine appulo-lucano, sono situati su impilamenti di strati sedimentari recenti, coinvolti da (o determinanti con il loro sovraccarico) una tettonica recente del basamento carbonatico, con la conseguente loro dislocazione in ampie monoclini per lo più allungate parallelamente al bordo della struttura murgiana.

Le discontinuità profonde così generate e successivamente integrate nel modellamento superficiale della regione, costituiscono contemporaneamente le zone di generazione dei fanghi e di mescolamento con fluidi idrici, di

provenienza superficiale, e subordinatamente gassosi.

Il materiale sedimentario destrutturato, fluidificato e pressurizzato risale attraverso le discontinuità trascinando sedimenti argillosi e altri tipi di sedimenti strappati durante la risalita, dando luogo in superficie alle particolari strutture morfologiche.

Le argille bradaniche sul bordo orientale della fossa sono dunque affette da discontinuità alla piccola ed alla grande scala, riconducibili a deformazioni in fase di consolidazione e nelle successive fasi tettoniche; queste ultime nell'area sono state tipicamente distensive e hanno dato luogo a successioni di monoclini fagliate, bordate da vistose strutture di taglio, su cui si sono successivamente impostate morfologie erosionali e nello specifico, calanchive.

Tra i meccanismi precedentemente elencati, potrebbero avere un ruolo importante anche l'effetto della spinta di galleggiamento dei sedimenti profondi, le acque salate di espulsione per consolidazione, esse stesse pressurizzate, la componente gassosa, e l'instaurarsi di elevate pressioni interstiziali nei sedimenti, che aumenta fino al superamento della pressione di confinamento (litostatica), determinata dal carico dei materiali soprastanti o da stati tensionali di origine tettonica. È utile osservare che stati compressivi aiutano la risalita dei fanghi, ma creano problemi alla loro circolazione e fuoriuscita; inoltre la circolazione idrica lungo ampie discontinuità o contrasti di permeabilità nell'ambito delle formazioni argillose plio-pleistoceniche atti-

va processi di arricchimento granulometrico delle frazioni più grosse, per dilavamento di quelle argillose più fini.

## CONCLUSIONI

I vulcanelli di fango individuati e studiati sul bordo orientale della fossa Bradanica, al confine tra Basilicata e Puglia, appartengono alla più ampia famiglia delle analoghe fenomenologie già segnalate e studiate nelle argille azzurre plio-pleistoceniche marine sub-appennine dell'intero bordo adriatico, ideale proseguimento della fossa verso N. A differenza di queste altre, tuttavia, le analisi preliminarmente disponibili e la dimensione e intensità del fenomeno definiscono processi legati alla tettonica recente delle formazioni argillose ed a circuiti di formazione dei fanghi e di pressurizzazione associati a meccanismi idrodinamici non particolarmente profondi e sensibili alle ricariche meteoriche. La definizione dei meccanismi che accompagnano la dinamica di questi fenomeni necessita di un approccio multidisciplinare che integri le più diversificate competenze. Sono ancora numerosi gli aspetti da investigare riguardanti questi straordinari fenomeni naturali, di enorme potenzialità ai fini delle molteplici conseguenze nella ricerca di base ed applicata in numerosi settori, dalla geodinamica alle georisorse, allo studio di precursori sensibili nel campo dei pericoli naturali, oltre che costituire geositi di straordinaria attrattività e potenzialità didattica.

Tra gli studi utili per la loro valorizzazione nella direzione indicata, fondamentale risulterebbe la determinazione delle condizioni fisico-chimiche in profondità e in superficie ed il monitoraggio composizionale ed isotopico dei fluidi interstiziali e di quelli espulsi e dei gas associati nonché dell'attività "vulcanica" in generale.

Tali studi sono indispensabili per migliorare la lettura e la comprensione del paesaggio, anche alla luce della normativa Europea (Council of Europe, 2004), italiana e regionale, sulla conservazione del patrimonio geologico, di aree di particolare interesse geologico e di singolarità geologiche, le quali sottolineano l'importanza del patrimonio geologico e delle geodiversità, con l'obiettivo della tutela e salvaguardia, attraverso gli strumenti per creare opportunità per l'istruzione, la ricreazione e il turismo.

## RINGRAZIAMENTI

Questo articolo nasce con i contributi offerti con entusiasmo da molti amici nel contesto delle loro attività. Ci è gradito ricordare e ringraziare in primo luogo il Sig. Michele Parisi dell'Associazione Speleologica CARS di Altamura, il Dott. Emanuele Scarciolla dell'ARPA Basilicata, l'Ing. Ruggero Palumbo, e la Dott.ssa Teresa Trabace della Metapontum AGROBIOS.

## BIBLIOGRAFIA

- 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, 90-101.
- ALIYEV A., GULIYEV I.S., BELOV I.S. (2002), *Catalogue of Recorded Eruptions of Mud Volcanoes of Azerbaijan*. Nafta Press, Baku, pp.87.
- BARBER A.J., TJOKROSAPOETRO S., CHARLTON T.R. (1986), *Mud volcanoes, shale diapirs, wrench faults, and mélanges in accretionary complexes, Eastern Indonesia*. AAPG Bull., 70, 1729-1741.
- BONINI M. (2007), *Interrelations of mud volcanism, fluid venting, and thrust-anticline folding: Examples from the external northern Apennines (Emilia-Romagna, Italy)*. Journal of Geophysical Research 112, B08413, doi:10.1029/2006JB004859.
- BONINI M. (2008), *I vulcani di fango Emiliani: retrospettiva e prospettive*. Geoitalia, 22, 12-21.
- BONINI M. (2009), *Mud volcano eruptions and earthquakes in the Northern Apennines and Sicily, Italy*. Tectonophysics, 474, 723-735.
- BONINI M., MAZZARINI F. (2010), *Mud volcanoes as potential indicators of regional stress and pressurized layer depth*, Tectonophysics, 1-2, 494, 32-47.
- BROWN K.M. (1990), *The nature and hydrogeological significance of mud diapirs and diatremes for accretionary prisms*, Journal of Geophysical Research, 95, 8969-8982.
- CAMERANA E. (1926), *Le manifestazioni di idrocarburi nell'Emilia*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., 20, 21-69.
- CAMERLENGHI A., CITA M.B., HIEKE W., RICCHIUTO T. (1992), *Geological evidence for mud diapirism on the Mediterranean Ridge accretionary complex*. Earth and Planetary Science Letters 109, 493-504.
- CAMERLENGHI A., PINI G.A. (2009), *Mud volcanoes, olistostromes and Argille scagliose in the Mediterranean region*. Sedimentology 56, 319-365.
- 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, 363-370.
- CAROBENE L., GASPERI G. (2008), *Vulcanetti di fango a Nirano (Modena)*. Geoitalia, 25, doi:10.1474/Geoitalia-25-13.
- CASTALDINI D., VALDATI J., ILIES D.C., CHIRIAC C. with contributions by BERTOGNA 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) - Vol. Sp., 245-255.
- CERAMICOLA S., PRAEG D. (2007), *Una nuova provincia di vulcani di fango scoperta nel Mar Ionio*. Geoitalia, 19, 18-22; doi:10.1474/Geoitalia-19-10.
- CIARANFI N., MAGGIORE M., PIERI P., RAPISARDI L., RICCHETTI G., WALSH N. (1979), *Considerazioni sulla neotettonica della Fossa bradanica*. Progetto Finalizzato Geodinam. CNR, 251, 73-95.
- CIARANFI N., MARINO M., SABATO L., D'ALESSANDRO A., DE ROSA R. (1996), *Studio geologico stratigrafico di una successione infra e meso-pleistocenica nella parte sudoccidentale della Fossa Bradanica (Montalbano Ionico, Basilicata)*. Boll. Soc. Geol. It., 115, 379-391.
- COUNCIL OF EUROPE (2004), *Committee of Ministers, Recommendation Rec(2004)3 on conservation of the geological heritage and areas of special geological interest*.
- CYRANOSKI D. (2007), *Muddy waters. How did a mud volcano come to destroy an Indonesian town?* News Feature, Nature, 445, 812-815.
- DAVIES R.J., STEWART S.A. (2005), *Emplacement of giant mud volcanoes in the South Caspian Basin: three-dimensional seismic reflection imaging of root zones*. Journal of the Geological Society 162: 1-4.
- DELL'ANNA L. (1969), *Indagini mineralogiche e chimiche sulle argille di Rutigliano*. Per. Miner., 38, 515-577.
- DELL'ANNA L., LAVIANO R. (1982), *Composizione mineralogica, granulometrica e chimica delle argille grigio-azzurre infamesoplioceniche di Cairano e Conza della Campania (AV)*. Rendiconti della Società Italiana di Mineralogia e Petrologia 38, 871-881.
- DEVILLE E., GUERLAI S.H. (2009), *Cyclic activity of mud volcanoes: evidences from Trinidad (SE Caribbean)*. Marine and Petroleum Geology 26:1681-1691.
- DIA A. N., CASTREC-ROUELLE M., BOULÈQUE J., COMEAU P. (1999), *TRINIDAD MUD VOLCANOES: WHERE DO THE EXPELLED FLUIDS COME FROM?* Geoch. et Cosmoch. Acta, 63, 7/8, 1023-1038.
- DIMITROV L.I. (2002), *Mud volcanoes-the most important pathway for degassing deeply buried sediments*. Earth-Science Reviews 59, 49-76.
- DI PIERRO M. (1981), *Caratteri composizionali delle argille pleistoceniche della zona di Miglionico (MT)*. Rendiconti della Società Italiana di Mineralogia e Petrologia 37, 229-240.
- ETIOPE G., KLUSMAN R.W. (2002), *Geologic emissions of methane to the atmosphere*. Chemosphere, 49, 777-789.
- ETIOPE G., MILKOV A.V. (2004), *A new estimate of global methane flux from onshore and shallow submarine mud volcanoes to the atmosphere*. Environmental Geology, 46, 997-1002.
- ETIOPE G., FEYZULLAYEV A., BACIU C. L., MILKOV A. V. (2004), *Methane emission from mud volcanoes in eastern Azerbaijan*, Geology, 32, 465-468, doi:10.1130/G20320.1.
- 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, L14303, doi:10.1029/2007GL030341.
- ETIOPE G., MILKOV A.V., DERBYSHIRE E. (2008), *Did geologic emissions of methane play any role in Quaternary climate change?*, Global Planetary Change, 61, 79-88.
- ETIOPE G. (2009), *Natural emissions of methane from geological seepage in Europe*. Atmospheric Environment, 43, 1430-1443.
- EVANS R., DAVIES R.J., STEWART S.A. (2007), *Internal structure and eruptive history of a kilometre scale mud volcano system, South Caspian Sea*. Basin Res., 19:153-163.
- EVANS R.J., STEWART S.A., DAVIES R.J. (2008), *The structure and formation of mud volcano summit calderas*. J. Geol. Soc. Lond. 165, 1-12.
- FARABOLLINI P., MATERAZZI M., SCALELLA G. (2003), *I vulcanelli di fango nella regione Marche: proposte di perimetrazione, valorizzazione, conservazione e tutela aree a rischio di estinzione*. Atti del Convegno "La geologia ambientale, strategie per il nuovo millennio", Geologia dell'Ambiente, n. 1-2003.
- FEYZULLAYEV A.A., LERCHE I. (2009), *Occurrence and*



- nature of overpressure in the sedimentary section of the South Caspian Basin, Azerbaijan*. En. Expl. & Exploit., 27, 5, 345-366.
- GAMBERI F., ROVERE M. (2010), *Mud diapirs, mud volcanoes and fluid flow in the rear of the Calabrian Arc Orogenic Wedge (southeastern Tyrrhenian sea)*. Basin Research 22, 452-464, doi: 10.1111/j.1365-2117.2010.00473.x.
- GARAVELLI C.L., NUOVO G. (1975), *Le argille di Montemesola: dati mineralogici e chimici*. Rendiconti della Società Italiana di Mineralogia e Petrologia 30, 611-642.
- GELETTI R., DEL BEN A., Busetti M., Ramella R., and Volpi V. (2008), Gas seeps linked to salt structures in the Central Adriatic Sea. Basin Research (2008) 20 (4): 473-487 doi: 10.1111/j.1365-2117.2008.00373.
- GIESKES J.M., YOU C.-F., LEE T., YUI T.F., CHEN H.-W. (1992), Hydro-geochemistry of mud volcanoes in Taiwan. Acta Geol.
- GORGONI C., BONORI O., LOMBARDI S., MARTINELLI G., SIGHINOLFI G.P. (1988), *Radon and helium anomalies in mud volcanoes from the northern Apennines (Italy) - a tool for earthquake prediction*. Geochemical Journal, 22, 265-273.
- HIGGINS G.E., SAUNDERS J.B. (1974), *Mud volcanoes their nature and origin: In Contributions to the Geology and Paleobiology of the Caribbean and Adjacent Area*, Naturforsch. Ges. Basel, Verh., 84, n. 1, 101-152.
- HOVLAND M., CURZI P. (1989), *Gas seepage and assumed mud diapirism in the Italian Central Adriatic Sea*, Marine and Petroleum Geology, 6, 161-169.
- HUSEYNOV D.A., GULIYEV I.S. (2004), *Mud volcanic natural phenomena in the South Caspian Basin: geology, fluid dynamics and environmental impact*, Environmental Geology, Springer, 46, 1012-1023.
- JAKUBOV A.A., ALI-ZADE A.A., ZEINALOV M.M. (1971), *Mud Volcanoes of the Azerbaijan SSR*. Atlas. Azerbaijan Academy of Sciences, Baku.
- KHOLODOV V.N. (2002), *Mud volcanoes, their distribution regularities and genesis: communication 1. Mud volcanic provinces and morphology of mud volcanoes*. Lithol. Miner. Res. 37, 197-209.
- KOPF A.J. (2002), *Significance of mud volcanism*. Reviews of Geophysics 40 (2), 1005.
- KOPF A., DEYHLE A. (2002), *Back to the roots: boron geochemistry of mud volcanoes and its implications for mobilization depth and global B cycling*. Chem. Geol. 192, 195-210.
- KOPF A.J. (2003), *Global methane emission through mud volcanoes and its past and present impact on the earth's climate*. International Journal of Earth Science 92 (5), 806-816.
- KOPF A., DEYHLE A., LAVRUSHIN V.Y., POLYAK B.G., GIESKES J.M., BUACHIDZE G.I., WALLMANN K., EISENHÄUER A. (2003), *Isotopic evidence (He, B, C) for deep fluid and mud mobilization from mud volcanoes in the Caucasus continental collision zone*. Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.) 92, 407-425, DOI 10.1007/s00531-003-0326-y.
- KOPF A.J. (2008), *Volcanoes: making calderas from mud*. Nature Geoscience 1 (8), 500-501.
- LAGUNOVA I.A. (1976), *Origin of boron in waters of mud volcanoes*. Int. Geol. Rev. 18, 929-934.
- LAZZARI M., LOSASSO A. (2010), *I vulcanelli di fango in Basilicata*. Geologia e Turismo, n. 3.
- MALTMAN A.J., BOLTON A. (2003), *How sediments become mobilized*. In: Subsurface Sediment Mobilization (P. Van Rensbergen, R.R. Hillis, A.J. Maltman and C.K. Morley, Eds.). Geol. Soc. Lond. Spec. Publ., 216, 159-171.
- MALTMAN and C.K. Morley, Eds.). Geol. Soc. Lond. Spec. Publ., 216, 9-20.
- MANGA M. (2007), Did an earthquake trigger the May 2006 eruption of the Lusi mud volcano? EOS 88, 18.
- MANGA M., BRUMM M., RUDOLPH M.L. (2009), *Earthquake triggering of mud volcanoes*. Marine and Petroleum Geology 26, 1785-1798 doi:10.1016/j.marpetgeo.2009.01.019.
- MARTIN J.B., KASTNER M., HENRY P., LE PICHON X., LALLEMENT S. (1996), *Chemical and isotopic evidence for sources of fluids in a mud volcano field seaward of the Barbados accretionary wedge*. J. Geophys. Res. 101, 20, 325-345.
- MARTINELLI G., JUDD A. (2004), *Mud volcanoes of Italy*. Geological Journal, 39, 49-61.
- MAZZINI A., SVENSEN H., AKHMANOV G.G., ALOISI G., PLANK S., MELTHE-SØRENSEN A., ISTADI B. (2007), *Triggering and dynamic evolution of the Lusi mud volcano, Indonesia*. Earth and Planetary Science Letters, 261, 375-388.
- MAZZINI A. (2009), *Mud volcanism: Processes and implications*. Marine and Petroleum Geology, 26(9): 1677-1680.
- MAZZINI A., NERMOEN A., KROTKIEWSKI M., PODLADCHIKOV Y., PLANKE S., SVENSEN H. (2009), *Strike-slip faulting as a trigger mechanism for overpressure release through piercement structures. Implications for the Lusi mud volcano, Indonesia*. Mar. Petr. Geol., 26, 1751-1765.
- MELLORS R., KILB D., ALIYEV A., GASANOV A., YETIRMISLI G. (2007), *Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions*. J. Geophys. Res., 112, B04304, pp.11.
- MIGLIORINI C. (1937), *Cenno sullo studio e sulla prospezione petrolifera di una zona dell'Italia meridionale*. 2nd Petroleum world Congress, Paris, 1-11.
- MILKOV A.V. (2000), *Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates*. Mar. Geol. 167, 29-42.
- MILKOV A.V. (2005), *Global distribution of mud volcanoes and their significance in petroleum exploration as source of methane in the atmosphere and hydrosphere as geohazard*. In: Martinelli G., Panahi B. (eds) Mud Volcanoes, Geodynamics and Seismicity. NATO Sci. Ser. 51, Springer, Amsterdam, 29-34.
- MILKOV A.V., G. Etiope (2005) - Global methane emission through mud volcanoes and its past and present impact on the Earth's climate. Comment. International Journal of Earth Science, v. 94 (3), pp. 490-492.
- NANNI T., ZUPPI G.M. (1986), *Acque salate, circolazione profonda in relazione all'assetto strutturale del fronte adriatico e padano dell'Appennino*. Mem. Soc. Geol. It. 35, 979-986.
- OWEN G. (1996), *Experimental soft-sediment deformation: structures formed by the liquefaction of unconsolidated sands and some ancient examples*. Sedimentology, 43, 279-293.
- PANAHI B.M. (2005), *Mud volcanism, geodynamics and seismicity of Azerbaijan and the Caspian Sea region*. In: Mud Volcanoes, Geodynamics and Seismicity, NATO Sci. Ser., Earth Environ., Ed. G. Martinelli and B. Panahi, 51, 88-104, Springer, New York.
- PRALLE N., KULZER M., GÜDEHUS G. (2003), *Experimental evidence on the role of gas in sediment liquefaction and mud volcanism*. (P. Van Rensbergen, R.R. Hillis, A.J. Maltman and C.K. Morley, Eds.). Geol. Soc. Lond. Spec. Publ., 216, 159-171.
- PELLEGRINI M., BRAZZOROTTO C., FORTI P., FRANCAVILLA F., RABBI E. (1982), *Idrogeologia del margine pedemontano Emiliano-Romagnolo*. Mem. Soc. Geol. It. 24 (Suppl. D), 183-189.
- PLANKE S., SVENSEN H., HOVLAND M., BANKS D.A., JAMTVEIT B. (2003), *Mud and fluid migration in active mud volcanoes in Azerbaijan*. Geo-Mar. Lett., 23, 258-268, doi:10.1007/s00367-003-0152-z.
- PLINIO IL VECCHIO (23-79 AD), *Naturalis Historia*. Vol. II.
- PRAEG D., CERAMICOLA S., BARBIERI R., UNNITHAN V., WARDELL N. (2009), *Tectonically-driven mud volcanism since the late Pliocene on the Calabrian accretionary prism, central Mediterranean Sea*. Marine and Petroleum Geology, 26, 9, 1849-1865.
- RICCHETTI G. (1980), *Contributo alla conoscenza strutturale della Fossa Bradanica e delle Murge*. Boll. Soc. Geol. It. 49, 421-430.
- RICCHETTI G., MONGELLI F. (1980), *Flessione e campo gravimetrico della micropiattaforma apula*. Boll. Soc. Geol. It. 99, 431-436.
- SAVINI A., MALINVERNO E., ETIOPE G., TESSAROLO C., CORSELLI C. (2009), *Shallow seep-related seafloor features along the Malta plateau (Sicily channel-Mediterranean Sea): morphologies and geo-environmental control of their distribution*. Mar. and Petr. Geology 26, 1831-1848.
- SCALELLA G., DI FRANCESCO R. (2004), *Le sorgenti connesse ai Vulcanelli di fango nel territorio teramano. Valorizzazione, conservazione e tutela*. Atti del Convegno "Sorgenti di interesse scientifico-ambientale", Salice Terme, Geologia dell'Ambiente, n. 3 - 2004.
- SELLI R. (1962), *Il Paleogene nel quadro della geologia dell'Italia meridionale*. Mem. Soc. Geol. It. 3, 737-789.
- SPALLANZANI L. (1795), *Viaggi alle Due Sicilie e in alcune parti dell'Appennino*. Pavia.
- STOHR R. (1869), *Intorno agli strati terziari superiori di Montegibbio e vicinanze*. Atti Soc. Nat. Mat. Modena, 4.
- STOPPANI A. (1873), *Il Bel Paese*. Milano, pp. 651.
- STEWART S.A., DAVIES R.J. (2006), *Structure and emplacement of mud volcano systems in the South Caspian Basin*. AAPG Bulletin, 90, 753-770.
- TROPEANO M., MARINO M., PIERI P. (1994), *Evidenze di tettonica distensiva plio-pleistocenica al margine orientale della Fossa Bradanica: l'Horst di Zagarella*. Il Quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences, 7(2), 597-606.
- www.tutoraiano: <http://tutoraiano.blogspot.com/2009/04/gli-esperti-li-chiamano-vulcanetti-ma.html>, 30 aprile 2009.
- YOU C.F., SPIVACK A.J., SMITH J.H., GIESKES J.M. (1993), *Mobilization of boron at convergent margins: implications for boron geo-chemical cycle*. Geology 21, 207-210.
- YOU C.F., CASTILLO P.R., GIESKES J.M., CHAN L.H., SPIVACK A.J. (1996), *Trace element behavior in hydrothermal experiments: implications for fluid processes at shallow depths in subduction zones*. Earth Planet Sci. Lett. 140, 41-52.
- YUSIFOV M.Z. (2004), *Seismic interpretation and classification of mud volcanoes of the South Caspian basin, offshore Azerbaijan*, M.S. thesis, pp. 94, Univ. of Tex., Austin.
- ZEPPILLI D., MEA M., CORINALDESI C., DANOVARO R. (2011), *Mud volcanoes in the Mediterranean Sea are hot spots of exclusive meiobenthic species*. Progress in Oceanography. Article in press, available online.