

STUDIO DEI PARAMETRI GEOLOGICI E GEOCHIMICI PER LA COMPrensIONE DEI MECCANISMI GENETICI DEGLI SPROFONDAMENTI NELLA PIANA DI S. VITTORINO (RI)

ANNUNZIATELLIS ALDO *, **BEAUBIEN STAN EAUGENE ***,
CIOTOLI GIANCARLO *, **LOMBARDI SALVATORE ***,
NISIO STEFANIA ** & **NOLASCO FRANCESCO *****

*Dip. di Scienze della Terra Università degli Studi di Roma "La Sapienza"
P.le A. Moro 5 00185 Roma

**APAT – Dipartimento Difesa del Suolo - V. Curtatone, 3 00185 Roma

***Dip. Ambiente e Protezione Civile, Difesa del Suolo - Regione Lazio
Via Capitan Bavastro, 108 00146 Roma

RIASSUNTO

In questo lavoro è presentata la sintesi di una serie di studi a carattere interdisciplinare effettuati dal 1997 nella Piana di S. Vittorino (Rieti). Tali studi hanno avuto l'obiettivo di migliorare le conoscenze sulle cause innescanti i noti fenomeni di sprofondamento avvenuti in epoca storica e recente nell'area. Lo scenario emerso ha permesso di ipotizzare un modello concettuale sulla genesi dei sinkholes, le cui caratteristiche possono essere estese ad altri casi simili presenti lungo la fascia peritirrenica dalla Toscana (Grosseto, Camaiole) al Lazio (Pianura Pontina, Guidonia, Capena), alla Campania (Teleso). Le indagini effettuate (geologiche, geomorfologiche, dei gas del suolo e idrogeochimiche) hanno permesso di attribuire al fenomeno una genesi non semplicemente carsica, ma che necessariamente deve ammettere un processo di risalita (piping), di fluidi aggressivi che possano generare sifonamento e asportazione chimica e/o meccanica di particelle solide. La migrazione dei fluidi è strettamente legata alla presenza di un importante reticolo di faglie, come evidenziato dall'origine profonda della componente gassosa di alcune emergenze, arricchita in CO_2 , He, CH_4 , e H_2S .

Lo studio del chimismo delle acque superficiali prelevate nella piana ha messo in evidenza la presenza di tre gruppi di acque con caratteristiche chimico-fisiche differenti. In particolare, le emergenze, ubicate tra le Terme di Cotilia e l'argine settentrionale del Velino, presentano anomalie di alcuni parametri fisici e chimici tra i quali assumono un ruolo rilevante il pH e gli ioni Cl^- , SO_4^{2-} . Tutti i campioni di acqua prelevati in quest'area mostrano una forte componente gassosa, anche quelli appartenenti ai piccoli invasi circolari (sinkhole). Inoltre, poiché la piana è caratterizzata da una importante circolazione idrica sotterranea, su entrambi i versanti, la risalita di fluidi nel centro della piana potrebbe essere giustificata dall'esistenza di un gradiente idraulico che darebbe origine ad emergenze anche all'interno dei depositi alluvionali. Alla luce dei risultati ottenuti l'area compresa tra le Terme di Cotilia e la destra idrografica del fiume Velino può essere indicata come una zona potenzialmente interessata da nuovi sprofondamenti.

INTRODUZIONE

Il fenomeno dei sinkholes è riconosciuto in diverse parti del mondo, ed è identificato come una calamità naturale scarsamente prevedibile. Più specificatamente, i sinkholes sono delle depressioni morfologiche circolari o ellittiche, generalmente rinvenibili in zone carsiche, che in superficie presentano un drenaggio radiale centripeto ed in profondità

hanno una classica terminazione ad imbuto. In Italia, escludendo i classici fenomeni carsici, i principali dissesti dovuti a sinkhole sono individuabili lungo la fascia tirrenica, nelle zone di distensione tettonico-strutturale, dalla Toscana alla Campania.

In particolare, i fenomeni studiati nell'Appennino centrale si sono verificati in scenari geologici che mostrano caratteristiche comuni, quali la presenza di acquiferi imprigionati, la presenza di un substrato posto a notevole profondità (> 100 m) e sormontato da depositi incoerenti, e la presenza di faglie e/o fratture vie preferenziali di risalita per fluidi di origine profonda arricchiti in specie gassose, come CO₂, He, Rn (FACCENNA, 1993; CIOTOLI et alii, 2001; BERTI et alii, 2002; SALVATI & SASOWSKY 2002; BEAUBIEN et alii, 2003; NISIO, 2003). Proprio le interazioni acqua-gas-roccia sembrerebbero alla base dell'innescò di sinkhole attraverso un processo di erosione e di dissoluzione dal basso verso l'alto noto col nome di suffosione (angl. piping). Tale meccanismo di dissoluzione chimica è frequente nelle zone caratterizzate dalla presenza di fluidi termali ed emanazioni gassose anche di elevata intensità. In queste aree la presenza di fluidi aggressivi ricchi in CO₂ e H₂S facilita la dissoluzione sia del substrato calcareo sia della componente calcarea dei sedimenti di copertura, soprattutto in corrispondenza delle superfici di frattura. Si originano così delle cavità che possono successivamente migrare verso l'alto originando dissesti e crolli improvvisi. In questo scenario geologico una qualunque variazione di pressione nell'acquifero del substrato, provocata ad esempio da un terremoto (anche di bassa magnitudo), può provocare il crollo della volta delle cavità ipogee.

Questo lavoro presenta la sintesi di una serie di studi geologici, geomorfologici e geochimici effettuati nella Piana di S. Vittorino (Rieti) ed iniziati nel 1997 nell'ambito di un progetto di ricerca tra la Regione Lazio ed il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli studi di Roma "La Sapienza". La Piana di S. Vittorino, ubicata nella media Valle del F. Velino (Lazio nord-orientale), è stata scelta sulla base di alcune caratteristiche geologiche, idrogeologiche e geochimiche peculiari tra le quali assumono particolare rilievo:

- il contesto geologico-strutturale che ipotizza all'interno della piana la presenza di un elemento tettonico di importanza regionale (la faglia di Fiamignano-Micciani);
- la presenza di un'abbondante e complessa circolazione idrica sotterranea complicata da opere idrauliche di contenimento del fiume Velino ed opere di captazione delle sorgenti;
- la presenza di sorgenti mineralizzate (Terme di Cotilia), caratterizzate da una forte componente gassosa, ed emanazioni di gas anidre;
- un numero elevato di sprofondamenti che in alcuni casi ospitano piccoli invasi circolari.

L'obiettivo generale della ricerca è stato lo studio delle relazioni tra la tettonica, la presenza di emanazioni di gas anidre, e l'influenza della distribuzione dei gas sulla chimica delle acque che circolano nella piana al fine di migliorare le conoscenze sull'origine dei fenomeni di sprofondamento in termini di interazione acqua-gas-roccia. L'obiettivo principale è volto soprattutto alla prevenzione del rischio nella piana, visto il frequente verificarsi di tali fenomeni negli ultimi 20 anni.

A tale scopo la ricerca ha previsto le seguenti indagini:

- un'indagine geologico-strutturale e geomorfologica per lo studio delle condizioni al contorno;
- una prospezione di dettaglio dei gas del suolo finalizzata all'individuazione degli elementi tettonici, vie preferenziali di risalita di fluidi (acqua e/o gas), ed alla delimitazione delle aree caratterizzate da concentrazione anomala di gas;
- una prospezione idrogeochimica per la caratterizzazione delle acque superficiali e del sottosuolo, che ha previsto il campionamento di sorgenti, pozzi e, laddove presente, il prelievo e l'analisi della fase gassosa (libera);
- l'installazione di una stazione di monitoraggio in continuo di parametri geofisici e geochimici in una delle aree evidenziate come potenzialmente a rischio.

L'elaborazione statistica e grafica dei dati ha permesso la restituzione cartografica dei dati geochimici, insieme alle altre informazioni geologiche e territoriali disponibili, organizzati in un sistema informativo geografico (continuamente aggiornabile) per l'elaborazione di mappe di rischio.

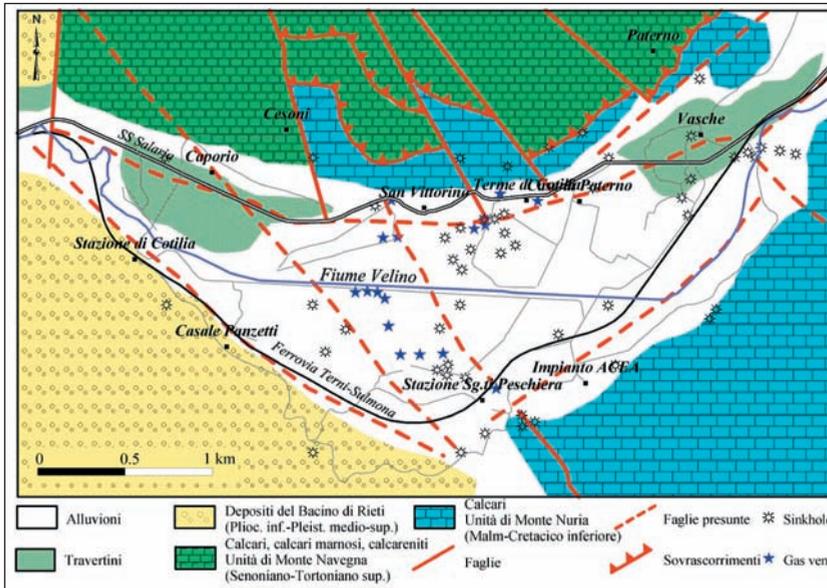


Figura 1 - Schema geologico-strutturale della Piana di San Vittorino (RI). La figura mostra l'ubicazione dei punti di collasso (sinkhole), delle sorgenti, delle sorgenti termali e dei gas vents.

1. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELLA PIANA DI S.VITTORINO

La piana di S. Vittorino è una tipica conca intermontana dell'Appennino situata a quote comprese tra 400 e 420 m; essa presenta una particolare forma triangolare con apice rivolto a sud ed è attraversata al centro dal F. Velino (Fig. 1). La piana è bordata a nord dalla successione carbonatica e silico-clastica dei Monti Reatini, e a sud dalle successioni carbonatiche di piattaforma del M.^{te} Nuria e dai depositi fluvio-lacustri del bacino di Rieti, trasgressivi su un substrato torbiditico, della dorsale di M.^{te} Calciariola (CENTAMORE & NISIO, 1999; 2000; 2002 a, b; CENTAMORE et alii, 1999). La piana è colmata da depositi fluvio-lacustri del Pleistocene Superiore-Olocene a differente granulometria, costituiti per la maggior parte da limi (60%), argille (20%), sabbie (10%); localmente e verso il centro della piana si rivengono lenti di ghiaie e travertini (incoerenti) di vario spessore. Anche lungo i versanti della piana sono presenti lembi di travertini, di depositi terrazzati e di conoide del Pleistocene medio.

La piana di San Vittorino è bordata da elementi tettonici distensivi e/o transtensivi che ne hanno condizionato la morfologia (FACCENNA et alii, 1993; CENTAMORE & NISIO, 1999; 2002, 2003). Il più importante di questi elementi è la faglia Fiamignano-Micciani, una dislocazione di importanza regionale a direzione NW-SE ed immergente verso SW.

Dal punto di vista idrogeologico la Piana di San Vittorino costituisce il luogo di recapito della circolazione idrica dei versanti limitrofi (BONI et alii, 1995, DALL'AGLIO & CAMPANILE, 1996, CIOTOLI et alii, 1998, 2001; BIGI et alii, 1999; COLOMBI et alii, 2001; CAPELLI et alii, 2000, 2001) e, soprattutto, del sistema idrogeologico dei Monti Giano, Nuria e Velino. In questa zona le sorgenti presenti sono distribuite lungo i margini settentrionale e

meridionale della pianura ed hanno un carattere prevalentemente puntuale a costituire fronti di deflusso emergenti per trabocco. Le portate emergenti sui lati opposti della piana sono molto differenti tra loro: circa 2000 l/s per il bordo settentrionale rispetto ai circa 18000 l/s complessivi di quello meridionale (Sorgenti del Peschiera; VERRI 1886). Alcune sorgenti puntuali sono poi presenti anche all'interno della piana con portate modeste (stimate tra 0.1 e 2 l/s), poste in corrispondenza dei sinkholes.

2. METODOLOGIE DI INDAGINE, CAMPIONAMENTO ED ANALISI

2.1. Indagini geologico-strutturali e geomorfologiche

Nella Piana di S.Vittorino è stato condotto un rilevamento geologico-strutturale con l'obiettivo di caratterizzare le formazioni affioranti e delineare le principali strutture tettoniche (Fig. 1). Tale indagine ha permesso di ricostruire il complesso assetto tettonico dell'area localizzata al contatto tra due differenti domini paleogeografici: dominio di piattaforma e dominio di bacino. Le strutture tettoniche pre-quadernarie, la successiva tettonica estensionale, unitamente alle variazioni climatiche e, per una certa misura il vulcanesimo (cui sono legate le manifestazioni idrotermali e le anomalie di gas), hanno controllato l'evoluzione geomorfologica del paesaggio. L'analisi delle fotografie aeree ha permesso il riconoscimento delle tipiche morfologie legate alla presenza di sinkholes e dei processi che hanno modificato il paesaggio circostante. Il rilevamento dei dati in campagna ha permesso di confrontare ed integrare la fotointerpretazione.

2.2. Indagini geochemiche

2.2.1. Gas del suolo

La prospezione dei gas del suolo consiste nella raccolta e nell'analisi di campioni di gas dalla zona non satura al fine di determinarne la composizione. Il campionamento si basa su una metodologia proposta negli anni '70 dall'U.S. Geological Survey del Colorado (ROBERTS et alii, 1975; BRADY & RICE, 1977) e successivamente sviluppata presso il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Roma "La Sapienza" (ANNUNZIATELLI et alii, 2003; BEAUBIEN et alii, 2003; ASTORRI et alii, 2001; CIOTOLI et alii, 1998; CIOTOLI, 1997; LOMBARDI et alii, 1996; CIOTOLI et alii, 1993;1994; LOMBARDI et alii, 1984). Il gas presente nei pori interstiziali del suolo viene raccolto per mezzo di una sonda portatile in acciaio ad una profondità di circa 60 cm mediante una siringa in plastica da 50 cc. La profondità di infissione della sonda di campionamento è determinata principalmente da due fattori: la profondità della frangia capillare e la profondità fino a cui si risente dell'influenza dell'aria atmosferica (HINKLE, 1990). Le analisi hanno riguardato le seguenti specie gassose: ^{222}Rn , ^4He , CO_2 , N_2 , O_2 , idrocarburi gassosi (C_1 - C_4). Il radon è stato analizzato direttamente in situ mediante un contatore a scintillazione (EDA RD 200) dotato di cella di Lucas. Tutte le altre specie gassose sono state analizzate in laboratorio mediante gascromatografia (Carlo Erba GC8000), ad eccezione dell'elio che è stato analizzato con uno spettrometro di massa tarato per la sola massa 4 (mod. Varian Helium Leak Detector 938-41).

2.2.2. Acque del sottosuolo

Sulla base delle informazioni ottenute da studi idrogeologici precedenti sono stati selezionati e campionati 43 punti d'acqua (Fig. 2) a differente tipologia (sorgenti, sorgenti mineralizzate, laghetti di sprofondamento, pozzi) al fine sia di caratterizzare geochemicamente la circolazione idrica della piana, sia di evidenziare eventuali relazioni tra le anomalie di concentrazione di alcuni elementi e la presenza dei fenomeni di sprofondamen-

to. Sui campioni di acqua sono state effettuate le seguenti analisi: misura di parametri chimico-fisici in situ (Eh, pH, temperatura, conducibilità ed ossigeno disciolto) mediante una unità multiparametrica (MultiLine P4, WTW s.r.l.); analisi degli elementi maggiori, anioni (Cl^- , F^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) e cationi (Li^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ e Sr^{2+}) mediante un cromatografo ionico CX-500 (Dionex Ltd.). La concentrazione dei bicarbonati (HCO_3^-) è stata determinata in situ mediante titolazione con il metodo del metil-arancio; analisi degli elementi in traccia mediante un'accurata procedura mirata a minimizzare le possibilità di contaminazione del campione. I campioni sono stati prelevati tramite un sistema sotto vuoto per il filtraggio dell'acqua che ha impedito il contatto tra l'acqua e materiali diversi dal FEP teflon (materiale altamente inerte). Gli elementi in traccia sono stati analizzati mediante uno spettrometro di massa al plasma (Plasma-Quad Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer, VG Elemental).

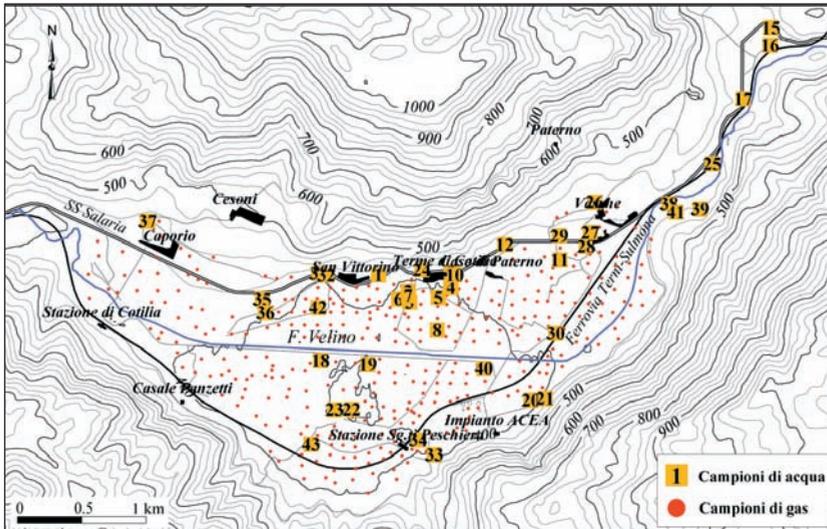


Figura 2. Ubicazione dei punti di campionamento relativi alla prospezione di dettaglio dei gas nel suolo (284 campioni con una densità di circa 60 camp/kmq) e al campionamento delle acque effettuato nell'ambito della prospezione idrogeochimica.

2.2.3. Gas liberi e gas disciolti e analisi isotopiche

Alcune delle sorgenti, dei pozzi e dei sinkholes campionati presentano fenomeni di gorgogliamento per la presenza di una abbondante fase gassosa libera spesso non correlabile all'attività biologica. Il prelievo della fase gassosa libera è stato effettuato con il metodo dell'imbutto rovesciato. I campioni sono stati analizzati in laboratorio per le stesse specie considerate per i gas del suolo. Soltanto l'idrogeno solforato, gas altamente instabile, è stato analizzato direttamente in situ mediante gascromatografia (MicroGC). Sui campioni di gas sono state eseguite anche le analisi isotopiche di ^{13}C e ^{18}O con uno spettrometro di massa in fase gassosa Mat 250 a doppio sistema di immissione (IRMS-dual inlet system). Le tecniche di preparazione relative ai campioni in oggetto sono di tipo criogenico su linea da vuoto per quanto riguarda la separazione del metano dalla CO_2 e dall'acqua eventualmente presente. La CO_2 così ottenuta è stata analizzata direttamente relativamente alle masse 44, 45, 46, fornendo i rapporti isotopici di ^{13}C e ^{18}O vs VPDB (PeeDee Belemnite) di ogni campione.

Laddove sono state riscontrate evidenze di elevate concentrazioni di gas liberi sono stati prelevati anche campioni d'acqua per le analisi dei gas disciolti. I campioni sono stati conservati in contenitori di vetro cilindrici da 500 ml lunghi 30 cm, muniti di val-

vole di chiusura su entrambi i lati, e mantenuti ad una temperatura di 4°C fino al momento dell'analisi. L'estrazione dei gas dai campioni d'acqua è stata eseguita usando una linea da vuoto in vetro.

3. RISULTATI

3.1. Indagini geologico-strutturali e geomorfologiche

Nell'area studiata gli elementi distensivi e/o transtensivi che hanno maggiormente condizionato l'assetto morfostrutturale della zona sono: la faglia Fiamignano-Micciani ed i sistemi di faglie, E-O e NO-SE, che hanno guidato la formazione della depressione tettonica di S. Vittorino.

La faglia Fiamignano-Micciani è una dislocazione di importanza regionale a direzione NO-SE ed immergente verso SO con inclinazione media di 45°. Essa si segue per chilometri al di fuori dell'area studiata; continua più a nord lungo il versante occidentale del gruppo montuoso del Terminillo. Al contrario, il segmento che attraversa la Piana di S. Vittorino non è facilmente individuabile sul terreno, e sembra coincidere con l'allineamento Micciani - S. Vittorino (FACCENNA et alii, 1993; CIOTOLI et alii, 1998; 2001). Le altre dislocazioni distensive possono essere raggruppate in diversi sistemi principali che mostrano alcune caratteristiche ricorrenti in tutta l'area in esame: una elevata dispersione azimutale delle strutture (nell'ordine NO-SE, E-O, NE-SO, N-S); una diversa componente orizzontale del rigetto (minima lungo i sistemi appenninici e massima sugli altri); un'attività polifasica (principalmente dei sistemi appenninici ed antiappenninici). Nella Piana di S. Vittorino è difficile riconoscere le tracce di queste dislocazioni, se non ai piedi del versante di M.^{te} Paterno; tuttavia, analizzando i dati gravimetrici e gli allineamenti di sinkholes, l'andamento delle anomalie dei gas nel suolo e la localizzazione delle sorgenti minerali, si può ipotizzare un graduale ribassamento dei blocchi verso SE e S da parte di sistemi di faglie NE-SO tra Vasche e Case Paterno, E-O tra Case di Paterno e S. Vittorino, e verso NE da parte di sistemi NO-SE (FACCENNA et alii, 1993; CIOTOLI et alii, 2001).

Il quadro morfostrutturale che si è delineato per effetto della tettonica distensiva quaternaria è caratterizzato dalla suddivisione in blocchi a movimenti verticali differenziati, separati da faglie dirette o transtensive. In questo contesto, in base ai dati geologici e geomorfologici, il blocco di Colle Impicciavera, delimitato dalla faglia Fiamignano-Micciani e dalla faglia a direzione NE-SO lungo il Velino, e il blocco di Prato Miccio-Colle Riofagio, delimitato dalla faglia NE-SO tra le Terme di Cotilia e Canetra, e dalla faglia NO-SE tra le Terme di Cotilia e la Montagna dei Cesoni, risultano i blocchi più sollevati, mentre i settori di Micciani e Cittaducale sono più ribassati; ancora più ribassato è poi il blocco di Calciariola, mentre la Conca di S. Vittorino rappresenta il settore complessivamente più depresso (Fig. 3).

L'analisi geomorfologica ha messo in evidenza lungo i bordi della piana lembi di depositi terrazzati, ricoperti da travertini disposti in due ordini altimetrici: I° ordine (Pleistocene medio), ad altezze comprese tra i 500 e 420 m (abitati di Canestra e Cittaducale); II° ordine (del Pleistocene medio finale?), a quote comprese tra 450 e 400 m. Ai piedi dei versanti sono presenti detriti e conoidi alluvionali, sia coevi dei depositi terrazzati sia del Pleistocene superiore-Olocene.

La piana di S. Vittorino è, inoltre, caratterizzata dalla presenza di almeno 30 cavità sub-circolari (piping sinkholes; NISIO 2003) che ospitano laghetti e piccole pozze, con presenza di fenomeni di gorgogliamento, e di altri numerosi piccoli sprofondamenti localizzati noti sin dal secolo scorso (TENORE 1872; MORI, 1938; RICCARDI 1951; MARINELLI,

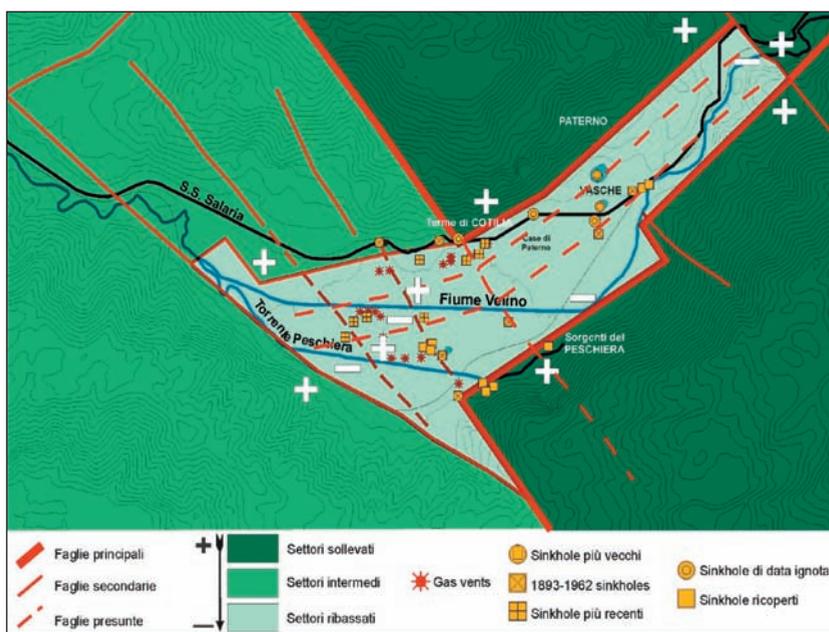


Figura 3. Schema morfotettonico della Piana di Sa Vittorino. La caratteristica forma triangolare con apice rivolto verso il basso, deve la sua geometria alla presenza di importanti elementi strutturali, tra i quali ha un particolare rilievo la faglia di Micciani-Fiamignano. Unitamente a tale importante elemento tettonico, ha agito una faglia diretta bordiera, ad andamento circa E-O, che interessa il versante settentrionale della Piana. Lungo tale faglia si allineano le più importanti sorgenti mineralizzate (Vasche, Cotilia, Chiesa di S. Vittorino). L'interazione di tali sistemi di faglie determina un mosaico a blocchi con movimenti differenziati. L'area più ribassata in tale schema risulterebbe la parte sud occidentale della porzione centrale della Piana.

1995). I sinkholes sono concentrati nella zona centro-orientale della piana tra gli abitati di S. Vittorino e di Vasche, e sono allineati secondo una direzione principale NO-SE nella fascia compresa tra le sorgenti del Peschiera-Micciani e Terme di Cotilia-S. Vittorino. Tale area coincide in parte con il prolungamento settentrionale della faglia Fiamignano-Micciani, ad ovest della quale non si evidenziano più i fenomeni di sprofondamento (FACCENNA et alii, 1993; NOLASCO, 1986, 1998; CENTAMORE et alii, 1999; CIOTOLI et alii, 2001, BERSANI & CASTELLANO 2002; CENTAMORE & NISIO, 2002, 2003; Nisio, 2003). Il primo sprofondamento è avvenuto nel 1703 in seguito ad una scossa sismica e riguarda la Chiesa di S. Vittorino. Altri 5 sprofondamenti delle dimensioni variabili da 15 a circa 200 m di diametro e profondità da pochi metri ad un massimo di 45 m (tra cui il Lago di Mezzo) sono avvenuti tra il 1700 e il 1850 (MORI, 1938; RICCARDI, 1951; BERSANI & CASTELLANO, 2002 CAPELLI et alii, 2000). Neoformazioni o allargamenti si sono avute in occasioni di sismi, come avvenne per il Pozzo Gustavo formatosi in occasione del terremoto di Avezzano nel 1915. Nel 1986 in località Sciamargutta si aprono 3 voragini con diametri da 5 a 60 m e profondità di una decina di metri (NOLASCO, 1986; CATENACCI, 1992). I sinkholes, formati negli anni novanta, presentano solo pochi metri di diametro, l'ultimo si è aperto nel settembre 2003 (Fig. 4).

Come accennato nell'introduzione l'origine dei sinkholes nella Piana di S. Vittorino è da ricercarsi in cause predisponenti ed innescanti; nella piana si possono comunque differenziare due differenti genesi. Le cavità che giacciono direttamente o quasi direttamente sul substrato litoide, o sui travertini (Lago di Paterno, Pozzo di mezzo) corri-



Figura 4. Sinkhole recente (settembre 2003) ubicato nei pressi delle Terme di Cotilia al km 101,200 della SS Salaria. Tale sinkhole si è formato in corrispondenza di una zona caratterizzata da elevate anomalie di CO_2 , CH_4 e He. Come in tutti gli altri fenomeni recenti, anche questo presenta una abbondante fase gassosa libera.

spondono a fenomeni molto antichi di genesi incerta. (anche se lo spessore consistente di depositi continentali al di sopra del substrato 55 m nel caso di Paterno fa sì che la loro origine potrebbe essere dovuta a fenomeni di erosione dal basso suffusione). Per gli altri casi di cavità posti sul versante di M.te Paterno (canetre) si tratta di "doline di crollo" (collapse doline).

I fenomeni presenti nella piana, invece, possono essere attribuiti senza dubbio a sinkhole in senso stretto (o piping sinkholes). Tra questi ultimi, la genesi di alcuni, potrebbe essere facilitata anche dalla dissoluzione di orizzonti di travertino, con spessori non superiori a 10 m, presenti nelle alluvioni (BERSANI & CASTELLANO, 2002, CAPELLI et alii, 2000). In alcuni sondaggi al centro della piana i travertini hanno mostrato una scarsa potenza e una natura terrosa (tipo sabbioni). Di conseguenza la presenza dei soli travertini, forse non continui in profondità in tutta la piana, non basta a spiegare la genesi di tutti i casi, ma l'origine è da ricercare a profondità maggiori nel substrato (oltre i 100 m).

Gas	N	Media	Mediana	Min	Max	Q1	Q3	Dev.St.
Rn (Bq/L)	284	15.70	8.88	0.1	95.46	2.96	20.72	18.91
He (ppb)	283	518.06	-48.00	-1589	80000.00	-232.00	0.00	5521.16
CH4 (%)	284	183.86	2.06	0.01	19396.14	1.29	2.85	1462.29
Etano (ppm)	284	0.09	0.01	0	13.40	0.00	0.03	0.81
Propano (ppm)	284	0.64	0.08	0	62.07	0.00	0.34	4.08
CO2 (ppm)	284	1.98	0.85	0.04	69.40	0.36	1.85	5.96
O2 (%)	284	20.74	21.41	3.95	24.76	20.27	22.02	2.44
N2 (%)	284	76.87	77.58	21.36	87.12	76.19	78.78	5.47

Tabella I. Principali parametri statistici relativi alla prospezione di dettaglio effettuata su tutta la piana di S. Vittorino.

3.2. Prospezione dei gas nel suolo

Nella Piana di San Vittorino è stata condotta una prospezione di dettaglio dei gas del suolo con l'obiettivo di individuare la presenza di elementi tettonici sepolti (Faglia di Micciani) al di sotto della coltre alluvionale. Poiché i processi di migrazione dei gas nella crosta avvengono per meccanismi di tipo avvertivo lungo le discontinuità tettoniche, lo

studio della distribuzione superficiale di alcune specie di origine endogena (CO_2 , CH_4 , He, Rn) permette sia di individuare le principali vie di risalita (faglie e fratture) sia di approfondire il ruolo svolto dalle discontinuità stesse nel condizionare i fenomeni di interazione acqua-gas-roccia. La prospezione dei gas del suolo è stata eseguita su un'area di circa 5 kmq ed ha previsto il prelievo di 284 campioni di gas con una densità di circa 60 camp/kmq; la tabella I riporta i principali parametri statistici ed il valore della soglia di anomalia ottenuto dall'analisi dei grafici di probabilità cumulata (GPC). L'elaborazione geostatistica dei dati ha permesso di elaborare mappe ad isolinee di concentrazione utilizzando il metodo di kriging come algoritmo per la stima delle concentrazioni di radon, anidride carbonica, metano e elio nelle zone non coperte dal campionamento (Figg. 5a,b,c,d).

Nel settore occidentale della piana da Ortali fino all'abitato di Caporio è evidente una diffusa zona di anomalia caratterizzata da valori di radon superiori a 80 Bq/L. In questa zona le indagini geologiche hanno messo in evidenza sia la presenza di un substrato carbonatico più superficiale, sia la presenza di una serie di placche di travertino sede di una intensa circolazione di fluidi che favorisce il rapido movimento di radionuclidi (^{238}U , ^{226}Ra) e, pertanto, di specie gassose a breve vita come il radon. Altre zone caratterizzate da anomalie diffuse di radon sono presenti nell'area dell'abitato di Vasche a nord-est della piana, sempre in corrispondenza di placche di travertino. Nel settore centrale della piana le concentrazioni di radon sono mediamente più basse (40-60 Bq/L) e le anomalie interessano una fascia centrale da Micciani-Stazione Sorgenti del Peschiera a sud a Chiesa di S. Vittorino-Terme di Cotilia a nord congruente il prolungamento della faglia di Micciani (CIOTOLI et alii, 2001; NOLASCO, 1998) (Fig. 5a).

Il comportamento dell'anidride carbonica segue con buona approssimazione quello del radon (Fig. 5b). Tale situazione è nota in letteratura poiché l'anidride carbonica, essendo una specie gassosa più abbondante rispetto ai gas in tracce, può costituire una fase propria capace di migrare velocemente verso la superficie agendo come gas di trasporto per le specie in tracce come il radon e l'elio (CIOTOLI et alii, 1998; LOMBARDI et alii, 1996; ETIOPE, 1995). Le concentrazioni di CO_2 più elevate (fino a 50%) sono state riscontrate nell'area delle Terme di Cotilia (a nord) e in località Tornariccio-Piano dei Micciani (a sud).

Come riportato nella tabella I anche il metano e l'elio mostrano concentrazioni elevate che, in alcuni casi, sono confrontabili con i valori misurati in aree caratterizzate dalla presenza di giacimenti di idrocarburi, o di aree vulcaniche attive. La presenza di elevate concentrazioni di queste due specie gassose interessa principalmente il settore centrale della piana (Fig. 5c,d). In particolare le anomalie maggiori (superiori a 10 ppm per il metano e a 150 ppb per l'elio) sono localizzate nei pressi delle Terme di Cotilia, a nord, tra la località Tornariccio e la ferrovia Terni-Sulmona verso est, e in corrispondenza delle sorgenti del Peschiera lungo il versante sud orientale della piana.

3.3. Analisi della fase gassosa libera e dei gas disciolti

In generale tutti i campioni prelevati mostrano un forte arricchimento in CO_2 , e sono impoveriti in O_2 (Tab. II). I dati relativi alla concentrazione di H_2S sono parziali, sebbene questo gas sia presente nell'area indagata (caratteristico odore di "uova marce") soprattutto nei campioni 6 e 10 caratterizzati da un'abbondante fase gassosa libera. La mappa di distribuzione della CO_2 sia nella fase gassosa libera che disciolta indica che i campioni anomali sono localizzati nell'area delle Terme di Cotilia, mentre campioni caratterizzati da concentrazioni moderatamente elevate sono localizzati a SO verso il centro della piana (Fig. 6). La distribuzione di questi campioni è congruente sia con la distribuzione delle anomalie dei gas nel suolo sia con la distribuzione dei campioni d'acqua a chimismo anomalo (vedi paragrafo seguente).

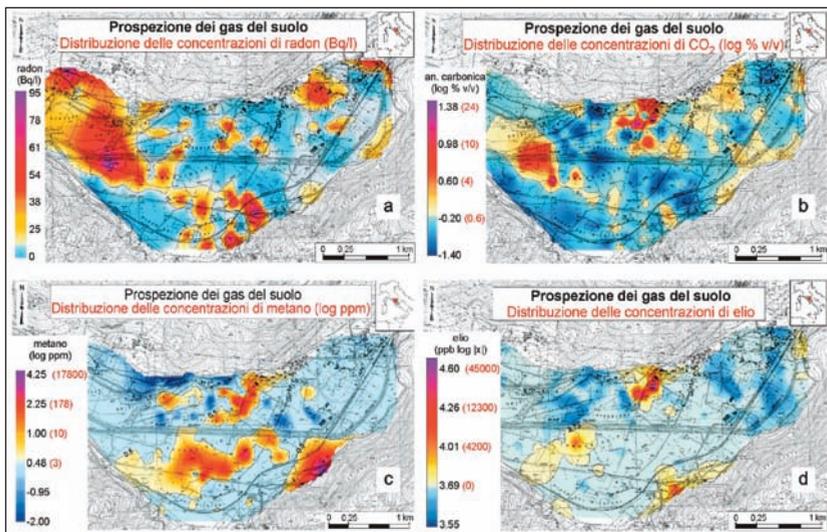


Figura 5. Mappe di distribuzione delle concentrazioni nei gas del suolo di ^{222}Rn (a), CO_2 (b), CH_4 (c) e DHe (d).

N	CH4	C2H4	C2H6	C3H8	C4H10	COS	H2S	SO2	He	CO2	O2	N2
6	388	0.00	234	60.6	1.9	1.6	45	0.5	20	85.0	1.0	7.4
10	760	0.35	634	59.0	0.8	1.6	147	0.4	55	83.0	1.3	9.5
22	198	0.22	9	41.0	0.0	0.3	-	0.0	309	62.5	0.9	32.8
23	177	0.02	8	9.0	0.0	0.0	-	0.0	132	72.0	1.4	17.8
Concentrazione dei gas disciolti in alcuni dei campioni di acqua prelevati (litri di gas a temperatura e pressione standard in 1 litro d'acqua, i.e. l/l).												
N	CH4	He	CO2	O2	N2							
6	8.1E-05	6.5E-06	0.79	0.02	0.08							
10	3.3E-06	1.4E-06	0.32	0.04	0.16							
18	8.4E-06	7.8E-07	0.62	0.03	0.12							
22	1.5E-05	7.7E-06	0.37	0.08	0.30							
23	2.1E-06	1.4E-06	0.36	0.05	0.18							
solubilità at 10° C	4.3E-02	8.9E-03	1.22	0.04	0.02							
solubilità at 20° C	3.4E-02	8.7E-03	0.91	0.03	0.02							

Tabella II. Composizione delle fase gassosa libera di alcune delle sorgenti campionate. Le specie gassose maggiori (CO_2 , O_2 e N_2) sono espresse in percentuale, le altre in ppm.

Sebbene l'ipotesi più accreditata sull'origine della CO_2 sia quella della degradazione termica dei carbonati in profondità, esistono altre possibilità che includono un'origine magmatica e/o primordiale. L'associazione delle elevate concentrazioni di CO_2 con elevate concentrazioni di He e di CH_4 , nonché le analisi isotopiche del C, hanno fornito indicazioni più precise sull'origine almeno di parte della CO_2 presente nella piana per la quale non si può escludere un'origine parte primordiale (magmatica). La correlazione negativa tra He e CO_2 nel grafico di figura 7 gioca a favore di un'origine comune (termometamorfismo?) per la CO_2 , gli idrocarburi gassosi e i solfuri gassosi, mentre tende a confermare l'ipotesi di una sorgente più profonda (primordiale?) per l'elio. La presenza di basse concentrazioni di O_2 ed elevate concentrazioni di N_2 permette, inoltre, di ipotizzare un fenomeno di mixing con le acque meteoriche, più esposte alla contaminazione con l'aria atmosferica. Per quanto riguarda il contenuto in H_2S è possibile usare come

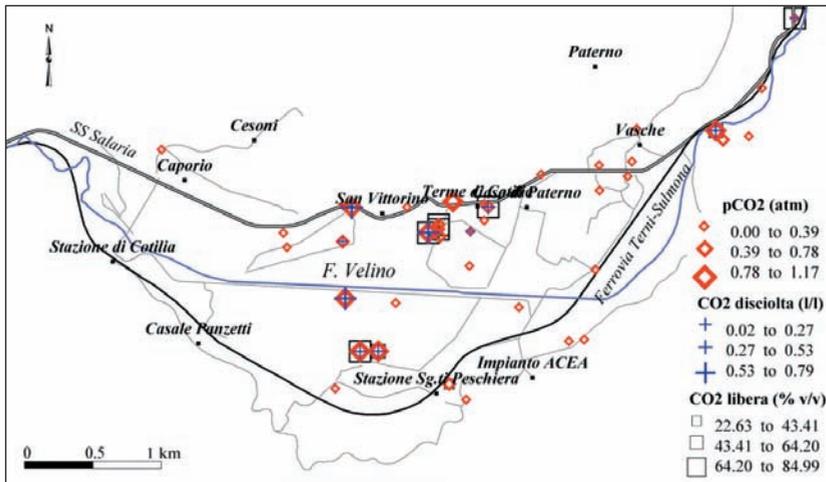


Figura 6 - Mappa a classi di valori relativa alla distribuzione delle concentrazioni di CO₂ libera nei campioni d'acqua prelevati nella Piana di S. Vittorino. La mappa mostra come le concentrazioni più elevate sono localizzate nella zona centrale presso le Terme di Cotilia, in loc. Tornariccio e presso la chiesa di S. Vittorino.

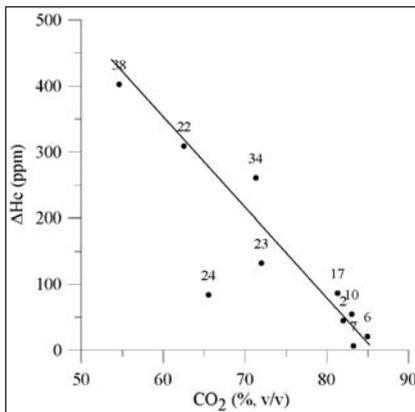


Figura 7 - Grafico a dispersione DHe-CO₂ nella fase gassosa libera di alcune emergenze. La figura mostra una correlazione inversa (osservabile anche fra He e COS) che permette di ipotizzare una differente sorgente per le due specie gassose.

ed H₂S. Al contrario, le concentrazioni di CH₄ e He nei gas disciolti sono molto lontane dal limite di saturazione di questi gas.

3.4. Prospezione idrogeochimica

Per brevità sono riportati in tabella solo i dati relativi ai principali parametri statistici delle analisi effettuate (Tab. III). Sulla base della composizione media desunta dalla tabella statistica, tutte le acque analizzate sembrano appartenere al gruppo delle bicarbonato-calciche e pertanto potrebbero avere un'origine comune, anche alla luce delle piccole dimensioni e delle caratteristiche geologiche omogenee della piana. Tuttavia, la

indicatori i suoi prodotti di ossidazione (COS ed SO₂); infatti tutti i campioni che presentano valori elevati di COS sono localizzati nell'area delle Terme di Cotilia.

La tabella II riporta i risultati relativi al contenuto in gas disciolti per 12 campioni di acqua, e il valore della solubilità dei gas a 10° e 20° C. Come si può vedere dalla tabella, le concentrazioni più elevate di CO₂ sono molto vicine al limite di solubilità del gas indicando che i campioni d'acqua sono saturi in gas. La figura 8 mostra in generale una buona correlazione diretta di calcio e solfati con l'anidride carbonica disciolta. Tale correlazione indica che le concentrazioni anomale di Ca²⁺ e SO₄²⁻ sono il risultato di una diminuzione del pH originata dalla presenza di specie gassose di origine profonda come CO₂

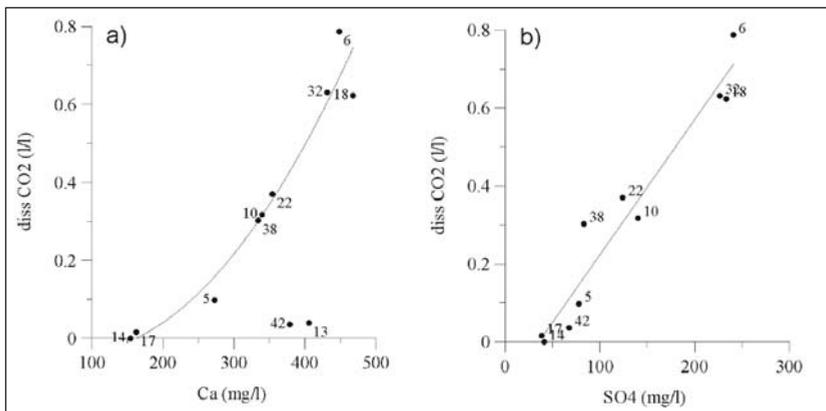


Figura 8. Diagrammi Ca-CO₂ disciolta (a) e SO₄-CO₂ disciolta (b). La figura mostra in generale una buona correlazione diretta di calcio e solfati con l'anidride carbonica disciolta. Tale correlazione indica che le concentrazioni anomale di Ca e SO₄ sono il risultato di un aumento della solubilità dovuto a una diminuzione del pH per la presenza di specie gassose di origine profonda come CO₂ ed H₂S.

	Id	Min	Max	Media	Dev.St.	Coeff.Dev.	Var%
Misure in situ	pH	6.08	7.97	6.53	6.60	101.07	24
	T(°C)	10.80	21.00	13.31	2.05	15.40	49
	Cond (µS/cm)	605	2820	1327	576	43	79
	Eh (mV)	-385.00	337.00	108.63	222.12	204.48	214
	O ₂ (mg/l)	0.11	13.22	5.01	3.35	66.77	99
Ioni maggiori (mg/l)	Mg ²⁺	17.34	88.50	35.35	18.24	51.61	80
	NO ₃ ⁻	0.07	15.66	1.87	2.72	145.47	100
	NH ₄ ⁺	0.03	15.23	1.83	4.05	221.31	100
	Cl ⁻	3.50	36.53	10.35	8.78	84.80	90
	Na ⁺	2.42	26.52	7.57	6.06	80.09	91
	Li ⁺	0.00	0.16	0.03	0.04	121.04	100
	SO ₄ ²⁻	9.86	240.82	76.89	66.46	86.43	96
	K ⁺	0.06	5.26	1.68	1.11	65.87	99
Elementi in traccia (ppb)	HCO ₃ ⁻	360.00	2061.80	886.94	427.37	48.19	83
	CA ₂ ⁺	89.20	551.00	242.47	122.17	50.39	84
	Rb	0.00	0.02	0.00	0.00	74.08	91
	Sr	0.23	2.90	0.87	0.63	71.94	92
	Ba	0.02	0.22	0.04	0.03	69.10	92
	Pd	0.00	0.01	0.00	0.00	59.49	92
	Zr	0.00	0.00	0.00	0.00	91.17	95
	Br	0.11	0.65	0.26	0.12	45.77	84
	Mo	0.00	0.00	0.00	0.00	57.59	97
	I	0.01	0.64	0.09	0.12	138.15	98
F	0.05	0.49	0.21	0.10	49.45	90	
B	0.04	1.95	0.40	0.41	100.90	98	
Ni	0.01	0.03	0.01	0.01	44.44	81	
Al	0.00	0.16	0.02	0.03	192.77	99	
Mn	0.00	0.71	0.08	0.17	217.33	100	
V	0.00	0.03	0.00	0.00	191.87	100	
U	0.00	0.00	0.00	0.00	66.69	100	

Tabella III. Principali parametrici statistici delle acque campionate.

quantità totale di elementi disciolti mostra un'ampia variabilità evidenziata, ad esempio, dal contenuto in HCO_3^- (da 360 a 2062 mg/l), dalla conduttività (da 605 a 2820 mS/cm) e dal TDS (da 330 a 1843 mg/l). Tale variabilità non può essere giustificata dal potere solvente delle acque di infiltrazione, debolmente acide (la concentrazione media di CO_2 nel suolo è di circa 2%), e suggerisce la presenza di un'altra sorgente di acidità, e quindi la probabile presenza di più sottogruppi di acque. I GPC elaborati per alcuni elementi e/o composti (Ca^{2+} , HCO_3^- , Mg^{2+} e K^+) mostrano la presenza di due o tre popolazioni (gruppo di BG, gruppo anomalo e gruppo di transizione) legate a fenomeni differenti, quali l'origine, il miscelamento, e i meccanismi reattivi e di trasporto. Ad esempio, rappresentando sulla topografia dell'area le classi di valori riconosciute per il Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} e Cl^- (Fig. 9) è possibile osservare l'ubicazione dei campioni anomali in cui la concentrazione degli elementi e/o composti è tale da non giustificare un processo di acidificazione delle acque per cause biologiche. La figura mette in evidenza come le acque prelevate dalle sorgenti a contatto con i rilievi che circondano la piana appartengono alla stessa popolazione (background); al contrario, campioni relativi alle altre popolazioni (campioni anomali e campioni di transizione) sono localizzati principalmente lungo una fascia N-S che attraversa centralmente piana. È interessante notare che tutti i campioni appartenenti al gruppo "anomalo" presentano fenomeni di gorgogliamento con una fase gassosa libera costituita da concentrazioni elevate di CO_2 , CH_4 ed He, e subordinatamente, di etano e propano (Tab. II). In particolare, i campioni 6, 7, 18 e 24, che nei grafici a dispersione appartengono al gruppo più anomalo in assoluto, insieme ai campioni 10, 5, 22 e 23, sono localizzati nella zona a più elevato flusso di gas (fino a 60% di CO_2 , 8000 ppm di CH_4 e 300000 ppb di He nei gas del suolo (Figg. 5b, c, d) tra le Terme di Cotilia e Loc. Tornariccio. Appare, pertanto, evidente che le concentrazioni anomale di Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} (anche K^+ e HCO_3^-) sono il risultato di un aumento del pH originato dalla presenza di specie gassose di origine profonda come CO_2 ed H_2S . Una tale sorgente può considerarsi illimitata, diversa dalla CO_2 presente nei gas del suolo, e come tale permette un continuo apporto di ioni H^+ favorendo la dissoluzione dei minerali carbonatici. Questa ipotesi sembra essere confermata dalla correlazione positiva tra CO_2 disciolta vs Ca^{2+} , SO_4^{2-} (ed anche con pH, HCO_3^- , Mg^+ , K^+) (Fig. 8). In particolare, la buona correlazione tra la CO_2 disciolta e l' SO_4^{2-} rappresenta un'ulteriore indicazione sull'origine dei solfati per ossidazione dell' H_2S trasportato dalla CO_2 , piuttosto che dalla dissoluzione di gessi. È evidente come tali emergenze siano in contatto con un flusso anomalo di gas la cui migrazione verso la superficie è legata alla presenza di elementi strutturali "profondi", come testimoniato dalle elevate concentrazioni di He. Tale ipotesi è supportata anche da un primo tentativo di modellizzazione di speciazione geochimica con PHREEQC dal quale si evince che l'equilibrio con i gessi produrrebbe una variazione del rapporto $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$.

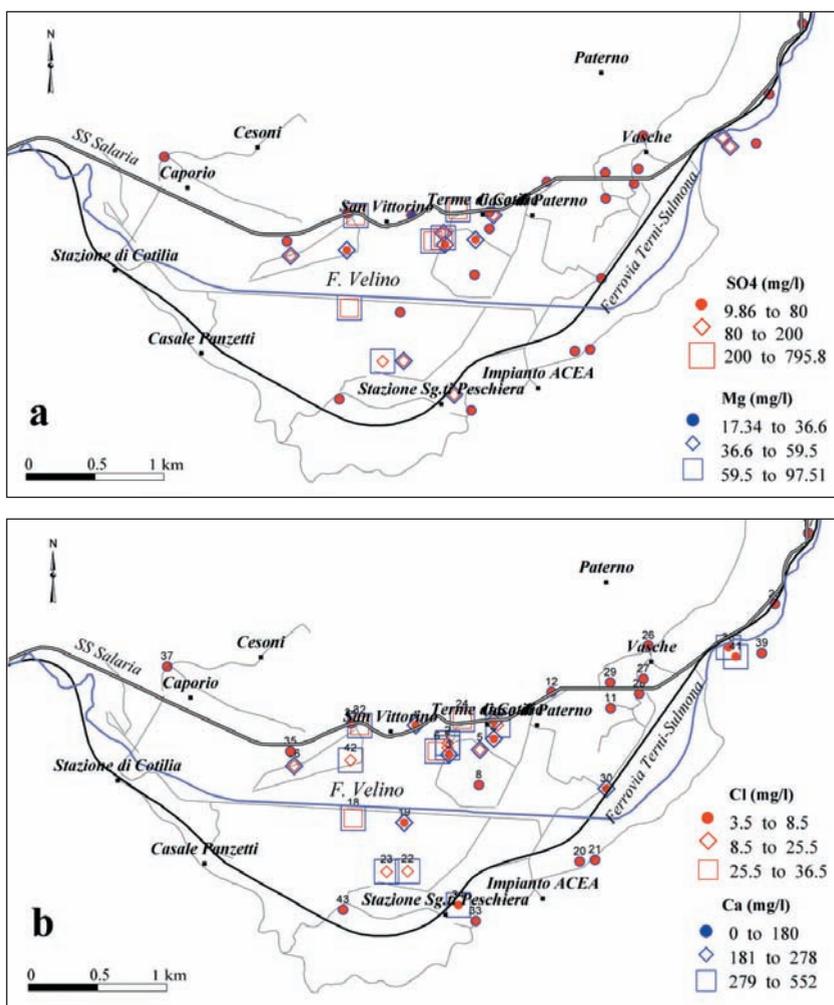


Figura 9. Mappa a classi di valori relative alla distribuzione delle concentrazioni di Mg^{2+} e SO_4^{2-} (a), Ca^{2+} e Cl^- (b) nei campioni d'acqua prelevati nella Piana di S. Vittorino. I simboli nelle mappe sono blu per i cationi e rossi per gli anioni. Le classi di valori sono state selezionate sulla base dei grafici di probabilità cumulata. Per tutte le specie chimiche rappresentate le classi più anomale sono localizzate nel settore centrale e centro-settentrionale della Piana.

Anche il rapporto Ca^{2+}/SO_4^{2-} vs Mg^{2+} conferma la presenza di gruppi differenti di acque (Fig. 10): il gruppo 1, costituito dai campioni con valori bassi di entrambe le specie chimiche (gruppo di background, in verde), mentre gli altri due gruppi mostrano rispettivamente concentrazioni più elevate del Mg (gruppo 2, in rosso) e del rapporto Ca^{2+}/SO_4^{2-} (gruppo 3, in blu). Nella figura è possibile riconoscere i campioni anomali (gruppo 2) e localizzare i campioni degli altri due gruppi uno nel settore nord della piana (gruppo 1, simbolo verde), l'altro nel settore meridionale della piana (gruppo 3, simbolo blu). Nel diagramma Ca^{2+} vs SO_4^{2-} è chiaramente visibile un andamento diverso tra i campioni prelevati nel settore settentrionale, quelli prelevati in quello meridionale e quelli relativi alla zona centrale (4, 19 e 30) (Fig. 11).

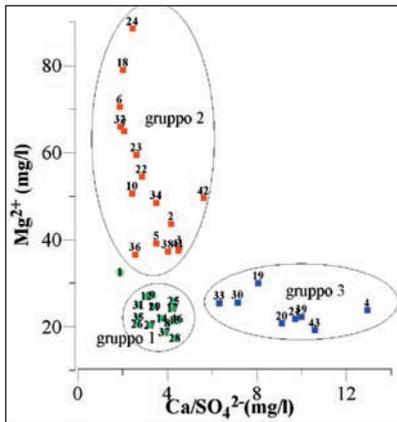


Figura 10 - Diagramma Mg^{2+} vs Ca^{2+}/SO_4^{2-} . Nel grafico l'importanza della produzione di ioni SO_4^{2-} viene messa in evidenza dalla presenza di gruppi differenti di acque. Il gruppo verde è localizzato in basso a sinistra, mentre gli altri due gruppi si presentano più dispersi e mostrano rispettivamente concentrazioni più elevate del Mg (gruppo 2, rosso) e del rapporto Ca^{2+}/SO_4^{2-} (gruppo 3, blu).

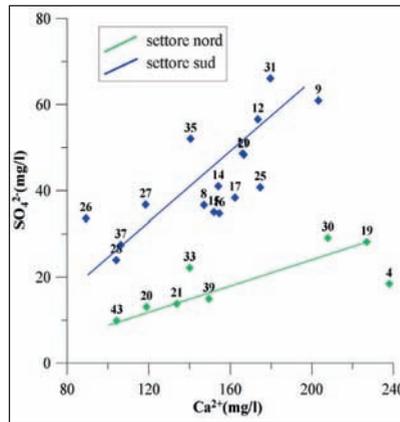


Figura 11 - Il grafico a dispersione SO_4^{2-} vs Ca^{2+} mostra il particolare relativo ai soli campioni appartenenti ai gruppi di acque riconosciuti come gruppo del settore settentrionale e gruppo del settore meridionale. Nel grafico è visibile una differenziazione tra i due gruppi che presentano inoltre, una tendenza diversa verso un aumento dei solfati per il gruppo a nord (blu) e verso un aumento relativo del calcio per i campioni del gruppo a sud.

Tuttavia rimane un gruppo di elementi la cui concentrazione non può essere spiegata dall'aumento locale dell'acidità delle acque; tali elementi includono Cl, Na, Li, Mn, I, Br, F, Al, Rb e lo ione NH_4^+ . In particolare, i diagrammi a dispersione Cl vs Ca^{2+} e Na/Cl vs Cl mostrano l'esistenza di due evidenti trends tra i campioni del settore nord/sud ed i campioni anomali, nei quali il valore della concentrazione del Cl è molto lontana da quella prodotta da eventuali impurità delle rocce carbonatiche o da quella presente nell'acqua piovana (Fig. 12).

I GPC di Cl, Na presentano una distribuzione abbastanza differente da quella del Ca, ciò potrebbe significare una origine diversa per questi due elementi. Tale osservazione permette di formulare l'ipotesi dell'esistenza di un fenomeno di miscelamento delle acque superficiali carbonatiche con un secondo tipo di acqua (connata, termale o di strato), visti i rapporti elevati Na/Cl e Cl/Br nei campioni anomali (0.552 e 283.6 rispettivamente).

Il grafico tra Ca^{2+} vs l'indice di saturazione per la calcite (Fig. 13) sottolinea, inoltre, la presenza di un piccolo sottogruppo costituito dai campioni prelevati dai tre laghetti di Paterno (26, 27 e 28) nei pressi dell'abitato di Vasche. Tali campioni costituiscono un sottogruppo con caratteristiche idrochimiche molto simili e mostrano una sovrasaturazione in calcite. La figura mostra una diminuzione dell'indice di saturazione dalle acque del settore nord verso quelle del settore sud della piana, mentre l'indice di saturazione per i campioni anomali tende ad aumentare. Inoltre, nonostante le basse temperature delle acque delle Terme di Cotilia (circa 14 °C), la presenza di elementi come Br, I, F, NH_4^+ , Mn e Li non consente di scartare l'ipotesi di un miscelamento con acque profonde. Comunque, sebbene la sorgente di questa acqua "profonda" sia sconosciuta, la sua risalita verso la superficie è strettamente legata alla presenza di un canale preferenziale costituito da un elemento tettonico importante come la faglia di Fiamignano-Micciani.

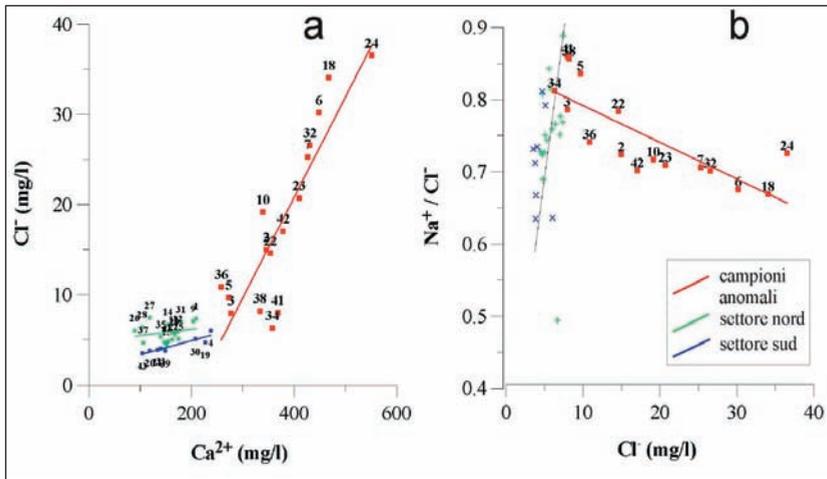


Figura 12. Diagramma a dispersione Cl^- vs Ca^{2+} (a) e Na^+/Cl^- vs Cl^- (b). Il grafico mostra l'esistenza di due evidenti trends sia nei campioni dei settori nord e sud sia nei campioni anomali. Il grafico Cl^- vs Na^+/Cl^- mostra un aumento del rapporto per i campioni del settore nord e sud, rapporto che diminuisce nel gruppo dei campioni anomali. Tale osservazione permette di formulare l'ipotesi dell'esistenza di un fenomeno di miscelamento delle acque superficiali carbonatiche con un secondo tipo di acqua (connata, termale o di strato), visti i rapporti elevati Na^+/Cl^- e Cl^-/Br^- nei campioni anomali.

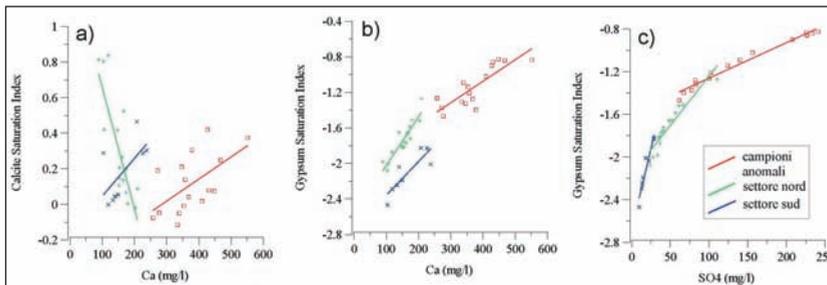


Figura 13. Grafico a dispersione tra gli indici di saturazione relativi a calcite (CaCO_3) e gesso (CaSO_4) e gli ioni Ca^{2+} e SO_4^{2-} . Nella figura a non si ha un andamento molto chiaro, probabilmente perché quasi tutti i campioni sono sovrasaturi in calcite. Al contrario, esiste una chiara tendenza sia tra calcio e lo ione solfato vs l'indice di saturazione del gesso (b e c). Questo può essere determinato dall'incremento progressivo della concentrazione dello ione solfato prodotto dall'ossidazione dell' H_2S . Tale incremento sposta l'equilibrio verso il campo di precipitazione del gesso.

CONCLUSIONI

La presente ricerca costituisce il primo tentativo mediante il quale si è cercato di affrontare la problematica dei sinkholes nella Piana di S. Vittorino in maniera multidisciplinare utilizzando indagini specifiche (geologiche, geomorfologiche e geochemiche). Nonostante il fenomeno sia molto complesso, i dati raccolti hanno permesso di definire, almeno in linea generale, le variabili in gioco e le possibili interazioni fra di esse. Il controllo attuale della tettonica sulla evoluzione recente della conca e sulla genesi dei

fenomeni di collasso è confermato dalla distribuzione dei sinkhole ancora attivi attualmente (laghetti) maggiormente concentrati nel settore centrale dell'area laddove si ipotizza la presenza di un elemento tettonico regionale (Faglia di Fiamignano-Micciani). Per quanto riguarda l'origine delle emergenze nella piana S. Vittorino, appare probabile che le acque del sottosuolo (sorgenti) e quelle superficiali (sinkholes) abbiano caratteristiche idrochimiche e fisico-chimiche simili tra loro e simili a quelle dell'acquifero regionale presente nei rilievi carbonatici. Alcune piccole differenze possono essere attribuite a fenomeni di mixing con l'acquifero superficiale e/o ai tempi di residenza nel sottosuolo. Al contrario, le principali variazioni composizionali sono dovute alla presenza nel settore centro-settentrionale dell'area di un flusso anomalo di gas, di probabile origine profonda, arricchito in CO_2 , che rende le acque superficiali aggressive nei confronti delle rocce carbonatiche. Da ciò deriva una distribuzione delle acque del sottosuolo in due (forse tre) facies idrogeochimiche, quella bicarbonato-solfato-calciche, prevalente sul margine settentrionale, e quella bicarbonato-calcica, maggiormente rappresentata nell'area sud-orientale. La presenza di differenti facies idrochimiche, e il mixing ridotto, potrebbero essere messi in relazione con una sorta di tamponamento da parte dei depositi lacustri che colmano la conca. Inoltre, i dati geochimici convergono con le informazioni ottenute da indagini geofisiche precedenti (microgravimetria e tomografia elettrica) che hanno rilevato nella zona a sud delle Terme di Cotilia un deficit di massa e un'alta resistività. Le elevate concentrazioni di gas (anche nella zona non satura) osservate in corrispondenza dei minimi gravimetrici, evidenziano zone in cui la risalita di fluidi profondi ed aggressivi potrebbe alterare la matrice carbonatica dei sedimenti superficiali diminuendone la densità per aumento della porosità efficace. In queste zone la presenza di placche di travertino carsificate potrebbe accelerare tale fenomeno provocando il collasso della coltre sedimentaria, e la conseguente formazione dei tipici laghetti. Ai fini dello studio della tipologia degli sprofondamenti presenti nella piana le indagini geomorfologiche e geochimiche hanno messo in evidenza la presenza di:

- forme senili (Laghi di Paterno) o poco attive (Lago Rotondo) ubicate prevalentemente nel settore orientale della piana, e caratterizzate da dimensioni maggiori, assenza di una fase gassosa libera e da un $\text{pH} > 7.5$ (condizioni riscontrate anche in altre aree, quali ad esempio la zona di Capena (RM));
- forme recenti, di dimensioni ridotte (2-5m), ubicate nel settore centrale della Piana e caratterizzate dalla presenza di una forte componente gassosa, libera e disciolta, (arricchita in CO_2) e un pH compreso tra 6.5-6.8.

La causa di tale differenziazione (presenza di forme estinte, "senili", in via di estinzione, e recenti) può essere attribuita alla dislocazione differenziale di blocchi fagliati che rende plausibile l'ipotesi di una possibile "migrazione" del fenomeno sinkhole. Tale osservazione è rafforzata dalle analisi strutturali che hanno messo in evidenza una distensione generale verso i quadranti sud-occidentali della piana che potrebbe aver provocato in superficie uno spostamento relativo (dei blocchi) e progressivo dell'attività dei sinkholes. L'attività tettonica che ha agito nella piana ha causato il sollevamento del settore settentrionale e della porzione orientale, quest'ultima, separata dalla faglia di Fiamignano-Micciani che solleva il blocco di destra. A questi movimenti (di tipo distensivo) consegue un analogo spostamento delle principali vie di migrazione (faglie) dei fluidi di origine profonda. Pertanto la presenza di fenomeni di bubbling nei sinkholes (insieme alle elevate concentrazioni di alcune specie gassose nel suolo), può considerarsi diagnostica di un fenomeno ancora attivo e/o recente; sono evidenti, infatti, le differenze geochimiche con i tipici laghetti della piana che possiamo considerare sinkholes allo stadio "senile". Tali risultati potrebbero indicare che, almeno allo stadio attuale, la pericolosità del territorio per sprofondamenti è molto elevata nella zona compresa tra le Terme di Cotilia e Loc. Fiecciani sulla destra idrografica del fiume Velino.

BIBLIOGRAFIA

- ANNUNZIATELLIS A., CIOTOLI G., LOMBARDI S., NOLASCO F. (2003) – Short and Long Term Gas Hazard: The Release of Toxic Gases in the Alban Hills Volcanic Area (Central Italy). *Journal of Geoch. Expl.* 77, 93-108
- ASTORRI F., BEAUBIEN S.E., CIOTOLI G., LOMBARDI S. (2002) - An assessment of gas emanation hazard using gis and Geostatistics. *Health Physics*, 82/1.
- BEAUBIEN S.E., CIOTOLI G., LOMBARDI S., NISIO S. & NOLASCO F. (2003) - Indagini Geologiche e Geochimiche per lo Studio del Rischio Sinkholes nella Piana di S. Vittorino Atti Conv. 4° Forum FIST Bellaria (Rimini) 16-18 sett. 2003. Vol Abs., 357-359.
- BEAUBIEN S.E., CIOTOLI G., LOMBARDI S. (2003)- Carbon Dioxide and Radon Gas Hazard at the Alban Hill Area (Central Italy). *Journal of Volc. and Geoth. Research* 123, 63-80.
- BERSANI P. & CASTELLANO F. (2002)- I sinkhole della Piana di S. Vittorino (Rieti) e il rischio idraulico connesso. In: *Le voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana. Att. Conv. 31 marzo 2000, (GR). Regione Toscana, 47-61.*
- BERSANI P., BIAGI P. F., FERRANTI C. & PIOTTI A. (2000) – Gli sprofondamenti della Piana di S. Vittorino (Rieti). *L'Aquila*, 1/2000, 39-48.
- BIGI G., CAPELLI G., MAZZA R., PAROTTO M., PETITTA M. & SALVATI R. (1999) - Strutture di collasso nella piana di S. Vittorino (Fiume Velino, Lazio): interazione tra circolazione idrica sotterranea e tettonica attiva. *Convegno Conoscenza e salvaguardia delle aree di Pianura. Ferrara Italy, 8-11 Novembre 1999.*
- BONI C., CAPELLI G. & PETITTA M. (1995) – Carta idrogeologica dell'alta e media valle del F. Velino. *System cart, Roma.*
- CATENACCI V. (1992) – Censimento dei dissesti causati dal crollo di cavità sotterranee verificatesi in Italia dal dopo guerra al 1990. *Mem. Serv. Geol. Naz. Vol. XLVII.*
- CAPELLI G., PETITTA M. & SALVATI R. (2000) – Relationships between catastrophic subsidence hazards and groundwater in the Velino Valley (Central Italy) – *Proceedings Sixth International Symposium on Land Subsidence SISOLS 2000, Ravenna, Italy. 1, 123-136.*
- CAPELLI G., COLOMBI A. AND SALVATI R. (2001) Catastrophic subsidence risk assessment. A conceptual matrix for sinkhole genesis: in *Geotechnical and Environmental applications of karst geology and hydrology. Beck B.F. and Gayle Herring J. Eds., Balkema.*
- COLOMBI A., SALVATI R. AND CAPELLI G., (2001) Sinkhole in Latium Region (Central Italy). Purposes of the Main Project: in *Geotechnical and Environmental applications of karst geology and hydrology. Beck B.F. and Gayle Herring J. Eds., Balkema.*
- CENTAMORE E. & NISIO S. (2002) - Quaternary Morfodinamic between the Velino and Salto Valleys. *Studi Geol. Camerti Vol Spec. (1999), 37-44.*
- CENTAMORE E. & NISIO S. (2003) - The effects of uplift and tilting in the Central Apennine. *Quaternary international* 101-102 (2003), 93-101
- CENTAMORE E., NISIO S. & SABATINELLI A. (1999) – Nuovi dati sull'assetto geologico-strutturale e morfotettonico della Piana di S. Vittorino ("zona d'incontro tra Umbria-Marche e Lazio-Abruzzi, Lazio nord-orientale- Rieti). *Boll. Serv. Geol. Naz., 69.*
- CIOTOLI G., DI FILIPPO M., NISIO S., ROMAGNOLI C. (1998) - La piana di S. Vittorino: dati preliminari sugli studi geologici, strutturali, geomorfologici, geofisici e geochimica. *Atti Conv. Giovani Ricercatori di Geologia Applicata. Chieti 22-24 Ott. 1998, Vol. abs. 200-201.*
- CIOTOLI G. DI FILIPPO M. NISIO S. & ROMAGNOLI C. (2000) – La Piana di S. Vittorino: dati preliminari sugli studi geologici, strutturali, geomorfologici, geofisici e geochimici. *Mem. Soc. Geol. It., 56, 297-308.*
- CIOTOLI G., GUERRA G., LOMBARDI S., VITTORI E. (1998) - Soil gas survey for tracing seisogenic faults: a case-study in the Fucino basin (central Italy). *Journal of Geophysical Research*, 103/B10, 23781-23794.

- CIOTOLI G. (1997) -Introduzione di metodi geostatistici nell'interpretazione della distribuzione dei gas endogeni nei suoli quale contributo alle indagini strutturali: la piana del Fucino. Tesi di dottorato, Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Roma "La Sapienza", Roma, Italy.
- FACCENNA C., FLORINDO F., FUNICELLO R., & LOMBARDI S. (1993) – Tectonic setting and Sinkhole Features: case histories from western Central Italy. *Quaternary Proceeding* n.3, 47-56.
- MARINELLI R. (1995) *Le terre contese*. Comune di Borgovelino RI. Gruppo Tipografico Editoriale L'Aquila.
- MORI A. (1938) – Sulla formazione di alcuni laghetti presso Cittaducale. In: *la petrografia per tutti*.
- NISIO S. (2003) – I fenomeni di sprofondamento: stato delle conoscenze ed alcuni esempi in Italia Centrale. *Il Quaternario*, 16(1), 121-132.
- NOLASCO F. (1986) – Sprofondamenti del terreno in località Sciamargutta presso Cotilia Terme. Roma
- NOLASCO F. (1998) – La piana di S. Vittorino. Contributo allo studio dei processi evolutivi dei rischi e della prevenzione. Regione Lazio- Acea.
- RICCARDI M. (1951) – Nuove ricerche sulla Piana di S. Vittorino. *Boll. Soc. Geogr. It.*, IV, Fasc. V.
- SALVATI R. & SASOWSKY I.D. (2002) - Development of collapse sinkholes in areas of groundwater discharge. *Journal of Hydrology* 264, 1-14.
- TENORE G. (1872) – Sulle azioni chimiche e meccaniche dell'acqua come cagioni attuali modificatrici nella Valle del Velino nel secondo Abruzzo Ulteriore (Piana di San Vittorino).
- VERRI A. (1886)- La sorgente del Peschiera. In: *L'Annunziatore umbro-sabino*. Anno IV, n° 38.7

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la Sg.ra Anna Baccani per il supporto tecnico fornito nella fase di analisi dei campioni, si ringraziano inoltre il Dr. Andrè Fascetti, il Dr. Fabrizio Gismondi e il Dr. Massimo Colarieti per l'importante contributo fornito durante il periodo di campionamento.

Questo lavoro è stato possibile grazie supporto finanziario garantito principalmente dal Dipartimento Ambiente e Protezione Civile della Regione Lazio e più recentemente dalla CE nell'ambito del progetto "Natural analogue to the storage of CO₂ in the geological environment" (NASCENT, n. ENK5-CT2000-00303).