

Uomo, georisorse e faglie nel Bacino delle Acque Albule, Italia centrale

Luigi De Filippis (*), Claudio Rossetti (*), Andrea Billi (***) e Claudio Faccenna (*)

(*) Dipartimento di Scienze, Università Roma Tre. E-mail: luigidefilippis1@gmail.com

(***) Consiglio Nazionale delle Ricerche, IGAG, Roma.

Document type: Article.

Manuscript history: received 15 November 2012; accepted 29 June 2013; editorial responsibility and handling by Lucio Ubertini.

RIASSUNTO

Il presente contributo è un resoconto di alcuni studi di carattere geologico, geofisico e geomorfologico che il nostro gruppo di ricerca ha effettuato, nel periodo 2001-2008, sui depositi di travertino quaternario del Bacino delle Acque Albule. Alla formazione di questo grande plateau di travertino hanno contribuito, in un lasso di tempo di c. 100 ka, diversi fattori geologici: (1) il substrato carbonatico profondo, (2) la tettonica attiva, (3) l'anomalia geotermica regionale, con gli associati fluidi geotermali di natura vulcanica, ed infine (4) l'enorme disponibilità di acqua, le cui vaste aree di ricarica sono rappresentate dai rilievi carbonatici preappenninici delimitanti il bacino a nord e ad est. Le faglie attive e l'intensa fratturazione oltre a garantire un continuo afflusso di fluidi geotermali (acque e gas) in superficie hanno determinato su tutta l'area l'instaurarsi di fenomeni di pericolosità geologica: fenomeni di collasso repentino (*sinkhole*) e subsidenze dei terreni di superficie. E' inoltre dimostrato che questi fenomeni subiscono accelerazioni o riattivazioni al verificarsi di eventi sismici, anche di bassa magnitudo. I fattori di pericolosità geologica associati all'intensa urbanizzazione dell'area hanno concorso a generare una situazione di rischio elevato, per il patrimonio abitativo e per la popolazione. L'integrazione dei dati geologici di superficie e del sottosuolo, l'analisi strutturale, la geofisica, l'analisi di foto aeree storiche e lo studio della sismicità storica, associati ai numerosi dati idrogeologici disponibili, hanno permesso di ricostruire con buona precisione l'assetto geologico del bacino. Tale assetto costituisce lo strumento indispensabile sia per la tutela delle due georisorse locali (acqua e travertino) che per una più attenta e rigorosa pianificazione territoriale

TERMINI CHIAVE: faglie attive, fratture, *sinkhole*, fluidi geotermali, travertino.

INTRODUZIONE

Il Bacino delle Acque Albule (Tivoli, Italia centrale) da sempre attrae l'interesse degli studiosi di Scienze della Terra. In particolare, negli ultimi dieci anni, sono state eseguite numerose ricerche di carattere geologico, idrogeologico, geomorfologico, geofisico e geochimico. Sin dall'epoca romana, la presenza di due importanti georisorse come l'acqua termale e il travertino hanno reso famoso quest'angolo dell'agro romano prossimo alla città di Tivoli. Già da allora erano note sia le qualità terapeuti-

che delle acque termali, sia le buone proprietà meccaniche e decorative delle pietre ivi estratte. Entrambe le georisorse devono principalmente la loro origine all'interazione tra i fluidi geotermali profondi e le faglie, un processo geologico molto frequente nella crosta terrestre, in particolare laddove accanto a zone tettonicamente attive (attività vulcanica e sismica) coesistono un basamento carbonatico e un'anomalia geotermica. Questi fattori hanno giocato un ruolo fondamentale nella modellazione del paesaggio geologico e dei suoi aspetti economici.

Negli anni '30 del secolo scorso, lo sfruttamento delle acque termali viene ben presto affiancato da un'importante ripresa della coltivazione del travertino, in particolare durante il ventennio, cui segue una repentina urbanizzazione dell'area che, nel dopoguerra, continua a richiamare mano d'opera dall'Italia meridionale. L'enorme pressione antropica ha contribuito quindi, più di quanto non abbia fatto la natura in decine di migliaia d'anni, a modificare l'assetto geomorfologico ed idrogeologico dell'area. Se da una parte lo sfruttamento delle acque e del travertino ha continuato a generare ricchezza e posti di lavoro, dall'altro il venir meno di un'ideale pianificazione territoriale, accanto alla presenza di terreni superficiali molto compressibili, ha introdotto nel territorio situazioni di rischio geologico.

Nel periodo compreso tra il 2003 e il 2006, il Dipartimento di Scienze Geologiche dell'Università Roma Tre insieme ad altri enti di ricerca ha studiato i fenomeni di pericolosità geologica presenti nell'area. Di seguito, accanto ad un riesame delle conoscenze precedenti, si presenta una breve sintesi dei risultati delle ricerche effettuate in quel periodo. L'obiettivo principale del presente studio è quello di mettere in evidenza i principali fenomeni di pericolosità geologica presenti nell'area di studio e di comprendere i nessi causa-effetto esistenti tra tali fenomeni e l'evoluzione geologica dell'area stessa fino al recente e considerevole impatto antropico.

L'ATTIVITA' ESTRATTIVA IN EPOCA ROMANA

L'area estrattiva del Bacino delle Acque Albule ubicato nella pianura sottostante Tivoli, circa 20 km ad est di Roma, è famosa per i notevoli depositi di travertino coltivati sin dall'età romana oltre che per le sorgenti idrotermali. Il nome travertino deriva dal latino «tivurtinus», denominazione dell'età tardo-imperiale



Fig. 1 - Deposito di travertino (circa 1 metro di spessore) sull'antica via consolare Tiburtina (286 a.C.) a Tivoli Terme (foto F. Poggi).

dell'area di Tivoli. I romani chiamavano la pietra ornamentale ivi cavata "*lapis tiburtinus*". L'architetto di epoca romana Vitruvio parlando del *lapis tiburtinus* così si esprime: "Le pietre tiburtine e quelle che sono della stessa specie resistono a tutto, si al peso, si ancora alle ingiurie del tempo".

Il travertino rappresentò così, per ragioni di praticità, il materiale privilegiato dell'architettura romana durante tutto il corso del II e del I secolo a.C. Veniva utilizzato nelle costruzioni in sostituzione dei tufi vulcanici (meno resistenti, meno modellabili con precisione e più grezzi), nelle fondazioni, nelle strutture portanti, come sostegno dei muri, e per i componenti edilizi in generale più sollecitati staticamente. Fino a qualche anno fa era ancora possibile ammirare in alcuni punti dell'area estrattiva le pareti che conservavano le impronte dello scalpello degli "antichi" operai (De Filippis & Massoli Novelli, 1998). La deposizione del travertino era ancora molto attiva durante l'era imperiale e nei periodi immediatamente successivi. Molti manufatti di epoca romana, infatti, sono inclusi o coperti da depositi travertinosi (Fig. 1).

ASSETTO STRATIGRAFICO

Il Bacino delle Acque Albule (BAA) è una depressione morfologica di recente formazione (Fig. 2) avente un'estensione di circa 30 km², con un lato di circa 7 km in direzione meridiana e con una debole pendenza generale da nord verso sud e da est verso ovest, con quote che variano da circa 80 m s.l.m. a meno di 50 m s.l.m. in prossimità del Fiume Aniene. La sua conformazione, le dimensioni e i lineamenti tettonici presenti hanno

portato ad interpretarlo come bacino di *pull-apart* (Aydin & Nur, 1982; Faccenna et al., 1994).

I depositi di travertino termogenico, formati per deposizione di CaCO₃ a seguito di perdita di CO₂ da acque bicarbonatiche anche per l'intervento di specifici batteri (Chafetz & Folk, 1984), occupano una superficie di oltre 20 km² (circa il 70% dell'intero bacino). I materiali più litoidi sono coperti da un bancone di travertino quasi spugnoso ed incoerente conosciuto come *testina* o *cappellaccio*, il cui spessore è variabile e raggiunge i suoi valori massimi nella parte centrale del bacino. Maxia (1950b) definisce questa facies travertinoso come "Tartari delle Acque Albule-Pietra spugna".

La stratigrafia del settore centrale del bacino è costituita da travertino per uno spessore medio di circa 60 m e massimo di oltre 85 m (Maxia, 1950a). Tale travertino poggia sopra una sequenza di argille, conglomerati e sabbie di età Plio-Quaternaria. Nel margine occidentale, l'unità dei travertini è spessa circa 10 m e giace su pochi metri di conglomerati ed almeno 75 m di argille.

Verso est, il travertino ha spessori assai esigui e poggia sopra depositi alluvionali ed epivolcanici. Nella parte più orientale del bacino, ai piedi dei Monti Tiburtini, è presente una facies travertinoso meteogenica conosciuta come *tartaro*, formata dalla precipitazione delle acque dell'Aniene. Il settore periferico del bacino si differenzia per il minor spessore della coltre travertinoso che poggia sui depositi alluvionali e sulle piroclastiti albane.

La zona delle Acque Albule è un campo di doline, alcune trasformate in laghetti, ora prosciugati, ora attivi, di solito ri-

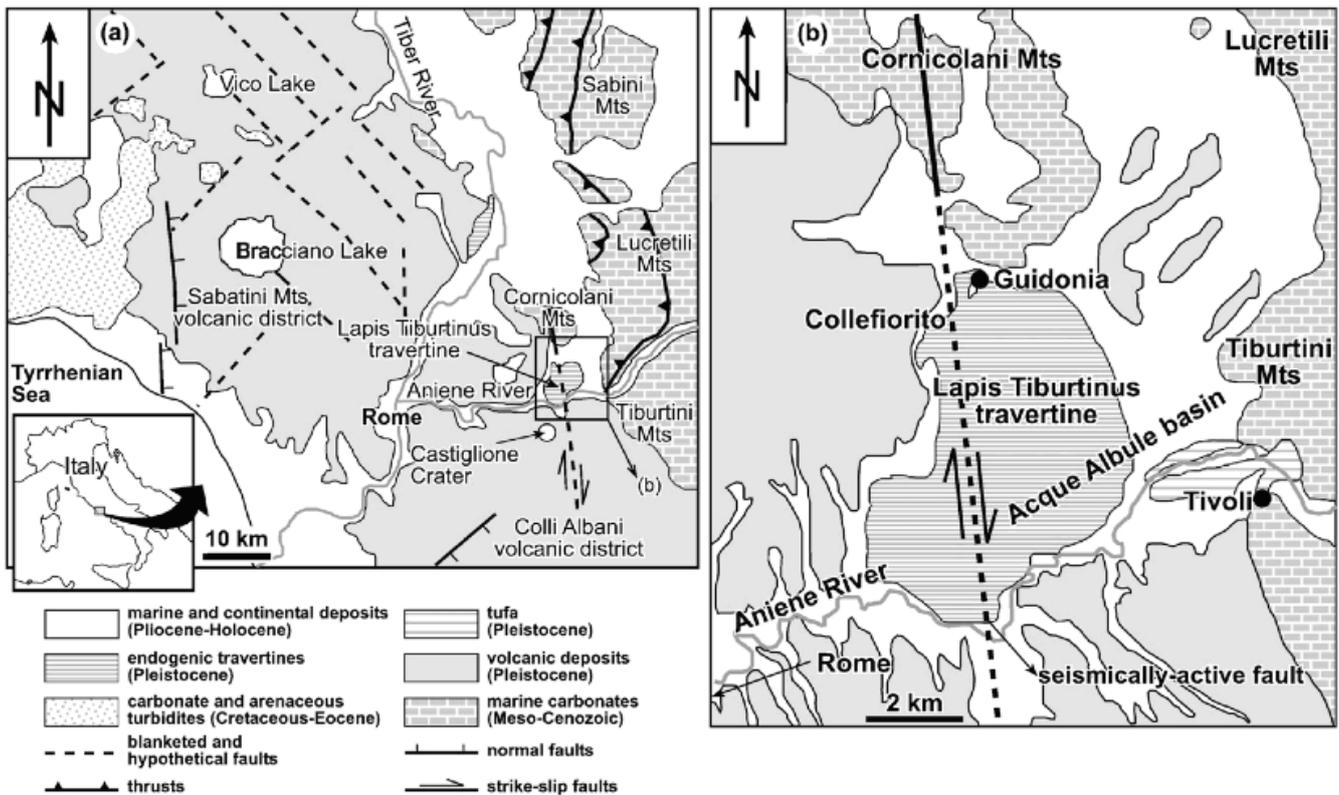


Fig. 2 - (a) Carta geologica dell'area intorno a Roma (Italia Centrale). Le faglie sottostanti gli edifici vulcanici sono state interpretate attraverso dati indiretti e diretti, come l'allineamento delle emergenze dei fluidi e i campi di fratturazione (De Rita et al., 1988, 1995). Il giacimento di Lapis Tiburtinus è situato circa 30 km ad est di Roma. (b) Carta geologica dell'area di studio, comprendente il bacino delle Acque Albule, dove durante il tardo Pleistocene si è depositato il travertino Lapis Tiburtinus. La faglia sotto il giacimento di Lapis Tiburtinus è sismicamente attiva (come testimoniato dalla sequenza sismica del 2001 in cui si sono avuti terremoti compresi tra 0.5 e 1.5 km di profondità; Gasparini et al., 2002). Da Faccenna et al., 2008.

empiti da materiali molto recenti (torbe, limi, argille, ecc.). Tra quelli ormai bonificati, ricordiamo il Lago dei Tartari, il Pantano ed altri, per i quali non esiste neanche un toponimo.

Le isopache del corpo travertinoso nei vari punti del BAA sono state ricostruite dai dati dei sondaggi esistenti nell'area; tuttavia, le determinazioni dei diversi spessori sono piuttosto approssimate, in quanto, anche se tali perforazioni sono abbastanza ben distribuite all'interno del bacino stesso, esse sono state eseguite per scopi non stratigrafici e, spesso, sono state interrotte a profondità inferiori a quelle necessarie per attraversare completamente i depositi di travertino. In particolare, non si conosce ancora con precisione quale sia il massimo spessore che essi raggiungono.

I dati di pozzo (compresi i più recenti eseguiti dall'Università Roma Tre nel periodo 2003-2006) suggeriscono che i maggiori spessori di litologie travertinosi (fino circa 90 m dal piano campagna) si trovano lungo una fascia allungata in direzione N-S che si estende dall'area delle sorgenti (Lago della Regina e Lago delle Colonnelle) fino all'abitato di Tivoli Terme. Verso i margini occidentale e orientale del bacino si hanno più informazioni stratigrafiche: gli spessori del travertino sembrano diminuire bruscamente verso ovest, mentre procedendo verso est ciò avviene in modo più graduale.

ASSETTO STRUTTURALE

Il processo di subsidenza responsabile della formazione del BAA e il sistema di alimentazione profonda del circuito idro-

termale sono controllati dall'azione di un sistema di faglie a decorso meridiano attive nell'area durante il tardo Pleistocene. La faglia principale, ben osservabile nei rilievi dei Monti Cornicolani, in particolare nella porzione più settentrionale del paese di Sant'Angelo Romano, si allinea con le sorgenti principali dell'area (laghi delle Colonnelle e Regina) e prosegue in modo discontinuo sino alle pendici del distretto vulcanico dei Colli Albani, bordando anche la depressione di Pantano Borghese. All'interno del bacino, la localizzazione di questo sistema di faglie è stata dedotta da evidenze indirette quali il campo di fratturazione all'interno delle cave, l'allineamento delle sorgenti, l'ubicazione degli epicentri degli eventi sismici del 2001, l'ubicazione dei conetti idrotermali, l'andamento delle isopache dei depositi sovrastanti il travertino, le isoterme delle acque di sorgente e di falda e da alcune evidenze geomorfologiche rilevate sul terreno e da foto aeree (Faccenna et al., 1994, 2006, 2008, 2010; Funciello et al., 2005a, 2005b; Billi et al., 2007). La cinematica del sistema di faglie principali presenta una componente trascorrente destra. All'altezza di Colle Fiorito di Guidonia, dal sistema principale dipartono segmenti divergenti a direzione N20°-40° con cinematica prevalentemente obliqua (componente estensionale e trascorrente destra) (Faccenna et al., 1994, 2010; fig. 3).

In superficie, queste strutture si manifestano con faglie trascorrenti N-S o N20° destre cui si associano fratture estensionali e faglie normali con direzione media oscillante intorno a N40°-70°. Il limite del bacino, nel settore occidentale, è segnato da faglie oblique. Più raramente si notano piccole faglie inverse, e faglie antitetiche trascorrenti sinistre E-W.

Le età delle deformazioni sono in gran parte coeve a quella

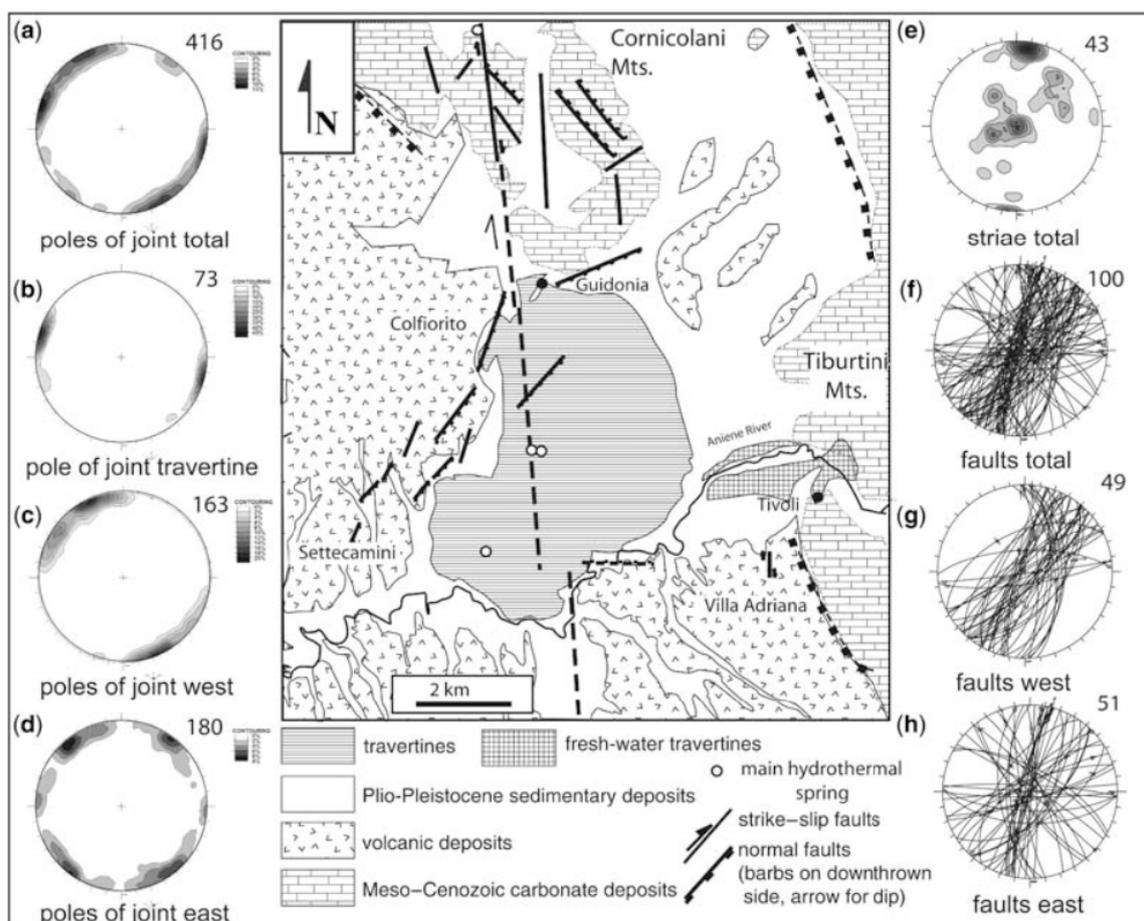


Fig. 3 - Carta strutturale del bacino delle Acque Albule. (a)-(h) Dati strutturali (in alto a destra il numero di dati) con rappresentazione stereografica (reticolo equiareale di Schmidt, emisfero inferiore): distribuzione percentuale delle direzioni dei poli di proiezione delle fratture misurate nell'intera area (a); distribuzione percentuale dei poli delle fratture all'interno delle cave di travertino (b) (queste strutture rappresentano le vie preferenziali per la risalita dei fluidi geotermali); distribuzione percentuale dei poli delle fratture nei depositi piroclastici e/o nelle sequenze plioceniche del settore occidentale del bacino, da Settecamini a Guidonia (c); distribuzione percentuale delle direzioni dei poli misurati nell'area di Villa Adriana (d); totale delle misure effettuate sulle strie e su altri indicatori cinematici nell'intera regione (e); misure delle faglie dell'intera area (f); misure delle faglie nei depositi piroclastici e/o nelle sequenze plioceniche del settore occidentale del bacino, da Settecamini a Guidonia (g); misure delle faglie nelle unità vulcaniche pleistoceniche nell'area di Villa Adriana (h). Da Faccenna et al., 2010.

del corpo principale dei travertini, suggerendo un nesso causale tra deformazione tettonica e circolazione idrotermale.

In particolare, all'interno dell'area estrattiva, il quadro deformativo riconosciuto si caratterizza per una serie di fratture estensionali, che sono il risultato della risposta fragile delle litologie travertinose alle sollecitazioni tettoniche, spesso interessate da risalita di fluidi profondi (fig. 4). Le fratture hanno decorso variabile, con un massimo di distribuzione in direzione circa NNE-SSW. Esse si presentano in genere subverticali, o con valori d'inclinazione comunque elevati. La loro spaziatura è variabile, così come la loro distribuzione areale. E' da notare, infatti, che l'intensità della fratturazione è maggiore nel settore settentrionale dell'area investigata, dove anche le aperture delle singole fratture, di norma, assumono i valori massimi. Raramente le fratture presentano un riempimento al loro interno; quando esso è presente, è costituito per lo più da materiale argilloso.

Nella cava più settentrionale tra quelle attualmente in esercizio, il travertino si presenta fortemente immergente verso NW ed è sovrastato da una sequenza di terreni limoso-argilloso-sabbiosi e da livelli di travertino meno compatto e spugnoso ("testina"). Questi depositi diminuiscono di spessore verso est, andandosi a "spegnere" contro il travertino sottostante.

Il rilevamento geologico-strutturale all'interno delle cave e l'analisi delle foto aeree del 1943 lasciano ipotizzare che il lineamento morfologico ad andamento SW-NE, riconosciuto dalla fotointerpretazione nell'area del Lago di San Giovanni (fig. 5), possa rappresentare l'espressione superficiale di una faglia sviluppata durante la deposizione dei depositi successivi al travertino litoide (faglia di crescita). L'ipotesi dell'esistenza di tale faglia è avvalorata dall'andamento delle isopache dei depositi sovrastanti il travertino litoide ricostruite sulla base dei dati di pozzo (fig. 6). Infatti, le stratigrafie dei sondaggi suggeriscono che il tetto del travertino sia notevolmente approfondito rispetto alle aree circostanti nel settore immediatamente ad est del lineamento visibile dalle foto aeree. L'area in cui i depositi successivi al travertino litoide assumono i maggiori spessori (sicuramente superiori ai 30 metri) è allungata in direzione NE-SW, in accordo con la possibile esistenza della faglia presunta.

Un altro indizio della possibile esistenza della faglia è che la direzione del lineamento riconosciuto è compatibile con altri elementi rilevati nella stessa area a seguito dell'analisi delle foto aeree. Infatti, esiste una buona corrispondenza tra il lineamento stesso e molte depressioni morfologiche di probabile origine carsica. Anche i punti di risorgenza dei fluidi geotermali che ri-



Fig. 4 - Risalita di fluidi profondi da fratture estensionali, con orientazione circa N-S, all'interno di una cava.

cadono nei pressi di Colle Fiorito seguono pressapoco lo stesso trend, così come un altro lineamento che si sviluppa verso SW a partire proprio dall'abitato di Colle Fiorito. Inoltre, anche gli epicentri della crisi sismica del 2001 (Gasparini et al., 2002), opportunamente georeferenziati, ricadono nella stessa area e sono allineati secondo la medesima direzione (fig. 5).

ASSETTO IDROGEOLOGICO

Il Bacino delle Acque Albule è alimentato dalla struttura idrogeologica dei Monti Lucretili-Tiburtini-Cornicolani, il cui drenaggio sfrutta i principali lineamenti tettonici distensivi riconosciuti nell'area, in particolare la direttrice NNE-SSW. Parte dell'acquifero, nel bacino, è compreso nei depositi sabbioso-conglomeratici e nel travertino, sopra le argille del Pliocene.

Nei pressi della città di Tivoli e diffusamente anche al di sotto della campagna sabina, l'ingente volume di acqua proveniente dal circuito carsico lucretile-cornicolano (circa 5 m³/s) si miscela con convogli gassosi e termominerali che risalgono lungo le faglie distensive che hanno ribassato la serie meso-cenozoica in questo settore. Per questo motivo, nell'area di Tivoli Terme, si manifestano le più grandi sorgenti termominerali d'Italia, la cui portata complessiva è di circa 3000 l/s (Capelli et al., 1987). L'esistenza di acque solfuree e di depositi travertinosi nell'area di Tivoli è ben nota. Le acque furono sfruttate fin dall'epoca romana per le loro proprietà terapeutiche con la realizzazione di impianti termali.

Le sorgenti più importanti sono quelle del Lago della Regina (1850 l/s; fig. 7) e del Lago delle Colonnelle (250 l/s) ma se ne conoscono di minori, con portate anche variabili stagionalmente. E' plausibile ipotizzare un passaggio d'acqua dai rilievi

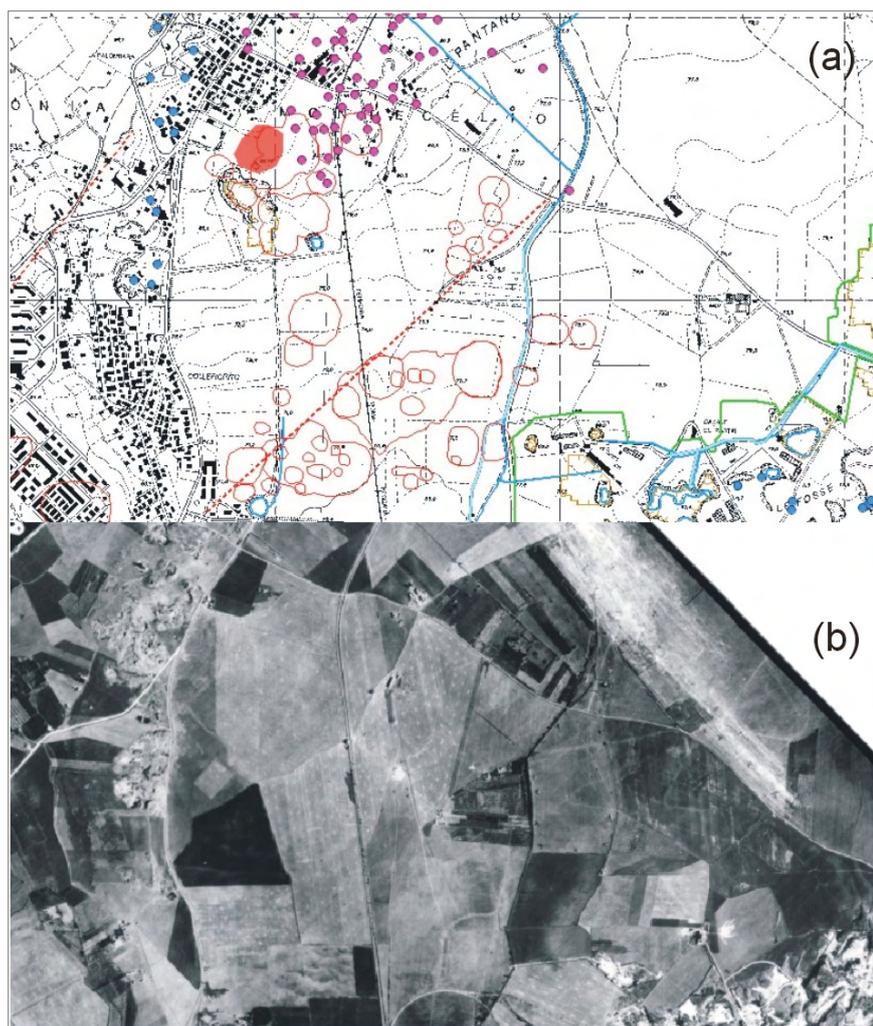


Fig. 5 - (a) Particolare in cui sono visibili i principali caratteri morfo-tettonici dell'area compresa tra Colle Fiorito e il settore settentrionale dell'area estrattiva del bacino (i punti di risorgenza dei fluidi geotermali sono indicati con i cerchi azzurri; gli epicentri della crisi sismica del 2001 con i cerchi viola). (b) Foto aerea della R.A.F. relativa all'area. Da Funiello et al., 2005b. In entrambe le mappe (a) e (b) il nord è parallelo al bordo verticale dell'immagine.

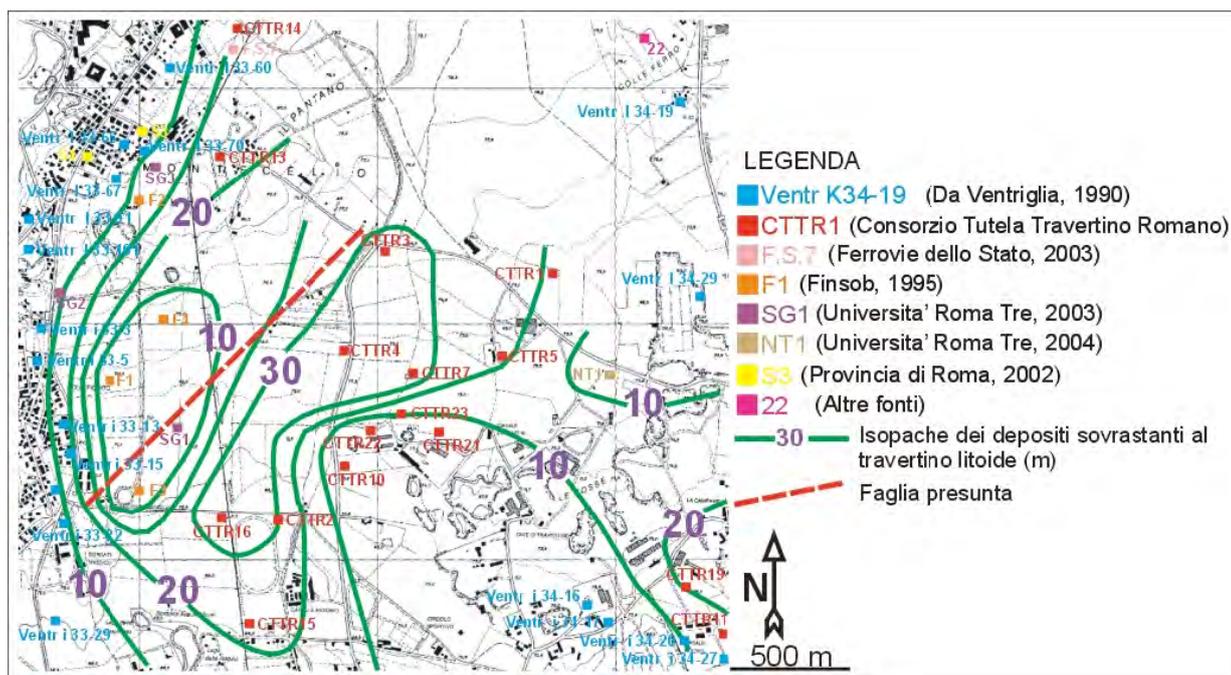


Fig. 6 - Isopache dei depositi sovrastanti il travertino litoide nella zona del Lago di San Giovanni. Viene indicato anche il lineamento riconosciuto dall'analisi delle foto aeree del 1943. I quadratini colorati in legenda e in mappa indicano i diversi sondaggi stratigrafici. Da Faccenna et al., 2006, modificato da Funiello et al., 2005b.



Fig. 7 - Il Lago Regina, sullo sfondo i Monti Lucretili (foto L. De Filippis).

carbonatici verso la piana delle Acque Albule. I rilievi dei Monti Lucretili e Cornicolani, infatti, per la loro natura geologica (vaste aree carsiche con doline, inghiottitoi, etc.) e per le caratteristiche meteorologiche dell'area, sono in grado di assorbire ingenti quantitativi di acqua piovana che si infiltrano rapidamente andando ad alimentare la falda presente nella sottostante formazione carbonatica massiva del Lias inferiore.

Le acque di infiltrazione si muovono da est verso ovest, cioè da monte verso il bacino. L'esiguità di emergenze sorgentizie al piede dei rilievi indica l'esistenza di una comunicazione idraulica ad elevata permeabilità con il deposito travertinoso della piana. Una conferma a queste ipotesi proviene dal fatto che dalla massa dei travertini emergono, per emungimenti e sorgenti, acque leggermente termali ($\sim 22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) e minerali (CO_2 , H_2S e Fe), il che fa supporre un rapporto idraulico con orizzonti profondi connessi, forse con flussi mineralizzati legati a manifestazioni tardo-vulcaniche. Nell'insieme la circolazione idrica nei travertini è unica, anche se può essere localmente interrotta da sottili veli argillosi. Le isoterme delle già ricordate importanti sorgenti del Lago delle Colonnelle e del Lago della Regina raggiungono un massimo di $22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ lungo il margine occidentale dei depositi di travertino, mostrando un allineamento N-S.

Ciò rende ancor più plausibile l'ipotesi che i fluidi geotermali profondi risalgano in superficie sfruttando il trend tettonico ad orientamento N-S, la cui zona di taglio presenta un altissimo valore di permeabilità. In quest'area, l'attuale emergenza di fluidi di genesi profonda e la formazione di vaste placche di travertino tende a confermare la presenza di un meccanismo distensivo tuttora attivo. La circolazione di fluidi lungo zone di frattura profonde è per lo più prodotta dal miscelamento del circuito profondo idrotermale perivulcanico, con quello più superficiale carsico (La Vigna et al., 2013). Quindi, questo settore della tettonica distensiva sembra comportarsi come barriera per il flusso laterale e come percorso preferenziale per la migrazione dei fluidi profondi.

Il quadro che si delinea dall'analisi dei principali parametri idrochimici dei campioni prelevati è quello di un acquifero principale a «falda carsica regionale», ospitato nei termini carbonatici mesozoici della Serie Sabina con apporti di fluidi mineralizzati e caldi lungo le dislocazioni tettoniche attive dell'area aniene e cornicolana. Alla circolazione basale dell'acquifero regionale si associano, ai margini della struttura carbonatica, piccole falde

sospese ubicate nei depositi di copertura. I citati acquiferi sono sfruttati localmente per usi prevalentemente irrigui e domestici.

IL SOTTOSUOLO E I FATTORI DI PERICOLOSITÀ GEOLOGICA

Il substrato carbonatico, ivi incluso quello travertinoso, è interessato da grandi fenomeni carsici con formazione di cavità epigee ed ipogee. In alcuni casi, le voragini si manifestano in modo repentino senza apparenti segnali premonitori. Frequenti sono le segnalazioni di boati uditi dalla popolazione locale, cui spesso fanno seguito ritrovamenti di nuove depressioni o vere e proprie aperture sul piano campagna che consentono di raggiungere cavità ipogee.

Nell'area, la cavità carsica più imponente è senza dubbio il Pozzo del Merro, sui Monti Cornicolani. Questa voragine, parzialmente allagata, è stata oggetto di studi e, ad oggi, risulta essere uno dei *sinkhole* allagati più profondi al mondo ($>300\text{ m}$; Caramanna, 2001). Ad ulteriore prova della dinamicità del fenomeno carsico, nel gennaio 2001, in località Pozzo Grande, nei pressi del paese di Marcellina, si è repentinamente formato un *sinkhole* in un terreno agricolo (Argentieri et al., 2002).

In prossimità dell'abitato di Tivoli Terme, nell'ampia lente di travertino affiorante, si aprono due *sinkhole* allagati rappresentati dalle sorgenti delle Acque Albule: il Lago della Regina (fig. 7) e il Lago delle Colonnelle. A poca distanza dai suddetti laghi si trova il laghetto subcircolare di S. Giovanni.

Dall'esame dei fronti di cava attuali è stato possibile osservare che i travertini sono soggetti ad estesi fenomeni di sgrotamento (fig. 8); per tali motivi, nel passato, si sono formate nell'area numerose doline di crollo, la cui morfologia risulta oggi obliterata dai numerosi interventi antropici (De Filippis, 2003). È stato osservato che gli stessi agricoltori ritombano tali voragini, quando di limitata estensione superficiale, creando dei cumuli di terra a testimonianza dei crolli, ma non eliminando affatto il rischio.

Durante il 2001 è stata inoltre registrata una sequenza sismica nel Bacino delle Acque Albule che ha interessato ben quattro aree ad alta densità abitativa: Guidonia, Colle Fiorito, Villalba di Guidonia e Tivoli Terme. Ciò, oltre a creare il panico tra gli abitanti, ha creato nuovo interesse scientifico da parte degli enti di ricerca a tal punto che l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia ha installato alcune stazioni digitali per monitorare il fenomeno. Sebbene gli eventi furono contraddistinti da una bassa magnitudo (< 3.0), i fenomeni locali come boati e forti vibrazioni del terreno gettarono per mesi nel panico gli abitanti dell'area, preoccupando notevolmente le autorità. Si rese necessario quindi uno studio dell'area dal punto di vista sia macrosismico sia microsismico. Per quanto riguarda la prima metodologia, furono fatte interviste agli abitanti, permettendo in tal modo di definire le isosisme degli eventi, mentre per quanto riguarda la seconda metodologia, furono processati i dati provenienti dalla rete sismologica installata. La sinergia delle due metodologie ha permesso di capire che gli eventi sono stati originati da due differenti strutture sismotettoniche, una con direzione anti-appenninica e l'altra con direzione N-S (Gasparini et al., 2002).

Nel corso dello studio sismologico, l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia ha reperito inoltre alcune notizie storiche sull'area. Già nella seconda parte del XVII secolo, l'area di Colle Fiorito era conosciuta come «Valle Stregata», a causa dei rumori provenienti dal sottosuolo e ben percepiti dagli abitanti.

Durante gli eventi sismici del 2001 la popolazione ha riferito di alcuni fenomeni naturali certamente collegati a strutture ge-



Fig. 8 - Sinkhole nella formazione della testina (da Faccenna et al., 2008; foto F. Poggi).

ologiche del sottosuolo non in equilibrio. Subito dopo l'evento del 22 giugno, gli abitanti di Pantano hanno osservato uscite di gas da fratture del terreno in punti distanti tra di loro anche 200 m. Le venute gassose erano inodori, rumorose e con consistente vapore ed alcuni tecnici le hanno interpretate come emissioni di CO₂, escludendo peraltro la presenza di zolfo e metano.

Un secondo fenomeno fu osservato in coincidenza con l'evento sismico del 12 luglio 2001. L'ufficio tecnico delle Terme di Tivoli in quell'occasione registrò una consistente diminuzione nella portata normale delle sorgenti delle Acque Albule. In agosto, in occasione di un nuovo evento sismico, si osservò che la portata delle sorgenti era tornata a valori normali (3250 l/s).

Tali eventi sono stati caratterizzati da una profondità ipocentrale assai modesta, compresa fra 300 m e 800 m (Gasparini et al., 2002). Gli eventi registrati in giugno, luglio, agosto, settembre, ottobre 2001 e gennaio 2002 sembrano essere causati da una struttura sismotettonica con direzione anti-appenninica, mentre l'evento di novembre, con una magnitudo simile agli altri ($M=2.6$), sembra essere generato da un lineamento strutturale con direzione N-S (fig. 9), con tutta probabilità la faglia trascorrente riconosciuta già nel lavoro di Faccenna et al. (1994).

Da notare che gran parte della popolazione di Tivoli Terme ha denunciato un aumento repentino delle deformazioni negli abitati a seguito di questa crisi sismica.

SUBSIDENZE, LAGHETTI E FAGLIE

A causa dei numerosi dissesti geologici verificatisi dal 2001 (terremoti, *sinkhole* e subsidenze) l'area degli abitati di Villalba di Guidonia e Tivoli Terme è stata oggetto, dal 2004 al 2006, di approfonditi studi di carattere geologico, geomorfologico, strutturale, idrogeologico, geofisico e geochimico. Tali ricerche, promosse dall'Ufficio Geologico e Difesa del Suolo della Regione

Lazio, sono state prevalentemente eseguite dalle università romane "Roma Tre" e "La Sapienza". Il principale problema che all'epoca scatenò l'intervento delle istituzioni pubbliche e degli enti di ricerca, oltre all'interesse scientifico, fu l'insorgere di cedimenti del terreno con innesco di evidenti problemi strutturali negli edifici.

Il Dipartimento di Scienze Geologiche dell'Università Roma Tre, coordinato dal Prof. Renato Funicello, ha programmato le proprie ricerche partendo innanzitutto da un dato incontrovertibile quale l'analisi della "fotografia" del territorio prima della presenza umana. Le osservazioni sulle foto aeree del 1943, affiancate alla preziosa cartografia pervenutaci dai lavori condotti nell'immediato dopoguerra da Maxia (1950b), hanno permesso di ricostruire l'assetto geomorfologico originale del BAA (Funicello et al., 2005a e 2005b; Faccenna et al., 2006).

Dall'osservazione delle foto aeree del 1943, in particolare, è evidente come l'area fosse interessata da depressioni naturali, probabilmente testimonianza di antichi bacini lacustri, del tutto simili ad altri presenti fino a pochi anni fa nella piana (Lago dell'Inferno, Lago dei Tartari, ecc.). Queste depressioni, probabilmente associate a processi di carsismo nel plateau di travertino, sono delimitate da bordi netti e sono in genere di forma circolare o sub-circolare con dimensioni variabili. In particolare, gruppi di depressioni morfologiche circolari assimilabili a quelle appena descritte ricadono in corrispondenza dei centri abitati di Villanova di Guidonia (a nord dell'acquedotto ACEA) e di Castell'Arcione, ma in queste zone non sono noti ad oggi fenomeni di dissesto analoghi a quelli che interessano alcuni edifici di Villalba di Guidonia e di Tivoli Terme. Le foto aeree evidenziano inoltre notevoli concentrazioni di depressioni carsiche anche in altre zone del bacino, come per esempio in corrispondenza del Lago dell'Inferno e all'interno dell'attuale area estrattiva (in special modo nella zona compresa tra la S.S. n° 5 Tiburtina e l'acquedotto dell'ACEA); tuttavia, va rilevato che quest'ultimo

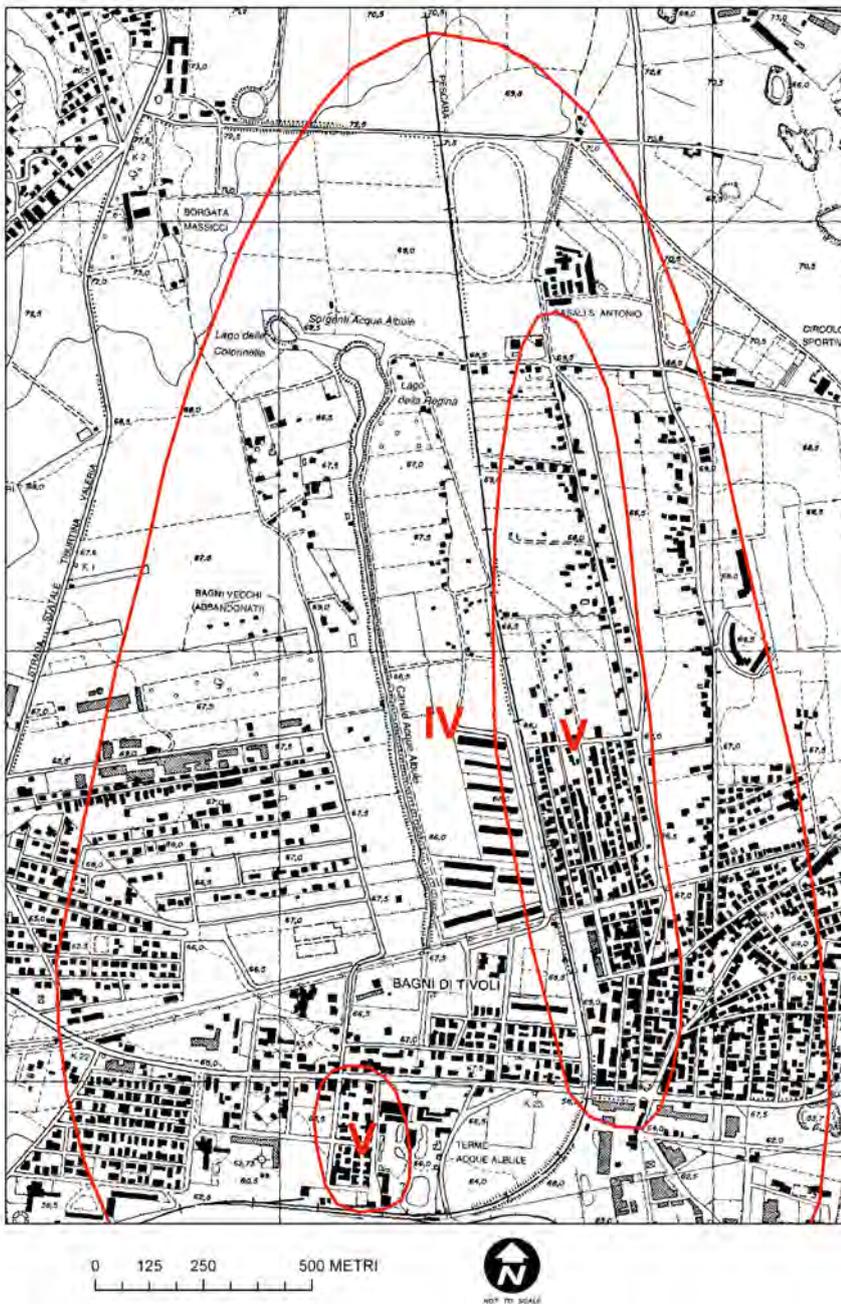


Fig. 9 - Isoisoste dell'evento sismico del 7 novembre 2001 (da Faccenna et al., 2006, modificato da Gasparini et al., 2002).

gruppo di strutture carsiche oggi non esiste più perché rimosso dall'attività estrattiva.

In alcuni settori del bacino è stato possibile riconoscere una stretta correlazione tra queste depressioni morfologiche e le faglie. In particolare, l'allineamento delle depressioni, unito all'osservazione delle foto aeree e al rilevamento geologico-strutturale in cava, ha permesso di riconoscere in un'area a nord delle sorgenti delle Acque Albule un lineamento morfotettonico che sembra svilupparsi in direzione SW-NE dal Lago San Giovanni fino alla Via di Pantano.

Altri elementi morfologici riconosciuti dall'analisi delle foto aeree del 1943, elementi oggi non più presenti poiché cancellati dalle attività industriali e agricole, sono delle particolari forme circolari che dall'osservazione stereoscopica risultano essere piccoli tronchi di cono rilevati rispetto alle aree circostanti, aventi diametro di base non superiore ai 5 m. Ne sono stati riconosciuti

due gruppi principali nel settore settentrionale del bacino, uno posto subito a sud della pista dell'aeroporto militare di Guidonia ed un altro, allineato in direzione NNE-SSW, all'interno dell'abitato di Colle Fiorito (De Filippis et al., 2013b). Queste morfologie sono state riconosciute in numero minore anche nel settore meridionale del bacino, in corrispondenza del centro di Villalba di Guidonia (gli anziani del posto ancora chiamano quell'area "Il bollente") e nella zona immediatamente a nord della S.S. n° 5 Tiburtina in cui oggi si trovano le cave più estese di tutta l'area. Tali forme sono state interpretate come punti di risorgenza di fluidi geotermali, per la loro geometria legata alla venuta a giorno di emissioni a bassa entalpia (fig. 10).

Le foto aeree hanno permesso di evidenziare, soprattutto dove oggi sono presenti edifici (fig. 13), molteplici depressioni naturali testimonianza di antichi bacini lacustri. In particolare, all'interno di una vasta area depressa che interessa in parte gli

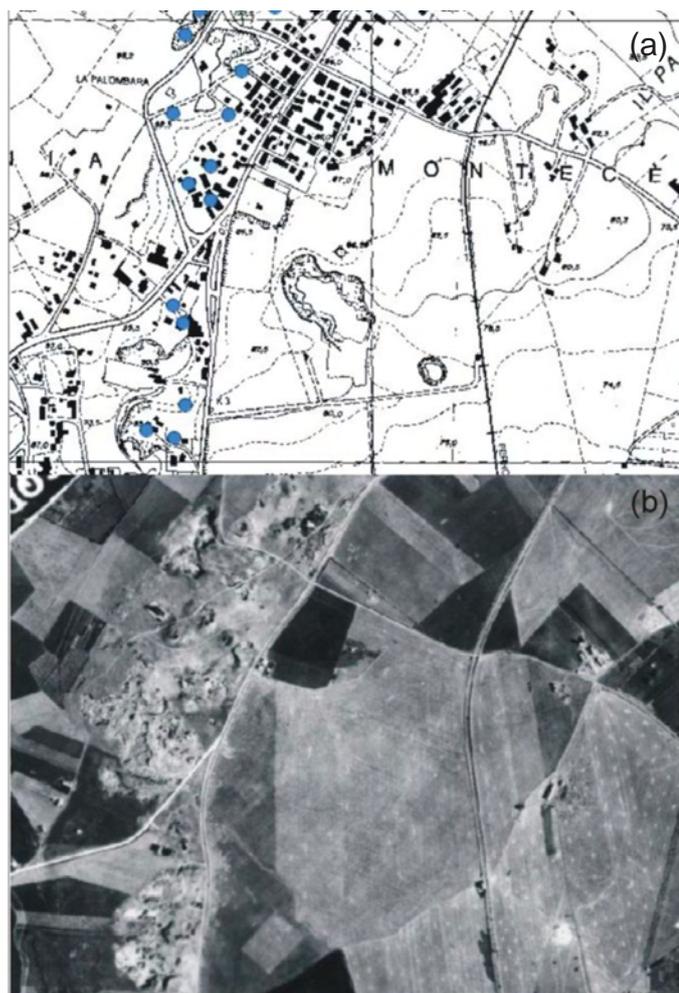


Fig. 10 - (a) Esempio di allineamenti di punti di risorgenza di fluidi geotermali nei pressi dell'abitato di Colle Fiorito. (b) Foto aerea della R.A.F. relativa all'area. Da Funicicello et al., 2005b. In entrambe le mappe (a) e (b) il nord è parallelo al bordo verticale dell'immagine.

abitati di Tivoli Terme e Villalba di Guidonia, sono riconoscibili numerose depressioni morfologiche, alcune delle quali oggi ricadono proprio in corrispondenza degli edifici interessati dai fenomeni di dissesto (fig. 12). A volte, esse sono ravvicinate a tal punto da non essere più riconoscibili singolarmente e sembrano fondersi in rapporti di coalescenza (fig. 12). Queste morfologie furono identificate anche da Maxia (1950b), il quale rinvenne in prossimità dell'area di studio antichi depositi lacustri da essiccamento dei travertini e ripiani tartarosi (fig. 11).

DISCUSSIONI E CONCLUSIONI

I depositi di travertino geotermale quaternario affioranti nel Bacino delle Acque Albule costituiscono un importante archivio stratigrafico, tettonico e climatico, nonché un interessante record temporale dei fenomeni di interazione tra faglie e fluidi profondi (Faccenna et al., 2008; De Filippis, 2012; De Filippis et al., 2013a, 2013b). Anche qui le sorgenti termali associate ai travertini, come avviene in altre parti del mondo (es. Pamukkale, Turchia; Bridgeport, USA; Mammoth Hot Springs, USA; Toscana meridionale, Italia), risultano allineate lungo o in prossimità di sistemi di faglie attive (Bargar, 1978; Hancock et al., 1999;



Fig. 11. Particolare della carta di Maxia (1950b). Il nord della mappa è parallelo al bordo verticale dell'immagine.

Uysal et al., 2007, 2009; Brogi and Capezzuoli, 2009; Capezzuoli et al., 2010; De Filippis et al., 2012; De Filippis & Billi, 2012). Spesso, in concomitanza di eventi sismici, le sorgenti possono subire variazioni idrogeologiche significative quali diminuzione o aumento della portata, degassing repentino, o improvviso intorbidimento delle acque (La Vigna et al., 2012). L'assetto tettonico dell'area è contraddistinto da un sistema di faglie trascorrenti destre N-S con componente anche normale e da faglie transtensive NE-SW (Faccenna et al., 1994). Queste ultime, in particolare, sono ben testimoniate dallo stato fessurativo riconosciuto nei travertini, nel settore più settentrionale dell'area estrattiva. In cava è stato possibile verificare come queste discontinuità, in regime distensivo, siano una via preferenziale alla risalita di fluidi profondi. E' proprio lungo questi lineamenti tettonici, infatti, che si originano tuttora fenomeni quali sorgenti, *sinkhole*, doline, depressioni morfologiche e formazione di piccoli bacini lacustri.

L'integrazione dei dati geologici, strutturali, geofisici, idrogeologici, e geomorfologici ha permesso di definire la natura del substrato su cui poggiano gli edifici danneggiati di Tivoli Terme e Villalba di Guidonia. Questi i principali risultati ottenuti:

(1) L'analisi dei numerosi sondaggi ha messo in luce come le depressioni carsiche dell'area siano riempite da spessori notevoli (sino ad un massimo di 13 m) di depositi lacustri e/o torbe.

(2) L'analisi strutturale ha mostrato come l'area interessata dai dissesti degli edifici sia localizzata in corrispondenza della discontinuità principale a direzione N-S. Il sistema di fratturazione legato a questo elemento tettonico risulta avere primaria importanza nel convoglio di fluidi geotermali verso la superficie.

(3) I dati geofisici strumentali, in particolare la tomografia sismica, hanno permesso di evidenziare in dettaglio come nell'area danneggiata l'interfaccia tra depositi travertinosi lapidei e la copertura sia accidentata con geometrie connesse con strutture carsiche sepolte.

(4) Lo studio della sismicità storica ha evidenziato che le strutture tettoniche presenti nell'area sono ancora attive, localizzando microsismicità, durante la crisi sismica del 2001-2002, anche nell'area di Tivoli Terme.

(5) La correlazione dei dati idrogeologici, di prelievo e piezometrici acquisiti dal laboratorio di idrogeologia dell'Università Roma Tre (responsabile scientifico: Prof. G. Capelli) ha portato a valutare gli effetti potenziali della dinamica degli ac-



Fig. 12 - (a) Tematismi morfologici creati in ambiente GIS ottenuti dall'analisi della cartografia del Prof. C. Maxia (in celeste: suoli a struttura poligonale di disseccamento lacustre nei travertini; in verde: suoli a "pozzette" e a ripiani tartarosi), e dalle foto aeree della R.A.F. del 1943 (in rosso: aree depresse). (b) Foto aerea della R.A.F. relativa all'area di studio. Da Funicello et al., 2005a e 2005b.



Fig. 13 - Evidente cedimento differenziale in un edificio presso Villalba di Guidonia. Si noti che il piano inferiore è più ruotato rispetto al superiore lasciando ipotizzare che il cedimento sia avvenuto in corso di costruzione. L'abitazione si trova in corrispondenza di una delle depressioni morfologiche riconosciute dall'analisi delle foto aeree (foto L. De Filippis).

quiferi nelle aree interessate dallo studio. L'assetto idrogeologico prevede una circolazione più superficiale, in acquifero libero, coincidente con il complesso dei travertini e una circolazione più profonda, in pressione, confinata all'interno del complesso carbonatico mesozoico sottostante. Quest'ultimo rimane in continuità idraulica con i depositi sabbioso-limosi pleistocenici, in corrispondenza di finestre di erosione e/o di discontinuità tettoniche.

(6) L'analisi delle foto aeree del 1943 ha evidenziato la presenza di diffusi processi carsici quali *sinkhole*, allineati in direzione N-S (lungo la discontinuità principale), successivamente mascherati o sepolti dallo sviluppo edilizio di Tivoli Terme e Villalba di Guidonia. Gli edifici più danneggiati sono risultati essere edificati in corrispondenza di queste depressioni.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia E. Capezuoli per la gentile e costruttiva revisione del manoscritto.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Argentieri A., Capelli G., Di Filippo M., Loretelli S., Salvati R., Toro B., Vecchia P. (2002) - Il Sinkhole di Marcellina (Roma) del 25/1/2001: primi dati stratigrafici, idrogeologici e geofisici. Atti del Convegno "Dissesto idrogeologico". Roma 5 giugno 2001. Accademia Nazionale dei Lincei, 181, 243-255, 5 Figg.
- Aydin A., Nur A. (1982) - Evolution of pull-apart basins and their scale independence. *Tectonics*, 1, 91-105.
- Bargar K.E. (1978) - Geology and thermal history of Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, Wyoming. U. S. Geological Survey Bulletin 1444, 1-55.
- Billi A., Valle A., Brilli M., Faccenna C., Funicello R. (2007) - Fracture-controlled fluid circulation and dissolutional weathering in sinkhole-prone carbonate rocks from central Italy. *Journal of Structural Geology*, 29, 385-395.
- Broggi A., Capezuoli E. (2009) - Travertine deposition and faulting: the fault-related travertine fissure-ridge at Terme S. Giovanni, Rapolano Terme (Italy). *International Journal of Earth Sciences* 98, 931-947.
- Capelli G., Cosentino D., Raffi R., Ventura G. (1987) - Modalità di ricarica ed assetto strutturale dell'acquifero delle sorgenti Capore - S. Angelo (Monti Lucretili - Sabina meridionale). *Geol. Romana*, 26, 4 19-447.
- Capezuoli E., Gandin A., Sandrelli F. (2010) - Calcareous tufa as indicators of climatic variability: a case from the Southern Tuscany (Italy). In: Pedley, M., Rogerson, M. (Eds.), *Tufas, Speleothems and Stromatolites: Unravelling the Physical and Microbial Controls*: Geological Society, London, Special Publications, 336, pp. 263-281.
- Caramanna G. (2001) - L'immersione scientifica avanzata nelle ricerche geologiche subacquee. Un caso di studio: il sinkhole Pozzo del Merro. *Rivista della Federazione Italiana di Scienze della Terra*, 7, 28-29.
- Chafetz H.S., Folk R.L. (1984) - Travertines depositional methodology and the bacterially constructed constituents. *Journ. Sed. Petr.*, 54, 289-316.
- De Filippis L., Massoli Novelli R. (1998) - Il travertino delle Acque Albule (Tivoli): aspetti geologici ed ambientali. *Geologia dell'Ambiente, Bollettino della Società Italiana di Geologia Ambientale*, 2, 6-13.
- De Filippis L. (2003) - Analisi territoriale in ambiente GIS: rapporti tra georisorse ed attività antropiche nella Piana di Tivoli. Tesi inedita del Master di 2° livello in "Sistemi informativi territoriali, Telerilevamento, Fotointerpretazione e Cartografia Geoambientale". Dipartimento di Scienze Geologiche, Università degli Studi "Roma Tre" (anno accademico 2001-2002).
- De Filippis L. (2012) - From fissure ridge to travertine plateau: tectonic and climatic control on the deposition of quaternary travertines in geothermal areas. PhD thesis, Università degli Studi Roma Tre, April 2012.
- De Filippis L., Billi A. (2012) - Morphotectonics of fissure ridge travertines from geothermal areas of Mammoth Hot Springs (Wyoming) and Bridgeport (California). *Tectonophysics* 548-549, 34-38.
- De Filippis L., Faccenna C., Billi A., Anzalone E., Brilli M., Özkul M., Soligo M., Tuccimei P., Villa I.M. (2012) - Growth of fissure ridge travertines from geothermal springs of Denizli basin, western Turkey. *Geological Society of America Bulletin* 124, 1629-1645.
- De Filippis L., Faccenna C., Billi A., Anzalone E., Brilli M., Soligo M., Tuccimei P. (2013a) - Plateau versus fissure ridge travertines from Quaternary geothermal springs of Italy and Turkey: interactions and feedbacks between fluid discharge, paleoclimate, and tectonics. *Earth-Science Reviews*, 123, 35-52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.004>.
- De Filippis L., Anzalone E., Billi A., Faccenna C., Poncia P.P., Sella P., (2013b) - The origin and growth of a recently-active fissure ridge travertine over a seismic fault, Tivoli, Italy. *Geomorphology*, 195, 13-26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.04.019>.
- De Rita D., Funicello R., Parotto M. (1988) - Geological map of the Colli Albani volcanic complex, 1:50,000 scale. SELCA, Florence.
- De Rita D., Faccenna C., Funicello R., Rosa C. (1995) - Structural and geological evolution of the Colli Albani volcanic district. In: Trigila, R. (Ed.), *The Volcano of the Alban Hills*. Tipografia SGS, Rome, pp. 3371.
- Faccenna C., Funicello R., Montone P., Parotto M., Voltaggio M. (1994) - Late Pleistocene strike-slip tectonics in the Acque Albule Basin (Tivoli, Latium). *Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia*, Volume XLIX, Roma.
- Faccenna C., De Filippis L., Rossetti C., Poncia P.P. (2006) - Relazione finale del Gruppo di lavoro di Geologia strutturale - in "Indagini geologiche, strutturali, stratigrafiche e idrogeologiche nell'area di Tivoli Terme (RM) e Villalba di Guidonia (RM) (con 9 tavole fuori testo) - Ottobre 2006. Convezione di ricerca tra il Dip. di Scienze Geologiche dell'Università degli Studi "Roma Tre" ed il Centro per la Valorizzazione del Travertino Romano.
- Faccenna C., Soligo M., Billi A., De Filippis L., Funicello R., Rossetti C., Tuccimei P. (2008) - Late Pleistocene depositional cycles of the Lapis Tiburtinus travertine (Tivoli, Central Italy): possible influence of climate and fault activity. *Global and Planetary Change*, 63, 299-308 (doi:10.1016/j.gloplacha.2008.06.006).
- Faccenna C., Funicello R., Soligo M. (2010) - Origin and deposition of the Lapis Tiburtinus travertine. In: Funicello R. & Giordano G. (eds) *The Colli Albani Volcano*. Special Publications of IAVCEI, 3, 215-228. Geological Society of London.
- Funicello R., Faccenna C., De Filippis L., Rossetti C., Di Capua G., Peppoloni S. (2005a) - Indagini per determinare le cause dei dissesti agli edifici di Via Cesare Augusto, e aree limitrofe, in località Bagni di Tivoli: Assetto strutturale e microzonazione sismica. Regione Lazio.
- Funicello R., Faccenna C., Lombardi L., De Filippis L., Rossetti C. (2005b) - Indagini idrogeologiche e geomorfologiche per il piano d'area del Parco Metropolitan Termale di Tivoli, Guidonia e Roma (Con 9 tavole fuori testo) - Provincia di Roma.
- Gasparini C., Di Maro R., Pagliuca N., Pirro M., Marchetti A. (2002) - Recent seismicity of the "Acque Albule" travertine basin. *Ann. Geophys.*, 45, 537-550.
- Hancock P.L., Chalmers R.M.L., Altunel E., Çakir Z. (1999) - Travertines: using travertine in active fault studies. *Journal of Structural Geology* 21, 903-916.
- La Vigna F., Carucci V., Mariani I., Minelli L., Pascale F., Mattei M., Mazza R., Tallini M. (2012) - Intermediate-field hydrogeological response induced by L'Aquila earth-quake: the Acque Albule hydrothermal system (Central Italy). *Italian Journal of Geosciences* 131, 475-485. <http://dx.doi.org/10.3301/IJG.2012.05>.
- La Vigna F., Mazza R., Capelli G. (2013) - Detecting the flow relationships between deep and shallow aquifers in an exploited groundwater system, using long-term monitoring data and quantitative hydrogeology: the Acque Albule basin case (Rome, Italy). *Hydrological Processes*. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9494> (in press).
- Maxia C. (1950a) - Un interessante sondaggio nei travertini di Bagni di Tivoli (Acque Albule, fra Tivoli e Roma). *Contributi di Scienze Geologiche, Supp. Ric. SC. 20-22*, Univ. Roma.
- Maxia C. (1950b) - Il Bacino delle Acque Albule (Lazio). *Contributi di Scienze Geologiche, Supp. Ric. Sc. 20-27*, Univ. Roma.
- Uysal I.T., Feng Y., Zhao J.X., Altunel E., Weatherley D., Karabacak V., Cengiz O., Golding S.D., Lawrence M.G., Collerson K.D. (2007) - U-series dating and geochemical tracing of late Quaternary travertine in co-seismic fissures: Earth and Planetary Science Letters, v. 257 (3-4), p. 450-462.
- Uysal, I.T., Feng, Y., Zhao, J.X., Isik, V., Nuriel, P., Golding, S.D., 2009. Hydrothermal CO₂ degassing in seismically active zones during the Late Quaternary: *Chemical Geology*, v. 265, p. 442-454.