



Etruria*natura*

una finestra sul territorio

Periodico dell'Accademia dei Fisiocritici, Siena

Anno XII - 2017/2018

Numero speciale sulle acque termali

*Coltivare conoscenza
per creare coscienza*



ACCADEMIA DELLE SCIENZE DI SIENA DETTA DE' FISIOCRITICI



Etrurianatura
Accademia dei Fisiocritici onlus
piazzetta Silvio Gigli 2, 53100 Siena
tel. 0577 47002
www.fisiocritici.it
www.museofisiocritici.it

Registrazione

Autorizzazione del Tribunale di Siena
n. 747 del 19-1-2004

Direttore responsabile

Giannichele Galassi

Responsabili scientifici

Roberto Fondi
Roberto Mazzei

Comitato editoriale

Roberto Fondi
Università di Siena
Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e
dell'Ambiente, via Laterina 8, 53100 Siena

Folco Giusti
Università di Siena
Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e
dell'Ambiente, via Mattioli 4, 53100 Siena

Roberto Mazzei
Università degli Studi di Siena
Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e
dell'Ambiente, via Laterina 8, 53100 Siena

Luana Paulesu
Università di Siena
Dipartimento di Scienze della Vita,
via A. Moro 2, 53100 Siena

Claudia Perini
Università di Siena,
Dipartimento di Scienze della Vita,
via Mattioli 4, 53100 Siena



Realizzazione editoriale
Betti s.r.l.
Siena (Italia)
www.betti.it
redazione@betti.it

Nessuna parte di questa rivista può essere
riprodotta o trasmessa in qualsiasi forma o con
qualsiasi mezzo elettronico, meccanico o altro
senza l'autorizzazione scritta dei proprietari dei
diritti e dell'editore. L'editore è a disposizione
degli eventuali detentori di diritti che non sia stato
possibile rintracciare

© 2018 Accademia dei Fisiocritici Onlus, Siena

ISSN 2282-2607

In copertina
Foto di Giovanni Bencini – viale Europa,
comparto "I Pini", 42 - 58022 Follonica (GR)

Retro copertina
Foto di Giovanni Bencini

Sommario

Presentazione

Contributi

- 10 Geotermia nella Toscana meridionale: una risorsa importante da gestire con cura
Marcello Viti, Enrico Tavarnelli
- 25 *Acqua et ignis*: scienza e senso del sacro delle acque termali per gli Antichi
Carmelo Cannarella, Valeria Piccioni
- 39 Terapie termali nel trattamento delle malattie reumatiche: utopia o realtà?
Antonella Fioravanti, Sara Tenti, Sara Chelieschi, Mauro Galeazzi
- 50 Gli habitat, la flora e la fauna degli ambienti termali della Toscana meridionale
Leonardo Favilli, Andrea Benocci, Claudia Angiolini, Giuseppe Manganeli
- 56 La risorsa geotermica nella Toscana meridionale, con particolare riferimento alla bassa entalpia
Giacomo Biserni, Massimo Salleolini
- 76 Le acque delle miniere nelle Colline Metallifere
Alessandro Masotti
- 90 Le zone termali marine: un modello per studiare gli effetti dell'acidificazione degli oceani su popolazioni naturali
Ilaria Corsi, Elisa Bergami

La parola all'immagine

- 98 L'Uomo incontra l'armonia della Natura nelle colline senesi
Giovanni Bencini

Il punto della situazione

- 108 Le acque termominerali di Petriolo
Massimo Fanti, Massimo Salleolini
- 121 «Heri mattina principassemo a tuore el bagno». Quando i Gonzaga venivano a Petriolo
Riccardo Bassani
- 141 Il recupero dei Bagni di Petriolo
- 141 Bagni di Petriolo, un grande impegno di Italia Nostra
Mariarita Signorini
- 142 Un esperimento di conservazione e valorizzazione
Adriano Paoletta
- 146 Terme di pontefici e imperatori
Anna Guarducci, Andrea Arrighetti, Barbara Gelli
- 147 Risultati e prospettive per la ricerca archeologica
Serena Massa, Susanna Bartolotto, Piero Favino, Andrea Garzulino
- 149 Le varie fasi del recupero
Giovanni Minutoli, Stefano Bertocci
- 151 Un progetto per ricreare l'armonia del luogo
Massimo Bettini

Schede naturalistiche

- 154 La Tomba etrusca delle foglie d'oro nei pressi dell'area termale di Petriolo: tra Archeobotanica e Storia
Claudio Milanesi

Le acque termominerali di Petriolo

Massimo Fanti*, Massimo Salleolini**

* HERA S.r.l., Via Siria 102 - 58100 Grosseto (massimo.fanti@herasrl.it)

** Università degli Studi di Siena, Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente, Strada Laterana 8 - 53100 Siena (massimo.salleolini@unisi.it)

“Non dimentichiamo che il ciclo dell'acqua e il ciclo della vita sono una cosa sola”

Jacques-Yves Cousteau (1910-1997)

Fin dall'Antichità i popoli hanno utilizzato le acque per finalità terapeutiche. In pratica, con le acque termali e la loro storia nasce la medicina intesa come cura e mantenimento della salute: al di là della loro sacralità, nella Roma imperiale esse assunsero un'importanza tale che il benessere si configurava con il frequentare le terme. Il termine Spa, che attualmente indica le stazioni termali o in generale le aziende che forniscono cure idroterapiche, deriva dall'omonima cittadina belga nota dal XIV secolo per le sue acque minerali; tale termine è inteso anche come sigla del latino “Salus Per Aquam” o “Sanare Per Aquam” e cioè “la salute grazie all'acqua”. In Italia esistono numerosi complessi termali che hanno assunto fama in tutto il mondo, come ad esempio quelli di Abano in Veneto, Castrocaro in Emilia Romagna e Montecatini in Toscana. Nella Toscana meridionale, comunque, se ne trovano alcuni certamente non meno rinomati per la qualità delle loro acque e noti fin dall'epoca romana o addirittura etrusca, associati a peculiari circuiti idrogeologici in specifici contesti geologico-strutturali.

Introduzione

L'articolo vuole descrivere in modo sintetico le caratteristiche geologiche ed idrogeologiche della zona di Petriolo, le quali hanno portato ad emergere acque calde dotate di particolari proprietà terapeutiche. Queste acque erano già conosciute nell'antica

Roma; infatti, esse sono ricordate da Marco Tullio Cicerone nella sua “Orazione per Marco Coelio”, pochi decenni prima della nascita di Cristo (Cambria, 2013). Per volontà della Signoria di Siena la località iniziò ad attrezzarsi a stazione termale a partire dal 1266; l'antico edificio è ancora visibile su un lato del ponte che attraversa il T. Farma (Foto 1). Nel 1325 il medico Gentile da Foligno scrisse il *Tractatus de Balneis* dove consigliava di curarsi con le acque di Petriolo a coloro che erano affetti da malattie respiratorie e dolori articolari. Lo stesso fece Michele Savonarola (nonno del più celebre Girolamo), medico naturalista del tardo trecento, che ne esaltava le proprietà lenitive nei confronti dei dolori e “delle sofferenze fredde e umide delle membra”. Nel 1404 fu iniziata la fortificazione delle terme con lo scopo non solo di salvarle dalle invasioni, ma anche di tutelare le illustri personalità che vi si recavano (ad esempio, Giovanni e Bernardo dei Medici nel 1443 e i Gonzaga nel 1461). Fra tutte le frequentazioni spicca però il Pontefice Pio II (al secolo Enea Silvio Piccolomini), che per curare un'artropatia vi si recò per la prima volta il 2 giugno 1460. Oggi Petriolo presenta bagni termali fruibili liberamente (Foto 1) e stabilimenti attrezzati anche con strutture alberghiere.

Cenni geologici, idrogeologici e geomorfologici

La Val di Farma è da considerarsi un territorio di elevato pregio ambientale (Foto 2), la cui



Foto 1. I Bagni di Petriolo. A sinistra: le antiche terme con la sovrastante chiesa, entrambe di origine medievale. A destra: le acque calde (ipertermali, secondo Marotta & Sica, 1929), di cui si può usufruire gratuitamente, provengono dal sottosuolo mediante un pozzo naturalmente fluente ed alimentano vasche in travertino sulle sponde e nel letto del Farma.

caratteristica principale è la varietà del paesaggio; accanto ad una rilevante presenza di aree di alta collina, dove ampie superfici sono ricoperte da boschi rigogliosi, vi sono molte aree rurali di media collina e numerosi sono i centri abitati anche se di piccole dimensioni (la densità di abitanti è piuttosto bassa). La zona di Petriolo, ubicata al confine tra i comuni di Monticiano (Siena) e di Civitella Paganico (Grosseto), è incisa dal corso inferiore del Torrente Farma e ben si inserisce nel contesto geologico, geomorfologico e paesaggistico della valle (i rilievi, che raggiungono altezze di 250 - 550 m e mostrano morfologie localmente dolci, appartengono al settore orientale della Dorsale Medio - Toscana, la quale confluisce in quella più ampia del Fiume Ombrone.

Dal punto di vista idrologico il bacino del Farma mostra i contributi unitari¹ medi annui più elevati (circa 16 L/s·km²) all'interno del bacino dell'Ombrone, con valori doppi rispetto a quello del Fiume Orcia (circa 7 L/s·km²). Esso è interessato da precipitazioni medie di circa 1.000 mm/anno, concentrate nel quadrimestre settembre-dicembre (oltre il 40 % del totale), con minimo a luglio e massimo a ottobre-novembre; le temperature medie annue sono di circa 13 °C, con un minimo di 5 °C a gennaio ed un massimo di 22

°C a luglio ed agosto. Seguendo la classificazione climatica di Thornthwaite (1948) e gli studi di Barazzuoli *et al.* (1993), la Val di Farma risulta compresa nei climi umidi B₁ e B₂ (indice di umidità globale compreso tra 20 e 60). La sua peculiare conformazione è all'origine di un vistoso fenomeno di inversione termica; è il fondovalle, infatti, ad essere colonizzato dal faggio, dall'acero di monte e persino dalla betulla, piante tipiche di altitudini maggiori (Studio Mattioli S.r.l., 2012).

Nelle gole del Farma, a monte di Petriolo, affiorano formazioni del Devoniano (Periodo dell'Era Paleozoica) risalenti a circa 400 milioni di anni fa, che sono anche le più antiche dell'Appennino. L'evoluzione tettonica post-collisionale e le differenti caratteristiche litologiche hanno prodotto l'attuale assetto del reticolo idrografico ed hanno influenzato e definito la circolazione idrica superficiale e profonda; la morfologia e la pendenza dei versanti rispecchiano le proprietà tecniche delle rocce affioranti.

I rilievi dell'area di Petriolo, facenti parte come detto della Dorsale Medio -Toscana, sono in prevalenza costituiti dalle formazioni del Verrucano e del basamento paleozoico (Unità Toscane metamorfiche) su cui poggiano il Calccare cavernoso (Falda Toscana) in lenti e le Unità Liguri tetto-

1. Il contributo unitario di un corso d'acqua è definito dal rapporto tra la portata media mensile (o annua) e la superficie del bacino sotteso; questa grandezza definisce pertanto il contributo che ogni km² di bacino fornisce in media, mese per mese (o annualmente), al deflusso del corso d'acqua considerato.



Foto 2. A sinistra, panoramica della Val di Farma offerta dal Ponte di Petriolo sulla superstrada Siena-Grosseto. A destra, il geotopo² "I Canaloni" (il nome deriva dalle profonde incisioni che l'acqua ha realizzato nella roccia altamente fratturata; Costantini *et al.*, 2015).

nicamente sovrascorse (Costantini *et al.*, 1988; Lazzarotto *et al.*, 2003; Aldinucci *et al.*, 2008; Engelbrecht, 2008) (Fig. 1). La particolare conformazione geologico - strutturale è dovuta alla presenza di due importanti strutture dirette: la prima, a direzione circa E-O, è denominata Faglia di Petriolo; la seconda, più o meno perpendicolare alla prima, è nota come Faglia delle Caldanelle (Figg. 1-2). Tali strutture dislocano e sollevano le formazioni più profonde del Dominio Toscano, come il Calcere cavernoso e le filladi del basamento metamorfico, rispetto alle sovrastanti Unità Liguri; è proprio la loro intersezione e la variabilità di composizione litologica, insieme ai processi di interazione fisico-chimica connessi al contatto delle acque sotterranee con le rocce attraversate, ad essere responsabili della circolazione, dell'immagazzinamento e della venuta a giorno delle acque termominerali di Petriolo. Da rilevare ancora che il regime tettonico distensivo ha facilitato la messa in posto, al di sotto delle Unità Toscane metamorfiche e ad una profondità di circa 1.800 m sotto

il livello del mare (Brogi *et al.*, 2005; Tinivella *et al.*, 2005; Brogi & Liotta, 2006), di masse intrusive rappresentanti la sorgente di calore del termalismo (sorgenti calde, emanazioni gassose, ecc.). Dal punto di vista geomorfologico, infine, è da ricordare che i principali dissesti dell'area sono dovuti a fenomeni gravitativi, di tipo "scorrimento rotazionale", su porzioni superficiali più o meno alterate (coltri eluvio-colluviali) del Verrucano e del Calcere cavernoso riscontrabili lungo corsi d'acqua molto incisi; sui versanti impostati nelle Argille con calcari a palombini, invece, si rilevano prevalentemente fenomeni di erosione calanchiva (in particolare nel tratto settentrionale).

Sistemi di flusso delle acque sotterranee

Gli ammassi rocciosi dell'area di Petriolo mostrano un'elevata eterogeneità composizionale e, soprattutto, una limitata estensione; di conse-

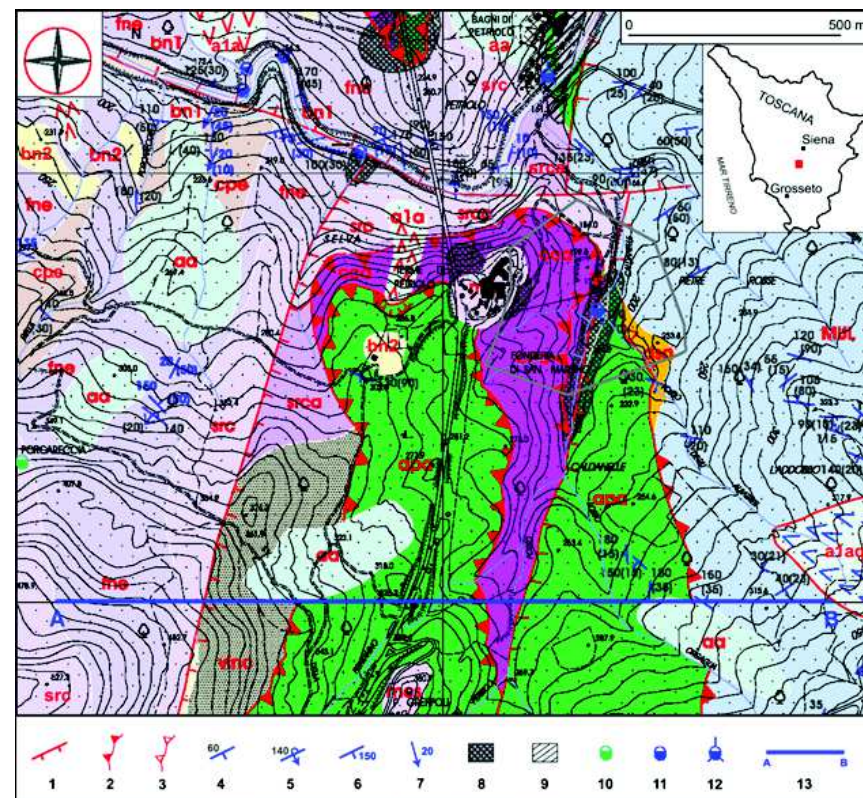


Fig. 1. Carta geologica dell'area di studio (Carta Geologica Regionale in scala 1:10.000 - Sezione 307120, a cura di Aquè *et al.*, 2005, ripresa con modifiche da Fanti, 2010). DEPOSITI CONTINENTALI POST-VILLAFRANCHIANI: **ala** = frana complessa in evoluzione (Olocene); **alaaq** = frana complessa senza indizi di evoluzione (Olocene); **aa** = depositi di versante (Olocene); **bn1** = depositi alluvionali (Olocene); **bn2** = depositi alluvionali (Pleistocene). DEPOSITI LACUSTRI E LAGUNARI POST-EVAPORITICI MESSINIANI: **mes** = breccie e conglomerati ad elementi di Calcere cavernoso (Turoliano sup.). UNITÀ LIGURI: **apa** = argilliti grigie e calcilutiti (Cretaceo inf.); **MUL** = marne (Cretaceo inf.); **dsd** = radiolariti con interstrati argillitici (Malm). FALDA TOSCANA: **cca** = Calcere cavernoso (Trias sup.). UNITÀ TOSCANE METAMORFICHE: **Verrucano Auc.** (**vinc** = metacalcari e metacalcari dolomitici, livelli di calcescisti e filladi carbonatiche (Carnico-?Norico); **src** = filladi quarzitiche-muscovitiche, con intercalazioni di metaconglomerati e filladi scure (Ladinico sup.-Carnico); **srca** = metaconglomerati quarzosi con matrice quarzitiche-filladica (Ladinico sup.-Carnico); **Ciclo mediotriassico inferiore** (**fne** = filladi muscovitiche e muscovitico-quarzitiche, localmente con livelli di metarenarie metaconglomerati (Anisico?); **Successione tarso-paleozoica** (**cpe** = siltiti scure e filladi con olistoliti carbonatici (Visseano sup.-Namuriano). **1** = faglia diretta; **2** = sovrascorrimento di 1° ordine; **3** = sovrascorrimento di 2° ordine; **4** = superficie di origine primaria; **5** = stratificazione a polarità rovescia; **6** = superficie di scistosità o clivaggio; **7** = asse di piega; **8** = zona cataclastica; **9** = zona di alterazione idrotermale; **10** = sorgente fredda; **11** = sorgente termominerale; **12** = pozzo per acqua; **13** = traccia della sezione geologica di Fig. 2.

2. Il termine geotopo è utilizzato diffusamente nell'ambito della gestione del territorio ed indica la più piccola unità spaziale geograficamente omogenea (cioè, una parte del paesaggio con caratteri e struttura relativamente uniformi); i geotopi definiscono quindi unità di territorio spazialmente limitate e distinguibili dalle circostanti essenzialmente in relazione a processi geologici e geomorfologici definiti (Poli, 1999; Moretti *et al.*, 2005).

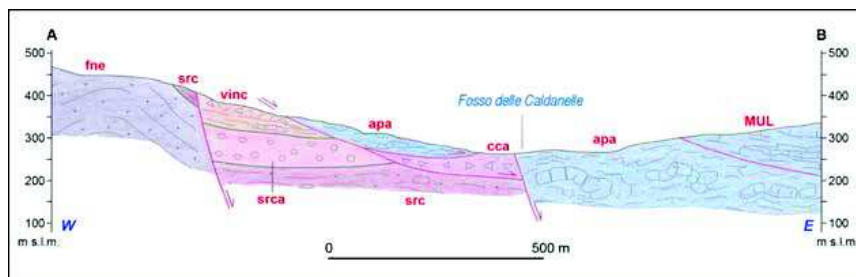


Fig. 2. Sezione geologica la cui traccia è riportata nella Fig. 1 (Carta Geologica Regionale in scala 1:10.000 - Sezione 307120, a cura di Aquè et al., 2005, ridisegnata); per la spiegazione delle simbologie si rimanda alla stessa figura.

guenza, non possono trovarvi sviluppo sistemi di flusso ampi con sorgenti di grossa portata. Qui di seguito sono evidenziate le peculiarità delle unità idrogeologiche distinte (Asticher, 2015):

- il Calcare cavernoso è da considerarsi la principale formazione acquifera in virtù dell'abbondante e diffusa presenza di pori, reticoli fessurativi e condotti di dissoluzione dovuti alle caratteristiche intrinseche della roccia (Gandin et al., 2000). Tutto ciò comporta condizioni di elevata permeabilità secondaria per fessurazione e carsismo, con valori di conducibilità idraulica³ che complessivamente possono arrivare anche a 10^{-4} m/s (Fiocco & Ilardo, 2012);
- nelle Unità Toscane metamorfiche la circolazione idrica sotterranea è quella tipica di un *hard-rock aquifer*, cioè limitata alle porzioni interessate da fessurazione e/o strato di alterazione super-

ficiale. La presenza di una matrice argilloscistosa permette inoltre di definire questi ammassi come acquitardi³, i quali localmente possono assumere le caratteristiche di modesti acquiferi, con una conducibilità idraulica variabile fra 10^{-6} e 10^{-7} m/s. Una situazione simile si riscontra nelle Unità Liguri dove la circolazione idrica attiva riguarda solamente la porzione litoide calcarea, con capacità di sostenere sorgenti piccole e irregolari;

- i depositi neogenici e quaternari sono terreni con permeabilità variabile per la diversa porosità efficace⁵. La discontinuità e la limitata estensione non consentono una buona circolazione idrica, salvo la possibile formazione di acquiferi epidermici nella coltre detritica.

Le locali acque sotterranee sono legate a due sistemi di circolazione idrica ben distinti. Il primo, più superficiale, è formato da acque freatiche.

3. La capacità di una roccia di lasciarsi attraversare dall'acqua, in condizioni normali di temperatura e pressione, viene definita permeabilità. Ad essa corrisponde un parametro che prende il nome di coefficiente di permeabilità o conducibilità idraulica (K); introdotto per la prima volta da H. Darcy nel 1856; tale parametro dipende sia dalla natura del fluido in movimento che dalla natura e conformazione della matrice solida.

4. Acquiferi = Unità idrogeologiche che consentono il moto e l'immagazzinamento dell'acqua; esse ammettono componenti di movimento sia orizzontale (con portate significative verso le opere di captazione) che verticale. Acquitardi = La componente orizzontale è pressoché trascurabile; possono però essere sede di importanti movimenti verticali. Inoltre, se potenti, possono rappresentare importanti serbatoi di immagazzinamento, da cui l'acqua può muoversi in verticale verso gli acquiferi. Acquiludi = Entrambe le componenti di moto sono trascurabili. L'acqua può essere presente sotto forma di ritenzione, non soggetta alla forza di gravità.

5. La porosità efficace corrisponde al volume dei vuoti intercomunicanti contenenti acqua estraibile per gravità in rapporto al volume totale della roccia.

che in stretta relazione con le precipitazioni ed è spesso contraddistinto da un chimismo bicarbonato-alcalino terroso con basse temperatura e salinità; è da sottolineare che alcune acque superficiali, classificabili come solfatiche (spesso calciche), sono relazionabili a semplici processi di interazione con le rocce serbatoio affioranti (Sorgenia Geothermal S.r.l., 2010) come la sorgente fredda Porcareccia (si veda in Fig. 1). Il secondo, più profondo, è legato alle acque meteoriche che attraverso la fratturazione delle rocce raggiungono i serbatoi termali dove subiscono significative variazioni fisico-chimiche (a questo sistema è associata l'emergenza delle acque dei

Bagni di Petriolo e delle Caldanelle); la loro rapida risalita, per spinte termo-artesiane lungo le zone di frattura con direzione appenninica ed antiappenninica, consente di mantenere una composizione solfato-alcalino terrosa ed una certa termalità accompagnata da emissioni gassose a CO_2 prevalente (Minissale, 2004).

Le emergenze termali naturali dell'area si riscontrano soprattutto lungo il Farma a monte dei Bagni di Petriolo (si veda in Fig. 1), dove si trova l'opera di captazione (Fig. 3, Foto 3) costituita da due pozzi; tale opera alimenta sia le terme libere che gli stabilimenti Terme di Petriolo e Petriolo Spa Resort. Il pozzo n. 1 ha attraversato litolo-

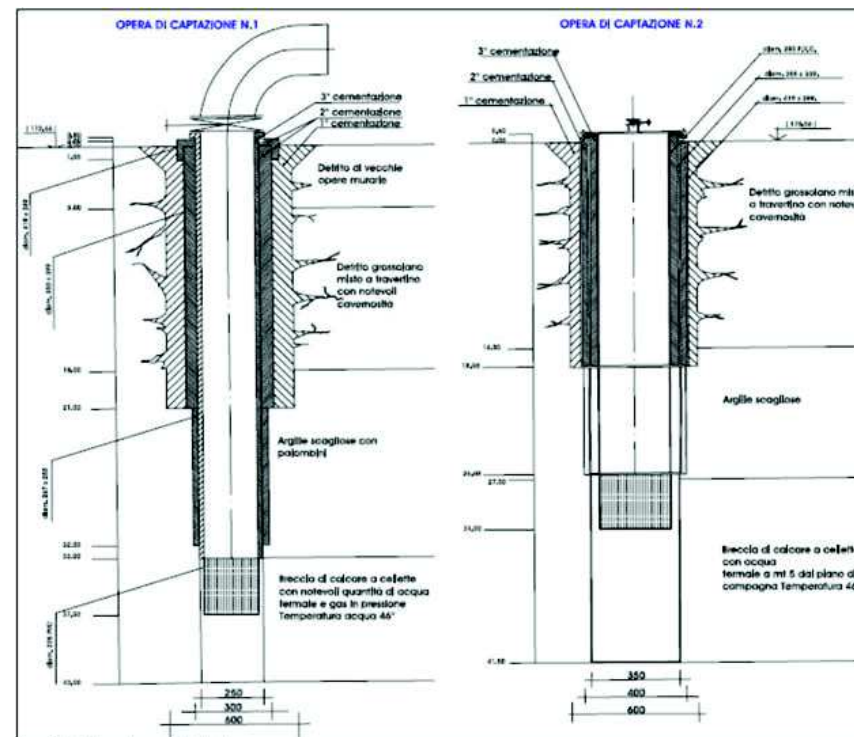


Fig. 3. Stratigrafia delle opere di captazione realizzate a Bagni di Petriolo da Trevisan & Raggi nel 1973 (ripresa da Fanti, 2010); dal pozzo n. 1 fuoriescono le acque termali che alimentano le vasche delle terme libere ed i vicini stabilimenti privati.



Foto 3. L'opera di captazione n. 1 di Bagni di Petriolo da cui fuoriescono le acque termali.

gie travertinose per 18 m, le Argille con calcari palombini fino a 33 m dal piano di campagna e, infine, la breccia di Calcare cavernoso fino a 43 m di profondità; da tale breccia, associata al piano di faglia, scaturirono spontaneamente a livello di boccapozzo circa 40 L/s di acqua termale alla temperatura di 46 °C (Trevisan & Raggi, 1978); la pressione della falda corrispondeva ad un livello piezometrico di 1,70 m sopra il boccapozzo. Poco diversa è risultata la situazione del pozzo n. 2 (portata di poco inferiore, tenendo chiuso il n. 1), per cui esso potrebbe essere utilizzato in alternativa al precedente.

L'altra significativa emergenza naturale è la Sorgente delle Caldanelle, la quale scaturisce in destra idrografica del fosso omonimo (si veda in Fig. 1). L'acqua termale fuoriesce da una frattura del Calcare cavernoso e viene captata da un'opera di presa costituita da un manufatto in cemento armato (Foto 4); una tubazione interrata consente a quest'acqua di attraversare il fosso e di immergersi in un altro manufatto (Foto 5), da cui sorte nuovamente con una portata di circa 8 L/s ed una temperatura di 35 °C (dati relativi al periodo novembre 2013 - gennaio 2015; Asticher, 2015). Essa può essere classificata come sorgente per "soglia di permeabilità sovrainposta" (Civita, 2005), trovandosi il Calcare cavernoso a contatto con la

formazione delle Argille con calcari palombini tramite una faglia diretta immergente ad est.

Acqua termale è stata riscontrata anche in altri sondaggi effettuati nella zona delle Caldanelle (Fig. 4); alle profondità di circa 40 m e 60-65 m essi hanno messo in evidenza serbatoi nel Calcare cavernoso (e breccia associata) confinati tra formazioni di bassa permeabilità quali le Argille con calcari palombini e le filladi del Verrucano. In tali sondaggi i Professori Trevisan e Raggi dell'Università di Pisa eseguirono nel 1972 alcune prove di emungimento di lunga durata (portata complessiva di 32 L/s) aventi l'obiettivo di verificarne l'impatto sull'erogazione della Sorgente Caldanelle; durante il pompaggio quest'ultima

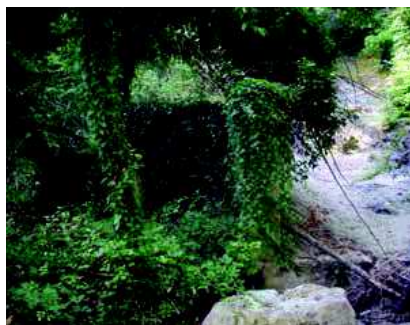


Foto 4. Opera di captazione della sorgente termale delle Caldanelle.



Foto 5. Manufatto, in sinistra idrografica, dal quale escono le acque termali della Sorgente Caldanelle.

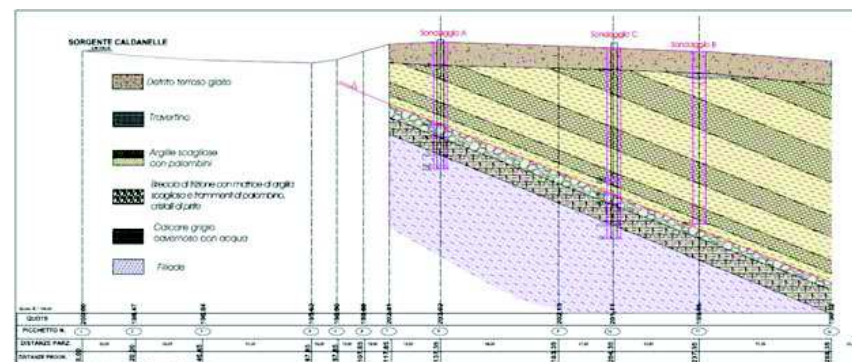


Fig. 4. Sezione geologica ricostruita da Trevisan & Raggi nel 1972 tramite sondaggi effettuati in località Le Caldanelle (ripresa da Fanti, 2010).

diminui la portata fino ad esaurirsi totalmente, a dimostrazione che la sua alimentazione proveniva direttamente dai sistemi di flusso presenti nel Calcare cavernoso.

In definitiva, secondo le risultanze ottenute dalle varie indagini, Trevisan & Raggi (1978) affermarono che "le acque termali dei Bagni del Petriolo provengono da una circolazione profonda, in pressione, che risale in superficie lungo una grande faglia con piano inclinato verso est. Tale discontinuità tettonica è caratterizzata dalla presenza sui due lati di formazioni molto diverse fra loro, per età e caratteristiche litologiche, rappresentate dalle filladi del Verrucano a ovest e un complesso di argille scagliose con intercalazioni di strati calcarei a est. Tra queste due pareti impermeabili l'acqua termale risale attraverso la breccia di frizione della faglia costituita in prevalenza da calcari, facenti parte della formazione del Calcare cavernoso".

Seguendo l'approccio di Gargini *et al.* (2008), la Sorgente Caldanelle rientra tra i "Sistemi di flusso regionali di bassa quota" che sono caratterizzati da portate importanti ed alimentati da strutture tettoniche regionali; le emergenze termali, che scaturiscono dal Verrucano lungo il T. Farma a monte del viadotto, sono classificabili invece come "Sistemi locali di flusso di minor grado gerarchico di bassa quota" in quanto mostrano una limitata espansione areale e portate ridotte (Asticher, 2015). Per confronto, la Sorgente Por-

careccia è da definirsi una sorgente per "limite di permeabilità indefinito" (Civita, 2005), trovandosi in un complesso litologicamente omogeneo come il Verrucano ed essendo quindi associata ad una zona a permeabilità maggiore, rispetto all'intorno, dovuta a una maggiore fratturazione; essa rientra tra i "Sistemi locali di flusso di versante" dove si posizionano sorgenti di piccola e media portata (max 1 L/s).

Aspetti geochemici delle acque termominerali

Le analisi chimiche effettuate nel tempo sull'acqua risalente nel pozzo dei Bagni di Petriolo (Fig. 5) indicano una facies tipicamente solfato-bicarbonato-calcico-magnesiaca (la componente dominante è costituita dalla coppia ionica $Ca^{++}SO_4^-$) con una buona stabilità composizionale (ARPAT, 2014); i dati del contenuto in ione solfato mostrano concentrazioni medie superiori a 1.500 mg/L, mentre quelle dello ione calcio rimangono intorno a 800 mg/L. Tale chimismo è comunemente interpretato come il riflesso di una circolazione idrica nelle formazioni carbonatico-anidritiche del Mesozoico della Serie Toscana, quali la Formazione anidritica di Burano - Calcare cavernoso (Bencini *et al.*, 1977; Panichi, 1982; Minissale *et*

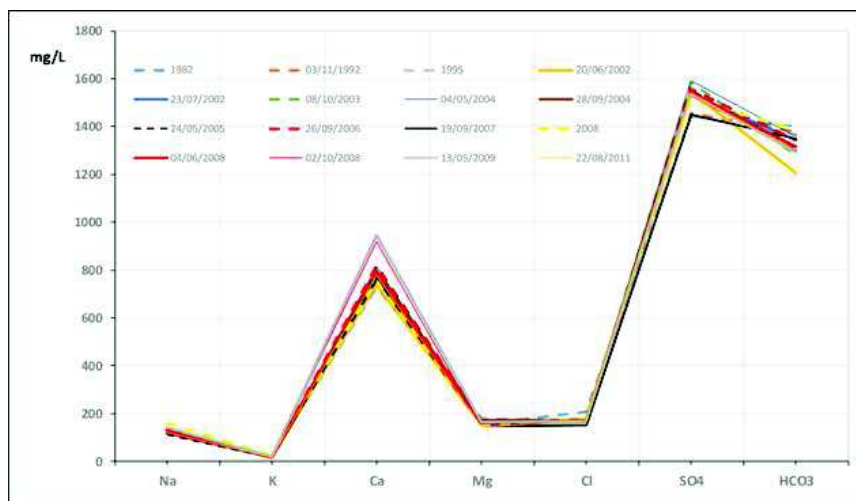


Fig. 5. Andamento temporale delle concentrazioni degli ioni maggiori nell'acqua termominerale emergente dal pozzo dei Bagni di Petriolo. Dati ripresi da Panichi (1982), Baldi (2013) e ARPAT (2014).

al., 1997); altri esempi molto noti di questo tipo sono costituiti dalle sorgenti di Bagno Vignoni e delle Terme di Saturnia.

Anche la composizione chimica dell'acqua della Sorgente Caldanelle ricade nel campo solfato-calcico, con valori medi degli ioni solfato e calcio rispettivamente intorno a 1.200 mg/L e 500 mg/L, per cui può essere interpretata come il riflesso di un'analoga circolazione idrica. Il confronto con le risultanze analitiche dei Bagni di Petriolo (Fig. 6) consente però di evidenziare che quest'ultime presentano una maggiore salinità totale (circa 4,1 g/L rispetto a 2,1 g/L) e soprattutto un più alto contenuto di sodio, potassio e cloruri, indicativi di un circuito più profondo e di una risalita rapida caratterizzata da mescolamenti trascurabili con acque appartenenti a circuiti più superficiali. Al contrario, le acque delle Caldanelle subiscono un miscelamento con acque epidermiche più fredde

(di natura meteorica recente), circolanti nel Calcare cavernoso, che provoca anche un abbassamento della temperatura di emergenza (35 °C, rispetto ai 46 °C dei Bagni di Petriolo); ciò è avvalorato pure dal comportamento della portata, che è soggetto a periodi di morbida (massima circa 15 L/s) e di magra (minima circa 4 L/s) influenzati dalle precipitazioni meteoriche stagionali (dati relativi al periodo novembre 2013 - gennaio 2015; Asticher, 2015). Queste differenti composizioni chimiche si riflettono nelle diverse deposizioni di sali all'emergenza; infatti, le acque dei Bagni di Petriolo provocano marcate concrezioni calcaree intorno al boccapozzo (zona terme libere), mentre quelle delle Caldanelle non presentano alcun tipo di deposito calcareo né in corrispondenza dell'opera di presa, né nelle sue immediate vicinanze.

Le composizioni chimica ed isotopica delle acque termominerali del *Graben*⁶ di Siena-Radi-

6. Termine proveniente dalla letteratura scientifica tedesca che in geologia strutturale indica una fossa tettonica, ovvero una porzione di crosta terrestre sprofondata a causa di un sistema di faglie dirette (o normali) in regime tettonico distensivo. Tra due fosse adiacenti si distingue una zona di crosta terrestre relativamente sollevata chiamata *Horst* (o pilastro tettonico).

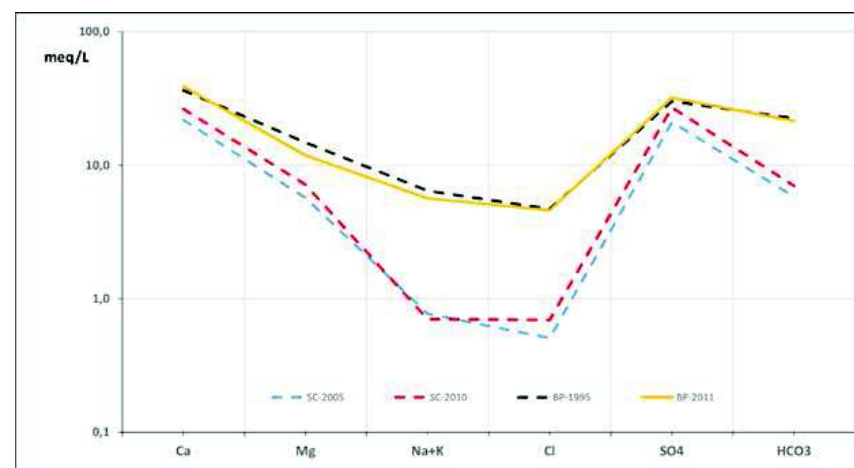


Fig. 6. Confronto tra le composizioni chimiche delle acque dei Bagni di Petriolo (BP) e della Sorgente Caldanelle (SC). Dati ripresi da Fanti (2010), Baldi (2013) e ARPAT (2014).

cofani (Panichi *et al.*, 1979; Panichi, 1982), nel quale ricadono quelle della zona di Petriolo, indicano che le diverse emergenze derivano da circolazioni idriche profonde sostanzialmente differenti e relazionabili con le caratteristiche idrogeologiche dei vari settori della struttura, pur avendo tutte una comune origine meteorica. In sintesi (Fig. 7):

- sui fianchi del *Graben* si sviluppano circolazioni idriche nelle serie permeabili costituite dalle formazioni carbonatico-anidritiche mesozoiche della Falda Toscana e, in minor misura, dall'Unità di Monticiano-Roccastrada (rappresentata essenzialmente dal Verrucano); queste circolazioni possono interessare solo marginalmente la fossa poiché alimentano numerose sorgenti con chimismo sia bicarbonato-calcico, come quelle di S. Giovanni (Rapolano Terme), che solfato-calcico come quelle di Petriolo, dell'Acqua Santa (Chianciano) e di Bagno Vignoni (S. Quirico d'Orcia);
- dagli stessi fianchi, ed in particolare da quello sud-occidentale, si sviluppa anche una circola-

zione idrica relativamente più profonda che va ad interessare le rocce del basamento cristallino e che alimenta alcune sorgenti, di varia termalità e con chimismo clorurato-alcocalco, localizzate sia all'interno del *Graben* (ad esempio, l'Acqua Borra di Castelnuovo Berardenga) che ai suoi limiti sud-occidentali (ad esempio, le sorgenti Mortaione di Monticiano e Collalli di Montalcino) e perciò denominate "acque del *Graben*" da Panichi *et al.* (1979). Secondo Duchini *et al.* (1992), il chimismo di queste sorgenti interne non dipende dall'interazione con le rocce del basamento, ma rappresenta il risultato del miscelamento tra acque provenienti dalle formazioni carbonatico-anidritiche ed acque marine fossili contenute negli spessi sedimenti argillosi marini del Pliocene.

Questa differenza esistente nella profondità dei vari circuiti si traduce non solo in una differenziazione dei contenuti salini delle acque termominerali, ma anche in una sostanziale diversità delle temperature che esse hanno assunto in profondità; le composizioni chimiche e isotopiche delle acque

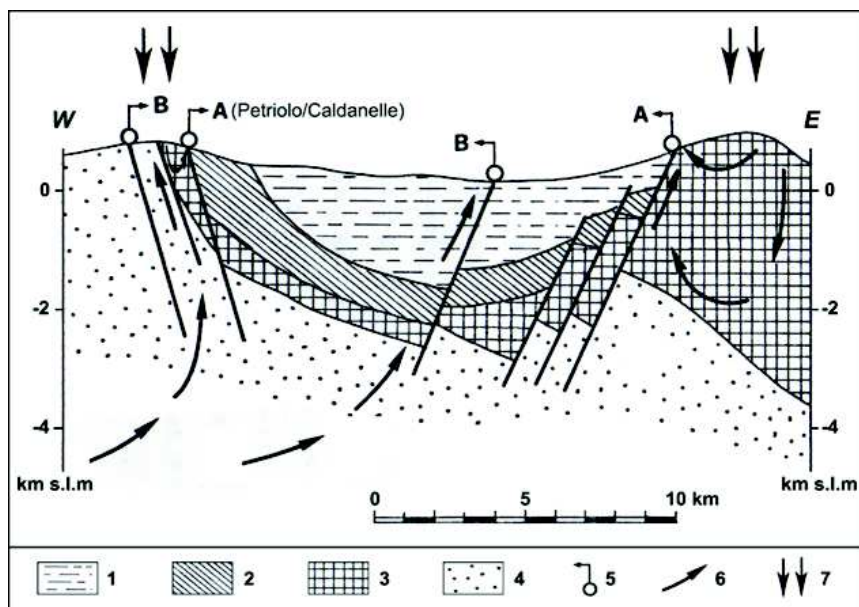


Fig. 7. Sezione geologica schematica del Graben di Siena-Radicofani (Panichi et al., 1979, modificata): **1** = argille e sabbie prevalenti del ciclo sedimentario neogenico (Miocene superiore - Pliocene); **2** = formazioni prevalentemente flyschoidi (Giurassico superiore - Eocene); **3** = rocce carbonatico-anidritiche (Triassico superiore - Giurassico); **4** = filladi, scisti e quarziti del basamento cristallino regionale (Paleozoico - Triassico superiore); **5** = sorgente termominerale; **6** = circolazione idrica più o meno profonda; **7** = ricarica meteorica. A = acque dei margini occidentale e orientale; B = acque del Graben.

emergenti dal pozzo dei Bagni di Petriolo consentono di stimare valori dell'ordine di 80 °C e comunque inferiori a 150 °C (Panichi, 1982). Infine, il loro tenore in trizio⁷ permette di ritenere che il percorso sotterraneo dalle zone di ricarica all'emergenza è stato compiuto in un arco temporale di almeno 40 anni (Battaglia et al., 1992; Minissale et al., 1997).

Conclusioni

Nella Toscana meridionale è presente un gran numero di sorgenti termominerali, la cui origine

dipende dai particolari circuiti idrogeologici: le acque meteoriche penetrano e circolano in profondità assumendo calore dal contatto con gli strati sempre più caldi e prendendo in carico, per dissoluzione, sostanze varie. Il contenuto minerale ed il livello termico, così acquisiti, vengono talvolta conservati pressoché totalmente dall'acqua fino alla sua emergenza in superficie che avviene solitamente lungo faglie. Sono quindi le rocce serbatoio, tramite le proprie caratteristiche mineralogiche ed il concorso di altre variabili come pressione, temperatura e tempo di contatto, a determinare le specifiche composizioni chimiche di queste acque.

A partire dalla prima intuizione di Trevisan (1951), gli studi successivi hanno dimostrato che la genesi tipica delle acque termominerali toscane è sostanzialmente riconducibile alla concomitante presenza dei seguenti elementi (ARPAT, 2014):

- un importante serbatoio idrico nella serie carbonatica mesozoica. La buona (o l'elevata) permeabilità per fessurazione e carsismo, che questa mostra, facilita la ricarica meteorica diretta in corrispondenza dei nuclei affioranti;
- un flusso di calore terrestre, derivante dal locale gradiente geotermico (normale o anomalo), a cui può aggiungersi il calore prodotto dalla reazione esotermica dovuta all'idratazione e trasformazione in gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dell'anidrite che si trova alla base della serie carbonatica;
- vie preferenziali per le correnti ascendenti del flusso convettivo idrotermale. Esse sono rappresentate da faglie distensive post-orogeniche,

le quali spesso portano in affioramento anche i nuclei mesozoici.

Queste emergenze, pertanto, sono da considerarsi strettamente legate alle formazioni carbonatico-evaporitiche del Mesozoico della Serie toscana non metamorfica; Bencini et al. (1977) hanno evidenziato, ad esempio, come rappresentando in un diagramma le temperature rispetto al contenuto in solfati, la maggior parte delle sorgenti toscane mostri una chiara correlazione dei due parametri.

Per molto tempo, e comunque ancora oggi, le sorgenti termominerali sono state osservate e studiate soprattutto sotto il profilo di acque da utilizzare per scopi terapeutici. Una visione finalizzata quasi esclusivamente alla "sfera sanitaria" ha però ostacolato una loro collocazione in un contesto scientifico più ampio. Con il presente articolo, dedicato alla conoscenza e alla tutela delle risorse idriche sotterranee di una zona ad elevato valore paesaggistico ed ambientale come quella di Petriolo, si è cercato di contribuire a colmare questa lacuna.

Testi citati

- Aldinucci M., Brogi A. & Spina A. (2008) - *Middle-Late Permian spomorphs from the Farma Formation (Monticiano-Roccastrada Ridge, southern Tuscany): new constraints for the tectono-sedimentary history of the Tuscan Domain*. Boll. Soc. Geol. It. (Ital. J. Geosci.), 127: 581-597.
- Aquè R., Bellagotti E., Costantini A., Decandia F.A., Lazzarotto A. & Sandrelli F. (2005) - *Foglio 307-Roccastrada - Sezione 307120*. Carta Geologica Regionale a scala 1:10.000 della Regione Toscana.
- ARPAT (2014) - *Principali emergenze termali in Toscana: idrogeologia e chimica delle acque*. Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana, 378 pp.
- Asticher G. (2015) - *Monitoraggio di sorgenti e verifica della potenziale interferenza idrogeologica di una galleria: il caso della tratta stradale Grosseto-Siena*. Tesi di Laurea Magistrale inedita, Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche ed Ambientali dell'Università degli Studi di Bologna, A.A. 2014-2015 (Relatore: Prof. A. Gargini), 138 pp.
- Baldi A.M. (2013) - *Nota circa le emergenze termali presenti*. Relazione inedita per conto della Terme di Petriolo S.p.A. (Monticiano, Siena), 26 pp.
- Barazzuoli P., Guasparri G. & Salleolini M. (1993) - *Il clima*. In: *La storia naturale della Toscana meridionale*, Pizzi Ed., Milano, 140-171.

Battaglia A., Ceccarelli A., Ridolfi A., Frohlich K. & Panichi C. (1992) - *Radium isotopes in geothermal fluids in central Italy*. Proc. Int. Symp. on Isotope Techniques in Water Resources Development, I.A.E.A., 11-15 March 1991, Vienna, 363-383.

Bencini A., Duchi V. & Martini M. (1977) - *Geochemistry of thermal springs of Tuscany (Italy)*. Chemical Geology, 19: 229-252.

Brogi A., Lazzarotto A., Liotta D. & Ranalli G. CROP-18 Working Group (2005) - *Crustal structures in the geothermal areas of southern Tuscany (Italy): insights from the CROP-18 deep seismic reflection lines*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 148: 60-80.

Brogi A. & Liotta D. (2006) - *Understanding the crustal structures of southern Tuscany: the contribution of the CROP-18 Project*. Boll. Geofis. Teor. Appl., 47: 401-423.

Cambria V. (2013) - *Alla scoperta delle Terme di Petriolo. Capitolo I° - Cenni Storici*. Italia Nostra Siena, 10 marzo 2013.

Civita M. (2005) - *Idrogeologia applicata e ambientale*. Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 794 pp.

Costantini A., Decandia F.A., Lazzarotto A. & Sandrelli F. (1988) - *L'Unità di Monticiano-Roccastrada fra la Montagnola Senese e il Monte Leoni (Toscana meridionale)*. Atti Ticinensi di Scienze della Terra, 31: 382-420.

Costantini A., Lazzarotto A., Stanghellini G. & Tavarnelli E. (2015) - *I Canaloni e la formazione di Poggio al Carpino*. In

Costantini A. (a cura di): Geotopi di importanza regionale nelle province di Siena e Grosseto. Pacini Ed., Pisa, 115-121.

Duchi V., Minissale A., Paolieri M., Prati F. & Valori A. (1992) - *Chemical relationship between discharging fluids in the Siena-Radicofani Graben and the deep fluids produced by the geothermal fields of Mt. Amiata, Torre Alfina and Latera (Central Italy)*. *Geothermics*, 21(3): 401-413.

Engelbrecht H. (2008) - *Carboniferous continental margin deposits in southern Tuscany, Italy: results from geological mapping of the geotopes Farma Valley and San Antonio Mine Area*. *Geological Journal*, 43: 279-305.

Fanti M. (2010) - *Studio degli aspetti geologici, geofisici, idrogeologici e idrochimici, relativo al permesso di ricerca di acqua termale denominato "Le Caldanelle di Petriolo" in località Petriolo*. Relazione inedita per conto della società Athens R.E. Fund SAI Investimenti SGR S.p.A. secondo quanto prescritto dal Permesso di Ricerca rilasciato dalla Regione Toscana (Decreto Dirigenziale n. 3640 del 29 luglio 2009), 42 pp.

Fiocco M. & Ilardo I. (2012) - *Relazione geologica, indagini e rilievi, geologia e idrogeologia*. Relazione inedita per conto dell'ATI Strabag S.p.A. - Intercantieri Vittadello S.p.A. relativa alla realizzazione dell'opera "Itinerario internazionale E78 S.G.C. Grosseto-Fano - Adeguamento a 4 corsie nel tratto Grosseto-Siena (S.S. 223 di Paganico) dal km 30+040 al km 41+600 - Lotti 5, 6, 7, 8".

Gandin A., Giamello M., Guasparri G., Mugnaini S. & Sabatini G. (2000) - *The Calcere Cavernoso of the Montagnola Senese (Siena, Italy): mineralogical-petrographic and petrogenetic features*. *Miner. Petrogr. Acta* 43: 271-289.

Gargini A., Vincenzi V., Piccini L., Zuppi G.M. & Canuti P. (2008) - *Groundwater flow systems in turbidites of the Northern Apennines (Italy): natural discharge and high speed railway tunnel drainage*. *Hydrogeology Journal*, 16: 1577-1599.

Lazzarotto A., Aldinucci M., Cirilli S., Costantini A., Decandia F.A., Pandeli E., Sandrelli F. & Spina A. (2003) - *Stratigraphic correlation of the Upper Palaeozoic-Triassic successions in Tuscany, Italy: a review*. *Boll. Soc. Geol. It.*, Vol. Spec. 1: 25-35.

Marotta D. & Sica C. (1929) - *Classificazione delle acque minerali italiane*. *Giornale di Chimica industriale ed applicata*, 11(6), 276 pp.

Minissale A. (2004) - *Origin, transport and discharge of CO₂ in central Italy*. *Earth Science Review*, 66: 89-141.

Minissale A., Magro G., Vaselli O., Verrucchi C. & Perticone I. (1997) - *Geochemistry of water and gas discharges from the Mt. Amiata silicic complex and surrounding areas (central Italy)*. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 79: 223-251.

Moretti S., Reale V. & Rossi R. (2005) - *I geositi di importanza regionale ai sensi della legge regionale toscana*. *Acta apuana*, Suppl. IV, 53-58.

Panichi C. (1982) - *Aspetti geochimici delle acque termali*. In: Il Graben di Siena, CNR-PFE, SPEG, RF 9, Pisa, settembre 1982, 61-72.

Panichi C., D'Amore F., Fancelli R., Noto P. & Nuti S. (1979) - *Interpretazione del rilevamento geochimico delle acque e delle manifestazioni gassose della Provincia di Siena*. *Energia Geotermica: prospettive aperte dalle ricerche del CNR, PFE-SPEG, Atti del 1° Seminario Informativo, Roma, 18-21 dicembre 1979*, 450-469.

Poli G. (1999) - *Geositi, testimoni del tempo. Fondamenti per la conservazione del patrimonio geologico*. Regione Emilia-Romagna, Bologna, 259 pp.

Sorgenia Geothermal S.r.l. (2010) - *Regione Toscana. Istanza di permesso di ricerca di risorse geotermiche "Murlo". Allegato F2 - Relazione tecnico-geologica*. Relazione inedita per ottenere il permesso di ricerca ai sensi del D.Lgs. 11 febbraio 2010 n. 22 e dell'art. 8 del D.P.R. 395 del 27 maggio 1991, 100 pp.

Studio Mattioli S.r.l. (2012) - *Monitoraggio ambientale ante-operam fauna: relazione tecnica*. Relazione inedita per conto dell'ATI Strabag S.p.A.-Intercantieri Vittadello S.p.A. relativa alla realizzazione dell'opera "Itinerario internazionale E78 S.G.C. Grosseto-Fano - Adeguamento a 4 corsie nel tratto Grosseto-Siena (S.S. 223 di Paganico) dal km 30+040 al km 41+600 - Lotti 5, 6, 7, 8", 52 pp.

Thornthwaite C.W. (1948) - *An approach toward a rational classification of climate*. *Geographical Review*, 38: 55-94.

Tinivella U., Accaino F., Rossi G. & Nicolich R. (2005) - *Petrophysical analysis of CROP-18 crustal seismic data*. *Boll. Soc. Geol. It.*, Vol. Spec., 3: 205-211.

Trevisan L. (1951) - *Una nuova ipotesi sull'origine della termalità di alcune sorgenti della Toscana*. *L'industria mineraria*, 2: 41-42.

Trevisan L. & Raggi G. (1978) - *Relazione idrogeologica sulle sorgenti termominerali di Petriolo*. Relazione inedita per conto della SAGIM S.p.A. (Grosseto), 9 pp.

«Heri mattina principassemo a tuore el bagno». Quando i Gonzaga venivano a Petriolo

Riccardo Bassani

Via dell'Arco, 1 – Loc. Iesa, Monticiano

Un lunedì sul finire del mese d'aprile del 1460, alle prime ore del mattino, si abbassò il ponte levatoio del castello di San Giorgio, quello verso il centro della città di Mantova, che di lì a poco venne attraversato da una lunga cavalcata di signori e dignitari di corte, seguita da carri e muli carichi all'inverosimile. A guidare quel lungo corteo il marchese Ludovico III in persona¹, che i sudditi e gli altri signori del tempo giudicavano un principe abile nelle armi, colto e prudente, ma soprattutto integro e leale e che poneva sopra ogni considerazione il proprio onore, la fedeltà agli impegni presi e il bene della sua casata e della sua città (Foto 1-3). Uno per parte al suo fianco cavalcavano Federico, il suo primogenito (Foto 2, 4)², e un bambino di soli otto anni, Rodolfo (Foto 5)³, il settimo dei dieci figli che il marchese aveva avuto dalla consorte Barbara di Brandeburgo⁴, donna di grande cultura, che amava le arti e che ebbe

un ruolo non secondario nel fare della piccola corte mantovana uno dei più importanti centri dell'arte e della cultura rinascimentale. Non era bella la marchesa, aveva tratti energici e quasi maschili per i quali si era meritata il soprannome di «virago» (Foto 6).

Insieme ai loro signori, un folto gruppo di segretari, cancellieri, medici e famigli di ogni genere e stato completava il corteo. Attraversata la città fra ali di folla venuta a salutare il principe in partenza, la lunga carovana prese la strada per Mirandola per affrontare il lungo viaggio che di lì a una decina di giorni avrebbe portato il signore e i suoi dignitari a trascorrere un periodo di cure presso i Bagni di Petriolo, il complesso termale allora rinomatissimo sulla strada che da Siena porta in Maremma.

Siamo a conoscenza di questo viaggio e dei giorni trascorsi ai bagni, nonché di quello che accadde durante il soggiorno di cure, come

1. Ludovico III Gonzaga (Mantova, 5 giugno 1412 – Goito, 11 giugno 1478), figlio di Gian Francesco I Gonzaga e di Paola Malatesta, dal 1444 secondo marchese di Mantova.

2. Federico I (Mantova, 2 luglio 1441 – Ivi, 14 luglio 1484), terzo marchese di Mantova.

3. Rodolfo Gonzaga (Mantova, 18 aprile 1452 – Forno, 6 luglio 1495), quintogenito di Ludovico III e Barbara, fu il capostipite dei Marchesi di Castiglione.

4. Barbara di Hohenzollern (30 settembre 1422 – Mantova, 7 novembre 1481), figlia primogenita di Giovanni detto l'Alchimista, figlio del margravio di Brandeburgo Federico I e di Barbara di Sassonia. Con il permesso dell'imperatore, Sigismondo di Lussemburgo, di cui Barbara era nipote, giunse all'età di appena 11 a Mantova dove nel mese di novembre con il fasto e la pompa tipiche di una corte italiana del Rinascimento, si svolsero le cerimonie nuziali con Ludovico III. Data la sua giovanissima età, il marchese Gian Francesco la fece educare insieme ai propri figli da Vittorino da Feltrina sotto la cui guida Barbara acquistò quella cultura e quella saggezza pratica che più tardi l'avrebbero resa famosa e che le era senza dubbio riconosciuta, oltre che dal marito e dai figli, anche dai parenti e dai dignitari di corte, come risulta evidente dai toni che ognuno di loro usava nelle lettere che le indirizzava.