

Acquiferi non termali del settore di San Giuliano Terme del Monte Pisano

Non-thermal aquifers in San Giuliano Terme area of Monte Pisano

L. Sergiampietri & D. Andreani

Riassunto: Lo studio, previo uno schematico inquadramento del Monte Pisano dal punto di vista geologico strutturale, definisce e caratterizza tre principali corpi acquiferi indipendenti dal sistema termale di San Giuliano Terme. La delimitazione dei diversi sistemi idrogeologici ha permesso il calcolo dei singoli bilanci idrologici basandosi su dati di precipitazione e temperatura relativi al periodo 1956-2002. Nel periodo giugno-luglio 2006 è stata inoltre condotta una campagna di censimento, campionamento e analisi chimica delle emergenze alimentate esclusivamente dagli acquiferi individuati, che fornisce informazioni circa i percorsi e i tempi di circolazione delle acque all'interno di ciascun acquifero. Infine è stato realizzato un confronto tra la chimica delle acque esaminate e le acque termali di San Giuliano Terme, grazie al quale è stata ricostruita l'evoluzione chimica delle acque del versante sangiulianese del Monte Pisano.

Parole chiave: Monte Pisano, sorgenti termali, bilancio idrologico, idrogeochimica

Keywords: *Monte Pisano, thermal springs, water budget, hydrogeochemistry*

L. SERGIAMPIETRI ✉
D. ANDREANI
Studio LSG
via T. Rook, 12
56122 Pisa
Tel: 050 9910035 - Fax: 0509910059

L. SERGIAMPIETRI
studiolsg@gmail.com

Ricevuto: 02 maggio 2012 / Accettato: 22 giugno 2012
Pubblicato online: 30 giugno 2012

© Associazione Acque Sotterranee 2012

Abstract: *This work, starting from a structural description of Monte Pisano, defines three main aquifers hydraulically disconnected from the San Giuliano Terme thermal system. The characterization of the three hydrogeological systems allows to calculate the respective water budgets based on 1956-2002 rainfall and temperatures data. Moreover, in 2006 June-July, a survey and sampling of the main springs, fed by the defined aquifers, was undertaken. All this along with the chemical analysis allows to infer the paths and the travel time of the water through the aquifers. Finally, a comparison between these analysed waters and San Giuliano Terme thermal waters was performed: it led to trace the hydrochemical evolution of Monte Pisano waters on San Giuliano Terme side.*

Introduzione

Il versante sangiulianese del Monte Pisano è ben noto per le caratteristiche, apprezzate sin dall'antichità, delle sue acque termali, ma meno noto è il fatto che esistono anche risorse idriche non termali, di pregio sia per uso irriguo che potabile. Le acque termali di San Giuliano sono state infatti oggetto di numerosi studi caratterizzanti il contesto geologico, idrogeologico e idrochimico (Grassi e Squarci, 1991; Grassi et al., 1992); solo un recente studio condotto dalla Regione Toscana (2007) tratta dei corpi acquiferi non termali, individuando il Corpo Idrico Sotterraneo Significativo dei Monti di Santa Maria del Giudice e dei Monti Pisani, e suddividendolo in tre sotto sistemi: il sotto sistema nord-occidentale, da Ripafratta a S. Giuliano Terme, il sottosistema di S. Giuliano Terme ed il sottosistema di Uliveto Terme.

Il presente lavoro costituisce quindi il primo studio idrogeologico e idrochimico dettagliato degli acquiferi non termali in questione caratterizzandone potenzialità e chimismo e permettendo così di uscire dalla generalità riguardo l'argomento. E' fornita una conoscenza del patrimonio idrico sotterraneo e del contesto idrogeologico, da considerarsi indispensabile per la gestione del territorio, le scelte urbanistiche e le previsioni di destinazione d'uso delle aree (dalle nuove edificazioni alla gestione delle zone agricole, alla realizzazione d'impianti di varia tipologia).

Inquadramento geologico e stratigrafico del Monte Pisano

Il Monte Pisano, rilievo conosciuto anche come Monti Pisani, si colloca nella Toscana Settentrionale, a Est della città di Pisa, ad una distanza dalla costa tirrenica variabile tra i 12 ed i 20 km e rappresenta l'estremità Sud-Orientale della dorsale Alpi Apuane - Monte Pisano, margine Est di un ampio bacino di sprofondamento tettonico denominato graben pisano-versiliese, il cui lato Ovest è limitato dalla dorsale (in mare) detta della Meloria e di Maestra. La maggior parte della Pianura di Pisa è compresa nel suddetto graben e il Monte Pisano rappresenta un alto strutturale che determina l'emersione del basamento litoide rispetto ai terreni tettonicamente depressi circostanti, legati ad una tettonica distensiva in epoca post - tortoniana (Grassi et al., 1992).

L'area interessata dal presente studio (Fig. 1) riguarda il versante san giulianese che comprende la stretta fascia Nord-Occidentale del rilievo dal M. Maggiore a Nord, sino al confine meridionale con il Comune di Calci a sud (Valle del Torrente Zambra di Asciano e Monte La Stipareccia).

Inquadramento tettonico del Monte Pisano

Il Monte Pisano ha un assetto tettonico (Fig. 1) che può essere schematizzato dalla sovrapposizione di tre unità principali: l'Unità del Monte Serra (Rau e Tongiorgi, 1974) costituita dai sedimenti clastici triassici del Verrucano e l'Unità di S. Maria del Giudice, nota anche come "Falda toscana metamorfica" (Giannini e Nardi, 1965; Rau e Tongiorgi, 1974) e dalla Unità della Falda Toscana. Quest'ultima affiora essenzialmente nel settore meridionale, occidentale e nord-occidentale, e si sovrappone tettonicamente alle Unità del M. Serra.

L'Unità del Monte Serra è costituita da sedimenti triassici appartenenti, da un punto di vista paleogeografico, al dominio toscano dell'Unità di Massa (Rau e Tongiorgi, 1974), che sono caratterizzati da una successione stratigrafica (Verrucano s.s.) rappresentata prevalentemente da sedimenti terrigeni di tipo alluvionale (Formazione della Verruca, Trias medio) che evolvono verso sedimenti costieri e infine di delta fluviale (Formazione del M. Serra, Carnico). Questo complesso stratigrafico giace in discordanza su di un basamento paleozoico (Carbonifero Sup.-Permiano) costituito da filladi,

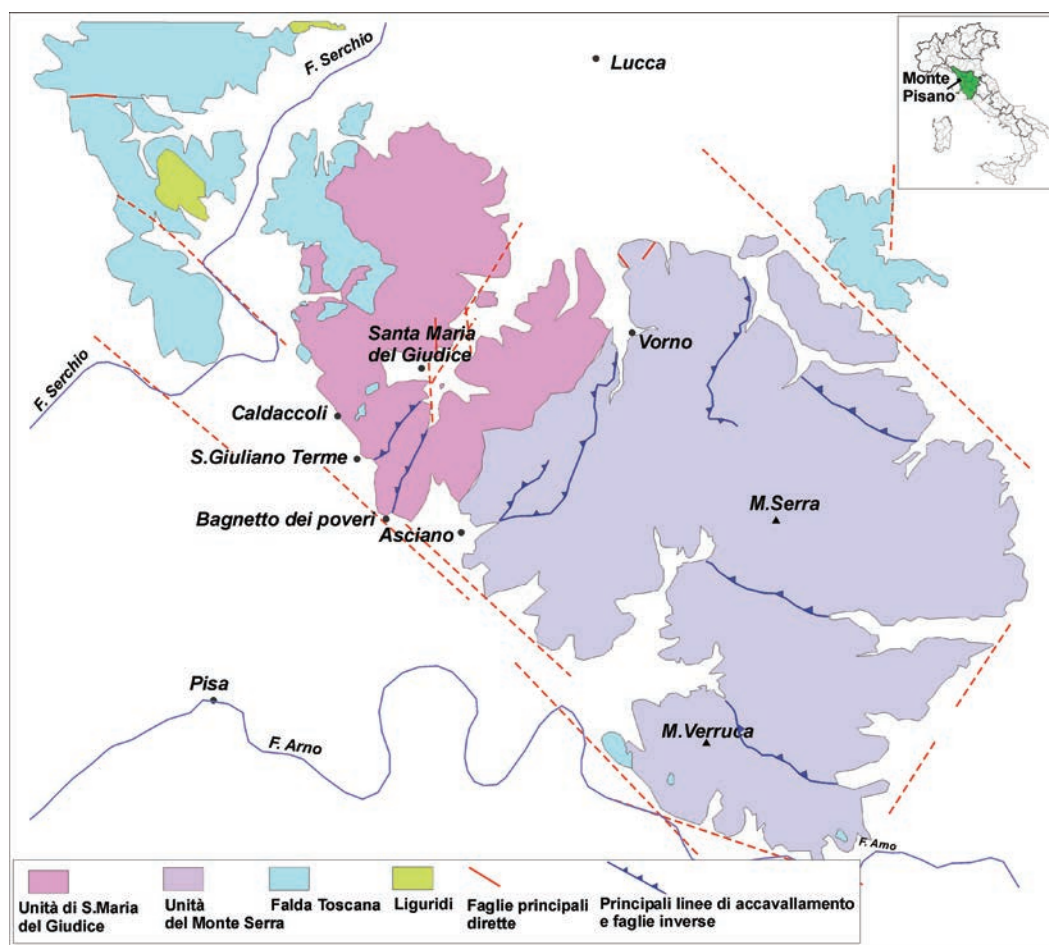


Fig. 1 - Inquadramento geografico e schema tettonico del Monte Pisano (modificata da Rau e Tongiorgi, 1974)

Fig. 1 - Geographical and structural setting of Monte Pisano (modified after Rau and Tongiorgi, 1974)

quarziti, scisti e metarenarie. Sui metasedimenti del Verrucano si sovrappone tettonicamente l'Unità di S. Maria del Giudice che è rappresentata da una successione di metasedimenti post-triassici (Norico-Retico/Oligocene) a composizione prevalentemente carbonatica, che termina in alto con modesti spessori di depositi torbiditici («Pseudomacigno»).

L'unità della Falda Toscana è rappresentata soltanto da piccoli lembi, che si sovrappongono tettonicamente all'Unità di S. Maria del Giudice e all'Unità del Monte Serra, costituiti prevalentemente dalle formazioni carbonatiche inferiori di questa unità e sono rappresentati, nella zona studiata, dalle formazioni del Calcare Cavernoso, dalle Radiolariti varicolori e dalla Maiolica. Il Calcare Cavernoso, base della Falda Toscana, per la sua origine almeno in parte evaporitica, costituisce un livello di scollamento preferenziale in corrispondenza del quale si è verificato il sovrascorrimento tettonico delle due successioni.

Da un punto di vista strutturale i Monti Pisani sono stati interessati da tre diverse fasi tettoniche:

- la prima fase tangenziale: questa prima fase produce pieghe isoclinali con piani assiali sub-orizzontali ai quali è associata una scistosità molto penetrativa (S1) che ha trasposto le superfici sedimentarie preesistenti (S0). A questa fase sono collegate le locali riduzioni di serie relativi a fenomeni di boudinages, generati da movimenti differenziali tra le varie formazioni, testimoniati da superfici di taglio parallele alla S1. A tale scistosità è associata una lineazione di estensione;
- la seconda e terza fase hanno lo stesso stile deformativo della prima, ma presentano orientazioni diverse, e conferiscono alle rocce piegamenti blandi e scistosità distanziata (Bertagni e Bigazzi, 1990).

Idrogeologia del Monte Pisano

Le successioni litologiche e la rispettiva struttura tettonica delle unità del Monte Pisano individuano complessi idrogeologici caratterizzati da permeabilità riconducibili a fratturazione e carsismo; ulteriori acquiferi, permeabili per porosità intergranulare si ritrovano nelle coperture detritiche (Grassi e Cortecchi, 2005). Il reticolo idrografico è rappresentato da corsi d'acqua che incidono le principali valli; in particolare, da Nord verso Sud, si incontrano F. Cimitagna, Rio dei Mulini, Botro della Cava, Botro del Falcione e Botro Sugherone Fosso Bellugello e Torrente Zambra di Asciano.

Tali corsi d'acqua presentano portate molto variabili in funzione della stagionalità: alcuni risultano completamente asciutti già nella stagione primaverile, come rilevato dagli autori in uno studio svolto per il Comune di San Giuliano Terme (Pistoia, Sergiampietri e Innamorati, 2010), e sono alimentati da bacini di dimensioni variabili da 0.16 Km² (bacino Fosso Bellugello) a 2.22 km² (bacino Rio dei Mulini). Unica eccezione è rappresentata dal T. Zambra che presenta una minima portata anche durante la stagione secca

Materiali e metodi

Nel presente paragrafo si illustra la metodologia seguita per l'individuazione dei corpi acquiferi, i dati reperiti da bibliografia o appositamente determinati e le metodologie seguite per stimare la risorsa idrica basandosi sulla stima dei bilanci idrologici di ogni corpo acquifero. Inoltre per i corpi acquiferi del Monte Partigione e della Valle delle Fonti, dopo un campionamento delle principali scaturigini, è stata eseguita la caratterizzazione chimica delle acque.

Individuazione dei principali corpi idrici sotterranei

Nella Tabella 1 sono riportati i litotipi classificati per tipo di permeabilità relativa (primaria e/o secondaria) e per grado (compreso da I a IV). Una volta definita la permeabilità relativa delle varie formazioni, si è proceduto ad una prima disamina del tema idrogeologico andando ad individuare i principali corpi acquiferi presenti e delimitando per quanto possibile dimensioni e caratteristiche della riserva idrica in essi contenuta (Figura 2).

Di seguito sono elencati i corpi acquiferi sotterranei individuati.

- Corpo acquifero del Monte Partigione: costituito dalla formazione del Calcare Cavernoso, affiorante in maniera continua principalmente nei dintorni di Molina di Quosa, ma che presenta piccoli affioramenti distribuiti lungo la Provinciale del Lungomonte.
- Corpo acquifero della Valle delle Fonti, noto per la presenza di un complesso sistema di captazioni utilizzato sin da epoca medicea.
- Corpo acquifero di Monte Maggiore, a monte dell'abitato di Pugnano.

Il corpo acquifero del M. Moriglion di Penna rappresenta un contributo al complesso sistema di alimentazione delle acque termali di San Giuliano Terme ed è quindi riportato solo ai fini conoscitivi.

Bilancio Idrologico

Il calcolo del bilancio idrologico necessita almeno della conoscenza dei termini di precipitazione, evapotraspirazione, ruscellamento ed infiltrazione. Il bilancio idrologico rappresenta l'equilibrio tra le entrate, individuate dalla portata media degli apporti, e dalle uscite, rappresentate dalla portata media degli afflussi. Il calcolo deve essere eseguito almeno su un anno idrologico così da trascurare gli errori che si commettono nella valutazione dei vari parametri sia in entrata sia in uscita ed è riassunto dalla seguente formula:

$$P - Er = R + I \quad (1)$$

dove in mm/anno:

- P = quantitativi d'acqua di precipitazione meteorica
- Er = quantitativi d'acqua di evapotraspirazione reale
- R = quantitativi d'acqua di ruscellamento superficiale
- I = quantitativi d'acqua di infiltrazione.

Per determinare i quantitativi di acque circolanti nella formazione del Monte Pisano è stato considerato il valore medio

Tab. 1 - Grado di permeabilità relativa degli acquiferi del Monte Pisano.

Tab. 1 - Relative permeability of M. Pisano aquifers

Grado di permeabilità	I	II	III	IV
Permeabilità primaria (per porosità)	Detriti e terreni di copertura, terreni alluvionali, coni di deiezione e depositi alluvionali sabbiosi e limosi a permeabilità variabile		Depositi alluvionali prevalentemente argillosi	
Permeabilità secondaria (per fratturazione e fessurazione)	Calccare Cavernoso, Calcari Massicci, Metacalcari picchiettati, Calcari tipo portoro, Rosso Ammonitico, Maiolica, Grezzoni e Calcari Selciferi	Marne a Posidonomya Radiolariti e Flysch arenaceo		Scaglia Toscana e il complesso quarzítico filladico del Verrucano

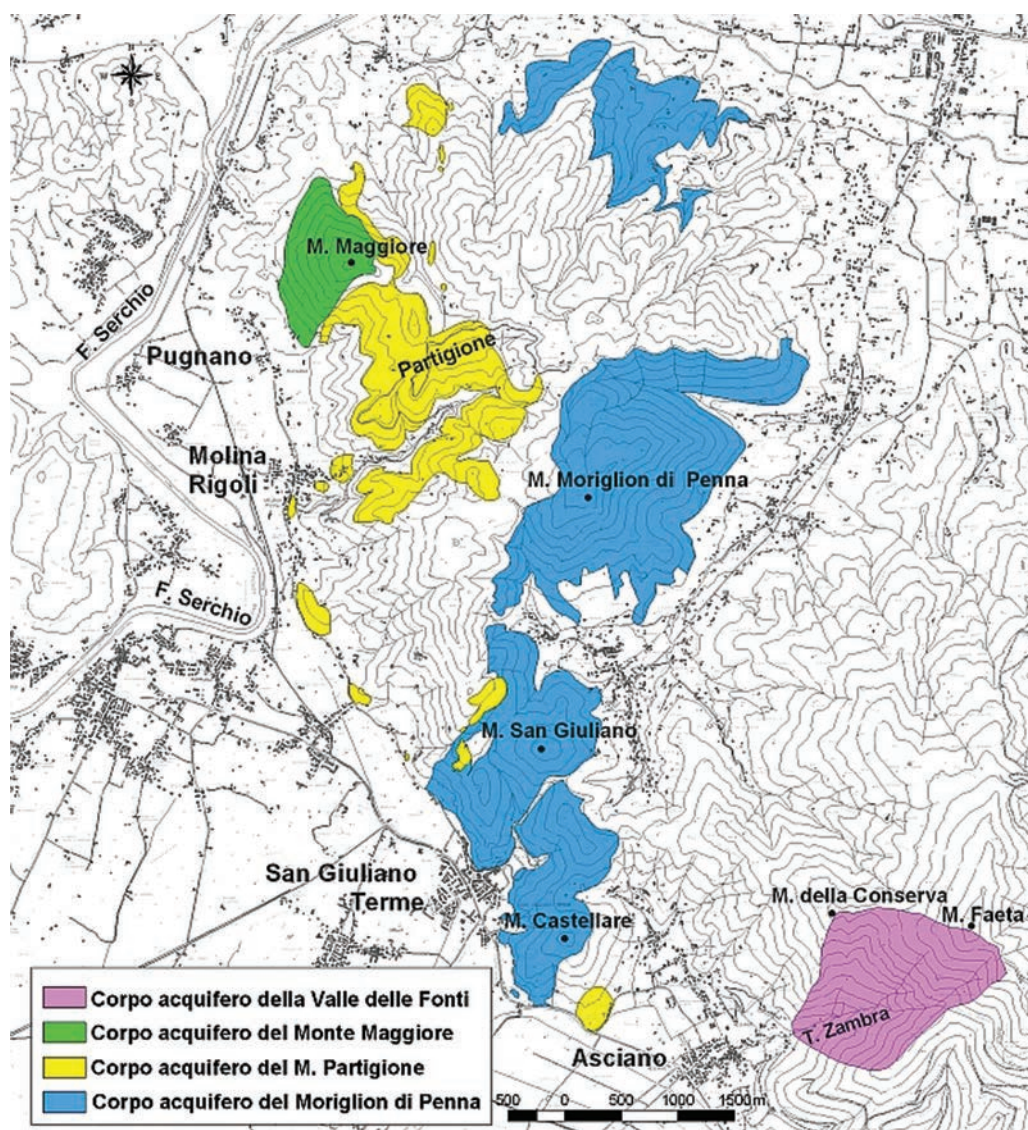


Fig. 2 - Carta dei corpi acquiferi del Monte Pisano.

Fig. 2 - Map of M. Pisano aquifers.

annuo delle precipitazioni, sul periodo 1956-2002, 1100 mm, ed è stato integrato dai dati termometrici relativi allo stesso periodo.

I dati meteo-climatici sono stati consultati sul sito del Servizio Idrologico Regionale (<http://www.sir.toscana.it/>; Regione Toscana 2012) e si riferiscono, per le temperature (con all'interno delle parentesi il periodo di funzionamento), alle stazioni di Pisa-Agraria (1942 -1999) e alla stazione ubicata sul Monte Serra (2001-2003), e per le precipitazioni alle stazioni di Asciano (1921-1955), Pisa P. Lucca (1930-1941), Pontasserchio (1956-1966), Molina (1955), Ripafratta (1970-2000) e Asciano Pisano (1916-2001). Tali dati, vista anche la loro discontinuità temporale, sono stati integrati con dati pubblicati in uno studio di Rapetti e Vittorini (1994).

L'evapotraspirazione è stata determinata attraverso le formule empiriche di Coutagne (1956) e Turc (1954).

La formula di Coutagne presuppone la conoscenza dell'altezza totale di precipitazione (P, m/anno) riferita all'anno idrologico o ad un numero di anni statisticamente significativo e la conoscenza della temperatura media dell'aria (T, °C) relativa allo stesso periodo:

$$Er = P - \lambda P^2 \quad (2)$$

dove:

$$\lambda = 1 / (0.8 + 0.14 T) \quad (3)$$

La formula di Turc può essere utilizzata inserendovi l'altezza di precipitazione (P, mm/anno) e la temperatura media dell'aria (T, °C) di un unico anno idrologico o di un periodo sufficientemente lungo da risultare statisticamente significativo:

$$Er = P / (0.9 + (P^2 / L^2) / 2) \quad (4)$$

dove:

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (5)$$

Il ruscellamento superficiale o deflusso superficiale (R) è stato determinato per differenza, ovvero: $R = P - Er - I$.

L'infiltrazione (I) è stata stimata sulla base del coefficiente di infiltrazione potenziale (*c.i.p.*) espresso come percentuale del deflusso potenziale:

$$Dp = Ip + Rp = P - Er \quad (6)$$

$$c.i.p. = (Ip / Dp) \times 100 \quad (7)$$

dove :

Dp = Deflusso presunto;

Ip = infiltrazione presunta;

Rp = ruscellamento presunto.

Per il Monte Partigione e il Monte Maggiore si parla di bilanci relativi non a bacini idrografici chiusi, per cui è stato necessario valutare di volta in volta gli afflussi per ruscellamento da aree confluenti.

Campionamento e caratterizzazione chimica delle acque

Il campionamento delle acque è stato effettuato nel periodo giugno-luglio 2006; ed ha riguardato 11 sorgenti, 1 pozzo profondo e un corso d'acqua superficiale. Per ogni punto sono state effettuate le seguenti operazioni:

- determinazione dei parametri chimico fisici in situ quali temperatura, pH e conducibilità;
- prelievo del campione: sono state raccolte due aliquote tal quale per ogni punto campionato prestando cura ad evitare contaminazioni;
- misura della portata solo per sorgenti ed opere di captazione, per quelle captazioni tali da permettere la misurazione o con deflusso tale da poter essere stimato.

Ove possibile la portata è stata stimata determinando il tempo necessario a riempire un becker della capacità di 1 litro. Le acque sono state classificate tramite i diagrammi quadrangolari Langelier-Ludwig (Langelier e Ludwig, 1942) e il diagramma binario Ca vs Mg.

Risultati e discussione

Per ogni corpo acquifero è di seguito riportato l'inquadramento geologico con evidenziate le principali emergenze censite e campionate, ed i risultati e le relative considerazioni riguardanti le analisi chimiche e il calcolo di bilancio.

Il corpo acquifero del Monte Partigione

Il Corpo acquifero del M. Partigione (Fig. 3) è costituito dal Calcere Cavernoso (CC) che affiora in una vasta area ai due lati dell'incisione del Rio dei Molini, intorno all'abitato di Molina di Quosa, occupando le due creste laterali all'incisione; più a Nord la formazione si immerge al di sotto dei Diaspri e dalla Maiolica di Monte Maggiore. Il CC è considerato una breccia autoclastica, sulla cui origine sono state formulate diverse ipotesi, essenzialmente formata da clasti di calcare dolomitico; tale composizione rende la formazione soggetta a fenomeni di dissoluzione che danno luogo a "vacuoli" o vere e proprie cavità sotterranee di notevoli dimensioni. Questa caratteristica, unitamente alla fratturazione di origine tettonica, la rendono praticamente molto permeabile e quindi ottimo serbatoio sotterraneo. Da un punto di vista tettonico il CC giace al di sopra delle formazioni della "Scaglia" metamorfica praticamente impermeabile e può immagazzinare agevolmente le acque meteoriche d'infiltrazione.

E' importante osservare che, data la composizione litologica ed il contesto tettonico, ci si aspetterebbe una maggiore frequenza di sorgenti di contatto, rispetto all'esiguo numero (11) osservato durante il sopralluogo. Ciò è probabilmente dovuto al tipo di contatto con la "Scaglia", che risulta interessato da pieghe che formano delle sacche che "traboccano" solo in occasione di piogge rilevanti, cosa che non si verifica nel periodo estivo.

A questo fenomeno si associano due fatti:

- (i) le sorgenti storiche, come quella di Rupe Cava (in essere sin dal Medio Evo) sono ora praticamente sterili;
- (ii) i pozzi presenti nell'intorno di Molina di Quosa che intercettano il livello di saturazione ben al di sotto del piano di campagna.

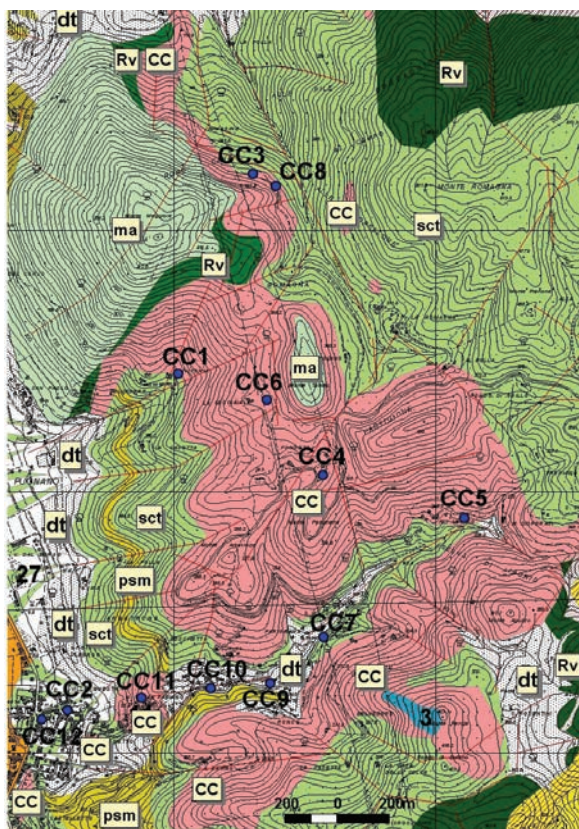


Fig. 3 - Sorgenti del Corpo acquifero M. Partigione identificate con la sigla CCn. sct: scisti sericitici e calcescisti della Scaglia Toscana (Cretaceo-Eocene); psm: pseudomacigno (Eocene); CC: calcare cavernoso (Trias Sup.); Rv: radiolariti varicolori (Giurassico sup.); ma: maiolica (Tithonico sup.-cretaceo inf.); dt: deposito di versante.

Fig. 3 - Springs of M. Partigione identified by abbreviation CCn. sct: schist and calc-schist (Scaglia Toscana, Cret.-Eoc.); psm: metasiltstone (Eoc.); CC: limestone (Late Trias.); Rv: chert (Late Jur.); ma: limestone (Tith.-Early Cret.); dt: debris.

Caratterizzazione idrochimica

Durante il campionamento sono state individuate 11 emergenze (Fig. 3) alcune perenni ed altre temporanee; data l'impossibilità di prelievo di alcune di esse sono state campionate tre emergenze (CC1, CC2, CC3) e un pozzo profondo 87 m (CC4) che interessa il CC. I campioni (Tab. 2), classificati tramite i diagrammi quadrangolari Langelier-Ludwig grafico LLHCO₃ e il diagramma binario Ca vs Mg, risultano di tipo bicarbonato - calcico (Fig. 4). Sulla base del solo chimismo è possibile desumere che le acque analizzate, circolano per tempi brevi all'interno della formazione carbonatica dove acquisiscono la natura bicarbonato calcica tipica proprio del primo stadio di salinizzazione.

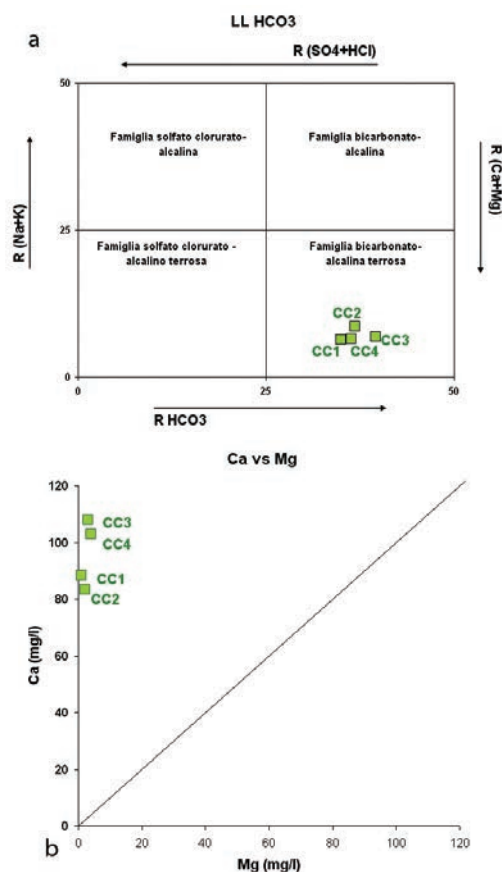


Fig. 4 - a) Diagramma quadrangolare LLHCO₃ e b) diagramma binario Ca vs Mg per il Corpo acquifero di Monte Partigione.

Fig. 4 - Monte Partigione groundwater: a) Langelier- Ludwig diagram LLHCO₃ and b) binary diagram Ca vs Mg.

Tab. 2 - Dati chimici relativi alle acque campionate nel M. Partigione (meq/l).

Tab. 2 - Chemical data from M. Partigione water (meq/l).

Sigla campione	Data	Quota	Portata	Na	K	Mg	Ca	Cl	SO ₄	HCO ₃	Bilancio ionico
CC1	12/07/2006	170m	Non misurabile	0,75	0,02	0,79	4,41	1,09	0,67	4,10	0,82
CC2	27/07/2007	12m	20 l/min	0,96	0,07	0,79	4,16	0,94	0,51	4,07	4,00
CC3	12/07/2006	285m	Non misurabile	0,64	0,27	0,22	5,39	0,82	0,45	4,82	3,41
CC4	12/07/2006	305m	Non disponibile	0,84	0,02	0,54	5,14	1,15	0,43	4,67	2,20

Bilancio idrologico

In Tabella 3 si riporta la stima del bilancio idrologico del Corpo acquifero Monte Partigione.

Sulla base di questi dati, è possibile stabilire che il CC costituisce un potente acquifero che ogni anno è in grado di raccogliere 747.000 m³ di acqua meteorica. Verosimilmente la

elevata permeabilità del CC fa sì che la maggior parte dell'acqua d'infiltrazione vada ad alimentare un circuito profondo. Questo giustifica la scarsa presenza di sorgenti, la loro temporaneità e rende altresì ragione delle cospicue portate di alcuni pozzi realizzati a monte di Molina di Quosa.

Tab. 3 - Bilancio idrologico dell'acquifero di M. Partigione.

Tab. 3 - Water budget of M. Partigione aquifer.

Superficie Calcare Cavernoso	Precipitazioni P	Evapotraspirazione Er	Deflusso idrico globale Dr	Infiltrazione I	Deflusso superficiale
	1100 mm	685,0 mm	415,0 mm	332,0 mm	
2.250.000 m ²	2.475.000 m ³ /anno	1.541.250 m ³ /anno	933.750 m ³ /anno	747.000 m ³ /anno	186.750 m ³ /anno

Corpo acquifero della Valle delle Fonti

La cosiddetta "Valle delle Fonti" corrisponde, in realtà, al bacino idrografico del torrente Zambra di Asciano, bacino esposto a SO, con una superficie di 1.7 kmq. Le rocce costituenti il bacino sono riconducibili alla Formazione delle Quarziti del Monte Serra (Fig. 5), in particolare alle Quarziti bianco-rosa (Carnico); nel settore Nord Nord-Est del bacino sono presenti ampi affioramenti della Formazione della Verruca, in particolare Anageniti grossolane (Anisico-Ladinico) sovrapposte alle Filladi e Quarziti listate di Buti (Paleozoico). I litotipi presenti sono quindi pressoché impermeabili e scarsamente erodibili.

Sul versante in sinistra idrografica sono presenti due "Sassaie", accumuli di massi angolosi ed eterometrici, tipici del Monte Pisano; il confronto di questi corpi con quelli presenti in altre parti del mondo ha portato alla loro interpretazione come colate di pietre (block stream) inattive che si sarebbero formate durante la fase più fredda dell'ultima glaciazione, quando i rilievi al margine della catena appenninica erano soggetti a condizioni di ambiente periglaciale (Papalardo e Putzulu, 1994). E' nostra opinione che gran parte della copertura detritica della valle sia in realtà costituita da "Sassaie" colonizzate dalla vegetazione e che queste costituiscano il serbatoio alimentante le scaturigini della "Valle delle Fonti".

Chimismo

Le acque del Corpo acquifero della Valle delle Fonti, sfruttate già dal Cinquecento a fini potabili, alimentano tuttora il sistema acquedottistico della città di Pisa. Sono state campionate n. 8 sorgenti ed è stato raccolto n. 1 campione di acqua superficiale nel T. Zambra; non sono state monitorate le acque dei coacervi poiché rappresentano punti di accumulo di più sorgenti (Tab. 4).

Le acque analizzate risultano appartenenti alla famiglia delle acque bicarbonato – calciche (Fig. 6 e Fig.7)

In particolare è interessante notare l'allineamento di punti che si ripete secondo la sequenza S10, S8, S15, S6, S5, S3, S2, T1 e S1; i campioni S10 e S8 sono i più ricchi in Ca, Mg e HCO₃ (grafici Ca vs Mg e TDS vs Ca) dei termini T1 e S1 che hanno valori leggermente più alti di Na e Cl benché le concentrazioni di questi ultimi siano molto simili tra loro (grafico Ca vs Na). Le sorgenti S6, S5, S3 e S2 occupano una posizione intermedia e hanno valori di concentrazione analoghi.

Confrontando il suddetto allineamento con l'ubicazione dei campioni si può ipotizzare che il chimismo rispecchia il percorso e quindi il tempo di interazione dell'acqua all'in-

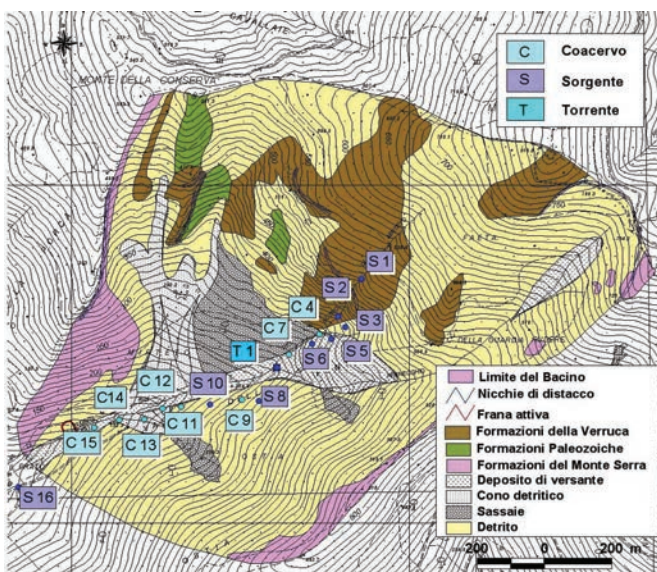


Fig. 5 - Le sorgenti del Corpo acquifero Valle delle Fonti.

Fig. 5 - Springs of Valle delle Fonti aquifer.

Tab. 4 - Dati chimici relativi alle acque campionate nel corpo acquifero Valle delle Fonti (meq/l).

Tab. 4 - Chemical data from Valle delle Fonti water (meq/l).

Sigla campione	pH	cond.	Na	K	Mg	Ca	Cl	SO ₄	HCO ₃	Bilancio ionico
S2	7	168	0,60	0,02	0,36	0,80	0,50	0,12	1,09	1,59
S3	6,4	164	0,62	0,02	0,36	0,79	0,50	0,14	1,07	2,29
S5	6,7	166	0,61	0,01	0,36	0,76	0,51	0,13	1,07	1,04
S6	6,8	170	0,61	0,01	0,38	0,78	0,50	0,13	1,11	1,08
S8	7,1	246	0,59	0,01	0,75	1,38	0,53	0,09	2,12	-0,20
S 10	7,9	270	0,59	0,02	0,96	1,52	0,47	0,07	2,58	-0,62
T1	6,9	165	0,64	0,01	0,37	0,65	0,56	0,13	0,99	-0,02
S1	6,6	199	0,70	0,01	0,46	0,69	0,58	0,20	1,02	1,82
S15	7,1	207	0,68	0,02	0,64	0,88	0,55	0,09	1,57	0,55

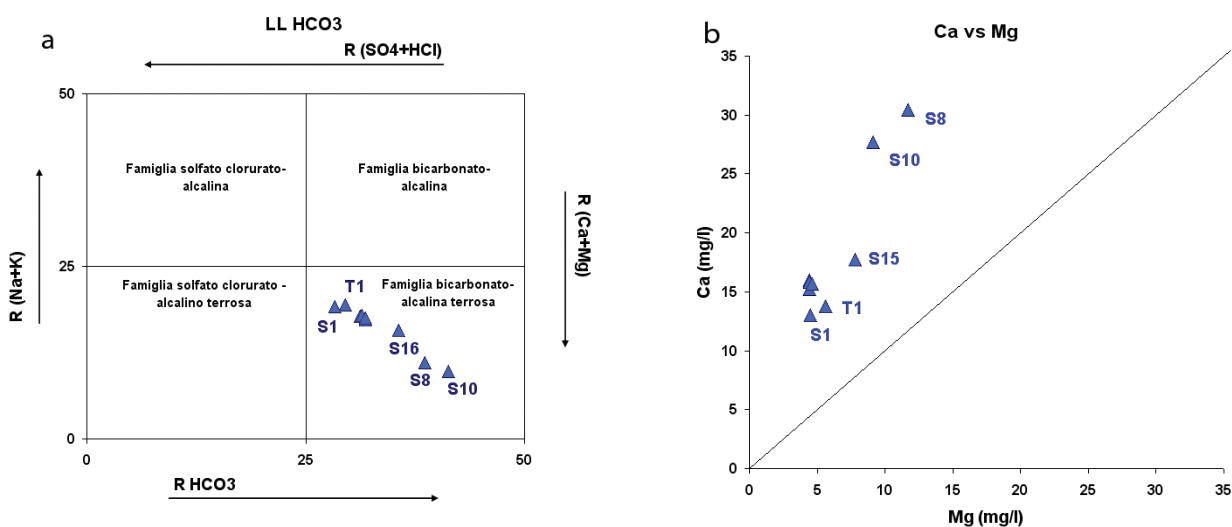


Fig. 6 - Le acque della Valle delle Fonti : a) Diagramma quadrangolare LLHCO₃ e b) diagramma binario Ca vs Mg.

Fig. 6 - Valle delle Fonti waters: a) Langelier- Ludwig diagram LLHCO₃ and b) binary diagram Ca vs Mg.

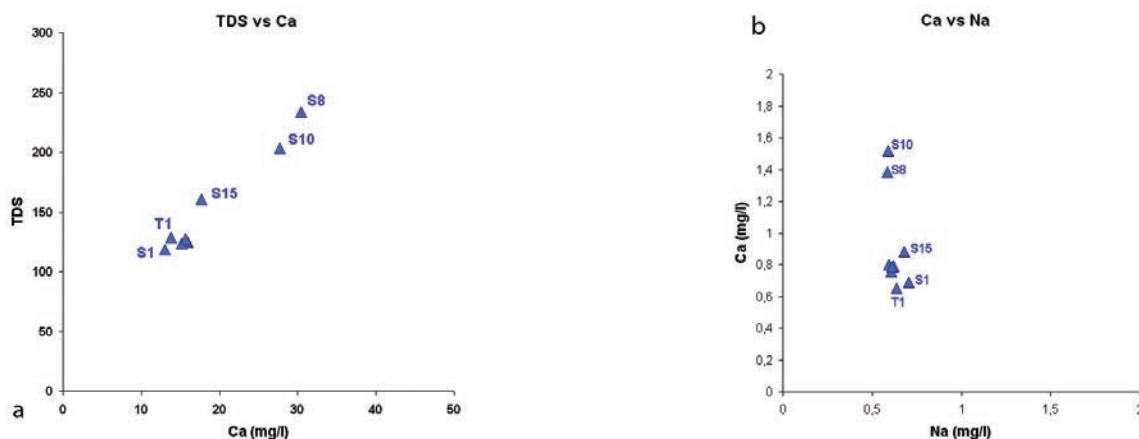


Fig. 7 - Le acque della Valle delle Fonti : a) Diagramma Ca vs Na e b) diagramma TDS vs Ca.

Fig. 7 - Valle delle Fonti waters: a) Diagram Ca vs Na and b) diagram TDS vs Ca.

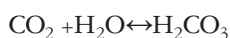
Tab. 5 - Bilancio idrologico del Corpo acquifero Valle delle Fonti.

Tab. 5 - Water budget of Valle delle Fonti aquifer.

Superficie "Valle delle Fonti"	Precipitazioni P	Evapotraspirazione Er	Deflusso idrico globale Dr	Infiltrazione I	Deflusso superficiale
	1100 mm/anno	685,0 mm/anno	415,0 mm/anno	373,5 mm/anno	
1.800.000 m ²	1.980.000m ³ /anno	1.233.000 m ³ /anno	747.000 m ³ /anno	672.300 m ³ /anno	74.700 m ³ /anno

terno della copertura detritica; infatti i campioni, da monte verso valle, aumentano il loro grado chimico. Fa eccezione il campione S15 poiché rappresenta un punto di raccolta di più emergenze. Inoltre è stato stimato il rapporto di rSO_4/rCl , definito da Monition-Nerat De Lesguise (1960), come caratterizzante della natura litologica del serbatoio, che è risultato compreso tra 0.2 e 0.47 ovvero corrispondente ad un serbatoio costituito da rocce scistose con valori prossimi a rocce quarzitiche; questo rapporto rappresenta un'ulteriore conferma del percorso di circolazione delle sorgenti.

Quindi, sulla base del chimismo, si può affermare che le sorgenti della Valle delle Fonti si originano e si sviluppano interamente all'interno della copertura detritica dove interagiscono per tempi abbastanza brevi, attribuiti sia ai bassi valori di concentrazione sia alla natura bicarbonato-calcica dei campioni tipica delle acque al primo stadio di salinizzazione. Possiamo attribuire la concentrazione di bicarbonato anche all'interazione con il suolo e la materia organica. Infatti l'acido carbonico viene prodotto per ossidazione, mediata da batteri, della materia organica a CO_2 e per successiva idratazione della CO_2 secondo la reazione seguente:



Inoltre la presenza dell'acido ossalico contenuto nelle secrezioni di alcuni organismi vegetali, può complessare alcuni metalli (es. Fe ed Al) determinando la decomposizione dell'ossalato in CO_2 e HCO_3 e la precipitazione dei metalli. Infine un'altra fonte di bicarbonato può derivare anche dalla dissoluzione dei feldspati.

Bilancio idrologico

Di seguito si riporta il bilancio idrologico stimato per il bacino della Valle delle Fonti (Tabella 5).

In conclusione sulla base dei dati ottenuti si può constatare che il bacino della Valle delle Fonti, seppur caratterizzato da formazioni tipicamente impermeabili, recepisce un elevato volume di acque per infiltrazione, pari al 90% del deflusso idrico globale. Il notevole spessore dei depositi grossolani che caratterizzano la Valle delle Fonti permette l'infiltrazione e l'accumulo delle acque a livelli poco profondi e successivamente un lento, ma continuo, rilascio delle stesse tramite le scaturigini distribuite lungo tutta la valle.

Corpo acquifero di Monte Maggiore

Il rilievo di Monte Maggiore (451 m s.l.m.) si erge al di sopra dell'abitato di Ripafratta, all'estremità Nord del Monte Pisano (Fig. 8), ed è costituito da un unico ed imponente affioramento costituito dalla Maiolica (Giannini e Nardi, 1965) che presenta una composizione litologica (calcare pressoché puro) particolarmente soggetta alla dissoluzione da parte delle

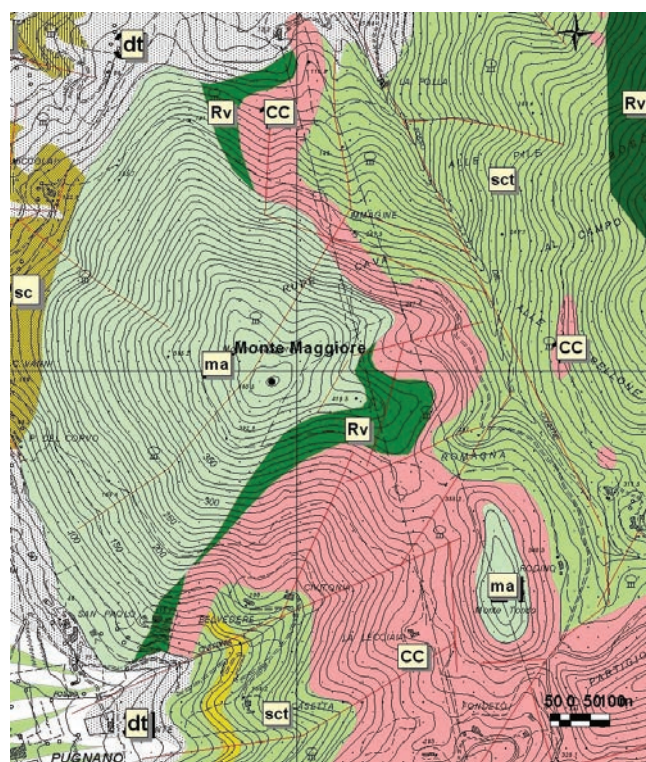


Fig. 8 - Affioramento di Maiolica (ma) sul Monte Maggiore. sct: scisti sericitici e calcescisti della Scaglia Toscana (Cretaceo-Eocene); CC: calcare cavernoso (Trias Sup.); Rv: radiolariti varicolori (Giur. sup.); ma: maiolica (Titonico sup.-Cretaceo Inf.); sc: Scaglia Rossa (Cretaceo Sup. - Eocene); dt: deposito di versante.

Fig. 8 - Outcrop of Maiolica (ma) at M. Maggiore. Sct: schist and calc-schist (Scaglia Toscana, Cret.-Eoc.); CC: limestone (Late Trias.); Rv: chert (Late Jur.); ma: limestone (Titb.-Early Cret.); sc: sbale (Late Cret. - Eoc.); dt: debris.

acque meteoriche, leggermente acide per il contenuto in CO_2 , che ne favorisce il comportamento come serbatoio acquifero. Nonostante questi elementi favorevoli all'immagazzinamento di acque ipogee, i rilevamenti, eseguiti nel giugno-luglio 2006, non hanno rilevato la presenza di scaturigini o sorgenti, neppure al contatto con la formazione della Scaglia Rossa, alla base del rilievo, al di sopra di Ripafratta. Generalmente gli acquiferi nella Maiolica, come in questo caso, costituiscono quasi sempre acquiferi sospesi nei quali le sorgenti si dispongono al contatto con le formazioni impermeabili sottostanti (Piccini et al., 1999). La mancanza di sorgenti può essere attribuita proprio alla elevata permeabilità della formazione che ne favorisce l'infiltrazione in profondità, ma non presenta orizzonti intermedi impermeabili che ne permettano l'accu-

mulo e la scaturigine. Il Corpo acquifero di Monte Maggiore costituisce quindi un interessante problema meritevole di ulteriori approfondimenti.

Bilancio idrologico

Nella Tabella 6 è riportato il calcolo del bilancio idrologico.

Sulla base di questi dati, si può affermare che la formazione della Maiolica dal punto di vista idrogeologico rappresenta un buon acquifero, in grado di accogliere ogni anno 303.365 m^3 di acqua meteorica e con un alto grado di permeabilità, grazie al quale circa l'80% del deflusso globale viene trasferito al circuito profondo. L'elevato valore di infiltrazione calcolata spiega la mancanza di sorgenti nell'area del bacino.

Tab. 6 - Bilancio idrologico Corpo acquifero Monte Maggiore.

Tab. 6 - Water budget of Monte Maggiore aquifer.

Superficie Maiolica	Precipitazioni P	Evapotraspirazione Er	Deflusso idrico globale Dr	Infiltrazione I	Deflusso superficiale
	1100 mm	685,0 mm	415,0 mm	332,0 mm	
731.000 m^2	804.100 m^3/anno	500.735 m^3/anno	303.365 m^3/anno	242.692 m^3/anno	60.673 m^3/anno

Le acque del Monte Pisano confrontate con le acque termali di San Giuliano Terme

Le acque del versante sangiulianese del Monte Pisano, di cui abbiamo dato una prima caratterizzazione chimica sono state confrontate con le acque del circuito termale di San Giuliano Terme alimentate da un serbatoio costituito dal CC (Grassi e Squarci 1991; Grassi e Cortecchi 2005; Sergiampietri 2006) riportate in Fig. 9. I grafici elaborati (Ca vs Mg e TDS vs Ca; Fig. 10) mostrano l'esistenza di quattro distinti gruppi di acque che rispecchiano i diversi contesti geologici e i diversi percorsi delle acque:

- (i) le acque termali in senso stretto, quelle a temperatura maggiore e a maggiore concentrazione, che scaturiscono nei pressi del complesso termale (L, P, PT e N);
- (ii) una miscela di acque termali e acque a minore concentrazione e minore temperatura, legate a circuiti superficiali prevalentemente carbonatici (C, Bs e Bp);
- (iii) acque carbonato calciche a media salinità (CC)
- (iv) acque bicarbonato calciche a bassa salinità (Valle delle Fonti).

Il grafico LL HCO_3 (Fig. 11), come già illustrato nei paragrafi precedenti, mostra che le acque che circolano nel CC e lungo la Valle delle Fonti sono di tipo bicarbonato calcico, mentre le acque termali sono solfato calciche. Inoltre è possibile individuare un percorso evolutivo delle acque che si infiltrano nel versante san giulianese del Monte Pisano il cui stadio iniziale è rappresentato dai campioni della Valle delle Fonti, a minore concentrazione (S1, S5, S6), che la parte centrale del grafico, al quale segue una fase in cui le acque, percorrendo circuiti più lunghi e quindi interagendo per tempi più lunghi con la copertura detritica, risultano più mine-

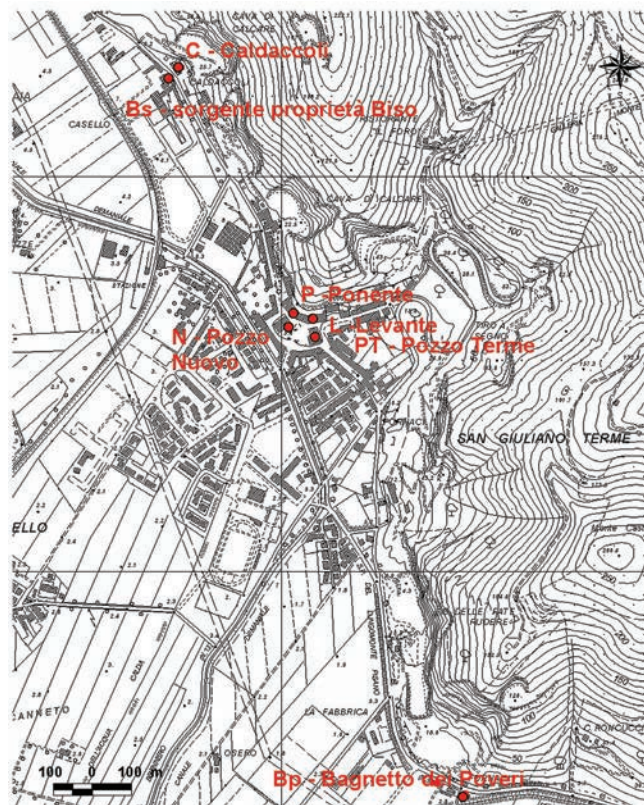


Fig. 9 - Ubicazione delle scaturigini termali in corrispondenza dell'abitato di S. Giuliano Terme.

Fig. 9 - Thermal spring in the near of San Giuliano Terme.

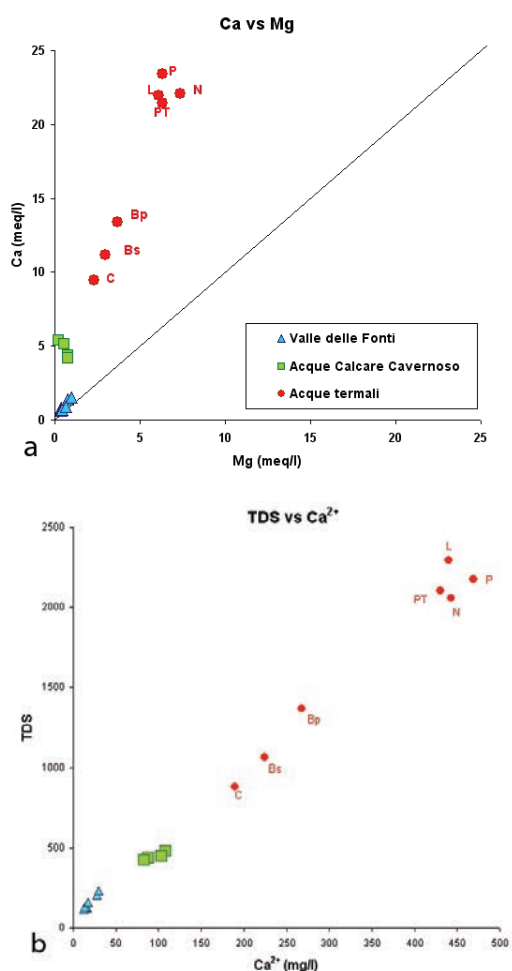


Fig. 10 - Le acque di San Giuliano: a) diagramma Ca vs Mg e b) diagramma TDS vs Ca.

Fig. 10 - San Giuliano waters: a) diagram TDS vs Ca and b) diagram TDS vs Ca.

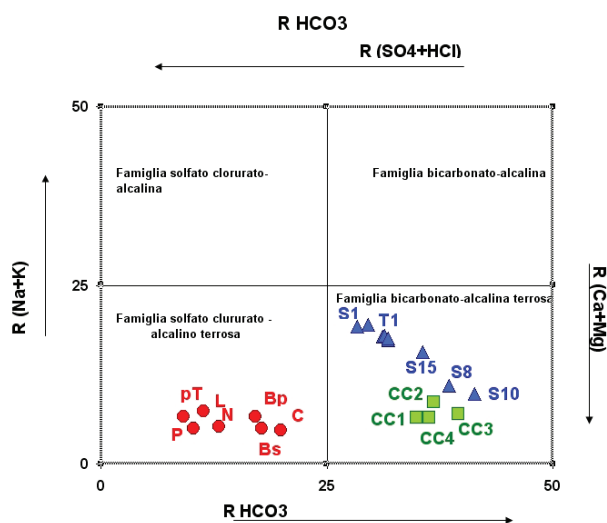


Fig. 11 - Le acque di San Giuliano: diagramma RHC03.

Fig. 11 - San Giuliano waters: diagram RHC03.

ralizzate (porzione in basso a destra - S8, S10). L'evoluzione continua spostandosi verso sinistra interessando le acque che circolano in rocce calcaree a maggiore contenuto di bicarbonato e calcio (CC). Il passaggio finale è rappresentato dalle acque che raggiungono profondità maggiori, e interagendo con rocce evaporitiche, assumono un maggior grado di salinizzazione e cambiano il proprio tipo chimico da bicarbonato calcio a solfato calcio, tipico delle acque termali. Nel diagramma LL HCO₃ queste acque risultano più spostate verso destra quanto minore è il loro grado di mescolamento con acque più superficiali (bicarbonato calciche).

Conclusioni

Nel versante san giulianese del Monte Pisano sono stati individuati tre principali corpi acquiferi indipendenti: Corpo acquifero del Monte Maggiore, Corpo acquifero del Monte Partigione e Corpo acquifero Valle delle Fonti. La delimitazione dei diversi sistemi idrogeologici ha permesso il calcolo dei singoli bilanci idrologici con la stima delle risorse idriche rinnovabili, cioè dei quantitativi d'acqua che mediamente circolano annualmente nei principali corpi acquiferi. Il Corpo acquifero che si sviluppa all'interno del Monte Partigione, dal punto di vista idrogeologico, costituisce un potente acquifero ma, data l'elevata permeabilità e considerata la scarsa presenza di sorgenti, la loro natura temporanea, ed i bassi valori di portata, si ritiene vada ad alimentare un circuito profondo.

Il Corpo acquifero della Valle delle Fonti, seppur caratterizzato da formazioni tipicamente impermeabili, recepisce un elevato volume di acque per infiltrazione, pari al 90% del deflusso idrico globale, dovuto al notevole spessore dei depositi grossolani permeabili che permettono l'infiltrazione e l'accumulo delle acque a livelli poco profondi.

Il Corpo acquifero del Monte Maggiore, sviluppandosi interamente all'interno della Maiolica, rappresenta un buon acquifero con un alto grado di permeabilità, che permette all'80% del deflusso globale di raggiungere circuiti profondi. Nonostante l'elevata percentuale di infiltrazione stimata non sono presenti sorgenti nell'area del bacino.

Infine dal punto di vista idrochimico le sorgenti del corpo acquifero Calcare Cavernoso e Valle delle Fonti sono state confrontate con le acque del sistema termale di San Giuliano Terme. Dal confronto emerge una possibile evoluzione chimica delle acque che si infiltrano nel bacino di studio e che è legata ai circuiti seguiti dalle acque d'infiltrazione, ai tempi di percorrenza e alle profondità raggiunte. Da acque bicarbonato calciche a bassa salinizzazione (Valle delle Fonti), si passa ad acque bicarbonato calciche a media salinizzazione (Calcare Cavernoso) fino ad evolversi in acque ad elevato contenuto salino ed alto grado chimico mescolandosi con acque calde profonde (acque termali di San Giuliano Terme).

BIBLIOGRAFIA

- Bertagni F., Bigazzi C. (1990). La montagna in San Giuliano Terme: la storia, il territorio. Edizioni Giardini.
- Coutagne A. (1956). La pouvoir évaporant de l'atmosphère. Rev. Genl. De l'Hydraul., 73.
- Giannini E., Nardi R. (1965). Geologia della zona nord-occidentale del Monte Pisano e dei Monti D'Oltre Serchio (Prov. di Pisa e Lucca). Boll. Soc. Geol. It. 8 (5):197-270.
- Grassi S., Carosi R., Marroni M., Ancora D. (1992). Il sistema idrotermale di San Giuliano (PI): note di geologia, idrogeologia e geochemica. Bollettino della Società Geologica Italiana 111:2.
- Grassi S., Corceci G. (2005). Hydrogeology and geochemistry of the multilayered confined aquifer of the Pisa plain (Tuscany-central Italy). Applied Geochemistry 20: 41-54.
- Grassi S., Squarci P. (1991). Studio del sistema idrotermale di San Giuliano Terme per il reperimento di fluidi caldi.
- Langelier W.F., Ludwig H.F. (1942). Graphical methods for indicating the mineral character of natural waters. J.A.W.W.A.:34.
- Monition L., Nerat De Lesguise M. (1960). Carte hydrogéologique et notice explicative de la région de Casablanca, au 1 :50.000. Notes et mem. serv. géol. Maroc., n. 131, Rabat.
- Pappalardo M., Putzolu P.P. (1994). Le "sassaie" dei Monti Pisani: "colate di pietra" tipiche dell'ambiente periglaciale. Atti Soc. Tosc. Sci. Nat. Mem. Seria A 101: 323-342.
- Piccinini L., Pranzini G., Tedici L., Forti P. (1999). Le risorse idriche dei complessi carbonatici del comprensorio Apuo-Versiliese. Quaderni di Geologia Applicata, 6-1
- Pistoia A., Sergiampietri L., Innamorati D. (2010). Studio relativo ai fattori naturali ed antropici che influenzano i fenomeni erosivi e di dissesto idrogeologico del versante Sangiulianese del Monte Pisano. Rapporto finale relativo alla convenzione tra Comune di San Giuliano Terme e Università di Pisa, Dipartimento di Agraria.
- Rapetti e Vittorini (1994). La pianura di Pisa e i rilievi contermini: la natura e la storia. Memorie della Società Geografica Italiana Vol. L.
- Rau, A., Tongiorgi, M. (1974). Geologia dei Monti Pisani a sud della Vale del Guappero. Mem. Soc. Geol. It. 154:227-408.
- Regione Toscana (2007). Studio idrogeologico prototipale del corpo idrico sotterraneo significativo dell'acquifero carbonatico delle Alpi Apuane, Monti d'Oltre Serchio e S. Maria del Giudice.
- Regione Toscana (2012). Servizio Idrologico Regionale: <http://www.sir.toscana.it/> [Ultimo accesso 1 Aprile 2011]
- Sergiampietri L. (2006). Bagni di Pisa: idrogeologia del complesso termale di San Giuliano Terme. Studio commissionato dal Comune di San Giuliano Terme.
- Turc L. (1954). Calcul du bilan de l'eau: evaluation en fonction des précipitation et des températures. IAHS Publ. 37:88.200.