

L'idrogeologia regionale nella pianificazione e gestione della risorsa idrica sotterranea. Il dominio vulcanico laziale (Italia centrale)

Regional hydrogeology for groundwater resource management policies. The Latium volcanic domain (central Italy)

Roberto Mazza, Lucia Mastrorillo

Riassunto: Nelle aree vulcaniche del Lazio l'aumento incontrollato dei prelievi idrici, dovuto al crescente sviluppo residenziale, ha innescato inesorabili fenomeni di riduzione delle portate sorgive e di abbattimento dei livelli piezometrici. Questa situazione ha evidenziato l'urgenza e la necessità di una razionalizzazione della gestione del patrimonio idrico sotterraneo partendo da una sua dettagliata conoscenza sia sotto l'aspetto qualitativo che quantitativo.

I principali obiettivi di questa nota sono quelli di mettere in risalto l'importanza del metodo di studio e dei risultati, finora ottenuti dai ricercatori del Laboratorio di Idrogeologia Quantitativa dell'Università degli Studi di Roma Tre, nelle azioni di supporto alla pianificazione delle attività relative all'uso e alla tutela della risorse idriche sotterranee. A tale scopo viene proposta una sintesi degli studi idrogeologici degli ultimi decenni che hanno contribuito all'emanazione dell'attuale normativa regionale di pianificazione delle risorse idriche sotterranee degli acquiferi vulcanici.

Parole chiave: Dominio vulcanico laziale, idrogeologia regionale, acquiferi vulcanici, modello idrogeologico concettuale, bilancio idrogeologico, gestione della risorsa idrica sotterranea.

Keywords: *Latium volcanic domain, regional hydrogeological analysis, volcanic aquifers, conceptual hydrogeological model, hydrogeological budget, groundwater resource management.*

Roberto MAZZA
Lucia MASTRORILLO ✉
Università degli Studi Roma Tre - Dipartimento di Scienze - Sezione Geologia
Largo San Leonardo Murialdo 1, 00146 Roma
lucia.mastrorillo@uniroma3.it

Ricevuto: 01 settembre 2013 / Accettato: 30 dicembre 2013
Pubblicato online: 21 febbraio 2014

© Associazione Acque Sotterranee 2013

L'area di studio corrisponde al dominio vulcanico peritirrenico laziale e si estende su circa 6500 km² in cui sono state revisionate, in chiave idrogeologica, circa 3000 stratigrafie e controllati circa 2600 punti d'acqua al fine di ricostruire un modello concettuale di circolazione idrica sotterranea a scala regionale. Il modello concettuale è stato successivamente validato con la risoluzione del bilancio idrogeologico, per la corretta impostazione del quale, è stata necessaria un'attenta e sistematica valutazione dei prelievi che costituiscono il termine principale di uscita del bilancio stesso. Questa analisi ha portato alla verifica dello stato di conservazione della risorsa e all'individuazione delle "aree critiche", sulle quali intervenire nella fase di programmazione con una rimodulazione dei prelievi al fine di raggiungere gli obiettivi di risanamento sia in termini di tutela ambientale che di previsioni di sviluppo dell'area.

Abstract: *Growing urban areas in the Latium volcanic domain has resulted in the increase of water demand. The uncontrolled increase in water withdrawals cause an inexorable reduction of springs discharges and progressive drawdown of groundwater levels. This emergency needs an urgent rationalization of groundwater management thorough understanding of qualitative and quantitative features of the aquifers. The main aim of this paper is to emphasize the importance of the method of study and the results obtained by researchers belonging to the Laboratory of Quantitative Hydrogeology (University of Roma Tre) to support the use and protection of groundwater resources. Therefore, we propose a summary of methods applied in previous hydrogeology studies that have contributed to legislation on groundwater resources management in the volcanic aquifers.*

The study area corresponds to the Latium volcanic domain and covers approximately 6500 km². About 3000 stratigraphic data and about 2600 water points have been collected in order to set up a conceptual hydrogeological model. The conceptual model has been validated by the resolution of the hydrological budget. Detailed evaluation of the water supply is essential for the correct setting of the hydrological budget, in fact it represents the main output of the budget. These analysis highlight the condition of the resource. Critical areas have been identified for reshaping of water supply in order to increase environmental remediation and economic development.

Introduzione

Sin dai tempi antichi le risorse idriche sotterranee degli acquiferi vulcanici del Lazio hanno costituito un'importante fonte di approvvigionamento idropotabile attraverso prelievi prevalentemente da pozzi. La convenienza della captazione da pozzo delle acque sotterranee è legata alla geometria multifalda degli acquiferi vulcanici che favorisce un iniziale utilizzo dei livelli acquiferi superficiali facilmente accessibili e il successivo approfondimento dei prelievi nelle falde sottostanti. Il crescente sviluppo residenziale nelle aree vulcaniche ha inevitabilmente determinato l'incremento del fabbisogno idrico che, nel tempo, si è tradotto in un aumento incontrollato dei prelievi idrici innescando inesorabili fenomeni di riduzione delle portate sorgive e di abbattimento dei livelli piezometrici. Il rimedio immediato a tale situazione è stato, ed è tutt'ora, la tendenza all'aumento della profondità delle perforazioni nel tentativo di raggiungere orizzonti acquiferi più profondi e temporaneamente più produttivi.

Gli effetti negativi del graduale depauperamento delle risorse idriche disponibili, a fronte di un progressivo incremento del fabbisogno idrico, hanno evidenziato l'urgenza e la necessità di una razionalizzazione della gestione del patrimonio idrico sotterraneo, partendo da una sua dettagliata conoscenza sia sotto l'aspetto qualitativo che quantitativo. Per tale ragione, da alcuni decenni, sono state prodotte ricerche scientifiche per affinare le conoscenze dell'assetto idrogeologico dei distretti vulcanici peritirrenici.

Il principale obiettivo di questa nota è quello di comprovare l'efficacia di un metodo di ricerca idrogeologica, con il quale ottenere risultati che costituiscono il principale supporto scientifico fornito alle amministrazioni pubbliche nella realizzazione di strumenti di pianificazione e gestione della risorsa idrica (Misstear, 2000; Asano e Cotruvo, 2004; Jemcov, 2007).

In circa venti anni di ricerca idrogeologica nel territorio vulcanico laziale, il Laboratorio di Idrogeologia Quantitativa dell'Università degli Studi di Roma Tre, ha pubblicato studi idrogeologici condotti con i tradizionali metodi dell'idrogeologia quantitativa, che si basano sul rilevamento di campagna dei dati idrogeologici con un dettaglio di acquisizione che nel corso del tempo è andato progressivamente aumentando. Il grado di conoscenza idrogeologica raggiunto è caratterizzato da quella uniformità e omogeneità spaziale e temporale indispensabile per un approccio regionale in termini di salvaguardia e gestione delle risorse idriche.

I risultati ottenuti, sintetizzati nella nota, costituiscono attualmente il quadro conoscitivo di riferimento nelle azioni di:

- a) supporto ai compiti di indirizzo, gestione e tutela delle risorse idriche sotterranee assegnati dalla normativa agli enti istituzionali preposti (Autorità di Bacino, Regioni, Province, Comuni ecc.);
- b) coordinamento e indirizzo delle attività dei liberi professionisti, con specifiche competenze nel settore, per scongiurare la propagazione di un diffuso abusivismo, responsabile di gravi inconvenienti sia nell'uso che nella tutela delle risorse idriche sotterranee.

E' volontà degli Autori esplicitare maggiormente l'aspetto metodologico degli studi finora condotti, nella convinzione che la metodologia di studio adottata evidenzia e quantifica gli aspetti idrogeologici necessari alle amministrazioni pubbliche per programmare adeguati ed efficienti piani di gestione della risorsa idrica sotterranea. Per l'analisi degli specifici risultati si rimanda alla consultazione delle seguenti pubblicazioni scientifiche e di cui questa nota costituisce una sintesi: Capelli et al., 1998; Giordano et al., 2000; Pagano et al., 2000; Capelli et al., 2004; Capelli et al., 2005; Capelli e Mazza, 2005; Di Matteo et al., 2005; Capelli et al., 2008; Mazza et al., 2008; Capelli et al., 2012a, 2012b; Mazza et al., in press.

Sulla base degli studi idrogeologici citati, la Regione Lazio ha emanato le principali direttive di pianificazione delle risorse idriche sotterranee degli acquiferi vulcanici regionali:

- **DGR 1317 del 5/12/2003** "Individuazione e classificazione delle aree a regime idraulico e idrogeologico alterato nell'ambito degli acquiferi vulcanici dei Colli Albani e Monti Sabatini. Presa d'atto delle misure di salvaguardia definite dall'Autorità di Bacino Regionale e dall'Autorità di Bacino del Tevere. Linee d'intervento e provvedimenti prioritari";
- **DGR 222 del 25/02/2005** "Monitoraggio delle acque sotterranee – Rilevazione dei fattori meteo-climatici e idrologici per il calcolo del bilancio idrico degli acquiferi";
- **DGR 42 del 27/09/2007** "Piano di Tutela delle Acque Regionali (PTAR) ai sensi del D.Lgs. 152/99 e successive modifiche ed integrazioni";
- **DGR 445 del 16/06/2009** "Deliberazione Consiglio Regionale 27 settembre 2007, n. 42, art. 19, comma 2. Provvedimenti per la tutela dei Laghi Albano e di Nemi e degli acquiferi dei Colli Albani. Modifica alla deliberazione Giunta Regionale n. 1317 del 5 dicembre 2003";
- **DGR 11 del 13/01/2012** "D.Lgs. 152/06 art. 95 e D.C.R. n°42/07 Piano di Tutela delle Acque - Norme Tecniche di Attuazione, art. 4 c. 10: Adozione dello schema di "Piano di Tutela Quantitativa - stralcio funzionale del sistema idrogeologico dei Colli Albani (PTQ-Albani)".

Area di studio: inquadramento geologico e idrogeologico

L'area di studio corrisponde al dominio vulcanico peritirrenico e si estende su circa 6500 km² all'interno del territorio della Regione Lazio (Fig. 1)

Il vulcanismo del Lazio, sviluppatosi a partire dalla fine del Pliocene, è parte della provincia vulcanica tosco-laziale, impostata in una fascia strutturalmente depressa parallela alla costa tirrenica (De Rita, 1993, De Rita et al., 1993); l'area è compresa tra il settore più elevato della catena appenninica e le zone costiere, al margine del bacino del Tirreno caratterizzato da una crosta di tipo oceanico di età pliocenica. Nel Lazio il vulcanismo ha originato più distretti vulcanici a prevalente attività esplosiva subaerea, che si alternano con strutture ora centrali ora areali: il Distretto Vulcanico Vulsino, quello Cimino-Vicano, quello Sabatino con associato il Distretto Tolfetano-Cerite-Manziate ed infine il Distretto vulcanico dei Colli Albani.

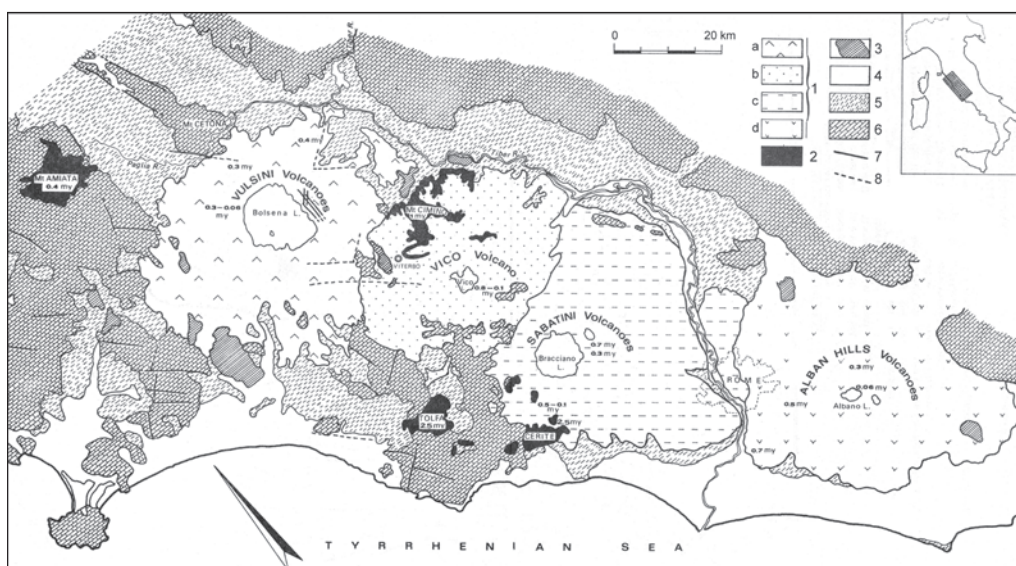


Fig. 1 - Schema geologico del dominio vulcanico laziale. 1) Vulcaniti alcalino potassiche (Quaternario) (a – Distretto Vulcanico dei Monti Vulsini; b – Distretto Vulcanico dei Monti Vicini; c – Distretto Vulcanico dei Monti Sabatini; d – Distretto Vulcanico dei Colli Albani); 2) Vulcaniti acide (Pliocene-Pleistocene); 3) Travertino; 4) Sedimenti continentali e costieri (Quaternario); 5) Sedimenti argillosi e sabbiosi (Miocene superiore-Pliocene-Pleistocene inferiore); 6) Successioni prevalentemente sedimentarie (Carbonifero-Miocene inferiore); 7) Faglie; 8) Faglie sepolte (Locardi et al., 1976).

Fig. 1 -Geological setting of Latium volcanic domain. 1) Alkaline - potassic volcanics (Quaternary) (a -Vulsino district; b - Cimino - Vicano district; c - Sabatini district; d - Colli Albani district); 2) acid volcanic (Plio - Pleistocene); 3) travertine; 4) continental and coastal sediments (Quaternary); 5) clays and sands (Upper Miocene - Pliocene - Lower Pleistocene); 6) mainly sedimentary sequences (Carboniferous- Lower Miocene); 7) Faults; 8) Buried faults (Locardi et al., 1976).

L'ampia coltre vulcanica può raggiungere spessori superiori a 1000 m e ricopre un substrato sedimentario, localmente affiorante o sub-affiorante, riferibile a diversi cicli deposizionali (successione carbonatica mesozoica basale, complesso allocatone flyschoid, sedimenti neo-autoctoni neogenici in facies prevalentemente marina, sedimenti in facies continentale del Pleistocene medio-superiore) (Capelli et al., 2005).

Dal punto di vista idrogeologico i distretti vulcanici laziali sono sede di acquiferi multistrato fra loro idraulicamente interconnessi, con circolazione idrica diffusa nelle piroclastiti più o meno coerenti, nelle colate piroclastiche e laviche, prodotte sia dall'attività centrale che periferica. Gli acquiferi sono sostenuti alla base dal substrato a bassa permeabilità dei depositi sedimentari pre-vulcanici. La circolazione idrica sotterranea è caratterizzata da una suddivisione in sistemi idrogeologici idraulicamente definiti, corrispondenti a ciascun distretto vulcanico (vulsino, cimino - vicano, sabatino e albano). Ogni distretto vulcanico, quindi, è caratterizzato da una propria circolazione idrica sotterranea che solo localmente presenta limitate e circoscritte situazioni di interconnessioni idrauliche con distretti limitrofi.

A scala di maggior dettaglio gli acquiferi presentano un'evidente geometria multifalda, con circolazioni idriche sovrapposte e fra loro localmente interconnesse, localizzate prevalentemente nel settore centrale dell'edificio vulcanico, che sovrastano una circolazione idrica profonda e di maggiore estensione con direzione di flusso generalmente centrifuga (falda basale) (Baiocchi et al., 2006, Capelli et al., 2005).

Le discontinuità tettoniche, che interrompono la continuità del substrato a bassa permeabilità, possono favorire la miscelazione delle acque della falda regionale con i circuiti idrotermali profondi, determinando locali situazioni di termalismo

e mineralizzazione delle acque sotterranee. In corrispondenza dei centri di emissione, quando sono presenti specchi lacustri, l'assenza del substrato a bassa permeabilità può favorire la connessione idraulica fra le diverse circolazioni. I laghi, infatti, sono generalmente alimentati dai contributi sotterranei delle diverse falde più superficiali e, dove particolarmente profondi, si raccordano idraulicamente con la falda basale (Capelli et al., 2005).

Nel dominio vulcanico laziale le sorgenti più importanti sono quelle di tipo lineare, presenti nei corsi d'acqua che scorrono lungo i versanti degli edifici vulcanici. Queste sorgenti si manifestano negli alvei la cui profondità di incisione raggiunge la quota di saturazione della falda. Le emergenze puntuali sono generalmente alimentate dal sistema multifalda sovrastante la falda di base ed erogano volumi più modesti. Anche i laghi del dominio vulcanico, come già spiegato, sono sorgenti che canalizzano il loro flusso negli emissari naturali o artificiali di epoca romana. Negli ultimi decenni le misure sperimentali hanno evidenziato negli acquiferi vulcanici laziali fenomeni di marcata riduzione delle portate sorgive e di progressivo abbattimento dei livelli piezometrici, nonché abbassamento dei livelli dei laghi (Capelli et al., 2005).

Il sempre più pressante utilizzo del territorio vulcanico, sia in termini di urbanizzazione che di industrializzazione e agricoltura intensiva, unitamente a fattori climatici contingenti (variazioni climatiche degli ultimi cento anni) ha determinato una modificazione degli equilibri idrodinamici della circolazione idrica sotterranea a scala regionale (Di Matteo et al., 2010). Gli effetti di tali squilibri sono evidenti sia nella diminuzione delle portate "naturalmente" erogate dai sistemi idrogeologici studiati (sorgenti puntuali e lineari), sia nella riduzione del rendimento delle opere di captazione realizzate.

Questi indicatori mostrano una tendenza generalizzata all'innescarsi di situazioni, sempre più frequenti, di ricariche inadeguate rispetto ai volumi d'acqua emunti con conseguente progressivo depauperamento delle riserve idriche.

Per la scelta degli interventi strutturali e normativi per l'ottimizzazione dell'uso delle risorse idriche sotterranee è stato necessario disporre, oltre che di un adeguato quadro idrogeologico conoscitivo di base, anche dei termini per la corretta impostazione dei calcoli del bilancio idrico. I risultati del calcolo di bilancio, risolto ad un elevato grado di dettaglio spaziale e temporale, ha consentito, infatti, di individuare i volumi massimi di acqua che possono essere emunti nei diversi settori di un acquifero, tenendo conto delle esigenze di tutela ambientale e di sviluppo del sistema socio economico.

Metodologia di studio

Gran parte delle ricerche sull'argomento sono state realizzate applicando, su un territorio regionale, i criteri dell'analisi idrogeologica quantitativa (White, 1969; Boni et al., 1986; De Marsily, 1986; Custodio, 1989, 2007; Scanlon et al., 2002; Bakalowicz, 2005), che prevedono il continuo confronto fra l'assetto geologico e idrogeologico del territorio e la potenzialità delle risorse idriche contenute negli acquiferi, valutata sulla base dei dati idrogeologici di terreno. I dati idrogeologici raccolti ed analizzati negli sviluppi progressivi delle ricerche (circa 3000 stratigrafie, 2000 punti di controllo del livello di falda, 650 stazioni di misura della portata in alveo) sono attualmente archiviati presso la banca dati informatizzata del Laboratorio di Idrogeologia Numerica e Quantitativa del Dipartimento di Scienze dell'Università degli Studi di Roma Tre e coprono un intervallo temporale di circa 40 anni, a partire dal 1970 ad oggi.

La valenza applicativa dell'analisi idrogeologica di dettaglio, estesa ad un ambito regionale, è da ricercare soprattutto nella prerogativa di considerare territori delimitati non da confini amministrativi (limiti comunali, provinciali, ecc.), ma da limiti idrostrutturali garantendo, quindi, la congruenza dei risultati con il contesto geologico e idrogeologico considerato.

Le principali fasi in cui si articola il metodo di analisi utilizzato possono essere così sintetizzate:

- formulazione di un'ipotesi attendibile dello schema di circolazione idrica sotterranea alla scala di indagine (modello concettuale degli acquiferi);
- valutazione della potenzialità idrica media annua di ciascuna acquifero;
- valutazione dell'entità media annua dei prelievi e delle risorse residue di ciascun acquifero;
- verifica dello stato di conservazione della risorsa attraverso il confronto fra la potenzialità idrica e l'entità dei prelievi.

Ricostruzione del modello idrogeologico concettuale

La ricerca idrogeologica a scala regionale è partita dalla ricostruzione del modello geologico-strutturale di riferimento. Agli elementi del modello geologico-strutturale (formazioni geologiche, limiti stratigrafici, elementi tettonici) sono stati

associati specifici ruoli idrogeologici (acquifero, acquiclude, aquitard, limite di flusso, ecc.) in funzione dei rapporti geometrici fra i singoli elementi geologico – strutturali e gli elementi idrogeologici noti (sorgenti, andamento della superficie piezometrica, ecc.). Il confronto fra l'assetto geologico - strutturale e idrogeologico del territorio con la distribuzione spaziale e la portata delle sorgenti (lineari e puntuali) ha portato all'identificazione delle strutture idrogeologiche ("unità idrogeologiche" o "idrostrutture"). In termini pratici l'applicazione del metodo descritto nel dominio vulcanico laziale, ha previsto, nell'arco di un ventennio, la revisione critica, in chiave idrogeologica, di circa 3000 stratigrafie e il loro confronto con la letteratura geologica, soprattutto cartografica, riguardante l'area di studio. Questa operazione ha consentito di:

- classificare le formazioni vulcaniche in complessi idrogeologici, sulla base alla loro capacità di assorbire, immagazzinare e restituire l'acqua ("potenzialità acquifera" Capelli et al., 2012a);
- ricostruire l'andamento del substrato sedimentario a bassa permeabilità che sostiene la circolazione idrica all'interno degli acquiferi vulcanici. Questa ricostruzione si rivela di fondamentale importanza nella individuazione dei possibili spartiacque sotterranei, generalmente coincidenti con locali alti strutturali del substrato sedimentario sepolto.

Parallelamente all'analisi stratigrafico – strutturale sono state portate a termine numerose campagne di rilevamento idrogeologico (circa 650 stazioni per la misura delle portate delle sorgenti lineari e puntuali, circa 2000 punti di misura del livello freaticometrico della falda) allo scopo di:

- quantificare le portate in uscita dalle idrostrutture individuate;
- ricostruire il probabile andamento della superficie piezometrica a scala regionale.

Si è arrivati, quindi, alla formulazione di un modello concettuale dell'acquifero e/o di un sistema di acquiferi coerente con l'assetto stratigrafico, geologico-strutturale e idrodinamico dell'ambito geologico considerato, la cui validazione è passata attraverso la risoluzione del bilancio idrogeologico.

Il bilancio idrogeologico come verifica del modello idrostrutturale

Con il calcolo del bilancio è stato progressivamente attuato un processo di validazione del modello idrogeologico concettuale, mediante il confronto, su base quantitativa, della rispondenza tra i limiti idrostrutturali ipotizzati e i volumi idrici noti o calcolati. Per agevolare le procedure di calcolo e migliorare la risoluzione dei risultati, il bilancio è stato calcolato in modalità "distribuita", su maglie di 250 m di lato, con l'utilizzo di tecniche GIS.

Nel caso di idrostrutture con limiti idraulici definiti e in cui l'entità delle risorse idriche sotterranee utilizzate è risultata trascurabile rispetto alla potenzialità complessiva del sistema, il calcolo del bilancio idrogeologico ha trovato una soluzione immediata, prendendo atto che la portata media-

mente erogata da un'idrostruttura chiusa equivale alla portata che mediamente si infiltra nella sua area di alimentazione. Diversamente, qualora il sistema idrogeologico da esaminare è risultato circoscritto da limiti di natura idraulica non definita, che non consentono una valutazione dell'entità dei travasi sotterranei, è stata calcolata la ricarica effettiva del sistema a partire dai valori di precipitazione efficace dell'area studiata.

Nei sistemi idrogeologici in esame l'entità delle risorse idriche sotterranee utilizzate non può essere considerata trascurabile rispetto alla potenzialità complessiva dei sistemi. Gli acquiferi vulcanici laziali, infatti, sono sottoposti ad un intenso sfruttamento idrico, la cui entità costituisce uno dei principali termini di "uscita" dal sistema; la corretta risoluzione del calcolo del bilancio idrogeologico, quindi, dipende sostanzialmente dal grado di approssimazione della stima dei prelievi.

Valutazione dei prelievi come termine di uscita nel calcolo del bilancio

Allo stato attuale, negli acquiferi indagati, il prelievo da falda è quantificabile direttamente solo per le captazioni a scopo idropotabile o gestite da Enti che registrano le portate derivate, mentre il volume emunto da pozzi non controllati può essere solamente stimato.

Per ottenere una migliore stima della reale entità dei prelievi è stata utilizzata una procedura, di seguito sinteticamente descritta, che porta alla valutazione del fabbisogno idrico, inteso come "quantità d'acqua necessaria al soddisfacimento dell'idroesigenza del sistema antropico connessa agli usi residenziali, agricoli, industriali ed alle altre attività produttive, commerciali e sociali in genere" (Capelli et al., 2005).

La quantificazione del fabbisogno idrico è partita da un'approfondita valutazione dell'idroesigenza della copertura vegetale e delle attività antropiche, dove per "idroesigenza" si intende il consumo idrico necessario al mantenimento delle condizioni esistenti sulla porzione di territorio considerata. L'idroesigenza è stata quindi calcolata analizzando la distribuzione spaziale delle differenti attività produttive, delle tipologie colturali e vegetazionali naturali e dei diversi usi del suolo ("Unità Territoriali Idroesigenti").

Relativamente al territorio agricolo a ciascuna "Unità Territoriale Idroesigente" è stato associato un fabbisogno irriguo in funzione dei differenti coefficienti colturali (Doorenbos e Pruitt, 1977; Lauciani et al., 1999) e della quantità di acqua disponibile nei suoli (AWC). Il valore di AWC, funzione del regime pluviometrico, esprime il volume d'acqua che può essere trattenuto nel suolo e quindi utilizzabile dalla vegetazione. L'insufficienza dell'AWC a garantire il mantenimento della coltura in produzione, che si verifica generalmente nella stagione estiva, corrisponde al deficit di acqua necessaria al fabbisogno idrico calcolato. La valutazione del deficit, in assenza di reti di distribuzione irrigua attingenti all'esterno del territorio considerato, fornisce una stima (in difetto) dell'entità dei prelievi idrici in loco. Poiché nei territori vulcanici laziali i corsi d'acqua hanno portate estive esigue, il prelievo irriguo ha prevalente origine sotterranea.

Il fabbisogno residenziale viene garantito prevalentemente

dagli acquedotti, di cui sono note le portate in distribuzione e di eventuale origine locale. La stima del prelievo connesso con le captazioni ad uso domestico è stata considerata nella valutazione dei fabbisogni e prelievi irrigui.

Il prelievo per uso industriale corrisponde alla valutazione dell'idroesigenza dell'attività produttiva considerata; la valutazione è stata verificata con i dati di prelievo dichiarati nelle domande di concessione e dove necessario con controlli diretti.

Verifica dello stato di conservazione della risorsa

La metodologia di valutazione descritta ha portato al calcolo del bilancio idrogeologico per ciascuna unità idrogeologica individuata, su un territorio complessivo di circa 6500 km², tenendo in considerazione le attuali condizioni dell'uso del suolo e della distribuzione dei prelievi.

I risultati ottenuti, per ciascuna unità idrogeologica, hanno fornito una valutazione del grado di sfruttamento della risorsa determinando una classificazione degli acquiferi in funzione della rilevanza e dell'entità dello sfruttamento in rapporto alla ricarica media annua.

Il bilancio idrogeologico, riferito ad un anno idrologico medio, in un corpo idrico sotterraneo definito da limiti di flusso nulli si può esprimere come:

$$I_{eff} - F_b - P_r = \Delta S$$

dove:

I_{eff} : l'infiltrazione efficace espressione della ricarica del sistema

F_b : flusso di base misurato negli alvei corrispondente alla portata di magra dei periodi siccitosi (componente della portata sostenuta dagli apporti di acqua sotterranea che emergono dalle sorgenti puntuali e lineari)

P_r : prelievi idrici sotterranei

ΔS : variazione del volume idrico immagazzinato

Quando ΔS assume valori prossimi a zero il sistema è in equilibrio, valori negativi di ΔS individuano situazioni in cui la ricarica è inferiore alle portate in uscita, indicando possibili condizioni di sovrasfruttamento. Tale situazione viene verificata dal rapporto fra l'entità della ricarica e l'entità dei prelievi: valori superiori al 25% segnalano condizioni di sovrasfruttamento (Capelli et al., 2005). Con questo criterio di calcolo i sistemi idrogeologici sono stati classificati in funzione di una valutazione dello stato di conservazione della risorsa.

La modalità di calcolo di tipo "distribuito" ha favorito l'applicazione dei calcoli anche all'interno dei singoli bacini idrogeologici (ambiti di bilancio) di ciascuna unità idrogeologica. La possibilità di ottenere risultati parcellizzati su ciascuna area di applicazione ha consentito l'applicazione di ulteriori criteri di analisi per valutare e localizzare le "aree critiche" ovvero quei settori di acquifero in cui la concentrazione dei prelievi determina livelli di alterazione della circolazione idrica e dei livelli piezometrici significativamente superiori a quelli delle aree circostanti, con rischio di compromissione in tempi brevi dell'approvvigionamento idrico delle attività che vi insistono (Capelli et al., 2005).

Risultati: assetto idrogeologico regionale

In questa nota non vengono presentati risultati inediti, ma viene proposta una sintesi di quanto desunto dalle pubblicazioni scientifiche più volte citate. Dalle medesime pubblicazioni sono tratte le figure, il commento delle quali fornisce un quadro idrogeologico di sintesi dell'area vulcanica laziale.

Per una completa e dettagliata trattazione di tutti gli aspetti, brevemente descritti in questa nota, si rimanda al volume "Strumenti e strategie per la tutela e l'uso compatibile della risorsa idrica nel Lazio" (Capelli et al., 2005) e alla consultazione della recente edizione della Carta Idrogeologica del Territorio della Regione Lazio, scala 1:100.000 (Capelli et al., 2012a), in cui il dominio vulcanico viene contestualizzato all'interno di un quadro idrogeologico regionale completo.

Modello idrogeologico concettuale

Nell'ambito del dominio vulcanico laziale Capelli et al. (2012a, 2012b) individuano cinque unità idrogeologiche (o idrostrutture) (Fig. 2). A scala regionale gli acquiferi afferenti alle unità idrogeologiche individuate sono sostenuti alla base dal substrato sedimentario a bassa permeabilità, il cui andamento in profondità è stato ricostruito sulla base dell'elaborazione dei dati stratigrafici. La geometria degli acquiferi è stata schematizzata in sezioni idrogeologiche interpretative, di cui si riporta come esempio quella relativa all'Unità dei Monti Cimini e Vicani (Fig.3) (Capelli et al., 2012a).

Per ciascuna unità idrogeologica gli Autori rendono noti, nel dettaglio, i seguenti termini del modello idrogeologico concettuale:

- La natura dei limiti idraulici che delimitano le unità. Tali limiti corrispondono generalmente a contatti litologici fra le formazioni vulcaniche sovrastanti e le formazioni sedimentarie, generalmente marnoso -argillose, ai margini delle idrostrutture. A scala regionale, tali contatti assumono quindi il ruolo di limiti a flusso nullo e coincidono anche con la fascia di massima riduzione dello spessore dell'acquifero vulcanico.
- La piezometria regionale (Fig. 4). La ricostruzione piezometrica evidenzia le principali direzioni di flusso sotterraneo che, dal centro dell'edificio vulcanico, sono dirette verso i limiti esterni con palesi variabilità locali del gradiente idraulico. L'andamento della superficie piezometrica rileva marcati spartiacque sotterranei interpretabili come limiti idrodinamici di potenziale, che demarcano le aree di ricarica dei differenti bacini idrogeologici di ciascuna idrostruttura (ambiti di bilancio), riportati in figura 2.
- La ricostruzione piezometrica proposta costituisce la rappresentazione, alla scala di restituzione (1:100.000), di un andamento regionale "medio", della superficie piezometrica. Gli acquiferi vulcanici sono, infatti caratterizzati da una circolazione idrica multifalda che satura gli orizzonti più permeabili in locali condizioni di confinamento e/o semiconfinamento. Gli orizzonti permeabili costi-

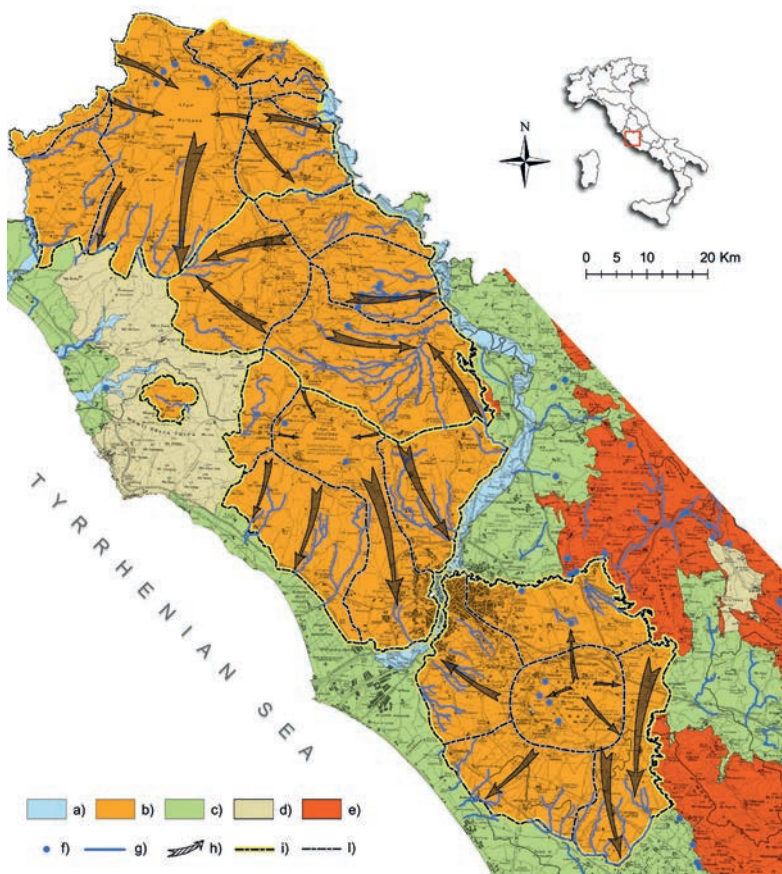


Fig. 2 - Schema delle unità idrogeologiche del dominio vulcanico laziale – (Capelli et al., 2012b modificato) Legenda: a) Unità alluvionali; b) Unità vulcaniche; c) Unità detritico – alluvionali; d) Unità flyschoidi; e) Unità carbonatiche; f) sorgenti puntuali con portata media superiore a 50 L/s; g) sorgenti lineari con portata media superiore a 50 L/s; h) principali direttrici di flusso idrico sotterraneo; i) limiti delle unità idrogeologiche vulcaniche; l) limite dei bacini idrogeologici vulcanici (ambiti di bilancio).

Fig. 2 - Map of hydrogeological units of Latium volcanic domain - (modified from Capelli et al., 2012b). Legend: a) alluvial Units; b) volcanic Units; c) clastic-alluvial Units; d) flysch Units; e) carbonate Units; f) localized springs (mean discharge > 50L/s); g) linear springs (mean discharge > 50L/s); h) main groundwater flowpath; i) boundary of hydrogeological volcanic units; l) boundary of hydrogeological volcanic basins (areas of budget).

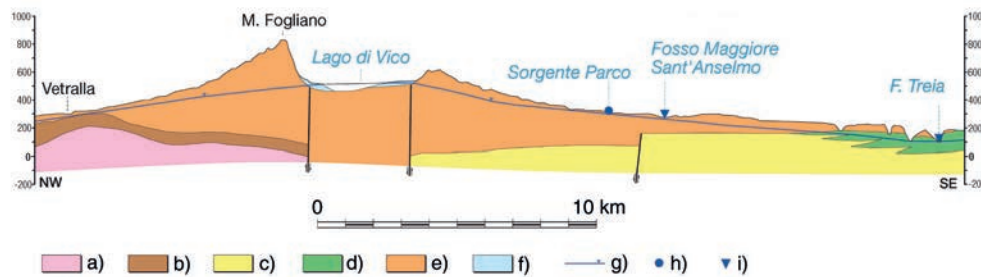


Fig. 3 - Sezione idrogeologica interpretativa dell'assetto idrostrutturale dell'unità idrogeologica dei Monti Cimini e Vicani (stralcio da Capelli et al., 2012 a). Legenda: a) complessi dei depositi carbonatici della successione umbro- marchigiana indifferenziati; b) complessi dei depositi flyschoidi indifferenziati; c) complesso delle argille marine; d) complesso dei depositi clastici indifferenziati; e) complesso delle vulcaniti indifferenziati; f) complesso dei depositi di copertura indifferenziati; g) livello piezometrico medio dell'acquifero; h) sorgente puntuale; i) sorgente lineare.

Fig. 3 - Interpretative hydrogeological section of Cimini and Vicani Mounts structural setting (modified from Capelli et al., 2012 a). Legend: a) carbonate hydrogeological complex of umbria - marchean domain; b) flysch complex; c) complex of marine clays; d) clastic deposit complex; e) volcanic complex; f) detrital deposits complex; g) mean watertable of aquifer; h) localized spring; i) linear spring.

tuiscono le principali vie di scorrimento sotterraneo del flusso idrico sotterraneo. A scala regionale è possibile, assimilare la circolazione "multifalda" ad un'unica circolazione idrica sotterranea la cui continuità idraulica, riferita a vaste porzioni di territorio, è garantita dalla continuità spaziale e dalla reciproca interdigitazione degli orizzonti più permeabili.

- d) La distribuzione spaziale delle sorgenti puntuali e lineari e la valutazione della loro portata media. La distribuzione e la portata media delle sorgenti risulta essere coerente con l'andamento della superficie piezometrica e dei limiti idrodinamici di spartiacque sotterraneo. L'or-

dine di grandezza della portata delle sorgenti lineari è di alcune centinaia di L/s, con massimi di 800 e 1000 L/s; le portate delle sorgenti puntuali raramente superano i 100 L/s.

- e) L'entità della ricarica media annua, espressa come "infiltrazione efficace". Per ciascuna delle cinque unità idrogeologiche individuate viene fornito il valore medio annuo di infiltrazione efficace (mm/anno) (Tab. 1) desunto dal rapporto fra la portata di acqua sotterranea in uscita naturale dal sistema e l'estensione dell'area di infiltrazione. I valori delle portate naturali in uscita dai sistemi sono ricostruiti sulla base di dati storici, precedenti

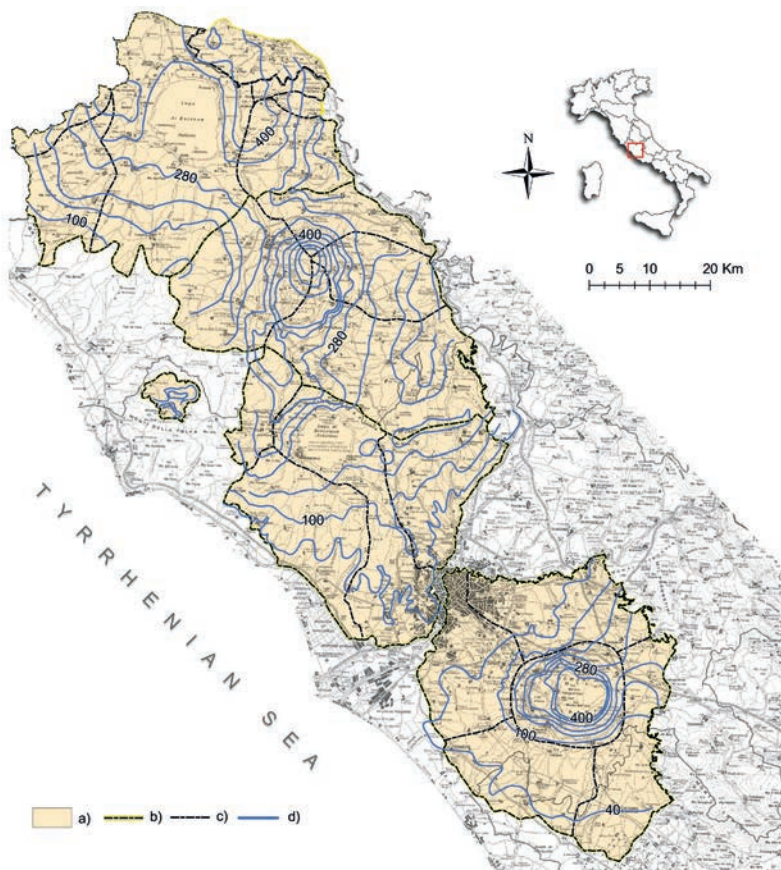


Fig. 4 - Andamento della superficie piezometrica nel dominio vulcanico laziale. Legenda: a) dominio vulcanico; b) limiti delle unità idrogeologiche vulcaniche; c) limite dei bacini idrogeologici vulcanici (ambiti di bilancio); d) isopieze (equidistanza: 60 m). (Capelli et al., 2012a modificato).

Fig. 4 - Regional piezometric map of Latium volcanic domain. Legend: a) volcanic domain; b) boundary of hydrogeological volcanic units; c) boundary of hydrogeological volcanic basins (areas of budget); d) piezometric surface (equidistance: 60 m). (modified from Capelli et al., 2012 a).

Tab. 1 - Infiltrazione efficace media annua calcolata: rapporto fra la portata sorgiva complessivamente erogata e l'area di ricarica di ciascuna unità idrogeologica. (Capelli et al.2012b).

Tab. 1 - Calculated effective infiltration (net recharge): ratio of the average outflow volume (the sum of the average flow from the springs) to the hydrogeological unit recharge area extent (Capelli et al.,2012b).

| Unità idrogeologica | Area km ² | Portata L/s | Infiltrazione Efficace mm/anno |
|-----------------------|----------------------|-------------|--------------------------------|
| Monti Vulsini | 1607 | 12230 | 240 |
| Monti Cimini - Vicani | 1342 | 10210 | 240 |
| Tolfa Allumiere | 46 | 330 | 230 |
| Monti Sabatini | 1249 | 9500 | 240 |
| Colli Albani | 1461 | 12040 | 260 |

all'attuale situazione di sovrasfruttamento delle risorse (Camponeschi e Lombardi, 1969; Cassa per il Mezzogiorno, 1978; D'Amore et al., 1979; Boni et al., 1981a, 1981b; Ventriglia, 1989, 1990). L'espressione quantitativa dell'infiltrazione efficace fornisce, quindi, una prima valutazione dell'ordine di grandezza della capacità media di ricarica di ciascuna unità idrogeologica.

L'ordine di grandezza ottenuto è risultato confrontabile con l'infiltrazione efficace calcolata dall'elaborazione dei dati di precipitazione e temperatura nel calcolo del bilancio idrogeologico (Fig.5) proposto da Capelli et al.(2005).

Bilancio idrogeologico

Utilizzando la metodologia descritta gli Autori hanno redatto un primo bilancio idrogeologico alla scala dell'intero dominio vulcanico laziale (6515 km²), in cui è tenuta in considerazione l'entità dei prelievi diversificati per i vari usi (Tab.2).

Sono stati successivamente calcolati analoghi bilanci idrogeologici riferiti ai singoli sistemi idrogeologici; in particolare, nella Tabella 3, si riportano i risultati relativi all'Unità idrogeologica dei Monti Vulsini, delle Unità aggregate dei Monti Cimini - Vicani e Sabatini e dell'Unità dei Colli Albani desunti da Capelli et al. (2005).

Stato di conservazione della risorsa

I sistemi idrogeologici studiati sono stati classificati in funzione dell'entità delle risorse idriche sotterranee non ancora utilizzate (disponibilità residua), partendo dal confronto dei

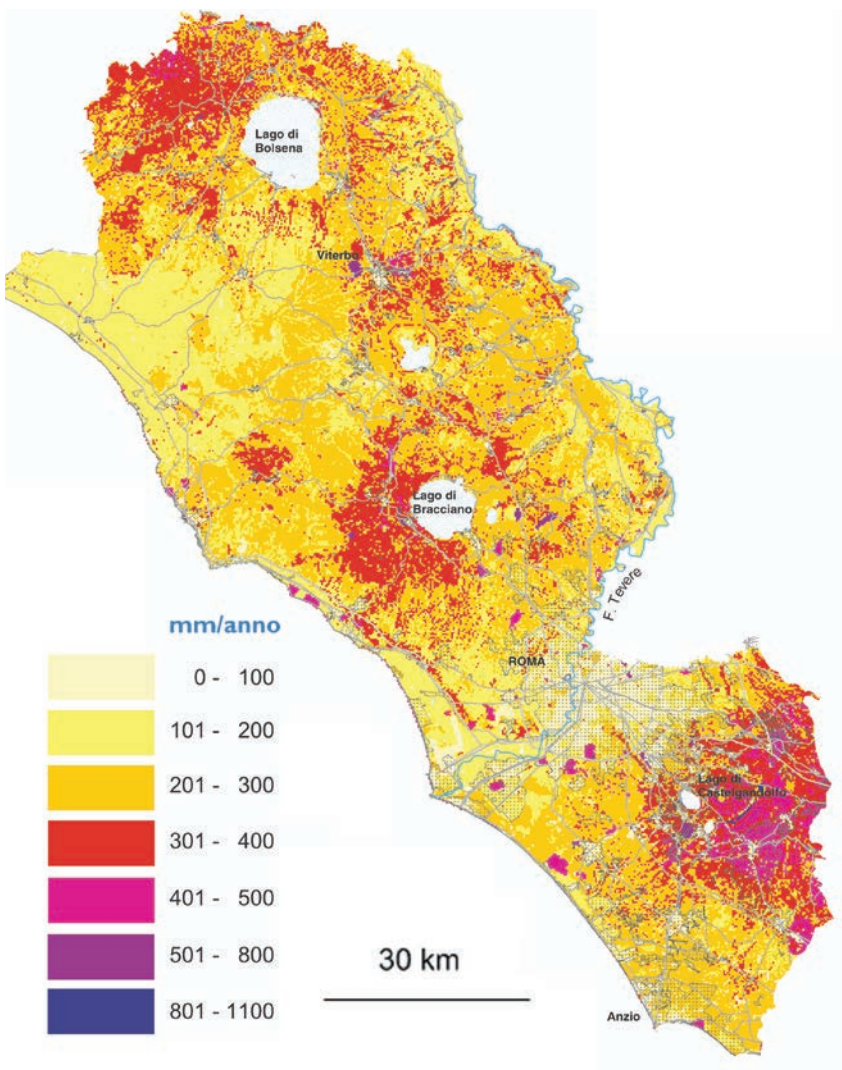


Fig. 5 - Carta dell'infiltrazione efficace del dominio vulcanico laziale (Capelli et al., 2005).

Fig. 5 - Effective infiltration (net recharge) map of Latium volcanic domain (Capelli et al., 2005).

Tab. 2 - *Bilancio idrogeologico del dominio vulcanico laziale (Capelli et al., 2005).*Tab. 2 - *Hydrogeological budget of Latium volcanic domain (Capelli et al., 2005).*

| | mm/anno | L/s | Mm ³ /anno |
|----------------------------------|---------|--------|-----------------------|
| Precipitazione | 704 | 145370 | 4775 |
| Evapotraspirazione | 365 | 73046 | 2.400 |
| Ruscellamento | 97 | 19485 | 640 |
| Infiltrazione Efficace | 240 | 48012 | 1577 |
| Deflusso di base in alveo | 74 | 14792 | 486 |
| Prelievi per usi agricoli | 30 | 5941 | 195 |
| Prelievi per usi industriali | 32 | 6438 | 211 |
| Prelievi da pozzi per acquedotti | 50 | 10018 | 329 |
| Totale prelievi | 112 | 22397 | 736 |

Tab. 3 - *Bilancio idrogeologico delle unità vulcaniche (Capelli et al., 2005).*Tab. 3 - *Hydrogeological budget of volcanic units (Capelli et al., 2005).*

| Sistema Idrogeologico dei Monti Vulsini 1733 km ² | mm/anno | L/s | Mm ³ /anno |
|---|---------|-------|-----------------------|
| Precipitazione | 714 | 39246 | 1238 |
| Evapotraspirazione | 397 | 20361 | 642 |
| Ruscellamento | 64 | 3304 | 104 |
| Infiltrazione Efficace | 249 | 12763 | 403 |
| Deflusso di base in alveo | 97 | 4958 | 156 |
| Prelievi per usi agricoli | 34 | 1763 | 56 |
| Prelievi per usi industriali | 2 | 104 | 3 |
| Prelievi da pozzi per acquedotti | 26 | 1354 | 43 |
| Totale prelievi | 63 | 3221 | 102 |
| Sistema Idrogeologico dei Monti Cimini – Vicani e Sabatini 2800 km ² | mm/anno | L/s | Mm ³ /anno |
| Precipitazione | 678 | 60199 | 1898 |
| Evapotraspirazione | 359 | 31026 | 978 |
| Ruscellamento | 88 | 7571 | 239 |
| Infiltrazione Efficace | 230 | 19885 | 627 |
| Deflusso di base in alveo | 69 | 5941 | 187 |
| Prelievi per usi agricoli | 62 | 5355 | 169 |
| Prelievi per usi industriali | 19 | 1638 | 52 |
| Prelievi da pozzi per acquedotti | 14 | 1240 | 39 |
| Totale prelievi | 95 | 8233 | 260 |
| Sistema Idrogeologico dei Colli Albani 1982 km ² | mm/anno | L/s | Mm ³ /anno |
| Precipitazione | 731 | 45925 | 1448 |
| Evapotraspirazione | 346 | 21659 | 683 |
| Ruscellamento | 138 | 8610 | 272 |
| Infiltrazione Efficace | 245 | 15364 | 485 |
| Deflusso di base in alveo | 62 | 3893 | 123 |
| Prelievi per usi agricoli | 46 | 2900 | 91 |
| Prelievi per usi industriali | 75 | 4696 | 148 |
| Prelievi da pozzi per acquedotti | 53 | 3347 | 106 |
| Totale prelievi | 175 | 10943 | 345 |

valori medi annui dell'entità dei prelievi e della ricarica (infiltrazione efficace) nell'intero dominio vulcanico e nei singoli sistemi idrogeologici (Tab.4) (Capelli et al., 2005).

I risultati sinteticamente descritti evidenziano, sull'intero territorio vulcanico del Lazio, l'esistenza di un patrimonio idrico sotterraneo pari a circa 1500 Mm³/anno. A scala regionale l'utilizzo di queste risorse è prossimo al 50% del totale, ne deriva che il restante 50% costituisce la disponibilità residua che assicura l'attuale mantenimento del deflusso naturale negli alvei e nei laghi nei periodi non piovosi (Tab.5).

Tab. 4 - *Confronto fra l'entità dei prelievi e la ricarica (valori medi annui) nell'intero dominio vulcanico e per le singole unità idrogeologiche (Capelli et al., 2005).*Tab. 4 - *Comparison of water withdrawals and net recharge in the Latium volcanic domain and in hydrogeological units(Capelli et al., 2005).*

| Sistema idrogeologico | Inf. Eff. (ricarica) mm/anno | Prelievi (mm/anno) | Prelievi (% della ricarica) | Disponibilità Residua (% della ricarica) |
|----------------------------------|------------------------------|--------------------|-----------------------------|--|
| Dominio vulcanico | 1577 | 736 | 47 | 53 |
| Monti Vulsini | 403 | 102 | 25 | 75 |
| Monti Cimini – Vicani e Sabatini | 627 | 260 | 41 | 59 |
| Colli Albani | 485 | 345 | 71 | 29 |

Tab. 5 - *Indici utilizzati per la definizione delle aree critiche nell'Unità idrogeologica dei Colli Albani (Capelli et al. 2005).*Tab. 5 - *Index used to define critical areas in the Colli Albani hydrogeological unit (Capelli et al., 2005).*

| Indice | Descrizione | Valore |
|--------|---|---|
| 1 | Rapporto fra anomalia piezometrica e potenza dell'acquifero (%) | 0 se < 5 10 se compreso tra 5 e 20 20 se compreso tra 20 e 50 30 se > 50 |
| 2 | N° pozzi/ha (esclusi quelli per uso acquedottistico) | 0 se < 0,01 2 se compreso tra 0,01 e 1 5 se > 1 |
| 3 | N° pozzi acquedotto/km ² | 0 se < 0,1 5 se compreso tra 0,1 e 1 10 se compreso tra 1 e 2 20 se > 2 |
| 4 | Aree di prelievo ad uso industriale | 0 se non sono presenti 10 se sono presenti |
| 5 | Classi di prelievo agricolo (m ³ /anno/ha) | 0 se compreso tra 0 e 1000 3 se compreso tra 1000 e 3500 10 se > 3500 |
| 6 | Rapporto fra prelievo e ricarica del bacino idrogeologico (%) | 0 se < 25 5 se compreso tra 25 e 75 10 se > 75 |
| 7 | Anomalie piezometriche (m) | 0 se compreso tra 0 e 0,5 5 se compreso tra 0,5 e 2 15 se > 2 |

L'incidenza degli utilizzi della risorsa cambia qualora vengano esaminati i risultati ottenuti per ciascuna unità idrogeologica. Capelli et al. (2005) riferiscono che nel sistema idrogeologico dei Colli Albani circa il 70% delle risorse idriche sotterranee esistenti viene prelevata per usi antropici, lasciando meno del 30% della risorsa alle esigenze di natura ambientale. Nei sistemi idrogeologici Cimini - Vicani e Sabatini il prelievo complessivamente raggiunge circa il 40% della risorsa disponibile. Nel sistema idrogeologico dei Monti Vulsini viene utilizzato "solo" il 25% della risorsa idrica esistente (Capelli et al., 2005). Nei sistemi idrogeologici Cimini - Vicani e Sabatini il prelievo complessivamente raggiunge circa il 40% della risorsa disponibile. Nel sistema idrogeologico dei Monti Vulsini viene utilizzato "solo" il 25% della risorsa idrica esistente (Capelli et al., 2005).

Il territorio dei Colli Albani risulta essere quello a maggior impatto negativo sugli equilibri del sistema idrogeologico e quello maggiormente soggetto alla progressiva intensificazione di tale squilibrio. Studi successivi al 2005, segnalano un incremento dello sfruttamento della risorsa idrica sotterranea fino a valori superiori all'80% della disponibilità totale (Gazzetti, 2012). Questa situazione viene confermata dal generalizzato abbassamento della superficie piezometrica il cui primo effetto negativo in termini ambientale è il progressivo abbattimento dei livelli idrometrici del Lago di Albano (40 cm/anno) e delle portate di magra dei corsi d'acqua (Capelli et al., 2005; Gazzetti, 2012).

Il Piano per la Tutela Quantitativa delle risorse idriche dei Colli Albani

Il sistema idrogeologico dei Colli Albani, nel quale risulta la minore disponibilità residua, è stato oggetto di un'analisi idrogeologica regionale di maggior dettaglio (Mazza et al., 2008; Capelli et al., 2012b; Gazzetti 2012). Partendo da una iniziale suddivisione del sistema acquifero in quattro bacini idrogeologici (Fig.6) definiti dalla posizione degli spartiacque dinamici desunti dalla ricostruzione piezometrica (Capelli et al., 2005), gli approfondimenti degli studi hanno portato alla ridefinizione degli attuali cinque bacini (ambiti di bilancio) (Fig. 2 e 4) (Capelli et al. 2012b; Gazzetti, 2012). Per ciascun ambito di bilancio è stato valutato lo stato di criticità di conservazione della risorsa idrica. Nello specifico, per la definizione del livello di criticità, sono stati presi in considerazione alcuni indicatori, riportati in Tabella 5, la cui valutazione ha consentito l'individuazione di quei settori di acquifero in cui la concentrazione dei prelievi determina livelli di alterazione della circolazione idrica e dei livelli piezometrici significativamente superiori a quelli delle aree circostanti. Sono state inoltre indicate come "aree di attenzione" quelle in cui viene evidenziata una criticità legata essenzialmente ad anomalie piezometriche, ma sulle quali il prelievo calcolato non risulta particolarmente elevato, inferiore a 1600 m³/anno/ha (Capelli et al., 2005).

La suddivisione del sistema idrogeologico dei Colli Albani in cinque ambiti di bilancio e l'individuazione delle "aree critiche e di attenzione" hanno costituito la base scientifica di

riferimento per la redazione del Piano di Tutela Quantitativa-Albani da parte della Regione Lazio (PTQ-Albani) (DGR 11 del 13/01/2012).

Il PTQ Albani ha previsto il raggiungimento di obiettivi sia in termini di tutela ambientale che di previsioni di sviluppo dell'area. Con un approccio graduale, il Piano mira a perseguire, nei prossimi 5-6 anni, il blocco dell'incremento dei prelievi e l'avvio del risanamento ambientale delle situazioni più compromesse. Operativamente viene proposta una rimodulazione dello sfruttamento nei vari settori dell'acquifero (ambiti di bilancio), tenendo conto della distribuzione delle "aree critiche e di attenzione", al fine di raggiungere l'obiettivo di un nuovo bilancio idrogeologico in cui il rapporto "prelievi/infiltrazione efficace" diminuisca dall'attuale 81% al programmato 68% (Gazzetti, 2012). Tale obiettivo viene raggiunto imponendo, dove necessario, una riduzione dei prelievi (anche fino al 30%), salvaguardando quelli a scopo potabile; evidenziando, comunque la necessità di ridurre questi ultimi, laddove superino i limiti di sostenibilità dell'acquifero. Le indicazioni del PTQ-Albani dovranno essere recepite in sede di aggiornamento del Piano Regolatore Generale degli Acquedotti e costituire un punto di riferimento per la pianificazione di nuovi interventi urbanistici. Nell'area dei Colli Albani, qualsiasi nuova previsione urbanistica dovrà essere supportata dalla dichiarazione dell'Ente Gestore dei Servizi Idrici circa la possibilità e la modalità di soddisfazione del nuovo fabbisogno.

Riflessioni e commenti sullo stato delle conoscenze

I risultati raggiunti dall'approfondimento degli studi sul sistema idrogeologico dei Colli Albani, hanno consentito la realizzazione di importanti strumenti e azioni di pianificazione da parte della Regione Lazio.

In particolare la possibilità di giustificare e motivare la perimetrazione delle "aree critiche e di attenzione" con argomentazioni scientifiche ha agevolato la realizzazione e l'ufficializzazione di azioni normative, il cui principio è stato quello dell' "uso compatibile" della risorsa idrica e non quello di una sua rigida ed assoluta tutela. Se si dispone di conoscenze adeguate è possibile, infatti, aspirare alla ricostruzione di un bilancio idrico ottimale, cercando di risolvere la causa del costante aggravamento della crisi tenendo conto delle esigenze di chi vive e opera sui territori in crisi.

Si sottolinea comunque che l'incertezza nella stima dei prelievi comporta imprecisioni e incongruenze nella valutazione del bilancio che non possono essere considerate trascurabili. La stima dei prelievi effettivi presenta ancora insormontabili difficoltà oggettive legate sia alla mancanza di sistemi di controllo diretti sia alla pratica diffusa dell'abusivismo. Da un'attenta analisi delle tabelle di bilancio (Tabelle 2 e 3) emerge l'incidenza della sottostima dei prelievi sui risultati del bilancio idrogeologico, riferito sia all'intero dominio vulcanico che ai singoli sistemi idrogeologici. Il valore complessivo della ricarica (infiltrazione efficace) risulta, infatti mediamente superiore alla somma dei prelievi e del flusso di base in alveo di circa il 30%; l'incongruenza deve essere attribuita princi-

palmente alla sottostima dei prelievi e solo secondariamente all'approssimazione del valore del flusso di base, ottenuto dalla somma di misure di portata eseguite negli alvei di numerosissimi corsi d'acqua. Le situazioni di sfruttamento più contenuto della risorsa idrica rilevate nei sistemi idrogeologici dei Monti Vulsini, e nei sistemi idrogeologici Cimini - Vicani e Sabatini, potrebbero nascondere una maggiore incidenza degli effetti di una sottostima degli effettivi prelievi idrici, rispetto a quanto rilevato nel sistema dei Colli Albani. Diviene, quindi, sempre più pressante la necessità di programmare strumenti normativi di effettivo controllo e misura dei prelievi per non vanificare le azioni di pianificazione e gestione della risorsa idrica in corso di realizzazione.

Si ritiene opportuno, inoltre, proporre alcuni spunti di riflessione a commento della ricostruzione piezometrica proposta (Fig.4) ed utilizzata come principale strumento conoscitivo dei sistemi idrogeologici studiati.

- Il primo punto da analizzare è il grado di rappresentatività della ricostruzione piezometrica. Partendo da un numero considerevole di dati (oltre 2000 punti d'acqua) gli Autori hanno realizzato, con buona approssimazione, un andamento piezometrico con significatività a scala regionale. L'andamento piezometrico proposto non si ritiene realmente rappresentativo se riferito ad una scala di dettaglio superiore a 1:100.000. Ad una scala di maggior dettaglio, dove la circolazione idrica "multifalda" non può essere approssimata ad un unico andamento piezometrico medio, si ritiene opportuno distinguere le differenti circolazioni idriche eventualmente presenti e definire la natura degli eventuali rapporti idraulici fra le falde sovrapposte. Questo aspetto deve essere tenuto sempre presente nella redazione di studi idrogeologici a carattere locale, per i quali si suggerisce, quindi, di utilizzare la ricostruzione piezometrica regionale proposta esclusivamente per contestualizzare l'analisi idrogeologica di dettaglio.
- Le eteropie orizzontali e verticali della conducibilità idraulica, che ricalcano le eteropie litologiche, tipiche delle formazioni vulcaniche, non sempre consentono ricostruzioni piezometriche rappresentative, anche se prodotte a scala regionale. Non è ancora chiaro se le elevate acclività che la superficie piezometrica presenta in alcuni settori sia da imputare a: i) riduzione della conducibilità idraulica locale delle litologie acquifere; ii) inclinazione del tetto del substrato a bassa permeabilità; iii) ricostruzione della piezometria con interpolazione di punti d'acqua riferibili a differenti livelli di saturazione relativi a falde sovrapposte.
- La piezometria ricostruita a scala regionale costituisce lo strumento fondamentale per la delimitazione dei bacini idrogeologici rispetto ai quali calcolare i bilanci idrici (ambiti di bilancio). Poiché i limiti idraulici fra bacini idrogeologici contigui possono coincidere con i limiti idrodinamici di potenziale, il risultato del bilancio calcolato per ogni singolo ambito è funzione del risultato ottenuto dal medesimo calcolo sugli ambiti limitrofi.

Questa condizione evidenzia l'importanza di pianificare programmi di gestione solo a seguito di un'accurata ricostruzione dello schema di circolazione idrica sotterranea, al fine di prevedere interventi specifici compatibili con la tutela della risorsa anche dei bacini limitrofi.

- Il confronto fra piezometrie di anni diversi, effettuato soprattutto nel sistema albano, evidenzia che le quote di saturazione, riferite a circa 30 – 40 anni fa, erano mediamente più elevate rispetto alle attuali. Il generalizzato e progressivo abbassamento delle quote piezometriche non deve essere messo in relazione esclusivamente con l'aumento dell'entità dei prelievi, ma anche con il perfezionarsi delle tecniche di perforazione che hanno consentito nel tempo il raggiungimento delle falde più produttive, con livelli di saturazione più profondi. Fino agli anni '70 la profondità media di captazione delle risorse idriche sotterranee si attestava a circa 20 – 30 m dal piano campagna ed interessava gli orizzonti acquiferi più superficiali; successivamente a seguito della maggiore richiesta e grazie all'innovazione dei sistemi di perforazione, le captazioni si sono spinte a quote sempre più basse fino a raggiungere attualmente profondità prossime a -500 m dal piano campagna. Un improprio condizionamento dei pozzi ha favorito la miscelazione locale dei diversi orizzonti acquiferi uniformando i livelli di saturazione a quello della quota più bassa. Sono state riscontrate delle situazioni locali in cui ad una conclamata condizione di sovrasfruttamento idrico corrispondono livelli di falda analoghi o superiori a quelli del passato. In questi settori sono state intercettate, con l'approfondimento dei pozzi, falde in pressione, il cui emungimento può produrre squilibri non rilevabili dall'immediato abbattimento delle quote piezometriche, ma non per questo meno problematici.

Conclusioni

Affinché lo studio idrogeologico non resti esclusiva proprietà del ricercatore o del professionista incaricato, ma possa trasformarsi in uno strumento di pianificazione e gestione della risorsa idrica è necessario che sia inquadrato in un contesto idrogeologico territoriale, ricostruito grazie ai risultati del progressivo affinamento della ricerca idrogeologica. Nell'arco degli ultimi vent'anni, il Laboratorio di Idrogeologia Numerica e Quantitativa del Dipartimento di Scienze dell'Università degli Studi Roma Tre ha pubblicato una serie di studi idrogeologici sugli acquiferi vulcanici del Lazio, utilizzando i criteri di rilevamento ed acquisizione dei dati proprio dell'idrogeologia quantitativa regionale. La sintesi dei risultati ottenuti fornisce un quadro idrogeologico regionale sufficientemente completo sulla valutazione e distribuzione delle risorse idriche sotterranee dell'intero dominio vulcanico laziale ed evidenzia una situazione diffusa di sovrasfruttamento delle risorse.

In particolare risulta preoccupante lo stato di conservazione della risorsa negli acquiferi del sistema dei Colli Albani, dove circa l'80% della risorsa idrica sotterranea è utilizzata per

scopi antropici. La Regione Lazio, partendo dalle conoscenze acquisite con gli studi idrogeologici, ha formulato e messo in atto una sequenza di strumenti normativi, al cui apice si posiziona il Piano di Tutela Quantitativa della risorsa idrica dei Colli Albani (PTQ –Albani) (DGR 11 del 13/01/2012), che, attraverso azioni di rimodulazione dei prelievi, convenientemente distribuite sul territorio interessato, raggiunge gli obiettivi di riqualificazione e tutela ambientale compatibilmente con le esigenze di chi vive e opera sul territorio in crisi.

Come conclusione di questo lavoro di sintesi è doveroso accennare a due problematiche inerenti la pianificazione della risorsa idrica sotterranea del Lazio, che allo stato attuale mancano di una base conoscitiva di riferimento sufficientemente completa per trovare una efficiente soluzione gestionale.

- Il quadro idrogeologico regionale attualmente delineato riguarda essenzialmente l'aspetto quantitativo della risorsa idrica sotterranea. Numerosi studi di letteratura (Francesconi et al., 2007; Vivona et al., 2007; Angelone et al., 2009; Preziosi et al., 2010) approfondiscono gli aspetti idrochimici degli acquiferi vulcanici peritirrenici, fornendo risultati significativi a scala locale. Sarebbe auspicabile una maggiore distribuzione territoriale anche degli studi idrochimici al fine di ottenere una caratterizzazione idrochimica a scala regionale da affiancare e confrontare con il modello idrogeologico quantitativo. In modo particolare si ritiene utile un tentativo di regionalizzazione della distribuzione delle concentrazioni di arsenico, fluoro ed altri elementi minori caratterizzanti la qualità delle acque vulcaniche. Il superamento dei limiti di potabilità (D.L. 31/2001 attuazione della direttiva 98/83/CE) della concentrazione di questi elementi, sta causando gravi problemi di approvvigionamento idropotabile nei territori vulcanici. Per migliorare la capacità di operare scelte decisionali corrette e lungimiranti nell'ambito della pianificazione della risorsa idrica degli acquiferi vulcanici è ormai necessario poter disporre di strumenti conoscitivi di confronto fra direzioni preferenziali di flusso, variazione della concentrazione di particolari elementi "inquinanti" e distribuzione territoriale delle aree sottoposte a sovrasfruttamento della risorsa. È auspicabile, quindi, una più proficua collaborazione fra gli enti istituzionali e i gruppi di ricerca qualificati nella caratterizzazione idrogeochimica delle acque degli acquiferi vulcanici, al fine di ricostruire a breve termine una distribuzione qualitativa della risorsa idrica sotterranea a scala regionale.
- Alcuni acquiferi vulcanici, oltre ad essere intensamente utilizzati per l'approvvigionamento idrico, sono riconosciuti anche come serbatoi di energia geotermica. Negli ultimi anni è stato incentivato l'utilizzo privato della geotermia a bassa entalpia, senza prevedere un piano organico di sviluppo. I primi tentativi di programmazione e gestione di questa "nuova risorsa" evidenziano gravi lacune già nella loro fase embrionale, non essendo previsto un coordinamento con quanto definito nella pianifi-

cazione delle risorse idriche sotterranee. Non può essere concepibile un piano energetico, soprattutto relativo alla bassa entalpia, che non si integri con il Piano di Tutela delle Acque. Il funzionamento degli impianti geotermici a bassa entalpia, anche se a circuito chiuso, mobilita notevoli volumi di acqua di falda (da decine fino a centinaia di L/s) che, se pur non fisicamente "estratti" dal sistema, innescano dinamiche che inevitabilmente interferiscono con gli equilibri idrodinamici dell'acquifero interessato. Nella definizione dei criteri decisionali è evidente l'analogia fra le problematiche inerenti la concessione di nuovi prelievi idrici e le questioni relative al rilascio di autorizzazioni per impianti geotermici. È lecito, a questo punto, esprimere la convinzione che i concetti di "area critica" e di "uso compatibile della risorsa idrica", discussi nel testo, dovrebbero mantenere la loro validità anche nel caso degli utilizzi "geotermici" della risorsa.

BIBLIOGRAFIA

- Angelone M., Cremisini C., Piscopo V., Proposito M., Spaziani F. (2009) - Influence of hydrostratigraphy and structural setting on the arsenic occurrence in groundwater of the Cimino-Vico volcanic area (central Italy) - *Hydrogeology Journal* 17,4; 901-914.
- Asano T., Cotruvo J. A. (2004) - Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater: health and regulatory considerations - *Water Research* 38, (8);1941-1951.
- Bakalowicz M.(2005) - Karst groundwater: a challenge for new resources - *Hydrogeology Journal* 13;148-160.
- Baiocchi A., Dragoni W., Lotti F., Luzzi G., and Piscopo V. (2006) "Hydrogeological outline of the Cimino and Vico volcanic area and of the interaction between groundwater and Lake Vico (Lazio region, Central Italy). *Italian Journal of Geosciences* 125; 187-202.
- Boni C., Bono P., Capelli G., D'Amore F., Lombardi S. (1981a) - Nuove osservazioni su idrogeologia, geochimica e termalismo dell'area albana. *Atti del 2° Seminario informativo "Progetto Finalizzato Energetica - sottoprogetto Energia Geotermica", CNR* 2.
- Boni C., Bono P., Capelli G., Lombardi S., Zuppi G.M. (1986b) - Contributo all'idrogeologia dell'Italia centrale: analisi critica dei metodi di ricerca. *Mem. Soc. Geol. It.* 35; 947-956.
- Boni C., Bono P., Capelli G., Rossi M.F., Scholl C. (1981b) - Tentativo di calcolo del bilancio idrologico nell'area albana nel periodo ottobre 1978 - settembre 1979. *Atti del 2° Seminario informativo "Progetto Finalizzato Energetica - sottoprogetto Energia Geotermica", CNR* 2.
- Camponeschi B., Lombardi L. (1969) - Idrogeologia dell'area vulcanica sabatina. *Mem. Soc. Geol. It.* 8 (1); 25-55.
- Capelli G., Cecili A., De Rita D., Giordano G., Mazza R. (1998) - La conoscenza idrogeologica del territorio come presupposto alla gestione delle risorse idriche: il caso dei Colli Albani - *Raccolta dei contributi tecnico-scientifici della Giornata di Studio "Uso e tutela delle acque sotterranee" Viterbo 3 aprile 1998 Regione Lazio Assessorato Opere Servizi di Reti e Mobilità*; 109-162.
- Capelli G., Mastroiillo L., Mazza R., Petitta, M. Baldoni T., Cascone D., Di Salvo C., La Vigna F., Taviani S., Teoli P. (2012a) - "Carta idrogeologica del Territorio della Regione Lazio, scala 1:100 000 (4 fogli) - Regione Lazio - S.EL.CA. Firenze.

- Capelli G., Mastrorillo L., Mazza R., Petitta M. (2012b) "Carta delle Unità Idrogeologiche della Regione Lazio, scala 1:250.000." ed. REGIONE LAZIO. Firenze: S.EL.CA.
- Capelli G., Mazza R. (2005) - Water criticality in the Colli Albani (Rome, Italy). *Italian Journal of Engineering Geology and Environment* 1; 263-273.
- Capelli G., Mazza R., Paganelli D., Scalise A.R. (2008) - Experimental hydrogeological cartography in the south-eastern sector of the Monti Cimini (Latium) - *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia Volume LXXXI*; 59-88.
- Capelli G., Mazza R., Taviani S. (2004) - "Compatibilità tra domanda di risorse idriche e rinnovamento naturale degli acquiferi" - Atti del Convegno "Il governo delle risorse idriche. Clima, trasformazioni ambientali, istituzioni e gestione. I casi di Ninfa e dei laghi Albano e di Nemi". Sermoneta, 8 novembre - Latina, 9 novembre 2004; 177-197.
- Capelli G., Mazza R., Gazzetti C. (2005) - "Strumenti e strategie per la tutela e l'uso compatibile della risorsa idrica nel Lazio." Pitagora Editrice, Bologna.
- Cassa per il Mezzogiorno (1978) - Indagini preliminari conoscitive delle risorse idriche dell'area di intervento del Progetto Speciale n° 29. Relazione inedita.
- Custodio E. (1989) - "Groundwater characteristics and problems in volcanic rock terrains. " IAEA Isotope Techniques on the Study of Fractured and Fissured Rocks STI/PUB790, Vienna; 87-137
- Custodio E. (2007) - "Groundwater in Volcanic Rocks". Krasny J and Sharp LM (eds) *Groundwater in Fractured Rocks*. Taylor & Francis, London; 95 - 104
- D'Amore F., Panichi C., Squarci C. (1979) - Studio idrogeologico e geo-chimico dei sistemi termali della zona di Latera-Canino. Atti del 1° Seminario Informativo "Energia Geotermica: prospettive aperte dalle ricerche del C.N.R.", Ed. PEG.
- De Marsily G., (1986) *Quantitative hydrogeology*. Academic Press, Inc., Orlando, FL.
- De Rita, D. 1993. "Il vulcanismo." In: " *Guide Geologiche Regionali - Lazio*". Be-Ma editrice. Milano; 50-64.
- De Rita D., Di Filippo M., Sposato A. (1993). Carta geologica del complesso vulcanico sabatino. In *Sabatini Volcanic Complex*. CNR.
- Di Matteo L., Dragoni W., Latini M., Spinsanti R. (2005) - Risorse idriche sotterranee e loro gestione: il caso dell'ATO 2 Umbria (Umbria Meridionale). *Acque Sotterranee* 96; 9-21.
- Di Matteo, L., Dragoni, W., Giontella, C. Melillo, M. (2010) - Impact of climatic change on the management of complex systems: the case of the Bolsena Lake and its aquifer (Central Italy). *Global Groundwater Resources and Management* ed. B. PALIWAL, Jodhpur (India); 91-106.
- Doorenbos J., Pruitt W.A.O. (1977) - Guidelines for prediction Crop water requirements - quaderno FAO n° 24 del 1977.
- Francesconi F.M., Fratini S., Checucci R. (2007) - Hydrogeological survey and mathematical model of the Vulsino volcanic aquifer within the territory of the Region of Umbria. *Journal of technical, environmental geology* 3-4/2007; 5-33.
- Gazzetti C. (2012) - Esperienze e approccio metodologico nella pianificazione per la tutela e la gestione degli acquiferi del Lazio. *Geologia Tecnica e Ambiente* 2/2012; 24-38.
- Giordano G., Mazza R., Cecili A., Capelli G., De Rita D., Bigi G., Rodani S. (2000) - GIS for groundwater management in cities on volcanoes: example from the Colli Albani Region, Rome, Italy. *Journal of the Nepal Geological Society*, 22, p. 315-326.
- Jemcov I. (2007) - Water supply potential and optimal exploitation capacity of karst aquifer systems - *Environmental Geology* 51, 5; 767-773.
- Lauciani E., Farroni A. Terzini M (1999) - Fabbisogni irrigui in Abruzzo. *Lacqua* n° 2.
- Locardi E., Lombardi G., Funicello R, Parotto M. (1976) - The main volcanic group of Latium (Italy): relations between structural evolution and petrogenesis. *Geol. Romana* 15; 279-300.
- Mazza R., Capelli G., Taviani S., Teoli P., Gazzetti C. Roca C., La Vigna F (2008) - "L'Unità idrogeologica dei Colli Albani: Modellazione numerica per un piano di uso compatibile della risorsa" *Accademia Nazionale dei Lincei - Roma* 2008.
- Mazza R., Taviani S., Capelli G., De Benedetti A., Giordano G. in press. Quantitative hydrogeology of volcanic lakes with management, volcanological and geothermal implications. In *Volcanic Lakes*. Springer-Heidelberg.
- Missteat B.D.R. (2000) - Groundwater recharge assessment: a key component of river basin management. *National Hydrology Seminar* 2000.
- Pagano G., Menghini A., Floris S. (2000) - Ground water budget of the Vulsini Basin. *Geologia Tecnica, Ambientale*, 3.
- Preziosi E., Giuliano G., Vivona R. (2010) - Natural background levels and threshold values derivation for naturally As, V and F rich groundwater bodies: a methodological case study in Central Italy - *Environmental Earth Sciences* 61, 5; 885-897.
- Regione Lazio (2012) - D.Lgs 152/06 art.95 e D.C.R. n° 42/07 Piano di Tutela delle Acque - Norme Tecniche di Attuazione, art. 4 c. 10: Adozione dello schema di "Piano di Tutela Quantitativa - stralcio funzionale del sistema idrogeologico dei Colli Albani (PTQ-Albani) - DGR 11 /2012.
- Scanlon B. R., Healy R.W., Cook P.G. (2002) - Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* 10; 18-39.
- Ventriglia U. (1989) - *Idrogeologia della Provincia di Roma. Regione Vulcanica Sabatina. Amministrazione Provinciale di Roma, Assessorato Lavori Pubblici*.
- Ventriglia U. (1990) - *Idrogeologia della Provincia di Roma. Regione Vulcanica dei Colli Albani. Amministrazione Provinciale di Roma, Assessorato Lavori Pubblici*.
- Vivona R., Preziosi E., Madè B. (2007) - Occurrence of minor toxic elements in volcanic-sedimentary aquifers: a case study in central Italy. *Hydrogeology Journal* 15,6; 1183-1196.
- White W. B. (1969), *Conceptual Models for Carbonate Aquifers*. *Ground Water* 7, 15-21.