

Dorsale carbonatica dei Monti Lepini: tentativo di verifica delle aree di ricarica delle sorgenti carsiche e quantificazione dello scambio idrico con la Pianura Pontina attraverso l'uso di un modello numerico (Italia Centrale)

Lepini Mountains Carbonatic Ridge: try of springs recharge areas verification and water exchange quantification with Pontina Plain by use of a numerical model (Central Italy).

Pamela Teoli, Roberto Mazza, Alessandro Cappelli

Riassunto: L'area di studio del lavoro qui presentato è costituita dalla dorsale carbonatica dei Monti Lepini e dal settore pedemontano della Pianura Pontina (Lazio meridionale, province Latina e Frosinone), su cui in passato, nell'ambito di caratterizzazioni idrogeologiche quantitative, erano stati sviluppati modelli di calcolo per il deflusso delle acque sotterranee, ma riferito solo alla dorsale. Gli studi più recenti (Teoli, 2012) invece hanno cercato di rappresentare gli scambi idrici sotterranei tra la dorsale ed il settore pedemontano della Pianura Pontina. Nell'ambito della messa a punto del nuovo modello di simulazione del deflusso delle acque sotterranee, implementato in condizioni di regime stazionario e seguendo l'approccio del mezzo poroso equivalente esteso anche ai Monti Lepini (codice di calcolo MODFLOW 2005), l'attenzione è stata rivolta allo schema dell'assetto tettonico della dorsale che gli stessi autori con altri, in precedenti studi (Alimonti et al.

2010), hanno definito sulla base di un dettagliato rilevamento geologico-strutturale di terreno integrato con analisi idrogeologiche. Si è potuto così definire una compartimentazione sui percorsi d'infiltrazione delle acque e sull'estensione delle aree di ricarica delle sorgenti basali in uscita dal massiccio carbonatico dei Monti Lepini, che presentano una portata totale media di circa 10 m³/s. La calibrazione del modello ha avuto come obiettivo principale la definizione delle caratteristiche di permeabilità delle aree di ricarica, imponendo la corrispondenza dei flussi calcolati con i flussi misurati delle sorgenti; conseguentemente è stato possibile migliorare il grado di attendibilità del modello (riduzione del grado di incertezza) quantificando lo scostamento della deviazione standard dei residui dei flussi.

Parole chiave: monti lepini, modello numerico, aree di ricarica, sorgenti, calibrazione.

Keywords: *lepini mountains, numerical, modelrecharge areas, springs, calibration.*

Pamela TEOLI 

Roberto MAZZA

Laboratorio di Geologia Applicata all'Ambiente – Dipartimento di Scienze Geologiche, Università Degli Studi di Roma Tre, (Italy)
pamelaateoli@hotmail.it

Alessandro CAPPELLI

Libero Professionista

Ricevuto: 27 luglio 2012 / Accettato: 15 marzo 2014

Pubblicato online: 30 aprile 2014

© Associazione Acque Sotterranee 2014

Abstract: *The study area of this work is represented by the Lepini Mountains carbonatic ridge and by the Pontina Plain foothills area, on which in the past, within quantitative hydrogeological characterizations, models were developed for calculating the groundwater flow, but only referred to the ridge. The most recent studies (Teoli, 2012) have done their best, instead, to represent the underground water exchanges between the ridge and the Pontina Plain foothill area. The new model (developed using computer code MODFLOW 2005) has been implemented to simulate steady-state underground flow using equivalent porous media approach even for the ridge; attention has been particularly directed to the proper tectonic ridge schematic, which the authors had previously defined, together with others (Alimonti et al., 2010), on detailed structural-geological survey basis, integrated by hydrogeological analysis. So, it's been possible to determine partitioning effects on groundwater flowpaths and on springs recharge areas extent, whose total average discharge is about 10 m³/s. Model calibration main goal has been the recharge areas permeability definition, posing the correspondence of calculated flows with measured springs' flows; as a consequence, it's been possible to improve the model reliability (uncertainty reduction) quantifying the flow residuals' standard deviation offset.*

Introduzione

Il lavoro illustrato nella presente memoria riguarda la verifica delle aree di ricarica delle sorgenti carsiche della dorsale carbonatica dei Monti Lepini, condotta mediante l'impiego di un modello numerico alle differenze finite che simula il deflusso delle acque sotterranee. L'area di studio è costituita dalla dorsale dei Monti Lepini e dal settore pedemontano della Pianura Pontina (Fig. 1). Tale area è stata interessata negli anni passati da numerosi studi (Conforto et al., 1962; Mouton, 1977; Sappa e Rossi, 2007; Boni et al., 1980; Celico, 1983), che hanno riguardato l'idrogeologia quantitativa della dorsale lepina e della piana e che hanno indagato anche gli scambi di circolazione con le idrostrutture limitrofe. Tale interessamento è legato al fatto che quest'area di studio costituisce uno degli acquiferi carsici più importanti del Lazio e funge da fonte di approvvigionamento idrico per alcuni comuni della Provincia di Latina, di Roma e di Frosinone.

Gli studi precedenti (Petitta, 1994; Celico, 2002) avevano sviluppato dei modelli numerici alle differenze finite, ma riferiti solo alla dorsale carbonatica, mentre studi più recenti (Teoli, 2012) hanno impiegato un nuovo modello, che si è spinto ad analizzare gli scambi di flussi sotterranei che esistono tra la dorsale e il settore pedemontano della Pianura Pontina. Per tale motivo esso verrà chiamato, nel seguito, modello "Lepini-Piana". La sua messa a punto ha richiesto di dare particolare attenzione all'assetto tettonico della dorsale, che determina effetti di compartimentazione sui percorsi d'infiltrazione delle acque meteoriche ed influenza conseguentemente l'estensione delle aree di ricarica delle emergenze sorgive. Lo sviluppo dell'implementazione del modello "Lepini-Piana" è stato condotto mediante l'au-

silio del software Groundwater Vistas®5.41, che utilizza, per la risoluzione delle equazioni del moto di filtrazione, il codice di calcolo MODFLOW 2005 (Harbaugh, 2005). Durante questa attività si sono svolte numerose simulazioni di calcolo, tra le quali quelle che, a partire dalla compartimentazione della dorsale, hanno cercato di validare le corrispondenti aree di ricarica delle sorgenti basali in uscita dal massiccio carbonatico dei Monti Lepini. Questa validazione è consistita principalmente nell'ottenere la migliore corrispondenza tra i flussi delle sorgenti calcolati dal modello e quelli misurati.

Inquadramento geologico e idrogeologico *Aspetti geologici dei Monti Lepini e della Pianura Pontina*

La storia geologica della dorsale carbonatica può essere riassunta nei seguenti punti. Nel Mesozoico la piattaforma carbonatica è interessata da una serie di fenomeni che determinano variazioni di profondità della piattaforma stessa, con locali emersioni testimoniate dalla presenza di dolomie bituminose sottilmente stratificate con resti di flora continentale e rari pesci (Cocozza e Praturlon, 1966). Nel Cretacico superiore inizia un'intensa attività tettonica che conduce alla formazione di ambienti di scogliera e periscogliera tra Cori ed Ardena e sedimenti di ambienti lagunari a bassa energia nei settori interni della dorsale (Carbone et al., 1978). Dopo la lacuna paleogenica segue il contatto paraconcordante tra i depositi alto cretacici e le formazioni mioceniche, costituite da calcareniti organogene, calcari marnosi e depositi torbiditici argillosi-arenacei, che segnano il passaggio dei diversi settori del dominio di avampaese a quello di bacino di avanfossa e quindi di catena con fenomeni di sovrascorrimento, che portano la dorsale lepina ad accavallarsi verso NE sul flysch tortoniano della Valle Latina (Valle del Fiume Sacco). La successiva evoluzione dell'area, che inizia nel Messiniano superiore-Pliocene inferiore, è determinata dall'instaurarsi di un regime distensivo che determina lo smembramento in sistemi di horst e graben di interi settori di catena. L'evoluzione recente della regione è caratterizzata da un'intensa attività vulcanica, da esplosiva freatomagmatica a chimismo alcalino-potassico, che si imposta nelle aree depresse interessate da tettonica distensiva.

Il graben pontino è impostato prevalentemente su sequenze carbonatiche di piattaforma. Studi gravimetrici recenti (Capelli, 2002), hanno messo in luce la presenza di un'elevazione orientata da nord-est a sud-ovest, che separa due grandi depressioni che superano i -350 m s.l.m.. (Fig. 2).

I complessi plio-pleistocenici marini, che colmano il graben pontino e che sono in diretto contatto con i carbonati, sono costituiti prevalentemente da sequenze argilloso-sabbiose e sabbioso argillose, anche se in sondaggio sono stati intercettati depositi di ghiaie e di calcari detritici (Macco) (Conforto et al., 1962). La facies continentale che confina la serie marina è molto differenziata. Nel settore settentrionale, a nord della Città di Latina, sono presenti formazioni piroclastiche il cui spessore, nell'area di studio,

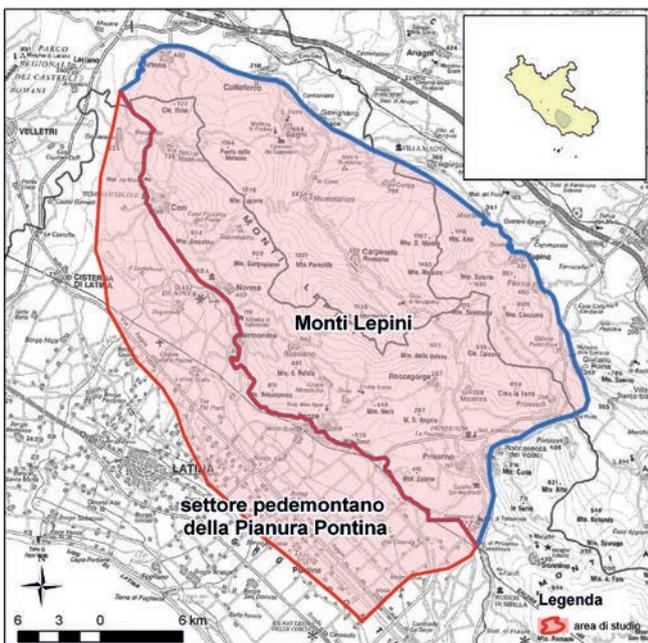


Fig. 1 - Area di studio.

Fig. 1 - Study Area.

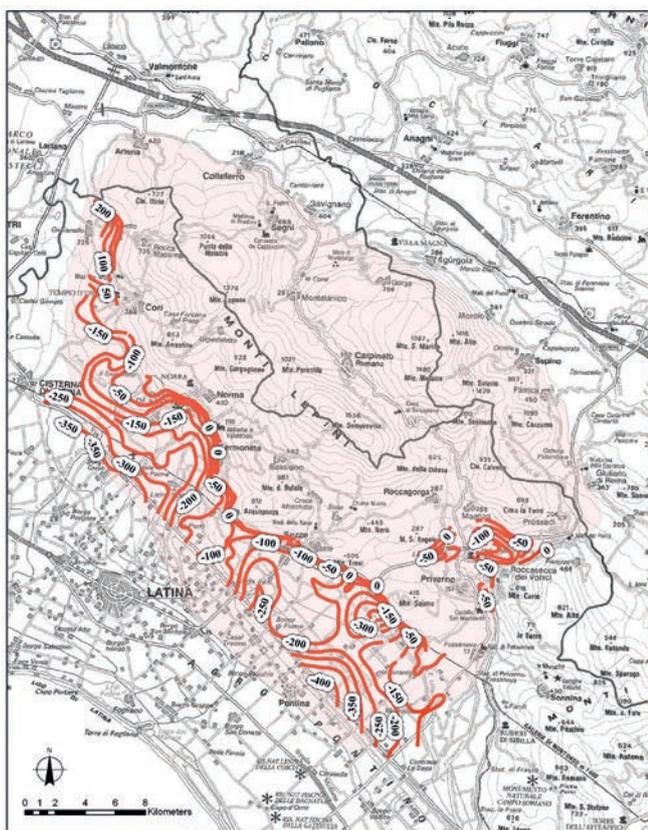


Fig. 2 - Isobate del tetto dei calcari in Pianura Pontina.

Fig. 2 - Contour bathymetric lines: Limestone top in Pontina Plain.

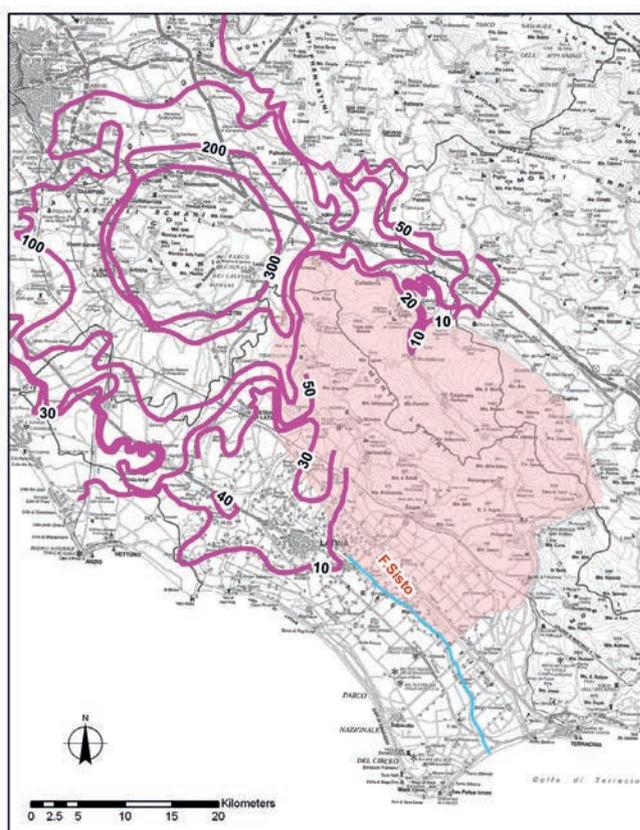


Fig. 3 - Isopache delle vulcaniti presenti nel distretto vulcanico dei Colli Albani.

Fig. 3 - Contour depth lines: Volcanites in the Colli Albani volcanic district.

varia da circa 200 m fino ad uno spessore di 10 m. L'entità areale e l'entità dello spessore delle vulcaniti, rappresentate in Fig. 3 sono state ricostruite a partire da studi condotti in precedenza (Rosa, 1995) e dall'analisi di diverse stratigrafie appositamente reperite (dati ISPRA – dB L.464/84, dB del laboratorio di idrogeologia di Roma Tre; dB della Provincia di Latina).

Nel settore meridionale, a sud della città di Latina, la presenza di depositi vulcanici si fa più episodica e gli spessori divengono assai più modesti. Tra la linea pedemontana ed il Fiume Sisto, è presente in affioramento un esteso complesso costituito da argille limose, limi argillosi con livelli torbosi, a luoghi intercalati a banchi travertinosi, che presentano uno spessore medio di circa 40 m (Serva e Brunamonte, 2007). Oltre il Sisto, fino alla linea di costa affiorano i sedimenti prevalentemente sabbiosi della “Duna Antica” (Sevink et al., 1982), costituiti da sabbie quarzose rossastre, con orizzonti torbosi e argillo-limosi. Verso la costa assume importanza il complesso lacustre delle “Argille limose” con intercalati livelli torbosi.

Al di sotto di queste formazioni affioranti è presente con spessori di alcune decine di metri, un complesso sabbioso estremamente esteso, che poggia su argille del Pleistocene-Siciliano (Barbieri et al., 1999). Scarse sono le informazioni sui sedimenti maggiormente soggiacenti. Un pozzo denominato Pontinia ha incontrato, al di sotto delle Argille del

Siciliano, una coltre di circa 50 m di sabbie e argille, 10 m di ghiaie e sabbie, 50 m di Macco (Conforto et al. 1962). A contatto dei carbonati è stato ritrovato un corpo ghiaioso spesso poco più di 10 m. Nel Pozzo denominato “Fogliano”, posto a ridosso dell'omonimo lago, al di sotto delle Argille turchine del Pliocene inferiore e delle ghiaie sono presenti le Marne del Miocene inferiore, appartenenti alla serie sabina e all'Horst di Fogliano (Funicello e Parotto, 1978).

Aspetti idrogeologici dell'area di studio

La realtà geologica descritta nel paragrafo precedente favorisce situazioni di confinamento delle acque sotterranee e situazioni di emergenze sorgive. Nel caso in esame le campagne di monitoraggio delle acque sotterranee della Pianura Pontina, condotte nel periodo 2008-2009 (Capelli et al., 2010; Teoli, 2012), hanno messo in luce fenomeni di artesianesimo (Fig. 4) in un settore notoriamente indicato come quello con falda risaliente (Mouton, 1977). I principali aspetti idrogeologici caratterizzanti l'area di studio sono brevemente richiamati nel seguito.

Nella Fig. 5 sono mostrati i quattro principali gruppi sorgivi dei Monti Lepini dislocati lungo la fascia pedemontana.

Nella tabella successiva (Tab.1) sono riportati i valori delle portate medie mensili misurate durante la campagna idrogeologica del periodo 2007-2008 (Bono, 2010).

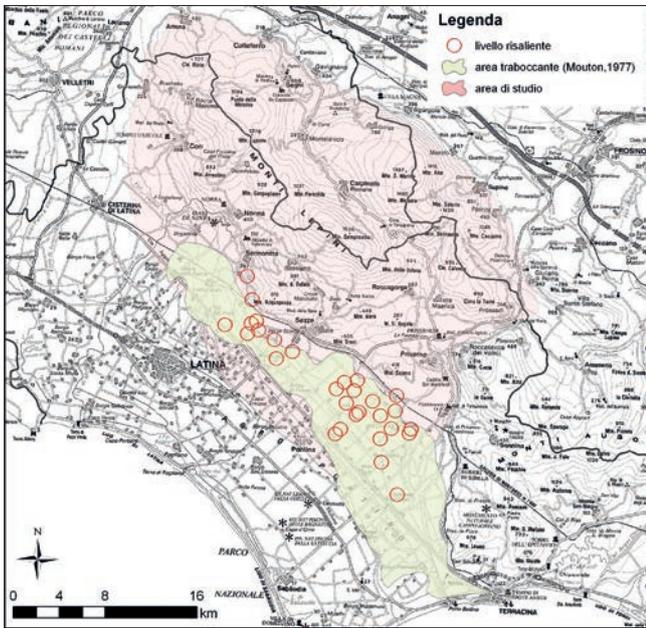


Fig. 4 - Estensione dell'area con falda risaliente (i cerchi in rosso rappresentano i pozzi artesiani misurati durante le campagne piezometriche del periodo 2008-2009).

Fig. 4 - Extent of rising aquifer area (red circles represent artesian wells gauged during 2008-2009 surveys).

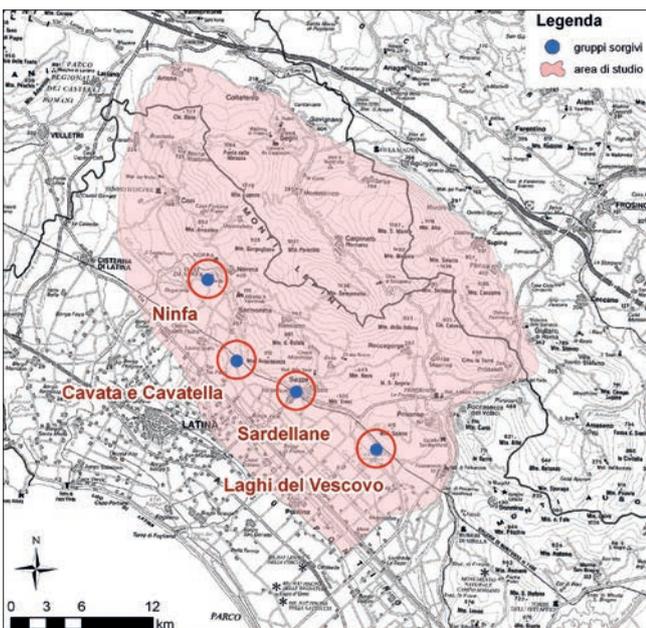


Fig. 5 - Ubicazione dei gruppi sorgivi dei Monti Lepini.

Fig. 5 - Lepini Mountains Springs Location.

Tab. 1 - Valori medi delle portate dei principali gruppi sorgivi.

Tab. 1 - Main Springs: discharge mean values.

| Gruppo Sorgivo | Portata media m ³ /s | Quota m s.l.m. |
|---------------------------|---------------------------------|----------------|
| Ninfa | 1.10 | 30 |
| Gruppo Cavata e Cavatella | 4.60 | 10 |
| Gruppo Sardellane | 2.50 | 3 |
| Gruppo Laghi del Vescovo | 1.4 | 1 |

Le aree di ricarica dei gruppi sorgivi della fascia pedemontana sono state delimitate in base ad un'ipotesi di compartimentazione della dorsale lepina, formulata dagli stessi autori insieme ad altri, in uno studio multidisciplinare pubblicato integralmente nel 2010 (Alimonti et al., 2010b). In tale studio, sulla base di un dettagliato rilevamento geologico-strutturale di terreno, della revisione in chiave idrogeologica delle formazioni affioranti, del rilevamento quantitativo dei principali punti d'acqua presenti nell'area (gruppi sorgivi e pozzi), unitamente all'analisi statica dei sistemi principali di faglie e dello sviluppo delle cavità ipogee, censite dalle diverse associazioni speleologiche che hanno effettuato esplorazioni nella dorsale, si sono ipotizzate delle aree di ricarica dei quattro grandi gruppi sorgivi presenti nella fascia pedemontana pontina (Bacino di Ninfa, Bacino di Cavata e Cavatella, Bacini di Sardellane e Bacino dei Laghi del Vescovo – Fig. 6).

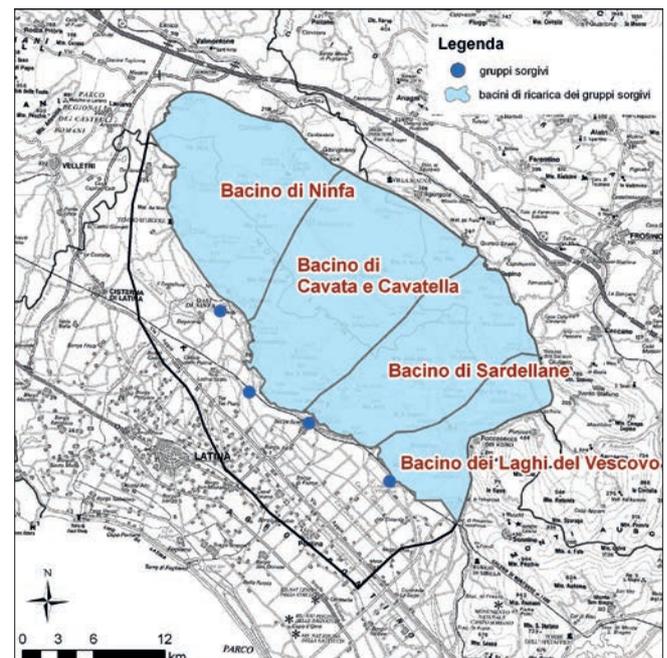


Fig. 6 - Ipotesi di aree di ricarica delle sorgenti basali dei M. Lepini.

Fig. 6 - Lepini Mountains basal Springs: Hypothetical recharge areas.

L'area della Pianura Pontina è invece caratterizzata da un fitto reticolo di canali artificiali che drenano le acque di falda, risultato della bonifica delle paludi pontine ultimata negli anni Trenta (Prampolini, 1939).

L'inquadramento geologico descritto nel paragrafo precedente ha permesso infine di definire diversi complessi idrogeologici, rappresentati nella figura 7, che sono il "complesso dei calcari" (calcari di piattaforma a potenzialità acquifera altissima), il "complesso dei depositi vulcanici e travertinosi" (colate piroclastiche litoidi e concrezioni travertinose, entrambi a potenzialità acquifera medio alta) ed il "complesso dei depositi argillo-sabbiosi della Pontina" (depositi in facies palustre, lacustre e salmastra con potenzialità acquifera bassa sebbene con locali intercalazioni ghiaiose).

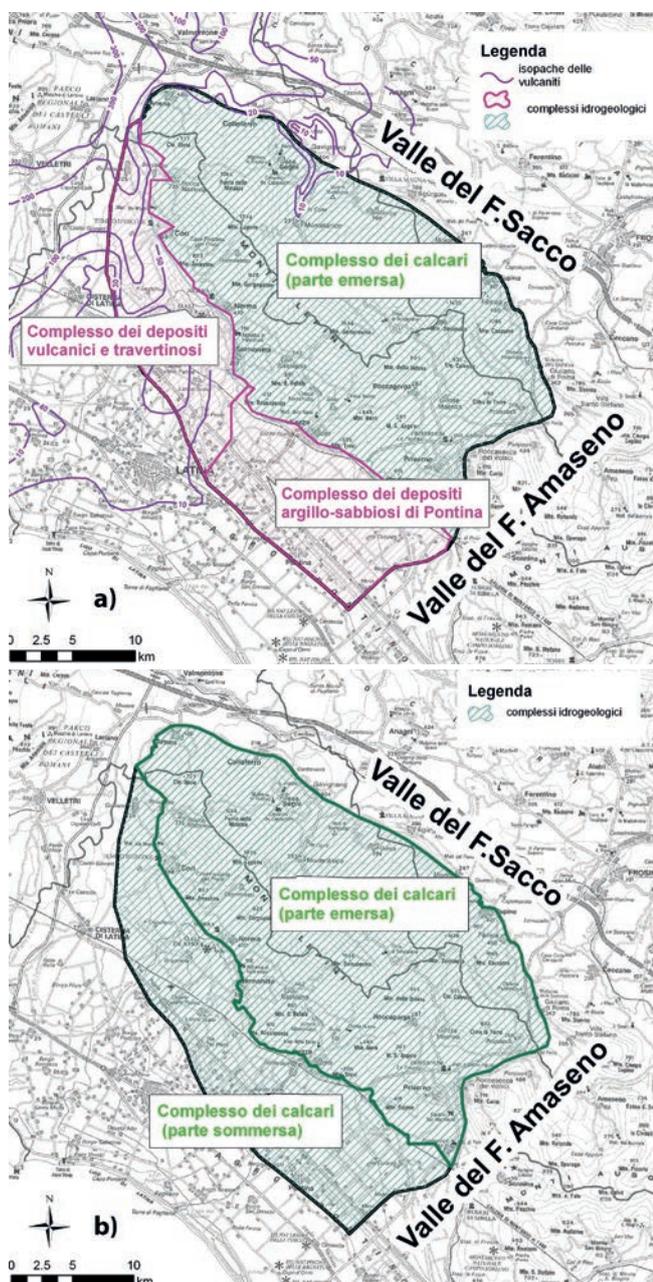


Fig. 7 - Mappa dei complessi a) layer 1, b) layer 2.

Fig. 7 - Units Map a) layer 1, b) layer 2.

La circolazione idrica sotterranea dell'idrostruttura lepina presenta un flusso prevalente verso la Pianura Pontina, generando i quattro grandi gruppi sorgivi e ricaricando il complesso dei calcari ribassato al di sotto del complesso dei depositi di copertura della pianura (Boni et al., 1980 – Fig. 8).

Metodologia

Impostazione del problema

Lo schema di circolazione idrica sotterranea, descritto nel paragrafo precedente, rappresenta il modello concettuale a partire dal quale è stato sviluppato il modello numerico "Lepini-Piana" (Teoli, 2012).

Le indagini idrogeologiche condotte recentemente, consistite in misure piezometriche (Capelli et al., 2010) ed in misure di portata dei principali gruppi sorgivi (Bono, 2010), hanno confermato la presenza di due acquiferi, quello carsico e fratturato dei calcari e quello terrigeno delle coperture quaternarie della pianura. Nel modello "Lepini-Piana" l'acquifero carsico e fratturato è stato ipotizzato come "mezzo poroso equivalente", ossia un acquifero continuo in cui le acque sotterranee defluiscono, almeno alla scala di bacino, in regime laminare (Bear, 1993).

Tale ipotesi è supportata da un'approfondita analisi di caratterizzazione idrodinamica, che è stata condotta sulle sorgenti basali appartenenti a questo acquifero (principali gruppi sorgivi), a partire dai risultati delle indagini idrogeologiche suddette. L'analisi (Teoli, 2012) ha messo in evidenza una relazione lineare tra le portate delle sorgenti ed i livelli piezometrici nella dorsale carbonatica.

In base a questa linearità si è potuto quindi assumere che il comportamento dell'acquifero segua la legge di Darcy (Mangin, 1970). Di seguito vengono riportati due grafici (Fig. 9) in cui sono presenti i valori di portata del gruppo sorgivo Ninfa e i valori del livello statico misurato in un piezometro denominato "Valle", notoriamente utilizzato come punto di monitoraggio della falda basale del dominio carbonatico dei Monti Lepini, posto in vicinanza della sorgente. Si può osservare un andamento generalmente simile tra i due parametri misurati; tale similitudine è anche rappresentata dalla curva di regressione lineare della correlazione tra i due andamenti con coefficiente di correlazione di circa 0,8.

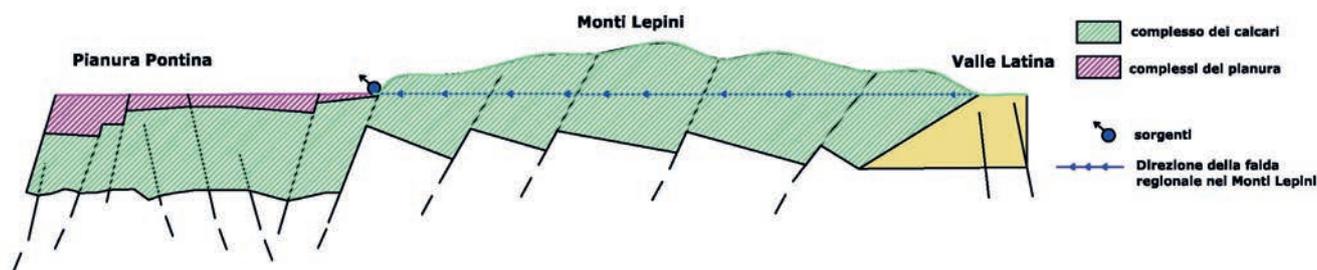


Fig. 8 - Sezione schematica di circolazione delle acque nell'area di studio (Rielaborato da schema di Boni et al., 1980).

Fig. 8 - Schematic cross section: groundwater circulation in the study area (Revised from Boni et al., 1980).

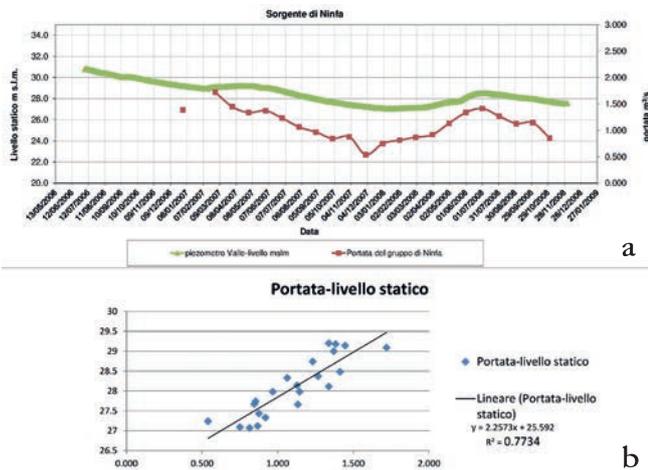


Fig. 9 - a) idrogramma del gruppo sorgivo di Ninfa e del livello statico del piezometro "Valle"; b) correlazione tra portata e livello statico.

Fig. 9 - a) Ninfa spring Hydrograph and "Valle" piezometer water level; b) discharge and water level correlation.

L'ipotesi di considerare l'acquifero dei calcari come un mezzo continuo e poroso ha permesso di poter scegliere come codice di calcolo il MODFLOW 2005 (Harbaugh, 2005), che è in grado di risolvere il sistema di equazioni differenziali che descrive il fenomeno di circolazione delle acque sotterranee in acquiferi porosi. Questo codice di calcolo simula i deflussi sotterranei in condizioni stazionarie e transitorie. Nel caso del modello "Lepini-Piana" il comportamento del sistema è stato simulato in condizioni stazionarie, in quanto l'assimilazione di un sistema carbonatico fratturato ad un mezzo poroso equivalente non consentirebbe comunque di tenere conto dei fenomeni tipici delle condizioni transitorie, legate in questo caso alla permeabilità secondaria del mezzo.

Obbiettivi di calibrazione

Il funzionamento del modello richiede, a valle dell'inserimento dei dati noti, la calibrazione dei parametri caratteristici dei diversi complessi idrogeologici, che, nel caso di simulazioni in condizioni stazionarie, si riducono alle sole conducibilità idrauliche delle aree a comportamento idrogeologico omogeneo. La fase di calibrazione, come noto, è quella in cui si correggono iterativamente i valori dei parametri del modello, per ridurre al minimo le differenze tra i valori delle variabili misurate sperimentalmente (definiti *target*, ovvero valori obiettivo) e quelli calcolati dal modello (Hill, 1998).

Per il processo di calibrazione del modello "Lepini-Piana" sono stati usati sia *target* di carico e sia *target* di flusso.

I *target* di carico, utilizzati per l'acquifero della piana e per l'acquifero carbonatico corrispondono ai valori di carico piezometrico, misurati in foro durante il periodo 2008-2009 per un totale di 112 pozzi, di cui 34 intercettano la falda della struttura carbonatica (dorsale e substrato carbonatico della Pianura Pontina) e 78 intercettano la falda dei depositi terrigeni di copertura (Teoli, 2012).

I *target* di flusso, invece, si riferiscono sia alle misure di portata dei principali gruppi sorgivi basali della dorsale le-

pina, sia alla quota parte della portata dei canali di bonifica corrispondente al drenaggio delle acque sotterranee. Il valore di tale quota parte è stato stimato a partire dai dati di funzionamento degli impianti idrovori, che garantiscono lo scolo meccanico dei canali (Alimonti et al., 2007). Noto il volume medio annuo sollevato dall'idrovora, attraverso un bilancio applicato al bacino idrologico dell'idrovora, si è ricavato che la percentuale di acque sotterranee sollevate è pari a circa l'11 % del volume sollevato, corrispondente in termini volumetrici a 0,44 m³/s. La stima di questa portata è stata ricavata dalla seguente relazione (Alimonti et al., 2007):

$$Q_s = P - E_{vr} - P_{rl} + T_s + Q_e \quad (1)$$

Dove :

Q_s = portata sollevata dall'impianto idrovoro

P = precipitazione

E_{vr} = perdite per evapotraspirazione

P_{rl} = volumi prelevati dal bacino

T_s = apporti al deflusso superficiale di acque sotterranee

Q_e = apporti di acque superficiali da altri bacini

Nella seguente Fig. 10 si riportano le ubicazioni dei *target* considerati.

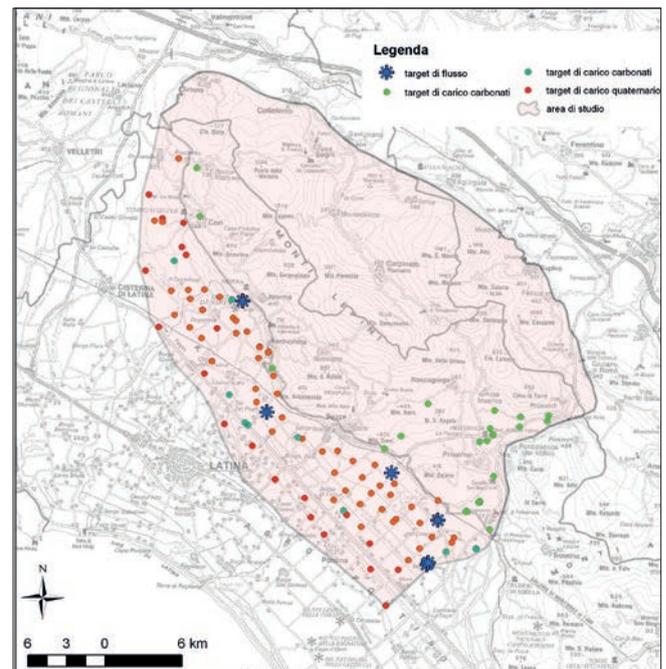


Fig. 10 - Mappa dei *target* utilizzati per la calibrazione.

Fig. 10 - Calibration target map.

Natura e determinazione dell'incertezza

Un elemento da definire prima della calibrazione è il grado di attendibilità che il modello calibrato deve avere, in altre parole il grado di incertezza ammissibile complessivamente per il modello. Per definire l'incertezza complessiva del modello è necessario definire per i singoli *target* l'errore che si ritiene ammissibile. Il valore della deviazione standard degli scarti dei risultati del modello, deve essere confrontabile con

il valore di incertezza dei *target*. In questo modo si evita l'amplificazione dell'errore, il cui valore assoluto è fissato nei limiti ritenuti ammissibili.

Per fissare l'errore dei *target* di carico, in accordo con quanto definito da Sonnenborg et al. (2003), si è deciso di considerare, per il modello "Lepini-Piana", i seguenti diversi elementi, che insieme concorrono a determinare il valore numerico dell'errore:

- Errori di misura associati all'accuratezza dello strumento utilizzato, alla precisione della definizione della quota del "boccapozzo" e del piano campagna e ancora errori dovuti all'effetto di "disturbo" della misura dovuto alla presenza di pompaggi nella zona limitrofa al pozzo misurato. Questi elementi, hanno dato un errore compreso tra $0,05 \div 6$ m (il valore massimo di questo intervallo si riferisce agli errori riscontrati nelle misure dei livelli statici dei pozzi della dorsale carbonatica) e quindi come valore medio si è assunto $E_1 = 3,025$ m.
- Errori dovuti alla necessità di utilizzare valori medi delle misure, riferite a periodi stagionali diversi, per la modellazione in stato stazionario. Nel caso in esame avendo a disposizione quattro campagne di misura piezometriche stagionali condotte da febbraio 2008 a luglio 2009 (Capelli et al., 2010), si è registrato che la variabilità massima del livello è pari a 6 m. L'errore dovuto a questo fattore è considerato normalmente come $E_2 = \Delta h / 2$ dove Δh è la variabilità stagionale del livello piezometrico. Pertanto si è assunto $E_2 = 3$ m.
- Errori di interpolazione legati alla variazione della superficie topografica che viene mediata all'interno della cella, comportando una discrepanza tra il valore realmente osservato e quello associato alla cella. Normalmente questo errore viene stimato a partire dal gradiente idraulico moltiplicato per la metà della dimensione della cella della discretizzazione del modello, cioè $E_3 = \Delta x / 2 \cdot J$. Nel caso in esame, dai dati delle campagne di misure piezometriche (Capelli et al., 2010) si è ricavato che il gradiente idraulico (J) sulla piana ha valore medio di 0,0018 e sulla dorsale di 0,0032, pertanto, considerando un gradiente medio di 0,0025, si è assunto $E_3 = 0,1875$ m.

L'errore da fissare come valore di incertezza ammissibile dei *target* di carico è dato da $\sqrt{\sum s^2}$.

Dove:

$$s^2 = E_1^2 + E_2^2 + E_3^2$$

Nel caso del modello "Lepini-Piana" $\sqrt{\sum s^2} = 4,42$ m.

Per quanto riguarda invece i *target* di flusso, poiché sono anch'essi affetti dagli errori di misura come quelli del carico idraulico, si è adottata una stima dell'incertezza basata sulla variabilità dei dati misurati. Si è scelto di fissare come incertezza del *target* di flusso il 20 % della variabilità media delle misure di portata effettuate nel periodo di osservazione 2008-2009. Analizzando i dati di flusso dei gruppi sorgivi indagati, si è riscontrata una variabilità media dei dati pari a $1,99$ m³/s. Pertanto per il modello "Lepini-Piana" $E_{\text{flusso}} = 0,40$ m³/s.

L'obiettivo della calibrazione del modello "Lepini-Piana" è stato quindi quello di minimizzare la deviazione standard degli scarti tra i valori simulati e i valori osservati, sia per i carichi piezometrici sia per i dati di flusso, fino al raggiungimento di un numero confrontabile rispettivamente con 4,42 m e con 0,40 m³/s.

Implementazione del modello

Discretizzazione del dominio del modello

Il modello concettuale di base corrisponde allo schema di circolazione delle acque sotterranee, descritto nel precedente paragrafo 2.2, secondo il quale la dorsale carbonatica è in grado di ricaricare, sia lateralmente sia dal basso, la Pianura Pontina, da cui le acque defluiscono poi verso il mare.

Il dominio di studio è stato suddiviso in due *layer* (Fig. 11):

- Il primo con *top* corrispondente alla superficie topografica e con *bottom* corrispondente alla superficie dei calcari sepolti sotto i depositi quaternari;
- Il secondo con *bottom* corrispondente alla superficie di un piano arbitrario posto alla profondità di -500 m s.l.m., la quale è assunta come profondità limite di interesse dei deflussi che dalla dorsale proseguono verso la pianura.

Le celle attive totali sono 79466, con dimensione costante di 150 m per lato, per un numero di righe e di colonne rispettivamente di 322 e 283.

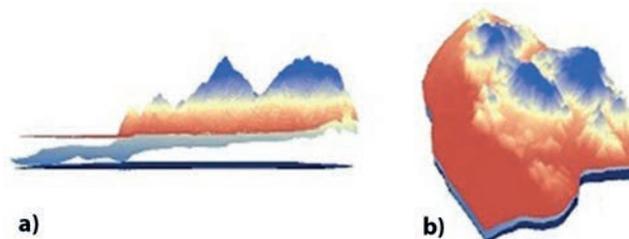


Fig. 11 - Immagini delle superfici di *top* e di *bottom* del *layer* 1 e del *layer* 2 a) vista in sezione b) vista tridimensionale.

Fig. 11 - *Layer* 1 and *Layer* 2 *top* and *bottom* images a) section view, b) 3D view.

Condizioni al contorno

In base alle caratteristiche geologico-stratigrafiche e in base ai valori della campagna piezometrica effettuata nel periodo 2008-2009 sono stati imposti come condizioni al contorno i seguenti elementi:

- condizioni di carico costante (Dirichlet) nel *layer* 1 in corrispondenza del limite ovest del modello dove è stato attribuito il valore piezometrico medio misurato nell'arco delle campagne piezometriche 2008-2009 (Capelli et al., 2010) (Fig. 12);
- condizioni di flusso nullo (Neumann) nel *layer* 1 e nel *layer* 2 lungo il perimetro della dorsale verso il Fiume Sacco, dove affiorano i flysch;
- condizioni di flusso dipendente dal carico (Chauchy) presenti nel *layer* 1 e nel *layer* 2 rappresentati da:
 - a. General Head Boundary (carico imposto esterno all'area di studio che determina un flusso entrante/uscente) nel

layer 1 lungo il margine settentrionale del modello, al confine con l'unità vulcanica dei Colli Albani, e nel layer 2 lungo il margine sud occidentale del modello (Fig. 13 e Fig. 14);

- b. Celle Dreno corrispondenti alle aree dove si hanno condizioni di drenaggio della falda, che nel caso specifico sono state attribuite alle aree sorgentizie e al reticolo artificiale della pianura (Fig. 15).

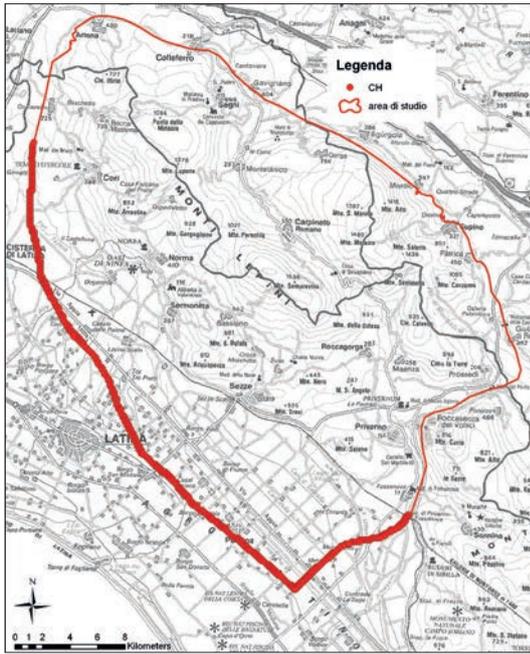


Fig. 12 - Condizioni di carico costante (CH) nel layer 1.

Fig. 12 - Constant Head in layer 1.

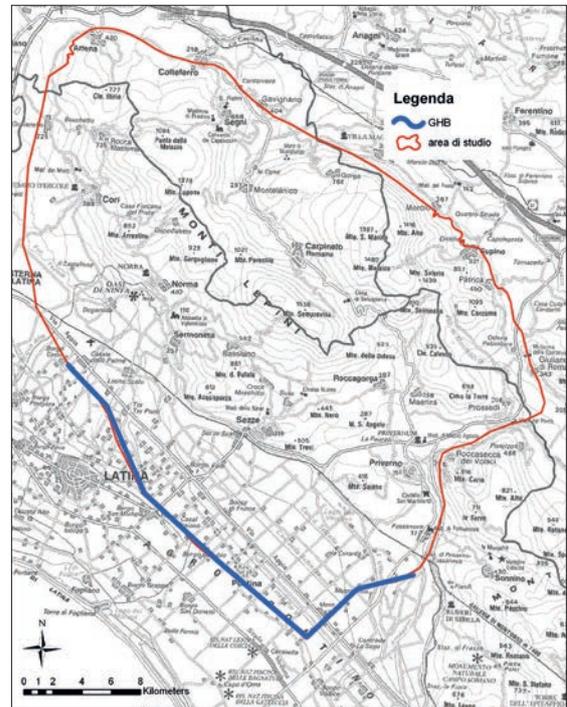


Fig. 14 - Condizioni di carico imposto (GHB) nel layer 2.

Fig. 14 - General Head Boundary in layer 2.

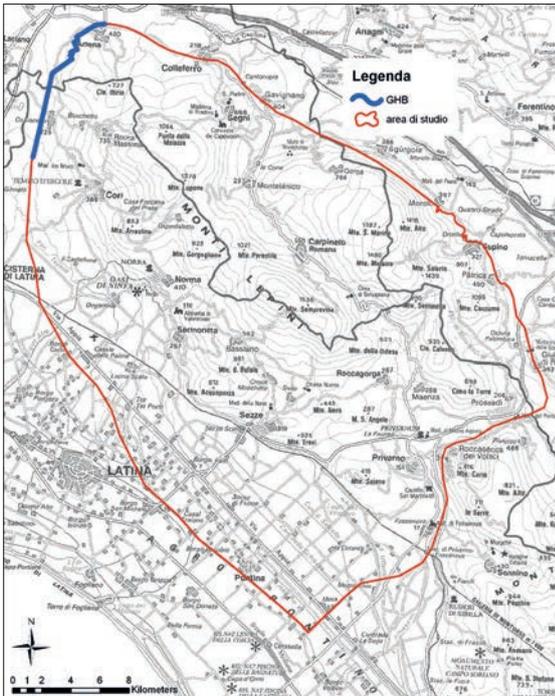


Fig. 13 - Condizioni di carico imposto (GHB) nel layer 1.

Fig. 13 - General Head Boundary in layer 1.

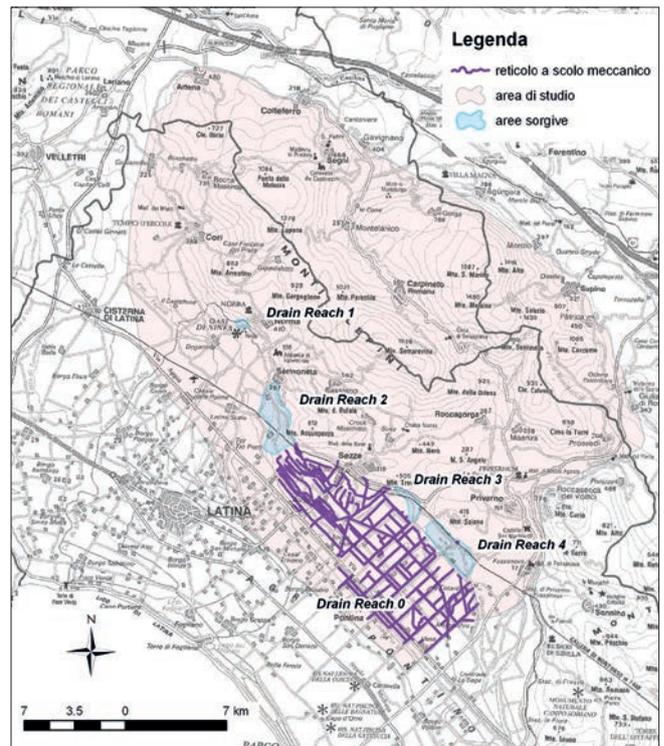


Fig. 15 - Dreni inseriti nel modello.

Fig. 15 - Drains input in the model.

Ricarica e prelievi

La ricarica idraulica del dominio di studio è stata posta, in ogni cella di calcolo del modello, pari all'infiltrazione efficace media degli anni 2005-2010 (anni di funzionamento delle stazioni meteorologiche a disposizione nell'area in studio), che corrisponde ad un valore mediato sull'intera area di 503 mm/anno (ovvero, in termini di flusso entrante nel modello, circa 15 m³/s). Tale valore è stato ricavato dal modello di bilancio distribuito di Alimonti et al. (2010 a), che ha valutato tutti i termini del bilancio idrologico per l'area di studio, a partire dai dati spazializzati di precipitazione media per il periodo 2005-2010 (valore mediato sull'intera area di 1103 mm/anno), di uso del suolo e dei relativi coefficienti colturali, di evapotraspirazione e di ruscellamento (Arnoldus-Huyzendveld et al., 2009).

I volumi relativi alla quantificazione dei prelievi sono stati inseriti all'interno del modello come pozzi di prelievo ossia come *well* (Fig. 16). Il calcolo dei volumi prelevati è stato eseguito sulla base dell'idroesigenza (Alimonti et al., 2010 a) associata al territorio comunale o alla sezione censuaria per i diversi usi della risorsa (agricolo, industriale, civile e zootecnico). Tali volumi sono stati trasformati in dati puntuali e inseriti nel modello come pozzi fittizi, che corrispondono al baricentro dei suddetti territori comunali o sezioni censuarie (territorio comunale per l'uso civile e zootecnico; sezione censuaria per l'uso industriale agricolo). Per il fabbisogno irriguo i pozzi sono stati inseriti in maniera omogenea su tutta la piana, ad eccezione del settore meridionale, dove il consorzio di bonifica locale gestisce la distribuzione delle acque di irrigazione attraverso il reticolo artificiale (dreni nel modello) e non da emungimenti di acque sotterranee (pozzi). A ciascun

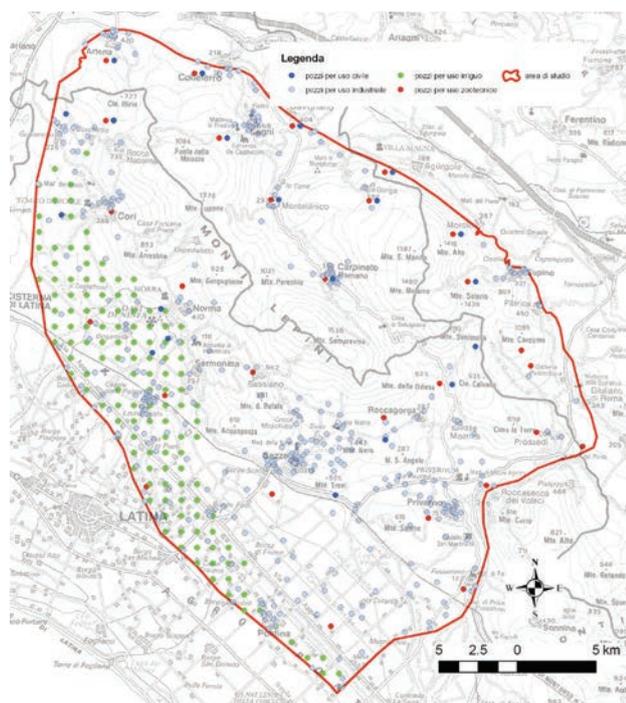


Fig. 16 - Mappa dei pozzi rappresentativi dei prelievi.

Fig. 16 - Wells representig water withdrawals.

pozzo fittizio è stata, inoltre, associata una profondità desunta da un *grid* delle profondità dei pozzi reali presenti nell'area di studio. Tale *grid* è stato calcolato dai dati di profondità ricavati dal database degli archivi delle concessioni della Provincia di Latina. All'interno del modello numerico la lunghezza del tratto finestrato (*bottom screen - top screen*) abbinato a ciascun pozzo, corrisponde alla profondità totale del pozzo; questo coerentemente a quanto normalmente avviene in questo territorio, dove è stato verificato che la maggior parte dei pozzi ha tecniche costruttive che prevedono la finestratura lungo tutto il tratto perforato.

Prima calibrazione della conducibilità idraulica

Il processo di calibrazione ha seguito un approccio di modellazione inversa (Hill, 1998), che consiste nel ricercare la soluzione che, a partire dai risultati calcolati, minimizza gli scarti quadratici medi tra i valori osservati e quelli calcolati. In questo caso la stima dei parametri è avvenuta tramite una funzione obiettivo, corrispondente alla regressione degli scarti quadratici medi, ponderata in base a pesi stabiliti in funzione dell'ubicazione e dell'importanza relativa dei *target* stessi, usando un metodo di Gauss - Newton modificato. Il codice di calcolo usato per la calibrazione è stato il PEST (*Parameter ESTimation*).

Nel modello trattato i pesi maggiori sono stati imposti ai *target* di flusso sia delle sorgenti e sia delle idrovore (per l'aliquota relativa alle acque sotterranee).

Il modello "Lepini-Piana", come detto, è stato impiegato in condizioni stazionarie, pertanto gli unici parametri idrodinamici utilizzati sono state le conducibilità idrauliche i cui valori iniziali sono stati ricavati sperimentalmente in 17 pozzi che hanno riguardato sia la struttura carbonatica, sia i terreni terrigeni di copertura quaternaria. Inizialmente sono state individuate cinque aree a diversa conducibilità idraulica:

- quattro nel *layer* 1, corrispondenti al complesso dei calcari, al complesso dei depositi vulcanici e travertinosi, al complesso dei depositi argillo sabbiosi della Pianura Pontina e ai detriti di versante nella fascia pedemontana in corrispondenza dei gruppi sorgivi (Fig. 17 a);
- una nel *layer* 2, corrispondente alla parte sommersa del complesso dei calcari (Fig. 17 b).

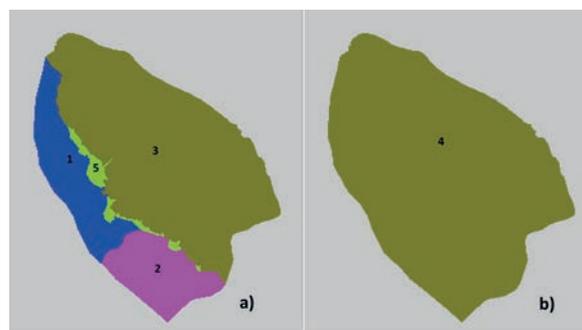


Fig. 17 - zone a diversa conducibilità idraulica del primo modello: a) *layer* 1, b) *layer* 2 (i numeri si riferiscono alle aree a conducibilità idraulica riportate in Tab. 2).

Fig. 17 - 1st model Hydraulic Conductivity areas in Layer 1 and in Layer 2 (numbers are referred to hydraulic conductivity values in Tab.2).

Verifica delle aree di ricarica delle sorgenti

Il modello “Lepini-Piana” nella sua configurazione con cinque aree a diversa conducibilità idraulica non è risultato ben calibrato, secondo l’indicatore statistico scelto per la stima del grado di attendibilità del modello, cioè la deviazione standard dei residuali (scarti). Si è quindi messa a punto una nuova configurazione; il *layer 1* non ha subito modifiche, mentre nel *layer 2* sono state introdotte quattro nuove aree a differente conducibilità idraulica, corrispondenti alle aree di ricarica dei principali gruppi sorgivi (Fig. 18).

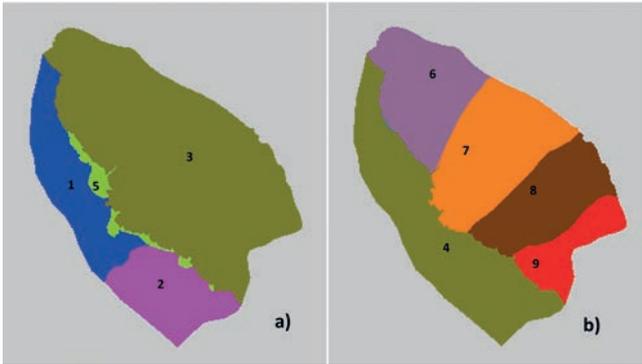


Fig. 18 - zone a diversa conducibilità idraulica del secondo modello: a) *layer 1*, b) *layer 2* (i numeri si riferiscono alle aree a conducibilità idraulica riportate in Tab. 2).

Fig. 18 - 2nd model Hydraulic Conductivity areas in Layer 1 and in Layer 2 (numbers are referred to hydraulic conductivity values in Tab.2).

Tuttavia anche questa nuova configurazione non ha prodotto risultati soddisfacenti nei confronti del grado di attendibilità atteso. Quindi si è deciso di revisionare le aree di ricarica mediante l’ausilio del pacchetto MODPATH (Pollock, 1994), che consente di individuare i percorsi delle particelle che si muovono con il flusso idrico, dalle aree di ricarica ai recapiti selezionati (sorgenti e canali di bonifica).

Tale operazione, resa più agevole mediante il sottopacchetto di analisi dei risultati (*post processing*), ha permesso di meglio distinguere le aree di ricarica delle singole sorgenti, evidenziando ulteriori aree a diversa conducibilità idraulica, come rappresentato nella Fig. 19.

La revisione delle aree di ricarica, ottenuta attraverso il metodo appena esposto e rappresentata nella Fig. 19f, ha permesso di realizzare una nuova configurazione del modello “Lepini-Piana” con ben dieci aree a diversa conducibilità idraulica. In particolare si è introdotto un settore della dorsale che ricarica esclusivamente la falda superficiale della Pianura Pontina, andando ad alimentare il sistema dei canali di bonifica e nella quale si attestano la maggior parte dei pozzi presenti nella piana.

La procedura di calibrazione di questa nuova configurazione ha restituito i valori di conducibilità idraulica per le diverse aree, riportati nella seguente Tab. 2. Bisogna notare che tali valori non vanno interpretati “in assoluto” rispetto ad una qualche giustificazione geologica, bensì devono intendersi come valori “di modello” che rispondono ai criteri di calibra-

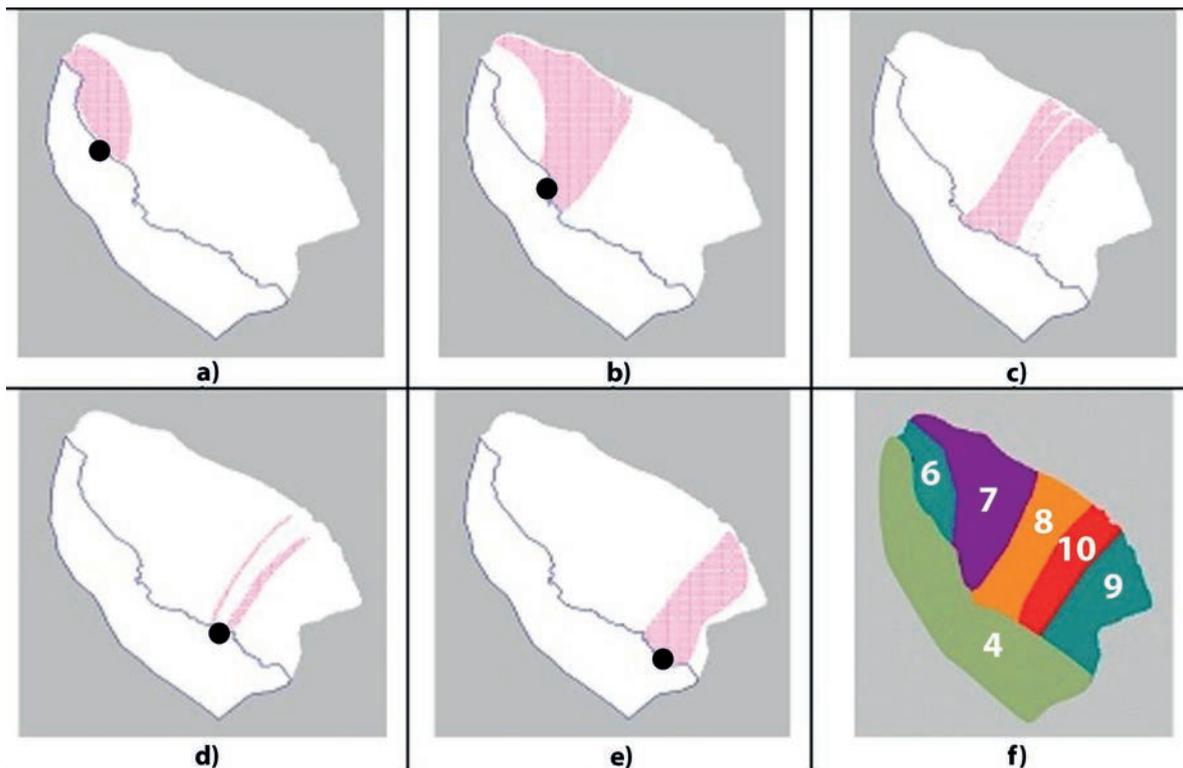


Fig. 19 - Aree di ricarica dei gruppi sorgivi e dei canali artificiali della pianura: a) area di ricarica di Ninfa, b) area di ricarica di Cavata e Cavatella, c) area di ricarica della falda contenuta nei terreni terrigeni quaternari della Pianura Pontina, d) area di ricarica di Sardellane, e) area di ricarica dei Laghi del Vescovo, f) implementazione delle nuove aree in GWV (i numeri si riferiscono alle aree a conducibilità diversa riportate in Tab. 2).

Fig. 19 - Main Springs and artificial channels Recharging Areas: a) Ninfa, b) Cavata e Cavatella, c) recharge area of the Pontina Plain shallow aquifer, d) Sardellane, e) Laghi del Vescovo, f) New Recharge areas input in GWV (numbers are referred to hydraulic conductivity values in Tab.2)

zione adottati ed alla schematizzazione idrogeologica che si è riusciti ad ottenere. In questo senso, ad esempio, il valore di K_z nella zona 4 tiene effettivamente conto del flusso dal basso che in quell'area alimenta la piana, mentre il $K_x=K_y$ nella zona 2 è molto basso in coerenza con le caratteristiche di bassa potenzialità acquifera del complesso idrogeologico di quest'area.

Tab. 2 - Valori di conducibilità idraulica finali.

Tab. 2 - Hydraulic Conductivity: ultimate values.

| Descrizione della zona | k_x ($k_x=k_y$) (m/s) | k_z (m/s) |
|------------------------|---------------------------|-------------|
| Zona 1 | 2.77E-05 | 9.27E-06 |
| Zona 2 | 7.42E-07 | 4.68E-08 |
| Zona 3 | 1.13E-03 | 5.96E-05 |
| Zona 4 | 1.27E-04 | 7.88E-04 |
| Zona 5 | 4.03E-04 | 1.31E-03 |
| Zona 6 | 1.00E-04 | 1.00E-04 |
| Zona 7 | 1.50E-04 | 9.99E-05 |
| Zona 8 | 5.80E-03 | 5.01E-03 |
| Zona 9 | 1.36E-03 | 1.82E-03 |
| Zona 10 | 4.51E-03 | 1.83E-04 |

La nuova schematizzazione idrogeologica delle aree di ricarica ha così consentito di migliorare il grado di attendibilità complessivo del modello, poiché si è ridotta la deviazione standard dei residuali dei flussi. Nella tabella seguente (Tab. 3) sono riportati i valori dei residuali e la deviazione standard dei *target* di flusso, determinati per ciascun gruppo sorgivo e per la rete di bonifica, per le tre diverse configurazioni del modello "Lepini-Piana", che si distinguono per la caratterizzazione idrogeologica della compartimentazione della dorsale. Nell'ultima configurazione delle aree di ricarica si ha, in particolare, una riduzione del grado di incertezza per le portate calcolate di quei due gruppi sorgivi che costituiscono circa il 70 % del flusso totale delle sorgenti basali. Per quanto riguarda il flusso della rete di bonifica, invece, l'elevato valore del

residuale esprime che il flusso sotterraneo drenato dai canali artificiali non è stato correttamente simulato. Ciò è dovuto al possibile errore nell'attribuzione del valore di obiettivo per il flusso della rete di bonifica, che come già spiegato precedentemente è una percentuale del volume totale sollevato dalle idrovore.

Conclusioni

La verifica delle aree di ricarica delle sorgenti carsiche, poste alla base della dorsale carbonatica dei Monti Lepini, è stata sviluppata nell'ambito della messa a punto di un modello numerico per il calcolo del flusso delle acque sotterranee nell'area di studio, costituita appunto dalla dorsale dei Monti Lepini e dal settore pedemontano della Pianura Pontina. Tale modello è stato chiamato "Lepini-Piana" ed ha messo in evidenza l'importanza della corretta schematizzazione dell'assetto geostrutturale ed idrogeologico (compartimentazione della dorsale), al fine di meglio rappresentare il rapporto tra la circolazione della dorsale carbonatica ed il regime delle sorgenti pedemontane.

L'ipotesi di considerare il complesso carbonatico come un mezzo poroso equivalente ha permesso di utilizzare un modello che si basa sulla legge di Darcy (il MODFLOW 2005), ma si è dovuto rappresentare il sistema di alimentazione dei gruppi sorgivi introducendo opportune aree a diversa conducibilità idraulica, associate alla compartimentazione della dorsale. Il valore della conducibilità idraulica di queste nuove aree è stato oggetto di una opportuna calibrazione, affinché il grado di attendibilità complessivo del modello migliorasse, soprattutto in termini di riduzione della deviazione standard dei residuali dei flussi.

Per i valori di conducibilità idraulica finali vale la considerazione che si tratta di risultati "di modello", cioè di schematizzazioni della ben più complessa realtà, come quella di un complesso carbonatico fratturato a contatto con formazioni terrigene. Tuttavia, ricordando che l'approccio modellistico viene sempre più utilizzato come strumento di supporto alle decisioni, si ritiene di poter affermare che la gestione e la tutela della risorsa idrica può ben avvalersi di strumenti matematici ed informatici, che siano però accompagnati dall'analisi

Tab. 3 - Residuali dei *target* di flusso nei diversi modelli.

Tab. 3 - Flow targets residuals for the 3 models.

| Gruppi sorgivi e rete di bonifica | Residuali del 1° modello calibrato (senza compartimentazione della dorsale) | Residuali del 2° modello calibrato (con la compartimentazione della dorsale) | Residuali del 3° modello calibrato (con la nuova compartimentazione della dorsale) |
|--|---|--|--|
| Ninfa | 0.38 | 0.36 | 0.40 |
| Cavata e Cavatella | -1.32 | -1.43 | -1.01 |
| Sardellane | -1.27 | -0.85 | -0.43 |
| Laghi del Vescovo | 0.46 | 0.18 | 0.70 |
| Rete di bonifica | 2.73 | 3.37 | 2.83 |
| Deviazione standard dei residuali dei flussi | 1.48 | 1.66 | 1.31 |

dell'incertezza dei loro risultati. Nel caso di studio si è infatti visto che la miglior definizione del comportamento idrogeologico delle aree di ricarica delle sorgenti in esame si è tradotta in una riduzione del grado di incertezza del modello stesso.

Questo studio propone quindi un modello preliminare il cui sviluppo ha permesso di fornire un primo tentativo di delimitazione delle aree di ricarica delle sorgenti basali e del sistema idrogeologico superficiale pontino. In futuro si potrà implementare una modellazione in transitorio che consideri la diversità a livello stagionale e annuale della ricarica, dei prelievi, dei deflussi di emergenza, nonché sviluppare modelli di maggior dettaglio relativi alle specifiche aree di ricarica riconosciute in questo lavoro.

BIBLIOGRAFIA

- Alimonti, C., Federici, E., Gazzetti, C. (2010 a). Bilancio idrico distribuito e usi antropici della risorsa idrica lepina “*Distributed water balance and anthropogenic uses of Lepina water resource*” In: Provincia di Latina, Progetto Monti Lepini studi idrogeologici per la tutela e la gestione della risorsa idrica, Gangemi Editore, Roma.
- Alimonti, C., Bono, P., Capelli, G., Federici, E., Gazzetti, C., Mazza, R., Tallini, M. Teoli, P. (2010 b). Schema della circolazione idrica sotterranea della dorsale carbonatica dei M. Lepini. “*Groundwater flow scheme in the Lepini Mountains carbonate ridge*” In: Provincia di Latina, Progetto Monti Lepini studi idrogeologici per la tutela e la gestione della risorsa idrica, Gangemi Editore, Roma.
- Alimonti, C., Perotto, C., Gazzetti, C., Marinucci, E. (2007). Captazioni e risorsa idrica nel bacino di Mazzocchio “*Withdrawals and water resource in the Mazzocchio basin*”, Gangemi editore, Roma.
- Arnoldus-Huyzendveld, A., Perotto, C. Sarandrea, P., (2009), I suoli della Provincia di Latina. “*Provincia di Latina soils*”, Gangemi editore, Roma.
- Barbieri, M., Carrara, C., Castorina, F., Dai Pra, G., Esu, D., Gliozzi, E., et al. (1999). Multidisciplinary study of Middle-Upper Pleistocene deposits in a core from the Piana Pontina (Central Italy). *Giornale di Geologia*, 61, 47-73.
- Bear, J. (1993). Modeling flow and contaminant transport in fracture rocks. *Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock*. Academic Press, Inc., 1-37.
- Boni, C., Bono, P., Calderoni, G., Lombardi, S., Turi, B. (1980). Indagine Idrogeologica e geochemica sui rapporti tra ciclo carsico e circuito idrotermale nella Piana Pontina (Lazio Meridionale) “*Hydrogeological and geochemical investigation about relationship between karst cycle and hydrothermal circuit in the Pontina Plain (Southern Latium)*”. *Geologia applicata e idrogeologia*, 15, 203-247.
- Bono, P. (2010). Valutazione delle risorse idriche naturalmente rinnovabili, caratterizzazione chimica ed isotopica delle acque sorgentizie e sotterranee, condizioni ai limiti. “*Evaluation of naturally renewable water resources, chemical and isotopic characterization of springs and groundwater, boundary conditions*” In: Provincia di Latina, Progetto Monti Lepini studi idrogeologici per la tutela e la gestione della risorsa idrica, Gangemi Editore, Roma.
- Capelli, G. (2002). Progetto Sinkhole del Lazio “*Latium Sinkhole Project*”. Università degli Studi di Roma Tre Dipartimento di Scienze Geologiche, Regione Lazio, Studio inedito.
- Capelli, G., Del Monaco, F., Mazza, R., Tallini, M., Teoli, P. (2010). Assetto geologico e idrogeologico dell'area di studio “*Geological and hydrogeological setting of study area*” In: Provincia di Latina, Progetto Monti Lepini studi idrogeologici per la tutela e la gestione della risorsa idrica, Gangemi Editore, Roma.
- Carbone, F., Russo, A., Sirna, G. (1978). Comunità a Coralli e rudiste del Cretacico superiore di Rocca di Cave (Monti Prenestini, Lazio) “*Community Corals and Rudists in the Upper Cretaceous of Rocca di Cave (Prenestini Mountains, New York)*”. In *Ann. Univ. Ferrara*, n.s. sez 9, v. 6, suppl. (199-217). Università di Ferrara.
- Celico, F. (2002). Approccio integrato per la definizione delle modalità di flusso in idrostrutture carbonatiche di estensione regionale: i Monti Lepini (Lazio) “*Integrated approach for flow mode definitions in regional hydrogeological carbonate structures: Lepini Mountains (Latium)*”. *Quaderni di Geologia Applicata*, 9 - 1,19-48.
- Celico, P. (1983). Idrogeologia dei Massicci carbonatici, delle piane quaternarie e delle aree vulcaniche dell'Italia centro-meridionale (Marche e Lazio meridionali, Abruzzo, Molise e Campania) “*South-central Italy Carbonate Massifs, Quaternary plains and volcanic areas Hydrogeology (southern Marche and southern Latium, Abruzzo, Molise and Campania)*” In: *Quaderni della Cassa per il Mezzogiorno- Progetti speciali per gli schemi idrici nel Mezzogiorno 4/2, Cassa per il Mezzogiorno*, Roma.
- Cocozza, T. e Praturlon, A. (1966). Note geologiche sul Colle Cantocchio (M. Lepini SW, Lazio) “*Geological Notes on the Cantocchio Hill (SW Lepini Mountains, Latium)*”. *Geologica Romana*, 5, 323-334.
- Conforto, B., Di Riccio, G., Sappa, M. (1962). Indagini sulle acque sotterranee dell'Agro Romano e Pontino “*Investigations on Agro Romano and Agro Pontino groundwaters*”. Parte seconda: Agro Pontino. Cassa per il Mezzogiorno.
- Funicello, R. e Parotto M. (1978). Il substrato sedimentario dell'area dei Colli Albani. Considerazioni geodinamiche e paleogeografiche sul margine tirrenico dell'Appennino Centrale “*The sedimentary substrate of the Albani Hills area. Geodynamic and paleogeographic considerations on the tyrrhenian margin of Central Appennins*”. *Geologica Romana* 17, 233-287.
- Harbaugh, A.W., (2005). MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model - the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16.

- Hill, M.C., (1998), Methods And Guidelines For Effective Model Calibration, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 98-4005.
- Mangin, A. (1970). Contribution a l'étude des aquifères Karstiques a partir de l'analyse des courbes de décrue et tarissement. *Annales de Spéléologie*. V. 25, no. 3, 581-610.
- Mouton, J. (1977). Contributo allo studio delle acque sotterranee dell'Agro Romano e Pontino. "Contribution to the study of Agro Romano and Agro Pontino groundwaters" In: Atti del convegno-L'acqua per la Piana Pontina: situazione e prospettiva.
- Petitta, M. (1994) Modelli matematici di simulazione dell'acquifero carsico dei Monti Lepini (Lazio meridionale). "Mathematical models simulation of the Monti Lepini karst aquifer (Southern Lazio)" Tesi di dottorato di ricerca in Scienze della Terra VI° Ciclo Università degli Studi "La Sapienza", Dipartimento di Scienze della Terra, Roma.
- Pollock, D. W (1994). User's Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U. S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model. U. S. GEOLOGICAL SURVEY Open-File Report 94-464. Virginia.
- Prampolini, N (1939). La bonifica Idraulica delle Paludi Pontine "The reclamation of the Pontina Marsbes". Ed. Verdesi, Roma.
- Rosa, C. (1995). Evoluzione geologica quaternaria delle aree vulcaniche laziali: confronto tra il settore dei Monti Sabatini e quello dei Colli Albani "Geological evolution of Latium's Quaternary volcanic areas: comparison between Sabatini Mountains area and Albani Hills". Università degli studi di Roma "La Sapienza", Tesi di dottorato di ricerca in Scienze della Terra – VII Ciclo, Roma.
- Sappa, G. e Rossi M. (2007) Idrogeologia del Sistema Acquifero della Piana Pontina "Hydrogeology of the Pontina Plain aquifer system". Dip. di Idraulica, trasporti e strade. Sapienza Università di Roma – Regione Lazio, Assessorato all'Ambiente e alla Cooperazione tra i popoli. Direzione Regionale Ambiente.
- Serva, L. e Brunamonte, F. (2007) - Subsidence in the Pontina Plain, Italy. *Bull Eng Geol Env*, 66, 125–134.
- Sevink, J., Vos P., Westerhoff W., Stierman A., Kamermans H. (1982): A sequence of marine terraces near Latina (Agro Pontino, Central Italy). *Catena*, 9, 361-378.
- Sonnenborg, T., Christensen, B., Nygaard, P., Henriksen, H., Refsgaard, J. (2003). Transient modeling of regionale groundwater flow using parametre estimates from steady-state automatic calibration. *Hydrology*, 273, 188-204.
- Teoli, P. (2012). Modellazione numerica degli acquiferi finalizzata alla valutazione degli scambi idrici sotterranei tra i Monti Lepini e la Pianura Pontina "Numerical modeling for groundwater exchange evaluation between Lepini Mountains and Pontina Plain acquifers". Scuola Dottorale in Geologia dell'Ambiente e delle Risorse - XXIV Ciclo, Università degli Studi di Roma Tre, Roma.