

## Le aree di salvaguardia di alcuni pozzi nel conoide di Prato.

Riccardo Frullini<sup>1</sup>, Giuliano Gabbani<sup>2</sup>, Giovanni Pranzini<sup>3</sup>, Filippo Sottani<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze, r.frullini@tin.it

<sup>2</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze, giga@geo.unifi.it

<sup>3</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze, gpranzini@mail.unifi.it

<sup>4</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze, f.sottani@virgilio.it

### *Safety areas of some wells in the Prato alluvial fan*

**ABSTRACT:** The work consists in the creation of safety areas, by means of the chronological method, of wells for drinking water in the city of Prato (Tuscany, Italy). The aquifer of Prato plays a fundamental role in supplying water to the municipality as it is the principal source. The area comprises the alluvial fan of the Bisenzio River, right hand affluent of the Arno River, at the meeting point with the fluvio-lacustrine plain of the intermediate Valdarno valley, between Pistoia and Firenze. The strong groundwater demand for both public and industrial purposes has caused the progressive lowering of the water table in recent years. Given the importance of this resource this work aims to protect the city's water supply. In particular, the objective is to use mathematical modelling to analyse the groundwater dynamics, in order to identify the areas of recharge, localise and classify centers of pollution and study their possible interferences. The software *Modflow* is used to construct the isochrones of the more productive wells with the chronological method. The results also demonstrate that protective buffers created with the geometric criteria (circle with a 200 m radius) tend to underestimate the size of the safety areas and, therefore, to reduce the protection of the wells.

**Key terms:** Safety areas, Modflow, Prato

**Termini chiave:** Aree di salvaguardia, Modflow, Prato

### **Riassunto**

Lo studio è finalizzato alla delimitazione delle aree di salvaguardia, con il criterio cronologico, di alcuni pozzi ad uso potabile della città di Prato in Toscana. I pozzi insistono sul conoide alluvionale del fiume Bisenzio, affluente di destra del fiume Arno, allo sbocco nella pianura del Valdarno Medio fra Firenze e Pistoia.

La falda di Prato costituisce la principale risorsa per l'approvvigionamento idrico del comune. L'acquifero è stato sovrasfruttato per anni, a causa dei prelievi delle industrie tessili che si sono aggiunti a quelli per l'acquedotto, tanto che il livello di falda si è abbassato fino a 40 metri rispetto agli anni '50. Inoltre, poiché i pozzi dell'acquedotto sono sparsi nel comune insieme con le industrie, le quali utilizzano varie sostanze tossiche e nocive nel ciclo di lavorazione, l'acqua emunta è molto esposta al rischio d'inquinamento.

In questa situazione è di massima importanza la delimitazione delle aree di salvaguardia dei pozzi, come primo passo per la l'attuazione del D.P.R. 236/88. A tal fine è stato realizzato il modello matematico di flusso della falda con il software *Modflow*, validato in base ai dati del monitoraggio piezometrico. Mediante il software *Visual Modflow* sono state disegnate le isocrone del tempo di arrivo ai pozzi relative a 60, 180 e 365 giorni.

Il confronto fra le isocrone e il cerchio di 200 metri con centro nel pozzo, che corrisponde all'area di rispetto delimitata con il criterio geometrico, mostra come quest'ultimo criterio non garantisca una valida protezione dei pozzi dall'inquinamento: in particolare, l'isocrona dei 60 giorni racchiude un'area più ampia del cerchio di 200 m di raggio e, come logico, più sviluppata nella direzione da cui viene il flusso di falda.

### **1. Introduzione**

Le acque sotterranee hanno assunto in passato, e assumeranno in futuro, un ruolo di crescente importanza nei sistemi idrici anche per il forte incremento della domanda. Perciò è fondamentale definire criteri affidabili di sfruttamento e di gestione di queste risorse. Prescindendo dall'entità di tali risorse, dalla loro qualità originaria e dalla loro dislocazione geografica, le acque sotterranee sono soggette a tre processi di depauperamento che influiscono pesantemente sugli schemi di corretto sfruttamento a livello regionale: la siccità, il sovrasfruttamento e l'inquinamento.

Nel presente lavoro si è studiato l'acquifero della città di Prato, da diversi anni sovrasfruttato, situato nel conoide alluvionale del fiume Bisenzio, affluente di destra del fiume Arno, al suo sbocco nella pianura del Valdarno Medio.

La falda acquifera riveste un ruolo fondamentale per la

città, non solo per l'approvvigionamento per uso potabile, ma anche per il mantenimento e lo sviluppo delle numerose industrie tessili presenti nel territorio.

Il progressivo impoverimento della falda è legato a molteplici fattori oltre i prelievi eccessivi: la progressiva estensione dell'urbanizzazione con conseguente impermeabilizzazione di estese superfici; gli interventi di regolarizzazione dell'alveo del Bisenzio che hanno ridotto la permeabilità del letto del fiume e quindi la ricarica della falda; la variabilità climatica, ovvero incremento delle temperature associato alla diminuzione delle precipitazioni.

Oltre ad una progressiva depressione, l'acquifero in questione è minacciato dalla presenza di numerosi centri di pericolo sparsi in maniera diffusa per tutta l'area Pratese.

## 2. Concetto di area di salvaguardia

La necessità di difendere dall'inquinamento le acque sotterranee in prossimità delle opere di captazione ha portato a definire delle aree, nelle quali sono applicati vincoli d'uso del territorio, concepite con la finalità di garantire la possibilità di un approvvigionamento idrico potabile compatibile con le leggi ed i regolamenti sanitari vigenti.

Regolamentare o vietare determinate attività antropiche nei pressi dei punti di prelievo, serve a prevenire il verificarsi di episodi di sversamento superficiale di inquinanti che, data la vicinanza, arriverebbero all'opera di captazione in tempi assai brevi per dare tempo di predisporre azioni specifiche di disinquinamento.

Proprio per dare protezione alle fonti di approvvigionamento idrico è stato introdotto il concetto di aree di salvaguardia, che, sulla base del D.P.R. 236/88 modificato dal D.Lgs. 152/99, consiste nella delimitazione di tre zone, che si distinguono in:

- *zona di tutela assoluta*, che deve avere raggio non inferiore a 10 m, in cui è vietata qualsiasi attività;
- *zona di rispetto*, che in prima attuazione corrisponde ad un cerchio di raggio 200 m con centro nel pozzo (criterio geometrico), nel quale è proibita una serie di attività potenzialmente inquinanti;
- *zona di protezione*: in teoria dovrebbe coincidere con l'intera area di alimentazione della falda idrica che alimenta l'opera di emungimento. Vi sono previsti blandi vincoli ed alcune raccomandazioni sull'uso del territorio.

Considerato che la zona di tutela assoluta dei pozzi degli acquedotti pubblici viene comunque recintata, e che l'area di protezione ha un significato soprattutto per la programmazione territoriale, l'attenzione si appunta soprattutto sull'area di rispetto, perché questa limita in maniera pesante le attività produttive; tanto è vero che, a distanza di 17 anni, sono poche le aree di rispetto attuate.

In questa sede è stato utilizzato, per la delimitazione delle aree di rispetto, il criterio cronologico, secondo il quale la distanza fra l'opera di captazione ed il limite esterno di ogni singola area coincide con un definito tempo

che impiegherebbe un eventuale inquinante idroveicolato ad arrivare al pozzo: in particolare sono state localizzate le isocrone di 60, 180 e 365 giorni di 9 pozzi dell'acquedotto di Prato, posti in aree nelle quali sono numerosi i centri di pericolo.

## 3. Il modello matematico di flusso

Un modello matematico di flusso ha la capacità di simulare in modo semplificato le caratteristiche essenziali e più significative della dinamica di una falda.

Ovviamente la realtà è molto complessa e difficile da rappresentare con un modello, quindi si sono rese necessarie alcune semplificazioni che devono per forza essere introdotte. Quelle più evidenti vengono fatte per quanto riguarda la forma e le caratteristiche geometriche del corpo da modellare in quanto è ovviamente impensabile poter rappresentare tutte le disomogeneità esistenti.

Inoltre, il modello considera sempre valida la legge di Darcy; questo rappresenta una semplificazione rispetto alla realtà del regime idrodinamico (in parte minore per quanto riguarda il tipo di fluido), che però non può essere evitata. La difficoltà di chi implementa il modello sta proprio nel non introdurre semplificazioni eccessive che, anche se contribuiscono a diminuire gli scarti nella fase di calibrazione, rischiano di stravolgere la realtà inficiando l'attendibilità del modello.

Il modello ad elementi finiti Modflow è uno strumento per la simulazione della dinamica delle acque sotterranee. Lo strumento informatico utilizzato (Visual Modflow) comprende un sistema di calibrazione per cui i dati ottenuti dalla simulazione possono essere confrontati e valutati statisticamente con le misure di piezometria reale effettuate su piezometri.

Modflow è un modello che simula il flusso di acque sotterranee nelle tre dimensioni spaziali (X,Y,Z); esso incorpora i modelli bi e tridimensionali descritti da Trescott et al. (1976). Il modello offre la possibilità di simulare: le diverse caratteristiche del sistema idrogeologico oggetto di studio quali, ad esempio flusso da fiumi, flusso da superfici a carico costante (mari, laghi ecc.), flusso dovuto a drenaggi ecc., flussi associati con stress esterni quali ad esempio pozzi, ricarica areale, evapotraspirazione, drenaggi; differenti tipi di acquiferi: confinati e non.

### 3.1 Note matematiche

Il movimento tridimensionale dell'acqua sotterranea a densità costante attraverso un mezzo poroso può essere descritto dall'equazione a derivate parziali:

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x * \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y * \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z * \frac{\partial H}{\partial z}) - W = S_s * \frac{\partial H}{\partial T} \quad \text{equazione (1)}$$

dove:

$K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$  sono i valori della conducibilità idraulica lungo le direzioni x,y,z che sono state assunte parallele agli assi maggiori della conduttività idraulica;

$H$  è il carico idraulico;

$W$  è il flusso volumetrico per unità di volume e rappresenta gli apporti o le perdite di acqua;

$S_s$  è il coefficiente di immagazzinamento del materiale poroso;

$T$  è il tempo.

L'equazione (1), insieme con le condizioni al contorno di carico idraulico e con le condizioni di carico idraulico iniziali, costituisce la rappresentazione matematica di un sistema di flusso delle acque sotterranee.

Eccetto che per rari casi molto semplici, l'equazione (1) non può essere risolta con semplici soluzioni analitiche, perciò sono stati sviluppati vari metodi di calcolo che forniscono soluzioni più o meno approssimate.

Un approccio alla soluzione è il metodo degli elementi finiti in cui il sistema continuo descritto dall'equazione (1) è sostituito da un set finito di punti discreti sia nello spazio che nel tempo, e le derivate parziali sono sostituite da termini calcolati dalle differenze di carico idraulico in questi punti. Dal processo sopra descritto si deducono sistemi di equazioni algebriche lineari di differenze, la cui soluzione fornisce valori di carico idraulico  $H$  agli specifici punti del sistema. Questi valori rappresentano un'approssimazione accettabile della distribuzione, variabile con il tempo, del carico idraulico rispetto a quella che si otterrebbe dalla soluzione analitica dell'equazione (1).

### 3.2 Modello Concettuale

Il primo impegno è la costruzione di un modello concettuale (Fig. 1) che deve racchiudere tutte le semplificazioni necessarie. È quindi essenziale un'ottima conoscenza dell'area in questione proprio per poter decidere quali siano le assunzioni semplificative da compiere.

Particolare importanza per la creazione di un modello concettuale hanno avuto le numerose litostratigrafie (circa 200) esaminate nella fase iniziale del lavoro.

L'acquifero è stato delimitato alla base dallo spesso strato di argille posto fra l'acquifero stesso ed il substrato. La profondità di tale strato è stata ricavata, oltre che da alcune litostratigrafie profonde, anche da alcune indagini geofisiche (Gheri, 1968) che attraverso sondaggi elettrici verticali hanno investigato buona parte del conoide.

La falda è alimentata da varie fonti: la più importante è l'infiltrazione efficace dalle precipitazioni, ma anche l'alimentazione dal Fiume Bisenzio è un fattore di ricarica importante, specialmente per il richiamo del profondo cono di depressione della falda; importanza minore ha l'alimentazione dal Torrente Ombrone.

Un ruolo significativo lo svolge l'afflusso proveniente dal margine montano a nord del conoide, dove la falda è alimentata anche dall'acqua di ruscellamento superficiale che raggiunge la pianura. A tale apporto dall'esterno si deve aggiungere l'afflusso profondo dai calcari dei Monti della Calvana, posti immediatamente a nord di Prato (Cicali e Pranzini, 1984).

Di seguito sono spiegati in dettaglio i termini inseriti nel modello in regime transiente, per il triennio 1.01.2002 –

31.12.2004, e quelli invece calcolati automaticamente dallo stesso modello in seguito ai dati di input immessi; tra questi, gli scambi tra il fiume Bisenzio e la falda, ricostruiti per 13 momenti diversi del triennio in base a misure di portata in diverse sezioni del fiume (Giacomelli, 2004).

Il passo successivo compiuto è stato quello di discretizzare lo spazio creando dal modello concettuale un modello di area vasta, delimitando l'area di modellazione in celle opportunamente infittite dove è richiesta una maggiore precisione. Successivamente, ad ogni cella sono stati attribuiti quei parametri idrogeologici richiesti dal modello che hanno permesso una simulazione del flusso.

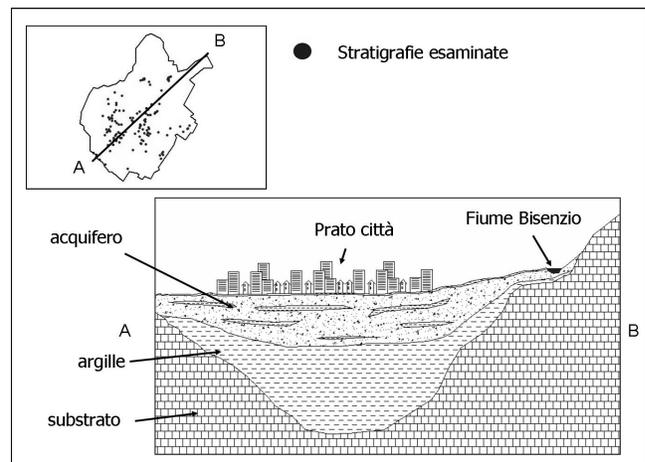


Fig. 1. Modello concettuale dell'acquifero pratese.  
*Conceptual model of the Prato aquifer.*

## 4. Input e implementazione

Qui di seguito sono descritti in dettaglio sia l'implementazione del modello che i risultati della simulazione.

L'implementazione di un modello consiste nel definire:

- i limiti del sistema in studio e discretizzarlo;
- tutte le variabili interne al sistema idrogeologico stesso, quali proprietà idrauliche di ciascuna cella, caratteristiche di corpi idrici in generale presenti all'interno dell'area da modellare;
- gli stress esterni al sistema, quali emungimenti, drenaggi, ricariche ecc.

### 4.1 Discretizzazione dello spazio

Il primo passo in una modellazione ad elementi finiti è quello di discretizzare lo spazio nelle tre direzioni  $x, y, z$ . Per realizzare la discretizzazione orizzontale ( $x, y$ ), la griglia iniziale di 100 righe e 100 colonne (celle a maglie quadrate di lato 120 metri), è stata modificata nel corso dell'implementazione, ovvero è stata infittita specialmente lungo la zona interessata dall'alveo del Bisenzio. Questo ha permesso una migliore rappresentazione del fiume stesso attraverso le singole celle.

Per la discretizzazione verticale ( $z$ ) il software ha

interpolato le singole isoipse creando una superficie tridimensionale corrispondente alla superficie topografica, immessa in coordinate Gauss-Boaga. Essa si sovrappone agli strati sottostanti, la cui ricostruzione è stata la parte più complessa del modello. Tramite interpretazione ed interpolazione delle litostratigrafie, è stato creato un primo strato di copertura dell'acquifero, il quale è stato suddiviso a sua volta in tre strati: il primo e il terzo caratterizzati da ghiaie relativamente pulite e quello centrale da ghiaie alternate a sottili livelli di sabbie e argille.

Per quanto riguarda l'ultimo strato, quello che costituisce la base dell'acquifero, per ricostruirne il tetto si sono utilizzati anche sondaggi elettrici verticali (Gheri, 1968), per estendere i pochi dati dei pozzi che l'hanno raggiunto.

#### 4.2 Proprietà delle singole celle

Ogni cella del modello non precedentemente definita come cella inattiva (i limiti dell'area modellata) o cella a carico costante (fronti di alimentazione) deve essere caratterizzata da una serie di proprietà idrauliche:

- *Conduttività ( $K_x, K_y, K_z$ ):* i valori delle conduttività (m/s) sono considerati uguali nelle direzioni x, y, mentre è stato assegnato un valore diverso per la direzione z. I valori di K derivano da una ventina di prove di pozzo (Andrenelli e Baldini, 1996). Questi valori sono stati confrontati con le granulometrie dei livelli acquiferi corrispondenti, in modo da potere utilizzare le numerose litostratigrafie disponibili per arrivare ad una zonazione di permeabilità dell'intero acquifero, attraverso il software Surfer 8.
- *Coefficiente d'immagazzinamento specifico per acquiferi confinati ( $S_s$ ):* per un acquifero saturo è definito come il volume di acqua che l'acquifero rilascia per abbassamento unitario del livello piezometrico. Questi valori sono stati assegnati sulla base delle poche prove di portata che hanno interessato solo i livelli acquiferi confinati.
- *Coefficiente d'immagazzinamento specifico per acquiferi non confinati ( $S_y$ ):* volume di acqua che un acquifero non confinato rilascia per abbassamento unitario della superficie freatica. Essendo questo coefficiente equivalente alla porosità efficace, i valori sono stati assegnati, oltre che dalle prove di portata, in base alle litostratigrafie dei pozzi.

#### 4.3 Perturbazioni esterne al sistema

Tutto l'insieme di fattori esterni al sistema idrogeologico, ma in grado di condizionarne il comportamento e lo stato fisico reale, vengono definiti come perturbazioni esterne. Tra esse si annoverano, per quanto riguarda il caso di Prato, gli emungimenti civili e quelli industriali, questi ultimi particolarmente intensi essendo la zona un importante centro produttivo.

Modflow effettua la modellazione degli effetti dovuti all'emungimento mediante le seguenti semplificazioni:

- un pozzo ubicato in una cella genera i propri effetti nel

centro della stessa,

- il software considera il pozzo filtrato sull'intero spessore dello strato interessato dai filtri senza tener conto di una loro eventuale lunghezza inferiore.

Nel caso dell'acquifero di Prato i pozzi sono stati distinti in civili ed in industriali. Per quanto concerne l'ubicazione e le caratteristiche specifiche dei primi, ci si è avvalsi dei dati forniti dal gestore della risorsa idrica, mentre per i pozzi industriali sono state necessarie alcune approssimazioni, in quanto tali opere non sono sempre denunciate ed i dati dei prelievi non sono reperibili.

La portata totale dei pozzi industriali appena descritti è stata ricavata dal bilancio idrico del 2001 (Landini, 2005) e suddivisa opportunamente per ogni periodo di stress valutato, considerando che il periodo estivo e quello natalizio sono di sostanziale inattività delle industrie.

La quantità d'acqua necessaria a soddisfare le esigenze delle industrie pratesi rappresenta circa il 52% di quella annualmente estratta dall'acquifero in questione.

Secondo il bilancio del 2001, la portata annualmente richiesta per usi industriali ammonta a circa 20 milioni di m<sup>3</sup>. Tale portata è stata ritenuta valida anche per l'anno 2002, che è il primo della modellazione. In considerazione della grave crisi che l'industria tessile ha subito nel territorio pratese negli ultimi anni, questa portata industriale è stata ridotta per gli anni 2002 e 2003. In particolare, sulla base dei dati di produzione industriale, l'emungimento è stato diminuito del 5% per l'anno 2003 e del 10% per l'anno 2004 rispetto a quello calcolato per il 2001.

#### 4.4 Risultati della simulazione ed affidabilità del modello

Il modello utilizza i dati di input per costruire delle equazioni di flusso del sistema acquifero; una volta risolte, le soluzioni sono visibili nei dati di output.

Le celle poste ad una quota superiore rispetto alla superficie piezometrica sono celle "dry" ovvero asciutte in quanto sopra il livello della falda.

Il modello ha elaborato, in base ai dati di input implementati, delle superfici piezometriche in momenti diversi del triennio considerato, che sono rappresentative della realtà. Un confronto tra una situazione fornita dal modello ed una reale è fornita dalle figure 2 e 3, che mostrano una piezometria abbastanza simile. Ci sono dieci anni di differenza tra le due situazioni, ma il monitoraggio continuo in 17 piezometri ha permesso di accertare che i livelli del 1994 sono simili a quelli del 2004, anche se nel decennio la falda ha subito variazioni importanti.

L'affidabilità del modello è confermata dal diagramma di Figura 4, che mostra una notevole corrispondenza tra i valori calcolati e quelli misurati nei piezometri inseriti come punti di calibrazione: tutti i punti di controllo si approssimano molto alla retta a 45°, che indica l'esatta corrispondenza tra il modello e la realtà. Un ulteriore grado dell'affidabilità è dato dall'andamento rispetto al tempo dell'RMS %, che rappresenta l'errore quadratico medio: alla fine del periodo studiato si stabilizza al 3,2 %.

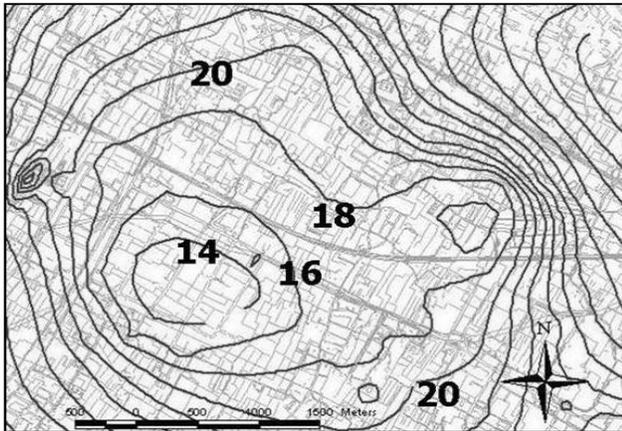


Fig. 2. Piezometria del 2004 ricavata dal modello.  
*Piezometric model of 2004*

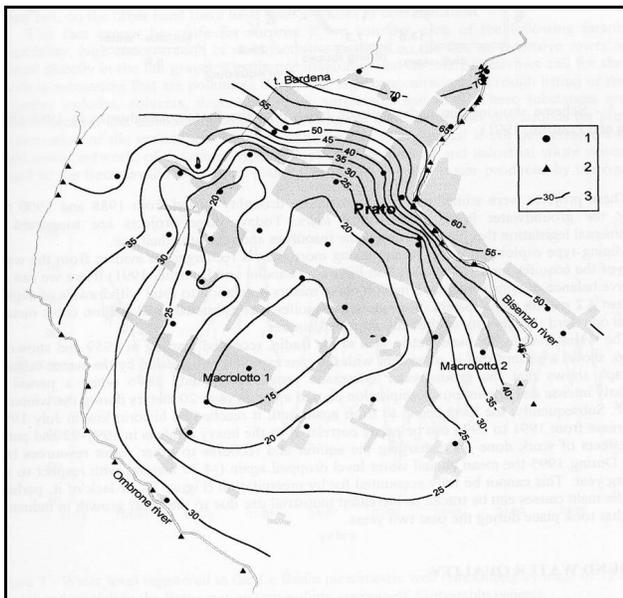


Fig. 3. Piezometria del 1994 (Gargini et al., 1994).  
*Piezometric contours, 1994 (Gargini et al., 1994)*

## 5. Calcolo delle isocrone

La lunga implementazione e la successiva calibrazione del modello matematico di flusso sono servite per poter calcolare automaticamente le aree di salvaguardia col criterio cronologico.

Un inquinante introdottosi in un sistema acquifero a porosità primaria si disperde in modo da occupare gradualmente una porzione sempre più grande del volume disponibile nei pori. In seguito allo sversamento di un inquinante, si produce nella zona un pennacchio ellittico (*plume*), la forma e le dimensioni del quale, nonché il suo spostamento nel tempo, dipendono dal modo in cui è stato

introdotta l'inquinante nel sistema e dalle caratteristiche idrodinamiche della falda.

Il modello matematico di flusso è servito proprio per simulare l'andamento nella falda di un inquinante idrovelocitato e completamente miscibile in acqua, in quanto il suo movimento segue il gradiente idraulico con le velocità definite dalla legge di Darcy. I limiti delle aree di salvaguardia, automaticamente calcolate per alcuni pozzi, individuano i punti dai quali l'eventuale inquinante già presente in falda impiega dei tempi predefiniti per arrivare ai pozzi. Questi tempi sono stati scelti in 60, 180 e 365 giorni: nelle aree delimitate andrebbero imposti tre diversi gradi di vincoli per la salvaguardia dei pozzi.

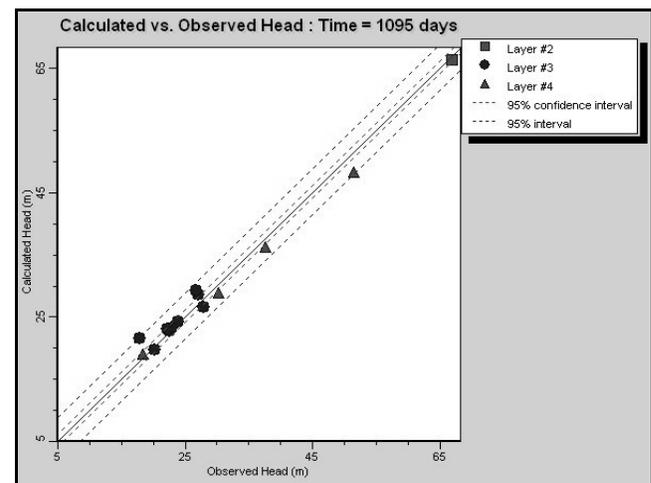


Fig. 4. Confronto tra i livelli osservati e quelli calcolati dal modello alla fine del periodo studiato.

*Observed and calculated model at the end of studied period.*

I pozzi ad uso idropotabile dell'acquedotto di Prato, sui quali sono state calcolate le isocrone, sono stati scelti per il loro elevato valore, dato dalla portata ( $Q$  media = 18,5 l/s) e dalla qualità dell'acqua estratta. I pozzi sono situati nella zona centrale e maggiormente produttiva del conoide e sono: il pozzo Baciacavallo, Badie 4, Badie 3, Grignano Lavatoi, Tempesti ed i quattro del campo pozzi Iolo. Nella Figura 5, che racchiude i pozzi sopra citati, nella quale le frecce indicano le direzioni di flusso della falda, sono state riportate le isocrone di 60 giorni, di 180 giorni e di 365 giorni per tutti i pozzi suddetti. Sono state disegnate anche le circonferenze di raggio 200 metri e centro nei pozzi, per confrontare le aree di rispetto definite con il criterio geometrico con quelle ottenute con il criterio cronologico.

## 6. Conclusioni

Il modello implementato si è rivelato uno strumento di rappresentazione e calcolo sufficientemente versatile ed accurato. La verifica dello schema idrogeologico dell'area di studio, elaborato sulla base di dati diretti ed indiretti, è stata effettuata mediante la simulazione dell'evoluzione

della falda pratese nel periodo compreso tra gennaio 2002 e dicembre 2004: si è riscontrata una buona corrispondenza fra dati osservati e calcolati. Il modello può essere utilizzato come strumento per supportare scelte e decisioni tecniche consentendo la verifica preventiva degli effetti di breve e lungo termine derivanti da interventi sul territorio concernenti il prelievo o la immissione di acque nel sottosuolo.

Le isocrone disegnate dal modello potranno essere utilizzate dalle autorità competenti per istituire le aree di rispetto, con tutte le conseguenze che ne derivano sull'uso del territorio.

Il confronto con i cerchi di 200 metri di raggio mostra come il criterio geometrico sia inadeguato per una efficace protezione dall'inquinamento delle risorse ad uso potabile.

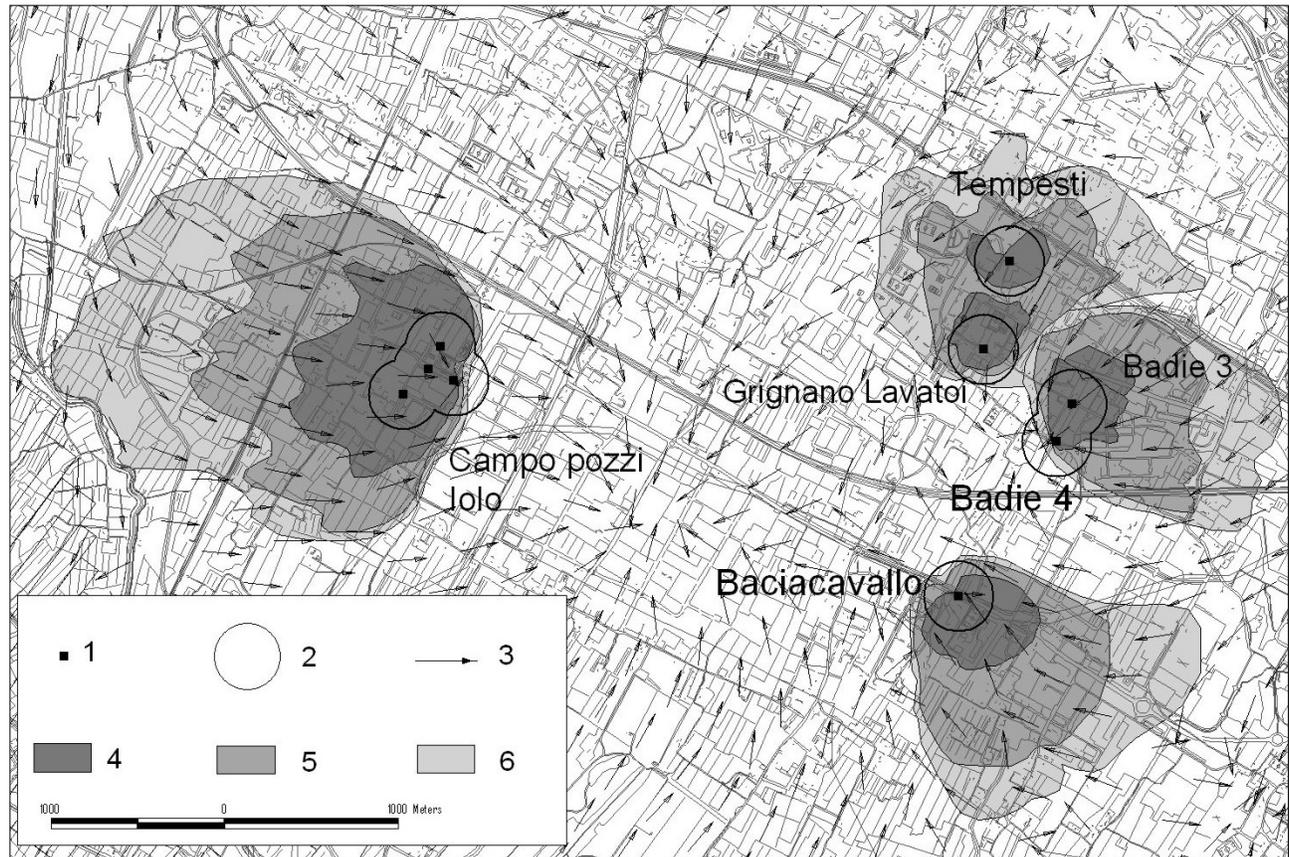


Fig. 5. Aree di salvaguardia: 1 pozzi; 2 criterio geometrico (200 m di raggio); 3 linee di flusso del modello; 4 criterio cronologico: isocrone 60 giorni; 5: isocrone 180 giorni; 6: isocrone 1 anno.

*Safety areas: 1 wells; 2 geometric criterion (200 m of radius); 3 flow lines of model; 4 chronological criterion: isochrones 60 days; 5: isochrones 180 days; 6: isochrones 1 year.*

## Bibliografia

Andrenelli M. C. & Baldini E. (1996) – Borsa di studio per l'esecuzione di prove di portata ed altri test sui pozzi del comune di Prato e loro interpretazione. Relazione finale. Consiag, Prato.  
 Cicali F. & Pranzini G. (1984) – Idrogeologia e carsismo dei Monti della Calvana (Firenze). Boll. Soc. Geol. It., CIII (2), 271-278.  
 Gargini A., Landini F. & Pranzini G. (1995) – Studio idrogeologico del territorio di Prato per la valutazione della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi mediante un sistema parametrico. Atti II Conv. Naz. sulla Protezione e Gestione delle

Acque Sotterranee, Nonantola, Maggio 1995, Quaderni di Geologia Applicata, 1, 1995, vol.3, 41-48.

Gheri F. (1968) – Elettrosondaggi per l'esplorazione idrogeologica nel comune di Prato. Lavoro inedito per Azienda Servizi Municipalizzati, Prato.

Giacomelli I. (2004) – Misura dell'infiltrazione nell'alveo del Bisenzio e valutazione del suo contributo alla ricarica della falda di Prato. Tesi di laurea, Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Scienze della Terra.

Landini F. (2005) – Indagini geologiche, idrogeologiche e progettazione di un sistema sperimentale di ricarica artificiale per un acquifero poroso sovrasfruttato nel Valdarno Medio, con verifica dell'esercizio dell'impianto. Tesi di dottorato, Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Scienze della Terra.

Truscott P.C., Peter C.F. & Larson S.P. (1976) – Finite difference model for aquifer simulation. USGS Ed.