

ISSN 1826-1256

# Giornale di Geologia Applicata

Volume 9, n. 2 - Anno 2008



Rivista dell'AIGA, Associazione Italiana di Geologia Applicata e Ambientale

# Giornale di Geologia Applicata

Volume 9, n. 2 - Anno 2008

Rivista dell'AIGA, Associazione Italiana di Geologia Applicata e Ambientale

## **Direttore**

Cesare Roda, Università di Udine

## **Comitato Editoriale**

Il Consiglio Direttivo dell'AIGA

Claudio Cherubini, Presidente (Bari Politecnico)	(Benevento)
Giovanni Pietro Beretta (Milano)	Alberto Prestininzi (Roma "La Sapienza")
Francesca Bozzano (Roma "La Sapienza")	Mario Luigi Rainone, Tesoriere (Chieti)
Andrea Camillo Cancelli (Milano Bicocca)	Cesare Roda (Udine)
Luigi Carmignani (Siena)	Roberto W. Romeo, Cons. Presidenza (Urbino)
Pietro Bruno Celico (Napoli)	Sergio Rusi (Chieti)
Corrado Cencetti, Segretario (Perugia)	Gabriele Scarascia Mugnozza (Roma "La Sapienza")
Gianfranco Ciancetti, Cons. Presidenza (Pavia)	Nicola Sciarra (Chieti)
Uberto Crescenti (Chieti)	Paolo Tacconi (Perugia)
Mario Del Prete (Potenza)	Roccaldo Tinelli (Bari Politecnico)
Walter Dragoni, Vicepresidente (Perugia)	
Francesco Maria Guadagno, Cons. Presidenza	

## **Segretaria di redazione**

Grazia Martelli, Università di Udine

## **Obiettivi del Giornale di Geologia Applicata**

Il Giornale ha lo scopo di pubblicare ricerche originali, descrizione di casi, rassegne sullo stato dell'arte nel campo della Geologia applicata, intesa nel senso più ampio del termine. Sono inclusi in questa espressione gli studi geologici che hanno rilevanza per l'Ingegneria civile, per la gestione del territorio, per lo sfruttamento delle risorse e per lo sviluppo della sicurezza ambientale. Sono considerati per la pubblicazione anche studi metodologici e rassegne sullo stato dell'arte su specifici problemi. L'obiettivo è quello di contribuire allo sviluppo della Geologia come professione.

© **2008 AIGA**. Tutti i diritti sono riservati all'AIGA. Sono autorizzate fotocopie per uso individuale; è autorizzata la riproduzione di parti del volume per uso didattico o scientifico, purché sia citata la fonte. Per ogni altro uso è necessaria l'autorizzazione dell'AIGA.

Il Giornale di Geologia Applicata è un periodico dell'AIGA, Associazione Italiana di Geologia Applicata e Ambientale, registrato presso il Tribunale di Udine in data 27.03.2006 al numero 10/2006.

Indirizzo della redazione: Prof. Grazia Martelli, Dipartimento di Georisorse e Territorio, Via Cotonificio, 114, 33100 Udine. e-mail: [giornale@geoitalia.org](mailto:giornale@geoitalia.org).

I singoli Autori sono responsabili delle opinioni espresse negli articoli. L'AIGA e gli Autori non si assumono nessuna responsabilità per eventuali danni a persone o cose derivanti dalla utilizzazione di idee, osservazioni o metodi riportati negli articoli del Giornale di Geologia Applicata.

---

**In copertina:** Il mulino di San Moro. L'edificio è connesso alla pescaia di Santa Rosa per mezzo di un canale artificiale di derivazione lungo circa 8 km. Per pescaie si intendono gli sbarramenti fluviali realizzati per accumulare acqua che viene incanalata per ricavarne energia. Si veda l'articolo a pagina 215.

# Giornale di Geologia Applicata

Volume 9, n. 2 - Anno 2008

## Idrogeologia applicata in aree urbanizzate

*Guest Editors: Roberto Mazza e Giuseppe Capelli*

- 91 **Presentazione**
- 93 **Applicabilità del metodo GALDIT per la valutazione della vulnerabilità di acquiferi costieri siciliani.** *Cimino A., Cosentino C., Oieni A., Tranchina L.*
- 103 **Modello di flusso della falda per lo studio di impatto ambientale di un campo pozzi nella Provincia di Milano.** *Puppini U., Gorla M., Remonti M., Rainero A.*
- 113 **Applicazione di un modello matematico per la protezione delle R.I.S.: il campo pozzi di Rivalta Torinese (TO).** *Quaranta N., Cogo E.*
- 125 **Modello preliminare di flusso e di trasporto di calore nella Provincia di Verona.** *Rainero A., Nucci E., Puppini U., Remonti M.*
- 133 **Studi idrogeologici in ambito urbano: gli esempi del VI e XI Municipio della Città di Roma.** *Capelli G., Mazza R., Taviani S.*
- 153 **Progettazione di un geodatabase per la gestione delle risorse idriche: Geodatabase CISS.** *Rossetto R., Baldi B., Perna M., Carmignani L.*
- 163 **Valutazioni sui problemi connessi con il flusso tra acquifero superficiale e acquiferi profondi attraverso pozzi per acqua e delle possibili strategie di intervento: il caso della Pianura Padana piemontese.** *Menegon A., Clemente P., De Luca D.A.*
- 175 **Scenari idrodinamici nella piana ad Oriente di Napoli (Italia), nell'ultimo secolo: cause e problematiche idrogeologiche connesse.** *Allocca V., Celico P.*
- 199 **Modellizzazione del bilancio idrico ed azotato della pianura Reggiana per la valutazione della capacità di attenuazione dei suoli all'inquinamento delle acque sotterranee da nitrati di origine agricola.** *Fumagalli L., Guermandi M., Laruccia N.*
- 207 **Caso di studio di un acquifero freatico a doppia porosità. Caratterizzazione, modellazione numerica e bonifica di un sito contaminato da solventi clorurati.** *Gigliuto A., Tangari D., Tognoni A., Cremonesi M.*
- 215 **Applicazione di tecniche di mappatura ad alta risoluzione nel fiume Arno (Firenze).** *Segoni S., Morelli S., Kukavcic M., Camorani A., Catani F., Ermini L.*
- 227 **Relazioni temporali pluridecennali di dati pluviometrici, idrologici e piezometrici nella pianura lombarda tra Ticino e Oglio.** *Bonomi T., Canepa P., Del Rosso F., Rossetti A.*
- 249 **Modellazione di flusso a densità variabile di un acquifero freatico salinizzato.** *Piccinini L., Vincenzi V., Gargini A.*





## Presentazione

*Il rapporto tra gli insediamenti urbani e i corpi idrici superficiali e sotterranei è intrinsecamente legato alle motivazioni che hanno portato l'uomo a scegliere determinati siti per lo sviluppo delle città stesse. In tali motivazioni si individuano la difesa della città, il vantaggio offerto dai trasporti su vie d'acqua, la disponibilità di energia idraulica, le risorse idriche per gli usi potabili ed industriali. Negli ultimi decenni l'equilibrio tra ambienti fortemente urbanizzati e risorse idriche è decaduto, aprendo serie problematiche ambientali e di uso compatibile. Sempre più gravi, infatti, sono divenuti i fenomeni di inquinamento e di depauperamento dei corpi idrici. Recentemente, inoltre, si sta sviluppando, senza una particolare pianificazione, lo sfruttamento delle risorse idriche sotterranee per l'uso dell'energia geotermica a bassa entalpia.*

*A fronte di tale ampio scenario, questa iniziativa editoriale si propone di illustrare lo stato dell'arte degli studi idrogeologici applicati alle diverse realtà metropolitane nazionali, raccogliendo i contributi presentati nella sessione tematica T32 – Idrogeologia applicata in aree urbanizzate, al Sesto Forum Italiano di Scienze della Terra, **Geitalia 2007**, che si è tenuto a Rimini tra il 12 e il 14 Settembre 2007*

*In particolare, gli argomenti trattati sono: la definizione dei complessi idrogeologici e della circolazione idrica sotterranea; l'individuazione dei fenomeni sorgivi; la valutazione della risorsa idrica sotterranea; l'interazione tra acque di falda e infrastrutture; il regime idrologico dei corsi d'acqua e le sue modifiche a seguito degli interventi antropici; gli scambi falda-fiume; l'espansione urbana in relazione al reticolo idrografico; la riqualificazione del reticolo idrografico; la qualità delle acque; la vulnerabilità della risorsa idrica; le reti di monitoraggio delle acque superficiali e sotterranee e l'idrogeologia applicata alle possibilità di trasporto di calore per l'uso dell'energia geotermica.*

*Le complesse realtà idrogeologiche e urbanistiche richiedono sempre più spesso l'utilizzo di Sistemi Informativi Territoriali e software specifici per la modellazione numerica degli acquiferi. Tuttavia si nota che a volte l'approccio matematico al problema non è sempre suffragato da configurazioni del modello fisico di riferimento sufficientemente approfondite, specialmente laddove ci si riferisce a territori di ampia estensione. E' comunque interessante notare come per alcune grandi aree metropolitane italiane, si disponga di schemi di assetto geologico – strutturale molto approfonditi, anche nella terza dimensione.*

*Ci si auspica che il futuro della ricerca sia rivolto alla definizione di modelli integrati che coniughino gli schemi di circolazione con la definizione dei plume di propagazione e diffusione delle anomalie termiche e chimiche, nonché affrontino il problema della parametrizzazione idrogeologica e geotecnica dei complessi litologici.*

Roberto Mazza e Giuseppe Capelli



## Applicabilità del metodo GALDIT per la valutazione della vulnerabilità di acquiferi costieri siciliani

Antonio Cimino<sup>1</sup>, Claudia Cosentino<sup>1,2</sup>, Antonino Oieni<sup>1,2</sup>, Luigi Tranchina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Fisica e Tecnologie Relative, Università di Palermo, <sup>2</sup>Ph.D. Student in Geologia, Università di Palermo  
cimino@unipa.it, cosentino@difter.unipa.it, oieni@unipa.it, tranchina@difter.unipa.it

### *Applicability of GALDIT assessing vulnerability model in Sicily coastal aquifers*

**ABSTRACT:** In the frame of hydrogeological studies carried out in the Nebrodi region (North-East Sicily), vulnerability aspects have been carefully considered. This area includes notable water reservoirs with high hydrogeological risk of pollution. Besides a number of scientific contributions, intrinsic vulnerability has been already estimated in the Acquadolci coastal plain by SINTACS system, together with a set of parametric maps. In this paper, Authors propose a further vulnerability evaluation by the GALDIT system, applied in few coastal areas of the world. This point-count system model is founded on the evaluation of six particular factors, that likely control sea encroachment. Each parameter is characterized by a relative pre-determined weight (ranging from 1 to 4), depending on its own influence with respect to intrusion phenomena. So, from the application of a relatively simple equation, GALDIT indexes can be evaluated, in this way classifying the surveyed area on the basis of pollution vulnerability.

**Key terms:** Pollution vulnerability, Coastal aquifers, Point and count systems, GALDIT, North-Eastern Sicily

**Termini chiave:** Vulnerabilità all'inquinamento, Acquiferi costieri, Metodi a punteggi e pesi, GALDIT, Sicilia Nord-Orientale

### **Riassunto**

Nell'ambito degli studi sulle caratteristiche idrogeologiche e sul rischio d'inquinamento degli acquiferi nella regione dei Nebrodi (Sicilia Nord-Orientale), in questa nota è stata presa in considerazione la piana costiera di Acquadolci. Quest'area, assieme ai rilievi circostanti (Pizzo Castellaro, Monte San Fratello), costituisce un apprezzabile *reservoir* idrico in una regione i cui acquiferi si presentano generalmente molto vulnerabili nei confronti dell'inquinamento. L'area di Acquadolci è già stata oggetto di numerose indagini a carattere interdisciplinare, le quali hanno consentito di delineare importanti proprietà degli acquiferi ivi presenti. Tali indagini, che hanno anche riguardato analisi idrogeochimiche e campagne di prospezioni geoelettriche, hanno condotto ad interpretazioni integrate sulle condizioni idrostrutturali e qualitative degli acquiferi costieri e montani, con la delineazione delle principali direttrici di scorrimento delle acque sotterranee. A coronamento di questi studi, è stata elaborata una prima valutazione della vulnerabilità intrinseca all'inquinamento tramite il noto sistema SINTACS, applicando tale protocollo nella rigorosa determinazione dei suoi sette parametri fondamentali. Qui gli Autori propongono e discutono un ulteriore, innovativo sistema di elaborazione della vulnerabilità, che prende il nome di GALDIT, dalle iniziali dei sei fattori che ne costituiscono l'essenza. Con

l'applicazione di questa metodologia, la vulnerabilità viene in particolare valutata nei confronti del fenomeno dell'intrusione marina, che è tipico delle aree litorali antropizzate e, quindi, anche della piana costiera di Acquadolci, dove gli insediamenti turistici e l'agricoltura intensiva hanno prodotto un crescente deterioramento degli acquiferi. Qui l'uso e l'evoluzione del territorio rischiano di avviare crescenti porzioni della fascia costiera verso densità abitative nei complessi urbani incompatibili con la razionale utilizzazione delle risorse idriche nel loro complesso. L'indice GALDIT e la relativa cartografia hanno consentito di identificare le aree non soltanto maggiormente suscettibili ad essere interessate da questa particolare sorgente di contaminazione, ma anche effettivamente vulnerate in corrispondenza dei punti d'acqua censiti, integrando la preventiva zonazione di vulnerabilità intrinseca del territorio precedentemente realizzata con il metodo SINTACS. Infine, viene condotta una discussione sulle limitazioni e sulle possibilità offerte dal nuovo metodo, con l'intento di proporre alcune modifiche sulla base delle peculiarità locali di applicazione.

### **1. Introduzione**

Oggi uno dei problemi di maggiore interesse nell'ambito della gestione ambientale è sicuramente la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi. La qualità delle RIS

(Risorse Idriche Sotterranee), che rappresentano un'importante fonte naturale di approvvigionamento idrico e sono utilizzate per soddisfare il fabbisogno della popolazione, sia dal punto di vista degli usi civili che industriali ed agricoli, è costantemente messa in pericolo da sorgenti potenziali di inquinamento, soprattutto di origine antropica. Questa situazione assume una gravità ancora maggiore se si considera che la quantità di risorse idriche necessarie alla popolazione mondiale è in progressivo aumento; tutto ciò conduce quindi alla necessità di mettere a punto metodi sempre più affidabili volti alla determinazione del grado di rischio da inquinamento esistente in una certa area.

Per questo motivo la tutela delle RIS rientra tra le priorità espresse dalle recenti normative in materia di risorse idriche; strettamente connesso alla tutela delle RIS è l'aspetto della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. A partire dagli anni Ottanta sono state proposte da diversi autori, sia italiani che stranieri, una serie di definizioni di vulnerabilità naturale di un acquifero; tra le tante, Civita (1987) definisce come vulnerabilità propria di un sistema acquifero "la suscettibilità specifica dei sistemi acquiferi nelle loro diverse parti componenti e nelle diverse situazioni geometriche e idrodinamiche, ad ingerire e diffondere, anche mitigandone gli effetti, un inquinante, fluido o idroveicolato, tale da produrre impatto sulla qualità dell'acqua sotterranea nello spazio e nel tempo".

Una volta stabilita in maniera univoca la definizione di vulnerabilità, bisogna però riconoscere che la vulnerabilità di un acquifero è di certo un parametro strettamente dipendente, oltre che dalle caratteristiche intrinseche dell'acquifero stesso, anche dalle diverse tipologie di inquinanti che possono entrare in gioco. L'approccio migliore sarebbe quindi quello di valutare la vulnerabilità all'inquinamento in relazione ad un gruppo specifico di inquinanti (per esempio sostanze organiche, metalli pesanti, fertilizzanti per usi agricoli, etc.) in modo da elaborare carte di vulnerabilità specifica per una certa area ed un certo tipo di inquinante (Foster, 1987). In questa direzione hanno lavorato diversi Autori contribuendo alla realizzazione di mappe di vulnerabilità specifica, ad esempio nel caso d'inquinamento da nitrati usati in agricoltura (Canter *et alii*, 1987). Il problema sta nel fatto che una cartografia di questo tipo richiede una quantità di dati che sono difficilmente disponibili; per cui nel corso degli anni è stato proposto l'utilizzo di alcuni metodi, sempre finalizzati alla valutazione della vulnerabilità di un'area, che prendessero in considerazione esclusivamente le caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero considerato; tra i tanti, vengono qui ricordati i seguenti, estesamente applicati in numerose regioni:

- il DRASTIC, secondo un sistema empirico proposto dall'Agenzia Americana per la Protezione dell'Ambiente (USEPA), finalizzato alla valutazione dell'inquinamento

potenziale che potrebbero subire le acque sotterranee su scala regionale (Aller *et alii*, 1987);

- il GOD, proposto da Foster (1987);
- il SINTACS (Civita, 1994; Civita e De Maio, 2000).

Inoltre, è stato recentemente sviluppato e proposto il metodo *COP* con lo scopo di valutare la vulnerabilità intrinseca degli acquiferi carbonatici con differenti livelli di carsificazione (Vias *et alii*, 2006).

## 2. Definizione della problematica

I metodi convenzionali a cui si è in precedenza accennato sono in grado di distinguere i diversi gradi di vulnerabilità che caratterizzano una data area, ma al tempo stesso risultano affetti da evidenti limitazioni, poiché - per esempio - un acquifero che è altamente vulnerabile rispetto ad un contaminante potrebbe esserlo in misura alquanto minore rispetto ad un altro. È proprio per questo motivo che vengono distinte due principali classi di vulnerabilità: la vulnerabilità *intrinseca* e la vulnerabilità *specifica* (Daly *et alii*, 2002); la prima è la suscettibilità delle acque sotterranee ai contaminanti prodotti dalle attività umane, prendendo in considerazione le caratteristiche idrogeologiche di un'area, ma è indipendente dalla natura del contaminante e dallo scenario della contaminazione. La seconda, invece, prende in considerazione le proprietà fisico-chimiche del contaminante e le sue interazioni con quelle dell'acquifero considerato, assumendo quindi, come esprime l'attributo, un carattere di maggiore *specificità* in base ai contaminanti che vengono presi in considerazione.

In base alla citata definizione di vulnerabilità di Civita (1987), gli esempi più immediati a cui fare riferimento, quando si pensa ad un acquifero vulnerabile all'inquinamento, sono le contaminazioni della falda causate da scarichi fognari (civili e/o industriali), o dall'immissione di prodotti chimici altamente tossici (agricoltura), ovvero da tutti quegli elementi chimici, immessi in atmosfera dalle industrie, che raggiungono il suolo ed il sottosuolo per mezzo delle acque meteoriche. Tutti questi fattori sono sicuramente importantissimi e da tenere in considerazione, ma oggi un altro fattore di rischio, non meno pericoloso per la qualità delle RIS in prossimità della linea di costa, è rappresentato dalla contaminazione delle acque dolci della falda a causa dell'intrusione di acque salate di provenienza marina. Gli acquiferi situati in zone costiere, infatti, negli ultimi anni sono sempre più soggetti al fenomeno dell'intrusione marina; questo fenomeno è particolarmente evidente in aree marino-costiere caratterizzate da un elevato numero di pozzi, specialmente se in acquiferi sovrasfruttati e laddove la litologia dei terreni tenda a favorire o, meglio, a non ostacolare la migrazione delle acque marine dalla linea di costa verso l'entroterra. In particolare, il fenomeno di salinizzazione degli acquiferi costieri diventa più evidente nelle aree in cui l'estrazione di acqua

dolce, attraverso pozzi ubicati in prossimità delle fasce costiere, avviene più velocemente della velocità alla quale si ricaricano i corpi idrici coinvolti nel processo di sfruttamento della falda.

È per questo che negli ultimi anni è stato suggerito un nuovo modello di valutazione della vulnerabilità di un'area, applicabile unicamente a zone costiere, in cui si è in presenza di vulnerazione della falda a causa dell'intrusione marina. Questo modello, noto come *GALDIT*, è stato recentemente proposto nell'ambito del progetto *COASTIN* (Chachadi e Lobo-Ferreira, 2001) ed applicato, fino a questo momento, in India nella regione di Nord Goa (Chachadi *et alii*, 2003; Chachadi e Lobo-Ferreira, 2005), nell'acquifero di Monte Gordo in Portogallo (Chachadi *et alii*, 2005), nell'isola Terceira nelle Azzorre (Novo e Lobo Ferreira, 2007) ed, in Italia, soltanto nella zona di Arborea, in Sardegna (Barrocu *et alii*, 2006). Il metodo, come spiegato meglio più avanti, ha sicuramente dei vantaggi, primo tra tutti quello di mirare alla determinazione della vulnerabilità di un'area dovuta esclusivamente al mescolamento delle acque di falda con acque salate di origine marina (vulnerabilità specifica); la conoscenza della causa che provoca la situazione di rischio considerata permette, infatti, di definire con più precisione quali sono i fattori che entrano

in gioco e, quindi, quelli che hanno una maggiore o minore influenza nell'instaurarsi delle condizioni di vulnerabilità. Nonostante questo, il metodo *GALDIT* sembra mostrare qualche punto debole nel senso che, da un'attenta analisi dei parametri presi in considerazione, l'opinione degli Autori di questa nota è che alcuni di essi andrebbero rivisti o dovrebbero avere un peso diverso da quello proposto dagli Autori.

### 3. Lineamenti idrostrutturali dell'area di Acquedolci

La piana di Acquedolci è compresa nella cintura costiera della regione siciliana dei Nebrodi, lungo la fascia settentrionale dell'Isola. Essa si trova delimitata da una serie di rilievi carbonatici nel suo margine meridionale (Pizzo Castellaro e Monte San Fratello, Figura 1), mentre ai suoi bordi occidentale e orientale è demarcata da due corsi d'acqua a carattere torrentizio (le fiumare Furiano ed Inganno rispettivamente).

La principale copertura geologica è data da depositi alluvionali quaternari, sovente terrazzati secondo degli ordini ben riconoscibili e che possono essere riscontrati nelle piane limitrofe.

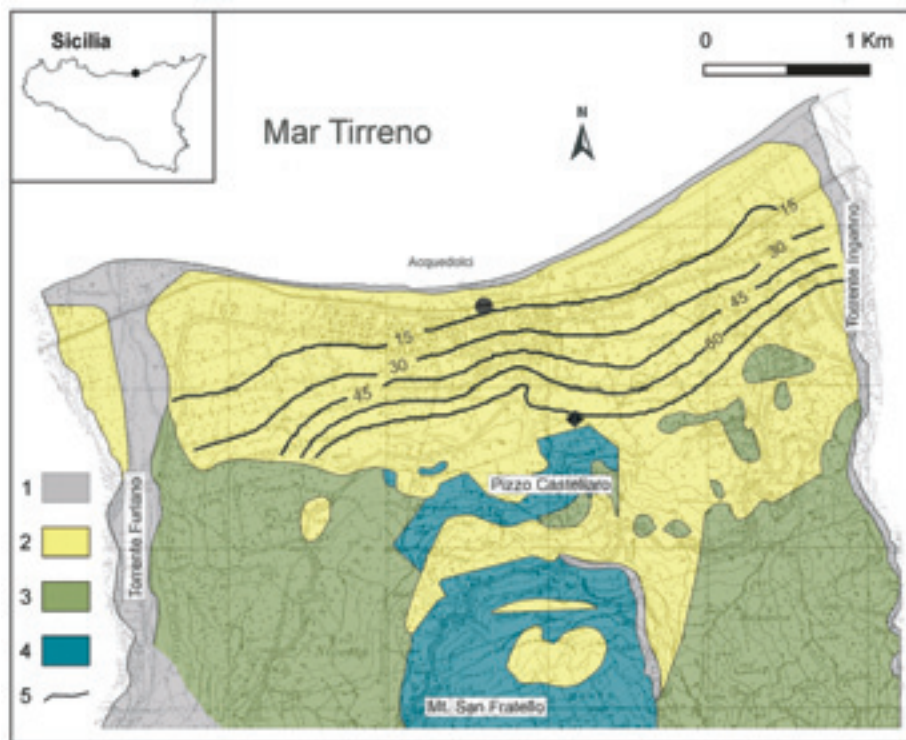


Figura 1. Schema idrostrutturale della Piana di Acquedolci. (1) unità sabbioso-ghiaioso-arenacea quaternaria; (2) unità sabbioso-arenacea quaternaria; (3) unità argilloso-marnoso-arenacea; (4) unità calcareo-dolomitica mesozoica; (5) isofreatiche dell'acquifero superiore (metri sul livello del mare), riferite ai punti d'acqua riportati in Figura 2.

Figure 1. Hydrostructural scheme of the Acquedolci Plain. (1) Quaternary sandy-gravelly-arenaceous unit; (2) Quaternary sandy-arenaceous unit; (3) clayey-marly-arenaceous unit; (4) Mesozoic calcareous-dolomitic unit; (5) contour lines of piezometric level (m above sea level), referred to wells in Figure 2.



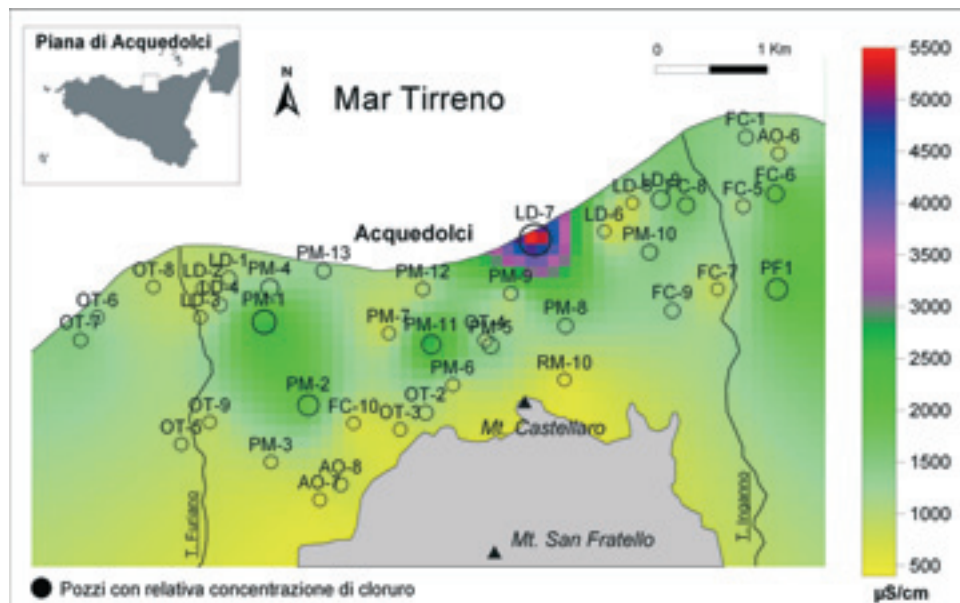


Figura 2. Ubicazione dei pozzi nell'area di Acquedolci; il diametro dei cerchi è proporzionale alla concentrazione dello ione cloruro nel pozzo in esame. La scala cromatica si riferisce alla conducibilità elettrica in  $\mu\text{S}/\text{cm}$  delle acque sotterranee.

Figure 2. Map of the investigated area, exhibiting wells location and distribution of electrical conductivity of groundwater. Size of circles is proportional to chloride concentration. Chromatic scale is referred to electrical conductivity of groundwater ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Questi affioramenti sono in genere caratterizzati da caratteristiche di permeabilità molto variabile in dipendenza della loro granulometria, costituendo acquiferi produttivi con una vulnerabilità all'inquinamento da media ad alta (Cimino *et alii*, 1997). È possibile pertanto differenziare, nell'intera area costiera, almeno quattro principali unità idrogeologiche (Abbate *et alii*, 2003; Cimino *et alii*, 2002), Figura 1:

1) un'unità sabbioso-ghiaioso-arenacea, comprendente le alluvioni quaternarie dei delta torrentizi ed una ristretta fascia litorale, con permeabilità da media ad alta per porosità;

2) un'unità sabbioso-arenacea, affiorante per quasi tutta l'estensione della piana, con un grado di permeabilità media per porosità; quest'unità si mostra in continuità idrogeologica con la prima, costituendo un unico acquifero molto sfruttato principalmente per usi agricoli; in Figura 1 sono pure riportate le curve isofreatiche della corrispondente falda (che chiameremo *superiore* per distinguerla con quella *profonda*, descritta più avanti);

3) un'unità argilloso-marnoso-arenacea, la cui composizione - piuttosto complessa - va da frammenti derivanti da complessi metamorfici affioranti nell'interno della regione nebroidea, a terreni terziari flyschoidi; la permeabilità complessiva dell'unità è da bassa a molto bassa, con una funzione di basamento impermeabile alla falda superiore e di tamponamento nei confronti delle direttrici idriche di ricarica provenienti dai massicci interni;

4) un'unità calcareo-dolomitica mesozoica,

rappresentata dai già menzionati rilievi di Pizzo Castellaro e di Monte San Fratello, con permeabilità medio-alta per fratturazione e carsismo: in essa è contenuto un acquifero cospicuo relativamente profondo, che si ritrova al di sotto della piana di Acquedolci e la alimenta attraverso le coltri detritiche delle sue pendici.

I citati rilievi sono inclusi nella ben nota catena costiera siciliana che, con andamento regionale Est-Ovest, rappresenta uno dei più estesi affioramenti carbonatici dell'Isola, con unità calcareo-dolomitiche e flyschoidi. La circolazione idrica, pur frammentata in funzione delle differenti caratteristiche di permeabilità presentate dalla regione, consente l'emergenza di sorgenti, talora dalla portata notevole, come, per esempio, la sorgente *Favara di Acquedolci*, che rappresenta una delle principali fonti di approvvigionamento idrico del territorio in esame (Cimino *et alii*, 2002). La presenza di numerose piccole sorgenti completa tale sintetica descrizione idrostrutturale dell'area di Acquedolci.

#### 4. Il metodo GALDIT

Una delle cause più comuni di contaminazione degli acquiferi costieri è data dall'intrusione delle acque di origine marina; questa tematica, soprattutto negli ultimi anni, è stata ampiamente trattata da Autori sia italiani che stranieri (Demirel, 2004; Di Sipio *et alii*, 2006; Liu e Cheng, 1997; Melloul e Goldenberg, 1997; Polemio *et alii*, 2006; Pulido-Leboeuf, 2004; Sodde e Barrocu, 2006; Yechieli *et alii*, 2006). Nell'ambito di quest'importante tematica, di recente è stato elaborato il metodo GALDIT, appunto finalizzato, in modo ben determinato, alla

valutazione della vulnerabilità specifica di un'area al fenomeno dell'intrusione marina.

#### 4.1 Descrizione del metodo

Il metodo GALDIT è un sistema a punteggi e pesi basato sulla stima dell'importanza relativa di ognuno dei sei fattori di seguito descritti. L'acronimo è proprio costituito dalle lettere, più avanti indicate in grassetto, caratterizzanti i singoli parametri. L'importanza di ciascun parametro è definita dal peso (che varia da 1 a 4) che gli viene attribuito; ad ognuno di essi corrisponde una scala di valori, compresi tra 2,5 e 10, in modo che a valori più alti corrisponda una più alta vulnerabilità all'intrusione marina.

La vulnerabilità è espressa dall'indice GALDIT, secondo la seguente espressione (Chachadi e Lobo-Ferreira, 2005):

$$\sum_{i=1}^6 \{(W_i)R_i\} / \sum_{i=1}^6 W_i$$

dove  $W_i$  ed  $R_i$  sono rispettivamente i pesi ed i punteggi individuati per ciascun parametro.

#### *Groundwater occurrence (tipologia dell'acquifero)*

Le acque sotterranee di solito costituiscono acquiferi che possono essere confinati o non confinati; stabilire la tipologia di acquifero presente nell'area in studio è molto importante ai fini della valutazione della vulnerabilità all'inquinamento per intrusione marina, in quanto influisce sul grado di estensione dell'intrusione marina. Gli acquiferi confinati, infatti, sono interessati da questo fenomeno in maniera più intensa rispetto a quelli non confinati. L'acquifero sabbioso-ghiaioso-arenaceo d'Acquedolci è di tipo non confinato; così al parametro G è stato assegnato un valore GALDIT di 7,5 (Figura 3).

#### *Aquifer hydraulic conductivity (Conducibilità idraulica dell'acquifero)*

La conducibilità idraulica è la proprietà che descrive la facilità con cui l'acqua, e di conseguenza l'inquinante trasportato dall'acqua, può muoversi all'interno del mezzo considerato; essa dipende strettamente dalla permeabilità intrinseca del materiale e dalla porosità effettiva, differenti nel caso di sedimenti arenacei o sciolti o nel caso di rocce più o meno compatte, quali quelle calcaree, dove assumono rilevanza il grado di fratturazione e l'apertura delle fratture stesse. I dati sulla conducibilità idraulica, presentata dagli acquiferi in corrispondenza dei vari punti d'acqua, sono raramente disponibili: in questa nota sono stati utilizzati in prima approssimazione i valori medi riportati in letteratura per i differenti litotipi (Civita e De Maio, 2000), anche se misure geofisiche eseguite nell'area hanno permesso di circoscrivere aree a maggiore conducibilità idraulica in corrispondenza dei delta torrentizi (Cimino et alii, 2007).

#### *Depth to groundwater Level above the sea (Quota piezometrica della falda)*

Nella stima del fenomeno dell'intrusione marina questo

parametro è molto importante in quanto, come enunciato nel principio di Ghyben-Herzberg, determina la pressione idraulica responsabile dell'avanzamento del fronte dell'acqua marina. La valutazione dei livelli piezometrici della falda ha tenuto conto dei valori effettivamente presenti nella piana di Acquedolci, diversamente da quanto proposto dal metodo

#### *Distance from the shore (Distanza dalla linea di costa)*

Ragionando esclusivamente in termini di distanza dalla linea di costa, ci si aspetta che il fenomeno dell'intrusione marina sia maggiore vicino la costa e diminuisca progressivamente man mano che ci si sposta verso le zone più interne; infatti, secondo il GALDIT si attribuiscono ai pozzi dei valori che diminuiscono all'aumentare della loro distanza dal mare. L'indice GALDIT è attribuito - come per ciascuno dei sei parametri che lo caratterizzano (*rating*) - a ciascun pozzo censito nella piana. Le corrispondenti mappe, come quella di sintesi, riportano la sua distribuzione in tutta l'area grazie al processo di elaborazione in ambiente GIS, che ne definisce il valore in tutti i pixel delle matrici correlate.

#### *Impact of existing status of seawater intrusion in the area (Impatto dell'intrusione marina nell'area)*

Chachadi e Lobo-Ferreira (2001) hanno suggerito che il rapporto:

$$\frac{[Cl^-]}{[HCO_3^-] + [CO_3^{2-}]}$$

dove le concentrazioni degli ioni sono espresse in epm (equivalenti per milione), possa essere usato per quantificare l'intrusione marina in un acquifero prossimo alla linea di costa. Poiché questo rapporto è sempre >100 per l'acqua marina e, generalmente, <1 per l'acqua dolce, in un'area soggetta ad intrusione marina questo rapporto, nelle acque sotterranee, crescerà proporzionalmente all'aumentare dell'acqua marina infiltratasi. Poiché nell'acquifero dell'area studiata la quantità di  $CO_3^{2-}$  è sempre trascurabile rispetto alla quantità di  $HCO_3^-$ , l'equazione precedente viene così semplificata:

$$\frac{[Cl^-]}{[HCO_3^-]}$$

Questo parametro è evidentemente legato alle condizioni di effettiva vulnerazione della falda, caratterizzando quindi il GALDIT quale metodologia di valutazione della vulnerabilità non prettamente intrinseca, ma integrata con lo stato di concreta contaminazione dell'acquifero.

#### *Thickness of the aquifer (Spessore dell'acquifero)*

Lo spessore dell'acquifero è un parametro importante nella valutazione del grado d'intrusione marina nelle aree vicine alla costa; i due parametri risultano in una certa misura in relazione tra loro, per cui il GALDIT correla, pur in maniera assolutamente qualitativa, il rischio d'intrusione marina con lo spessore dell'acquifero (Chachadi e Lobo Ferriera, 2005).



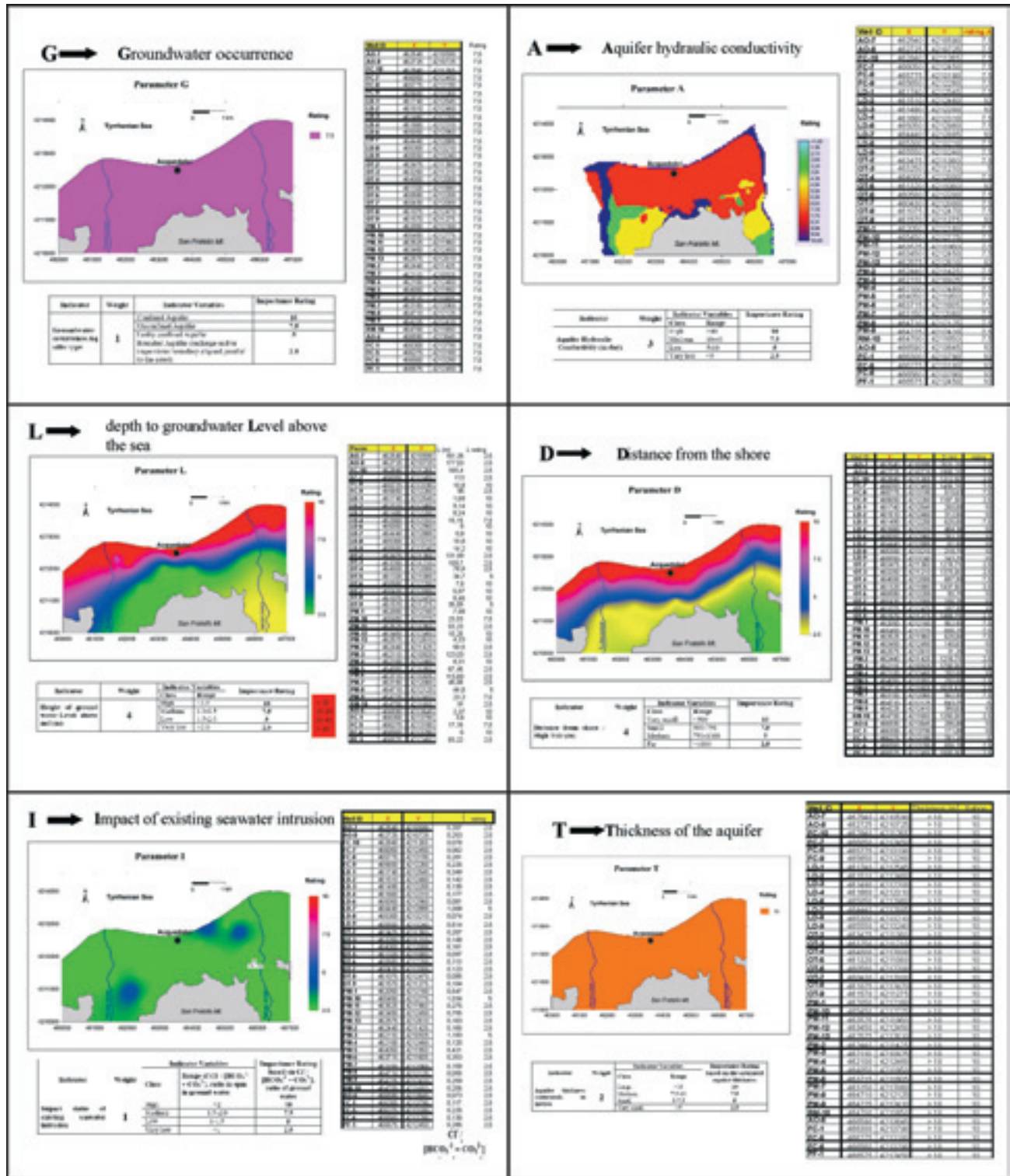


Figura 3. Mappe tematiche dei sei parametri relativi al metodo GALDIT applicato nell'area di Acquadolci; in particolare per il parametro L è stato variato il range dei valori corrispondenti effettivamente presenti nell'area di Acquadolci, questi valori sono riportati in rosso. Tabelle descrittive dei parametri da Chachadi e Lobo Ferriera, 2005.

Figure 3. Thematic maps of GALDIT parameters as evaluated in Acquadolci area. In detail, the L parameter has been changed (in red), following the real values shown in the examined area (Chachadi e Lobo Ferriera, 2005).

Le caratteristiche idrogeochimiche e geometriche discusse in precedenza sono desunte da precedenti contributi scientifici (Cimino *et alii*, 2007), e vengono riassunte in Figura 2, la quale mostra per l'area di Acquedolci l'ubicazione dei punti d'acqua e la relativa concentrazione di cloruri, assieme alle caratteristiche areali di conducibilità elettrica delle RIS. Inoltre, i relativi risultati, ottenuti per i diversi parametri, sono raccolti in Tabella 1, unitamente all'ID dei punti d'acqua ed alle loro coordinate UTM. La Figura 3 mostra la rappresentazione cartografica dei risultati medesimi.

#### **4.2 Applicabilità del metodo GALDIT all'acquifero di Acquedolci**

Il GALDIT, si riassume, è essenzialmente un metodo che esprime la vulnerabilità di un acquifero costiero nei confronti dell'intrusione marina, ed è rappresentato da un set di sei parametri che tengono complessivamente conto delle caratteristiche intrinseche del sistema (per esempio la conducibilità idraulica), geometriche (altezza della piezometrica e distanza dalla linea di costa) e di vulnerazione (condizioni effettive di contaminazione marina). Per questo motivo, la sua valutazione si pone come un'integrazione con esistenti metodologie quali per esempio il SINTACS, il quale può invece considerarsi a tutti gli effetti la rappresentazione di uno scenario *passivo* del territorio.

L'applicazione del GALDIT può, inoltre, considerarsi sufficientemente speditiva per il monitoraggio di aree particolarmente esposte a questo specifico rischio d'inquinamento e di aree molto antropizzate, laddove le RIS vengono considerate d'importanza strategica. Ma proprio per questi stessi motivi, la sua applicabilità può trovare talune difficoltà in dipendenza delle caratteristiche litologiche e idrostrutturali dei territori considerati. L'area costiera di Acquedolci può, a tal proposito, costituire un ulteriore *test-site* del GALDIT, il primo in Sicilia, rispetto ai pochi casi già presenti nel mondo. In tale occasione, il metodo è stato opportunamente modificato - rispetto al sistema proposto ed applicato altrove - limitatamente al parametro **G** (*Quota piezometrica della falda*), come si è potuto notare in Tabella 1. Si è così cercato di tenere in debito conto la locale geometria dell'acquifero.

Con particolare richiamo ad una delle esperienze già condotte, specificatamente nella già citata area indiana di North Goa (Chachadi e Lobo Ferriera, 2005), per l'area costiera di Acquedolci, ampiamente studiata da oltre dieci anni con differenti metodologie (Abbate *et alii*, 1994; Cimino *et alii*, 2007), si è ricorso ad alcune modifiche.

Anzitutto si è applicato un range molto differente con riferimento ai valori del livello della falda freatica realmente presenti ad Acquedolci (parametro L). Infatti, se nella menzionata regione di North Goa le variazioni della superficie piezometrica risultano contenute in alcuni metri, nell'area siciliana le differenze nei livelli freatici si presentano piuttosto notevoli. Questi, da un valore minimo di 0,8 m nei pressi della linea di costa (pozzo LD-

1), raggiungono oltre 170 m s.l.m. nei pozzi della fascia pedemontana sud-occidentale della regione considerata (AO-7 e AO-8), dove peraltro l'acquifero arenaceo si trova in continuità idraulica con quello carbonatico. In considerazione, quindi, della distribuzione e dell'entità locale dei livelli piezometrici, le quattro classi di vulnerabilità sono state equamente ripartite in intervalli di questo parametro che qui corrispondono a <15 m per la classe più bassa ed a >45 m per quella più alta (Figura 3).

Ciò ha consentito l'adeguata zonazione di un parametro che, nell'ambito del sistema, è particolarmente significativo nel contrastare l'intrusione marina, ciò testimoniato dall'attribuzione del peso relativamente più elevato previsto in ambito GALDIT (4). Un'eventuale modifica al protocollo potrebbe consistere nel valutare in dettaglio le variazioni del livello piezometrico in prossimità della costa, proponendo una maggiore differenziazione proprio nei primi 15 metri, dove si nota una sua sostanziale variazione.

Peraltro, uguale peso è assegnato anche al parametro che tiene conto della distanza dei pozzi dalla linea di costa (*parametro D*). Per una sua corretta valutazione, oltre all'attenta demarcazione della linea di alta marea, è strettamente necessario assumere condizioni indisturbate della superficie piezometrica e, soprattutto, stabilire che l'impatto dell'intrusione marina possa decrescere linearmente secondo una direzione che formi un angolo retto con la linea di ripa marina. È proprio quest'ultimo fattore a mostrarsi alquanto variabile in quelle zone dove sono frequentemente presenti eteropie di facies e variazioni granulometriche nell'ambito degli acquiferi costieri. Condizioni, queste, che nelle fasce costiere siciliane costituiscono quasi la norma, presentandosi quasi regolarmente disomogeneità ed anisotropie nell'ambito delle formazioni affioranti e sepolte.

Nell'area di Acquedolci questo aspetto, in una prima applicazione del sistema GALDIT, non è stato al momento stimato, pur in presenza di evidenti disuniformità granulometriche nelle formazioni affioranti. In particolare, scostamenti consistenti rispetto all'ipotizzata linearità - come assegnata in prima istanza a questo parametro - possono verosimilmente osservarsi in corrispondenza degli alvei fluviali e delle zone di recapito di questi (delta torrentizi), laddove le caratteristiche sedimentologiche delle formazioni presenti e sepolte possono risultare alquanto eterogenee, con indici di uniformità granulometrica relativamente elevati ed una cattiva classazione degli elementi mineralogici. È quanto risulta dalle prime campagne geofisiche di dettaglio attualmente in corso, le quali però - pur sopperendo alla carenza di dati stratigrafici - non consentono ancora una zonazione delle aree disomogenee sufficientemente dettagliata per tutta l'area; in questa sede si è quindi preferita una prima valutazione, sia pur approssimata, del *sistema acquifero* come omogeneo, estendendo tale approssimazione alla valutazione dell'indice GALDIT ed



alla correlata cartografia di vulnerabilità.

A tal proposito, le analisi sull'impatto dell'intrusione marina nella piana di Acquedolci hanno confermato questa possibilità, suggerendo un'anisotropia negli acquiferi presenti e la necessaria riconsiderazione del parametro in discorso: questo potrebbe, pertanto, riclassificarsi sulla base della zonazione delle effettive caratteristiche granulometriche e di permeabilità dell'acquifero il quale, nei settori più critici sopra accennati, offre una speciale debolezza ed una maggiore suscettività a lasciarsi attraversare dalle contaminazioni. Qui vengono richiamate le esperienze condotte dagli Autori di questa nota nell'esecuzione ed interpretazione di campagne geochimiche e geofisiche che, simultaneamente applicate, hanno delineato - sia pur in ben delimitati settori prossimi alla linea di costa - differenti comportamenti degli acquiferi (Cimino *et alii*, 2007). In particolare, il settore occidentale di Acquedolci, pertinente in gran parte al segmento terminale del torrente Furiano ed alla sua area deltizia - si offre particolarmente disomogeneo, come appare dalle stratigrafie ivi disponibili (Abbate *et alii*, 1994, anche per il seguito).

L'interpretazione di una serie di sondaggi elettrici verticali, eseguiti trasversalmente al delta e sub-paralleli rispetto alla linea di costa, confermano la distribuzione assolutamente irregolare delle differenti litologie alluvionali presenti, a testimonianza di una deposizione disomogenea, in senso verticale ed orizzontale, delle formazioni più diffuse (ghiaie, sabbie, arenarie, argille), secondo sequenze stratigrafiche alternate anche tipiche degli ambienti deltizi. Queste sequenze sono desunte dalle interpretazioni congiunte delle stratigrafie ed elettrostratigrafie nell'area deltizia.

Altro parametro per il quale l'area di Acquedolci presenta una propria tipicità è quello relativo allo spessore dell'acquifero presente: questo si mostra, ovunque nella piana, maggiore di 10 m, comportando la generale applicazione di un uguale punteggio, secondo il protocollo proposto da Chachadi e Lobo Ferreira (2005). Ma anche in questo caso, potrebbe utilmente proporsi una modifica all'interno delle quattro classi di questo parametro T, allo stesso modo del parametro L sopra discusso, ma questo dovrebbe riconsiderare l'entità del fenomeno dell'intrusione marina. In altre parole, dovrebbero considerarsi spessori dell'acquifero superiori al limite di 10 m - già proposto dal sistema GALDIT - come avviene ad Acquedolci, dove la potenza è certamente più elevata. In tal caso, dovrebbero, però, considerarsi *ratings* diversificati nell'area, con un rischio effettivo di penetrazione di acque contaminanti crescente a partire dalla linea di costa.

Si aggiunge qui che le possibili implementazioni, riferibili sia al parametro GALDIT, sia alla cartografia di vulnerabilità, entrambi in questa sede proposti, potranno godere della migliore conoscenza dell'acquifero di Acquedolci, grazie sia alle menzionate indagini geofisiche

in corso, sia all'aggiornamento delle prospezioni geochimiche integrate, sia alla relativa densità di informazioni stratigrafiche nelle aree più sensibili (delta torrentizi).

Tabella 1. Valori dei sei indici GALDIT calcolati per ognuno dei pozzi esaminati e il loro valore medio (*indice GALDIT*).  
*Table 1. GALDIT indexes calculated for all the inventoried wells together with their mean value.*

ID Pozzo	X	Y	G	A	L	D	I	T	INDICE
AO-7	462540	4210590	7.5	7.5	2.5	6.50	2.5	10	4.83
AO-8	462725	4210725	7.5	7.5	2.5	6.10	2.5	10	4.83
FC-10	462840	4211265	7.5	7.5	2.5	4.20	2.5	10	4.83
FC-7	466050	4212450	7.5	7.5	2.5	4.50	2.5	10	4.83
FC-8	465775	4213190	7.5	7.5	10	1.65	2.5	10	8.17
FC-9	465650	4212260	7.5	7.5	2.5	3.80	2.5	10	4.83
LD-1	461740	4212545	7.5	7.5	10	0.80	2.5	10	8.83
LD-2	461510	4212460	7.5	10	10	1.00	2.5	10	9.33
LD-3	461490	4212200	7.5	10	10	2.00	2.5	10	8.67
LD-4	461660	4212310	7.5	7.5	7.5	1.55	2.5	10	8.17
LD-6	465050	4212960	7.5	7.5	10	0.90	2.5	10	8.83
LD-7	464440	4212885	7.5	10	10	0.20	5	10	9.50
LD-8	465300	4213210	7.5	7.5	10	0.70	2.5	10	8.83
LD-9	465550	4213240	7.5	7.5	10	1.10	2.5	10	8.83
OT-2	463475	4211360	7.5	7.5	2.5	3.90	2.5	10	4.83
OT-3	463250	4211210	7.5	5	2.5	4.40	2.5	10	4.33
OT-4	464000	4212000	7.5	7.5	2.5	2.20	2.5	10	6.17
OT-5	461320	4211080	7.5	10	5	4.60	2.5	10	6.00
OT-6	460580	4212200	7.5	7.5	10	0.30	2.5	10	8.83
OT-7	460430	4212000	7.5	7.5	10	0.50	2.5	10	8.83
OT-8	461075	4212470	7.5	7.5	10	0.60	2.5	10	8.83
OT-9	461570	4211275	7.5	10	5	4.70	2.5	10	6.00
PM-1	462050	4212160	7.5	7.5	10	1.80	2.5	10	8.17
PM-10	465450	4212775	7.5	7.5	7.5	2.10	5	10	7.67
PM-11	463525	4211960	7.5	7.5	2.5	2.00	2.5	10	6.17
PM-12	463450	4212450	7.5	7.5	10	0.45	2.5	10	8.83
PM-13	462575	4212610	7.5	10	10	0.10	2.5	10	9.33
PM-2	462440	4211425	7.5	7.5	2.5	3.90	2.5	10	4.83
PM-3	462110	4210925	7.5	7.5	2.5	5.60	5	10	5.00
PM-4	462100	4212460	7.5	7.5	10	0.80	2.5	10	8.83
PM-5	464050	4211950	7.5	7.5	2.5	2.40	2.5	10	6.17
PM-6	463715	4211605	7.5	7.5	2.5	3.25	2.5	10	4.83
PM-7	463150	4212060	7.5	7.5	2.5	1.80	2.5	10	6.17
PM-8	464710	4212125	7.5	7.5	5	2.70	2.5	10	6.17
PM-9	464225	4212410	7.5	7.5	7.5	1.25	2.5	10	8.17
RM-10	464700	4211650	7.5	7.5	2.5	4.00	2.5	10	4.83
AO-6	466390	4213645	7.5	10	10	0.95	2.5	10	9.33
FC-1	466300	4213790	7.5	10	10	0.55	2.5	10	9.33
FC-5	466275	4213180	7.5	10	7.5	2.50	2.5	10	7.33
FC-6	466560	4213290	7.5	10	10	2.10	2.5	10	8.67
PF-1	466575	4212450	7.5	10	2.5	4.80	2.5	10	5.33
<b>Indice G.A.L.D.I.T.</b>									<b>7.13</b>

#### 4.3 Ulteriori considerazioni sul parametro D del metodo GALDIT

Come detto sopra a proposito della distanza dalla linea di costa, ci si aspetterebbe che il fenomeno dell'intrusione marina sia maggiore in prossimità del mare e diminuisca progressivamente verso le zone più interne; infatti, il GALDIT (*parametro D*) attribuisce ai pozzi dei valori che diminuiscono all'aumentare della loro distanza dal mare (Figura 3). Questo in alcuni casi potrebbe anche essere plausibile; in realtà, però, oltre alla distanza dal mare potrebbero più correttamente prendersi in considerazione anche altri parametri, quali la presenza di linee preferenziali di incanalamento delle acque, differenze nella porosità e nella granulometria dei sedimenti attraversati, etc., i quali - condizionando parimenti l'ingressione marina - possono far sì che acque di pozzi

più lontani dalla costa siano in effetti più inquinate delle acque dei pozzi più vicini al mare. A questo proposito, dati di questo tipo potranno in una successiva fase implementare la cartografia GALDIT in quest'area. Dato che il GALDIT nasce proprio con lo scopo di valutare la vulnerabilità di un'area all'intrusione marina, andrebbe verosimilmente proposta una legge, anche non lineare, che si basi - ad esempio - su caratteristiche fisico-chimiche, come la densità dell'inquinante (l'acqua salata); legge che possa meglio descrivere e valutare il moto e la velocità di diffusione dell'acqua di mare attraverso le rocce e i sedimenti. Pertanto, unitamente alla distanza  $D$ , potrebbe essere introdotto un parametro o un algoritmo che tenga conto anche di aspetti quali ad esempio la velocità di filtrazione dell'acqua di origine marina ed i suoi tempi di percorrenza all'interno delle rocce o dei sedimenti che la separano dalla falda. Questo aspetto assume particolare importanza, soprattutto nei casi di forti disomogeneità granulometriche dalla linea di costa verso l'entroterra, che è proprio quello che si verifica nelle zone nelle zone dei delta fluviali di Acquedolci: in questi, costituiti da materiale eterogeneo ghiaioso e sabbioso, la vulnerabilità è presumibilmente più elevata rispetto alla

zona centrale dell'area di studio, dove la granulometria più fine dei depositi rende più lento e tortuoso il percorso dell'acqua e, quindi, l'intrusione marina.

In effetti, in questo metodo - come già nel SINTACS - quest'aspetto viene parzialmente tenuto in considerazione nel parametro *conducibilità idraulica* ( $C$ ), ovvero la capacità di spostamento attraverso il mezzo saturo dell'acqua di falda e, quindi, anche di un contaminante.

### 5. Conclusioni

I risultati cartografici mostrati in questo lavoro indicano un indice di vulnerabilità GALDIT relativamente elevato per l'area di Acquedolci (Figura 4). I settori più vulnerabili risultano, com'era lecito attendersi, in prossimità della linea di costa ed, in particolare, in corrispondenza del settore terminale degli alvei torrentizi. Il sistema adoperato non presenta larghi margini d'incertezza nella sua rigorosa applicazione, anche se sovente le valutazioni della vulnerabilità risentono inevitabilmente di una certa soggettività nella selezione e nella stessa elaborazione dei vari elementi.

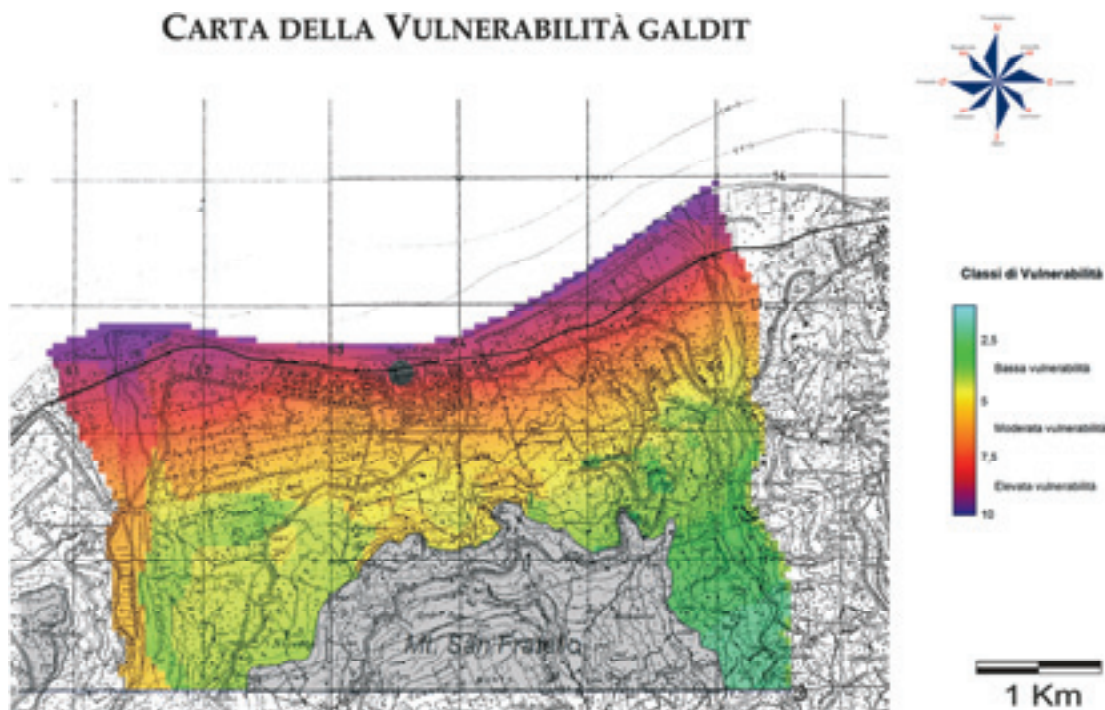


Figura 4. Rappresentazione grafica della vulnerabilità GALDIT all'intrusione marina nell'area studiata.  
 Figure 4. GALDIT map of vulnerability to seawater intrusion.

La zonazione in settori più o meno soggetti a rischio d'inquinamento per intrusione marina deve comunque osservare i principi generali di cautela, specie in considerazione della non uniformità granulometrica in vaste porzioni del territorio, consigliando - in attesa di un'implementazione del sistema nell'area considerata -

una sua verifica sulla base della dettagliata conoscenza dei litotipi ivi presenti. A ciò possono concorrere informazioni geofisiche e stratigrafiche di dettaglio, coadiuvate da analisi periodiche dei costituenti chimici delle acque di falda. Questo può consentire lo studio del comportamento dinamico della falda, in particolare



intorno al suo sfruttamento ed alle condizioni di ricarica attraverso le formazioni carbonatiche limitrofe: fenomeni, questi, mutevoli nel corso dell'anno e nei diversi settori della piana e, certamente, condizionanti la geometria dei conoidi di depressione nei vari pozzi e l'abbassamento locale del livello della falda.

In ultimo, vengono proposte limitate modifiche al

GALDIT, tenendo conto delle peculiarità locali e dei range osservati, nel territorio esaminato, nei valori dei parametri selezionati, operando quindi una verifica della sua validazione mediante il confronto con cartografie di vulnerabilità, acquisite nella stessa area con differenti metodi e con differenti metodi e tecniche di elaborazione.

## Bibliografia

- Abbate, R., Cimino, A., Emma, S., Martorana Tusa, A., Orecchio, S., 1994. *Lineamenti geomorfologici e idrogeologici dell'acquifero carbonatico del territorio di Acquadolci, Messina*. Boll. Acc. Gioenia Sci. Nat., 27, 579-597.
- Abbate, R., Cappadona Ignazzitto, S., Cimino, A. Di Patti, C. & Orecchio, S., 2003. *Indagini integrate per la valorizzazione delle risorse ambientali nell'area carbonatica di Monte San Fratello (Zona b del Parco dei Nebrodi)*. Thalassia Salentina, 26 Suppl., 65-76.
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H. and Petty, R.J., 1987. *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. U.S. EPA Report 600/2-85/018.
- Barrocu, G., Muzzu, M., Staffa, F., Testa, M., Uras G., 2006. *The GALDIT method to map the vulnerability to seawater intrusion in the Arborea coastal aquifer (central-western Sardinia)*. First International Joint Salt Water Intrusion Conference, Cagliari, Italy, September 24-29, 2006, Abstracts vol., 45-46.
- Canter, L.W., Knox, R.C., Fairchild, D., 1987. *Groundwater Quality Protection*, Lewis Publishers, Inc., Chelsea, Michigan, 562 pp.
- Chachadi, A.G., Lobo Ferreira, J. P., 2001. *Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using the GALDIT method*. COASTIN, a coastal policy research newsletter, 4, 7-9.
- Chachadi, A.G., Lobo Ferreira, J. P., Noronha, L., Choudri, B.S., 2003. *Assessing the impact of sea-level rise on salt water intrusion in coastal aquifers using GALDIT model*. APRH/CEAS, Seminário Sobre Águas Subterrâneas, Lisbon, Portugal, February, 2003, 13 pp.
- Chachadi, A.G., Lobo Ferreira, J. P., Diamantino, C., Henriques, M. J., 2005. *Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT method: Part 1 – Application to the Portuguese Aquifer of Monte Gordo, Guimarães, Portugal*. Proceed. of "The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources July 11-14, 2005, 12 pp.
- Chachadi A.G., Lobo Ferreira J. P., 2005. *Assessing aquifer vulnerability to sea-water intrusion using GALDIT method: Part 2 - GALDIT Indicators Description*. Proceed. of "The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources", Guimarães, Portugal, July 11-14, 2005, 12 pp.
- Cimino, A., Abbate, R., Macaluso, M., Orecchio, S., 1997. *Karst hydrogeology and vulnerability in a coastal sector of Nebrodi Mts. region (Northern Sicily)*. Sci. Tech. Envir., Mém. H. S., 12, 205-208.
- Cimino, A., Abbate, R., Cappadona Ignazzitto, S., Orecchio, S., Sambataro, S., 2002. *Protection and monitoring of water resources in North-West Sicily (with particular regard to the S. Fratello-Acquadolci karst area)*. Speleologia Iblea, 10, 107-115.
- Cimino, A., Cosentino, C., Oieni, A., Tranchina, L., 2008. *A geophysical and geochemical approach for sea water intrusion assessment in the Acquadolci coastal aquifer (Northern Sicily)*. Environmental Geology 55, 1473-1482.
- Civita, M., 1987. *La previsione e la prevenzione del rischio d'inquinamento delle acque sotterranee a livello regionale mediante le carte di vulnerabilità*. Atti del Convegno "Inquinamento delle Acque sotterranee Previsione e Prevenzione", Mantova, Prov. MN, Ass. Amb. e Ecol., 9-17.
- Civita, M., 1994. *Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: Teoria e pratica*. Pitagora Editrice, Bologna, 325 pp.
- Civita, M., De Maio, M., 2000. *Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5*. Pitagora Editrice, Bologna, 226 pp.
- Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., Neale, S., Popescu, C., Zwhalen, F., 2002. *Main concepts of the "European Approach" for karst groundwater vulnerability assessment and mapping*. Hydrogeology Journal, 10 (2), 340-345.
- Demirel, Z., 2004. *The history and evaluation of saltwater intrusion into a coastal aquifer in Mersin, Turkey*. J. Environ. Management, 70, 275-282.
- Di Sipio, E., Galgaro, A., Zuppi, G.M., 2006. *Salt water contamination on Venice lagoon mainland: new evaluation of origin, extension and dynamics*. Proceedings of 1st SWIM-SWICA (19th Salt Water Intrusion Meeting-3rd Salt Water Intrusion in Coastal Aquifers), Cagliari.
- Foster, S.S.D., 1987. *Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy*, in W. van Duijvanbooden and H.G. van Waegeningh (eds.), Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution, Proceedings and Information No. 38 of the International Conference held in the Netherlands, in 1987, TNO Committee on Hydrological Research, Delft, The Netherlands.
- Liu, C.W., Cheng, L.H., 1997. *Hydrogeological investigation of a groundwater contamination site in southern Taiwan*. Environmental Geology, 29, 238-245.
- Melloul, A.J., Goldenberg, L.C., 1997. *Monitoring of seawater intrusion in coastal aquifers: basic and local concerns*. J. Environ. Management, 51, 73-86.
- Novo, M.E., Lobo Ferreira, J.P., 2007. *Alterações Climáticas e seus Impactos em Recursos Hídricos Subterrâneos de Zonas Insulares - Metodologias de vulnerabilidade às Alterações Climáticas*. IV Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos países de Expressão Portuguesa, Funchal, 17-19 Outubro 2007, Madeira, Portugal, 9 pp.
- Polemio, M., Dragone, V., Limoni, P.P., 2006. *Salt Contamination In Apulian Aquifer: Spatial And Time Trend*. Proceedings of 1st SWIM-SWICA (19th Salt Water Intrusion Meeting-3rd Salt Water Intrusion in Coastal Aquifers), Cagliari.
- Pulido-Leboeuf, P., 2004. *Seawater intrusion and associated processes in a small coastal complex aquifer (Castell de Ferro, Spain)*. Applied Geochemistry, 19, 1517-1527.
- Sodde, M., Barrocu, G., 2006. *Seawater intrusion and arsenic contamination in the alluvial plain of the Rivers Quirra and Flumini Pisale, south-eastern Sardinia*. Proceedings of 1st SWIM-SWICA (19th Salt Water Intrusion Meeting-3rd Salt Water Intrusion in Coastal Aquifers), Cagliari.
- Vías, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I., Jiménez, P., 2006. *Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Application in two pilot sites in Southern Spain*. Hydrogeology Journal, 14 (6), 912-925.
- Yechieli, Y., Kafri, U., Sivan, O., 2006. *The interrelation between the sea and the coastal aquifer, deduced from analyses of radioactive isotopes*. Proceedings of 1st SWIM-SWICA (19th Salt Water Intrusion Meeting - 3rd Salt Water Intrusion in Coastal Aquifers), Cagliari.

## Modello di flusso della falda per lo studio di impatto ambientale di un campo pozzi nella Provincia di Milano

Umberto Puppini<sup>1</sup>, Maurizio Gorla<sup>2</sup>, Michele Remonti<sup>1</sup>, Alberto Rainero<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ESI Italia srl, Milano, [umbertopuppini@esinternational.it](mailto:umbertopuppini@esinternational.it), [michelerefonti@esinternational.it](mailto:michelerefonti@esinternational.it), [albertorainero@esinternational.it](mailto:albertorainero@esinternational.it)

<sup>2</sup>CAP Gestione Spa, [maurizio.gorla@capgestione.it](mailto:maurizio.gorla@capgestione.it)

*Large scale groundwater model for the environmental impact study of a wellfield near Milan, Italy*

**ABSTRACT:** CAP Gestione is a large public utility based in Milan which supplies drinking water serving more than 2 millions of people. CAP planned and built a new wellfield in Pozzuolo Martesana, 20 km east of Milan, drilling 8 wells screened in the hydrogeological unit named 'Traditional Aquifer', between ground level and 80-100 m b.g.l., and 7 wells affecting the 'Deep Aquifer', with the base deeper than 250 m b.g.l. The average instant predicted flow rate is 260 l/s and the annual water demand is 8,2 Mm<sup>3</sup>/year. According to the Italian legislation, if annual water demand exceeds 3 Mm<sup>3</sup>/year, an Environmental Impact Study must be carried out together with the permit application presented to public authorities. Therefore impacts on groundwater and springs, well protection areas and water exchange between Traditional and Deep aquifers were defined with a quasi-3D numerical groundwater flow model with MODFLOW in Groundwater Vistas v. 4.0.

**Key terms:** Water wellfield, Fontanili springs, Groundwater model, Environmental Impact Study, Evaluation of mitigatory measures

**Termini chiave:** Campo pozzi, Fontanili, Modello di flusso della falda, Studio Impatto Ambientale (SIA), Quantificazione misure mitigative

### Riassunto

CAP Gestione S.p.A. (Consorzio Acqua Potabile) fornisce acqua potabile a 122 comuni della Provincia di Milano, 58 della Provincia di Lodi e 20 della Provincia di Pavia, coprendo il fabbisogno di 2 milioni di persone, e si occupa della depurazione delle acque reflue della zona est di Milano.

CAP ha progettato ed eseguito un campo pozzi per acqua destinata al consumo umano nel Comune di Pozzuolo Martesana (MI), circa 20 km a Est di Milano, costituito da 8 pozzi che interessano il cosiddetto Acquifero Tradizionale fino a circa 80-100 m di profondità e da altri 7 pozzi che interessano l'unità idrogeologica nota come Acquifero Profondo, la cui base si trova ad oltre 250 m di profondità (Martinis e Mazzarella, 1971). La portata istantanea media che si prevede di estrarre è pari a 260 l/s (circa 8,2 milioni di m<sup>3</sup>/anno).

Secondo la normativa vigente, per le captazioni che derivano quantità d'acqua superiori a 3 milioni di m<sup>3</sup>/anno è necessario preparare e ottenere una concessione per grande derivazione corredata da uno studio d'impatto ambientale (SIA) per la procedura di valutazione d'impatto ambientale (VIA). CAP ha chiesto ad ESI Italia di elaborare tale documento e di assisterla nell'ottenimento del permesso. A tale scopo si è deciso di quantificare gli impatti sulla falda (e sui fontanili) e di

dimensionare le fasce di rispetto dei pozzi con un modello numerico di flusso quasi-3D (*MODFLOW* in *Groundwater Vistas* v. 4.0) che simula il flusso di entrambe le falde ed i rapporti di scambio tra i due acquiferi interessati.

### Introduzione

Il campo pozzi ubicato nel Comune di Pozzuolo Martesana contiene otto pozzi che interessano l'Acquifero Tradizionale e sette che interessano l'Acquifero Profondo (Martinis e Mazzarella, 1971).

L'Acquifero Tradizionale (Figura 1) è prevalentemente costituito da depositi di ambiente continentale, di origine fluvio-glaciale e glaciale, costituiti da ghiaie e sabbie (Martinis e Mazzarella, 1971, Cavallin *et alii*, 1994c), interrotti da strati di argilla e limo di colore bruno, rosso e giallo, il cui spessore cresce procedendo verso Sud.

Localmente, a Sud del Naviglio Martesana, gli strati a componente litologica fine diventano sub-affioranti, determinando una riduzione della trasmissività dell'acquifero e lo sfioro di parte dell'acqua della falda tradizionale attraverso il sistema dei fontanili nel settore della cosiddetta Media Pianura (CAP Milano, 2001).

L'Acquifero Profondo è costituito da depositi di ambiente transizionale, formati da una serie di livelli permeabili tra loro connessi idraulicamente e alternati a

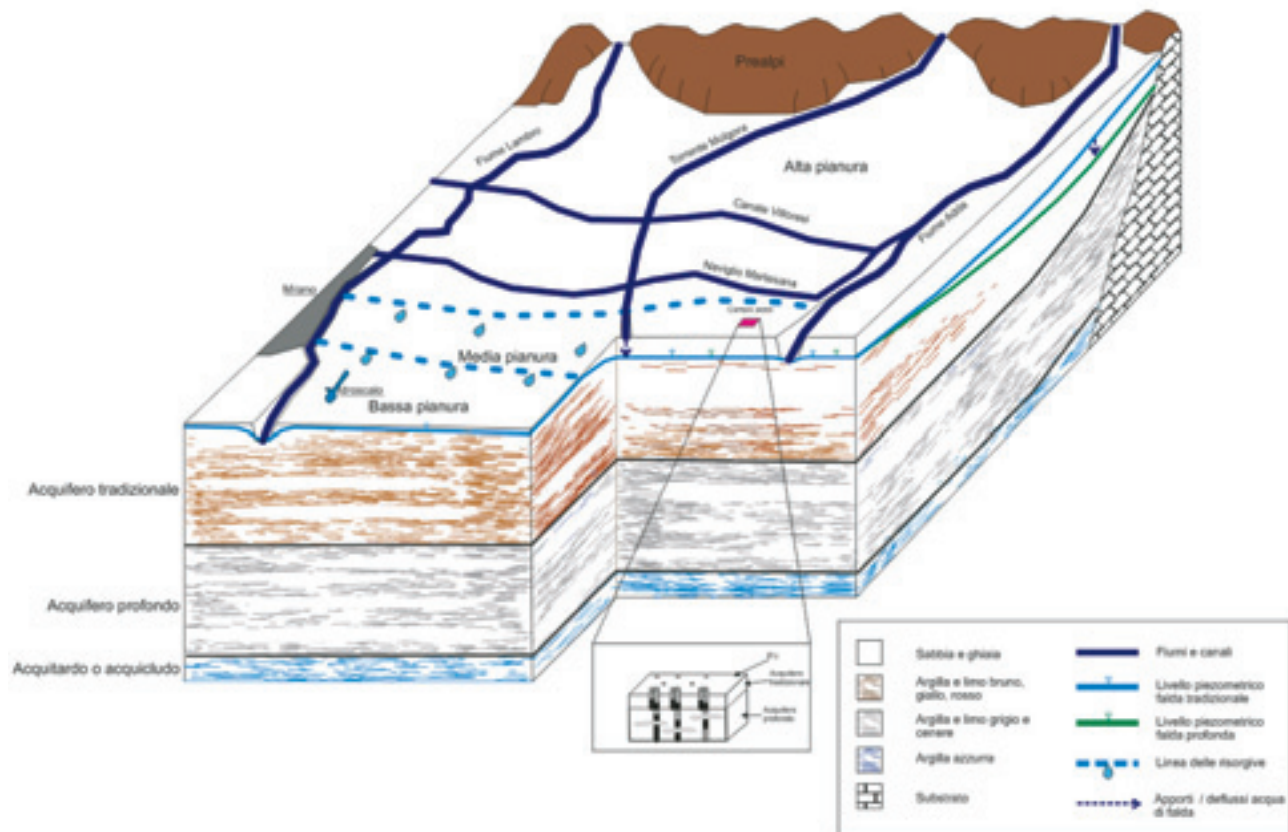


Figura 1. Modello concettuale.  
Figure 1. Conceptual model.

orizzonti di argille e limi di colore grigio e cenere (Avanzini *et alii*, 1995).

Esso è delimitato inferiormente da potenti strati di argille azzurre di ambiente deposizionale marino riferibili al Calabriano, definiti come Unità Argillosa (Avanzini *et alii*, 1995). Nell'Alta Pianura la falda contenuta nell'Acquifero Tradizionale ha un carico idraulico superiore a quello della falda contenuta nell'Acquifero Profondo, che viene dunque alimentato attraverso l'acquifero sovrastante. La differenza piezometrica tra la prima e la seconda falda si attenua procedendo verso Sud fino ad annullarsi nella Bassa Pianura, a valle della zona delle risorgive. Il fabbisogno idrico da coprire con l'acqua estratta dal campo pozzi è di 260 l/s, di cui il 60% da prelevare dalla falda superficiale e il restante 40% dalla falda profonda. Queste ripartizioni sono dettate da esigenze di progetto della società di gestione, basate essenzialmente sulla valutazione della corretta distribuzione dei carichi idraulici fra falde sovrapposte, tale da evitare il passaggio di eventuali contaminanti dalla falda superiore verso quelle sottostanti.

Secondo la normativa vigente (DPR 12 aprile 1996, L.R. 3 settembre 1999 n. 20 e D.G.R. 6/47582 del 29.12.1999) per le captazioni che derivano quantità d'acqua superiori a 3 milioni di m<sup>3</sup>/anno è necessario

preparare una domanda di grande derivazione corredata di: a) relazione tecnica che consideri le caratteristiche idrogeologiche del sito e del contesto; b) verifica delle interpretazioni di prove di pompaggio già eseguite e delle fasce di rispetto definite; c) studio d'impatto ambientale (SIA) della derivazione prevista da presentare all'Ente responsabile della concessione di derivazione e della valutazione d'impatto ambientale (VIA), nella fattispecie la Regione Lombardia. Per la realizzazione del SIA è necessario l'uso di uno strumento di modellazione, finalizzato a quantificare gli impatti sulla falda e a dimensionare le fasce di rispetto dei pozzi.

### Modello di flusso

Dato che i pozzi interessano sia l'Acquifero Tradizionale che quello profondo, è stato necessario realizzare un modello di flusso che rappresentasse entrambi gli acquiferi e i loro reciproci rapporti. Il modello è stato realizzato con *MODFLOW*, uno dei codici di calcolo alle differenze finite più diffusi al mondo per la simulazione di flusso della falda, attraverso il *software Groundwater Vistas 4* (McDonald, 1988).

Il modello copre un territorio ampio circa 1.400 Km<sup>2</sup> delimitato a Ovest dal Fiume Lambro, a Est dal Fiume



Adda, a Nord dalle Prealpi, che si estende a Sud fino al Comune di Zelo Buon Persico in Provincia di Lodi. Si tratta di un modello quasi-3D a doppio strato con celle quadrate di lato 300 m che, nel primo strato, consente di simulare il flusso della falda tradizionale e, nel secondo strato, il flusso della falda profonda. Il modello è stato impostato per simulare il regime di flusso stazionario ed è stato calibrato nella condizione di Giugno 2005, rappresentativa di una condizione di relativa magra delle falde. Ciò si è reso necessario in via cautelativa per simulare l'impatto del campo pozzi nelle condizioni con minore disponibilità idrica durante il corso dell'anno.

Il limite settentrionale del modello è caratterizzato da una linea di pozzi di alimentazione costituita da celle di tipo *Well*, che rappresenta il contributo idrico derivante del ruscellamento superficiale che perviene all'Alta Pianura dagli affioramenti prealpini. La portata d'acqua calcolata in immissione per ogni cella è pari a 1.730 m<sup>3</sup>/giorno per il primo strato e a 192 m<sup>3</sup>/giorno per il secondo. Il limite occidentale del modello è il Fiume Lambro, rappresentato con celle di tipo *River*. Le caratteristiche geometriche del corso d'acqua sono state tratte dalla Carta Tecnica Regionale in scala 1:10.000 (CTR) e dalle sezioni idrogeologiche di uno studio di letteratura (Provincia di Milano, 1995).

Il limite orientale è costituito dal Fiume Adda rappresentato anch'esso con celle di tipo *River*. I dati inseriti sono stati ottenuti in modo analogo a quanto fatto per il Fiume Lambro, utilizzando anche il profilo di fondo del fiume elaborato per un precedente studio eseguito per CAP Gestione (ESI Ltd per CAP Milano, 2002). Come condizioni al contorno interne al modello sono stati introdotti il Torrente Molgora e i fontanili. Il Torrente Molgora è stato definito con celle di tipo *River*, mentre i fontanili della Media Pianura sono stati simulati con celle di tipo *Drain*, che determinano un'uscita d'acqua dall'acquifero quando la quota piezometrica è superiore alla quota di drenaggio.

Relativamente ai valori di conducibilità idraulica, sono state definite quattro zone di conducibilità idraulica nell'Acquifero Tradizionale e tre nell'Acquifero Profondo, sulla base dei valori ottenuti da prove di pompaggio eseguite presso il campo pozzi, dell'analisi delle stratigrafie dei pozzi CAP Gestione e di alcuni lavori di letteratura (Avanzini *et alii*, 1995; Provincia di Milano, 1995). Sia nell'Acquifero Tradizionale che in quello profondo la conducibilità inserita nel modello diminuisce da Nord a Sud a causa dell'aumento della componente fine.

Un lavoro di letteratura (Avanzini *et alii*, 1985) associa all'Acquifero Tradizionale una Unità Ghiaioso-sabbiosa ed una Unità Sabbioso-ghiaiosa attribuendo loro, nella zona di Alta Pianura in sinistra Lambro, una trasmissività compresa tra 5x10<sup>-3</sup> e 8x10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s cui, per spessori saturi assottigliati a 1,5-8 m, corrispondono conducibilità idrauliche comprese tra un minimo di

3,3x10<sup>-3</sup> e un massimo 1x10<sup>-3</sup> m/s, pari rispettivamente a 259,2 e 86,4 m/g. Nella Media-Bassa Pianura, sempre nell'Unità Ghiaioso-sabbiosa lo stesso studio riporta una trasmissività di 8x10<sup>-3</sup> - 1x10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>/s, cui, per spessori saturi compresi tra 40 e 80 m, corrisponde una conducibilità idraulica compresa tra circa 8 e circa 17 m/g. L'interpretazione di prove di pompaggio eseguite presso il campo pozzi nell'Acquifero Tradizionale hanno fornito un valore medio di conducibilità di 1,9x10<sup>-4</sup> m/s pari a 16,4 m/g per una prova pozzo-piezometri a portata costante ed un valore comparabile di conducibilità media di 2,9x10<sup>-4</sup> m/s pari a 25,0 m/g per le prove eseguite a portata variabile. Per quanto riguarda l'Acquifero Profondo, per l'area corrispondente al settore settentrionale del territorio modellato, la letteratura (Provincia di Milano, 1995; Regione Lombardia, 2001) indica una conducibilità idraulica media di 3,71x 10<sup>-4</sup> m/s, pari a 32 m/g. L'interpretazione delle prove di pompaggio a gradini eseguite presso i pozzi profondi ha fornito un valore medio di conducibilità idraulica di 1,2x10<sup>-4</sup> m/s pari a 10,3 m/g.

Le conducibilità che sono state inserite nel modello calibrato (Figura 2) sono del tutto simili a quelle riportate in letteratura o a quelle derivanti dall'interpretazione di prove di pompaggio eseguite presso il campo pozzi di Pozzuolo.

La ricarica areale, vale a dire la quantità d'acqua che raggiunge la superficie piezometrica della falda tradizionale, corrisponde all'infiltrazione efficace ed è stata calcolata mediante un semplice bilancio idrico:

$$I_e = (P + Irr - ET_r) \times CIP$$

dove:

$I_e$  = infiltrazione efficace (m/g);

$P$  = afflusso dovuto alle precipitazioni (m/g);

$Irr$  = afflusso dovuto a irrigazione (m/g);

$ET_r$  = evapotraspirazione reale (m/g);

$CIP$  = coefficiente d'infiltrazione potenziale (adim.), pari alla frazione dell'afflusso idrico totale al netto dell'evapotraspirazione reale che raggiunge la superficie freatica.

Sono state definite 5 zone di ricarica areale (Gorla, 2004), a cui inizialmente è stato attribuito il valore iniziale di infiltrazione efficace calcolato col bilancio idrico (Figura 3). Per i depositi morenici è stato utilizzato un CIP di 0,4, per gli affioramenti di fluvioglaciale Mindel e Riss, caratterizzati dalla presenza di spesse coltri superficiali di alterazione argillosa, il CIP è stato posto a 0,3, valore inferiore a quello utilizzato per il fluvioglaciale Wurm nell'Alta Pianura (0,7), ove la coltre pedogenizzata è nettamente meno fine e più permeabile. Per il settore meridionale dell'Alta Pianura è stato scelto un CIP leggermente inferiore a quello del settore settentrionale e pari a 0,6 (Tabella 1). Per la Media e Bassa Pianura, laddove subaffiorano argille e limi che determinano una parziale protezione dell'acquifero, è

stato imposto un CIP di 0,4.

L'ubicazione e le dimensioni dei 58 fontanili compresi nel modello sono state tratte dal data-base del PTUA (Piano di Tutela ed Uso delle Acque) della Regione Lombardia (Regione Lombardia, 2004), che contiene anche un'indicazione semi-quantitativa della portata media di ciascun fontanile, espressa in tre classi: bassa

(portata compresa tra 0 e 50 l/s), media (portata compresa tra 50 e 100 l/s) e alta (portata superiore a 100 l/s). La portata totale drenata è stata calcolata attribuendo ai fontanili con portata bassa il valore di 25 l/s, a quelli con portata media il valore di 75 l/s e a quelli con portata alta il valore di 100 l/s. Il valore ottenuto è di 3.558 l/s, con una media di 61,3 l/s, che appare del tutto realistica.

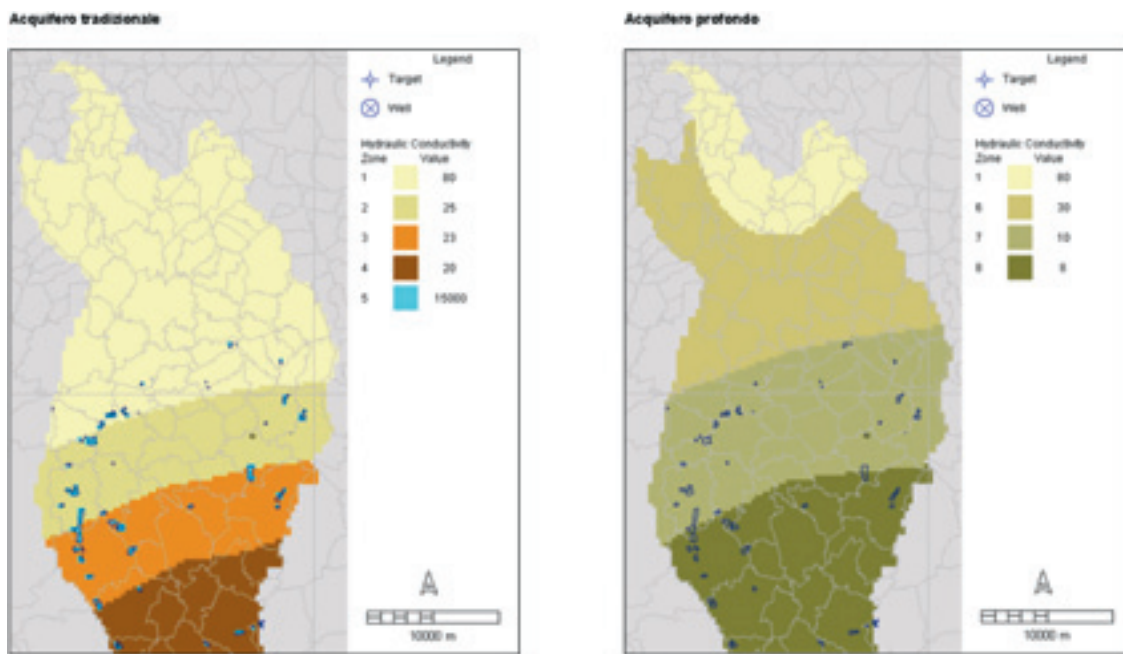


Figura 2. Valori di conducibilità (m/g).  
Figure 2. Hydraulic conductivity (m/d) values.

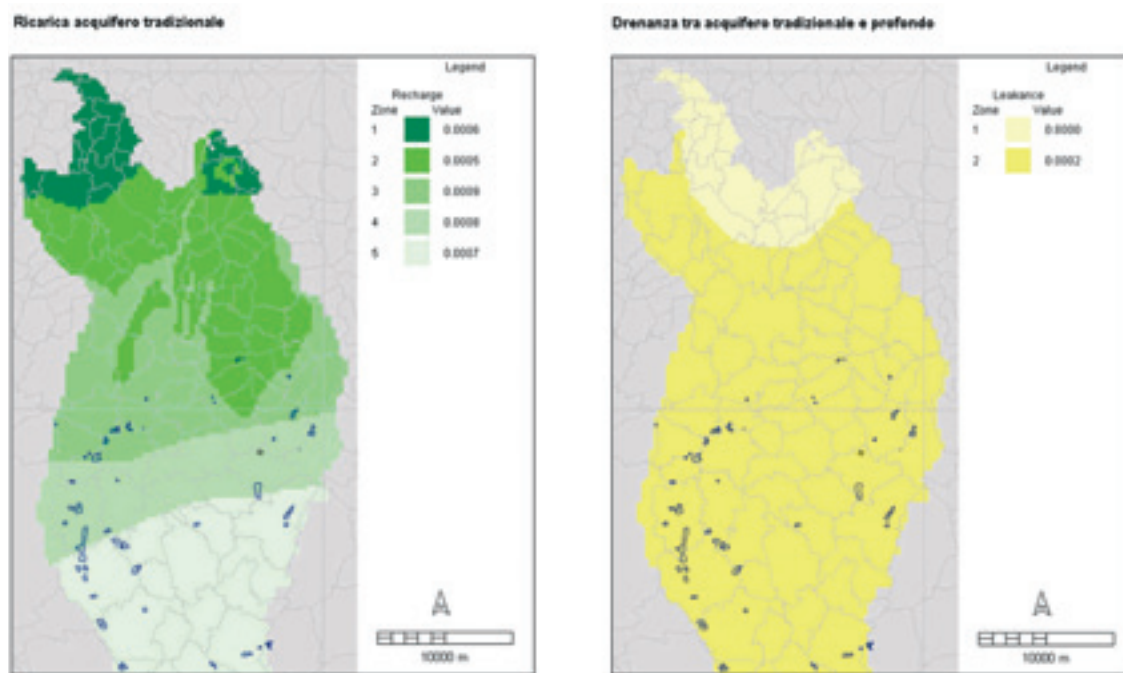


Figura 3. Ricarica areale e drenanza dell'Acquifero tradizionale e dell'Acquifero profondo (m/g).  
Figure 3. Recharge and leakage in Traditional and Deep Aquifer Units (m/d).

Tabella 1. Valori di infiltrazione efficace (m/g).  
 Table 1. *Effective infiltration values (m/d).*

Zona	Litologia	Settore del modello	CIP	Infiltrazione efficace (m/giorno)
1	Depositi glaciali Wurm/Riss/Mindel	Colline moreniche	0,4	0,0006
2	Fluvioglaciale Mindel e Riss	Alta Pianura	0,3	0,00045
3	Fluvioglaciale Wurm	Alta Pianura	0,7	0,001
4	Fluvioglaciale Wurm	Alta Pianura meridionale	0,6	0,0009
5	Fluvioglaciale Wurm	Media e Bassa Pianura	0,4	0,0006

Considerato che il modello è quasi-3D, l'orizzonte di separazione tra il primo e il secondo strato non è stato rappresentato come strato a sé stante ma impostando il valore del coefficiente di drenanza tra l'Acquifero Tradizionale e quello profondo con la proprietà *leakance* (Figura 3).

Non disponendo di misure dirette di porosità efficace è stato usato il valore di 0,25, rappresentativo di una ghiaia sabbiosa (Beretta, 1992). La scelta della porosità efficace non incide sulla forma del reticolo di flusso simulato, ma solo sulla velocità di flusso della falda, importante ai fini del calcolo delle zone di rispetto dei pozzi.

Per quel che concerne le misure di livello piezometrico, CAP Gestione ha messo a disposizione le serie storiche del livello piezometrico misurato presso circa 50 pozzi con filtri nell'Acquifero Tradizionale e 25 con filtri nell'Acquifero Profondo interni all'area del modello nel periodo 1980 - 2005. Sono stati scelti tre pozzi in falda superficiale e tre in falda profonda, rispettivamente nella zona settentrionale, centrale e meridionale dell'area del modello, e sono stati eseguiti i grafici con l'andamento del livello piezometrico nel tempo, sovrapponendoli alla curva delle precipitazioni

medie mensili misurate a Monza. Per la falda superficiale sono stati utilizzati i dati del pozzo 41 di Vimercate, del pozzo 2 di Gorgonzola e del pozzo 1 di Mulazzano, ottenendo grafici dell'andamento del livello piezometrico molto diversi fra loro (Figura 4).

In falda profonda sono stati scelti il pozzo 1 di Roncello, il pozzo 6 di Pioltello ed il pozzo 1 di Mediglia. I livelli nei tre pozzi profondi hanno andamento abbastanza simile a quello nei pozzi in prima falda, anche se sono più regolari e con escursioni inferiori, perché gli effetti della ricarica dovuta alle precipitazioni ed all'alimentazione dai corsi d'acqua superficiali sono meno evidenti di quelli che interessano la falda tradizionale. Inoltre le falde contenute nell'Unità Sabbioso-argillosa (Avanzini *et alii*, 1995) non sembrano del tutto isolate da quelle contenute nell'Acquifero Tradizionale (Unità Ghiaioso-sabbiosa, Unità Sabbioso-ghiaiosa), probabilmente anche a causa della drenanza attraverso gli acquitardi e dell'effetto di connessione idraulica esercitato dai numerosi pozzi profondi presenti. Queste premesse sono servite per individuare due periodi rappresentativi della condizione di magra (Giugno 2005) e di morbida (Settembre 2005) delle falde ed a realizzare le piezometrie di riferimento (Figura 5).

Per la calibrazione del modello sono stati utilizzati i valori di altezza piezometrica misurati a Giugno 2005 presso i punti di misura della rete CAP sia nell'Acquifero Tradizionale che in quello profondo, gli stessi utilizzati per realizzare le piezometrie di riferimento.

I valori misurati sono stati confrontati con quelli simulati e sono stati calcolati alcuni parametri statistici che hanno indicato l'aderenza dei risultati del modello alla realtà. Tra i valori piezometrici inseriti, 44 su 45 rispettano l'obiettivo di calibrazione generalmente accettato, vale a dire il raggiungimento di scarti inferiori al 10 % della differenza tra quote piezometriche massime e minime calcolate, pari a 118 m s.l.m..

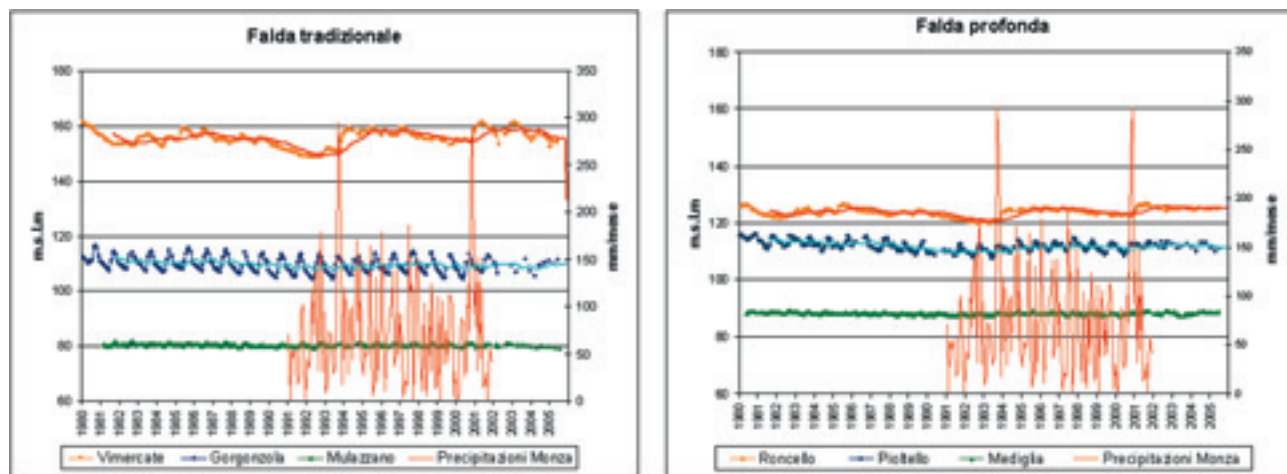


Figura 4. Livelli piezometrici nella falda tradizionale (sinistra) e profonda (destra).  
 Figure 4. *Groundwater levels in Traditional (left) and Deep (right) Aquifer Units.*



Nel grafico, i punti tra quote piezometriche misurate e simulate sono allineati sulla retta con inclinazione a 45°, che rappresenta la condizione di calibrazione ottimale (Figura 6). In particolare, i punti con altezza piezometrica di circa 120 m s.l.m., caratteristica dell'area del campo pozzi in condizioni statiche, sono collocati in un settore del grafico caratterizzato da piccoli scostamenti dalla retta e inclinazione molto prossima ai 45° teorici.

Le piezometrie della falda tradizionale e di quella profonda simulate col modello calibrato (Figura 7) sono nel loro complesso molto simili a quelle misurate a Giugno 2005 (Figura 5). Appaiono adeguatamente rappresentati il drenaggio esercitato dai Fiumi Lambro e Adda nel loro tratto di monte, le principali direzioni di deflusso delle falde e il gradiente idraulico nei vari settori dell'area del modello.

### Simulazione di flusso della falda alla scala locale

Una volta calibrato, dal modello generale è stato estratto un modello di dettaglio ampio 4,2 x 6,6 km dell'area circostante il Comune di Pozzuolo eseguendo un Telescopic Mesh Refinement (TMR). Poiché il TMR è

composto da celle ampie 21 x 22 m, questo maggior dettaglio rispetto al modello generale ha consentito di riprodurre con migliore precisione la disposizione dei pozzi e la forma dei corsi d'acqua, dei fontanili e dei laghi di cava e di ottenere simulazioni d'abbassamento piezometrico presso il campo pozzi più attendibili.

I risultati della simulazione alla scala locale hanno permesso di calcolare il bilancio idrico per il territorio comunale di Pozzuolo Martesana. Com'è noto la maggior parte del flusso di falda nel sottosuolo del Comune di Pozzuolo Martesana proviene dal suo confine settentrionale (Tabella 2). Gli scambi tra Acquifero Tradizionale e Acquifero Profondo avvengono in larga parte dal primo verso il secondo, a causa delle differenze piezometriche tra le due falde in essi contenute. Il modello generale non riporta corsi d'acqua nel territorio comunale, per cui gli scambi relativi sono nulli. In condizioni che precedono l'attivazione del nuovo campo pozzi, la portata totale prelevata dai pozzi rappresenta circa il 10 % della portata totale d'acqua di falda che transita giornalmente entro i confini comunali.

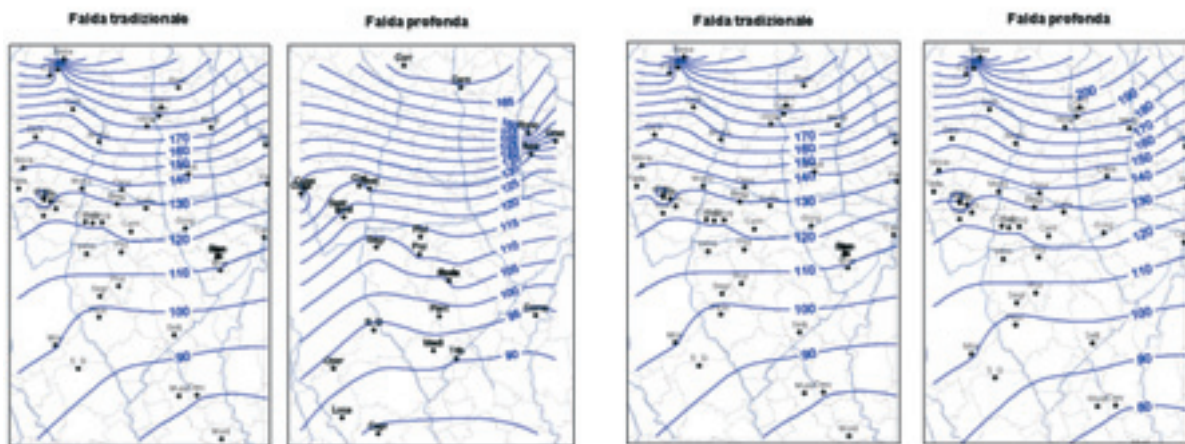


Figura 5. Piezometrie falda tradizionale e falda profonda Giugno (sinistra) e Settembre (destra), 2005.  
 Figure 5. Groundwater head countours in Traditional and Deep Aquifer Units, June (left) and September (right) 2005.

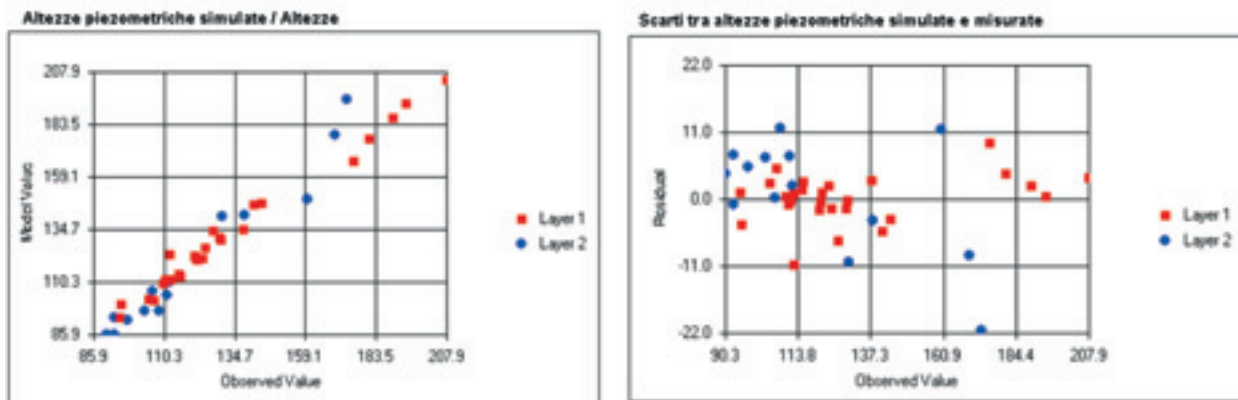


Figura 6. Grafici di calibrazione.  
 Figure 6. Calibration graphs.

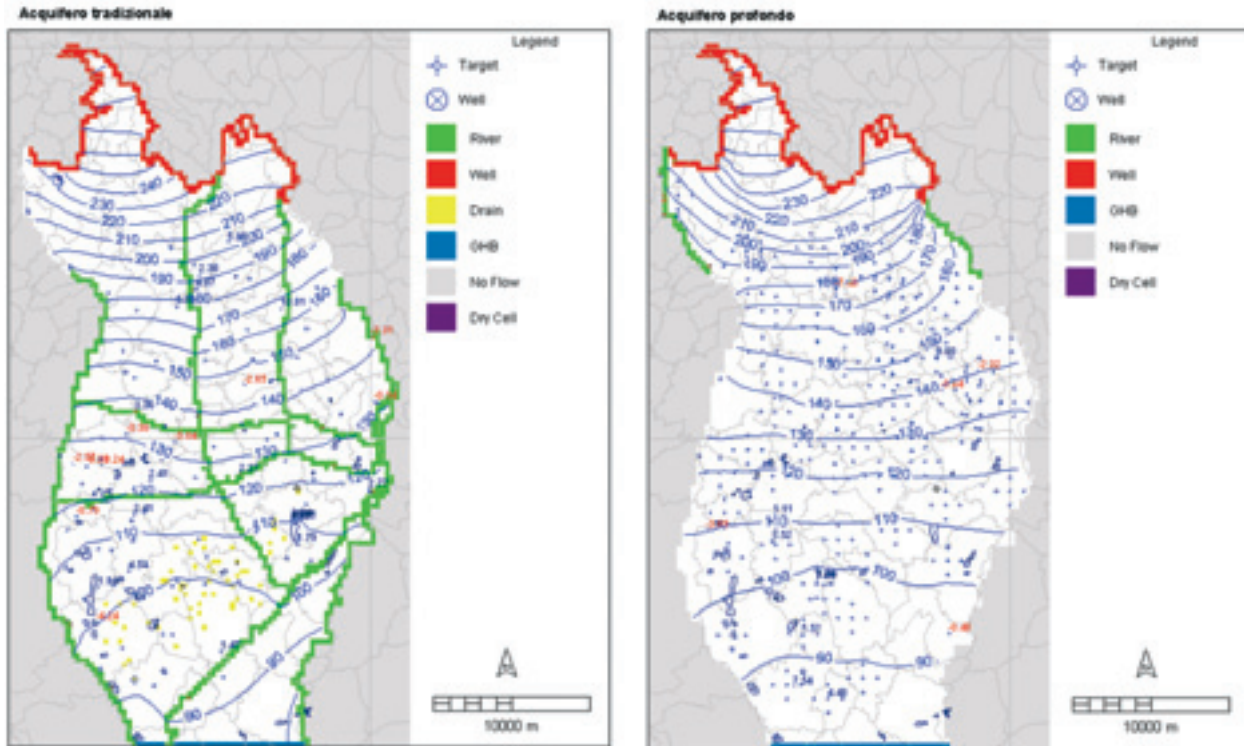


Figura 7. Simulazione piezometrie statiche Giugno 2005 Acquifero tradizionale (sinistra) e Acquifero profondo (destra).  
 Figure 7. Simulated groundwater heads (June 2005) in Traditional (left) and Deep (right) Aquifer Units.

Tabella 2. Bilancio idrico nel Comune di Pozzuolo Martesana.  
 Table 2. Water balance in Pozzuolo Martesana Municipality.

	Afflussi			Deflussi		
	m <sup>3</sup> /giorno	m <sup>3</sup> /s	%	m <sup>3</sup> /giorno	m <sup>3</sup> /s	%
<b>Flusso nello strato 1</b>						
<b>Acquifero tradizionale</b>						
Strato 2	168,45	0,0019	0,4	2.681,42	0,03	6,0
Ovest	5.170,26	0,06	12,2	7.720,15	0,09	17,1
Est	433,20	0,005	1,2	2.144,18	0,02	4,8
Sud	0	0	0	24.819,48	0,28	55,2
Nord	27.457,29	0,31	63,4	0	0	0
Corsi d'acqua (River)	0	0	0	0	0	0
Fontanili (Drain)	0	0	0	3.306,41	0,04	7,3
Pozzi (Well)	0	0	0	4.383,00	0,05	9,75
Ricarica areale	9.782,99	0,11	22,4	0	0	0
TOTALE	43.012,19	0,49	100	45.054,6	0,52	100
<b>Flusso nello strato 2</b>						
<b>Acquifero profondo</b>						
Strato 1	2.681,42	0,03	11,5	168,45	0,0019	0,7
Ovest	501,42	0,0058	2,1	1.081,30	0,012	4,6
Est	901,48	0,010	3,9	368,62	0,0043	1,6
Sud	0	0	0	19.835,78	0,23	83,9
Nord	19.551,66	0,22	83,8	0	0	0
Corsi d'acqua (River)	0	0	0	0	0	0
Fontanili (Drain)	0	0	0	0	0	0
Pozzi (Well)	0	0	0	2.180,11	0,02	9,3
Ricarica areale	0	0	0	0	0	0
TOTALE	23.635,98	0,27	100	23.631,26	0,27	100
<b>Flusso strati 1 e 2</b>						
Ovest	5.671,68	0,065	9,0	8.801,46	0,10	13,4
Est	1.334,68	0,015	2,1	2.512,81	0,03	3,8
Sud	0	0	0	44.655,26	0,51	68,0
Nord	47.008,96	0,54	74,5	0	0	0
Corsi d'acqua (River)	0	0	0	0	0	0
Fontanili (Drain)	0	0	0	3.306,41	0,04	5,0
Pozzi (Well)	0	0	0	6.563,11	0,075	9,9
Ricarica areale	9.782,99	0,11	15,5	0	0	0
TOTALE	63.798,31	0,73	100	65.839,05	0,76	100
Errore %	3,9					

Attivando i pozzi alla portata totale di 260 l/s corrispondente al fabbisogno idrico che deve essere coperto dal campo pozzi, il totale prelevato da falda salirebbe al 44 % circa del totale disponibile.

La portata d'esercizio di 260 l/s è stata attribuita per il 60% agli 8 pozzi con filtri nell'Acquifero Tradizionale e per il restante 40% ai 7 pozzi con filtri nell'Acquifero Profondo, ottenendo una portata unitaria di 19,5 l/s prelevati dalla falda tradizionale e di 14,8 l/s dalla falda profonda. Queste portate sono state assegnate ai pozzi ed è stata eseguita una simulazione preliminare in condizioni dinamiche, secondo la quale il pompaggio con queste portate determinerebbe abbassamenti massimi in falda tradizionale di circa 6,8 m e di 4,4 m presso la testa di un fontanile presente a circa 100 m a sud del campo pozzi, causandone il prosciugamento durante tutto l'anno.

Secondo i risultati della simulazione, l'abbassamento piezometrico indotto dal pompaggio renderà necessario mitigarne l'impatto restituendo al fontanile la portata che drenerebbe dalla falda in sua assenza. La restituzione potrà essere effettuata mediante una derivazione d'acqua

superficiale dal Naviglio Martesana, previa valutazione di compatibilità dal punto di vista qualitativo delle acque del canale, oppure incrementando la portata estratta dai pozzi in falda tradizionale di una quota pari alla portata drenata dal fontanile in condizioni inalterate.

Questa soluzione permette di restituire l'uso del volume d'acqua agli utenti del fontanile ma non di risaturare lo spessore di acquifero drenato dal pompaggio dal campo pozzi, che dunque rimarrebbe asciutto per tutto l'anno.

### Misure di mitigazione

Gli impatti nella fase di costruzione e in quella d'esercizio sulle varie componenti ambientali sono stati quantificati (Figura 8) costruendo una matrice di Leopold (Leopold *et alii*, 1971). Se per la fase di costruzione è stato riscontrato un impatto negativo, durante la fase di esercizio sono emersi importanti impatti positivi per via dei benefici sociali dell'opera che contrastano l'impatto negativo del prosciugamento del fontanile.

AZIONI RILEVANTI		COSTRUZIONE										ESERCIZIO																					
		POZZI	IMPIANTO TRATTAMENTO	EDIFICI E MANUFATTI TECNICI	TRAFFICO	BARRERE E REGIONI	OPERE ACCESSORIE	PUNTEGGI PARZIALI	OCCUPAZIONE SUOLO	POMPAGGIO	TRATTAMENTO	EDIFICI E MANUFATTI TECNICI E MANUTENZIONE	TRAFFICO	BARRERE E REGIONI	OPERE ACCESSORIE	PUNTEGGI PARZIALI ESCLUSE MITIGAZIONI	ALIMENTAZIONE DEL FONTANILE RAVAGGI	EDUCAZIONE AMBIENTALE	PUNTEGGI INCLUSE MITIGAZIONI														
<b>COMPONENTI AMBIENTALI</b>																																	
Categorie																																	
Fattori																																	
Fattori Socio Economici	Viabilità	-1	1	-1	1	-1	1	-2	1	0	0	0	0	-5	0	0	0	-1	1	-1	1	0	0	0	0	-3	0	0	0	0	0		
	Trasporti	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	0	0	0	0	-4	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	
	Salute pubblica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	0	0	0	0	6	0	0	1	2	2	
	Attività industriali	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	
	Attività agricole	-2	1	-3	1	-3	1	-1	1	0	0	0	0	-3	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	-2	1	1	1	2	3	
Ambiente e Beni Culturali	Panorama	-1	1	-1	1	-1	1	0	0	-2	1	-2	1	-7	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	-1	1	2	1	1	1	2	3	
	Ecosistemi	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-5	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	-1	1	0	2	1	1	1	2	3
	Parchi e riserve	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Beni culturali	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Terra	Suolo	-3	1	-3	1	-3	1	-1	1	-1	1	-1	1	-3	-3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	1	1	0	0	1
	Sottosuolo	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0
Acque superficiali	Qualità	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-4	3	2	1	1	7	
	Quantità	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	1	1	7	
Acque sotterranee	Qualità	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	2	1	3	1	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	1	1	1	
	Quantità	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3	0	0	1	1	1	
Flora	Vegetazione naturale	-1	1	-1	1	-1	1	0	0	-1	1	-1	1	-5	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	3	1	1	1	4	
	Vegetazione coltivata	-3	1	-3	1	-3	1	0	0	-3	1	-3	1	-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	1	1	1	1	2	
	Specie protette	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Uccelli	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	1	1	2	
Fauna	Animali terrestri	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-5	0	-1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	2
	Animali acquatici	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	1	1	1	1	3	
	Specie protette	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	1	1	1	2	
	Rumore	-2	1	-2	1	-2	1	-2	1	-2	1	-2	1	-4	-1	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
Atmosfera	Clima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	2	
	<b>PUNTEGGI TOTALI</b>	<b>-20</b>	<b>12</b>	<b>-17</b>	<b>10</b>	<b>-17</b>	<b>10</b>	<b>-9</b>	<b>9</b>	<b>-11</b>	<b>7</b>	<b>-6</b>	<b>6</b>	<b>-12</b>	<b>-7</b>	<b>-9</b>	<b>-9</b>	<b>12</b>	<b>7</b>	<b>-13</b>	<b>-5</b>	<b>-5</b>	<b>-2</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>26</b>	<b>11</b>		

Figura 8. Valutazione quantitativa e qualitativa delle pressioni con Matrice Leopold.  
 Figure 8. Quantitative and qualitative environmental pressures by means of Leopold Matrix.



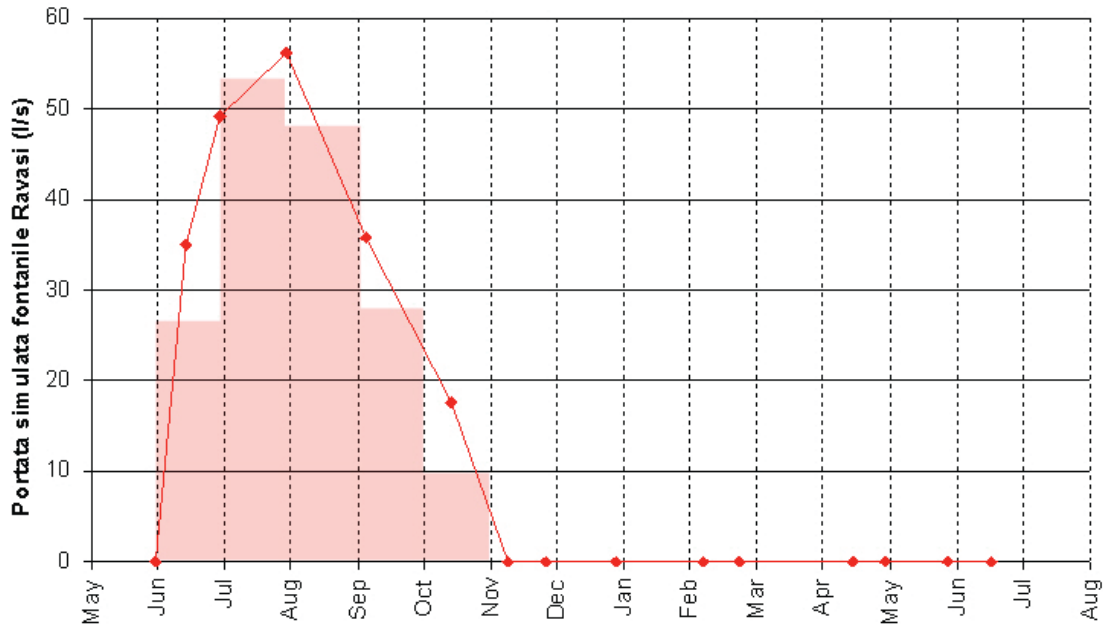


Figura 9. Portata drenata dal fontanile prima del pompaggio dal campo pozzi (valori calcolati).  
 Figure 9. Change of yield drained by 'fontanili' spring before starting wellfield pumping (calculated values).

Già il bilancio ambientale parziale della messa in esercizio del campo pozzi, escludendo le misure di mitigazione, appare leggermente positivo e, infine, considerando anche le misure di mitigazione, esso risulta nel complesso largamente positivo.

L'altezza idrometrica è stata misurata nella testa del fontanile solo nel periodo Giugno 2000-Giugno 2001, prima dell'attivazione del campo-pozzi. A Giugno 2000 il fontanile si presentava asciutto. A inizio di Luglio dello stesso anno ha cominciato a drenare acqua di falda raggiungendo il picco di massima altezza idrometrica alla fine del mese. Successivamente l'altezza dell'acqua ha ripreso a diminuire fino a tornare nulla a Novembre 2000, rimanendo tale fino alla fine del Giugno successivo.

Non disponendo di misure dirette di portata, il modello di flusso è stato utilizzato per definire la portata drenata dal Fontanile Ravasi in condizioni naturali nel mese di calibrazione, vale a dire Giugno 2005. La portata calcolata è di 3.036,4 m<sup>3</sup>/giorno, pari a 35,1 l/s.

La portata degli altri mesi in cui il fontanile non è in secca è stata determinata ipotizzando una dipendenza lineare tra i dati di altezza idrometrica misurati nel 2000-2001 e il dato di portata calcolato per Giugno 2005 (Figura 9). Sulla base di questa ricostruzione è stata stimata la portata drenata dal fontanile negli altri mesi dell'anno idrologico 2005 che presenta il suo valore massimo di circa 53 l/s nel mese di Luglio.

Come misura compensativa del prosciugamento del fontanile indotto dal pompaggio presso i campi pozzi si è previsto di restituire al fontanile, mese per mese, le portate così calcolate.

## Conclusion

Le simulazioni di flusso eseguite indicano che il prelievo in condizioni di esercizio delle portate di 260 l/s dai pozzi determinerà il prosciugamento del Fontanile Ravasi durante tutto l'anno, rendendo indispensabile una misura di mitigazione dell'impatto generato.

Il modello eseguito, calibrato in condizioni statiche e verificato in condizioni dinamiche, è stato utilizzato per calcolare la portata drenata naturalmente dal fontanile, nelle condizioni precedenti l'attivazione del campo pozzi, portata che dovrà essere restituita per garantire la disponibilità idrica per le utenze irrigue poste a valle.

La restituzione d'acqua dovrà essere eseguita nel periodo Giugno-Ottobre per garantire il mantenimento delle condizioni di flusso originali del fontanile. L'acqua da restituire al fontanile potrà essere prelevata dal Naviglio Martesana mediante la realizzazione di un'apposita derivazione. Sarà in tal caso necessario verificare le caratteristiche qualitative dell'acqua del canale e la compatibilità ambientale di tali acque con l'ecosistema preesistente. Alternativamente l'acqua da restituire al fontanile potrà essere ottenuta incrementando la portata estratta dai pozzi in falda tradizionale.

Le modalità di restituzione dovranno essere decise in fase di progetto, che dovrà tenere conto della necessità di ottenere velocità di flusso nella testa e nell'asta del fontanile simili a quelle presenti in condizioni naturali, per esempio mediante la realizzazione di stramazzi nella testa del fontanile per laminare il flusso in entrata.



## Bibliografia

- Anderson P.M., 1992. *Applied groundwater modelling. Simulation of flow and advective transport*. Academic press, Inc. Harcourt Brace Jovanovich Publishers.
- Avanzini M., Beretta G.P., Francani V., Nespoli M. per CAP Milano, 1995. *Indagine preliminare sull'uso sostenibile delle falde profonde nella Provincia di Milano*.
- Beretta G. P., 1992. *Idrogeologia per il disinquinamento delle acque sotterranee*. Pitagora Editrice.
- Bonomi T., 1994. *Valutazione delle risorse idriche sotterranee con l'utilizzo di SIT e modelli: esempio in un settore dell'hinterland milanese orientale*. Quaderni di Geologia Applicata, n. 1/1994.
- CAP Milano, 2001. *Progettazione e gestione dei pozzi d'acqua potabile. Caratteristiche idrogeologiche e idrochimiche delle falde delle Province di Milano e Lodi*.
- Cavallin A., De Luise G. per CAP Milano, 1994. *Progetto di fattibilità di un campo-pozzi in località Pozzuolo Martesana (parte II)*.
- Cavallin A., De Luise G. per CAP Milano, 1994. *Studio preliminare per l'ottimizzazione del prelievo nel campo pozzi di Pozzuolo Martesana*.
- Cavallin A., De Luise G., Battistello B., Cerbini G., Gorla M., 2004. *Idrogeologia applicata – Principi metodi e misure*. Geo-Graph.
- De Luise G. per CAP Milano, 1998. *Campo pozzi di Pozzuolo Martesana – Progetto per la trivellazione di n. 7 pozzi – Località Cascina Porro*.
- ESI Ltd per CAP Milano, 2002. *Valutazione d'impatto idrogeologico del campo pozzi progettato a Trezzo sull'Adda – Milano*.
- Martinis B., Mazzarella S., 1971. *Prima ricerca idrica profonda nella pianura lombarda*. Istituti di Geologia e Paleontologia dell'Università degli Studi di Milano, Pubbl. n. 94, nuova serie, Milano.
- McDonald M.G., Harbaugh A.W., 1988. *A modular three dimensional finite difference ground-water flow-model*. USGS-TWRI, Book 6, Chap. 1.
- Pollock D.W., 1989. *Documentation of computer program to compute and display pathlines using results from the U.S. Geological Survey modular three-dimensional finite difference finite-difference ground-water flow model*. U.S. Geological Survey Open File Report 89-381.
- Provincia di Milano – Assessorato all'Ambiente e Politecnico di Milano – S.S.T.M. – Geologia applicata, 1995. *Le risorse idriche sotterranee nella Provincia di Milano* Vol. I: Lineamenti idrogeologici.
- Regione Lombardia, 2001. *Acque sotterranee in Lombardia. Gestione sostenibile di una risorsa strategica*. Direzione generale servizio di pubblica utilità. U.O. Risorse Idriche.
- Regione Lombardia, 2004. *Piano di Tutela delle Acque. Relazione Generale*. Direzione generale servizio di pubblica utilità. U.O. Risorse Idriche.

## Applicazione di un modello matematico per la protezione delle R.I.S.: il campo pozzi di Rivalta Torinese (TO)

Nicola Quaranta, Elena Cogo

GEOengineering s.r.l., Torino, quaranta@geoengineering.torino.it, cogo@geoengineering.torino.it

*Application of simulation mathematical models to groundwater protection: the western well-field in Turin (Piedmont, Italy)*

**ABSTRACT:** As a response to the recent introduction of a new regulation about groundwater uptake for human use, the water managing society of the city of Turin (SMAT) has started a protection plan for deep aquifers. Among these, well-fields west of Turin (Cascina Romana-Doirone) supply until the 60' ies the 10% of groundwater abstraction rate for human use consumption of the city. Design of the well-head protection areas has been carried out setting up three different 3-D groundwater flow simulation models. Vertical discretization is referred to five computational layers: their elevation is computed from cross-correlation of stratigraphic records from the wells. Horizontal grid shows telescopic pattern, ranging from 1 to 20 meters. Hydraulic response to four pumping tests with automatic data-logging is diagnostic of a leaky aquifer. Boundary conditions consider river links, up-gradient constant flux, down-gradient fixed head, vertical recharge in 1st computation layer. Particle-tracking module has supported the automatic delineation of isocrones.

*Key terms:* Wellhead protection areas, Simulation model, Particle-tracking

*Termini chiave:* Delimitazione delle aree di salvaguardia, Modello di simulazione, Tracciamento delle particelle

### Riassunto

In risposta alla recente introduzione della disciplina regionale dei prelievi di acque per il consumo umano, la società di gestione del Servizio Idrico Integrato di Torino (SMAT) ha avviato dal marzo 2007 un programma di protezione delle riserve acquifere profonde. Dagli anni 1960, l'utilizzo continuo del sistema multi-falde Pleistocenico nel distretto torinese occidentale fornisce ancora oggi il 10% della risorsa idrica destinata al consumo umano. Una linea di 20 pozzi, approfonditi tra 95 e 145 metri dal piano-campagna, si estende da Sud a Nord per una lunghezza complessiva di 3.7 km dal T. Sangone ai terrazzi fluvio-glaciali di età Mindeliana, con ricarica da dispersioni subalvee e infiltrazione meteorica nella zona inframorenica a monte. Dagli anni '90 si osserva un significativo declino delle quote piezometriche, soprattutto nei pozzi più lontani dal T. Sangone. Analisi geochimiche suggeriscono un'età superiore a 50 anni (U.T. = 0), la composizione isotopica dell'azoto è in equilibrio con il contenuto minerale dei suoli; i due fattori suggeriscono un buon livello di protezione naturale del sistema acquifero. La delineazione delle aree di protezione è stata eseguita implementando 3 modelli di simulazione del flusso in falda (alle differenze finite), tridimensionali, intorno ai principali gruppi di pozzi, utilizzando un'interfaccia grafica commerciale di *pre-post processing* per

*MODFLOW*. La discretizzazione verticale si riferisce a 5 strati di calcolo, la cui elevazione è ricavata da correlazioni dei record stratigrafici dei pozzi; la discretizzazione orizzontale è telescopica, con celle di 1 metro intorno ai pozzi, crescenti sino a 20 metri nel resto del dominio di calcolo. La distribuzione dei parametri idrodinamici è stata stimata previa interpretazione di 4 prove di pompaggio di lunga durata con registrazione automatica dei livelli tramite *data-logger* in pozzi di osservazione e in pompaggio. La risposta idraulica è tipica di un acquifero semi-confinato con fattore di fuga variabile tra 600 e 1500 metri. La calibrazione si riferisce sia a condizioni stazionarie in assenza di pompaggio (misurate mediante interruzioni programmate dei prelievi), sia a condizioni di esercizio, con differenze tra livelli simulati e calcolati massime di pochi decimetri. Le condizioni al contorno comprendono scambio con il corso d'acqua, flusso costante da monte, carico costante a valle, ricarica verticale del primo strato. La tecnica del tracciamento automatico (*particle-tracking*) ha consentito l'individuazione delle isocrone a 365, 180, 60 giorni. Le prime due includono la "zona di rispetto allargata (ZRA)", rispettivamente per indici DRASTIC di vulnerabilità medio-alta e bassa (per la presenza di potenti orizzonti argillosi); la terza include la "zona di rispetto ristretta". La superficie complessiva delle aree di protezione è di 1.7 km<sup>2</sup>. Lungo il perimetro della ZRA è stata posizionata una proposta di rete di monitoraggio con

29 piezometri (singoli o accoppiati a profondità differenti), programmando frequenze di controllo rapportate ai tempi di sicurezza necessari per prevenire inquinamenti da punti esterni.

## 1. Introduzione

Il presente studio rappresenta una delle prime applicazioni della nuova regolamentazione della Regione Piemonte sull'utilizzo delle acque sotterranee destinate al consumo umano (D.P.G.R. 11 Dicembre 2006, 15/R).

Il complesso di captazioni di Rivalta Torinese è incluso nell'elenco di cui all'allegato 9, punto 2 delle Norme di Attuazione del Piano di Tutela della Regione Piemonte (Prima individuazione delle zone di protezione delle acque destinate al consumo umano). L'art. 24 delle N.A. - Zone di protezione delle acque destinate al consumo umano, prevede per il campo-pozzi le misure di tutela qualitativa e quantitativa previste dal PTA, in quanto, come meglio specificato nel p.to b) "...campo-pozzi di interesse regionale per potenzialità e qualità degli acquiferi captati.... costituisce riserva idrica strategica".

A tal fine il gestore unico di ATO 3 (SMAT) ha messo in atto, a partire dal marzo 2007, un programma di protezione della risorsa strategica, promuovendo uno studio finalizzato alla delimitazione delle aree di salvaguardia dei pozzi in esame.

Il campo-pozzi, costituito complessivamente da 20 captazioni, delle quali 18 attive, si presenta suddiviso in diversi settori, distinti all'interno di più aree recintate di proprietà dell'ente gestore (Figura 1):

- Cascina Romana Grande,
- Cascina Romana Piccola,
- Doirone,
- Campofregoso - Tetti Neirotti.

In Tabella 1 vengono riportati i parametri produttivi del sistema campo - pozzi, riferiti al biennio 2005 - 2006, validati da parte dell'Unità di Telecontrollo SMAT.

Per confronto con i dati relativi all'intero sistema di approvvigionamento dell'area metropolitana torinese, si ricava che il campo-pozzi di Rivalta fornisce il 6.4 % dell'aliquota totale di risorsa captata, costituendo il 9.3% della risorsa captata da pozzi.

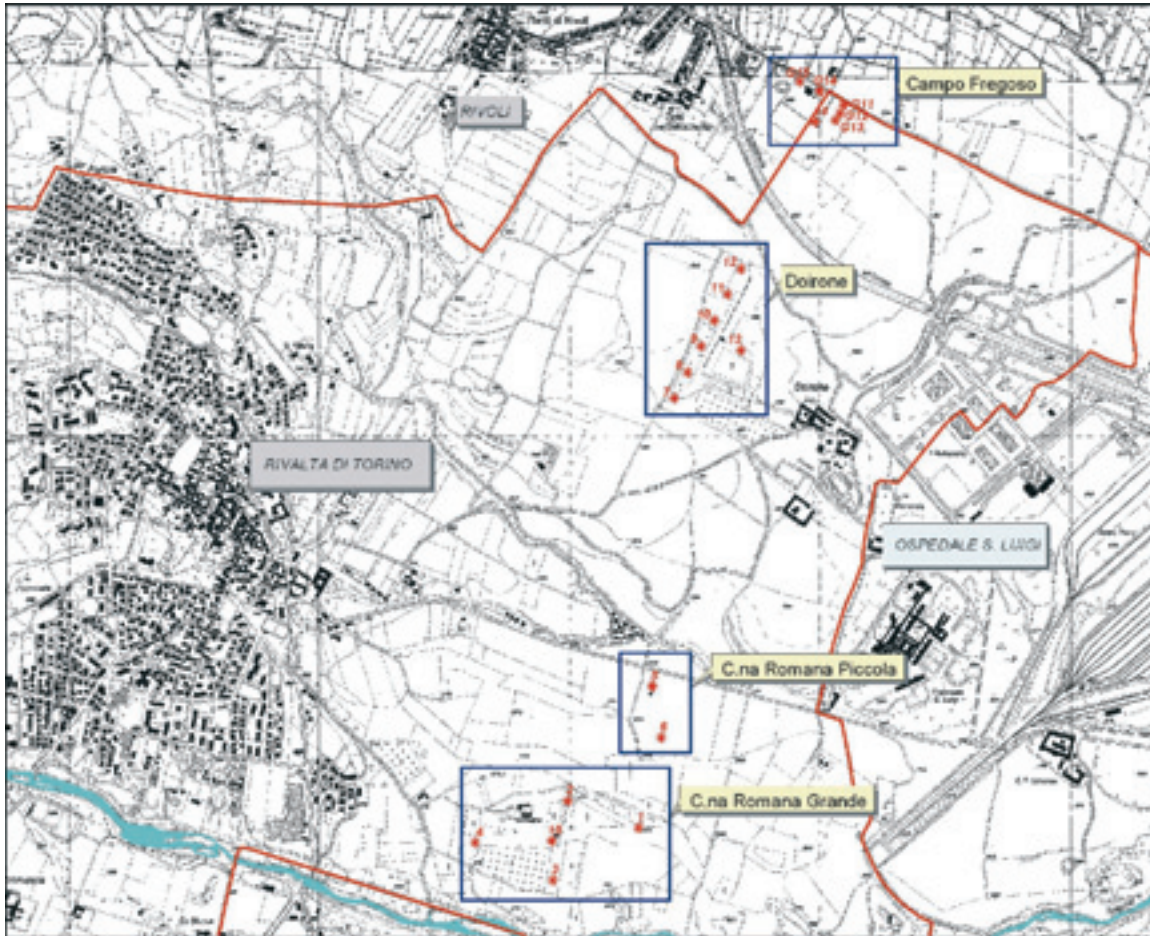


Figura 1. Corografia della zona di studio (scala 1:15000).  
Figure 1. Corography of the area (scale 1:15000).



Tabella 1. Produzione mensile del campo-pozzi Cascina Romana, Doirone, Campo Fregoso, periodo 2005-2006 (Fonte: Unità Telecontrollo SMAT).

Table 1. Monthly production of the well fields of C.na Romana, Doirone, Campo Fregoso, period 2005-2006 (Source: Remote-control unit SMAT)

Mesi	Volume 2005 (m <sup>3</sup> )	Portata media 2005 (l/s)	Volume 2006 (m <sup>3</sup> )	Portata media 2006 (l/s)
GENNAIO	902.376	337	1.042.275	389
FEBBRAIO	805.014	333	972.494	402
MARZO	913.378	341	1.074.054	401
APRILE	890.401	344	960.556	371
MAGGIO	863.129	322	857.528	320
GIUGNO	825.482	318	932.426	360
LUGLIO	916.346	342	1.024.328	382
AGOSTO	942.842	352	1.060.721	396
SETTEMBRE	811.881	313	1.018.882	393
OTTOBRE	844.069	315	840.206	314
NOVEMBRE	904.363	349	963.357	372
DICEMBRE	1.030.800	385	964.531	360
Anno	10.650.081	338	11.711.358	372

## 2. Inquadramento geologico e geomorfologico

Il territorio esteso tra la sponda sinistra del T. Sangone e Rivoli (Figura 2) si sviluppa a partire dai rilievi collinari pertinenti all'apparato morenico esterno di Rivoli-Avigliana, riconducibili alla fase glaciale del Mindel, che costituiscono i terreni più antichi della successione stratigrafica Quaternaria (V.Coccolo, 2007).

I cordoni più esterni di questa fase presentano asse in direzione Ovest-Est e si raccordano al piede delle creste con i depositi fluvio-glaciali del Mindel, estesi nella fascia a monte del Canale di Rivalta, lungo il terrazzo sul quale sorge il centro storico sino all'ospedale San Luigi.

I depositi fluvio-glaciali del Riss, che colmano gli scaricatori glaciali del Rivo Garosso di Rivalta e del Rivo Garosso di Rivoli, costituiscono il livello più antico delle superfici degradanti nel fondovalle verso l'alveo del T. Sangone a Sud del Canale di Rivalta, essendo riconoscibili nel settore occidentale del territorio comunale tra Cascina Boccardo e Cascina Abbruciata.

Gli stessi depositi fluvio-glaciali del Riss costituiscono la pianura tra C. Doirone, la tangenziale di Torino e Tetti Giacchetto.

I termini più recenti della serie deposizionale quaternaria (Olocene) sono rappresentati dai depositi alluvionali antichi, sui quali sorge l'espansione urbana recente immediatamente a Sud del centro storico sino a Cascina Romana, e dai depositi alluvionali medio-recenti, attualmente esondabili, lungo l'alveo di piena attuale del

T. Sangone.

## 3. Inquadramento idrogeologico

L'idrogeologia dell'area in oggetto si inquadra nell'ambito del sistema acquifero regionale, contraddistinto dalla presenza di una falda acquifera superficiale di tipo freatico, localizzata nei depositi ghiaioso-sabbiosi quaternari fluvio-glaciali e raccordata con il livello di base dei corsi d'acqua (nel caso specifico, il T.Sangone). Questo acquifero, alimentato dall'infiltrazione delle precipitazioni efficaci, dalle pratiche irrigue e da dispersioni in subalveo, presenta significative discontinuità in corrispondenza delle scarpate dei terrazzi fluviali. In corrispondenza della superficie terrazzata antica, ricoperta da paleosuoli argillosi di spessore plurimetrico, la ricarica verticale è fortemente limitata.

La falda superficiale è seguita altri acquiferi più profondi, in pressione, di spessore totale non ben definito, localizzati nelle sequenze sabbioso-ghiaiose dei depositi fluvio-lacustri plio-pleistocenici, contraddistinte da geometrie complesse e discontinue, di tipo lenticolare. Il sistema di falde in pressione è alimentato nella zona di ricarica dell'acquifero regionale, laddove può costituire una sequenza indifferenziata dal sovrastante acquifero freatico. L'assetto idrogeologico è schematizzato nella Tabella 2.

A larga scala, l'assetto idrostrutturale del sottosuolo può essere pertanto schematizzato come segue:

- l'acquifero superficiale è ospitato nella Serie dei Depositi Fluviali pleistocenici (ghiaie prevalenti, sabbia e ciottoli, orizzonti conglomeratici);
- la base dell'acquifero superficiale si colloca a profondità dell'ordine di 40-45 metri dal piano-campagna nella zona di Cascina Doirone, 65 metri da p.c. sul terrazzamento del Doirone (Bortolami, 2002);
- inferiormente a tale profondità si sviluppa un sistema acquifero multifalda, ospitato nel Complesso delle Alternanze Villafranchiane, avente una potenza non inferiore all'ordine di grandezza del centinaio di metri.

Il profilo geologico di Figura 3 evidenzia i rapporti geometrici tra le unità suddette.

## 4. Ricostruzione della piezometria

La ricostruzione della piezometria del sistema acquifero captato dai pozzi (profondo, semiconfinato) si basa sui risultati della campagna di misure dei livelli statici eseguita nel periodo compreso tra il 12-26 marzo 2007 in tutti in pozzi e piezometri rivelatisi accessibili a tale scopo, previo spegnimento delle pompe per durate non inferiori a 24 ore.

A supporto della campagna di ricostruzione dell'assetto piezometrico è stato ultimato un rilievo topografico planoaltimetrico di precisione con tecnica GPS differenziale, finalizzato sia all'ubicazione planimetrica dei punti di misura sia alla determinazione

delle quote assolute di riferimento per le misure di soggiacenza.

L'interpolazione areale delle quote piezometriche statiche misurate, utilizzando una funzione di "Spline" regolarizzata che preserva le quote piezometriche osservate nei punti di monitoraggio, permette di visualizzare la distribuzione piezometrica evidenziata nella Figura 4. Dall'analisi di questa figura è possibile

delineare una morfologia della superficie piezometrica con direzione di deflusso diretta da WNW verso ESE, con moderate inflessioni di tipo concavo verso la regione fluviale del T.Sangone e convesso in corrispondenza del terrazzamento del Doirone.

Nella ricostruzione della morfologia della superficie piezometrica del sistema di acquiferi in pressione captati dai pozzi non si è tenuto conto delle quote idrometriche

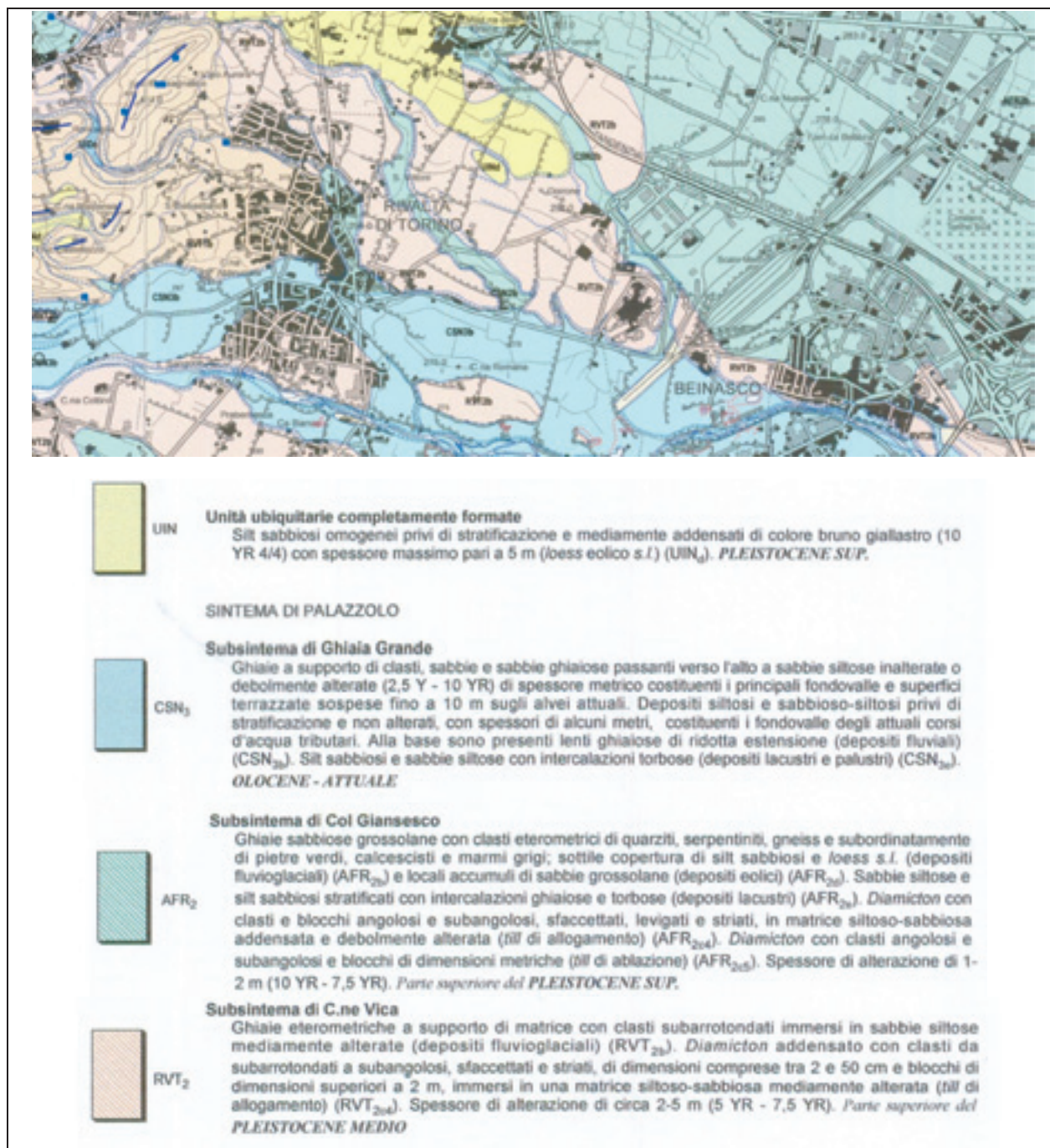


Figura 2. Carta geologica dell'area in esame (fonte: Foglio 155 - Torino ovest- progetto CARG, scala 1:5000).

Figure 2. Geologic map of the area (source: Sheet 155 – ovest Turin, CARG project, scale 1:5000)

Tabella 2. Schematizzazione del modello idrogeologico del sottosuolo dell'area in esame.  
 Table 2. Outline of the conceptual hydrogeological model of the area

Formazione	Sottounità	Litologia	Età
Serie dei Depositi Fluviali	Complesso dei depositi grossolani fluviali	Ghiaie prevalenti con sabbia e localmente ciottoli	Pleistocene medio - Olocene
	Complesso delle Alternanze Fluviali	Alternanze di depositi fini limoso-argillosi e depositi grossolani di natura ghiaiosa e sabbiosa	
Serie dei Depositi di Transizione Villafranchiani	Complesso delle Alternanze Villafranchiane	Alternanze in banchi di spessore anche decametrico di limi argillosi, sabbie e ghiaie di ambiente lacustre, fluvio-lacustre e deltizio	Pliocene sup. - Pleistocene inf.
	Complesso dei Depositi Fini Villafranchiani	Limi argillosi prevalenti con locali intercalazioni sabbiose e ghiaiose di modesto spessore	

del T.Sangone, che si ritiene condizionante più direttamente l'acquifero superficiale. Il gradiente piezometrico si attesta nell'intervallo 0,4 – 0.5 %, valore tipico di acquiferi di pianura.5.

### Parametrizzazione idrodinamica dell'acquifero

La definizione degli aspetti concernenti l'interazione tra opere di captazione e acquifero sfruttato, sia dal punto di vista della potenzialità produttiva delle captazioni nelle varie aree omogenee, sia dal punto di vista dell'analisi della funzione trasmissiva e capacitiva del mezzo acquifero, è risultata indispensabile per un corretto approccio alla determinazione delle zone di rispetto.

Al fine di definire la potenzialità produttiva delle captazioni sono stati esaminati ed elaborati i dati acquisiti in ordine alle curve caratteristiche dei pozzi, relativi alle prove di pozzo eseguite in fase di collaudo dei medesimi al termine delle perforazioni, e quindi alle relazioni tempi/abbassamenti, ovvero all'evoluzione dinamica in regime transitorio dei coni di depressione generati dal pompaggio.

I parametri idrodinamici del sistema acquifero profondo sono stati definiti mediante una serie di prove di pompaggio in regime transitorio riferite ai diversi settori, compatibilmente con le esigenze produttive dell'impianto, utilizzando successive coppie costituite da

un pozzo attivo e un pozzo piezometrico in posizione adiacente, verificando nel tempo l'evoluzione dei coni di depressione. La procedura ordinaria di prova è riassumibile nelle seguenti fasi operative:

- verifica dell'idoneità del pozzo per l'esecuzione delle registrazioni di livello mediante trasduttori di pressione collegati a data-logger;
- sospensione del pompaggio nel gruppo di pozzi interessati dalla prova (pozzo attivo-pozzo piezometrico e pozzi immediatamente adiacenti) per una durata non inferiore a 24 ore all'inizio del pompaggio;
- avvio del pozzo in pompaggio, per durate non inferiori a 48 ore, mantenendo in arresto le pompe del pozzo piezometrico e dei pozzi immediatamente adiacenti;
- verifica della portata di prova, avvalendosi delle letture dell'unità di telecontrollo SMAT immediatamente precedenti e successive all'avvio del pompaggio;
- scarico della registrazione delle serie di livelli dal *data-logger*, analisi ed interpretazione dei dati di prova.

I risultati delle prove di acquifero sono stati elaborati ricorrendo all'utilizzo di prassi interpretative correnti nella letteratura specializzata di settore.

Il metodo risolutore impiegato nel caso in esame è il modello interpretativo di Hantush – Jacob per acquiferi semiconfinati (1955):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/B) \quad (1)$$

e

$$S = 4T tu / r^2 \quad (2)$$

dove:

- $s$  (m) = abbassamento;
- $Q$  (l/s) = portata di emungimento;
- $r$  (m) = distanza dal pozzo;
- $T$  (m<sup>2</sup>/s) = trasmissività dell'acquifero;
- $S$  (-) = coefficiente di immagazzinamento;
- $u$  = funzione di pozzo;
- $B$  = fattore di fuga (m).

I valori di trasmissività dei parametri idrodinamici sono stati determinati sovrapponendo le curve sperimentali alle curve teoriche di riferimento.

In Tabella 3 viene proposta una sintesi delle prove e delle determinazioni dei parametri idrodinamici dell'acquifero.

### 6. Indagine sui centri di pericolo e valutazione della vulnerabilità

In ottemperanza alla normativa vigente è stato effettuato un censimento, anche con sopralluoghi in sito, di tutte le attività, insediamenti e manufatti in grado di costituire direttamente o indirettamente fattori certi o potenziali di degrado della qualità delle acque, (Decreto regionale 15/R, 11 dicembre 2006).

L'indagine sui centri di pericolo è stata distinta per il



campo – pozzi di Cascina Romana, per il Doirone e per quello di Campo Fregoso, interessando in tutti i casi tre aree racchiuse dal luogo dei punti situati ad 1 km di

distanza da un punto baricentrico rispetto ai pozzi attivi delle tre aree SMAT in esame.

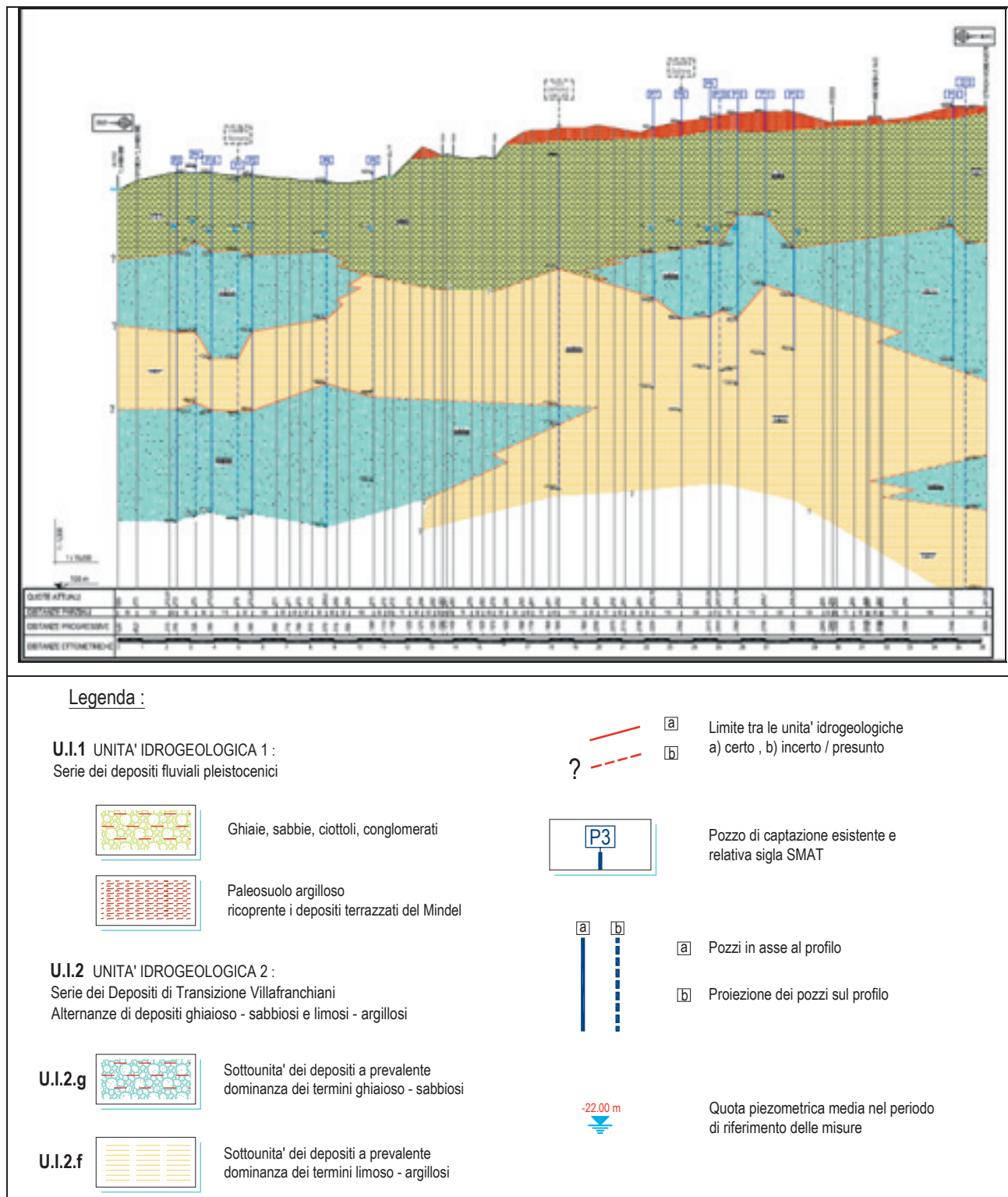


Figura 3. Profilo idrogeologico ricostruito sulla base dell'interpretazione dei sondaggi stratigrafici delle captazioni in esame.  
 Figure 3. Hydrogeological profile, based on the interpretation of the stratigraphic records from the wells.



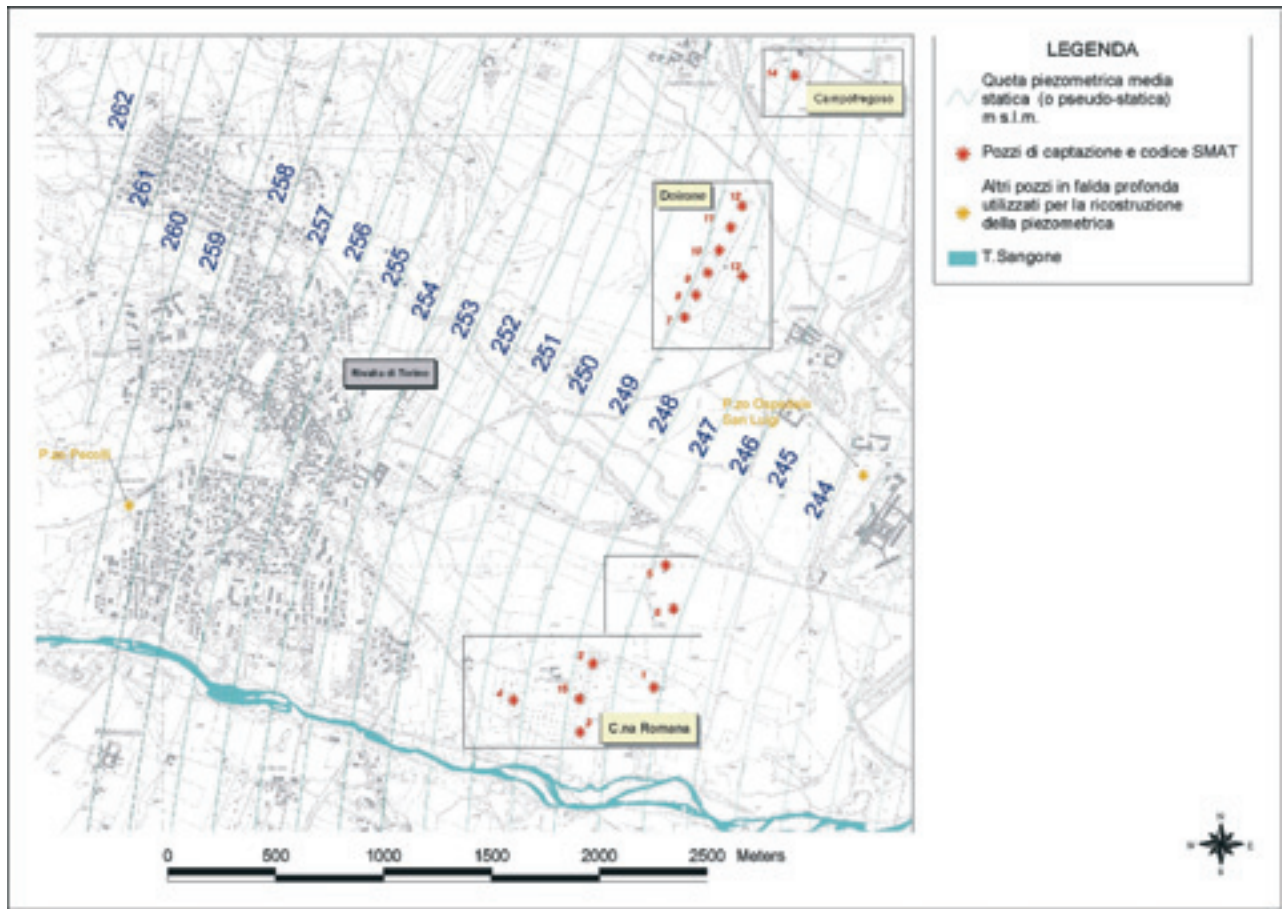


Figura 4. Carta piezometria ricostruita sulla base della campagna di misure del marzo 2007.  
 Figure 4. Piezometric map based on the measures of march 2007.

Tabella 3. Sintesi dei dati delle prove di pompaggio a portata costante elaborati sui piezometri di osservazione (test di acquifero).  
 Table 3. Chart of the constant rate pumping test results computed on the observation wells.

Pozzo in pompaggio	Pozzo di osservazione	Data inizio prova	Data fine prova	T (m <sup>2</sup> /s)	K (m/s)	S (-)	B (m)
15	3	12/03/2007	15/03/2007	2,28E-02	8,19E-04	4,70E-04	1,57E+03
11	12	15/03/2007	19/03/2007	1,66E-02	5,60E-04	2,28E-04	1,16E+03
9	10	22/03/2007	26/03/2007	2,39E-02	9,96E-04	3,15E-04	6,00E+02

Al fine di scegliere l'isocrona con tempo di sicurezza più idoneo per il dimensionamento della zona di rispetto allargata (ZRA), si è reso necessario valutare preliminarmente la situazione di vulnerabilità intrinseca dell'acquifero ospitato nel complesso multifalda delle Alternanze Villafranchiane.

A tal fine sono stati applicati i due metodi più accreditati a livello nazionale ed internazionale nella letteratura specialistica di settore:

- metodo DRASTIC (Aller et alii, 1987)
- metodo GOD (Foster, 1987).

In sintesi, la valutazione del grado di vulnerabilità

converge su valori "medi" nel caso dei pozzi sia del Doirone che di Campofregoso, mentre per Cascina Romana si attesta su valori "elevati".

## 7. Implementazione di un modello di simulazione

### 7.1. Premessa

Le aree di salvaguardia delle captazioni in esame, definite mediante il criterio geologico e idrogeologico sono state individuate implementando un modello di simulazione numerica.

A tal fine è stato utilizzato il codice di calcolo

ricosciuto come riferimento internazionale per le simulazioni dei processi di flusso e trasporto in falda (codice *MODFLOW* - McDonald and Harbaugh, 1988 - dall'U.S. Geological Survey). Come è noto il *MODFLOW* è un codice numerico tridimensionale basato sulle equazioni differenziali che governano i fluidi nei mezzi porosi, risolte con il metodo alle differenze finite. Nel presente caso è stata usata l'interfaccia *Groundwater Vistas* v. 4.0 (ESI - *Environmental Simulations Incorporated*).

In funzione delle dimensioni dell'area di studio, della quantità dei punti di prelievo e del grado di risoluzione atteso, le aree di captazione in esame sono state simulate mediante l'implementazione di 3 distinti modelli di calcolo:

- modello di simulazione del campo pozzi di Cascina Romana,
- modello del campo pozzi di Doirone,
- modello del campo pozzi di Campofregoso.

### 7.2. Discretizzazione verticale, orizzontale e temporale

Nel piano verticale, i modelli sono stati definiti tenendo conto del reale assetto idrogeologico, ricavato a partire dall'interpretazione delle sezioni stratigrafiche dei pozzi in esame.

I modelli sono stati discretizzati in 5 strati di calcolo, come schematizzato in Tabella 4.

Il secondo strato di calcolo è stato introdotto al fine di simulare la transizione che caratterizza il passaggio dalla falda libera a quella in pressione, in riferimento a studi realizzati dalla Provincia di Torino e della Regione Piemonte in convenzione con l'Università degli Studi di Torino (Bortolami et alii, 2002).

Tabella 4. Discretizzazione verticale del dominio di simulazione.

Table 4. Vertical discretization of the simulation.

UNITA' IDROGEOLOGICA (UI)	STRATO DI SIMULAZIONE
UI 1 Depositi fluviali	1° strato di calcolo – falda libera
	2° strato di calcolo – livello semipermeabile fittiziamente continuo
UI 2 Sottounità a dominanza di depositi ghiaioso - sabbiosi	3° strato di calcolo – falda semiconfinata (superiore)
UI 2 Sottounità a dominanza di depositi limoso - argillosi	4° strato di calcolo – livello semipermeabile
UI 2 Sottounità a dominanza di depositi ghiaioso - sabbiosi	5° strato di calcolo -falda semiconfinata (inferiore)

Sul piano orizzontale, il dominio di calcolo è stato discretizzato secondo una griglia a maglia quadrata a schema telescopico, in particolare, le celle assumono dimensioni pari ad 1 metro in corrispondenza dei pozzi in produzione per simulare la presenza del dreno in

corrispondenza dello spessore filtrato e da 5 a 20 m nel resto del dominio (Figura 5).

Le celle attive nelle 3 dimensioni per i modelli di simulazione sono rispettivamente di 6400,7500 e 5400 unità.

La direzione dell'asse Y del modello è stata assunta coincidente con la direzione media di deflusso idrico sotterraneo posta in evidenza dalla carta delle linee isopiezometriche.

### 7.3. Dati di input dei modelli

Vengono di seguito descritti e analizzati i vari parametri di *input*, utilizzati per simulare il comportamento idrodinamico del sistema acquifero.

#### Parametri idrodinamici

La spazializzazione dei valori di conducibilità idraulica in senso orizzontale e verticale tiene conto della distribuzione nel sottosuolo delle varie unità idrogeologiche.

Al primo, al terzo e al quinto strato di calcolo sono stati assegnati valori di conducibilità idraulica strettamente correlati ai risultati ottenuti mediante le prove di emungimento eseguita sui pozzi.

Al secondo strato di calcolo sono stati viceversa assegnati valori di permeabilità tipici di litologie siltose interstratificate con terreni più grossolani ( $K = 10^{-6}$  m/s).

Al quarto strato di calcolo è stata applicata una conducibilità idraulica caratteristica di termini a granulometria limoso argillosa.

#### Condizioni al contorno

La condizione al contorno imposta sul limite di monte dei modelli corrisponde ad una portata costante, ripartita tra le celle di calcolo a partire dalla legge di Darcy, per tenere conto del flusso in ingresso dall'acquifero sul lato W dell'area in esame; tale condizione viene gestita in *MODFLOW* mediante il pacchetto *WELL*.

Sul limite di valle sono state invece imposte condizioni di flusso dipendente dal carico, gestita in *Modflow* tramite il pacchetto *GHB* (*General Head Boundary*). Tale condizione mette in relazione il carico della cella con il flusso che la attraversa, calcolato in base ad un carico idraulico noto, in posizione esterna al modello. Nei casi in esame si è fatto riferimento ai valori delle quote piezometriche ricostruite a valle del limite dei modelli a partire da valori noti di soggiacenza.

Per quanto concerne il modello di simulazione del campo pozzi di Cascina Romana, si è ritenuto inoltre che il T. Sangone, situato poche centinaia di metri in direzione Sud rispetto al campo pozzi, potesse avere un ruolo di scambio idrico nei confronti della falda captata da questi ultimi. Al fine di simulare la presenza all'interno del modello è stata pertanto introdotta la condizione al contorno *RIVER* applicato solo al 1° strato di calcolo. Il percorso del fiume viene rappresentato tramite una spezzata di cui ogni tratto cade all'interno di

una cella di simulazione. Per ognuna di queste viene calcolato il termine di “conduttanza” tenendo conto del carico idrometrico del corso d’acqua, dello spessore dei sedimenti di fondo dello stesso, della permeabilità di questi ultimi e della larghezza dell’alveo.

#### *Ricarica verticale*

Nell’area di Cascina Romana al *layer* più superficiale è stata applicata una ricarica verticale, espressa come altezza dell’infiltrazione efficace in funzione del tempo dedotta dal modello idrogeologico realizzato nell’ambito degli studi propedeutici al Piano di Tutela delle Acque (Regione Piemonte, 2007), con la finalità di simulare il contributo dei fattori climatici dell’area (precipitazione ed evapotraspirazione) alla ricarica della falda.

In corrispondenza delle aree di captazione di Doirone e Campofregoso, l’unità idrogeologica 1 (Serie dei depositi fluviali pleistocenici) è caratterizzata da una copertura argillosa di spessore plurimetrico che limita fortemente l’infiltrazione verticale. La condizione di ricarica verticale è stata pertanto posta pari ad un valore di 400 mm/anno.

#### *Prelievi*

Gli spessori filtrati dei pozzi sono stati modellizzati riportando le quote reali della sommità e della base dei filtri, differenziati per le varie unità idrogeologiche.

Le portate di esercizio dei singoli pozzi sono state ripartite, in assenza di misuratori volumetrici installati a testa pozzo, a partire dai valori noti di portata complessiva del campo pozzi misurati dal centro di telecontrollo di Beinasco. Il criterio di ripartizione si basa

su una serie di misure differenziali, eseguite nei pozzi in emungimento, confrontati con le portate “di targa” delle pompe note alla loro data di installazione. Il pompaggio è applicato nel modello all’acquifero profondo (semi-confinato).

La variabilità stagionale delle portate di esercizio è stata ritenuta trascurabile, in quanto lo scarto medio dei valori mensili rispetto alla Q media annua risulta pari al 6% (Tabella 1).

#### *Calibrazione e validazione del modello*

In prima analisi i modelli di simulazione sono stati calibrati in condizioni di regime stazionario, utilizzando come condizione iniziale le misure piezometriche eseguite nei pozzi risultati accessibili durante la campagna di indagine, riferite ad una condizione di falda di tipo statico o pseudo-statico.

Il processo di calibrazione si è basato sul confronto fra i risultati forniti dal modello e i rilievi piezometrici sperimentali.

Il grado di correlazione tra i dati simulati e quelli osservati risultano molto soddisfacenti sia in termini di riproduzione del campo di moto sia in termini di fedeltà nella riproduzione delle quote piezometriche.

A questo punto sono state introdotte le sollecitazioni idrogeologiche e il modello è stato quindi calibrato, simulando il comportamento dell’acquifero in regime dinamico.

I risultati della taratura dei modelli sono esemplificati nella e nelle Figure 6-7.

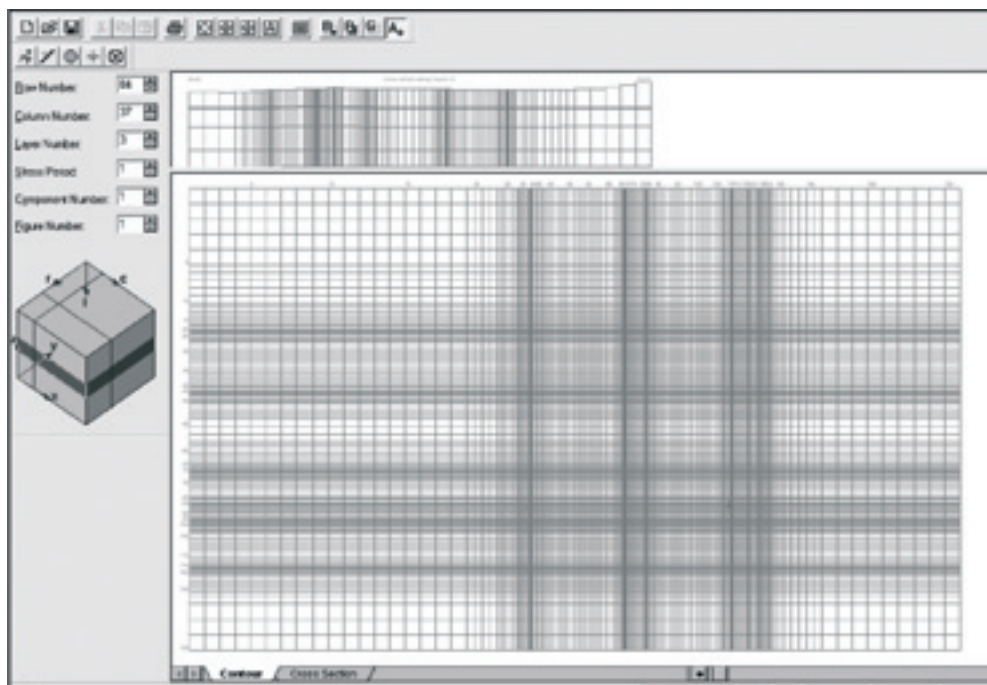


Figura 5. Discretizzazione del dominio di simulazione.

Figure 5. Discretization of the model mesh.



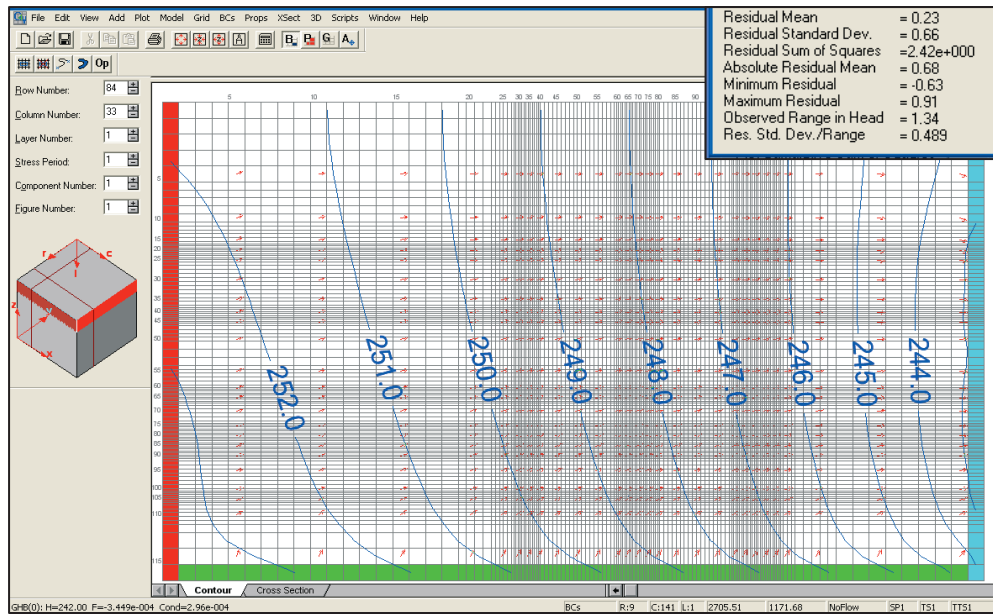


Figura 6. Calibrazione del modello in regime pseudo statico.  
 Figure 6. Calibration of the simulation model in pseudo-steady state.

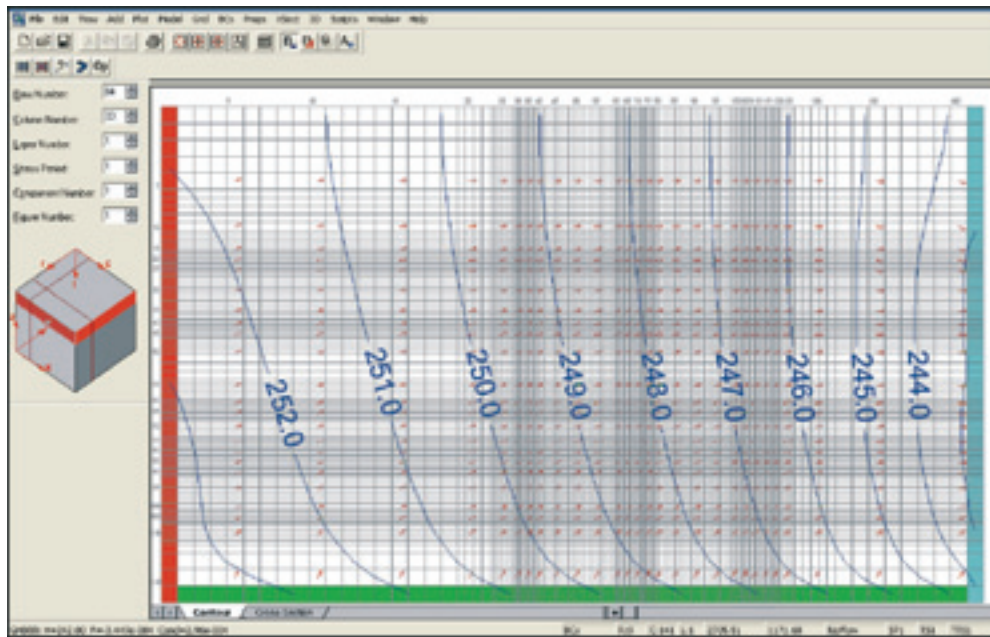


Figura 7. Calibrazione del modello di simulazione in regime dinamico (pozzi in pompaggio).  
 Figure 7. Calibration of the simulation model in dynamic state.

### 8. Dimensionamento delle aree di salvaguardia

Il Regolamento regionale 15R/2006 prescrive che nella definizione della aree di salvaguardia vengano distinte, a distanze crescenti dal punto del prelievo, una zona di tutela assoluta (ZTA), una zona di rispetto (ZR) e una zona di protezione (ZP).

Le aree di salvaguardia del campo pozzi di Cascina

Romana, e in particolare le zone di rispetto ristretta (ZRR) ed allargata (ZRA), sono state dimensionate utilizzando la tecnica del “particle tracking” attraverso il modulo MODPATH, disponibile nel codice di calcolo MODFLOW. La ZTA dei pozzi è circoscritta ad un raggio di 10 metri da ciascun punto di captazione, in accordo con la normativa nazionale e regionale vigente.

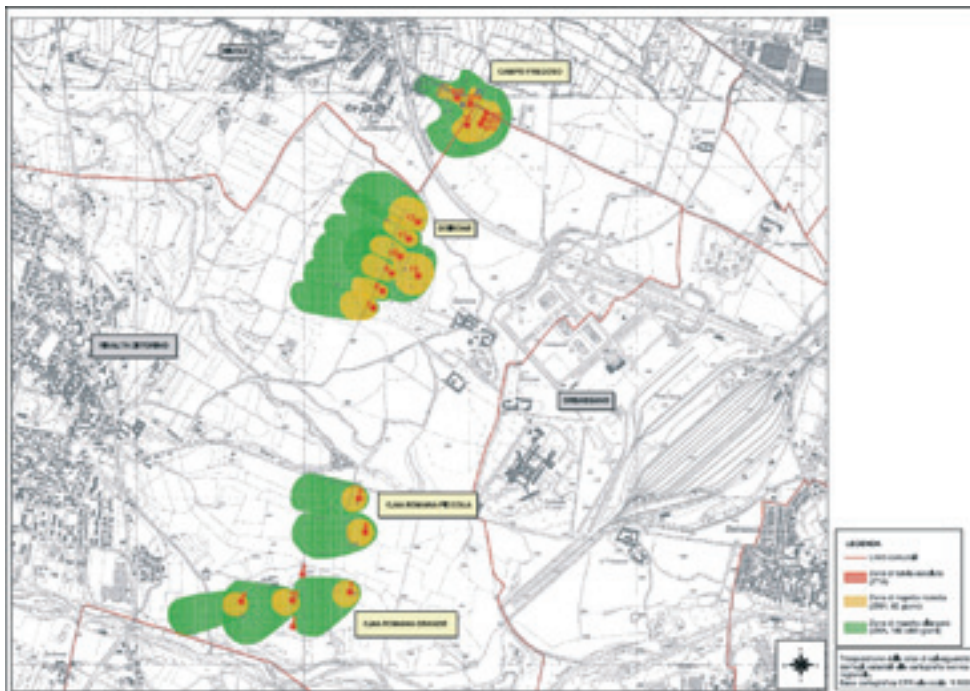


Figura 8. Perimetrazione delle aree di salvaguardia per i pozzi in esame (scala 1:15000).

Figure 8. Wellhead protection areas delineation (scale 1:15000).

Per quanto attiene il dimensionamento della ZRR, è stata eseguita una simulazione con tempo di sicurezza a 60 giorni. La ZRA è stata dimensionata utilizzando come tempo di sicurezza l'isocrona 365 giorni, appropriata per le aree in cui la vulnerabilità intrinseca dell'acquifero è stata stimata "alta", e 180 giorni per le aree caratterizzate

da una "media" vulnerabilità intrinseca dell'acquifero.

Nella Figura 8 viene riportata la proposta di perimetrazione così ottenuta per i campi pozzi in esame, in scala 1:10000 su base CTR, con indicazione della posizione del pozzo.

## Bibliografia

G. Bortolami, D.A. De Luca, L. Masciocco, A. Morelli di Popolo e Ticineto (2002). *Le acque sotterranee della Provincia di Torino. Carta della base dell'acquifero superficiale*. Assessorato Risorse idriche e atmosferiche, Prov. Torino, Lit. Savigliano. [http://www.provincia.torino.it/ambiente/risorse\\_idriche/pubblicazioni/acquesott](http://www.provincia.torino.it/ambiente/risorse_idriche/pubblicazioni/acquesott)

V.Coccolo, R.Polino, P.Cadoppi, G.Fioraso, S.Tallone (2007). *Progetto CARG - Carta*

*Geologica d'Italia, scala 1:50.000, Foglio n. 155 "Torino Ovest"*.

[http://www.apat.gov.it/Media/carg/Rilevamenti\\_Def/155/155.htm](http://www.apat.gov.it/Media/carg/Rilevamenti_Def/155/155.htm)

Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R.J., and Hackett G., (1987). *DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings*. NWWA/EPA Series, EPA-600/2-87-035.

Foster S.S.D. (1987). *Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy*. Proc. Int. Conf. vulnerability of soil and groundwater to pollutants, Noordwijk, The Netherlands, pp. 69-86.

Regione Piemonte (2007). *Piano di tutela delle acque (PTA)*. D.C.R. n. 117-10731 del 13 marzo 2007.





## Modello preliminare di flusso e di trasporto di calore nella Provincia di Verona

Alberto Rainero<sup>1</sup>, Enrico Nucci<sup>2</sup>, Umberto Puppini<sup>1</sup>, Michele Remonti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ESI Italia srl, Milano, albertorainero@esinternational.it, umbertopuppini@esinternational.it, micheleremonti@esinternational.it

<sup>2</sup>Studio Nucci & Associati, studionucci@enriconucci.191.it

### *Preliminary groundwater and heat transport model in Verona Province*

**ABSTRACT:** ESI Italia realized a preliminary groundwater flow and heat transport model to assess the feasibility of using groundwater as heat reservoir for an open loop GSH plant in Verona. Based on a former regional groundwater flow model built with MODFLOW to calculate the hydrogeological balance of the Verona Province, a telescopic mesh refinement has been realized to make predictions at the local scale. Flow simulations has been carried out considering different wells configurations with 4 or 5 pumping wells and 4 injection wells, two flow rates (400 and 800 l/s) and different temperature changes between abstracted and injected water. The heat transport model was aimed to predict temperature variations of the abstracted water on a long term base and to optimize the wells distribution to reduce the chances of thermal breakthrough between injection and abstraction wells and the rate of temperature changes in the abstracted water.

*Key terms:* Heat transport model, Feasibility study

*Termini chiave:* Modello di trasporto di calore in falda, Studio di fattibilità

### **Riassunto**

ESI Italia e Studio Nucci sono stati incaricati di realizzare un modello preliminare di flusso e di trasporto di calore per verificare la fattibilità dell'impiego di acqua di falda per alimentare un impianto di scambio termico falda/falda, previsto nel territorio veronese. Il progetto prevede pozzi di prelievo a portata costante, la circolazione dell'acqua nell'impianto e la sua restituzione in falda mediante altri pozzi alle medesime portate, con acqua di falda alla temperatura di progetto di 15°C.

Il modello di flusso è stato estratto dal modello della falda superficiale dell'acquifero di pianura della Provincia di Verona (ESI Italia per AGSM Verona, 2004) realizzato col codice alle differenze finite *MODFLOW* (McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988.), tramite l'esportazione di un TMR (*Telescopic Mesh Refinement*) relativo all'area dell'impianto di scambio termico a Verona. Il modello di trasporto di calore è stato realizzato con *MT3D*, un codice numerico per la simulazione del trasporto di contaminanti.

L'ubicazione dei pozzi di prelievo e restituzione è stata scelta per minimizzare l'incremento di temperatura nei pozzi di prelievo, riducendo la cortocircuitazione tra pozzi di iniezione e pozzi di prelievo per conservare l'efficienza dell'impianto. Sono state simulate due diverse disposizioni dei pozzi, la prima con i pozzi di prelievo e restituzione disposti parallelamente tra loro e in asse con la direzione di flusso della falda, la seconda con le due

serie di pozzi sfalsati.

Per le due diverse disposizioni dei pozzi sono stati simulati scenari con portata di 400 e 800 l/s e con differenti variazioni termiche tra l'acqua prelevata e quella reimpressa. In tutti gli scenari la valutazione dei risultati è stata effettuata a 10 e 50 anni di funzionamento dell'impianto.

### **Introduzione**

L'area in oggetto di studio appartiene all'Unità dell'Alta Pianura Occidentale (Dal Prà *et alii*, 1978), caratterizzata da un acquifero indifferenziato interessato dal flusso di una falda libera.

L'acquifero è formato dalle alluvioni fluvio-glaciali e fluviali del Fiume Adige (Figura 1) che si sovrappongono ai depositi risalenti ai periodi interglaciali Riss e, in minor misura, Wurm (Barbieri G. *et alii*, 1981a e 1981b) che formano la maggior parte del volume del conoide di deiezione allo sbocco della Val d'Adige nella Pianura Padana. L'Unità è delimitata a Nord dall'Unità dei Lessini occidentali, a Ovest dall'Unità Morenica del Garda, a Sud dalla fascia dei fontanili che la separa dall'Unità della Bassa Pianura indifferenziata e a Est dall'Unità dell'Alta Pianura Orientale, da cui è convenzionalmente separata dal corso del Torrente Fibbio.

La distinzione tra le Unità dell'Alta Pianura occidentale e quella dell'Alta Pianura Orientale (Dal Prà

et alii, 1978) è di tipo idrogeologico perchè l'unità occidentale si estende nel settore di alta pianura in cui l'Adige svolge un'azione di ricarica della falda mentre in quella orientale il fiume svolge un'azione drenante o comunque viene meno l'effetto d'alimentazione. In particolare nell'Unità dell'Alta Pianura occidentale i principali apporti idrici provengono dalla zona apicale del conoide dell'Adige, vale a dire dall'alveo e dal subalveo del fiume.

La separazione tra Alta e Bassa Pianura (Zanferrari et alii, 1982) invece è sostanzialmente legata alla variazione della granulometria dei depositi, più grossolana a monte della linea dei fontanili e con orizzonti fini via via più frequenti procedendo verso Sud e Sud-Est, a valle della zona delle risorgive (Dal Prà et alii, 1978). Lo spessore dei sedimenti prevalentemente grossolani dell'Unità dell'Alta Pianura occidentale non è noto con precisione ma, sulla base dei dati stratigrafici dei pozzi presenti, si può ammettere che sia superiore a 150 m.

### Modello di flusso regionale

Il modello di flusso regionale utilizzato per l'estrazione del modello di dettaglio è ampio circa 50 x 60 Km, è in regime stazionario e si riferisce all'intero territorio della Pianura Veronese.

Il valore di ricarica areale media è stato calcolato per ogni Unità idrogeologica secondo la seguente equazione:

$$R = Pe \times CIP - Q_{civ} - Q_{prod} + Q_a + Q_f$$

dove:

$R$  = ricarica areale (m/g);

$Pe$  = afflusso dovuto a precipitazione efficace (m/g);

$CIP$  = coefficiente d'infiltrazione potenziale (adimensionale);

$Q_{civ}$  = deflusso dovuto a pompaggio da pozzi per uso civile (sia pozzi pubblici che privati);

$Q_{prod}$  = deflusso dovuto a pompaggio da pozzi per uso produttivo (sia pozzi pubblici che privati);

$Q_a$  = afflusso dovuto a perdita dalla rete acquedotto (m/g);

$Q_f$  = afflusso dovuto a perdita dalla rete fognaria (m/g).

Per l'area in oggetto di studio, i valori di ricarica inseriti nel modello sono pari rispettivamente a  $8,83 \times 10^{-4}$  per le aree agricole e  $8,83 \times 10^{-5}$  m/g per l'urbanizzato, calcolati sulla base dei dati medi di precipitazioni ed evapotraspirazione e di appropriati valori di coefficiente di infiltrazione potenziale e successivamente ottimizzati nell'ambito della calibrazione del modello regionale.

Sulla base delle indicazioni ottenute da stratigrafie di pozzi e della Carta Geologica d'Italia Fogli 48 e 49 (Servizio Geologico d'Italia), sono state definite differenti zone di conducibilità idraulica (Figura 2).

Le quote del piano campagna sono state ottenute interpolando con *Surfer 8* le quote dei capisaldi CTR fornite da AGSM per buona parte dell'area del modello e importando nel modello la superficie risultante.

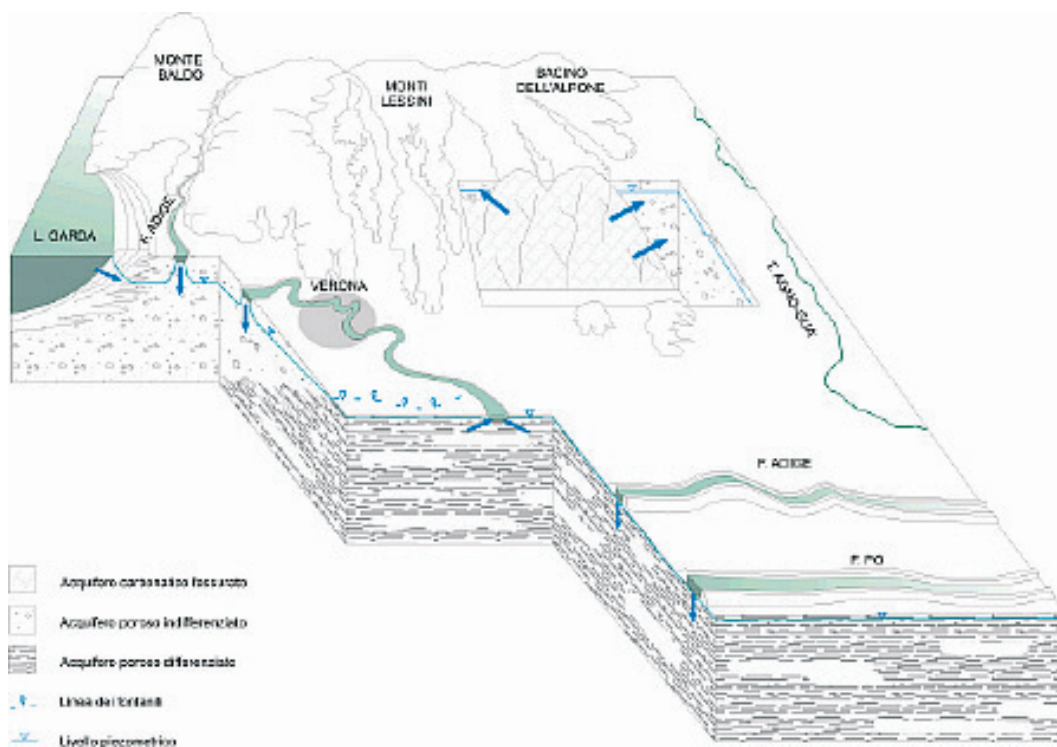


Figura 1. Modello Concettuale.

Figure 1. Conceptual model.

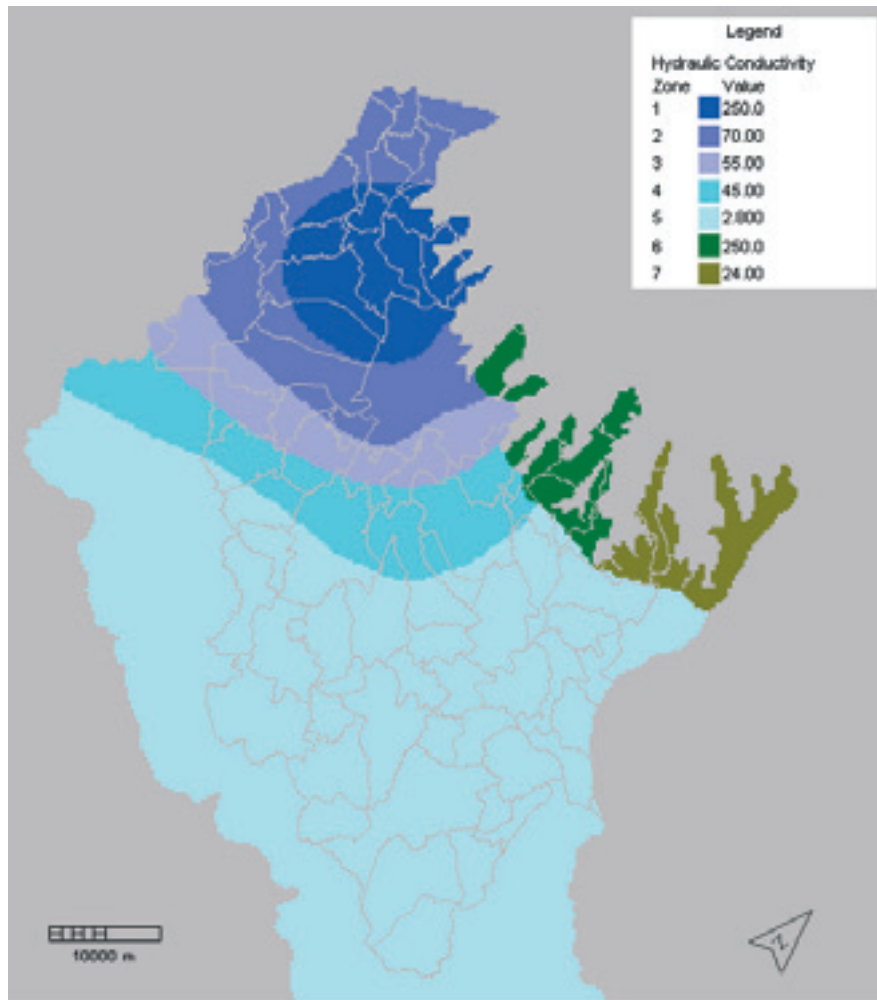


Figura 2. Valori di conducibilità idraulica (m/g) inseriti nel modello.  
 Figure 2. Hydraulic conductivity (m/d) values.

La quota della base dell'acquifero è stata mantenuta per tutta l'area del modello costante e pari a -200 m s.l.m. Questa scelta non influenza significativamente il risultato della simulazione di flusso effettuata poiché la forma delle zone di conducibilità idraulica e i valori inseriti del parametro sono stati scelti in modo da ottenere valori corretti di trasmissività dell'acquifero in ogni zona del modello (Figura 3).

### Modello di dettaglio a due strati

Il modello di dettaglio estratto dal modello regionale si riferisce ad un'area ampia 5,5 x 5,5 Km ubicata nell'Unità dell'Alta Pianura Occidentale ed è stato estratto da quello generale realizzato per AGSM nel 2004 (ESI Italia per AGSM Verona, 2004). Il TMR estratto ha una griglia di 50 x 50 m infittita sino a 5 x 5 m nell'area d'interesse. Come condizione al contorno interna al modello, rappresentata da celle di tipo River, è stato ridefinito il Fiume Adige migliorando l'accuratezza della digitalizzazione rispetto al modello originario.

Il modello è stato suddiviso in due strati in modo da rappresentare correttamente le quote dei filtri dei pozzi di progetto. La calibrazione del modello di flusso è stata verificata ottenendo risultati accettabili per il livello di approfondimento necessario per il lavoro. La verifica di calibrazione è stata eseguita sia in condizioni statiche che dinamiche, utilizzando i dati delle prove di pompaggio eseguite presso i campi pozzi Polidore, Chioda, La Genovese, Basso Acquar, Porta Palio (Tabella 1).

Sono stati riportati solo i dati d'abbassamento misurato nel tratto lineare della curva caratteristica dei pozzi perché le perdite di carico totali in pozzo sono determinate dalla somma delle perdite di carico in falda, che hanno andamento lineare rispetto alla portata, e in pozzo, che hanno andamento esponenziale secondo l'espressione  $s = BQ + CQ^n$ . Pertanto in prima approssimazione è stata accettata l'ipotesi che le perdite di carico misurate nel pozzo, nel tratto lineare delle curve caratteristiche, esprimano prevalentemente le perdite di carico in falda e, dunque, che il valore medio degli



abbassamenti riportati, pari a 1 m, sia confrontabile con il valore di abbassamento piezometrico simulato dal modello a parità di portata estratta.

Tabella 1 – Abbassamenti piezometrici in pozzo per  $Q=100$  l/s.  
 Table 1 – Groundwater drawdown in abstraction wells ( $Q=100$  l/s).

Campo pozzi	Abbassamenti (m)
Polidore 2	1,1
Chioda 1	1,6
Chioda 2	1,6
Chioda 3	1,0
Chioda 4	0,7
Chioda 5	0,6
La Genovesa 1	0,6
Basso Aquar 4	0,7
Basso Aquar 5	0,5
P. Palio1	2,0
P. Palio2	1,2
P. Palio3	1,0
P. Palio5	0,5

Poiché l'abbassamento simulato è risultato pari a 1,24 m, il modello è stato considerato cautelativo perché sovrastima la deformazione della falda provocata dal pompaggio. Nel modello di flusso calibrato sono stati inseriti quattro pozzi di prelievo con portata unitaria  $Q_u=$

100 l/s o  $Q_u=200$  l/s per una portata totale  $Q_{tot}=400$  l/s o  $Q_{tot}=800$  l/s e quattro pozzi di restituzione delle medesime portate, con una configurazione in asse con la direzione di flusso (Figura 4); in seguito sono state eseguite altre simulazioni con le medesime portate ma con i pozzi in configurazione sfalsata (Figura 5).

### Previsione dell'evoluzione del trasporto di calore in falda

Utilizzando il modello di dettaglio con pozzi di presa e di resa in asse alla portata di  $Q_{tot}=800$  l/s sono state realizzate differenti simulazioni di trasporto di calore in falda, imponendo per i pozzi di restituzione a valle diversi valori di salto termico (2,1°C, 4°C, 6°C e 8°C), con durata di simulazione pari a 10 e 50 anni, con falda alla temperatura di progetto pari a 15°C. Sono stati elaborati differenti scenari, con i pozzi allineati e con i pozzi sfalsati tra di loro e con pompaggi differenti pari rispettivamente a 800 l/s e 400 l/s. I risultati hanno evidenziato che per i pozzi allineati ed alla portata  $Q_{tot}=800$  l/s, dopo 50 anni il salto termico previsto in falda presso il punto di iniezione è pari a 1,20 °C (Figura 6).

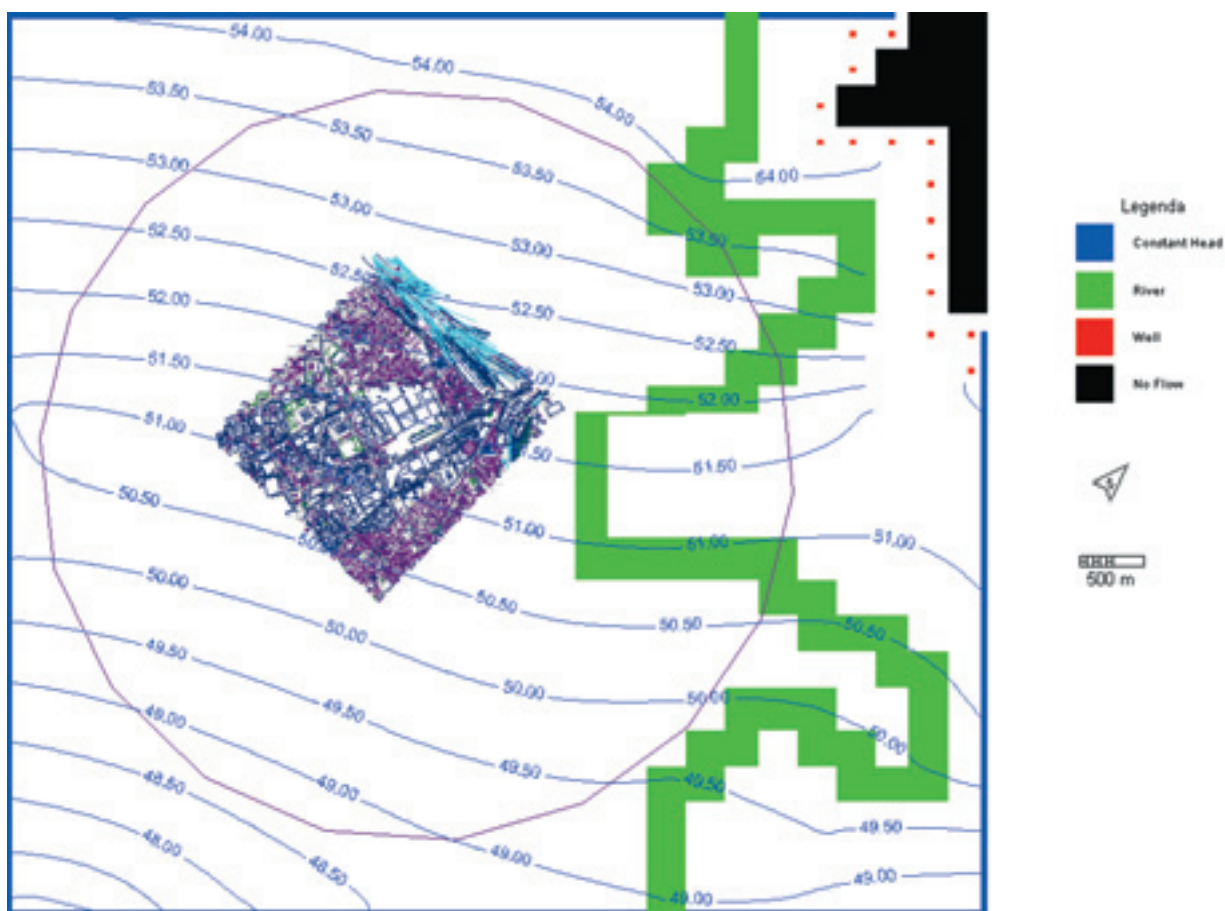


Figura 3. Simulazione statica del livello piezometrico.  
 Figure 3. Groundwater levels.

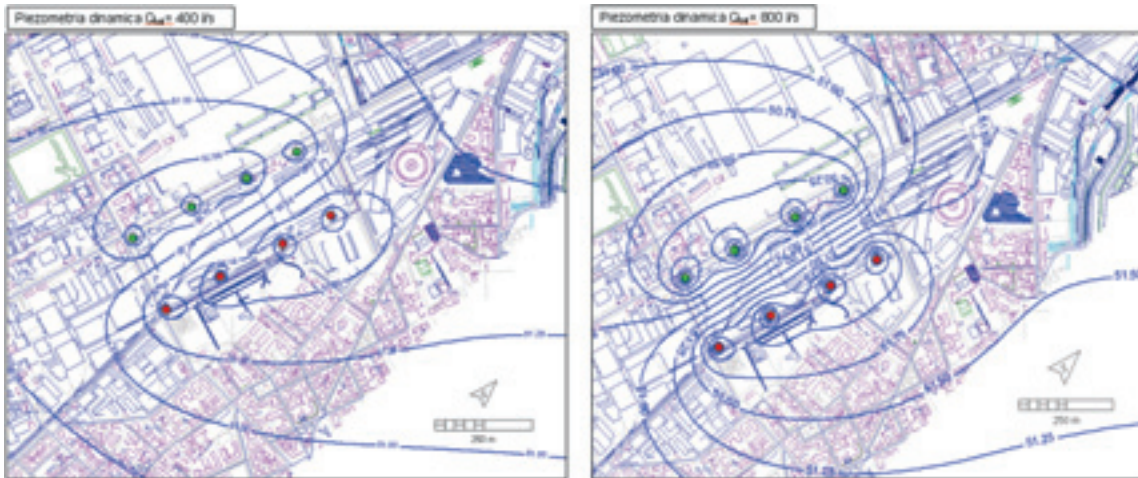


Figura 4. Piezometria dinamica con pozzi presa (in verde) e resa (in rosso) allineati lungo la direzione di flusso.  
*Figure 4. Pumping groundwater head contours with downward aligned abstraction (green) and injection (red) wells.*

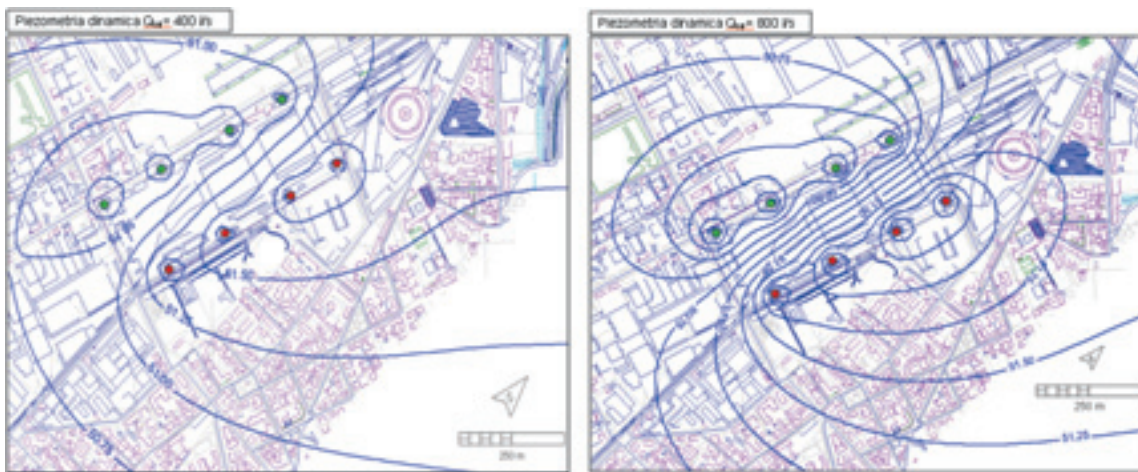


Figura 5. Piezometria dinamica con pozzi presa (in verde) e resa (in rosso) sfalsati rispetto alla direzione di flusso.  
*Figure 5. Pumping groundwater head contours with unaligned abstraction (green) and injection (red) wells.*

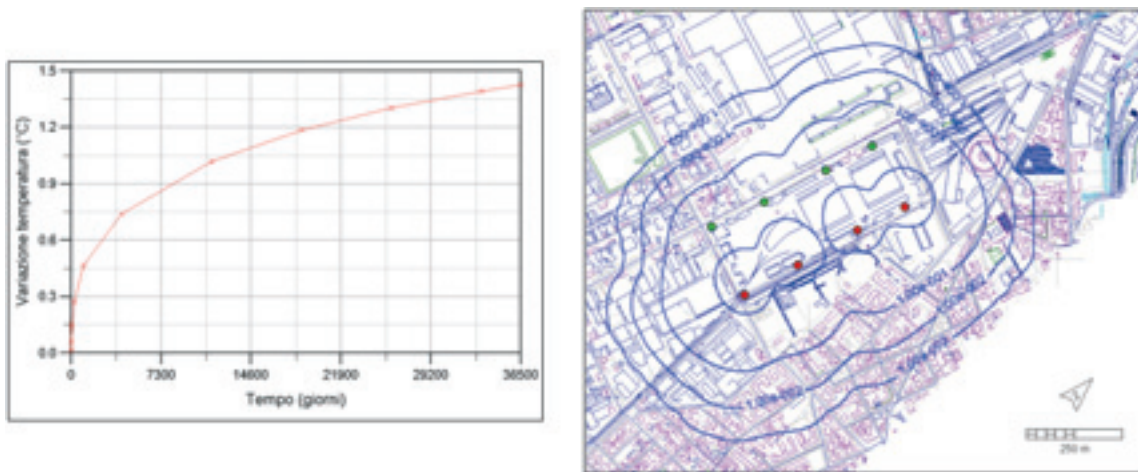


Figura 6. Previsione evoluzione trasporto calore in falda a 50 anni con pozzi presa (in verde) e resa (in rosso) allineati lungo la direzione di flusso.  
*Figure 6. Heat transport simulation after 50 years (downward aligned well configuration) with abstraction (green) and injection (red) wells.*



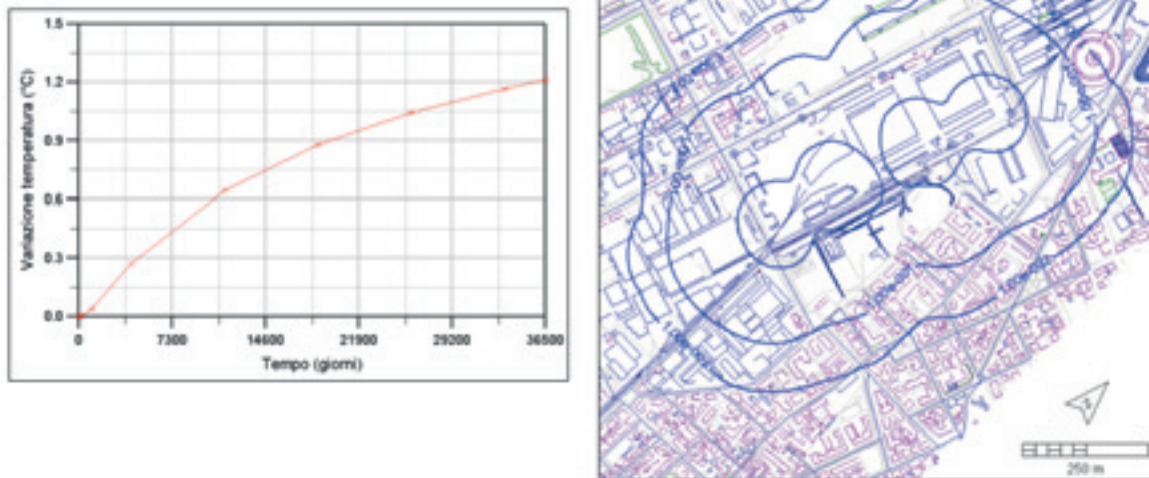


Figura 7. Previsione evoluzione trasporto calore in falda a 50 anni con pozzi presa (in verde) e resa (in rosso) sfalsati rispetto alla direzione di flusso.

*Figure 7. Heat transport simulation after 50 years (unaligned well configuration) with abstraction (green) and injection (red) wells.*



Figura 8. Previsione evoluzione trasporto calore in falda a 50 anni con pozzi presa (in verde) e resa (in rosso) a quote differenziate e in posizioni definite dal cliente.

*Figure 8. Heat transport simulation after 50 years with abstraction (green) and injection (red) wells screened at different elevations.*

Mantenendo le stesse condizioni di pompaggio ( $Q_{tot} = 800 \text{ l/s}$ ), ma utilizzando i pozzi in configurazione sfalsata (Figura 7) dopo 50 anni la variazione attesa al punto di iniezione è pari  $1,18 \text{ }^\circ\text{C}$ . In entrambi gli scenari anche dopo un tempo di simulazione di 100 anni non è stato raggiunto il valore di  $3^\circ\text{C}$ . Il salto termico di  $3^\circ\text{C}$  utilizzato nelle simulazioni, si riferisce a quanto esplicitato nell'Allegato II, Parte IV del D. Lgs. 152/2006 per ciò che concerne le variazioni di temperatura ammissibili negli scarichi in corpi d'acqua superficiali, dal momento che non esistono indicazioni di tipo numerico per quel che riguarda le acque sotterranee.

### Modello di dettaglio a 3 strati

In ultima analisi è stato realizzato uno scenario ipotizzando la restituzione dell'acqua a quote inferiori a quelle di prelievo tramite il ricorso ad un modello a 3 strati introducendo una configurazione conforme alle tipologie delle opere e della struttura idrogeologica: a) strato 1, da  $-10 \text{ m}$  a  $-40 \text{ m}$  dal p.c. (quota filtri pozzi presa); b) strato 2, da  $-40 \text{ m}$  a  $-50 \text{ m}$  dal p.c.; c) strato 3, da  $-50 \text{ m}$  a  $-270 \text{ m}$  dal p.c. Con il nuovo modello sono state realizzate differenti simulazioni di trasporto di calore in falda, imponendo per i pozzi di restituzione a valle un



unico valore di salto termico (2,1°C), con durata di simulazione pari a 10 e 50 anni, con 5 pozzi di presa con  $Q_u = 160$  l/s e 4 pozzi di resa alla portata di  $Q_u = 200$  l/s.

La previsione di variazione di temperatura della falda con presa e resa a quote differenti e nelle posizioni indicate dal cliente (Figura 8) è risultata di 0,022 °C dopo 10 anni e di 0,18 dopo 50 anni. In sintesi appare opportuno usare la cautela di restituire l'acqua a quota leggermente inferiore a quella di prelievo, vale a dire oltre 40 m dal p.c., pur rimanendo nella stessa falda.

## Conclusioni

Tutte le simulazioni fatte nei diversi scenari esprimono un'attesa d'incremento di temperatura ai pozzi di restituzione, che investe anche i pozzi di prelievo già alla fine dei 10 anni di esercizio, nel caso con  $\Delta T = 2,1^\circ\text{C}$ . La disposizione sfalsata dei pozzi determina salti termici in falda lievemente minori rispetto a quella con i pozzi allineati ma solo durante le fasi iniziali della simulazione. Le differenze tra il caso con pozzi in asse e quello con i pozzi sfalsati si attenuano nel tempo e dopo 50 anni praticamente si annullano. Pertanto il cambiamento di allineamento dei pozzi non migliora significativamente la prestazione per ciò che riguarda la variazione di temperatura della falda. Con buona probabilità, la simulazione della variazione dei carichi e, conseguentemente, della domanda d'acqua da parte

dell'impianto eseguita con un modello di flusso in regime transitorio nel complesso consentirebbe di ottenere una migliore definizione e, probabilmente, una riduzione dell'espansione spaziale e temporale della bolla di calore.

Le simulazioni fatte con disposizione dei pozzi con pompaggio e restituzione alla medesima quota dimostra che a 10 e a 50 anni si ha un'attesa di incremento di temperatura che investe tutti i pozzi di presa con valori crescenti nel tempo da 2 ad oltre 7 decimi di grado. Nel caso di pompaggio e restituzione a quota differenziata le simulazioni a 10 e a 50 anni per portata e temperatura di progetto presentano un'attesa di incremento di temperatura ai pozzi di restituzione e di presa, con valori crescenti nel tempo da 0,2 a meno di 2 decimi di grado. Allo stato attuale delle verifiche, la soluzione prospettata nello scenario con presa e resa a quote differenziate, offre performance più conservative della condizione originale ai pozzi di prelievo.

Dal momento che non esistono, dal punto di vista normativo, indicazioni sulle variazioni di temperatura ammissibili per lo scarico nelle acque sotterranee, i modelli di previsione dell'evoluzione della bolla di calore in falda sembrano rappresentare un utile tassello nella stesura dei Piani d'Indagine che le Autorità preposte alla concessione degli scarichi in falda possono richiedere in fase di autorizzazione (art. 104, comma 2 del D. Lgs. 152/2006).

## Bibliografia

Barbieri G., Castellarin A., De Zanche V. & Sedeo R., 1981b. *Carta tettonica delle Alpi Meridionali (alla scala 1:200.000). Foglio 36 Schio*. Pubblicazione n° 441. P.F. Geodinamica (S.P. 5). C.N.R. 113-119.

Barbieri G., Mietto P., Sedeo R., 1981b. *Carta tettonica delle Alpi Meridionali (scala 1:200.000). Foglio 49 Verona*. Pubblicazione n° 441, P.F. Geodinamica (S.P. 5), C.N.R., 107-112.

Dal Prà A., Antonelli R. *Ricerche idrogeologiche e litostratigrafiche nell'alta pianura alluvionale del fiume Adige*. Quaderni dell'Istituto di Ricerca sulle Acque, 34 (5).

ESI Italia per AGS Verona, 2004. *Modello di*

*Flusso per l'Ottimizzazione della Gestione Quantitativa e Qualitativa delle Risorse Idriche nell'AATO Veronese*.

McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988. *A modular three dimensional finite difference ground-water flow-model*. USGS-TWRI, Book 6, Chap. 1.

Piccoli G., Bellati R., Binotti C., Di Lallo E., Sedeo R., Dal Prà A., Cataldi R., Gatto G.O., Ghezzi G., Marchetti M., Bulgarelli G., Schiesaro G., Panichi C., Tongiorgi E., Baldi P., Ferrara G.C., Massari F., Medizza F., Ilceto V., Norinelli A., De Vecchi G.P., Gregnanin A., Piccirillo E.M., G. Sbettega G., 1976. *Il sistema idrotermale euganeo-berico e la geologia dei*

*Colli Euganei*. Mem. Ist. Geol. Miner. Univ. Padova, 30, Padova, pp. 1-266.

Servizio Geologico d'Italia. *Carta Geologica d'Italia. Fogli n. 48, 49, 62, 63*. (Scala 1:100.000).

Zanferrari A. et al., 1982. *Evoluzione neotettonica dell'Italia nord-orientale*. Mem. Sc. Geol. Univ. di Modena Ist. di Geol., 355-376.

Zanferrari A., 1972. *Primi risultati di uno studio geologico sugli Alti Lessini centro-orientali tra la Valle dell'Agno ed il Progno d'Ilasi*. Mem. Acc. Pat. Sc. Lett. Arti, Cl. Sc. Mat. Fis. Nat., 84, 23-50.



## Studi idrogeologici in ambito urbano: gli esempi del VI e XI Municipio della Città di Roma

Giuseppe Capelli, Roberto Mazza, Sara Taviani

Dipartimento di Scienze Geologiche, Università degli Studi "Roma Tre"  
capelli@uniroma3.it, mazza@uniroma3.it, staviani@uniroma3.it

*Hydrogeologic studies in urban areas: case studies in the 6th and 11th sub-municipalities of Rome*

**ABSTRACT:** The hydrogeological setting of the area of Rome is extremely diversified owing to the occurrence of numerous hydrogeological units and systems. The right bank area of the Tiber river hosts low-discharge aquifers. Groundwater flowpaths are highly affected by the Monte Mario structural high, which rests on low-permeability formations. The left bank area of the Tiber river accommodates the north-western ramification of the Alban hydrogeological unit. This unit sustains much more substantial discharge and recharge processes. These conditions give rise to a perennial drainage network and to aquifer-river interactions that the Authors identified and quantified as part of numerous survey programmes conducted over multiple decades. The drainage network in the urban area has been significantly altered, even in areas where the river landscape might have been an environmental resource. The paper reports the findings from some investigations, which were carried out to identify geological risks in some areas of Rome. Hydrogeological analysis played a key role in these investigations.

*Key terms:* Hydrogeology, Urban areas, Geological hazard  
*Termini chiave:* Idrogeologia, Aree urbane, Rischi geologici

### Riassunto

La Città di Roma è caratterizzata da un'abbondanza d'acqua, testimoniata dalla presenza dei Fiumi Tevere e Aniene, da un consistente reticolo di corsi d'acqua minori, dall'ingente risorsa sotterranea e dalla presenza diffusa di sorgenti. Roma e i suoi dintorni si estendono su cinque unità idrogeologiche: l'Unità dei Monti Sabatini a nord; l'Unità dei Colli Albani a sud-est; l'Unità della formazione di Ponte Galeria a ovest; l'Unità dei depositi alluvionali recenti e attuali e l'Unità del Delta del Fiume Tevere a sud ovest. Le argille del Pliocene, appartenenti al complesso dei depositi neogenici, hanno la funzione di *aquiclude* relativamente a tutte le unità idrogeologiche. Queste argille, che raggiungono spessori di oltre 800 metri, possono essere considerate come *bedrock* dell'area. L'idrogeologia del territorio romano è caratterizzata dalla presenza dei depositi vulcanici dei Colli Albani e di quelli dei Monti Sabatini che ricoprono le coltri del ciclo sedimentario della formazione di Ponte Galeria. L'insieme di questi complessi ospita i principali acquiferi dell'area romana, con una differenza di circolazione e di potenziale degli acquiferi in destra e sinistra del Fiume Tevere. Altri acquiferi sono rappresentati dalle *facies* ghiaiose e sabbiose, non sempre continue, legate ai depositi alluvionali recenti e attuali, presenti nell'esteso reticolo idrografico. Alle formazioni naturali si aggiunge una spessa ed estesa coltre di terreni di riporto, a volte

saturi per ricarica zenitale e perdite delle reti idriche. È interessante notare come molti dei corsi d'acqua perenni, una volta presenti nel contesto urbano, siano oggi o integrati nel reticolo dei grandi collettori fognari o del tutto ritombati dalle coltri di riporto. Questa situazione ha spesso definito delle situazioni di dissesto urbano legate alle interferenze tra falde e fondazioni. Analoghi problemi di dissesto sono stati individuati anche in aree ove sono estesamente presenti reticoli caveali derivati dalla coltivazione mineraria che ha interessato la città dai tempi remoti.

### I complessi idrogeologici e la circolazione idrica sotterranea

Il territorio comunale si estende su domini geologici diversi in cui si individuano cinque unità idrogeologiche (Figura 1) (Capelli & Mazza, 2005); l'assetto strutturale e il rapporto di scambio idrico tra queste condizionano l'assetto idrogeologico e lo schema di circolazione delle acque sotterranee nel territorio di Roma:

- *Unità idrogeologica dei Monti Sabatini.* È costituita dai prodotti vulcanici emessi da centri eruttivi a nord della Città di Roma. Questa unità, pur ospitando un'interessante risorsa, nell'area urbanizzata non ha una grande rilevanza idrogeologica, anche a seguito del modesto spessore dei depositi e della loro discontinuità. Inoltre, la circolazione sotterranea di questa unità è



condizionata dalla presenza e dalla morfologia di complessi geologici a bassa permeabilità, soprattutto nel settore occidentale della città.

- *Unità idrogeologica dei Colli Albani*. E' costituita dai prodotti vulcanici emessi da centri eruttivi ubicati a sud est della città. In questo dominio, essendo il substrato argilloso prevulcanico mediamente molto depresso come quota, gli acquiferi risultano caratterizzati da elevato spessore e drenano verso i Fiumi Tevere e Aniene, senza trovare particolari ostacoli alla circolazione idrica sotterranea (Figura 2). Questa unità idrogeologica sostiene anche il flusso di base di numerosi corsi d'acqua minori che risultano spesso inglobati nel sistema fognario all'interno del Grande Raccordo Anulare, ma sono ancora visibili nelle aree periferiche della città.

- *Unità idrogeologica della formazione di Ponte Galeria*. E' costituita da sedimenti di tipo marino, fluviale

e palustre, distribuiti ampiamente nell'area di studio. Fino agli anni sessanta questa unità ospitava due acquiferi principali, uno superiore a falda libera ed uno inferiore a falda confinata, ma, a seguito dell'ingente attività estrattiva, si è avuta, in quarant'anni, una perdita di risorsa idrica notevole e uno stravolgimento della circolazione sotterranea.

*Unità idrogeologica dei depositi alluvionali recenti e attuali*. Questa unità comprende i depositi dei due più importanti corsi d'acqua perenni presenti nella città, il Tevere e l'Aniene, nonché quelli del reticolo idrografico secondario. Si tratta di una serie di depositi limoso sabbiosi con la presenza di potenti livelli sabbiosi e ghiaiosi, soprattutto verso la base (Figura 3). Per questo motivo essa ospita una falda confinata, caratterizzata da una notevole continuità longitudinale.

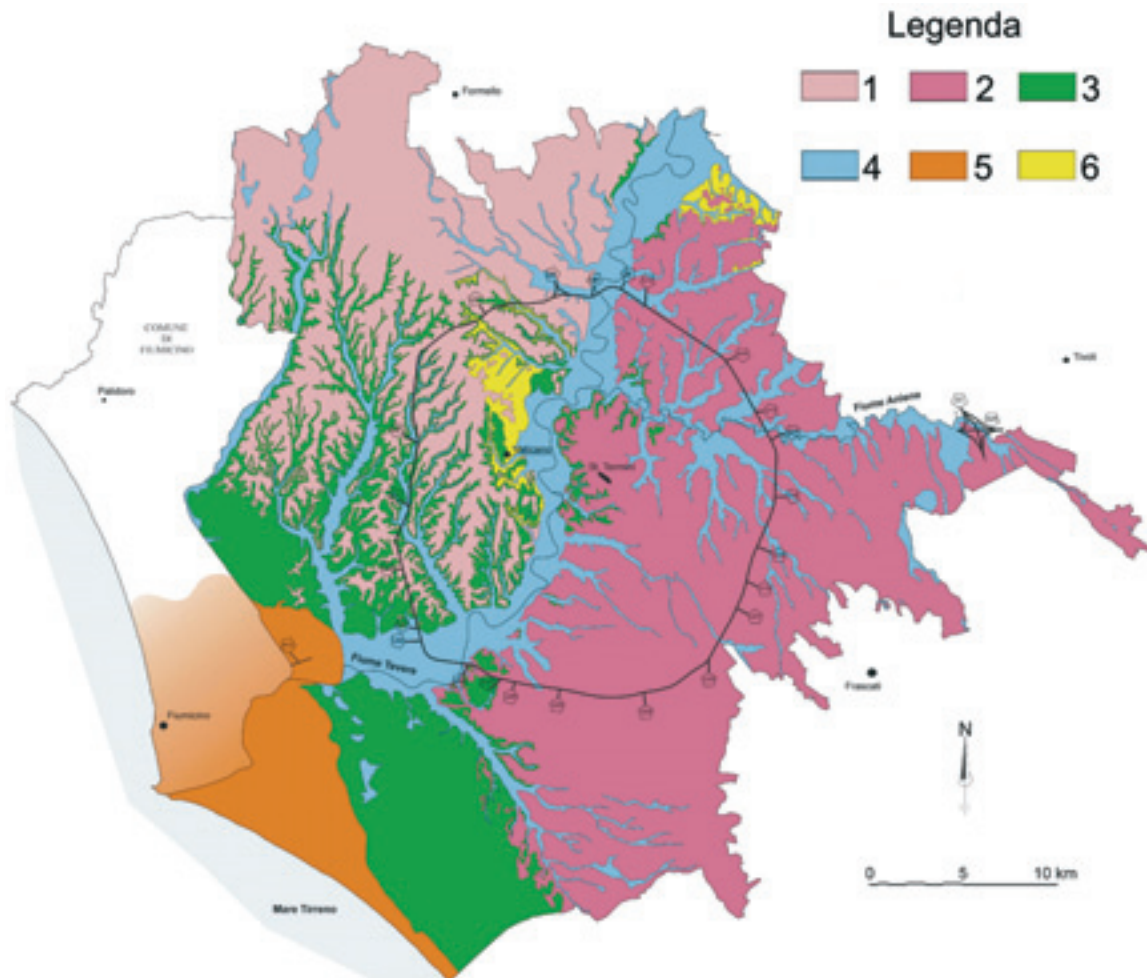


Figura 1. Carta delle Unità Idrogeologiche (UI) del territorio romano (da Capelli & Mazza, 2005). Legenda: 1: UI dei Monti Sabatini; 2: UI dei Colli Albani; 3: UI di Ponte Galeria; 4: UI dei depositi alluvionali recenti e attuali; 5: UI del Delta del Fiume Tevere; 6: Complesso Idrogeologico dei depositi argilloso-marnosi a bassa permeabilità.

*Figure 1. Map of the Hydrogeological Units (HU) of the Roman area (from Capelli & Mazza, 2005). Legend: 1: Sabatini Mts. HU; 2: Alban Hills HU; 3: Ponte Galeria HU; 4: HU of recent and present alluvia; 5: Tiber river delta HU; 6 – Hydrogeological system of clayey-marly deposits of low permeability.*

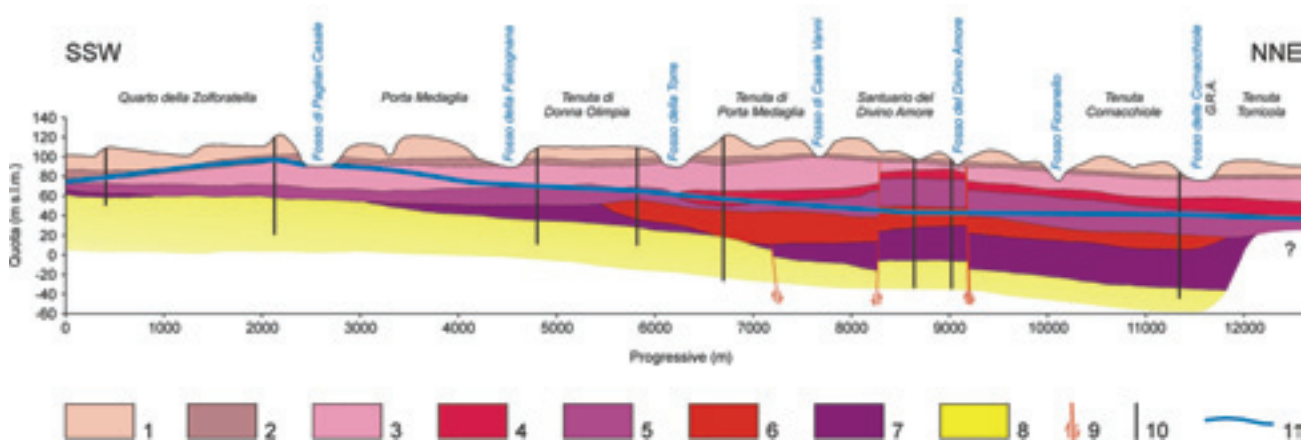


Figura 2. Profilo geologico nell'Unità idrogeologica dei Colli Albani (da Capelli *et alii*, 2005). Legenda: 1: Pozzolanelle; 2: Tufo Lionato o Litoide; 3: Pozzolane Nere; 4: Lave di Fosso Tre Rami; 5: Pozzolane Rosse; 6: Lave di Vallerano; 7: Tufi pisolitici; 8: Depositi sedimentari prevulcanici; 9: Faglia presunta; 10: Pozzo o perforazione; 11: Livello piezometrico.

Figure 2. Geological cross section of the Alban Hills hydrogeological unit (from Capelli *et alii*, 2005). Legend: 1 – Pozzolanelle; 2 – Tufo Lionato or Litoide; 3 – Black pozzolans; 4 – Fosso Tre Rami lavas; 5 – Red pozzolans; 6 – Vallerano lavas; 7 – Pisolitic tuffs; 8 – Pre-volcanic sedimentary deposits; 9 – Presumable fault; 10 – Well or borehole; 11 – Piezometric level.

– *Unità idrogeologica del Delta del Fiume Tevere*. Essa è costituita da una serie di depositi di *facies* diversa, appartenenti agli specifici ambienti sedimentari legati all'evoluzione del Delta del Tevere negli ultimi 5.000 anni, ovvero dalla stabilizzazione del livello del mare al termine dell'ultimo ciclo glacio-eustatico. Anche questa serie presenta alla base un termine ghiaioso-sabbioso che ospita un acquifero confinato di importanza locale, posto in area marginale rispetto all'area metropolitana (Figura 4) (Capelli *et alii*, 2007).

– *Complesso dei depositi neogenici*. Il complesso è costituito da argille marnose grigie e grigio-azzurre stratificate, appartenenti alla formazione di Monte Vaticano. In relazione agli spessori sempre notevoli che esso presenta in tutto il territorio romano e al bassissimo valore di permeabilità che la caratterizza, il complesso assume una funzione di *aquiclude* basale nei confronti di tutte le unità idrogeologiche precedentemente descritte.

La complessa geologia che caratterizza l'area del territorio romano, aggiornata con i rilevamenti alla scala 1:10.000 finanziati dal progetto CAR.G. (Funciello & Giordano, 2005) è stata riletta in chiave idrogeologica e, attraverso lo studio dettagliato della sequenza stratigrafica dell'area romana, sono stati definiti 21 complessi litologici che raggruppano formazioni tra loro idrogeologicamente omogenee. E' stato apportato un aggiornamento notevole alla lettura idrogeologica, riuscendo così a rappresentare le peculiarità e le complessità del contesto idrogeologico romano.

I complessi che rivestono maggiore interesse sono quelli caratterizzati da elevate permeabilità ed appartenenti alla formazione di Ponte Galeria ("Unità del Paleotevere 1") e alla formazione del Fosso della Crescenza e formazione di S. Cecilia ("Unità del

Paleotevere 2"). Oltre a queste, sono sede di importanti falde anche i depositi relativi all'attività del Vulcano Laziale, soprattutto nel settore sud orientale, dove tali depositi, notevolmente estesi, presentano spessori di diverse decine di metri.

L'evoluzione morfologica successiva alle fasi eruttive ha portato alla formazione di ingenti depositi alluvionali all'interno del sistema vallivo che si è venuto a creare in relazione alle oscillazioni del livello marino. Tali depositi presentano alla base delle *facies* ghiaiose che costituiscono degli acquiferi confinati dai successivi termini prevalentemente pelitici. Questi corpi idrici, per quanto estesi, non costituiscono un unico acquifero e le loro modalità di ricarica sono a tutt'oggi argomento di studio.

Alle formazioni naturali si aggiunge una spessa ed estesa coltre di terreni di riporto, messa in posto a seguito dei numerosi interventi urbanistici che hanno interessato la Città di Roma, soprattutto nel corso del XX secolo. Dal punto di vista idrogeologico tali depositi sono sede di circolazione idrica sotterranea, legata a una ricarica zenitale e alle perdite del sistema dei sottoservizi.

La funzione di *aquiclude* spetta al complesso delle argille di Monte Vaticano e al complesso delle argille sabbiose, limi sabbiosi e sabbie relative alla formazione di Monte Mario, in cui prevale la componente argillosa. La geometria del tetto di tale *aquiclude* risulta molto articolata e influisce fortemente sulla circolazione delle acque sotterranee.

La Carta Idrogeologica dell'area di Roma (Figura 5), realizzata dagli autori sulla base di rilievi eseguiti negli ultimi cinque anni (Capelli *et alii*, 2008), consente di valutare i rapporti esistenti tra la circolazione sotterranea, definita al tetto delle falde principali, e il reticolo idrografico sia naturale che artificiale, quest'ultimo

costituito prevalentemente dalla rete dei collettori fognari che hanno sostituito i rami fluviali preesistenti.

Inoltre, dalle linee isofreatiche, oltre all'individuazione delle principali direzioni di flusso idrico sotterraneo, è possibile individuare come siano diversi i gradienti di falda che caratterizzano le circolazioni nei differenti areali della città. Nel settore occidentale del territorio, in riva destra del Tevere, si può osservare come l'alto strutturale di Monte Mario, orientato da nord-ovest a sud-est, condiziona l'andamento delle linee di flusso delle acque sotterranee (Marra & Rosa, 1995). Esso, alle quote di interesse per la circolazione ipogea, è costituito da terreni argilloso-

sabbiosi e marnosi aventi una permeabilità molto bassa.

L'acquifero dell'Unità dei Monti Sabatini, nel suo naturale drenaggio verso il mare ed il Tevere, trovandosi ostacolato da questa struttura, si indirizza a sud-ovest verso il Torrente Arrone ed a ovest verso i bacini del Fosso della Mola – Cremera Valchetta. La ricarica dei Fossi Galeria, Magliana e minori è invece essenzialmente dovuta agli acquiferi ghiaioso-sabbiosi prevulcanici, appartenenti alla formazione di Ponte Galeria (Unità del Paleotevere 1) (Figura 6) (Marra *et alii*, 1995).

Ben diversa è la situazione in riva sinistra del Tevere, dove la potente falda albana è meno influenzata dal substrato argilloso più ribassato di quota; essa alimenta

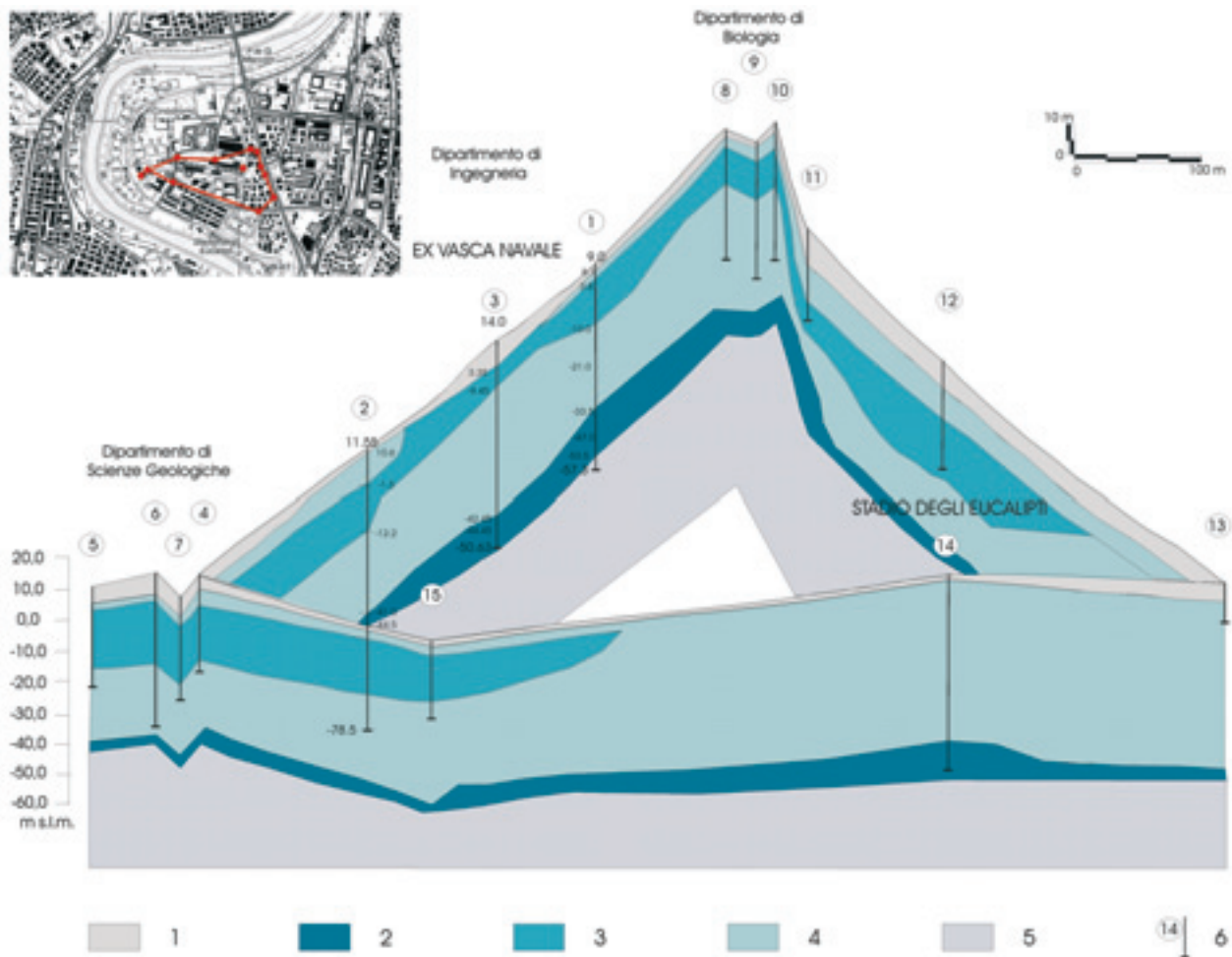


Figura 3. Diagramma a recinto nell'Unità idrogeologica dei depositi alluvionali recenti e attuali. Legenda: 1: Complesso dei materiali di riporto. Data l'estrema variabilità litologica non è stato possibile effettuare una stima della permeabilità; 2: Complesso delle *litofacies* ghiaiosa e sabbiosa. E' caratterizzato da una permeabilità da alta a medio-alta; 3: Complesso della *litofacies* sabbiosa. E' caratterizzato da una permeabilità da medio alta a media; 4: Complesso delle *litofacies* pelitica e limoso-sabbiosa. E' caratterizzato da una permeabilità da media a bassa; 5: Complesso della *litofacies* pelitica. E' caratterizzato da una permeabilità da bassa a estremamente bassa; 6: Sondaggio geognostico con numero di riferimento.

Figure 3. Diagram of the hydrogeological unit of recent and present alluvium. Legend: 1: Complex of man-made fills. The highly heterogeneous lithological composition of this complex did not make it possible to estimate its permeability; 2: Complex of gravelly and sandy lithofacies with high to medium-high permeability; 3: Complex of sandy lithofacies with medium-high to high permeability; 4: Complex of pelitic and silty-sandy lithofacies with medium to low permeability; 5: Complex of pelitic lithofacies with low to very low permeability. 6: Geognostic borehole and related database code.



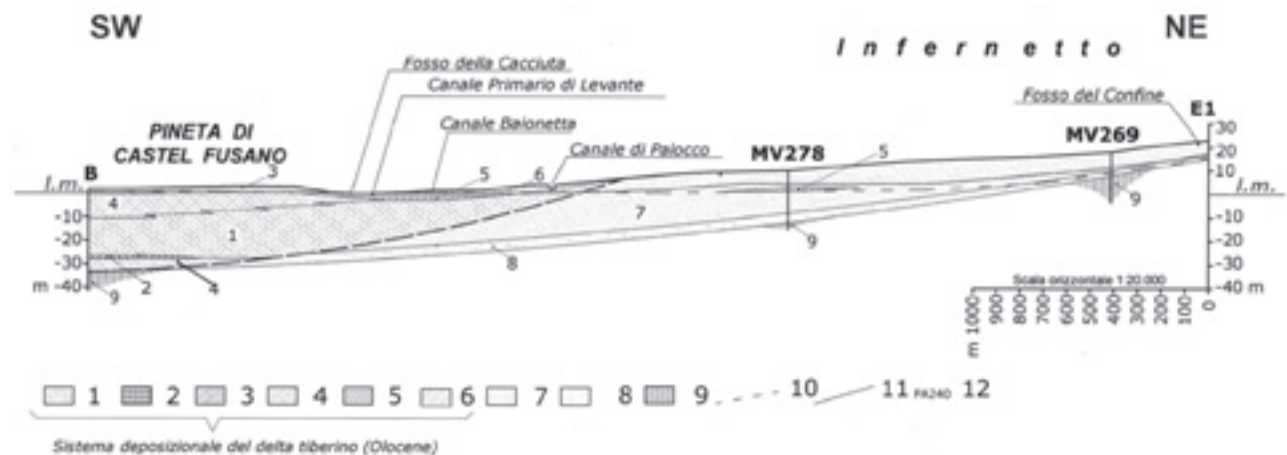


Figura 4. Profilo geologico nell'Unità idrogeologica del Delta del Fiume Tevere (da Capelli *et alii*, 2007). Legenda: 1: Sabbie grigio-giallastre, da fini a grossolane, talora con lenti di ghiaie. Spessore variabile fino a circa 20 metri. Costituiscono depositi fluviali (litofacies 1/a in Bellotti *et al.*, 1989); 2: Peliti grigie o grigio-azzurre, con frequenti sottili intercalazioni di sabbie fini, livelli di torba, lenti sabbiose. Spessore di qualche metro. Costituiscono un complesso di laguna costiera (litofacies 3 in Bellotti *et al.*, 1989); 3: Sabbie giallo-rossastre fini o medio-fini, ricche in femici, con resti vegetali, costituenti i cordoni dunari recenti e attuali. Spessore di circa 3-4 m (fino a 15 m sui cordoni più elevati) (litofacies 4/a in Bellotti *et al.*, 1989); 4: Sabbie grigie da medio-grossolane a medio-fini, ricche in femici, con conchiglie marine e resti vegetali. Costituiscono un complesso di barriera costiera. Spessore variabile da qualche metro a circa 10 m (litofacies 4/b in Bellotti *et al.*, 1989); 5: Torbe, argille organiche nerastre, talvolta sabbie nerastre, con sostanza organica in decomposizione. Presenti in lenti e strati con spessori variabili da qualche decimetro a qualche metro; 6: Peliti da grigie a giallastre talora con ghiaie fini, strutture da essiccamento, concrezioni travertinose, materiale vulcanico alterato, livelli di torba e livelli conchigliari (depositi alluvionali *latu sensu*). Spessori variabili fino a 7-8 m (litofacies 2 in Bellotti *et al.*, 1989); 7: Sabbie e sabbie debolmente limose di colore bruno-rossastro o giallastro, terrazzate a più quote. Spessori variabili da 5-10 m alle quote più elevate, fino a 20-25 m nei settori terrazzati (in parte "Duna antica" *auct.*). Pleistocene sup.; 8: Ghiaie incoerenti o in matrice sabbioso-limosa, più raramente sabbie da grossolane a fine o sabbie limose. Spessore variabile da qualche metro a circa 8 m ("Formazione di Ponte Galeria" *auct.*; litofacies 6 in Bellotti *et al.*, 1989). Pleistocene inf.-medio; 9: Argille e argille limose grigio-azzurre, talvolta con intercalazioni di limi sabbiosi grigi. Pliocene sup.; Pleistocene p.p.; 10: Superficie della falda superficiale: anno 2004; 11: Superficie della falda superficiale: anno 2002; 12: Sondaggio geognostico e relativo codice database.

Figure 4. Geological cross section of the Tiber river delta hydrogeological unit (from Capelli *et alii*, 2007). Legend: 1: Grey-yellow, fine to coarse sands, with occasional gravel lenses. Variable thickness of up to about 20 m. They represent fluvial deposits (lithofacies 1/a in Bellotti *et al.*, 1989); 2: Grey or grey-blue pelites, frequently interbedded with fine sands, peat levels and sandy lenses. Thickness of a few metres. They represent a coastal lagoon system (lithofacies 3 in Bellotti *et al.*, 1989); 3: Yellow-reddish, fine or medium-fine sands, rich in femic components and with vegetal remains; they represent recent and present dunal bars. Thickness of roughly 3-4 m (up to 15 m on the higher dunal systems) (lithofacies 4/a in Bellotti *et al.*, 1989); 4: Grey medium-coarse to medium-fine sands, rich in femic components, with marine shells and vegetal remains. They represent a coastal barrier system. Thickness ranging from a few metres to about 10 m (lithofacies 4/b in Bellotti *et al.*, 1989); 5: Peats, blackish organic clays, at times blackish sands with organic matter being decomposed. They appear as lenses and layers with thickness ranging from a few decimetres to a few metres; 6: Grey to yellowish pelites, in places with fine gravels, desiccation forms, travertine incrustations, altered volcanic material, peat and shell levels (*alluvia latu sensu*). Variable thickness of up to 7-8 m (lithofacies 2 in Bellotti *et al.*, 1989); 7: Sands and weakly silty sands of brown-reddish colour, terraced. Thickness ranging from 5-10 m at the higher elevations to 20-25 m in the terraced sectors (in part "Duna Antica" *auct.*). Upper Pleistocene; 8: Gravels, loose or in a sandy-silty matrix, more rarely coarse to fine sands or silty sands. Thickness ranging from a few metres to about 8 m ("Formazione di Ponte Galeria" *auct. p.p.*, lithofacies 6 in Bellotti *et al.* 1989). Lower-middle Pleistocene; 9: Grey-blue clays and silty clays, in places interbedded with grey sandy silts. Upper Pliocene-Pleistocene p.p.; 10: Surface of the shallow aquifer: year 2004; 11: Surface of the shallow aquifer: year 2002; 12: Geognostic borehole and related database code.

copiosamente tutte le incisioni fluviali che hanno raggiunto il tetto della falda regionale (Figura 7) (Capelli *et alii*, 2005).

Nella stessa area, i terreni a bassa permeabilità plio-pleistocenici hanno quote di qualche metro superiori al livello del mare. In sostanza, nel settore in destra Tevere la portata dei corsi d'acqua è legata prevalentemente ai fenomeni di ruscellamento, mentre in quello a sinistra le portate nel reticolo idrografico sono sostenute dal

deflusso di base alimentato dalla falda albana. Inoltre, mentre nel settore occidentale della città le modifiche territoriali derivate dalle necessità urbanistiche non hanno determinato la scomparsa totale del reticolo idrografico, in quello orientale, urbanizzato fin dai tempi più remoti dell'Urbe, attualmente le forme vallive risultano scomparse a seguito di ritombamenti e incondottamenti dei corsi d'acqua nel reticolo fognario.

Negli studi di idrogeologia urbana ci si scontra

necessariamente con una serie di problemi o questioni peculiari di un ambiente fortemente o completamente modificato dall'azione antropica. Di seguito vengono esposte alcune delle principali esperienze che gli autori hanno condotto nel contesto romano, in particolare:

- definizione del reticolo perenne, il regime idrologico dei corsi d'acqua e sue modifiche a seguito di interventi antropici.
- rischio di crollo per presenza di cavità sotterranee;
- dissesto per presenza di terreni non consolidati.

### Definizione del reticolo perenne

Nel territorio di Roma ingenti sono gli scambi tra la falda e i due principali fiumi, il Tevere e l'Aniene, soprattutto se si considera il settore orientale e sud orientale dell'area, laddove sono presenti i complessi acquiferi ad alta permeabilità relativi all'attività vulcanica albana.

Oltre ai due fiumi, gran parte del reticolo idrografico che incide il territorio presenta analoghi fenomeni di scambio. Su questi, gli autori hanno mantenuto un'attività di

controllo delle portate in alveo fin dal 1978, con una serie di campagne non regolarmente distribuite nel tempo (Figura 8). Ciò ha permesso di aggiornare l'andamento delle portate, soprattutto nei mesi di magra, di definirne le variazioni nel corso degli ultimi decenni e, conseguentemente, di identificare i segmenti d'asta perenni (Figura 8) (Capelli *et alii*, 2005).

A seguito della progressiva espansione del tessuto urbano, molte delle stazioni di misura sul reticolo perenne sono state spostate nel tempo verso monte. Infatti, l'inserimento di molti corsi d'acqua all'interno della rete dei collettori fognari (Figura 9), fa sì che questa ricalchi, sostituendolo o affiancandolo, il sistema di aste fluviali minori che oggi risulta fortemente ridotto all'interno del tessuto urbano della città. Questo ha ridotto a sua volta la possibilità di scambio, soprattutto nell'area centrale della città. In molti casi si è constatata una diminuzione delle portate di magra e si è appurato che una consistente percentuale del flusso di base è dovuta allo scarico di reflui.

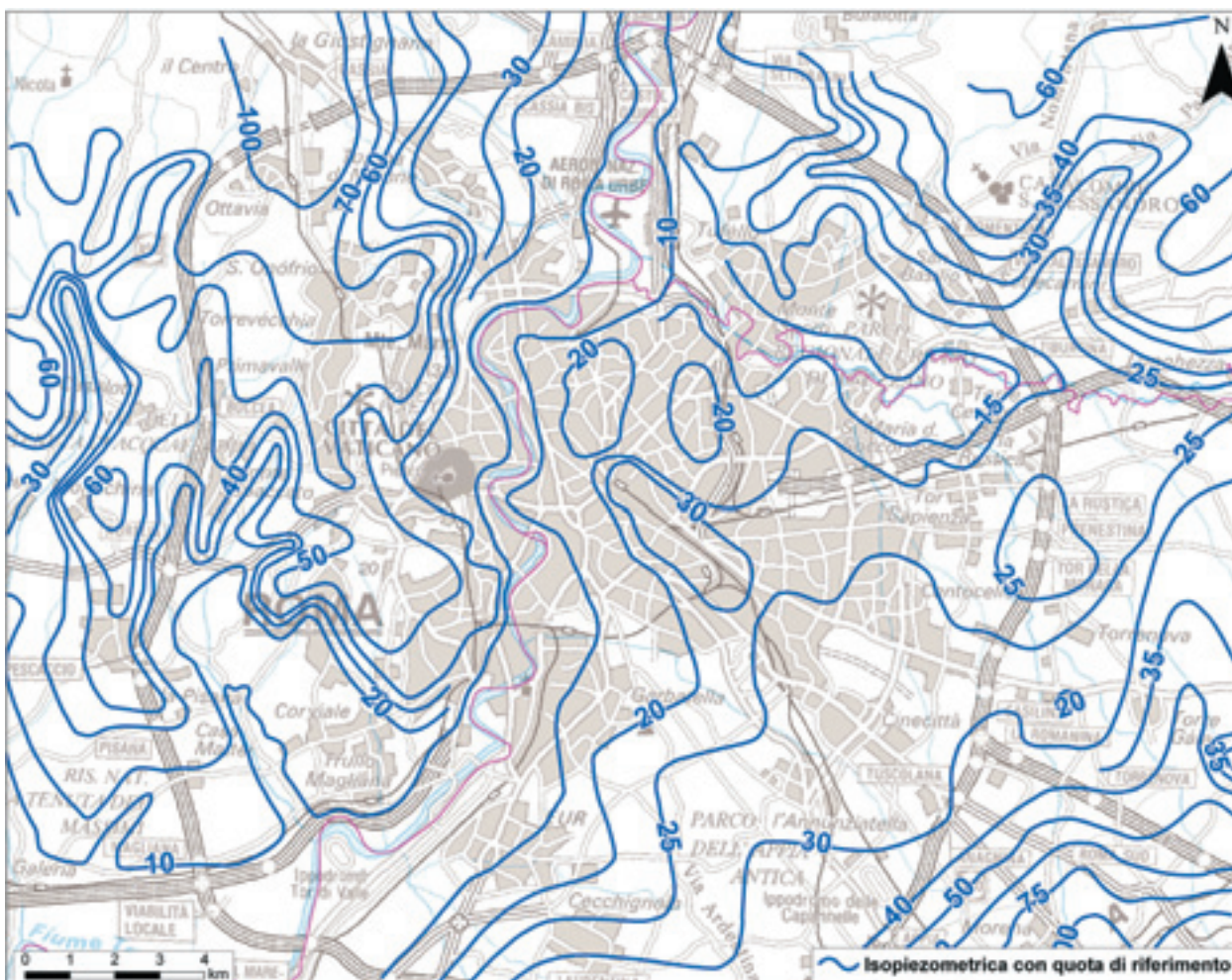


Figura 5. Carta delle linee isopiezometriche della Città di Roma.  
Figure 5. Map of Rome's isopiezometric lines.



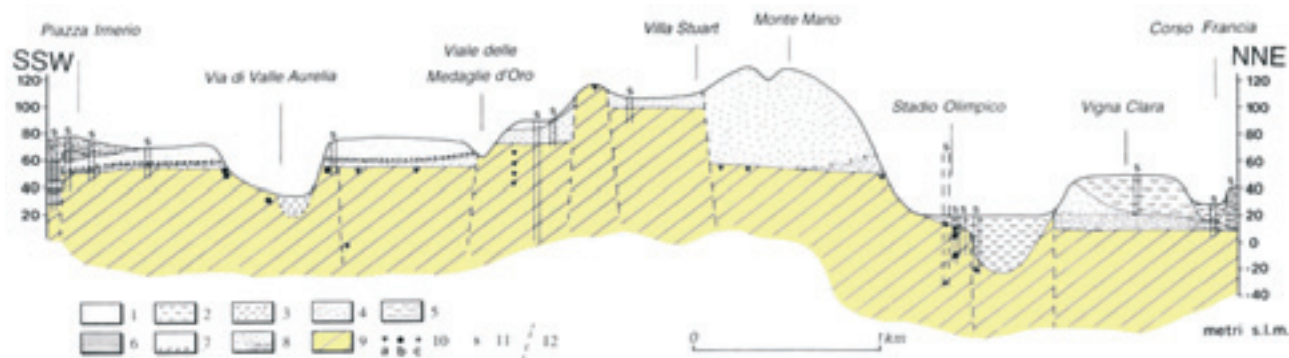


Figura 6. Profilo geologico nel settore di riva destra del Fiume Tevere (da MARRA *et alii*, 1995). Reinterpretato secondo la nuova Carta Geologica del Comune di Roma. Legenda: 1- riporti antropici; 2: alluvioni recenti; 3: piroclastiti; 4: formazione di Ponte Galeria; 5: formazione di Fosso della Crescenza e formazione di S. Cecilia (Unità del Paleotevere 2); 6: formazione del Monte delle Piche; 7: formazione di Ponte Galeria: *Litofacies conglomeratici* e *Litofacies argilloso-sabbiosa*; 8: formazione di Monte Mario; 9: formazione di Monte Vaticano; 10: Ubicazione dei campioni analizzati: a: Zona a *Globorotalia inflata*, b: Zona a *Globorotalia aemiliana*, c: Zona a *Globorotalia punctulata*; 11: Sondaggi; 12: Faglie

Figure 6. Geological cross section of the right bank area of the Tiber river (from MARRA *et alii*, 1995). Reinterpreted on the basis of the new geological map of Rome. Legend: 1- man-made fills; 2: recent alluvia; 3: pyroclastites; 4: Ponte Galeria formation; 5: Fosso della Crescenza formation and S. Cecilia formation (Unit of palaeo-Tiber 2); 6: Monte delle Piche formation; 7: Ponte Galeria formation: conglomeratic and clayey-sandy lithofacies; 8: Monte Mario formation; 9: Monte Vaticano formation; 10: Location of analysed samples: a: Zone with *Globorotalia inflata*, b: Zone with *Globorotalia aemiliana*, c: Zone with *Globorotalia punctulata*; 11: Boreholes; 12: Faults.

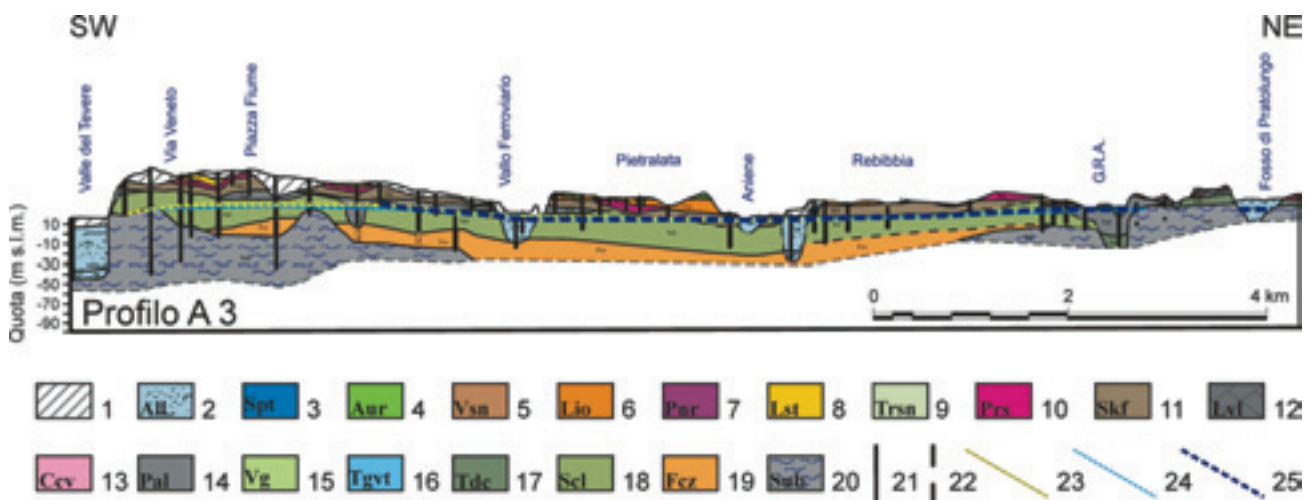


Figura 7. Profilo geologico nel settore di riva sinistra del Fiume Tevere (da CAPELLI *et alii*, 2005). Legenda: 1: Coltri di terreno di riporto; 2: Depositi alluvionali; 3: unità di Sacco Pastore; 4: formazione Aurelia; 5: Pozzolanelle; 6: Tufo Lionato; 7: Pozzolane Nere; 8: Tufi stratificati varicolori di La Storta; 9: Tufo Rosso a Scorie Nere sabatino; 10: Pozzolane Rosse; 11: Tufi stratificati varicolori di Sacrofano; 12: lave di Vallerano; 13: unità di Casale Cavaliere; 14: unità del Palatino; 15: formazione di Valle Giulia; 16: unità della Via Tiberina; 17: unità di Tor de' Cenci; 18: formazione di S. Cecilia; 19: formazione del Fosso della Crescenza; 20: Substrato prevalentemente argilloso; 21: Pozzo o perforazione intercettato dal profilo; 22: Pozzo o perforazione proiettato sul profilo; 23: Livello piezometrico degli anni '70 (da VENTRIGLIA, 1971); 24: Livello piezometrico degli anni '90 (da VENTRIGLIA, 2002); 25: Livello piezometrico attuale.

Figure 7. Geological cross section of the left bank area of the Tiber river (from CAPELLI *et alii*, 2005). Legend: 1: Layers of man-made fills; 2: Alluvia; 3: Sacco Pastore unit; 4: Aurelia formation; 5: Pozzolanelle; 6: Tufo Lionato; 7: Black pozzolans; 8: Stratificati varicolori tuffs of La Storta; 9: Tufo Rosso a Scorie Nere unit of the Sabatini Mts.; 10: Red pozzolans; 11: Stratificati varicolori tuffs of Sacrofano; 12: Vallerano lavas; 13: Casale Cavaliere unit; 14: Palatino unit; 15: Valle Giulia formation; 16: Via Tiberina unit; 17: Tor de' Cenci unit; 18: S. Cecilia formation; 19: Fosso della Crescenza formation; 20: Dominantly clayey bedrock; 21: Well or borehole intercepted by the profile; 22: Well or borehole projected onto the profile; 23: Piezometric level in the 1970s (from VENTRIGLIA, 1971); 24: Piezometric level in the 1990s (from VENTRIGLIA, 2002); 25: Present piezometric level.

Al riguardo, è stata messa a punto una metodologia per valutare le portate scaricate nel reticolo idrografico perenne dagli impianti di depurazione e dagli scarichi diretti e diffusi sul territorio dei Colli Albani.

La ricostruzione del contributo antropico al deflusso superficiale è stata eseguita mediante:

- individuazione dei principali corsi d'acqua di interesse;
- perimetrazione dei bacini e dei sottobacini idrografici chiusi o sottesi dalle sezioni di misura di portata;
- individuazione degli scarichi puntuali tramite la georeferenziazione del catasto degli scarichi superficiali e dei depuratori civili della Provincia di Roma, competente in materia;
- delimitazione delle aree servite dalla fognatura pubblica ed allacciate ai depuratori;
- determinazione del numero di abitanti ricadenti all'interno dei bacini di depurazione;
- determinazione del numero di abitanti ricadenti all'interno dei bacini idrografici, ma non allacciati alla rete fognaria pubblica servita dai depuratori;
- valutazione delle portate degli scarichi puntuali denunciati dalle attività residenziali e produttive;
- valutazione delle portate rilasciate dai depuratori;
- valutazione delle portate associate agli scarichi diffusi.

A titolo d'esempio nelle Figure 10 e 11 viene riportato il confronto tra le portate scaricate e quelle misurate nelle diverse campagne di rilevamento relativamente ai Fossi di Vallerano e dell'Osa, influenti rispettivamente nel Tevere e nell'Aniene.

Nel territorio romano, oltre alla crescita urbanistica, anche l'attività estrattiva ha fortemente contribuito a modificare il reticolo idrografico e i locali schemi di circolazione. Un caso emblematico è rappresentato dell'area Galeria-Magliana che costituisce da più di mezzo secolo un'area di produzione di inerti per l'edilizia. Lo sfruttamento minerario ha determinato una perdita di cubatura di acquifero, essenzialmente di natura ghiaioso-sabbiosa, maggiore di 200 Mm<sup>3</sup> (CAPELLI *et alii*, 1999), con una mobilitazione di cubature ancora maggiori dei termini più pelitici della serie. Questi sono stati riversati nelle depressioni di cava, in sostituzione degli originari termini ghiaiosi. Tale pratica, attuata diffusamente all'interno di un bacino estrattivo di circa 70 km<sup>2</sup>, ha determinato il completo sconvolgimento del sistema idrogeologico, con forti modifiche dei flussi ipogei e dello stato di confinamento delle falde più profonde.

Altro caso interessante è quello relativo al settore estrattivo Ardeatino-Laurentino; qui, a differenza dell'altro bacino estrattivo, i piani di escavazione raggiungono raramente il livello della falda basale, mentre è più frequente l'interferenza con i livelli saturi più superficiali.

Nonostante l'elevato grado di urbanizzazione,

nell'area metropolitana sono ancora presenti corsi d'acqua perenni inseriti in un contesto ad elevata qualità ambientale (Fosso dell'Almone nel Parco della Caffarella, Fosso di Grotta Perfetta a Tor Marancia, Fosso di Malafede nel Parco di Decima).

Infine si segnala il caso del Fosso della Cecchignola in cui, nel tratto terminale, si osservava una naturale alimentazione del corso d'acqua da parte della falda. Attualmente, nel medesimo tratto, esiste un complesso sistema di captazioni che alimenta un laghetto artificiale (Laghetto dell'EUR), riversandovi lo stesso volume che prima sosteneva il deflusso nell'asta fluviale.

### **Rischio di crollo per presenza di cavità sotterranee**

Nell'area romana, nel corso della millenaria storia della città, sono state realizzate innumerevoli gallerie per la coltivazione mineraria di pozzolane, tufi, ghiaie, sabbie e subordinatamente per la captazione di acque sotterranee.

Ciò determina, con relativa frequenza, l'apertura di voragini e franamenti di suolo in corrispondenza di dette cavità e, nel contempo, una condizione di rischio per la cittadinanza, problemi legati alla interruzione delle strade e delle reti di sottoservizi (fognature, reti idriche, elettriche, telefoniche, ecc.), nonché alla stabilità degli edifici sovrastanti.

Le aree interessate dalla presenza di tali cavità sono prevalentemente quella orientale, settentrionale e meridionale della città, ove si sviluppano, in riva sinistra del Tevere, i depositi piroclastici pozzolanacei del Vulcano Laziale, anche se non mancano segnalazioni in destra idrografica del Tevere, in corrispondenza delle vulcaniti sabatine. Le cave in galleria, relative a coltivazioni di depositi di ghiaie e sabbie, sono invece riferibili alla formazione di Ponte Galeria che è diffusa nelle aree della Magliana, Monteverde e in alcuni settori nord-occidentali di Roma, lungo il versante destro della valle tiberina.

Nel tempo si è persa la memoria dell'ubicazione e presenza di tali cavità e, soprattutto durante l'intensa espansione edilizia degli anni 50-70, si è costruito un tessuto continuo di strutture urbane al di sopra di tali gallerie, non sempre con le tipologie fondazionali opportune; sovente, infatti, si riscontrano edifici innalzati su fondazioni dirette al di sopra di reti ipogee a piccola profondità ed in condizione di potenziale pericolo. Altre interazioni negative si realizzano fra le gallerie e le reti idriche e fognarie, spesso fatiscenti e con frequenti perdite.

E' ben evidente che tale situazione, del tutto particolare per l'area romana, avrebbe richiesto un più accorto uso del territorio e scelte urbanistiche più attente alla realtà geoambientale; possiamo asserire che la disordinata espansione edilizia del dopoguerra, soprattutto nei settori orientali di Roma, ha sviluppato interi quartieri



ad alta densità abitativa al di sopra di una estesa rete caveale.

Ad oggi la situazione è tale che frequentemente dissesti, voragini, cedimenti e lesioni ad edifici provocano danni economici e rischi per la popolazione residente,

senza che tutto ciò sia preso nella giusta considerazione da parte della Pubblica Amministrazione, mediante l'attuazione di interventi programmatici mirati e non isolati e sporadici, frutto dell'emergenza.



Corso d'acqua	Quota (m s.l.m.)	Data	Portata (l/s)
F.so Cremera - Valchetta	32	01/08/1981	770
F.so della Cesarina	30	25/10/2003	21
F.so del Cavaliere	46	12/06/2006	57
F.so di Tor Sapienza	24	21/08/2002	5
F.so di Vallerano	15	20/06/2006	41
F.so dell'Acqua Acetosa	32	20/06/2006	68
F.so di San Basilio	45	20/08/2002	2
F.so dello Statuario	15	01/07/1981	396
F.so di Pratolungo	22	12/06/2006	53
F.so della Magliana	13	01/07/1982	200
F.so Galleria	10	01/07/1982	172
F.so della Cecchignola	23	01/06/2006	200
F.so dell'Acqua Traversa	8	01/08/1981	10

Figura 8. Carta del reticolo perenne e tabella dei valori di portata caratteristici.

Figure 8. Map of perennial drainage network and table with characteristic discharge values.



Figura 9. Fosso della Cervelletta all'imbocco del collettore fognario.

Figure 9. Fosso della Cervelletta, at the sewerage system inlet.

Lo studio, i cui metodi vengono di seguito proposti, è stato applicato dagli autori al territorio del VI Municipio della Città di Roma (Figura 12), attraverso una prima fase di raccolta di dati sperimentali e di letteratura di tipo geologico, stratigrafico, idrogeologico e geotecnico (Mazza *et alii*, 2008). In particolare, gli aspetti idrogeologici consentono da un lato di definire la profondità massima di sviluppo della rete caveale e dall'altro di individuare le aree in cui si riscontra una maggiore percolazione delle acque di ricarica naturale e di perdita dalle reti dei sottoservizi. Tali circolazioni risultano, infatti, responsabili dell'ammaloramento dei litotipi interessati dall'attività estrattiva, con conseguente decadimento delle caratteristiche geomeccaniche e, quindi, di incremento della pericolosità di crollo. Tra queste formazioni, di particolare importanza per la definizione del rischio è quella del Tufo lionato, in quanto, per le proprie caratteristiche geomeccaniche, può assumere la funzione di sostegno delle volte delle cavità.

Sono state, quindi, costruite la carta geologica, la carta dello spessore dei terreni di riporto e la carta idrogeologica di base con i relativi profili che assieme descrivono gli aspetti geoambientali del territorio.

Parallelamente si è sviluppata un'analisi delle infrastrutture di superficie attraverso lo studio della serie storica delle carte topografiche, dalla fine dell'ottocento ai giorni nostri, in modo da individuare le modalità dell'espansione edilizia; inoltre si sono reperite mappature relative alla distribuzione delle reti idriche, fognarie, elettriche, ecc. Tutto ciò ha consentito la realizzazione di una carta dello sviluppo urbano e di una carta delle reti dei sottoservizi.

Riguardo al tema specifico delle cavità sotterranee, sono stati ubicati tutti gli eventi di dissesto e le cavità segnalate. Sono state esaminate, inoltre, informazioni relative alle precedenti indagini inerenti fenomeni simili.

Infine, alcune cavità sono state esplorate e rilevate nel dettaglio.

Una volta raccolti tutti i dati degli aspetti geoambientali ed antropici del territorio, si è progettato un modello concettuale che individua nella realtà ipogea gli elementi di pericolo di crollo che possono colpire le infrastrutture di superficie, le quali possono essere caratterizzate da una vulnerabilità variabile in funzione delle tipologie strutturali e fondali degli edifici e della diversa gerarchia della rete stradale.

Questa analisi ha portato alla realizzazione di una carta degli elementi di propensione al crollo degli ipogei e di una carta delle tipologie costruttive e delle reti di comunicazione.

Sovrapponendo la carta del pericolo di crollo alla carta della vulnerabilità territoriale si è ottenuta la carta del rischio di crollo di cavità sotterranee.

Nella definizione del rischio sussistono due elementi: uno relativo alla possibilità che in un certo arco di tempo si verifichi l'evento indesiderato ed uno relativo alla gravità ed entità dei danni locali ed areali che tale evento può determinare. Nel caso della valutazione della pericolosità conseguente al crollo di una cavità sotterranea, non è possibile eseguire valutazioni sui tempi di ritorno e quindi valutazioni probabilistiche sul verificarsi dell'evento in un determinato orizzonte temporale. Tale difficoltà può essere superata se al concetto di *pericolosità* si sostituisce quello di *pericolo*, dove non è presente alcun termine probabilistico. Il pericolo di crollo viene infatti a coincidere con il rischio assoluto che in una determinata area, in un intervallo di tempo infinito, si verifichi una voragine.

In relazione alla presenza di cavità ipogee, pertanto, si definisce il pericolo di voragine con la sola accezione della minore o maggiore possibilità che possano verificarsi voragini e/o subsidenze per crollo delle cavità stesse; tale assunzione è assimilabile alle valutazioni del rischio di frana nelle quali non sono date indicazioni temporali del probabile evento franoso. In tal senso si assume che sia possibile individuare situazioni di maggiore o minore pericolo (o più classi di pericolo) attraverso l'analisi di una serie di "indicatori". L'importanza di eseguire una zonazione di pericolo (rischio assoluto di voragine) è giustificata dalla necessità di individuare zone con maggiori potenzialità di crollo e che richiedono immediati interventi di risanamento.

In relazione alla vulnerabilità del sistema superficiale che può subire danni (area urbana), sussistono minori problemi per la sua definizione, nel senso che è ovvio che le tipologie infrastrutturali porteranno all'individuazione di elementi meno vulnerabili (parchi, aree marginali, edifici con fondazioni profonde, ecc.) e di elementi più vulnerabili (edifici con fondazioni dirette, manufatti di importanza storica, ecc.).

Alla luce delle considerazioni circa la complessità di definire il rischio di crollo di cavità sotterranee, si è

costruita una matrice concettuale sulla base di indicatori di vulnerabilità delle infrastrutture e di indicatori di pericolo (Figura 13).

Si sono definiti i seguenti indicatori degli elementi di propensione al crollo, con livelli di pericolo crescente:

Depuratori			Scarichi dichiarati		Scarichi diffusi	
Insediamiento	Q dichiarata [l/s]	Q calcolata [l/s]	N° tot	Q [l/s]	Popolaz. residente non depurata	Q [l/s]
dep. Acea PIETRARE	---	5,07	12	2,24	16748	5,43
dep. com. DALLAS	0,46	6,92				
dep. com. SANTA MARIA DELLE MOLE	108,33	32,78				
dep. Acea FALCOGNANA	---	2,21				
dep. Acea VALLERANELLO	---	0,45				
dep. Acea CASAL FATTORIA	6,08	1,79				
Consorzio di Vallerano Consorzio di Miglioria Fon	20,61	0,82				
dep. Acea TOR PAGNOTTA	31,08	13,66				

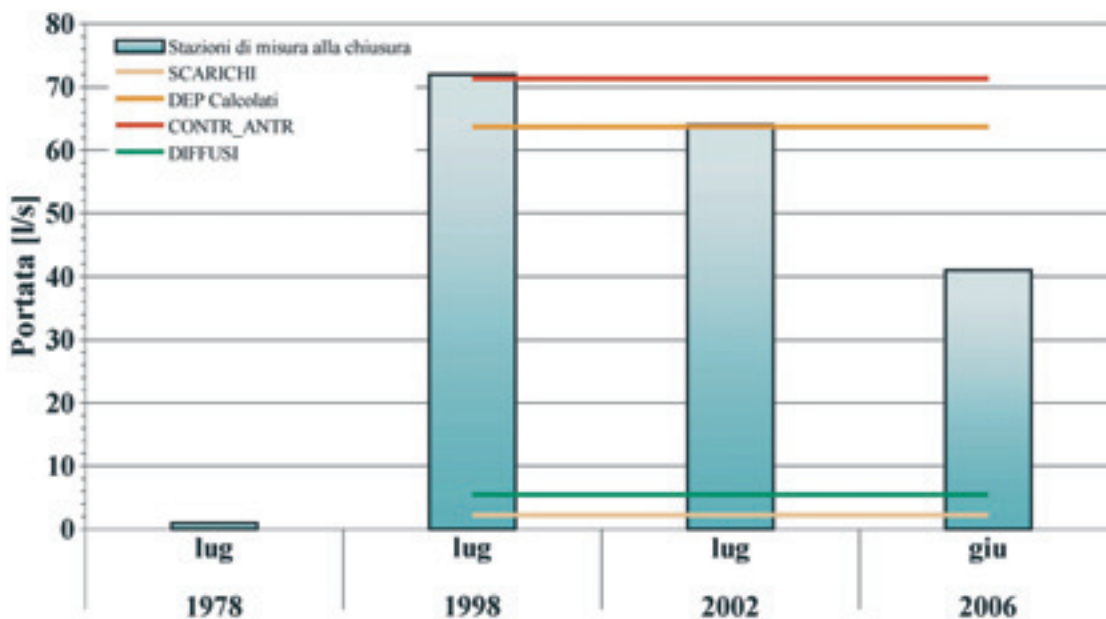


Figura 10. Fosso di Vallerano. Confronto tra le portate misurate e quelle scaricate, rilevate in periodi di magra.  
 Figure 10. Fosso di Vallerano. Measured vs. discharged flows (in low-water periods).



Fosso dell'Osa	Depuratori			Scarichi dichiarati		Scarichi diffusi	
	Insedimento	Q dichiarata [l/s]	Q calcolata [l/s]	N° tot	Q [l/s]	Popolaz. residente non depurata	Q [l/s]
	dep. com. SONNINO	16,2	10,7	2	0,05	14942	4,9
	dep. com. OSTERIA	9,9	8,6				
	dep. Acea FINOCCHIO	34,7	52,1				
	dep. A.M.A. ROCCA CENCIA	3,5	2,7				

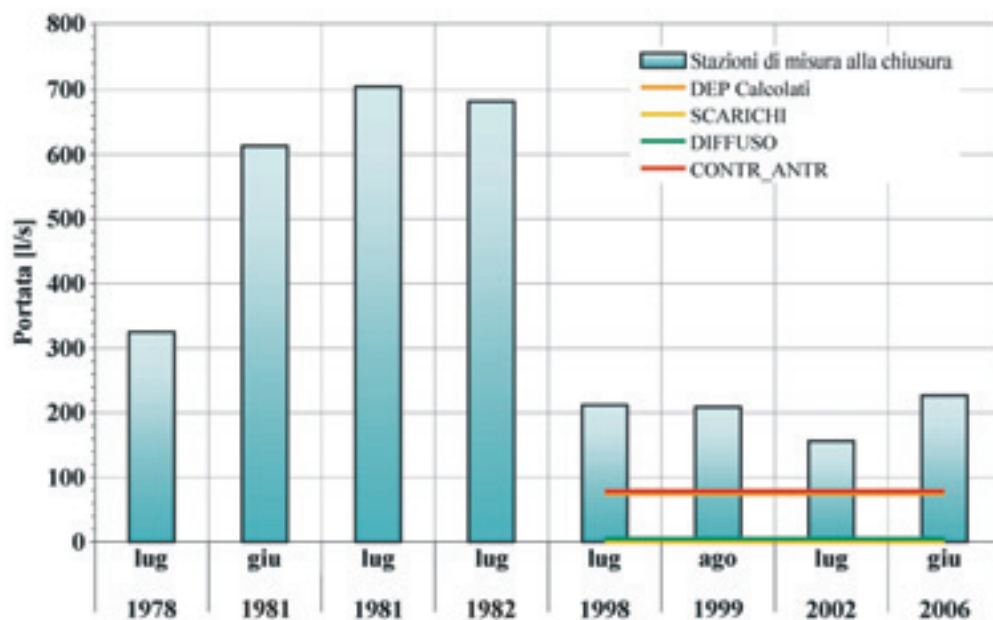


Figura 11. Fosso dell'Osa. Confronto tra le portate misurate e quelle scaricate, rilevate in periodi di magra.  
 Figure 11. Fosso dell'Osa. Measured vs. discharged flows (in low-water periods).

- Aree con assenza di cavità per motivi geologico-stratigrafici (aree delle alluvioni dei fossi).
- Aree con profondità della volta delle cavità > 8 m dal p.c. e con Tufo lionato in *facies* litoide e spessore superiore a 2 metri.
- Aree con profondità della volta delle cavità compresa fra 4 e 8 m dal p.c.
- Aree con profondità della volta delle cavità < 4 m dal p.c. e con assenza di Tufo lionato, oppure con la presenza di questo in *facies* non litoide, ovvero litoide, ma con spessori inferiori ai 2 metri.

Si sono, quindi, definiti i seguenti indicatori degli elementi di vulnerabilità del sistema insediativo, con livello di vulnerabilità crescente:

- Aree prevalentemente non edificate (ospitano case sparse, strutture leggere, ruderi).

- Aree edificate prevalentemente con strutture intelaiate in cemento armato, con fondazioni di tipo profondo.
- Aree edificate prevalentemente con strutture in muratura e/o mostre in cemento armato, con fondazioni di tipo superficiale. Strade ad alta viabilità urbana ed extracircoscrizionale e direttrici principali delle reti di sottoservizi.
- Aree edificate prevalentemente con strutture in muratura, con fondazioni di tipo superficiale. Strade ad alta viabilità urbana ed extracircoscrizionale e direttrici principali delle reti di sottoservizi.

Elaborando i suddetti indicatori in una matrice si individuano 16 relazioni che esprimono diverse potenzialità di rischio, raggruppate in 3 livelli di rischio, la cui distribuzione (Figura 14) ha valenza territoriale e prescinde da locali situazioni di pericolo di crollo dovute a fattori puntuali.

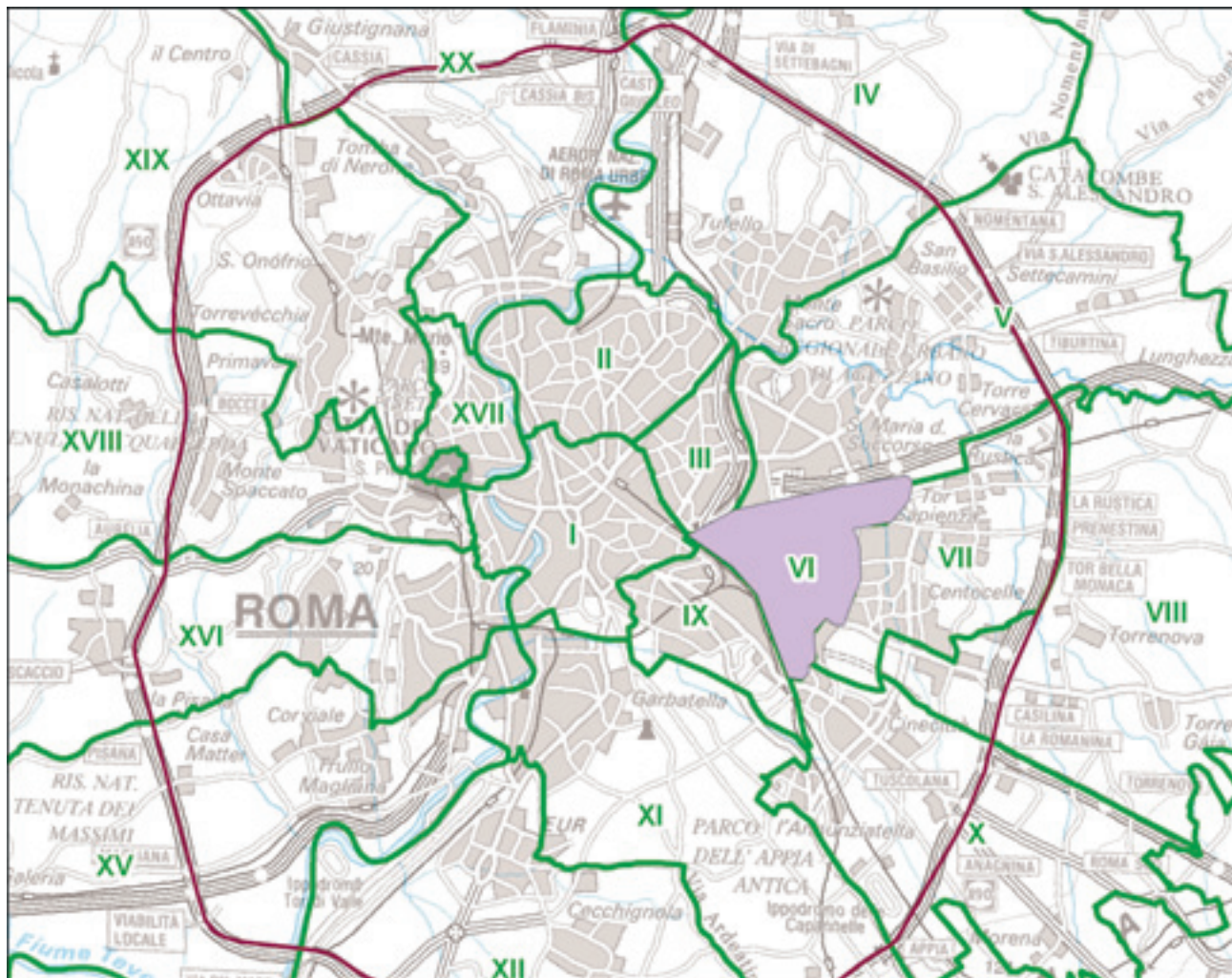


Figura 12. Ubicazione del territorio del VI Municipio della Città di Roma.  
 Figure 12. Location of the area of 6<sup>th</sup> Sub-Municipality of Rome.

Il rischio alto indica che nell'area sussistono condizioni geometriche degli ipogei con notevole propensione a crolli, in presenza di infrastrutture edilizie con fondazioni dirette e comunque tali da essere gravemente coinvolte dal dissesto. Si sono considerate ad alto rischio tutte le via stradali principali, sia a causa della presenza di reti di sottoservizi importanti, che per le vibrazioni del traffico.

Il rischio nullo o basso esprime una condizione di assenza di cavità sotterranee o, pur in presenza di cavità, l'assenza di infrastrutture insediative significative; in tale contesto una eventuale voragine o subsidenza, pur restando una eventualità possibile, non determina rischi importanti al sistema insediativo.

Il rischio medio è definito come intermedio fra quelli già descritti e va inteso come condizione comunque dinamica, che tende nel tempo a raggiungere lo stato di rischio più elevato, soprattutto con riferimento all'evoluzione delle cavità, unitamente alle possibilità di

ammaloramento dei terreni per interferenza con acqua di falda e/o di percolazione.

### Dissesto per la presenza di terreni non consolidati

Nel territorio di Roma esistono numerosi valli con consistenti serie alluvionali oloceniche, in cui spesso sono presenti, con continuità, terreni argillosi organogeni fino a torbosi.

In particolare, in riva sinistra del Tevere questi complessi alluvionali costituiscono un'ampia percentuale di territorio e sono quasi del tutto ricoperti da una coltre continua di terreni di riporto, con spessori medi di circa 5 metri.

Tale fatto ha spesso determinato problemi di cedimenti delle strutture urbane che a volte hanno portato al crollo di edifici o alla necessità del loro abbattimento.

Tra le aree nelle quali il fenomeno è conclamato vi è un settore dell'XI Municipio (Figure 12 e 15) in cui è insediato il polo universitario di "Roma Tre" e sul quale

gli autori hanno effettuato studi per la definizione dei meccanismi di dissesto degli edifici e dei livelli di pericolosità e vulnerabilità dell'area, in relazione all'assetto geologico – stratigrafico, idrogeologico, geotecnico e urbanistico (Campolunghi, 2005; Campolunghi *et alii*, 2008).

Attraverso il reperimento e l'analisi di circa un centinaio di sondaggi stratigrafici, è stato definito l'assetto geologico della Valle di Grotta Perfetta, oggi totalmente obliterata dal tessuto urbano (Figura 16). Il corpo alluvionale presenta, nella zona assiale della valle, uno spessore di circa 30 metri di argille oloceniche e attuali, prevalentemente poco consistenti, con abbondante materia organica e livelli torbosi. Alla base della serie alluvionale è presente un corpo ghiaioso di circa 5 metri, sede di una falda acquifera confinata. La valle risulta incisa in una serie neogenica costituita da terreni sedimentari marini consolidati, con residue coperture di prodotti vulcanici quaternari. Le necessità urbanistiche hanno comportato la messa in posto di una coltre di

terreni antropici che si estendono sia sul settore vallivo, sia sulle colline adiacenti.

L'assetto idrogeologico dei quartieri Garbatella – Ostiense è riconducibile al modello di circolazione idrica sotterranea proprio del settore terminale nord occidentale dell'Unità Idrogeologica dei Colli Albani (Figure 16 e 17). Tale modello è schematizzabile con un substrato a bassissima permeabilità, costituito dalla formazione di Monte Vaticano, pliocenica, al di sopra della quale si trova la sequenza delle vulcaniti della fase eruttiva tuscolano-artemisia, depostasi durante il Pleistocene medio. La geometria dell'acquifero, illustrata dalla carta delle linee isofreatiche e di deflusso del settore nord occidentale dei Colli Albani (Figura 17), indica un livello di saturazione che da circa 70-80 metri s.l.m. nell'area delle Mole (fuori carta), scende a 19-20 metri s.l.m. in corrispondenza della Via Cristoforo Colombo, nel tratto dove essa delimita l'area in studio, per poi raccordarsi al livello medio del Tevere che, nel meandro di S. Paolo, è posto a circa 2 m s.l.m.

**ELEMENTI DI PROPENSIONE AL CROLLO**

	Aree con assenza di cavità per motivi geologico-stratigrafici (alluvioni recenti e attuali)	Aree con profondità della volta delle cavità > 8 m dal p.c. e con Tufo Lionato di classe B	Aree con profondità della volta delle cavità compresa tra 4 e 8 m dal p.c. e con Tufo Lionato di classe A o B	Aree con profondità della volta delle cavità < 4 m dal p.c. e con Tufo Lionato di classe A
<b>ELEMENTI DI VULNERABILITÀ DEL SISTEMA INSEDIATIVO</b>				
Aree prevalentemente non edificate (ospitano case sparse, strutture leggere, ruderi)				
Aree edificate prevalentemente con strutture intelaiate in c.a., con fondazioni di tipo profondo				
Aree edificate prevalentemente con strutture in muratura e/o miste in c.a., con fondazioni di tipo superficiale. Strade ad alta viabilità urbana ed extracircoscrizionali e direttrici principali delle reti dei sottoservizi				
Aree edificate prevalentemente con strutture in muratura, con fondazioni di tipo superficiale. Strade ad alta viabilità urbana ed extracircoscrizionali e direttrici principali delle reti dei sottoservizi				

Figura 13. Matrice concettuale che relaziona gli elementi di propensione al crollo con gli elementi di vulnerabilità del sistema insediativo (da Mazza *et alii*, 2008).

Figure 13. Conceptual matrix relating collapse-prone elements to vulnerable elements of the local human settlements (from Mazza *et alii*, 2008).



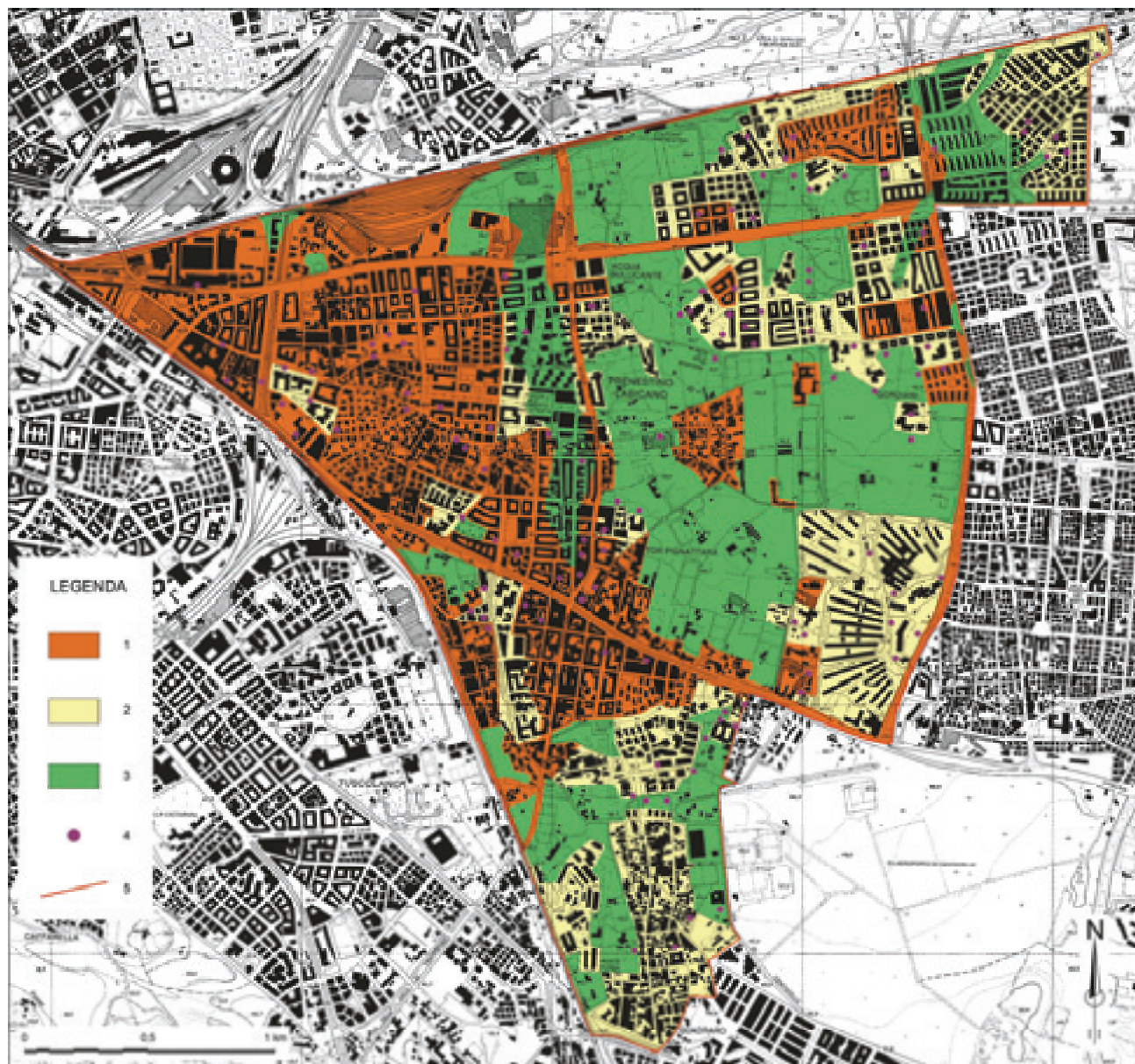


Figura 14. Carta della distribuzione delle classi di rischio di crollo di cavità sotterranee nel territorio del VI Municipio della Città di Roma (da Mazza *et alii*, 2008). Legenda: 1 – Rischio alto; 2 – Rischio medio; 3 – Rischio da nullo a basso; 4 – Elementi puntuali di rischio – centri ad alta frequentazione (scuole, ospedali e uffici circoscrizionali); 5 – Limite di competenza del VI Municipio della Città di Roma.

Figure 14. Map showing the distribution of classes of underground cavity collapse risk in the area of the 6<sup>th</sup> Sub-Municipality of Rome (from Mazza *et alii*, 2008). Legend: 1- High risk; 2 – Medium risk; 3 – Zero to low risk; 4 – Risk elements – highly frequented areas (schools, hospitals and municipal offices); 5 – Territory falling under the jurisdiction of the 6<sup>th</sup> Sub-Municipality of Rome.

In relazione allo spessore medio dell’acquifero e ai valori di trasmissività ricavati da alcune prove di pompaggio effettuate in pozzi per acqua gestiti dall’Ufficio Giardini del Comune di Roma e ubicati a ridosso dell’area di studio lungo la Via Colombo (trasmissività “T” compresa tra  $0,424 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  e  $1,552 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  e coefficiente di immagazzinamento “S” compreso tra 0,042 e 0,244), si calcola che il flusso idrico sotterraneo che proviene dal settore centrale dei Colli

Albani, lungo il fronte compreso tra Via Costantino e Via Severo, ha un ordine di grandezza di alcune centinaia di litri al secondo.

Tale flusso, incontrando tra le quote 15 e -30 m s.l.m. i depositi alluvionali del Fosso di Grotta Perfetta, caratterizzati da bassissima permeabilità, si indirizza verso i rilievi collinari che costituiscono i versanti della valle. La circolazione sotterranea prosegue, quindi, all’interno delle sabbie e ghiaie del paleo Tevere e al top

della serie alluvionale, sia nei terreni di riporto che nelle alluvioni storiche. Dalla lettura dei livelli piezometrici si osserva che il rilevato della linea metropolitana costituisce un ostacolo al naturale deflusso delle acque sotterranee verso il F. Tevere. Infatti, i piezometri posti a est della linea ferrata si attestano intorno a valori di 14 m s.l.m., mentre in quelli a ovest di 4 m s.l.m.

Oltre all'acquifero regionale, nel livello ghiaioso alluvionale è presente un acquifero confinato dai terreni argillosi della serie olocenica.

Da tale assetto idrogeologico consegue che il complesso dei limi e delle argille organiche risulta completamente circondato da acquiferi ricaricati e

pertanto mantiene un elevato contenuto d'acqua, in quanto i corpi idrici adiacenti ne impediscono la dissipazione e rallentano, quindi, la loro consolidazione.

Questa circostanza influenza alcuni parametri e indici che caratterizzano i terreni della serie alluvionale olocenica.

Dall'analisi della Figura 18 si può osservare che variazioni consistenti del loro andamento in funzione della profondità, si riscontrano nel campo 0/-10 m s.l.m., ove sono presenti i terreni con maggior percentuale di materia organica. In tale tratto il limite di liquidità supera valori del 100% e l'indice di consistenza è al di sotto dello zero.



Figura 15. Settore dell'XI Municipio della Città di Roma con fenomeni di dissesto per presenza di terreni non consolidati.  
 Figure 15. Sector of the 11<sup>th</sup> Sub-Municipality of Rome with instability phenomena due to unconsolidated soils.

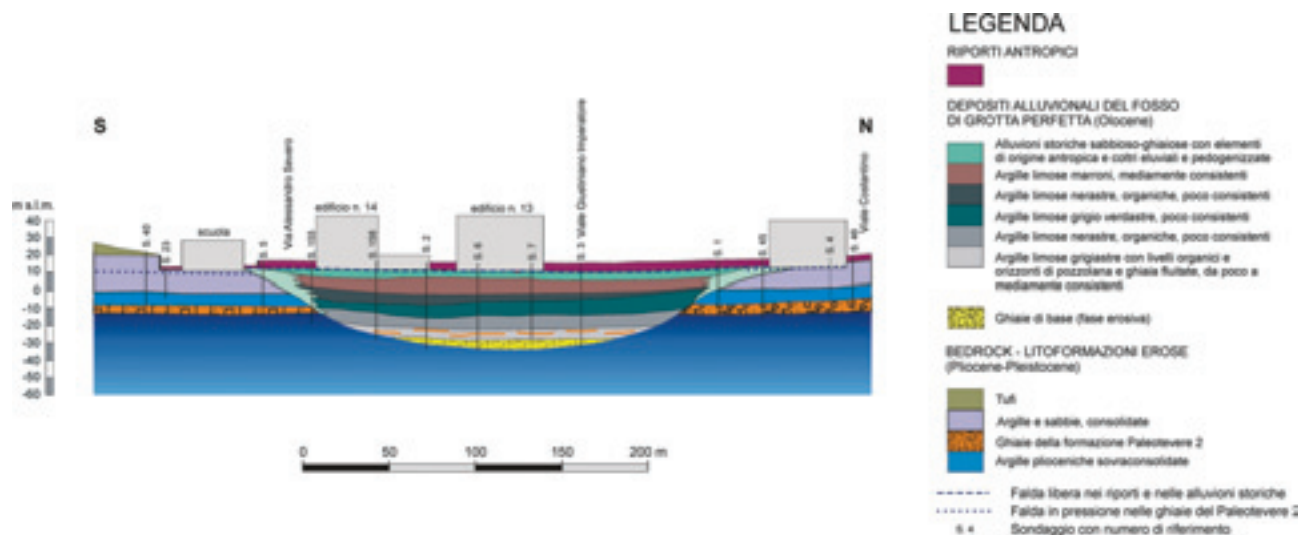


Figura 16. Sezione geologica trasversale alla Valle del Fosso di Grotta Perfetta.  
 Figure 16. Geological cross section of the Fosso di Grotta Perfetta valley.



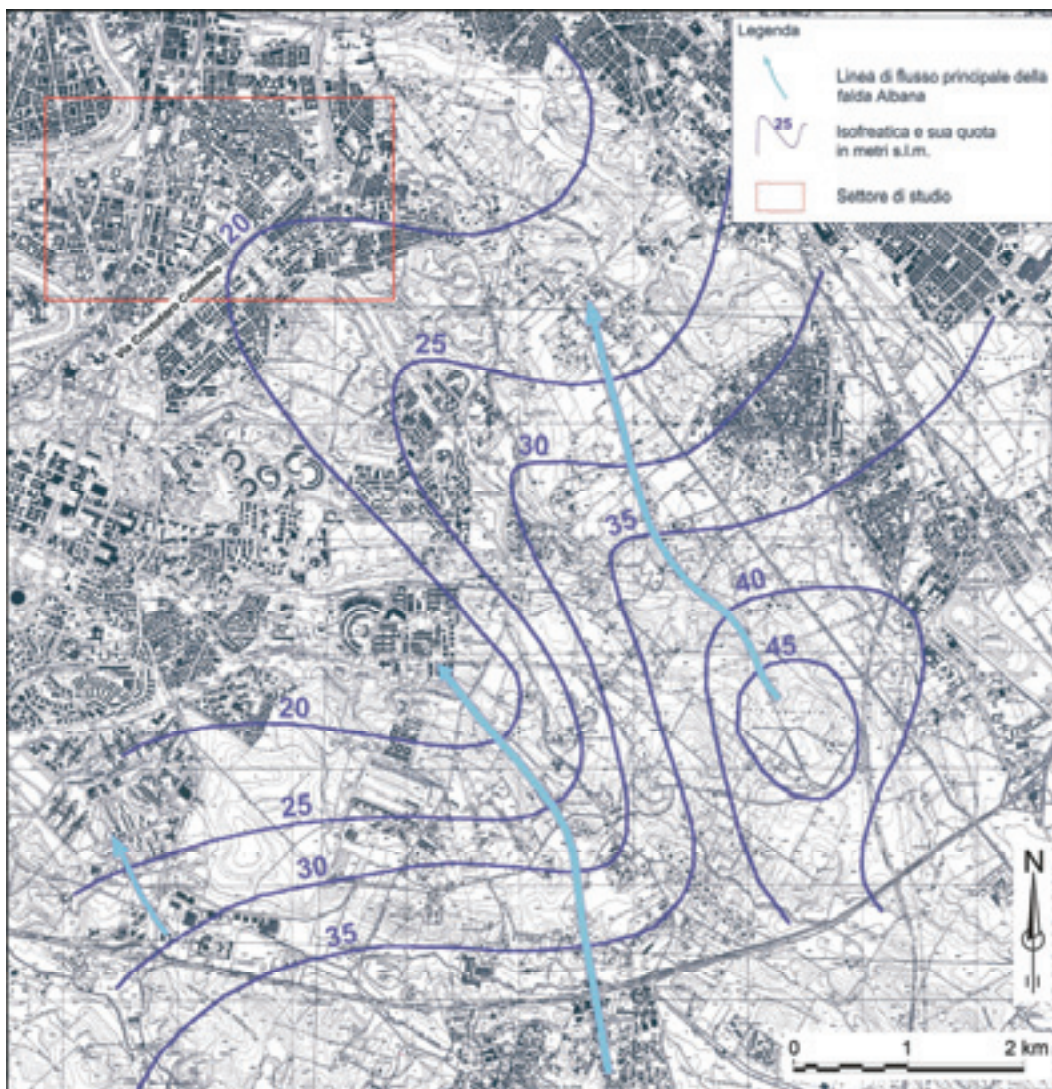


Figura 17. Carta delle linee isofreatiche del settore terminale nord occidentale dell'Unità Idrogeologica dei Colli Albani.  
 Figura 17. Map of isophreatic lines in the north-western terminal sector of the Alban Hills hydrogeological unit.

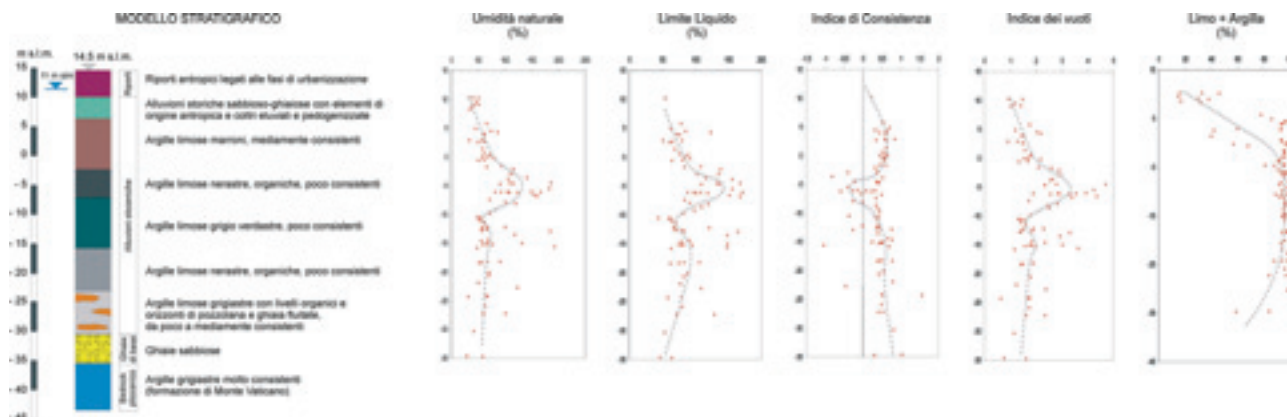


Figura 18. Andamento di alcuni parametri geotecnici connessi al contenuto d'acqua, in relazione al modello stratigrafico della Valle del Fosso di Grotta Perfetta.  
 Figure 18. Water-related geotechnical parameters vs. stratigraphic model of the Fosso di Grotta Perfetta valley.



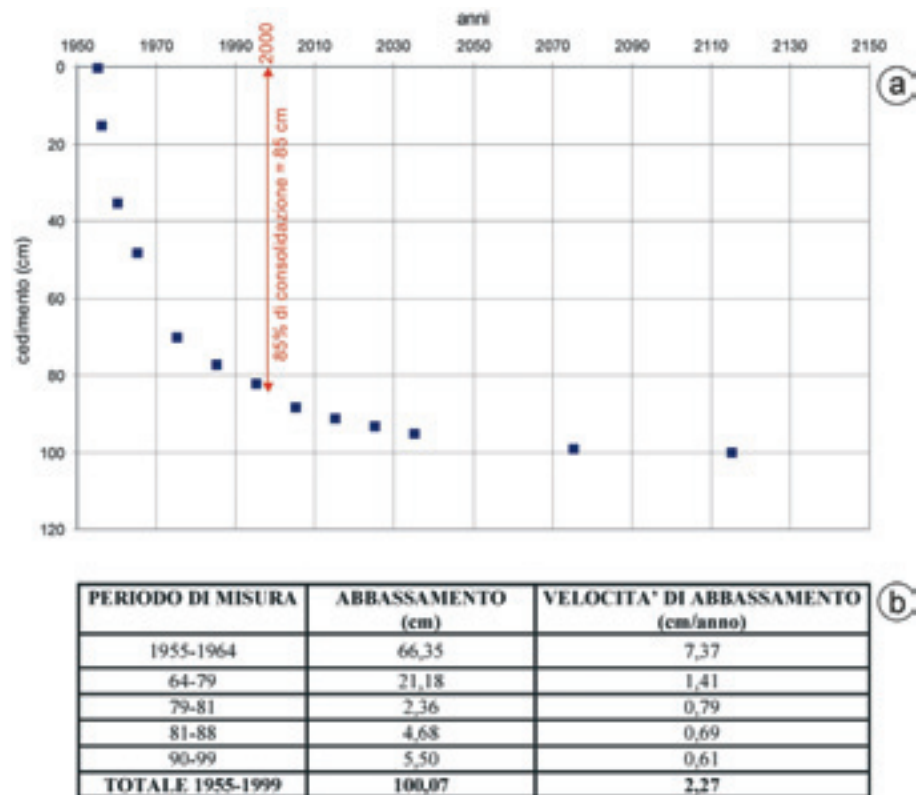


Figura 19. Andamento dei valori di cedimento calcolato (a) e abbassamento misurato (b) per un edificio fondato su terreni non consolidati.  
 Figure 19. Calculated subsidence (a) and measured subsidence (b) of a building resting on unconsolidated soils.

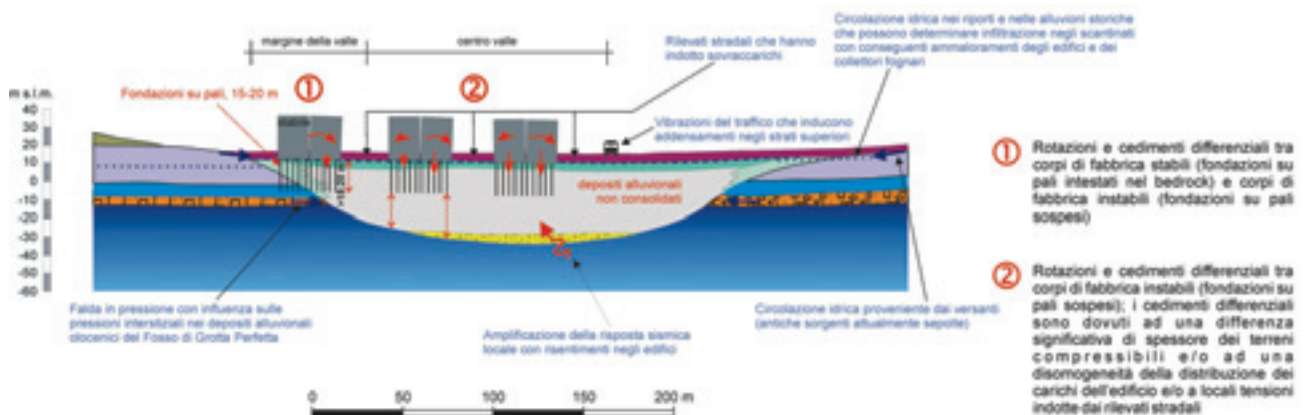


Figura 20. Schema dei meccanismi di dissesto su una sezione rappresentativa del Fosso di Grotta Perfetta.  
 Figure 20. Instability mechanisms in a representative section of Fosso di Grotta Perfetta.

L'effetto di quanto esposto si traduce nel fatto che il cedimento nel tempo, definito sia tramite calcoli geotecnici che tramite *remote sensing*, non è ultimato, anche se i gradienti si sono ridotti (Figura 19). E' interessante notare come negli ultimi decenni le velocità di abbassamento, relative ad uno degli edifici tenuti in osservazione, siano state molto consistenti e, pur riducendosi nel corso dei decenni, nel periodo 90-99 la velocità media di abbassamento risulta ancora di 0,61

cm/anno.

Per riassumere il comportamento generale dei terreni alluvionali in relazione al sovraccarico imposto dall'urbanizzazione, è stato realizzato uno schema dei meccanismi di dissesto (Figura 20). Si individuano due situazioni: edifici fondati nel settore marginale ed edifici fondati nel settore centrale della valle. Nel primo caso le fondazioni su pali di lunghezza omogenea (circa 18-20 m) agiscono in parte su terreni consolidati non alluvionali e

in parte su quelli argillosi non consolidati; ciò induce dei movimenti differenziali che determinano dei fenomeni di trazione suborizzontale nelle strutture degli edifici (Figura 21).

Nel secondo caso gli edifici fondati su pali di lunghezza omogenea, intestati all'interno di terreni cedevoli, subiscono cedimenti differenziali a causa di una differenza significativa dello spessore dei terreni compressibili oppure a causa della disomogeneità della distribuzione dei carichi dell'edificio o, ancora, a causa delle locali tensioni indotte dai rilevati stradali.

Oltre agli edifici, i meccanismi di dissesto hanno coinvolto anche il collettore fognario di Grotta Perfetta, nella tratta compresa tra Via Costantino e Via Leonardo da Vinci (Figura 22). In tale area il cedimento dei terreni plastici ha determinato flessioni e rotture nella struttura del manufatto idraulico, con parziale perdita della funzionalità idraulica e ingresso della falda superficiale all'interno del collettore stesso.

Fenomeni di dissesto urbano per presenza di terreni non consolidati sono presenti anche nel settore sinistro del Tevere, in altri contesti alluvionali simili.



Figura 21. Movimenti rotazionali relativi tra due edifici fondati nel settore marginale della Valle del Fosso di Grotta Perfetta.  
*Figure 21. Relative rotational movements between two buildings resting on the marginal sector of the Fosso di Grotta Perfetta valley.*

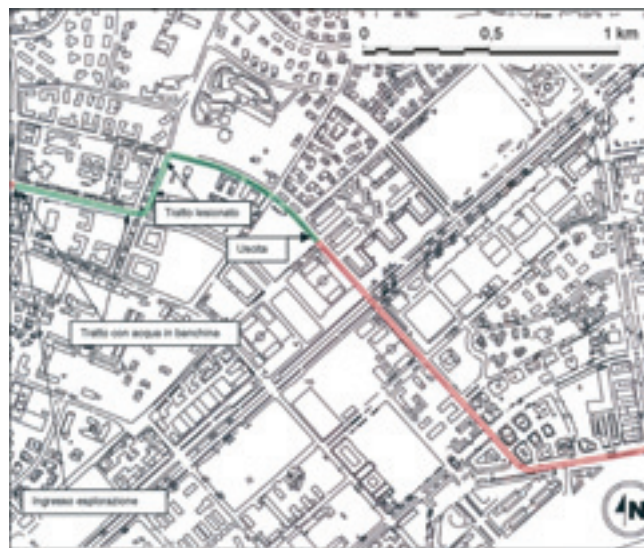


Figura 22. Tracciato del collettore fognario di Grotta Perfetta con evidenziati i tratti lesionati (foto). In verde è rimarcato il settore ispezionato.

*Figure 22. Routing of the Grotta Perfetta sewerage system; the damaged parts of the system are highlighted (photo). The surveyed area is shown in green.*

### Considerazioni finali

L'area romana presenta uno schema idrogeologico articolato, conseguente alle numerose unità e complessi idrogeologici presenti al suo interno. Si individua un settore in destra Tevere, ove sono presenti acquiferi di limitata potenzialità e ove la circolazione è fortemente influenzata dalla presenza dell'alto strutturale di Monte

Mario, impostato su formazioni a bassa permeabilità. In sinistra Tevere si estende la propaggine nord-occidentale dell'Unità Idrogeologica Albana che sostiene una circolazione ben più produttiva e fortemente ricaricata. In conseguenza di ciò esiste un reticolo perenne e fenomeni di scambio falda – fiume che sono stati rispettivamente identificati e quantificati dagli autori per mezzo di numerose campagne di rilevamento condotte nell'arco di più decenni. Il reticolo idrografico nel contesto urbano appare fortemente modificato, anche dove il paesaggio fluviale poteva costituire una risorsa ambientale. Ad ogni

modo, è molto importante il rapporto tra le acque sotterranee e il tessuto urbano, anche in relazione ai piani di sviluppo che prevedono la realizzazione di opere in sotterraneo. Dal punto di vista dei rischi, sono stati descritti i rapporti tra falde e cedimenti dovuti, sia al crollo di ambienti ipogei (VI Municipio), sia alla presenza di terreni non consolidati (XI Municipio). In tali aree sono state definite delle classi di pericolosità e rischio recepite dalle autorità locali competenti ed utilizzate per progetti di gestione e di riqualificazione urbana.

## Bibliografia

- Campolunghi M.P. (2005). I depositi alluvionali olocenici nella Città di Roma: ricostruzione 4D degli ambienti di sedimentazione. Tesi di dottorato di ricerca in Geodinamica – Università degli Studi “Roma Tre”, XVII ciclo.
- Campolunghi M.P., Capelli G., Funicello R., Lanzini M., Mazza R. & Casacchia R. (2008). Un caso esemplare: la stabilità degli edifici nell'area intorno a Viale Giustiniano Imperatore (Roma, XI Municipio). In: *La Geologia di Roma: dal centro storico alla periferia*, Mem. Desc. Carta Geologica d'Italia, Vol. 80, parte seconda, APAT, Roma, p. 195-219.
- Capelli G. & Mazza R. (2005). Schema idrogeologico della Città di Roma – Gestione della risorsa idrica e del rischio idrogeologico. In: *Atti del convegno “la IV Dimensione – Lo spazio sotterraneo di Roma”* Geologia dell'Ambiente – periodico trimestrale della SIGEA (Società Italiana di Geologia Ambientale), Anno XIII n° 4 (supplemento), Roma, p. 47-58.
- Capelli G., Funicello R., Iorio D. & Salvati R. (1999). Loss of groundwater resources following major quarrying activity in urban areas: the Galeria-Magliana quarry basin (Rome, Italy). *Impacts of Urban Growth on Surface Water and Groundwater Quality*, Proceedings of IUGG 99 Symposium H55, Birmingham, July 1999, IAHS Publ. no. 259, p. 169-175.
- Capelli G., Mazza R. & Gazzetti C. (a cura di) (2005). *Strumenti e strategie per la tutela e l'uso compatibile della risorsa idrica nel Lazio – Gli acquiferi vulcanici*. Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale n.78. Pitagora Editrice, 216 pp., 4 tavv. f.t., 21 tavv. f.t. su CD-ROM allegato.
- Capelli G., Mazza R. & Papiccio C. (2007). *Intrusione salina nel Delta del Fiume Tevere*. Geologia, idrologia e idrogeologia del settore romano della piana costiera. *Giornale di Geologia Applicata* Vol. 5, p. 13-28.
- Capelli G., Mazza R. & Taviani S. (2008). *Acque sotterranee nella Città di Roma*. In: *La Geologia di Roma: dal centro storico alla periferia*, Mem. Desc. Carta Geologica d'Italia, Vol. 80, parte prima, APAT, Roma, p. 221-245.
- Funicello R. & Giordano G. (a cura di) (2005). *Carta Geologica del Comune di Roma alla scala 1:10.000*. Volume 1. Università degli Studi “Roma Tre” – Dipartimento di Scienze Geologiche, Comune di Roma – Ufficio di Protezione Civile, APAT – Dipartimento Difesa del Suolo. Formato CD-ROM.
- Marra F. & Rosa C. (1995). *Stratigrafia e assetto geologico dell'area romana*. Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia, L, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, p. 31-112.
- Marra F., Carboni M.G., Di Bella L., Faccenna C., Funicello R. & Rosa C. (1995). *Il substrato plio-pleistocenico nell'area romana*. *Boll. Soc. Geol. It.*, 114, p. 195-214.
- Mazza R., Capelli G. & Lanzini M. (2008). *Rischio di crollo di cavità nel territorio del VI Municipio del Comune di Roma*. In: *La Geologia di Roma: dal centro storico alla periferia*, Mem. Desc. Carta Geologica d'Italia, Vol. 80, parte seconda, APAT, Roma, p. 149-170.



## Progettazione di un geodatabase per la gestione delle risorse idriche: Geodatabase CISS<sup>1</sup>

Rudy Rossetto, Bruna Baldi, Massimo Perna, Luigi Carmignani

Centro di GeoTecnologie, Università degli Studi di Siena, San Giovanni Valdarno (AR), rossetto@unisi.it

*Building geodatabase for water management: Geodatabase CISS*

**ABSTRACT:** In Italy, the D.Lgs. 152/06, acknowledgment of 2000/60/CE Directive, forces Regional Authorities towards integrated water management in order to monitor groundwater quantitatively and qualitatively. Then, it is essential to define groundwater body conceptual models based on hydrodynamic and hydrodispersive parameters, surface water-groundwater interactions, groundwater hydrochemical characteristics, and main elements of the hydrological system. Such record of data is often sparse through several governmental authorities, seldom organised, and commonly not updated. Moreover, data storage and processing is at present performed using tools dealing separately with elements constituting the hydrological cycle. Hence, a tool that allows the implementation of data pertaining to the various components of the hydrological systems is needed. In order to achieve this goal, a *geodatabase* was developed to collect, store, update and display data from alluvial, fissured and karst groundwater systems, and to show their relationship with the other elements of the water cycle.

*Key terms:* GIS, Geodatabase, Water management

*Termini chiave:* GIS, Geodatabase, Gestione risorse idriche

### Riassunto

Lo sviluppo di metodologie che permettano la gestione integrata e l'effettuazione di previsioni sulla disponibilità e la qualità della risorsa idrica richiede la possibilità di impiego dei dati da cui far partire le successive elaborazioni. Tali dati raramente sono organizzati ed aggiornati: questa frammentazione dell'informazione impedisce di fatto la realizzazione della gestione integrata della risorsa idrica. Andando in tale direzione in Italia il D.Lgs. 152/06, recependo la Direttiva 2000/60/CE, obbliga le regioni a caratterizzare i principali acquiferi dal punto di vista idrodinamico e idrodispersivo al fine di ricostruire il modello concettuale del sistema idrogeologico ed individuare i punti di monitoraggio per il controllo quali-quantitativo della risorsa idrica. È pertanto di primaria importanza disporre di strumenti che permettano l'archiviazione, la lettura, l'utilizzo e l'aggiornamento di tutti i dati conosciuti relativi alla gestione di tale risorsa. Attualmente esistono strumenti che permettono la caratterizzazione e la gestione separata di alcuni aspetti dei sistemi idrogeologici (ad esempio: banche dati geografiche per pozzi e stratigrafie, *data model* per l'idrologia superficiale, etc.). Questa situazione comporta difficoltà nell'operare elaborazioni che possano tenere conto dei diversi fattori che entrano in gioco nella gestione della risorsa idrica. Difficoltà che può essere superata centralizzando ed integrando tra di loro le informazioni prodotte dagli enti preposti al controllo del

territorio in modo da renderle disponibili per le successive operazioni di analisi. Per il raggiungimento di tale scopo, si è pertanto andati a sviluppare un *digital geographic database (geodatabase)*, denominato *Geodatabase CISS* (di seguito abbreviato in *Geodb CISS*), che implementa i principali aspetti idrologici e idrogeologici dei sistemi ed anche elementi geomorfologici ed antropici di interesse nella gestione della risorsa idrica. La sua struttura dinamica consente l'aggiornamento, la validazione e l'automazione delle operazioni di archiviazione e gestione dei dati. Tale *geodatabase* può essere relazionato anche a database esistenti gestiti da enti pubblici. Tra le molteplici finalità applicative del *geodatabase* si possono citare quelle relative alla razionale distribuzione delle captazioni e dei punti di monitoraggio sul territorio, alla valutazione della disponibilità idrica ed alla salvaguardia degli acquiferi dai pericoli di inquinamento, nonché alla creazione di una cartografia idrogeologica di dettaglio. Il Geodb CISS è stato testato nell'ambito di uno studio per la caratterizzazione del Corpo Idrico Sotterraneo Significativo (definito nel testo anche CISS) delle Alpi Apuane. I dati implementati nel *geodatabase* hanno consentito la creazione di cartografia "dinamica" idrogeo-

<sup>1</sup>Ricerca effettuata nell'ambito della Convenzione "Studio idrogeologico prototipale del corpo idrico sotterraneo significativo dell'acquifero carbonatico delle Alpi Apuane, Monti d'Oltre Serchio e Santa Maria del Giudice" finanziata dalla Regione Toscana

logica attraverso la quale sono stati individuati 38 sistemi idrogeologici la cui risorsa sarà successivamente caratterizzata quantitativamente e qualitativamente attraverso operazioni di analisi dei suddetti dati. I risultati preliminari dello studio sono pubblicati nel sito <http://www.idrogeologiapuane.info/>.

## **Il ruolo dei GIS nella gestione delle risorse idriche**

A partire dall'ultimo decennio dello scorso secolo, la tematica dei GIS applicati alla gestione delle risorse idriche è stata ampiamente trattata in letteratura. Ricercatori di diversi paesi (Newell *et alii*, 1990; Gogu *et alii*, 2001; Strassberg *et alii*, 2005; de Dreuzy *et alii*, 2006) hanno concentrato i loro sforzi verso la creazione di strumenti in grado di permettere una gestione dei dati necessari alla caratterizzazione idrogeologica. Questi strumenti devono consentire la rappresentazione spaziale dei principali parametri idrodinamici del sistema idrogeologico, la caratterizzazione in termini di qualità e di quantità della risorsa idrica e le variazioni di tali caratteristiche nel tempo. I risultati di tali ricerche in campo internazionale si sono concretizzati nell'implementazione tramite software GIS di *geodatabase* e di *tool* per la modellazione idrogeologica in grado di archiviare, gestire, aggiornare ed elaborare i dati.

Tali studi, tuttavia, si sono concentrati nella creazione di strumenti capaci di gestire solo alcuni degli aspetti necessari alla caratterizzazione degli acquiferi oppure hanno trattato unicamente gli aspetti necessari alla caratterizzazione di singole tipologie di acquiferi. Newell *et alii* (1990) hanno progettato un *geodatabase* (HGDB *database*) ed un DSS (*Decisional Support System*, OASIS) basati sugli indici del sistema DRASTIC (Aller *et alii*, 1987); il *geodatabase* HYGES (Gogu *et alii*, 2001), prima, e l'*ArcHydro Groundwater data model* (Strassberg, 2005) successivamente, hanno permesso l'applicazione congiunta dell'analisi spaziale e della modellazione numerica ai fini della caratterizzazione idrogeologica nel caso di acquiferi di tipo alluvionale. Recentemente, de Dreuzy *et alii* (2006) hanno sviluppato un *database* (*database H<sup>+</sup>*) e un portale on line (<http://hplus.ore.fr>) in grado di gestire informazioni provenienti da acquiferi di diversa tipologia.

A livello nazionale, il recepimento della *Water Framework Directive* (2000/60/CE) con il D.Lgs. 152/06 (già D.Lgs. 152/99) ha obbligato le regioni a caratterizzare i principali acquiferi (definiti Corpi Idrici Sotterranei Significativi) dal punto di vista idrodinamico ed idrodispersivo ai fini della ricostruzione del modello concettuale del sistema idrogeologico e del suo monitoraggio. A tale scopo gli enti preposti al controllo e alla gestione della risorsa idrica si sono trovati di fronte alla necessità di organizzare e gestire le informazioni

necessarie a perseguire tali obiettivi. L'affidabilità e la validità degli studi sulle acque sotterranee dipendono, infatti, dalla disponibilità di volumi importanti di dati organizzati in una struttura logica e coerente in un ambiente digitale, sì da fornire un importante supporto nella validazione dei dati stessi e un potente strumento di analisi e di elaborazione.

In particolare la Regione Toscana sulla base del D.Lgs. 152/99 e successive modifiche e integrazioni (attualmente D.Lgs. 152/06) ha individuato, designato e classificato i Corpi Idrici Sotterranei Significativi ai fini della definizione del livello di tutela da garantire, nonché delle relative azioni di risanamento da mettere in atto mediante il Piano di Tutela delle Acque (Regione Toscana, 2005). Nel 2005 il Settore "Tutela delle acque interne e del mare – Servizi idrici" della Regione Toscana ha stipulato una convenzione con il Centro di GeoTecnologie dell'Università degli Studi di Siena per la caratterizzazione del Corpo Idrico Sotterraneo Significativo delle Alpi Apuane, una delle aree strategiche a livello regionale per l'approvvigionamento idropotabile. La convenzione ha permesso la progettazione di un *geodatabase* ideato, oltre che per conseguire gli scopi della convenzione, per la gestione e la caratterizzazione di diverse tipologie di corpi idrici sotterranei, permeabili sia per porosità primaria sia per fratturazione e carsismo. Scopo di questo lavoro è, quindi, l'illustrazione delle diverse fasi di progettazione del *geodatabase* e della sua applicazione al *test-site* delle Alpi Apuane.

## **Il Geodb CISS**

Partendo da quanto prodotto per la realizzazione della cartografia idrogeologica dal Servizio Geologico Nazionale (ora APAT-Dipartimento Difesa del Suolo; Mari *et alii*, 1995) e sulla base di un'accurata analisi della letteratura (bibliografia citata ed inoltre: Bonomi *et alii*, 1995; Bouezmarni *et alii*, 2003; Maidment *et alii*, 2004; Strassberg, 2005), e delle esigenze di analisi ed elaborazione dei dati raccolti per la caratterizzazione del CISS delle Alpi Apuane, è stato sviluppato uno schema di *geodatabase*. Il *geodatabase* è un modello-dati *object oriented*, introdotto da ESRI a partire dalla versione 8 di ArcInfo® (ESRI, 1999). Questo modello-dati permette una migliore gestione dei dati geografici e semplifica la scrittura di applicativi consentendo all'utente di lavorare con oggetti geografici con caratteristiche e comportamenti propri.

La struttura del *geodatabase*, sviluppato mediante gli strumenti forniti dal software ESRI ArcInfo® 9.0 e 9.1 (ESRI, 2004; ESRI, 2005), parte da una rielaborazione e da un arricchimento dell'*Arc Hydro Groundwater data model* (Maidment *et alii*, 2004; Strassberg *et alii*, 2005). Nel suo schema originale, tuttavia, il *data model* non affronta la trattazione di dati provenienti da acquiferi di

tipologia carbonatica, concentrandosi su esigenze di rappresentazione e di elaborazione delle informazioni riguardanti acquiferi di tipo alluvionale. Si è quindi effettuato uno sforzo per integrare le informazioni mancanti in tale *data model* circa i sistemi idrogeologici e di aggiungervi gli elementi ritenuti fondamentali per la gestione del dato sulle acque sotterranee riguardanti le acque superficiali, gli aspetti antropici e geomorfologici.

Il Geodb CISS, è stato quindi concepito con l'obiettivo di realizzare uno strumento per la rappresentazione di tutte le tipologie di sistemi idrogeologici, in modo tale da soddisfare:

- le esigenze di archiviazione, aggiornamento, estrazione ed analisi dei dati relativi alle acque superficiali e sotterranee;
- la produzione di cartografia tematica ai fini della rappresentazione di sistemi a scala regionale e locale;
- le necessità di operazioni di sovrapposizione e indicizzazione di temi geografici al fine della valutazione della vulnerabilità degli acquiferi;
- la gestione di dati per l'implementazione di modelli numerici idrogeologici;
- l'utilizzo come strumento decisionale per le autorità preposte alla gestione della risorsa idrica.

Allo scopo di progettare uno schema di database relazionale, le tipologie di dati ritenuti necessari all'analisi dei corpi idrici sotterranei significativi sono stati pertanto analizzati. Lo schema finale risultante è stato implementato tenendo conto delle esigenze di massima informazione, minima ridondanza del dato e ottimizzazione dell'estrazione dei dati ai fini dell'analisi. Oltre a permettere l'archiviazione di dati, il Geodb CISS consente l'estrazione per la successiva elaborazione in software esterni.

### Struttura del Geodb CISS

Il Geodb CISS è stato strutturato in modo tale da suddividere i dati necessari alla caratterizzazione del sistema idrogeologico per tematismi. Questa suddivisione consente una migliore organizzazione del dato e permette anche all'operatore meno esperto di accedere ai dati archiviati con facilità. I tematismi individuati nei quali è stato suddiviso il *geodatabase* corrispondono ad altrettanti *Feature Dataset* (di seguito denominati *FD*), ciascuno dei quali consente l'archiviazione di una specifica categoria di dati.



Figura 1. Struttura del Geodb CISS. Suddivisione in *Feature dataset*.

Figure 1. Geodb CISS structure: *Feature datasets*.

Essi sono (Figura 1): *Idrologia\_e\_Idrogeologia*; *Complessi\_idrogeologici*; *Carsismo*; *Elementi\_antropici*.

All'interno dei singoli *FD* i dati raccolti sono stati organizzati in *Feature class* (di seguito denominate *FC*) puntuali, lineari e poligonali (Figura 2). Le singole *FC* permettono la descrizione dei principali elementi di ogni singolo *FD* utili alla caratterizzazione del corpo idrico significativo sotterraneo in esame.

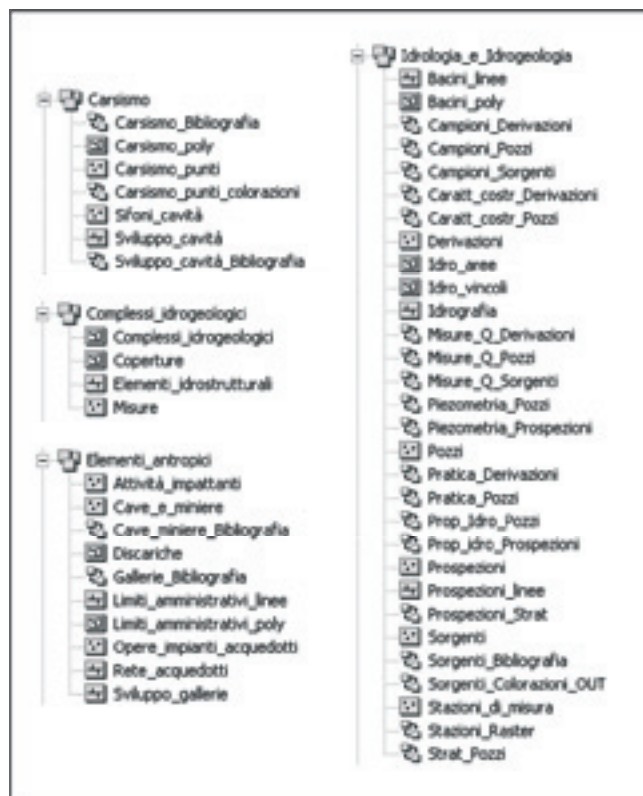


Figura 2. Struttura del Geodb CISS. Suddivisione in *Feature class* dei *Feature dataset*.

Figure 2. Geodb CISS structure: *Feature classes*.

Le informazioni sull'idrologia e sull'idrogeologia trovano collocazione nel *FD Idrologia\_e\_Idrogeologia*: in esso è possibile archiviare informazioni primarie quali l'andamento del reticolo idrografico superficiale (lineare ed areale), la posizione di sorgenti, pozzi, prospezioni (puntuali e lineari), derivazioni di acque superficiali, stazioni di misura e monitoraggio. Ad esse possono essere associate una serie di informazioni, quali, ad es. nel caso di pozzi, il tipo di utilizzo, la presenza di contatori e o strumenti di misura. L'analisi dei dati archiviati permette anche la definizione di una *FC* derivata relativa all'estensione delle aree di alimentazione dei sistemi idrogeologici. È stata inoltre aggiunta una *FC* in cui è possibile archiviare informazioni riguardanti le aree di vincolo *ex lege* presenti nell'area di studio.

Nel *FD Complessi\_idrogeologici* possono essere implementati i dati relativi alla distribuzione delle unità



idrostratigrafiche individuate sulla base di una riclassificazione in chiave idrogeologica della geologia del dominio di studio e le informazioni idrostrutturali ad esse relative. E' possibile inoltre archiviare i dati relativi ai contatti geologici (*FC Elementi\_idrostrutturali*) e alla presenza di coperture quaternarie (*FC Coperture*). Completa il *FD*, la *FC Misure* in cui sono archiviati i dati relativi alle misure geologiche effettuate in campagna.

Gli elementi legati alla morfologia carsica sono archiviati nel *FD Carsismo* e riguardano la posizione delle principali cavità carsiche, inghiottitoi, l'avvenuta effettuazione di prove di tracciamento idrogeologico in cavità e fratture (*Carsismo\_punti*, *FC puntuale*), l'estensione delle principali cavità carsiche con indicazione della quota della zona satura (*Sviluppo\_cavità*, *FC lineare*), la posizione dei sifoni (misurazione del livello piezometrico in grotta, *FC puntuale*) nelle singole cavità ed infine le informazioni relative all'estensione delle doline, di *sinkhole* o di aree ad esteso carsismo superficiale (*FC poligonale*).

I dati legati ad aspetti antropici che possono avere un'influenza sulle acque sotterranee e sulla loro vulnerabilità sono stati archiviati nel *FD Elementi\_antropici*. I centri di pericolo puntuali possono essere archiviati nella *FC Attività\_impattanti*; la *FC puntuale Cave\_e\_miniere* implementa la presenza di attività estrattive di vario genere (cave, cave in galleria, saggi estrattivi, miniere attive e inattive, etc.); informazioni relative a discariche sono state archiviate nella *FC Discariche*; le infrastrutture acquedottistiche o di trattamento reflui sono state rappresentate nelle *FC Opere\_impianti\_acquedotti* (puntuale) e *Rete\_acquedotti* (lineare). Infine, è possibile l'archiviazione di informazioni relative ai confini amministrativi (lineari e poligonali) e alla presenza di gallerie (*Sviluppo\_gallerie*).

I *metadata*, che descrivono le caratteristiche e i contenuti dei principali *dataset* e delle *feature class* facilitando la lettura dello schema del *geodatabase* e la gestione dei dati in esso contenuti, sono stati implementati secondo lo standard ISO 19115 (ISO, 2003).

Lo schema del *Geodb CISS* è completato da una serie di tabelle esterne (Figura 3), collegate tramite *relationship class* (attraverso relazioni uno ad uno - 1:1 od uno a molti - 1:M) alle *Feature Class*, che permettono di archiviare serie temporali (Goodall *et alii*, 2004) ed informazioni aggiuntive su di un record, non legate ad una variazione nel tempo, senza appesantire la struttura delle *attribute table*. A tale scopo, in ciascuna *FC* presente nei cinque *FD* è stato predisposto un campo che permette l'identificazione univoca degli elementi archiviati mediante l'attribuzione di un codice alfanumerico composto. La presenza di "Time series" consente l'archiviazione e la successiva analisi dell'andamento del singolo parametro variabile nel tempo e quindi anche la produzione di cartografia nei diversi passi di tempo in cui le misure sono raccolte.



Figura 3. Struttura del *Geodb CISS*. Schema delle tabelle esterne e *Raster Catalog* associati alla *FD Idrologia\_e\_Idrogeologia*.

Figure 3. *Geodb CISS* structure: Related tables and *Raster catalogues* associated with the *Idrologia\_e\_Idrogeologia* Feature dataset.

A titolo di esempio, nel caso della *FC Pozzi* le informazioni riguardanti le analisi chimico-fisiche delle acque sotterranee sono contenute nelle tabelle collegate *Campioni\_parametri\_base* e *Campioni\_parametri\_addizionali*, le misure di portata nella tabella *Misure\_Q*, le proprietà idrodinamiche calcolate nella tabella *Proprietà\_idrodinamiche*, le misurazioni della superficie potenziometrica nella tabella *Piezometria*, le caratteristiche costruttive dei pozzi nella tabella *Caratteristiche\_costruttive*, le informazioni burocratiche riguardanti la pratica delle opere di captazione nella tabella *Pratica*, ed infine i dati relativi al proprietario o conduttore dell'opera nella tabella *Contatti*. Per quanto riguarda la *FC Prospezioni* e la *FC Pozzi*, mediante una relazione è possibile visualizzare eventuali stratigrafie associate nella tabella *Stratigrafie*: in questo caso l'*Unique Id* è rappresentato dal campo *Codice* e la *Foreign key* è il campo *Idro\_ID*.

Per facilitare l'implementazione del *Geodb CISS*, i campi delle *FC* sono stati definiti in modo tale da presentare corrispondenza con i campi presenti in eventuali banche dati esterne già esistenti. A tale scopo è stato implementato un campo "Codice", *Foreign key* verso eventuali tabelle esterne (ad esempio, nel caso di studio, le banche dati del Sistema Informativo Regionale Ambientale della Toscana, S.I.R.A.; ARPAT, 2006).

Per le *FC* sopraccitate, possono inoltre essere archiviate informazioni bibliografiche: in ciascuna tabella, il campo *Bibliografia* funge da chiave primaria per una relazione verso il campo *Codice\_biblio* nella tabella *Bibliografia*. In tale tabella possono essere archiviati i riferimenti bibliografici a pubblicazioni e/o banche dati da cui derivano i dati implementati.

I dati geografici archiviati possono essere elaborati attraverso interpolatori deterministici e stocastici. Tali elaborazioni dei dati di tipo vettoriale (ad esempio dati puntuali quali pluviometrie, piezometrie, parametri idrodinamici, etc.) conducono alla definizione di livelli *raster* in grado di illustrare la distribuzione regionalizzata e la variazione nel tempo dei parametri analizzati. Per l'archiviazione di tali elaborazioni è stata predisposta una tabella del *geodatabase* definita *Raster Catalog*. Ulteriore possibile funzione del *Raster catalog* è l'archiviazione di documentazione fotografica relativa ai record implementati.

### Applicazione del Geodb CISS al test-site delle Alpi Apuane

Il Geodb CISS è stato utilizzato nell'ambito di un progetto finanziato dalla Regione Toscana per la caratterizzazione del Corpo Idrico Sottterraneo Significativo delle Alpi Apuane. In tale dominio, che costituisce la più importante idrostruttura carbonatica

della Toscana, i complessi carbonatici (a permeabilità prevalente per fessurazione e carsismo) sono distribuiti su di un'area pari a circa 380 Km<sup>2</sup> (Figura 4).

L'idrostruttura può a sua volta essere suddivisa in una serie di sistemi idrogeologici la cui definizione è legata all'andamento delle strutture geologiche (Carmignani *et alii*, 2001) e del rilievo. Nell'ultimo decennio, studi a carattere prevalentemente descrittivo hanno portato ad una conoscenza semi-quantitativa del modello idrogeologico regionale (Piccini *et alii*, 1999). La mancanza di una ricostruzione di dettaglio dell'andamento delle strutture geologiche non ha comunque permesso lo sviluppo di un modello concettuale quantitativo per ogni sistema idrogeologico. Conseguentemente è stato sviluppato un archivio geografico digitale utilizzando il Geodb CISS di tutti i dati conosciuti e accessibili per l'area di studio, con l'obiettivo di procedere, in una seconda fase, alla descrizione di ogni singolo sistema idrogeologico dal punto di vista quantitativo.

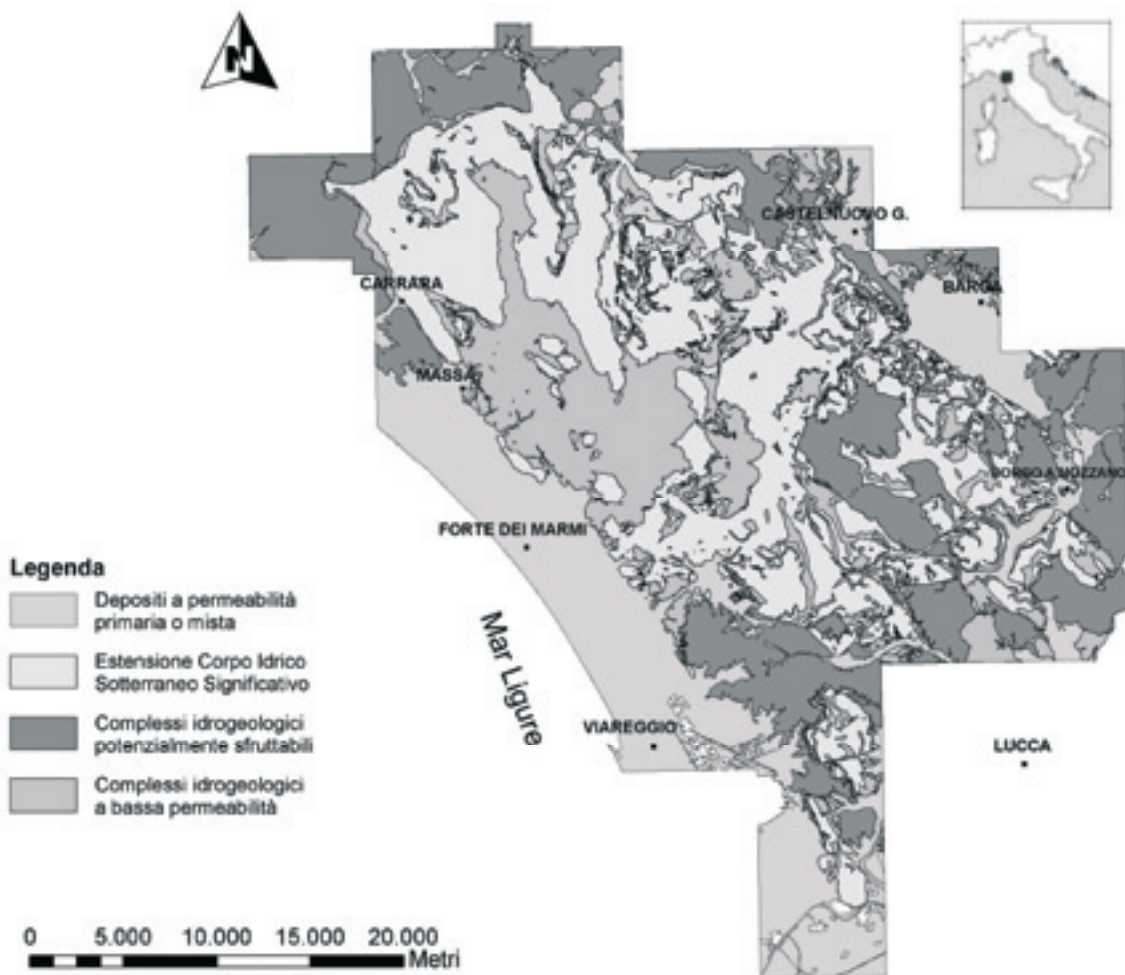


Figura 4. Test-site CISS Alpi Apuane.  
Figure 4. Apuan Alps Groundwater Body test-site.

Per l'archiviazione dei dati sono stati raccolti, validati, corretti, georeferenziati e implementati, nelle rispettive *FC*, tutti i dati necessari alla caratterizzazione del corpo idrico in esame. È stato possibile raccogliere dati relativi a 1648 sorgenti, 921 cavità carsiche, 71 stazioni di misura tra pluviometriche, termometriche e idrometriche, oltre 1500 pozzi e 650 prove geognostiche. Sono state inoltre acquisite le banche dati del S.I.R.A. (ARPAT, 2006), dell'AATO 1 Toscana Nord (comunicazione personale), della Federazione Speleologica Toscana (Federazione Speleologica Toscana, 2006), del Progetto di Cartografia Geologica alla scala 1:10.000 della Regione Toscana (Regione Toscana, 2007) e tutta una serie di banche dati edite ed inedite disponibili presso il Centro di GeoTecnologie dell'Università degli Studi di Siena. Le informazioni che in precedenza erano disponibili solo su supporto cartaceo e disperse in vari uffici, sono state raccolte e inserite in un unico *geodatabase* di proprietà della Regione Toscana.

L'implementazione dei dati è avvenuta suddividendo il dominio di studio in 41 Sezioni alla scala 1:10.000 per ciascuna delle quali è stato creato un *geodatabase*. Il sistema di riferimento utilizzato è il Gauss-Boaga (Roma40), fuso Ovest, conforme al sistema di riferimento adottato dall'attuale Carta Tecnica Regionale a scala 1:10.000 della Regione Toscana (Regione Toscana, 1996).

Le informazioni geologiche disponibili (Regione Toscana, 2007), dopo un controllo di congruenza, sono state implementate nel *FD Complessi idrogeologici* allo scopo di effettuare una dettagliata analisi geo-strutturale dell'idrostruttura. Sulla base di informazioni di campagna, dell'analisi della densità del reticolo di drenaggio e della distribuzione delle cavità carsiche superficiali, le formazioni geologiche sono state riclassificate per tipo e grado di permeabilità relativa. Sono stati inoltre individuati 38 sistemi idrogeologici e definita l'estensione della relativa area di alimentazione basandosi su considerazioni di carattere idrostrutturale, prove di tracciamento e studi isotopici progressivi (Figura 5). A tale scopo, la *FC Carsismo punti* è stata collegata tramite *relationship class* ad una tabella esterna (relazione 1:M), contenente informazioni sui risultati delle prove di colorazione, tramite il campo identificativo univoco *Cars ID*. Una relazione consente di evidenziare, interrogando il tematismo attraverso il software ArcMap (ESRI, 2005), il collegamento con il punto positivo alla prova di tracciamento, nel caso di monitoraggio presso le sorgenti.

Tutti i dati raccolti hanno consentito la creazione di una cartografia idrogeologica "dinamica" e aggiornabile in scala 1:10.000, in cui sono rappresentati i principali elementi idrologici-idrogeologici necessari alla descrizione del dominio di studio. Tale cartografia ha permesso anche di individuare almeno un punto di monitoraggio quali-quantitativo per ogni sistema

idrogeologico, di confermare assunzioni precedentemente effettuate sui modelli concettuali proposti e di individuare aree in cui sono necessarie ulteriori indagini per la definizione quali-quantitativa della risorsa.

L'analisi dei dati, inoltre, ha permesso la creazione di una carta prototipale della vulnerabilità intrinseca all'inquinamento del sistema idrogeologico di Carrara (Figura 6) mediante l'applicazione del metodo COP (Daly *et alii*, 2002; Zwahlen, F., 2004; Vias *et alii*, 2006).

I risultati preliminari dello studio di caratterizzazione sono disponibili all'indirizzo web <http://www.idrogeologiapuane.info/>. Attraverso questo sito web sono resi disponibili per la consultazione webGIS una serie di geotematismi che verranno aggiornati anche sulla base di segnalazioni da parte di enti pubblici e privati. I geotematismi visualizzabili consentono la lettura del territorio in chiave idrogeologica, fornendo in modo sintetico le principali informazioni sulle condizioni idrodinamiche esistenti all'interno ed ai limiti del dominio idrogeologico in oggetto.

## Conclusioni

Il Geodb CISS è stato progettato per la necessità di disporre di uno strumento digitale che permetta la gestione dei Corpi Idrici Sotterranei Significativi a partire dalla creazione di un archivio nel quale i dati possano essere inseriti, aggiornati, condivisi, processati ed estratti per eventuali elaborazioni. Allo stato attuale il Geodb CISS permette: di archiviare informazioni sulle acque superficiali e sotterranee; di rappresentare sistemi idrogeologici a scala regionale e locale; di estrarre dati ai fini della loro elaborazione; di esportare i conseguenti dati derivati in software per la modellistica idrogeologica; la creazione di mappe della vulnerabilità all'inquinamento; il suo utilizzo come strumento di supporto alla pianificazione territoriale ed alla gestione di siti contaminati.

Oltre alla creazione di cartografia idrogeologica di dettaglio, tra le molteplici finalità applicative del *geodatabase* si possono citare quelle relative al suo utilizzo per una razionale distribuzione delle captazioni e dei punti di monitoraggio sul territorio, alla valutazione della disponibilità idrica ed alla salvaguardia degli acquiferi dai pericoli di inquinamento. La sua struttura dinamica consente il continuo aggiornamento, controllo e gestione dei dati. Questi possono inoltre essere agevolmente estratti per l'implementazione di modelli numerici del flusso e del trasporto di contaminanti tramite software interfacciabili. I dati puntuali possono essere regionalizzati e i risultati di tali elaborazioni archiviati nel *Raster catalog* ai fini di ulteriori analisi.

La concezione e lo sviluppo del Geodb CISS non è da considerarsi definitiva bensì in avanzamento nel tempo, essendo possibili modifiche e integrazioni che consentano



una migliore gestione ed analisi del dato. Ad oggi, infatti, alcune delle funzionalità pensate non sono state ancora completamente sviluppate per cui in futuro si prevede di:

- integrare il *geodatabase* per l'utilizzo dei software di modellazione idrogeologica;

- sviluppare *Toolbar* che consentano l'automazione delle operazioni di *geoprocessing* e/o di estrazione dei dati;
- migrare il database relazionale in GFOSS (*Geographical Free Open Source Software*).

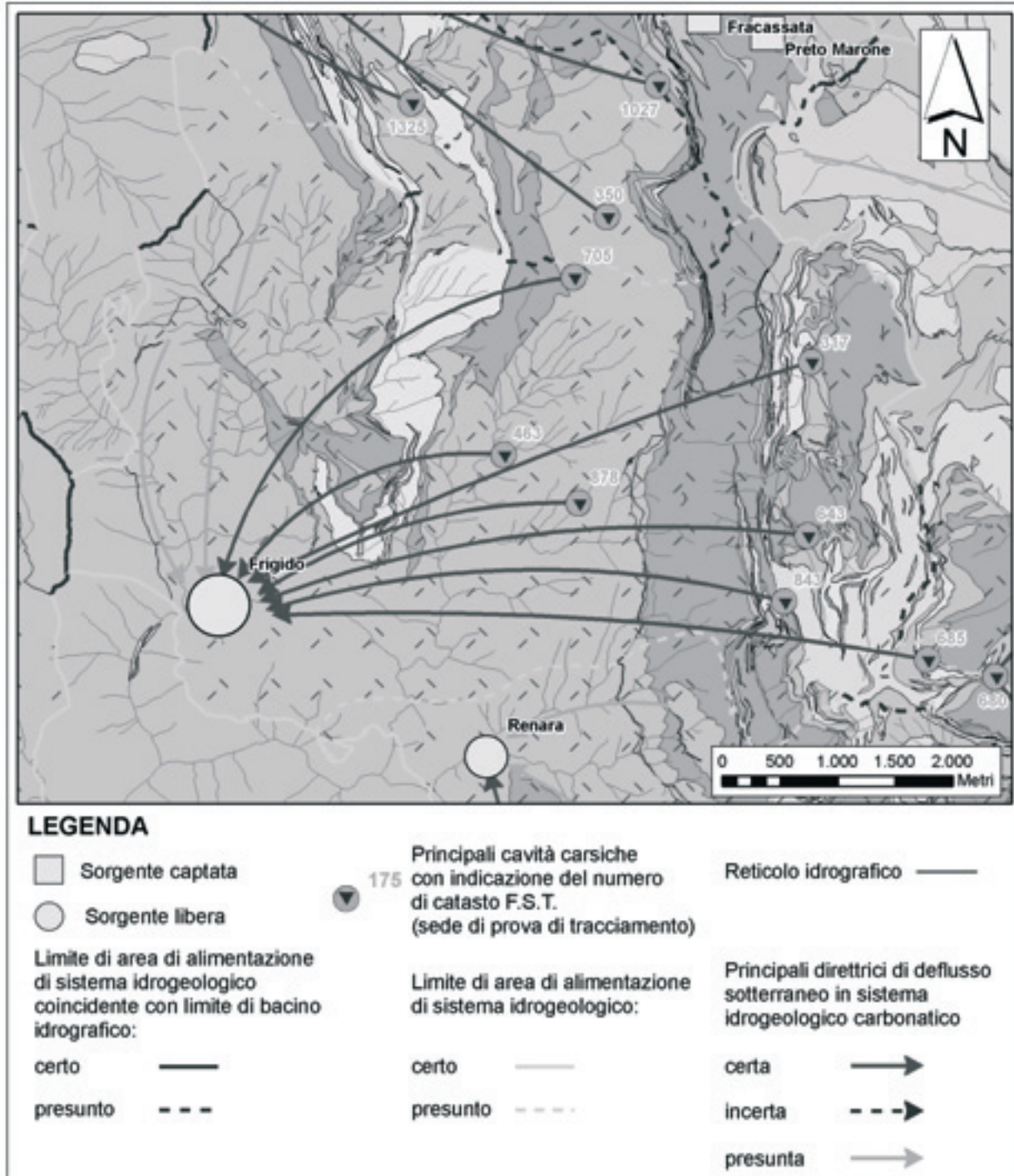


Figura 5. Carta delle aree di alimentazione dei sistemi idrogeologici: particolare dell'area di alimentazione del sistema idrogeologico del Fiume Frigido.

Figure 5. Groundwater system recharge areas: inferred Frigido River recharge area.



for hydrogeological mapping. Proceedings 4th ECRGC & IS, Bologna.

Carmignani, L. *et alii*, 2001. Inner Northern Apennines. In: G.B. Vai and I.P. Martini (Editors), *Anatomy of an Orogen: the Apennines and Adjacent Mediterranean Basins*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 197-214.

Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., Neale, S., Popescu, I.C., and Zwahlen, F., 2002. Main concepts of the "European approach" to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal*, v. 10: p. 340-345.

de Dreuzy, J.R., Bodin, J., Le Grand, H., Davy, P., Boulanger, D., Battais, A., Bour, O., Gouze, P., Porel, G., 2006. General database for ground water site information. *Ground Water* 44, no. 5: 743-748.

ESRI, 1999. ESRI ArcInfo® 8.0. ESRI, Redlands, California.

ESRI, 2004. ESRI ArcInfo® 9.0. ESRI, Redlands, California.

ESRI, 2005. ESRI ArcInfo® 9.1. ESRI, Redlands, California.

Federazione Speleologica Toscana, 2006. *Catasto grotte della Toscana*. <URL: <http://www.speleotoscana.it/catasto/Nuovo%20Cartella%20compressa.zip>> [Ultimo accesso Dicembre 2006].

Goodall, J., Maidment, D., Sorenson, J., 2004. Representation of Spatial and Temporal Data in ArcGIS. AWRA GIS and Water Resources III Conference, Nashville, TN. <URL:

[http://www.cwrw.utexas.edu/gis/gishydro05/Ti me/RepresentingSpaceAndTime/ARAPaper\\_J Goodall.doc](http://www.cwrw.utexas.edu/gis/gishydro05/Ti me/RepresentingSpaceAndTime/ARAPaper_J Goodall.doc)> [Ultimo accesso Ottobre 2005].

Gogu, R.C., Carabin, G., Hallet, V., Peters, V., Dassargues, A., 2001. GIS-based hydrogeological databases and groundwater modelling. *Hydrogeology Journal* 9, no. 6: 555-569.

Maidment, D.R., Jones, N., Strassberg, G., 2004. Arc Hydro Groundwater Geodatabase. June 17 2004, Draft.

Mari, G.M., Motteran, G., Scalise, A.R., Terribili, D., Zattini, N., 1995. *Carta Idrogeologica d'Italia 1:50.000. Guida al rilevamento e alla rappresentazione*, Servizio Geologico Nazionale, Quaderni Serie III, v. 5: p. 30.

Newell, C.J., Hopkins, L.P., Bedient, P.B., 1990. A hydrogeologic database for groundwater modeling. *Groundwater*, 28, no. 5: 703-714.

Piccini, L., Pranzini, G., Tedici, L., and Forti, P., 1999. Le risorse idriche dei complessi carbonatici del comprensorio apuo-versiliense. *Quaderni di Geologia Applicata*, v. 6: p. 61-78.

Regione Toscana, 1996. *Tavola dei contenuti, segni grafici e codici per la cartografia numerica a scala 1:5.000 / 1:10.000 - Livello 3 - Versione 3.5*. <UR:

[http://www.rete.toscana.it/sett/territorio/carto/c artopage/pagine/capitolato\\_10k.pdf](http://www.rete.toscana.it/sett/territorio/carto/c artopage/pagine/capitolato_10k.pdf)> [Ultimo accesso Marzo 2007].

Regione Toscana, 2007. *Programma regionale 2001-2005. Carta geologica regionale e dati*

derivati. <URL: <http://www.rete.toscana.it/sett/pta/terra/geologia/geo10k.htm>> [Ultimo accesso Marzo 2007].

Strassberg, G., Maidment, D. R., Jones, N., 2005. Arc Hydro Groundwater toolbar. <URL: <http://www.cwrw.utexas.edu/gis/gishydro05/Arc HydroGroundwater/ArcHydroGroundwaterES RIUC2005.htm>> [Ultimo accesso Maggio 2006].

Strassberg, G., 2005. *A geographic data model for groundwater systems*. Ph.D. diss., Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin. <URL: [ftp://ftp.cwrw.utexas.edu/pub/outgoing/st rassberg/GroundwaterDataModel/Groundwater \\_Data\\_Model.htm](ftp://ftp.cwrw.utexas.edu/pub/outgoing/st rassberg/GroundwaterDataModel/Groundwater _Data_Model.htm)> [Ultimo accesso 15 Giugno 2006].

Vias, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I., and Jiménez, P., 2006. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. *Hydrogeology Journal*, v. 14: p. 912-925.

Zwahlen, F., 2004. General overview of karst aquifers and their hydrogeological behaviour. Results of karst water protection, vulnerability and risk mapping in the frames of COST Action 620.

"Multidisciplinary approach to karstwater protection strategy", Short Course, Unesco, "Erdelyi Mihaly" School of Advanced Hydrogeology, 22-27 August 2004, Budapest, Hungary.

## Riferimenti normativi

Decreto Legislativo 11 maggio 1999, n.152. Disposizioni sulla tutela delle acque dall'inquinamento e recepimento della direttiva 91/271/Cee concernente il trattamento delle acque reflue urbane e della direttiva 91/676/Cee relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole (aggiornato con le modifiche del D.Lgs 18 agosto 2000, n. 258).

G.U.R.I. n. 246 del 20 ottobre 2000 - s.o. n. 172/L.

Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy (EU Water Framework Directive).

ISO, 2003. International Standard 19115, Geographic Information-Metadata, ISO 19115

2003(E).

Regione Toscana, 2005. *Deliberazione del Consiglio Regionale della Toscana 25 gennaio 2005, n. 6. Piano di tutela della acque*.

Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152. *Norme in materia ambientale*. G.U.R.I. n. 88 14 aprile 2006 - Supplemento Ordinario n. 96. Italia.





# Valutazioni sui problemi connessi con il flusso tra acquifero superficiale e acquiferi profondi attraverso pozzi per acqua e delle possibili strategie di intervento: il caso della Pianura Padana piemontese

Alan Menegon, Paolo Clemente, Domenico Antonio De Luca

Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Torino  
alan.menegon@unito.it, paolo.clemente@unito.it, domenico.deluca@unito.it

*Evaluations about problems related to flow between upper and lower aquifer through water wells and possible remediation strategies: the case of Piemonte's Po Plain*

**ABSTRACT:** In alluvial plains, groundwater is located in a system of superposed aquifers, separated by low-permeable formations. In Piemonte's Po Plain the upper aquifer is nowadays polluted, so multiaquifer wells and abandoned or damaged wells can be a hazard for water resources not yet contaminated. After comparing analytical and numerical solutions, the flow for a single well resulted in an order of some hundreds of m<sup>3</sup>/day. Considering Piemonte's Po Plain, about 15.000 water wells could be a potential way for contamination of clean deep aquifers: so this precious resource is in danger. There are two main ways to amend this situation: well sealing (or plugging): it is the process of well dismission, filling the well with appropriate materials; well reconditioning: it involves to seal one of the well screens of a multiaquifer well. These two methods have the purpose of re-establish the separation between upper and lower aquifers.

*Key terms:* Groundwater, Wells, Sealing, Reconditioning

*Termini chiave:* Acque sotterranee, Pozzi, Chiusura, Ricondizionamento

## Riassunto

Le falde idriche dei territori di pianura sono in genere ospitate in una serie di acquiferi sovrapposti, separati da livelli fini (*aquitards*). Nel caso particolare qui considerato (Pianura Padana piemontese) l'acquifero superficiale è vulnerabile alle contaminazioni superficiali, poiché spesso non è protetto da livelli a bassa permeabilità ed è in connessione con il reticolo idrografico. Gli acquiferi profondi sono invece naturalmente protetti dagli inquinanti presenti nella falda freatica, e in generale sono una risorsa preziosa: si tratta di una riserva di acqua di grande qualità e quantità, ottima per l'uso idropotabile. La qualità delle falde idriche profonde deve essere quindi tutelata, mentre va gradualmente migliorata quella delle falde superficiali. È quindi fondamentale preservare la separazione tra acquifero superficiale e acquiferi profondi. Tra le opere che potrebbero rappresentare una via di comunicazione tra acquifero superficiale e acquiferi profondi vi sono i pozzi multifalda e i pozzi profondi abbandonati e deteriorati. In presenza di un carico idraulico maggiore in falda superficiale rispetto a quelle profonde si produce un flusso diretto verso queste ultime con il rischio di una loro contaminazione; il caso contrario provoca un loro inutile depauperamento. Per valutare i flussi idrici tra acquiferi diversi si sono utilizzati due metodi analitici e un metodo

numerico (differenze finite), che hanno permesso di valutare il flusso in un singolo pozzo, per condizioni idrogeologiche medie nella pianura piemontese, in circa 250 m<sup>3</sup>/giorno. In una valutazione a scala regionale si è calcolato che il 35 % dei circa 200.000 tra pozzi e perforazioni presenti in Piemonte intercetta la falda profonda e potenzialmente potrebbe consentire una connessione tra acquifero superficiale e acquiferi profondi. In realtà, solo una ridotta percentuale dei pozzi profondi mette effettivamente in comunicazione l'acquifero superficiale e uno o più acquiferi profondi: solo il 9 % dei pozzi profondi del campione analizzato è un pozzo multifalda con filtri in falda superficiale e profonda (pozzi "misti"). Per impedire la comunicazione tra acquiferi diversi attraverso i pozzi per acqua sono possibili due tipi d'intervento: chiusura e ricondizionamento. Con la chiusura il pozzo viene completamente riempito con idonei materiali di riempimento e materiali sigillanti e reso inattivo; il ricondizionamento prevede la chiusura dei filtri in corrispondenza dell'acquifero superficiale oppure degli acquiferi profondi, mantenendo l'emungimento soltanto in corrispondenza di una delle due tipologie di acquifero. L'obiettivo degli interventi è di ripristinare la separazione idraulica tra i diversi acquiferi. Per attuare queste strategie sono descritte alcune delle tecniche attualmente utilizzate,

alcune delle quali sono risultate inefficienti, mentre altre sono in evoluzione.

## Introduzione

Nelle pianure alluvionali le falde idriche sotterranee sono ospitate da una serie di livelli acquiferi sovrapposti, separati da livelli fini (limi – argille) a bassa permeabilità (*aquitards*). L'acquifero superficiale, prevalentemente di tipo libero, presente nel territorio della Pianura Padana piemontese, è ormai compromesso su vaste aree da una notevole varietà di contaminanti provenienti dalla superficie (Debernardi *et alii*, 2005). La qualità della falda superficiale è quindi bassa, specie dove essa non è protetta da livelli a bassa permeabilità ed è in diretta connessione con il reticolo idrografico superficiale.

Gli acquiferi profondi, invece, grazie alla presenza di livelli fini a bassa permeabilità, sono meno vulnerabili rispetto all'arrivo di inquinanti che si trovano nella falda superficiale (Bove *et alii* 2005), per cui costituiscono una riserva di acqua di ottima qualità e grande quantità, ottimale per l'uso idropotabile.

La qualità delle falde idriche profonde deve essere quindi preservata, mentre va migliorata gradualmente quella della falda superficiale; a tal fine è di fondamentale importanza mantenere intatta la separazione tra acquifero superficiale e acquiferi profondi. In particolare è indispensabile evitare la costruzione di opere che permettano un passaggio di acqua tra la falda libera e quelle confinate. Tali opere sono rappresentate essenzialmente da pozzi per acqua profondi; nel caso della Pianura Padana piemontese, i pozzi per acqua sono in numero decisamente superiore rispetto ad altri tipi di opere, quali ad esempio i pozzi geotermici o petroliferi e cave per l'estrazione di inerti.

I pozzi profondi possono mettere in comunicazione falda superficiale e falda profonda allorché:

- siano finestrati sia in acquifero superficiale, sia in acquifero profondo (pozzi misti);
- presentino un dreno continuo lungo tutta la colonna;
- si trovino in entrambe le condizioni precedenti.

La direzione di flusso che si instaura è condizionata dalla differenza di carico idraulico esistente tra gli acquiferi; in particolare (Figure 1 e 2):

- se il carico idraulico in falda superficiale è maggiore, i pozzi misti costituiscono una potenziale via di contaminazione delle falde profonde;
- se il carico idraulico in falda profonda è maggiore, i pozzi multifalda provocano un depauperamento della falda profonda che va a mescolarsi con l'acqua della falda superficiale.

La prima delle due situazioni sopra elencate è la più critica, poiché mette in pericolo la qualità della risorsa su vaste estensioni di territorio.

L'obiettivo di questo studio è di quantificare l'entità dei flussi tra falde diverse attraverso i pozzi per acqua,

valutarne l'entità a livello regionale e descrivere le differenti tecniche utilizzabili per impedire il flusso idrico tra acquiferi diversi attraverso i pozzi per acqua.

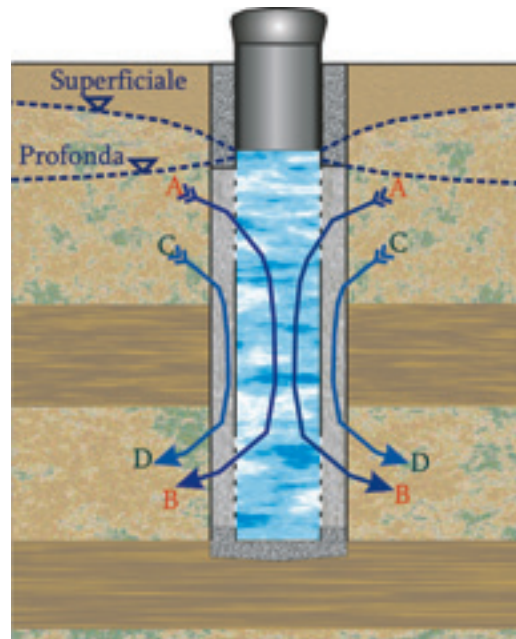


Figura 1. Situazione di flusso dall'acquifero superficiale verso l'acquifero profondo attraverso un pozzo multifalda.  $H_{sup}$ ,  $H_{prof}$ : livello piezometrico in acquifero superficiale e in acquifero profondo; AB: flusso attraverso la colonna – pozzo; CD: flusso attraverso il dreno posto nell'intercapedine colonna-perforo.

Figure 1. Situation of flow from the upper to the lower aquifer through a multiaquifer well.  $H_{sup}$ ,  $H_{prof}$ : head in upper and lower aquifer; AB: flow through the casing; CD: flow through the gravel pack in the annulus between casing and borehole wall.

## Valutazione dei flussi tra falde diverse attraverso pozzi

Per analizzare il flusso idrico tra acquifero superficiale e acquifero profondo, si è proceduto ad una valutazione teorica, comparando due modelli analitici e una modellazione numerica alle differenze finite.

L'approccio analitico per risolvere un problema di flusso attraverso la colonna di un pozzo può essere impostato partendo dall'Equazione di Darcy che può essere espressa in tre dimensioni e utilizzando l'immagazzinamento, come Equazione di diffusione (1): (Bear, 1979):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S_s \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

Per i tre metodi scelti si sono utilizzati parametri idrogeologici (Tabella 1) medi per l'acquifero superficiale e gli acquiferi profondi della pianura piemontese (Beretta *et alii*, 1997).



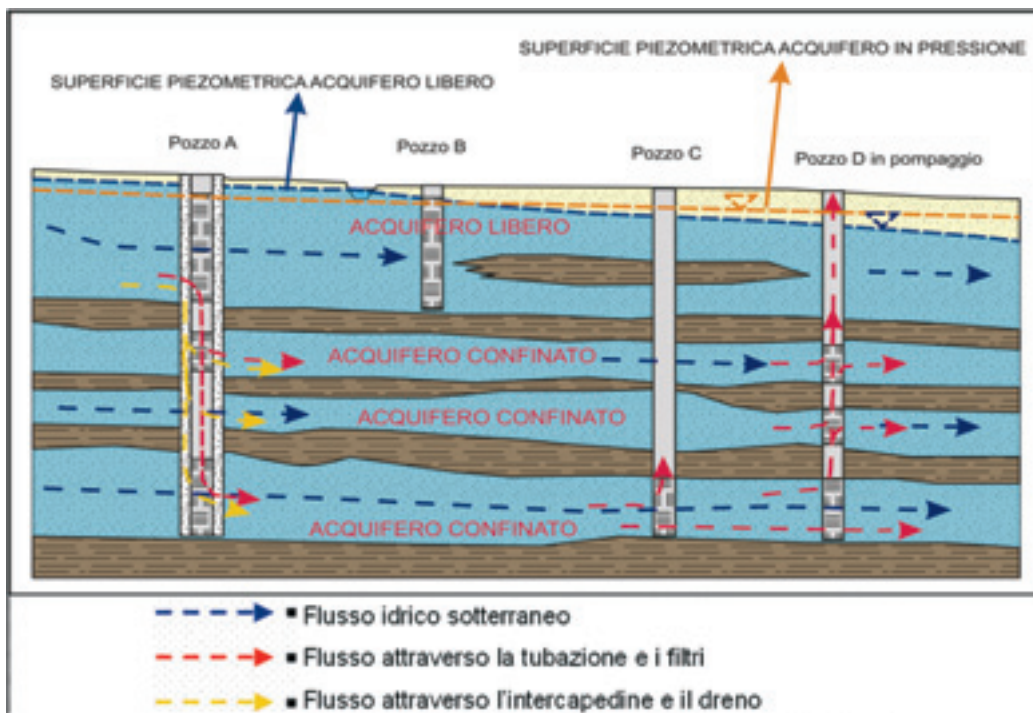


Figura 2. Ruolo dei pozzi misti nei flussi idrici tra acquifero superficiale e acquiferi profondi. I pozzi A, B e C sono inattivi, mentre il pozzo D è in pompaggio. In presenza di un gradiente verso il basso, si ha il passaggio di acque di bassa qualità dalla falda superficiale a quelle profonde, sia attraverso la colonna – pozzo, sia attraverso l’intercapedine o il dreno; in presenza di un gradiente verso l’alto, invece, si ha un depauperamento di acque di ottima qualità (falde profonde): esse si mescolano infatti con acque di falde superficiali spesso compromesse.

Figure 2. Role of multi-aquifer wells in water flow between upper and lower aquifers. Wells A, B and C are inactive, while D is a pumping well. Under a downward flow rate, there is a flow of poor quality water from the upper aquifer to the confined aquifer, either through casing or annulus; otherwise, under an upward gradient, there is a waste of very good quality water (lower aquifer): there is a mixing with the upper aquifer’s contaminated water.

Tabella 1. Parametri idrogeologici utilizzati nella simulazione.  
Table 1. Hydrogeological parameters used in the simulation.

strato	quota (m)	$K_x$ (m/s)	$K_y$ (m/s)	$K_z$ (m/s)	n	$n_e$	$Ss$ (m <sup>-1</sup> )	$Sy$
A= ghiaia-sabbia	100-160	0.0008	0.0008	0.0008	0.3	0.2	0.0001	0.23
B=argilla-limo	30-100	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-10</sup>	0.4	0.05	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-5</sup>
C= ghiaia-sabbia	20-30	0.00027	0.00027	0.00027	0.3	0.2	0.02	0.0001
D= argilla-limo	0-20	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-10</sup>	0.4	0.05	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-5</sup>

**Metodo 1.** Una possibile soluzione del problema del flusso idrico tra falde diverse attraverso la colonna di un pozzo inattivo è quello proposto da Sillimann e Higgins (1990). Si tratta di una soluzione in stato stazionario del flusso attraverso un pozzo multifalda utilizzando una modifica dell’equazione di Thiem (Bear, 1979).

Si assumono due acquiferi, uno superficiale non confinato (1) e uno profondo (2), di estensione laterale indefinita, omogenei e isotropi, caratterizzati rispettivamente da conducibilità idrauliche  $K_1$  e  $K_2$ . Il flusso avviene in stato stazionario. Secondo la Legge di Darcy, nel caso di acquifero non confinato, integrando tra il raggio del pozzo ( $r_1$ ) e il raggio d’influenza ( $R_{\infty 1}$ ) in corrispondenza dell’acquifero non confinato si ottiene il flusso idrico tra acquifero e pozzo:

$$Q_1 = \pi K_1 (H_1^2 - H_{w1}^2) \ln \left( \frac{r_1}{R_{\infty 1}} \right) \quad (2)$$

dove  $K_1$  è la conducibilità idraulica dell’acquifero non confinato;  $Q_1$  è la portata del flusso entrante nel pozzo dall’acquifero non confinato;  $H_1$  è il carico idraulico nell’acquifero non confinato a una distanza dal pozzo pari al  $R_{\infty 1}$ , che equivale al carico idraulico statico;  $H_{w1}$  è il carico idraulico al raggio  $r_1$ .

Per un acquifero confinato, il flusso vale:

$$Q_2 = 2\pi T_2 (H_2 - H_{w1} + CQ^2) \ln \left( \frac{r_2}{R_{\infty 2}} \right) \quad (3)$$

dove  $T_2$  è la trasmissività dell’acquifero confinato ( $T_2 = K_2 b_2$ , dove  $b_2$  è lo spessore dell’acquifero confinato).

Per la legge di conservazione della massa si ha che  $Q_1 = Q_2$ . Sviluppando i calcoli si ottiene:

$$Q = \frac{-1 + \sqrt{1 + 16\pi^2(\alpha^2\beta^2 C\Delta H)/(\alpha + \beta)^2}}{4\pi\alpha\beta C/(\alpha + \beta)} \quad (4)$$

dove  $Q$  rappresenta il flusso attraverso un pozzo misto inattivo; nella (4) per comodità di notazione, si è considerato:

$$\Delta H = H_1 - H_2$$

$$\alpha_2 = T_2 / \ln\left(\frac{R_{\infty 2}}{r_2}\right)$$

$$\beta_1 = K_1 / \ln\left(\frac{R_{\infty 1}}{r_1}\right)$$

L'equazione (4) permette di quantificare il flusso verticale tra due acquiferi, sotto le seguenti ipotesi: (a) condizioni di flusso in stato stazionario; (b)  $r_1 = r_2 = 0.3$  m; (c) il pozzo è completo in entrambi gli acquiferi.

**Metodo 2.** Un'altra soluzione è quella proposta da Lacombe *et alii* (1995). Gli autori descrivono il flusso in stato transitorio dell'acqua di falda in tre dimensioni. Si può ipotizzare un parametro fittizio, la  $K_w$  (conducibilità idraulica del pozzo) che rappresenta la conducibilità idraulica della colonna d'acqua al flusso verticale all'interno di una colonna - pozzo di raggio  $r_w$ .

Il flusso in tre dimensioni nell'acquifero, in stato transitorio, vale:

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = 0 \quad \text{con } i, j, k = x, y, z \quad (5)$$

Il flusso lungo l'asse del pozzo, in condizioni di flusso laminare e in assenza di emungimento o iniezione, è descritto dalla seguente equazione:

$$\pi \left( \frac{r_c^2}{L_s} + r_s^2 S_w \right) \frac{\partial h_w}{\partial t} - \pi r_s^2 K_w \frac{\partial^2 h_w}{\partial l^2} \mp q_n \Big|_{r_s} = 0 \quad (6)$$

dove  $\partial h_w$  è la variazione di carico idraulico in pozzo;  $l$  e  $L_s$  sono la distanza lungo la colonna e lunghezza totale dei filtri;  $r_c$  e  $r_s$  sono rispettivamente il raggio del rivestimento (*casing*) e dei filtri e sono qui considerati uguali ( $r_w$ );  $K_w$  = conducibilità idraulica del pozzo (direzione parallela all'asse);  $S_w$  rappresenta il coefficiente d'immagazzinamento specifico nella zona del pozzo compresa tra i filtri (cfr. (9)).

L'equazione non è lineare, poiché  $\partial h_w$  varia nel tempo, ed è estremamente complessa da risolvere.  $K_w$  si calcola usando l'equazione di Hagen - Poiseuille, e vale in condizioni di flusso laminare:

$$K_w = r_w^2 \rho g / 8\mu \quad (7)$$

dove  $\rho$  è la densità del fluido,  $g$  è l'accelerazione di gravità e  $\mu$  è la viscosità del fluido.

La portata del flusso lungo la colonna del pozzo si può calcolare con la formula di Darcy:

$$q_w = -K_w \frac{\partial h_w}{\partial l} \quad \text{ovvero:} \quad q_w = - \frac{r_s^2 \rho g}{8\mu} \frac{\partial h_w}{\partial l} \quad (8)$$

Il coefficiente d'immagazzinamento di un perforo riempito di fluido può essere ricavato dalla relazione seguente:

$$S_w = \rho g \beta \quad (9)$$

dove  $\beta$  è la compressibilità dell'acqua (a 20°C, circa  $4.4 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N (Pa}^{-1})$ ).

Per risolvere il problema posto, occorre eguagliare le equazioni (5) e (6) considerando nulla la perdita di carico del pozzo; si pone quindi il carico idraulico in pozzo pari a quello dell'acquifero ( $h_w = h$ ) in corrispondenza dell'interfaccia (filtri). Si ottiene così il flusso attraverso il pozzo in relazione alle caratteristiche idrogeologiche degli acquiferi.

**Metodo 3.** Il terzo metodo utilizzato è un metodo numerico alle differenze finite, sviluppato attraverso codice di calcolo *MODFLOW*.

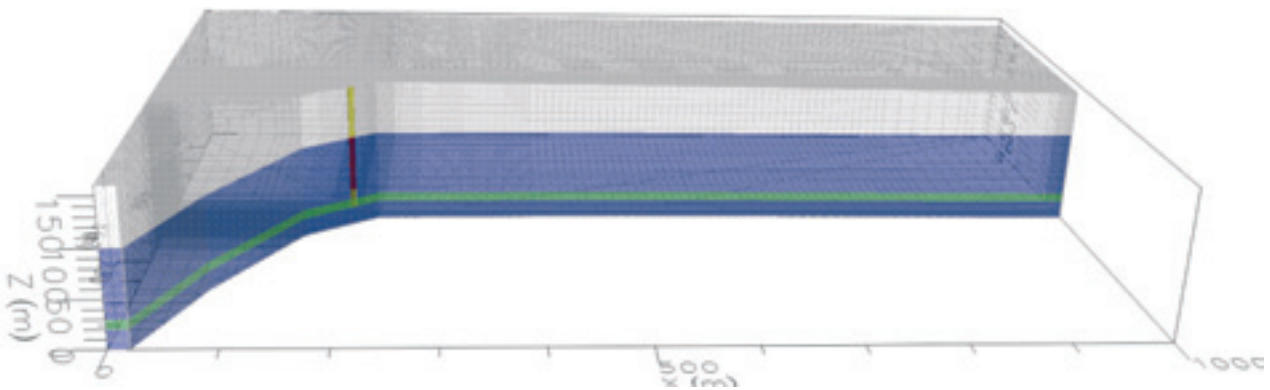


Figura 3. Rappresentazione schematica del sistema fisico modellizzato: in bianco l'acquifero superficiale, in verde l'acquifero profondo e in blu gli acquicludes; è inoltre visualizzata la posizione del pozzo presente nella simulazione.

Figure 3. Sketch representation of the modelled physical system: upper aquifers in white, deep aquifer in green and aquitards in dark grey; it is also shown the position of the well in the simulation.

Il sistema fisico modellizzato (Figura 3) è costituito da due acquiferi (uno superficiale e profondo) e due aquitards alternati; è stato inserito un pozzo, ad una distanza dai limiti tale che il cono di depressione non ne venisse influenzato.

Lo spessore dell'acquifero superficiale è un valore medio per la Pianura Padana piemontese, mentre per quanto riguarda l'acquifero profondo, nella pianura piemontese è presente una serie di acquiferi alternati ad *aquitards*. Nella modellazione si è ipotizzato per semplicità un pozzo che intercetta un solo acquifero profondo.

MODFLOW non è dotato, nella versione utilizzata, di un'applicazione specifica per simulare i pozzi multifalda inattivi (Neville e Tonkin, 2004); per simulare il flusso si è quindi assegnato alle celle che costituiscono la colonna – pozzo parametri tali da corrispondere ad una colonna d'acqua. In particolare si è impostata una porosità del 100%, una conducibilità idraulica del pozzo ( $K_w$ ) calcolata con la succitata formula di Hagen – Poiseuille, e valori di immagazzinamento e dispersività ricavati con formule riportate in Lacombe *et alii* (1995). Alle celle – pozzo è stata assegnata un'area di base uguale alla sezione del pozzo ipotizzato.

### Risultati dell'applicazione delle metodiche

Un confronto tra i vari metodi utilizzati ha evidenziato che, con differenze di carico idraulico dell'ordine di grandezza dei metri, comunemente riscontrabili nella Pianura Padana piemontese, i flussi attraverso la colonna del pozzo risultano essere dell'ordine di grandezza delle centinaia di  $m^3$ /giorno (Figura 4). I risultati dei metodi in stato stazionario (Metodo analitico 1 e Metodo numerico

alle differenze finite) si discostano soltanto del 10 %, mentre il Metodo analitico 2 dà valori maggiori (mediamente circa il doppio) pur rimanendo nell'ambito dello stesso ordine di grandezza. Si tratta quindi di quantità non trascurabili e che possono avere effetti qualitativi importanti sulle risorse idriche sotterranee.

### Valutazione a scala regionale

A scala regionale l'impatto potenziale dei pozzi profondi individuati nelle aree di pianura della Regione Piemonte è sicuramente rilevante: sono infatti presenti circa 200.000 tra pozzi e perforazioni di vario tipo (Regione Piemonte, 2007).

Da un'analisi eseguita su un campione di pozzi per uso idropotabile è emerso che circa il 35% sono pozzi profondi (Figura 5); di questi pozzi, il 9% è un pozzo misto con filtri sia in falda superficiale sia in falda profonda; a questa situazione di sicura intercomunicazione tra acquiferi diversi vanno aggiunte altre situazioni di criticità, spesso meno chiare ma non meno problematiche. Vi è infatti la presenza di pozzi per uso agricolo, industriale, o antincendio, che spesso presentano caratteristiche costruttive inidonee (come per esempio l'assenza di cementazioni intermedie), oppure sono deteriorati o danneggiati.

### Strumenti legislativi per la salvaguardia degli acquiferi profondi

Il D.Lgs del 3 aprile 2006, n. 152, stabilisce che le acque contenute negli acquiferi profondi, essendo di particolare pregio, siano destinate in via prioritaria per l'uso potabile.

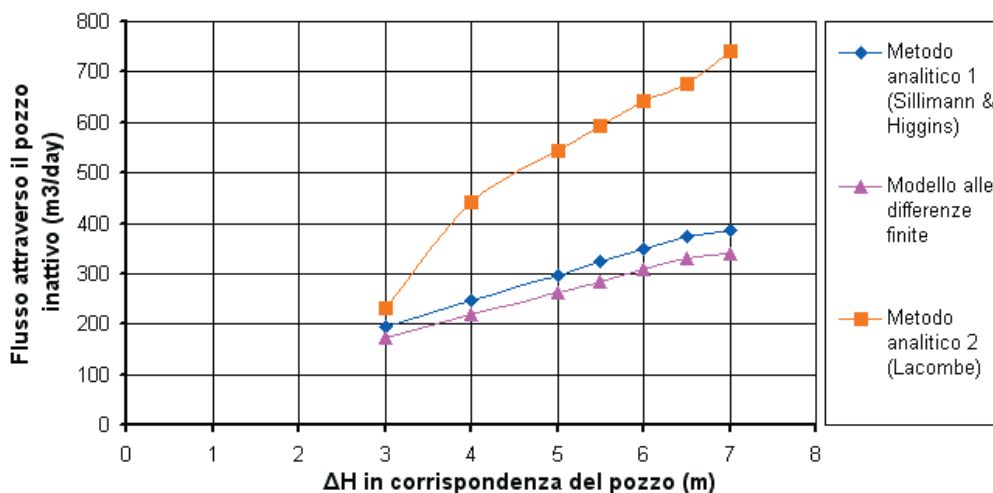


Figura 4. Entità del flusso idrico attraverso la colonna del pozzo, per differenti valori di carico idraulico, ricavati con due metodi analitici e un metodo numerico alle differenze finite (Modflow);  $Q$ : portata di flusso tra acquifero superficiale e profondo attraverso il pozzo;  $\Delta H$ : differenza di carico idraulico in pozzo tra acquifero superficiale e acquifero profondo.

Figure 4. Magnitude of water flow through the well casing, under different heads, obtained with two analytical methods and a numeric finite difference method (Modflow);  $Q$ : flow rate between upper and lower aquifer;  $\Delta H$ : head difference in well between upper and lower aquifer.



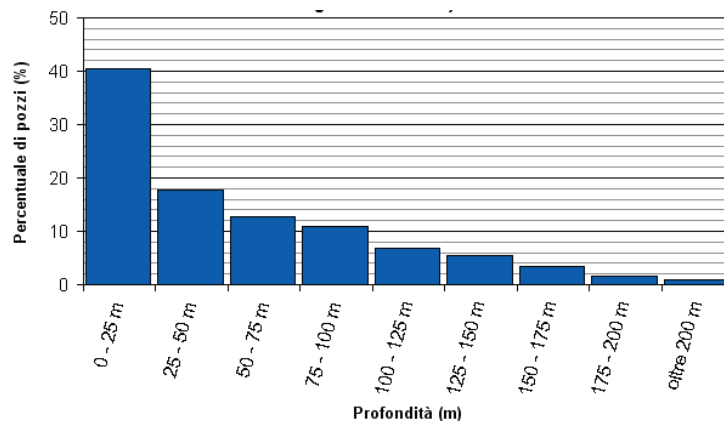


Figura 5. L'istogramma mostra la relazione tra numero di pozzi e loro profondità in Provincia di Vercelli: anche se molte perforazioni sono di profondità inferiore a 20 m di profondità, si nota che la maggior parte dei pozzi raggiunge i 50 m, quota a cui, in media, si ha il limite tra acquifero superficiale e acquiferi profondi.

Figure 5. The histogram shows the relationship between number of wells and depth in Vercelli's Province: even if many wells are less than 20 m deep, the main part of these wells reaches the depth of 50 m, where the lower aquifer occurs (on the average).

La Regione Piemonte ha emanato, con una politica all'avanguardia nel campo della protezione delle risorse idriche, una serie di norme volte a mantenere la separazione tra acquifero superficiale e acquiferi profondi.

Il D.P.G.R. 5 marzo 2001, n° 4/R, regolamento regionale recante: "Disciplina dei procedimenti di concessione preferenziale e di riconoscimento delle utilizzazioni di acque che hanno assunto natura pubblica" indica obiettivi, procedure ed elaborati da produrre al momento della cessazione dell'attività di un pozzo.

La L.R. 7 aprile 2003, n° 6, "Disposizioni in materia di autorizzazione agli scarichi delle acque reflue domestiche e modifiche alla L.R. 30 aprile 1996, n° 22 (Ricerca, uso e tutela delle acque sotterranee)" riporta all'art. 5 - Modifiche all'art. 2 della L. R. 30 aprile 1996, n° 22: "Per la tutela e la protezione della qualità delle acque sotterranee è vietata la costruzione di opere che consentano la comunicazione tra le falde profonde e la falda freatica", mentre all'art. 4 si ribadisce che le acque degli acquiferi profondi sono riservate all'uso potabile, a meno che non siano precluse a questo uso per le loro caratteristiche chimiche naturali.

### Interventi sui pozzi misti

Per impedire la comunicazione tra acquiferi diversi attraverso i pozzi per acqua esistono in generale due possibili strategie d'intervento (D.P.G.R. 5 marzo 2001, n° 4/R):

- Chiusura: il pozzo viene completamente riempito con idonei materiali di riempimento e materiali sigillanti e reso inattivo. I materiali sigillanti (cementazioni) devono coinvolgere sia la colonna - pozzo che l'intercapedine tra tubazione e parete del foro, in modo da assicurare l'isolamento dei diversi acquiferi;
- Ricondizionamento: viene eliminata la zona filtrante

in falda superficiale o nelle falde profonde, avendo cura di sigillare anche il dreno. In questo caso si mantiene l'emungimento solo dalla falda superficiale oppure da una o più falde profonde, ma si impedisce il mescolamento tra acque dell'acquifero superficiale e quelle degli acquiferi profondi.

Queste due tipologie di intervento possono essere attuate con modalità diverse, in base alle caratteristiche del sito (assetto idrogeologico) e del pozzo, alla quantità di informazioni note o acquisite, e a considerazioni di carattere economico.

In seguito ad un'indagine svolta in collaborazione con le amministrazioni provinciali piemontesi, sono state investigate le tecniche più utilizzate; quelle illustrate di seguito sono una sintesi rappresentativa del lavoro di ricerca svolto.

### Interventi di chiusura del pozzo

La chiusura di un pozzo è un intervento che si esegue in genere solo se non è possibile recuperare un pozzo irrimediabilmente danneggiato, o se esso non deve più essere utilizzato. Nel caso più semplice, con un pozzo finestrato solo in falda superficiale, l'obiettivo da perseguire è impedire agli inquinanti presenti in superficie di raggiungere l'acquifero, dal piano campagna, attraverso il pozzo. Per questo scopo, all'interno del pozzo si immette del materiale inerte, a partire da fondo pozzo a risalire, fino a 2 ÷ 5 m il piano di campagna; si eseguono un taglio della parte sommitale della tubazione (per almeno un metro) e uno scavo di diametro maggiore di quello della tubazione del pozzo. Tale scavo si può riempire con una boiaccia cementizia - bentonitica o con argilla priva di materia organica (P. of Manitoba, 2006).

In Figura 6 è illustrato un esempio di questo tipo di intervento.

Se il pozzo raggiunge uno o più acquiferi profondi,

l'obiettivo principale è sempre quello di ripristinare la condizione idrogeologica iniziale, separando i diversi corpi acquiferi interessati dalla perforazione; il tipo di intervento può essere differenziato a seconda che la stratigrafia del pozzo sia nota o meno. Se si conosce la posizione dei tratti filtrati ma non la stratigrafia è possibile:

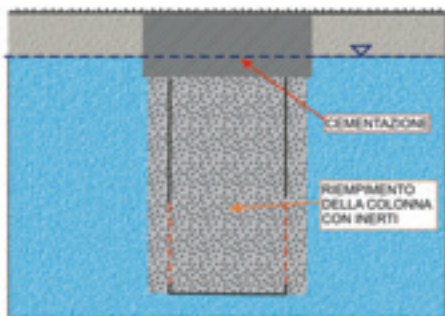


Figura 6. Esempio di intervento di chiusura di un pozzo con filtri in sola falda libera.

*Figure 6. Example of dismission (sealing) of a well with screens only in the upper aquifer.*

- scegliere di cementare solo i tratti filtrati, dopo averli punzonati con un apposito punzonatore. Questa operazione, pur non ristabilendo in senso stretto l'idrogeologia del sito, impedisce che ci sia un flusso attraverso la colonna del pozzo; per quel che riguarda l'intercapedine tra tubazione e parete del foro, è difficile infatti stabilire se l'intervento sia risultato realmente efficace, pur sfondando i filtri e cementando anche il dreno.

- punzonare l'intera tubazione e cementare l'intera colonna.

Un'altra possibilità (con ogni probabilità la più efficace) consiste nelle seguenti operazioni: si punzonano i tratti ciechi della colonna, in corrispondenza dei quali dovrebbero esserci livelli a bassa permeabilità (Prov. di Milano, 2006); si riempie la colonna con materiale inerte fino a poco sotto il tratto punzonato più profondo; si installa un semplice *packer* (al di sopra del tratto punzonato) e si esegue una cementazione in pressione; poi si riempie con materiale inerte fino a poco sotto il tratto punzonato successivo e si ripetono le operazioni di cui sopra per ogni tratto punzonato. Il risultato finale (Figura 7) presenta la ricostruzione dei livelli impermeabili in corrispondenza della tubazione e del dreno del pozzo.

Se la stratigrafia del sito e la posizione dei filtri sono note, l'intervento di ripristino delle condizioni idrogeologiche iniziali può essere più mirato e volto a ripristinare i livelli acquiferi e i livelli a bassa permeabilità (*aquitards*) nel pozzo.

Le possibilità d'intervento sono molteplici, e se ne riporta un esempio in Figura 8: vengono eseguite delle cementazioni in corrispondenza degli *aquitards*. Con

apposito punzonatore viene tagliata la tubazione cieca nel tratto in cui si esegue la cementazione con la metodologia di cui sopra (c), affinché l'intervento interessi anche il dreno.

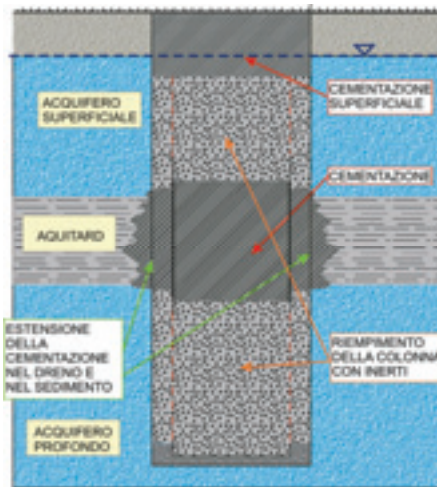


Figura 7. Chiusura di un pozzo profondo se non è nota la stratigrafia del sito. Se è nota la posizione dei tratti finestrati essi vanno cementati, mentre i tratti di tubazione cieca possono essere riempiti con inerti.

*Figure 7. Dismission of a deep well if the stratigraphic record of the site. If the screened position is known, they have to be sealed, while the not screened sections can be filled with aggregate materials.*

Con questo intervento si ha il ripristino dei livelli a bassa permeabilità e s'impedisce la comunicazione tra i diversi tratti finestrati. Le restanti porzioni della colonna si possono riempire con materiale inerte, ad eccezione della parte più superficiale del pozzo, che viene cementata per impedire l'ingresso in pozzo di eventuali contaminazioni presenti sul piano campagna.

Un'altra possibilità di operazione di chiusura di un pozzo è la cementazione dall'esterno della colonna – pozzo. Questo intervento è complementare alla cementazione della colonna, ma è anche una possibile alternativa quando non si può accedere all'interno del pozzo (per esempio a causa di un collasso della colonna).

Le metodologie operative finora utilizzate sono essenzialmente due:

- iniezione di boiaccia cementizia nel dreno con aste infisse nell'intercapedine tra la tubazione e la parete del foro (Figura 9);
- iniezione di boiaccia cementizia o bentonitica in pressione in fori (in numero di quattro, disposti ortogonalmente, o meglio sei, disposti a 60°) realizzati nelle immediate vicinanze del pozzo (Chiesa, 2001).

### Ricondizionamento di pozzi

Gli interventi di ricondizionamento si eseguono quando si vuole mantenere l'emungimento in un pozzo multifalda

con tratti filtrati sia in acquifero superficiale che in acquiferi profondi, e si attua chiudendo i tratti filtrati nella falda superficiale o nelle falde profonde. La scelta tra l'una e le altre dipende dall'uso del pozzo: essendo gli acquiferi profondi destinati all'emungimento per uso idropotabile, se l'acqua estratta è destinata al consumo umano, si chiudono i tratti finestrati in corrispondenza dell'acquifero superficiale, se l'uso è diverso (irriguo, antincendio, industriale,...) si chiuderanno i tratti finestrati in falda profonda.

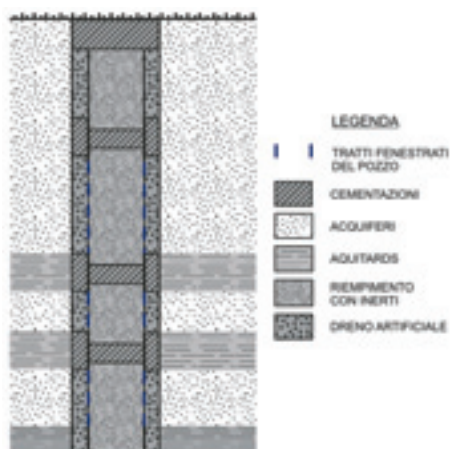


Figura 8. Cementazioni mirate in un pozzo profondo, per ristabilire l'originario assetto idrogeologico: si eseguono cementazioni in corrispondenza alla base e al top dei filtri, coinvolgendo il limite tra acquifero e aquitard.

*Figure 8. Focused sealing of a deep well, to restore the original hydrogeologic setting: cement plugs are made in correspondence to the top and bottom of the screened sections, involving the aquifer – aquitard limit.*

Il ricondizionamento delle falde profonde (Figura 10) implica una chiusura dei tratti finestrati in corrispondenza delle falde profonde. L'intervento più frequentemente utilizzato è la punzonatura dei filtri con successiva cementazione integrale della colonna e dell'intercapedine tra tubazione del pozzo e parete del foro, sfruttando il flusso della boiaccia nel dreno, attraverso i filtri. In luogo di questa modalità d'intervento sarebbe preferibile eseguire delle punzonature in corrispondenza ai tratti ciechi della tubazione, per facilitare la diffusione della boiaccia nei settori dell'intercapedine in corrispondenza di dove si presume sia l'ubicazione di livelli a bassa permeabilità; è comunque sempre necessario eseguire una cementazione consistente alla base della nuova colonna di produzione (top del riempimento).

Un altro tipo di intervento (Figura 11) ha invece l'obiettivo di ristabilire l'originaria idrogeologia del sistema acquifero profondo, ricostruendo all'interno del pozzo acquiferi e aquitards. Si esegue una punzonatura della colonna cieca in corrispondenza degli aquitards; in questi tratti si eseguono poi delle cementazioni in pressione utilizzando un *packer* semplice che

coinvolgono tubazione e dreno. I tratti di colonna in corrispondenza dei filtri si possono sempre riempire invece con materiale inerte.



Figura 9. Schema in pianta dei fori per cementazione dall'esterno del pozzo: l'iniezione della boiaccia (in pressione) avviene per mezzo di tubi inseriti in ognuno dei fori.

*Figure 9. Plan sketch of cementing bores from outside the well: the injection of the cement grout (pressurised) is made through tremie pipes inside each bore.*

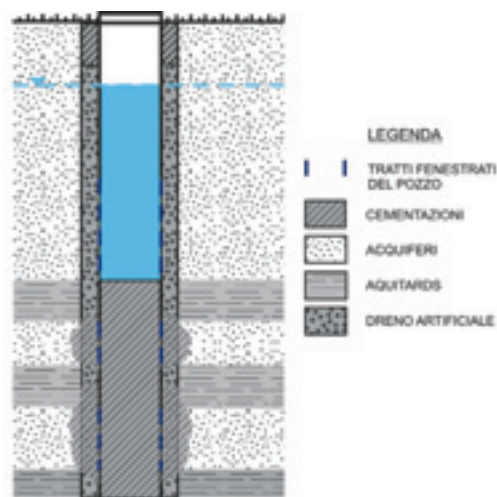


Figura 10. Esempio di ricondizionamento di un pozzo multifalda con chiusura dei filtri in corrispondenza delle falde profonde.

*Figure 10. Example of well reconditioning of a multiaquifer well, with sealing of the screens in correspondence to the deep aquifers.*

Se si desidera invece mantenere l'emungimento nelle falde profonde, chiudendo i tratti finestrati in corrispondenza dell'acquifero superficiale, le tecniche utilizzabili sono molto varie e in continua evoluzione.

Nell'esempio in Figura 12 è riportato un ricondizionamento con ritubaggio: dopo aver punzonato i filtri in falda superficiale, si inserisce nella colonna – pozzo una tubazione cieca di diametro inferiore, provvista di flangia terminale a tenuta, che viene fissata alla tubazione. L'intercapedine tra vecchia e nuova tubazione viene riempita, per mezzo di un tubo di piccolo diametro, con boiaccia cementizia.



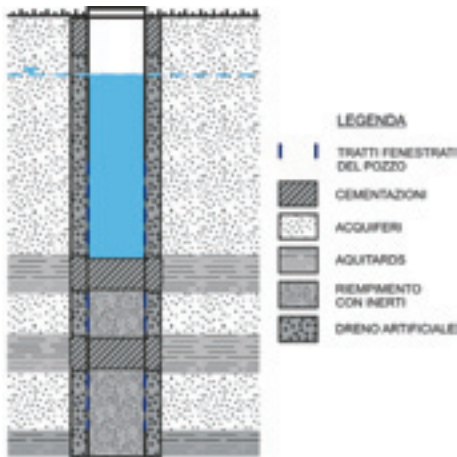


Figura 11. Ricondizionamento con ricostruzione dell'idrogeologia del sito: si eseguono cementazioni in corrispondenza degli aquitards.

Figure 11. Reconditioning with reconstruction of the site's hydrogeological setting: cement plugs are realized in correspondence to the aquitards.

Un altro tipo di intervento di ricondizionamento dei tratti filtrati in falda superficiale si esegue usando un *packer* doppio, che permette di isolare i tratti da cementare, corrispondenti ai filtri in falda superficiale, preventivamente punzonati.

In Figura 13 è illustrato uno schema dell'intervento di cementazione, che coinvolge sia l'intercapedine tra tubazione e parete del foro, sia i sedimenti circostanti. Dopo aver eseguito la cementazione si riveste internamente la vecchia tubazione con una nuova, cieca e con diametro appena inferiore, fino a poco sotto il filtro appena sigillato da chiudere. È un metodo innovativo, efficace ma costoso.

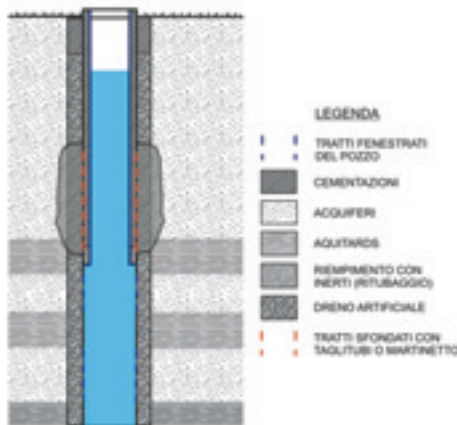


Figura 12. Ricondizionamento con chiusura dei filtri in falda superficiale per mezzo di un ritubaggio, con cementazione dell'intercapedine tra vecchia e nuova tubazione.

Figure 12. Reconditioning with sealing of the screens in correspondence to the shallow aquifer by a re-lining of the well, with cementing of the annular space between old and new casing.

Un altro tipo di intervento di ricondizionamento si esegue con un utensile per tagliare la tubazione e per iniettare boiaccia cementizia in pressione; questi utensili hanno nomi diversi a seconda del brevetto, ma possono essere genericamente definiti *reaming - jetting tools*. In Figura 14 è mostrato uno di questi utensili (Guareschi e Longo, 2006), che possono tagliare la tubazione e iniettare la boiaccia in pressione, nei tratti filtrati

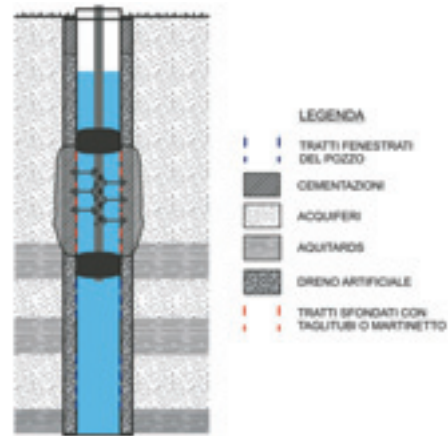


Figura 13. Ricondizionamento con cementazione dei filtri in falda superficiale tramite packer doppio.

Figure 13. Reconditioning by cementing upper aquifer screens with a double packer.

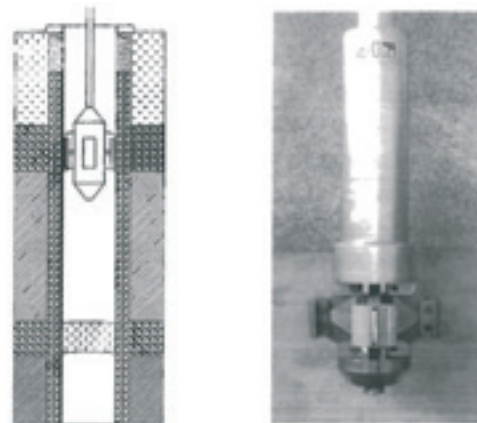


Figura 14. A sinistra: esempio di reaming - jetting tool; a destra: schema di funzionamento (Guareschi e Longo, 2006).

Figure 14. On the left: example of reaming - jetting tool; on the right: working scheme (Guareschi e Longo, 2006).

In Figura 15 è illustrata una tecnica di ricondizionamento dei tratti finestrati in falda superficiale che non ha dato sempre buoni risultati. Viene eseguito un ritubaggio, che ha la duplice funzione di isolare la colonna dai filtri in falda superficiale e di irrobustire la colonna stessa. Poi si esegue un'iniezione della boiaccia cementizia, che avviene mediante delle perforazioni eseguite all'esterno del pozzo oppure nel dreno. I problemi sono dovuti al fatto che l'elevata pressione a cui

avviene l'iniezione della boiaccia può causare lo schiacciamento o la rottura della tubazione.

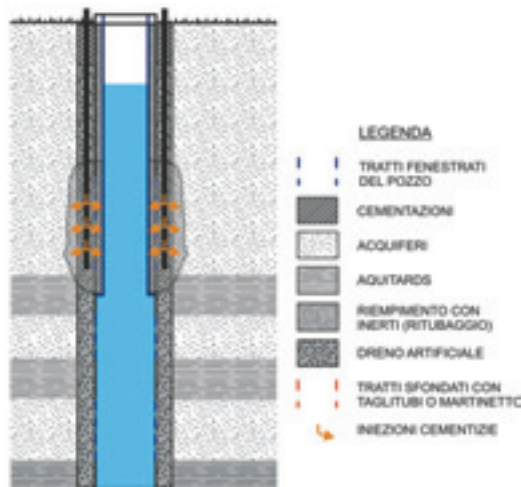


Figura 15. Ricondizionamento dei filtri in falda superficiale con ritubaggio e cementazione dall'esterno della colonna tramite perforazioni eseguite in prossimità del pozzo.

*Figure 15. Reconditioning of the upper aquifer screens with relining and cementing from outside the casing, through boreholes drilled beside the well.*

## Conclusioni

Si può affermare che è fondamentale preservare la separazione tra acquifero superficiale e acquiferi profondi. È stato calcolato che in condizioni medie (cfr. Tab. 1) nella Regione considerata (Pianura Padana piemontese), per ogni singolo pozzo multifalda è possibile che si verifichi un flusso idrico di ben 250 m<sup>3</sup>/giorno dalla falda superficiale verso le falde profonde.

È quindi necessario procedere a interventi sui pozzi multifalda in modo da impedire tale flusso. Le tecnologie di chiusura e ricondizionamento presentate sono le più comunemente utilizzate nella Pianura Padana piemontese.

Questi interventi sui pozzi profondi consentono di preservare la qualità delle falde idriche profonde, impedendo che queste siano raggiunte da contaminazioni superficiali, e di impedire inutili depauperamenti della

risorsa in caso di gradienti idraulici maggiori nelle falde profonde rispetto alle falde superficiali.

Esistono varie altre tecniche di chiusura e ricondizionamento di pozzi attualmente in evoluzione: la scelta deve essere operata caso per caso in base alle condizioni riscontrate, in funzione di una valutazione sito-specifica.

In alcuni casi (per esempio le iniezioni laterali) l'esperienza degli interventi eseguiti in Piemonte ha portato alla conclusione che l'efficacia non è sempre garantita; in altri casi c'è invece uno sfavorevole rapporto tra costi e benefici. La valutazione dell'efficacia della tecnica utilizzata non è semplice. Se si dispone di un piezometro filtrato nell'acquifero in cui si è mantenuto l'emungimento è possibile, mediante una prova di acquifero, valutare i parametri idrogeologici (trasmissività *in primis*) e individuare la tipologia di acquifero captato; in alternativa, se si dispone di due piezometri (uno fenestrato nell'acquifero superficiale e l'altro fenestrato nell'acquifero profondo) si può eseguire una prova di tracciamento, verificando così se permangono flussi tra acquiferi diversi.

Da un punto di vista tecnico, la verifica dell'efficacia degli interventi è comunque un argomento molto delicato e poco trattato

È quindi indispensabile il ruolo di controllo da parte delle amministrazioni competenti sulle tecnologie di intervento utilizzate. Una sempre maggiore conoscenza e sviluppo delle tecniche di chiusura e ricondizionamento è un passo fondamentale nella strategia di protezione delle falde profonde.

## Ringraziamenti

Un grande supporto a questo studio è stato fornito, concedendo l'opportunità di avere accesso ed elaborare una grande mole di dati e progetti, dalla Regione Piemonte e dalle Province; in particolare in questo lavoro sono stati trattati dati forniti dalle amministrazioni di Torino e Vercelli. Gli autori desiderano ringraziare: C. Cuzzi, M. Ferraris, M. Governa, V. Latagliata, G. Massazza, M. Petricig, per il loro tempo e l'assistenza.

## Bibliografia

- Bear, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater*. McGraw-Hill, New York, 1-567.
- Beretta G.P., De Luca D.A., Masciocco L., Filippini G., Viotto C. (1997). *Protezione delle acque sotterranee destinate al consumo umano: proposta di linee guida per definire le zone di rispetto intorno a pozzi*. R. Piemonte – Collana ambiente, 1-82.
- Bove A., Casaccio D., De Luca D.A., Destefanis E., Lasagna M., Masciocco L., Ossella L., Tonussi M. (2005). *Idrogeologia della Pianura Piemontese*. R. Piemonte – Dir. Pian. Ris. Idr. e Univ. Di Torino, 1-16.+ CD-ROM.
- Chiesa G., (2001). *Specifiche tecniche per la chiusura di pozzi abbandonati*. Acque Sotterranee, 74 - dic 2001, 27-28.
- Debernardi L., De Luca D.A., Lasagna M. (2005). *Il processo di denitrificazione naturale nelle acque sotterranee in Piemonte*. Proceedings of AVR05 and 4th National Congress on the Protection and Management of Groundwater - Reggia di Colorno (PR), Italy, 21-23 September 2005, Paper ID 176, 1-27.
- Guareschi C., Longo G. (2006). *Pozzi multifalda, messa in sicurezza, monitoraggio e sviluppo*. Acque Sotterranee, 103 - ott 2006, 47-51.
- Lacombe S., Sudicky E.A., Frapce S.K., Unger A.J.A. (1995). *Influence of leaky boreholes on cross-formational groundwater flow and contaminant transport*. Water Res. Res., 31, (8), 1871-1882.
- Neville C.J., Tonkin M.J. (2004). *Representation of multiaquifer wells with MODFLOW*. Ground Water, 42 (6), 910-919.
- Province of Manitoba (2006). *Guide for Sealing Abandoned Water Wells in Manitoba*. Prairie Farm Rehabilitation Administration,

Manitoba, Canada.

Provincia di Milano (2006). *Modalità tecniche per la chiusura dei pozzi per acqua e chiusura pratica di concessione*. Prov. Milano, Serv. Gest. E Contr. Acque Sott., 1-4.

Regione Piemonte (1996). *L.R. 30 aprile 1996, n. 22 Ricerca, uso e tutela delle acque sotterranee*. B.U.R.P. 8 maggio 1996, n. 19.

Regione Piemonte (2003). *D.P.G.R. 29 luglio 2003, n. 10/R, Reg. reg. recante: - Disciplina dei procedimenti di concessione di derivazione di acqua pubblica (Legge regionale 29 dicembre 2000, n. 61)*. B.U.R.P. 31 luglio 2003, n. 31.

Regione Piemonte (2003). *L.R. 7 aprile 2003, n. 6 - Disposizioni in materia di autorizzazione agli scarichi delle acque reflue domestiche e modifiche alla legge regionale 30 aprile 1996, n. 22*. B.U.R.P. 10 aprile 2003, n. 15.

Regione Piemonte (2003). *L.R. 7/4/2003, n. 6, Disposizioni in materia di autorizzazione agli scarichi delle acque reflue domestiche e modifiche alla legge regionale 30 aprile 1996, n. 22 (Ricerca, uso e tutela delle acque sotterranee)*. B.U.R.P. 10/4/2003, n. 15.

Regione Piemonte (2007). *Piano di Tutela delle Acque, D.C.R. n. 117-10731 del 13 marzo 2007*

Regione Piemonte (2001). *D.P.G.R. 5 marzo*

2001, n° 4/R, regolamento regionale recante: "Disciplina dei procedimenti di concessione preferenziale e di riconoscimento delle utilizzazioni di acque che hanno assunto natura pubblica". B.U.R.P. 7/3/2001 n.10.

Repubblica Italiana (2006). *Decreto legislativo del 3/4/2006, n. 152, Norme in materia ambientale*. G.U. n. 88 del 14/04/2006 - S.O. n. 96.

Silliman, S., and D. Higgins (1990). *An analytical solution for steady-state flow between aquifers through an open well*. *Ground Water* 28 (2): 184–190.





## Scenari idrodinamici nella piana ad Oriente di Napoli (Italia), nell'ultimo secolo: cause e problematiche idrogeologiche connesse

Vincenzo Allocca, Pietro Celico

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Napoli "Federico II"  
vincenzo.allocca@unina.it; pietro.celico@unina.it

*Hydrodynamics scenarios in the eastern plain of Naples (Italy), in the last century: causes and hydrogeological implications*

**ABSTRACT:** In the last century, the alluvial aquifer of the eastern area of Naples experienced important hydrogeological modifications – mining and elevations of the water table – which caused a degradation of the groundwater and affected the hydrogeological and urban systems. The historical pattern of the hydrodynamics scenarios, together with the time series of the public and private pumping, suggest an unsustainable management of the groundwater, which is the main cause of the recorded hydrogeological dynamics. By contrast, there is no evidence that temporary recharges variations, due to precipitations, persistently affect the observed piezometric dynamics. As to the rising of the piezometer levels, the presence of underground structures – tunnels, rail networks, public and private buildings – seems to have influenced, to local scale, the aquifer dynamics; however, such contribution turns out to be marginal compared to the one deriving from the lessening of the groundwater pumping.

**Key terms:** Hydrodynamics scenarios, Groundwater mining, Rise of the water table, Pumping rate, Underground structures, Naples, Southern Italy.

**Termini chiave:** Scenari idrodinamici, Abbassamenti piezometrici, Risalita della falda, Emungimenti, Opere in sotterraneo, Napoli, Italia Meridionale.

### Riassunto

Nell'ultimo secolo, la falda ad Oriente di Napoli ha subito profonde modificazioni idrogeologiche – abbassamenti e risalite dei livelli idrici – che hanno causato particolari condizioni di criticità per il sistema idrogeologico.

L'analisi integrata degli scenari idrodinamici, delle serie storiche pluviometriche e delle condizioni di utilizzazione della risorsa ha evidenziato che la gestione poco corretta dei prelievi idrici ha costituito la principale causa delle diverse dinamiche idrogeologiche registrate. Viceversa, data l'assenza di significativi e prolungati trends delle precipitazioni, può essere considerato ininfluenza il contributo derivante dalle temporanee variazioni di ricarica della falda.

Solo in alcuni casi, sull'attuale fenomeno di risalita della falda, sembra aver influito, in modo marginale ed a scala solo locale, anche la presenza di talune opere in sotterraneo – gallerie ferroviarie, fondazioni profonde, ecc. – realizzate nell'ultimo decennio.

### Introduzione

Da diversi decenni la falda ad Oriente di Napoli subisce ripetute modificazioni, in termini di abbassamenti e risalite dei livelli, causando un degrado delle risorse

idriche sotterranee e condizioni di criticità per il sistema idrogeologico ed urbano locale. Se i diversi fenomeni di abbassamento hanno contribuito al depauperamento di sorgenti e falde, al decadimento della qualità delle acque sotterranee (Celico et alii, 1995) e all'insorgere di locali fenomeni di subsidenza (Regione Campania, 2006; Dati, 2006), i più recenti fenomeni di risalita stanno causando non pochi problemi di sicurezza per il territorio urbano (Celico, 1999a; 1999b; Celico et alii, 2001; Comune di Napoli - C.U.G.R.I., 2001; Corniello & Ducci, 2002; Corniello et alii, 2003). Infatti, in diversi settori della zona orientale di Napoli, a seguito della realizzazione di opere in sotterraneo progettate secondo criteri non compatibili con le dinamiche idrogeologiche, si registrano periodici e/o costanti fenomeni di allagamento di gallerie ferroviarie, seminterrati, garages, etc., nonché problemi di tenuta idraulica per la rete fognaria e di stabilità per alcuni edifici.

Al fine di comprendere, dal punto di vista idrogeologico, ciò che è accaduto e sta accadendo nell'ambito della piana, è stata effettuata un'analisi storica dei dati idrogeologici, esaminando i vari scenari idrodinamici che hanno caratterizzato la falda nell'ultimo secolo. Inoltre, mediante l'uso integrato di dati piezometrici, pluviometrici e di quelli relativi ai prelievi idrici, sono state analizzate le cause e le problematiche

idrogeologiche connesse con le diverse dinamiche sotterranee osservate.

Lo studio è stato così articolato:

caratterizzazione idrogeologica dei depositi di piana e analisi delle peculiarità idrodinamiche dell'acquifero;

definizione delle dinamiche spazio-temporali della falda;

analisi integrata delle serie storiche piezometriche e pluviometriche, in relazione ai prelievi idrici e alla potenzialità della risorsa.

### La piana ad Oriente di Napoli

La piana ad Oriente di Napoli, di estensione pari a circa 300 km<sup>2</sup>, occupa la porzione centrale della più ampia

depressione strutturale della piana Campana (Figura 1), quella compresa tra il distretto vulcanico dei Campi Flegrei, ad W, i rilievi carbonatici dei Monti Avella e Pizzo d'Alvano, a NE ed a E, ed il Somma-Vesuvio, a S. Essa è morfologicamente suddivisa in due porzioni, la piana del Volturno e l'alto corso dei Regi Lagni, dallo spartiacque superficiale presente lungo l'allineamento S. Anastasia-Casalnuovo-Casoria (Figura 1).

Impostatasi già a partire dal Pliocene superiore su lineamenti tettonici di estensione regionale (Figura 1), detta depressione è stata colmata, durante il Quaternario, da depositi vulcanici, di origine flegrea e vesuviana, da sedimenti alluvionali e di ambiente marino.

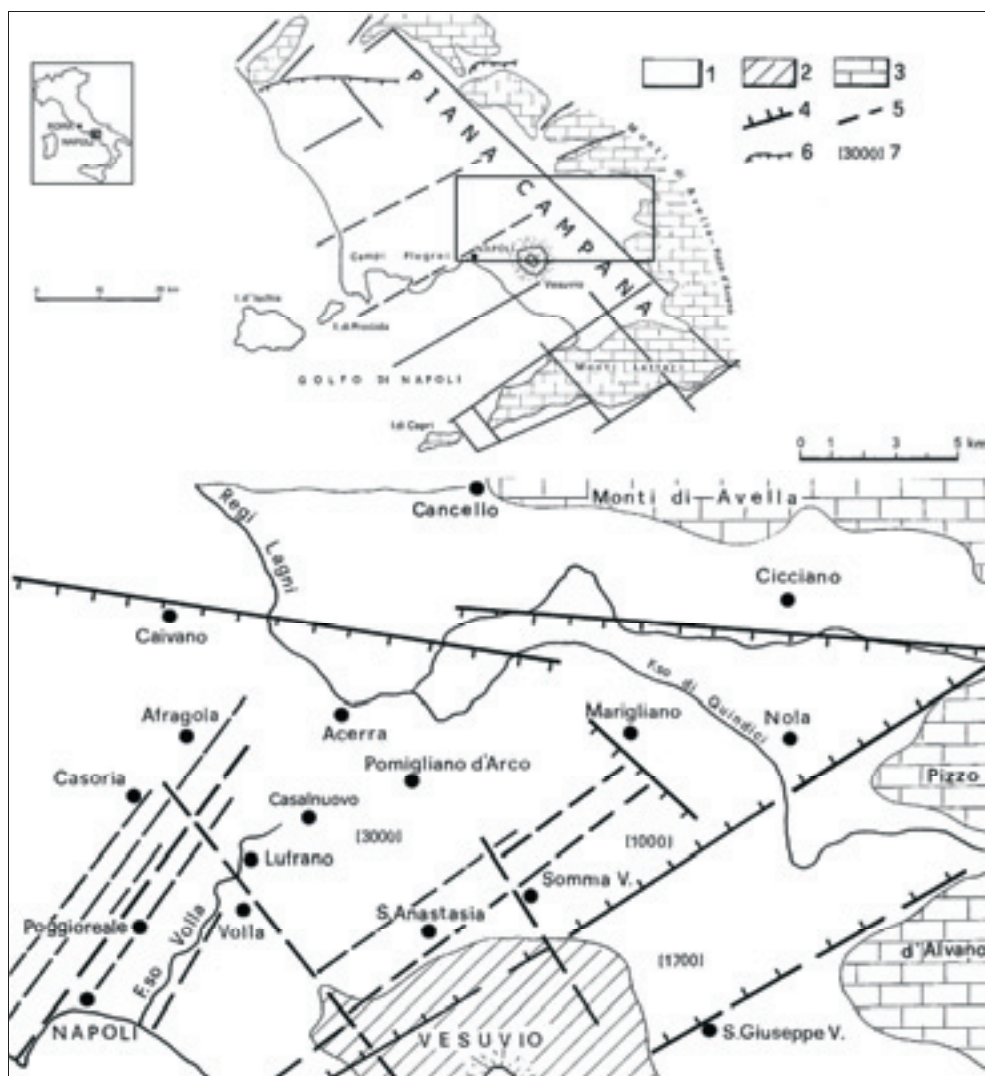


Figura 1 – Schema geologico-strutturale della piana Campana (Ippolito et alii, 1973, modificato; La Torre et alii, 1982, modificato).  
 Legenda: 1) Depositi piroclastico-alluvionali; 2) Depositi piroclastici e lave; 3) Rocce carbonatiche; 4) Principali faglie; 5) Faglie presunte o sepolte; 6) Sovrascorrimenti principali; 7) Profondità (in m dal p.c.) del substrato carbonatico.

Figure 1 – Geological-structural scheme of the Campania plain (Ippolito et alii, 1973, modified; La Torre et alii, 1982, modified).  
 Legend: 1) Pyroclastic-alluvial deposits; 2) Lavas and deposits pyroclastic; 3) Carbonatic rocks; 4) Main fault; 5) Fault buried or supposed; 6) Main thrust; 7) Deep of the carbonatic top.



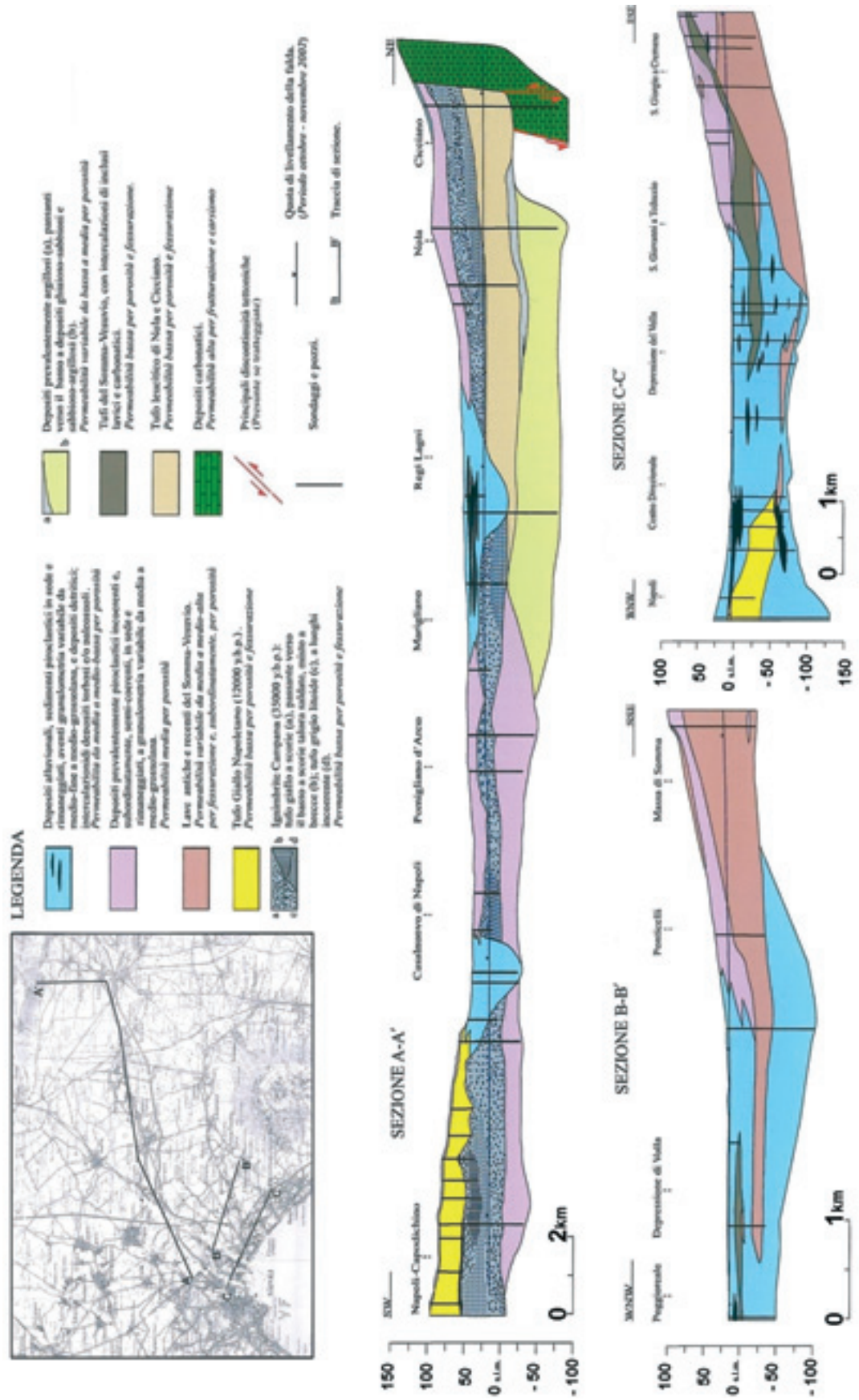


Figura 2 – Sezioni idrostratigrafiche (Bellucci et alii, 1998, modificato e integrato).  
 Figure 2 – Hydrostratigraphic cross-sections (Bellucci et alii, 1998, modified and integrated)

Al di sotto dei depositi quaternari, il substrato carbonatico risulta dislocato, da discontinuità tettoniche a prevalente componente distensiva (Figura 1), fino a profondità di circa 3000 m dal p.c. (Ippolito et alii, 1973; Carrara et alii, 1974; La Torre et alii, 1982; Ortolani & Aprile, 1979; 1985).

Per le differenti caratteristiche lito-stratigrafiche e tessiturali, l'insieme dei depositi di piana dà origine ad un acquifero complesso avente un'idrodinamica molto articolata. Procedendo da NE verso SW, seguendo il campo di moto delle acque sotterranee, è stato possibile distinguere:

- il margine orientale della piana, posto a valle del rilievo carbonatico dei Monti di Avella e Pizzo d'Alvano, dove il flusso idrico sotterraneo interessa prevalentemente i depositi piroclastico-alluvionali sottoposti al Tufo Grigio Campano (TGC); la falda è libera, ovvero semiconfinata quando interferisce con l'orizzonte ignimbrico, ed è alimentata prevalentemente dai travasi provenienti dal medesimo rilievo carbonatico (Figura 2, sez. A-A');

- la porzione centrale della piana e la zona di Lufrano, dove il deflusso interessa i depositi giustapposti al TGC (Figura 2, sez. A-A') e, subordinatamente, gli orizzonti lavici più fessurati del Somma-Vesuvio; l'esistenza del TGC determina, localmente, la formazione di un sistema a falde sovrapposte (Figura 13): la prima defluisce nei depositi posizionati al di sopra della formazione ignimbrica, in condizioni freatiche; la seconda, posta al di sotto dell'orizzonte tufaceo, è semiconfinata; tra le due c'è drenanza dall'alto verso il basso, in accordo con Celico (1990), Celico & de Paola (1992), Celico et alii, (1994) e Celico et alii (1995), essendo la falda profonda maggiormente utilizzata; nella zona di Marigliano, l'assenza del TGC determina l'esistenza di un'unica falda (Figura 2, sez. A-A') circolante in condizioni freatiche (Bellucci et alii, 1990; Celico et alii, 1995; Regione Campania - Comune di Marigliano, 2002);

- la fascia più prossima al Somma-Vesuvio, dove gli orizzonti acquiferi più produttivi sono localizzati nei depositi piroclastici più grossolani e nelle lave più fessurate (Figura 2, sez. B-B'); il deflusso può considerarsi freatico, sebbene sia possibile riscontrare condizioni di semiconfinamento in zone dove gli orizzonti lavici risultano poco fessurati;

- la Depressione del Volla e la fascia costiera, dove la presenza di intercalazioni di depositi piroclastico-alluvionali, torbe, paleosuoli e sedimenti marini dà luogo ad un acquifero stratificato in più orizzonti idrici (Figura 2, sez. C-C'); il locale sistema a falde sovrapposte tuttavia è parte integrante, a più larga scala, di un unico corpo idrico avente deflusso unitario, per la presenza di soluzioni di continuità nei litotipi meno permeabili (Viparelli, 1978; Celico et alii, 1995; Commissariato di Governo per l'Emergenza Rifiuti, Bonifica e Tutela delle

Acque nella Regione Campania, 2002a; 2002b).

Nonostante l'estrema articolazione idrostratigrafica e la locale presenza di sistemi a falde sovrapposte, il deflusso assume, a scala di bacino, carattere di unicità (Figure 3, 4, 5). Le più recenti ricostruzioni piezometriche (Celico et alii, 1995; Celico et alii, 1997; Esposito, 1998; Autorità di Bacino Nord Occidentale della Campania, 2004) indicano un bacino idrogeologico delimitato:

- a NE, dal contatto con i rilievi carbonatici dei Monti di Avella e Pizzo d'Alvano;
- a N, dallo spartiacque sotterraneo presente lungo la congiungente Canello-Caivano;
- a SE, dallo spartiacque sotterraneo esistente lungo l'allineamento S. Giuseppe Vesuviano-Palma Campania;
- a SW, dal mare.

Le acque sotterranee defluiscono da NE verso SW e tendono a convergere verso il centro della piana e la Depressione del Volla, dove in passato (Fiorelli, 1926) affioravano numerose sorgenti (Volla, Cozzone, Sanseverino), oggi completamente scomparse.

La piana è in continuità idraulica con la più ampia circolazione idrica sotterranea che interessa i rilievi carbonatici e vulcanici bordieri, l'area urbana e le colline di Napoli (Figura 2, sez. A-A', B-B'); essa è infatti alimentata dalle acque di infiltrazione diretta e dai travasi provenienti dai Monti di Avella e Pizzo d'Alvano, dal Somma-Vesuvio e dalla zona collinare di Napoli (Viparelli, 1967; Civita et alii, 1973; Viparelli, 1978; Celico, 1983; Bellucci et alii, 1990; Corniello et alii, 1990; Celico & de Paola, 1992; Celico et alii, 1995; Esposito, 1998; Celico et alii, 2001; Autorità di Bacino Nord Occidentale della Campania, 2004; Allocca & Celico, 2004b; Allocca et alii, 2007).

Gli interscambi con la rete idrografica interessano la zona dei Regi Lagni e del fosso Volla; lungo i Regi Lagni la falda, sebbene sia influenzata dalla presenza di opere di cementificazione, alimenta, in condizioni indisturbate, il corpo idrico superficiale (Regione Campania - Comune di Marigliano, 2002); viceversa, il fosso Volla e i suoi tributari, un tempo alimentati dalla falda (Viparelli, 1978), sembra che abbiano perso, a seguito di vari interventi di impermeabilizzazione, ogni forma di interazione con le acque sotterranee (Celico et alii, 1995).

Lungo la fascia costiera il recapito della falda è rappresentato dal mare e non si rilevano particolari fenomeni di intrusione salina, sebbene la presenza di un sistema fognario avente caratteristiche drenanti (Comune di Napoli - C.U.G.RI., 2000) ed a tratti ubicato a quota più bassa del livello medio marino, possa favorire locali richiami di acqua salata.

Dal punto di vista idrodinamico, l'acquifero è caratterizzato da un'elevata eterogeneità ed anisotropia. La trasmissività è variabile da  $1,26 \times 10^{-2}$  a  $5,10 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s (Tedeschi, 1974; Viparelli, 1978; Celico, 1983; Bellucci et alii, 1990; Corniello et alii, 1990; Celico et

alii, 1995; Esposito & Piscopo, 1997; Celico et alii, 2001; Autorità di Bacino Regionale Nord Occidentale della Campania, 2004; Marzano, 2001; Corniello et alii, 2003; Piscopo et alii, 2005; Regione Campania, 2006). I valori più elevati, dell'ordine di  $10-2 \div 10-3$  m<sup>2</sup>/s, sono stati riscontrati nella depressione di Acerra, lungo i margini della dorsale dei Monti di Avella e Pizzo d'Alvano ed in prossimità della fascia costiera (Corniello et alii, 1990; Bellucci et alii, 1990; Celico et alii, 1995; Celico et alii, 2001). Valori più bassi, dell'ordine  $10-3 \div 10-5$  m<sup>2</sup>/s, sono stati rilevati nei pressi di Lufrano e nella piana del Volla (Viparelli, 1978; Bellucci et alii, 1990; Comune di Napoli-C.U.G.R.I., 2001; Celico et alii, 2001; Corniello et alii, 2003); ciò, in accordo con Bellucci et alii (1990),

potrebbe giustificare, insieme alla locale riduzione della sezione di flusso della falda (Figura 2, sez. A-A'), l'affioramento delle antiche sorgenti del Volla.

La porosità efficace varia da 0,03 a 0,05, per i sedimenti più fini, fino a raggiungere valori di  $0,30 \div 0,40$ , per i depositi relativamente più grossolani (Viparelli, 1978; Celico et alii, 2001).

I molteplici studi idrogeochimici confermano, a scala settoriale e di bacino, lo schema di circolazione idrica sotterranea sopra delineato (Bellucci et alii, 1990; Corniello et alii, 1990; Celico et alii, 1995; Celico et alii, 1997; Esposito, 1998; Celico et alii, 2001; Regione Campania - Comune di Marigliano, 2002; Regione Campania, 2006).

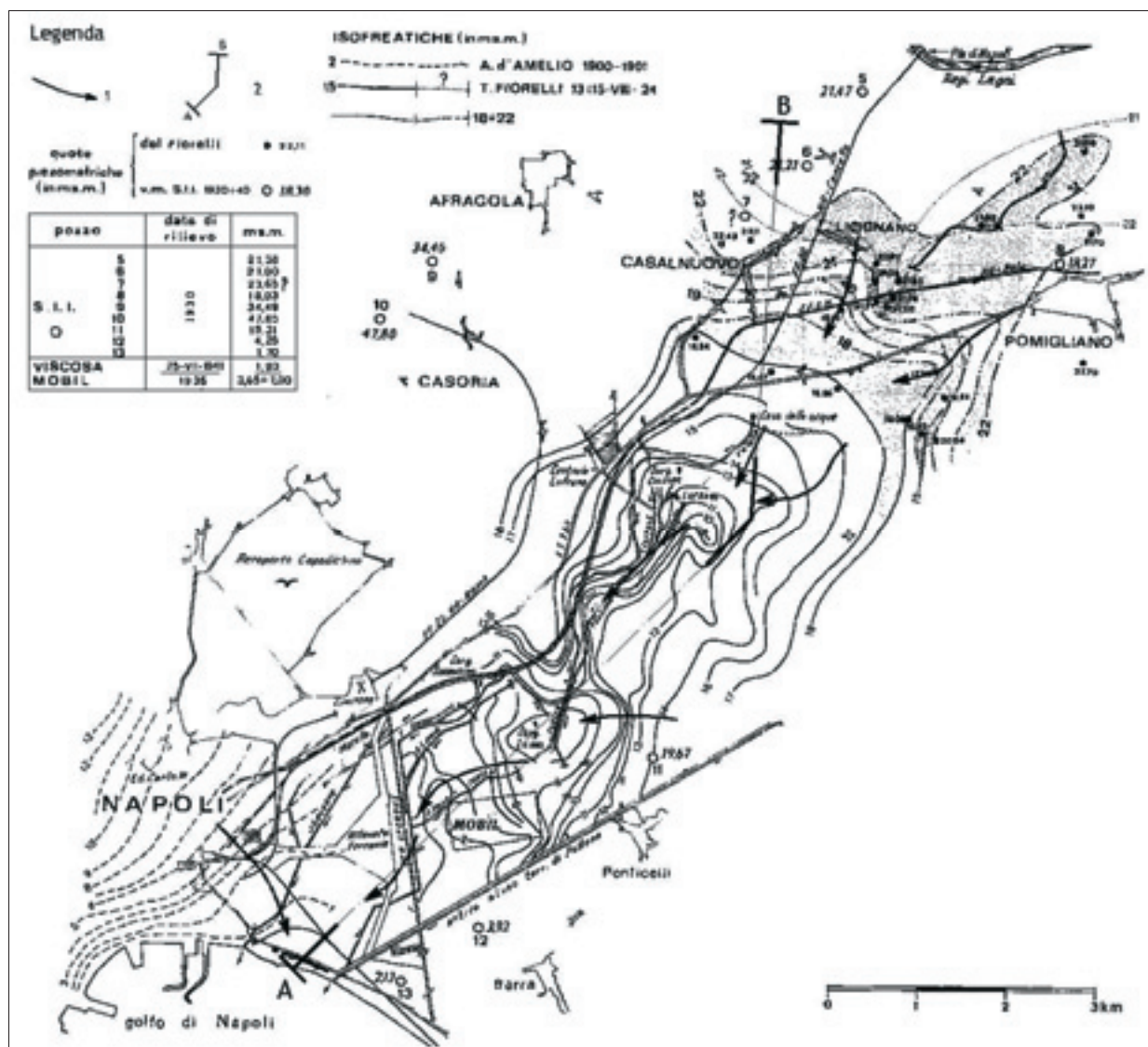


Figura 3 – Piezometria del centro urbano di Napoli (D’Amelio, 1928, modificato) e della piana del Volla (Fiorelli, 1926, modificato) (Viparelli, 1967, modificato e integrato). Legenda: 1) Direttrici di flusso idrico sotterraneo; 2) Traccia di sezione relativa allo schema concettuale di figura 14.

Figure 3 – Hydrogeological scheme of Naples urban area (D’Amelio, 1928, modified) and Volla plain (Fiorelli, 1926, modified) (Viparelli, 1967, modified and integrated). Legend: 1) Direction of groundwater flow; 2) Trace of section shown in the figure 14.



## Scenari idrodinamici

I primi dati idrodinamici risalgono alla fine del XIX secolo (Cantarino, 1888; D'Amelio, 1928) e le piezometrie, ricostruite tra il 1884 e il 1901, interessano il nucleo urbano di Napoli (Figura 3). Le quote della falda variano da 1 m s.l.m., in prossimità del mare, a 12÷13 m s.l.m., per la parte più interna della città, mentre i gradienti idraulici sono compresi tra 0,002 e 0,01.



Figura 4 – Carta a curve isopiezometriche della piana del Volla e dell'alto corso dei Regi Lagni (Civita et alii, 1973, integrata). Legenda: 1) Depositi piroclastico-alluvionali; 2) Depositi piroclastici e lave; 3) Rocce carbonatiche; 4) Curve isopiezometriche e relativa quota in m s.l.m.; 5) Direttrici di flusso idrico sotterraneo; 6) Sorgenti principali.

Figure 4 – Hydrodynamics scheme of plain Volla and Regi Lagni rivers (Civita et alii, 1973, modified and integrated). Legend: 1) Pyroclastic-alluvial deposits; 2) Deposits pyroclastic and lavas; 3) Carbonatic rocks; 4) Piezometric contour lines (m a.s.l.); 5) Direction of groundwater flow; 6) Main springs.

Nell'agosto del 1924, Fiorelli (1926) rileva, per il territorio compreso tra Napoli-Est e Pomigliano d'Arco, quote piezometriche variabili da 22 m s.l.m., per la zona di Casalnuovo, a 15 m s.l.m., per il settore di Lufrano, fino a 2 m s.l.m., per la zona della stazione centrale di Napoli. I gradienti idraulici sono compresi tra 0,001 e 0,01 e le diverse sorgenti (Volla, Cozzone, Lamia, Sanseverino), aventi una portata complessiva superiore a 1,50 m<sup>3</sup>/s in magra (Fiorelli, 1926), testimoniano l'esistenza di un deflusso pressoché indisturbato della falda.

Viparelli (1967), integrando i dati di D'Amelio (1928) e Fiorelli (1926) con nuove rilevazioni, osserva livelli di falda variabili da oltre 26 m s.l.m., per la zona posta a valle dei Monti di Avella, fino a circa 5 m s.l.m., per il settore più prossimo alla zona costiera. Il confronto con i medesimi dati storici (D'Amelio, 1928; Fiorelli, 1926) evidenzia, per la zona di Lufrano, una falda più bassa di diversi metri, mentre, per il centro urbano di Napoli, livelli piezometrici pressoché invariati.

In epoca più recente, Civita et alii (1973) rilevano quote variabili da 15÷17 m s.l.m., per la zona a ridosso di Lufrano, a circa 2 m s.l.m., per i settori prossimi alla fascia costiera (Figura 4) e, in accordo con Fiorelli (1926), segnalano la presenza, sia di una zona di drenaggio preferenziale coincidente con il fosso Volla, sia di sorgenti nella zona di Casalnuovo.

Celico (1983), sulla base di un rilevamento espletato nel periodo 1978÷1979 (Figura 5), osserva quote piezometriche variabili da 30 m s.l.m. in prossimità dei rilievi carbonatici, a 15÷16 m s.l.m. nella zona di Lufrano, fino a qualche metro nella zona più prossima al settore costiero.

Il disegno piezometrico evidenzia la presenza di una fascia di drenaggio preferenziale che, dalla base dei Monti di Avella, percorre l'intera zona centrale della piana, fino a raggiungere il mare. Lungo il fosso Volla si individua un'ulteriore zona di convergenza delle direttrici di flusso, in accordo con Fiorelli (1926) e Civita et alii (1973).

Per la prima volta vengono anche definiti i limiti del bacino idrogeologico, coincidenti con le zone di spartiacque sotterraneo presenti lungo il margine settentrionale e orientale della piana, rispetto alle quali le acque defluiscono verso i Regi Lagni, a Nord, ed il fiume Sarno, a Sud.

Il confronto, laddove possibile, con i dati piezometrici del 1924 (Fiorelli, 1926), evidenzia una situazione idrodinamica pressoché invariata, con quote quasi identiche, ovvero a luoghi più basse di 1÷1,5 m circa (Figura 6). Non è escluso, pertanto, che il mancato rinvenimento delle diverse emergenze sorgive lungo il fosso Volla, rilevate nel 1924 (Fiorelli, 1926) e nel 1973 (Civita et alii, 1973), sia legato all'esistenza di un territorio fortemente urbanizzato (De Seta, 1999) che ha mascherato, nel frattempo, i caratteri idrogeologici di superficie.

Sebbene Bellucci et alii (1990), riesaminando i dati di GEOLAB (1988), non rilevino differenze piezometriche significative rispetto alle precedenti ricostruzioni, nel 1989, Celico & de Paola (1992) delineano uno scenario fortemente modificato (Figura 7). Lo schema di circolazione idrica sotterranea mostra:

- quote piezometriche ovunque più basse, anche di diversi metri; in corrispondenza di Lufrano e nella zona posta idrodinamicamente a valle, le quote sono mediamente comprese tra 0 e 2 m s.l.m.;



Figura 5 – Carta a curve isopiezometriche della piana ad Oriente di Napoli relativa al periodo 1978÷1979 (Celico, 1983, modificata e integrata). Legenda: 1) Depositi piroclastico-alluvionali; 2) Depositi piroclastici e lave; 3) Lave; 4) Depositi travertinosi; 5) Rocce carbonatiche; 6) Sorgenti principali; 7) Stazioni freaticmetriche dell'ex S.I.M.N. (Servizio Idrografico Mareografico Nazionale) indicate in figura 15; 8) Curve isopiezometriche e relativa quota in m s.l.m.; 9) Asse di drenaggio preferenziale; 10) Direttrici di flusso idrico sotterraneo; 11) Spartiacque sotterraneo; 12) Spartiacque superficiale.

Figure 5 – Map of piezometric contour lines in the eastern plain Naples in period 1978÷1979 (Celico, 1983, modified and integrated). Legenda: 1) Pyroclastic-alluvial deposits; 2) Deposits pyroclastic and lavas; 3) Lavas; 4) Travertine deposits; 5) Carbonatic rocks; 6) Main springs; 7) Pheaticmetric station former S.I.M.N. (Mareographic and Hydrographic National Service) in figure 15; 8) Piezometric contour lines (m a.l.m.); 9) Axis of groundwater drainage; 10) Direction of groundwater flow; 11) Groundwater divide; 12) Drainage divide.

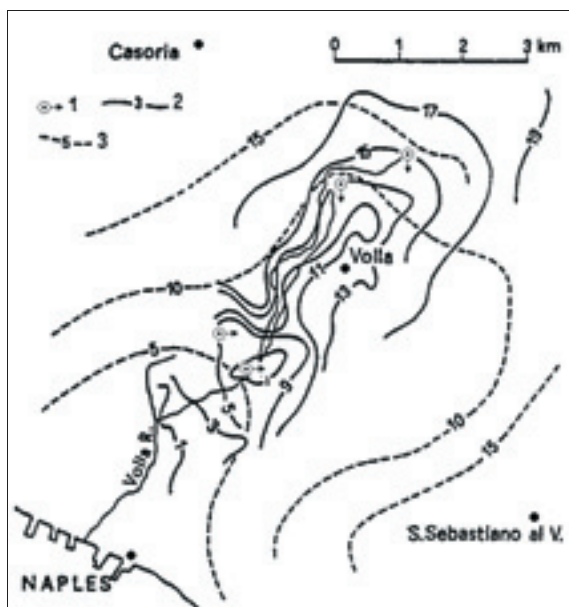


Figura 6 – Confronto tra la piezometria del 1978÷1979 (Celico, 1983, modificato) e del 1924 (Fiorelli, 1926, modificato) (Esposito & Piscopo, 1997, modificata). Legenda: 1) Sorgenti del Volla; 2) Curve isopiezometriche e relativa quota in m s.l.m. (anno di riferimento 1924); 3) Curve isopiezometriche e relativa quota in m s.l.m. (periodo di riferimento 1978÷1979).

Figure 6 – Piezometric map of the 1978÷1979 period (Celico, 1983, modified) in comparison with 1924 map (Fiorelli, 1926, modified) (Esposito & Piscopo, 1997, modified). Legend: 1) Volla spring's; 2) Piezometric contour lines (m a.l.m.) of 1978÷1979 period; 3) Piezometric contour lines (m a.l.m.) of 1924 period.



- la totale scomparsa delle sorgenti presenti nella zona centrale (sorgenti del Volla) e ai margini della piana (sorgenti di Cancellò);
- un ampliamento dei limiti del bacino idrogeologico, quale conseguenza della migrazione degli spartiacque sotterranei presenti lungo le congiungenti Cancellò-Caivano e Somma Vesuviana-Nola (Figura 5);
- un restringimento dei bacini idrogeologici limitrofi del fiume Sarno e dei Regi Lagni;
- richiami di acque sotterranee verso Lufrano, dalla zona posta a Nord di Cancellò e dal settore nord-occidentale dell'area vesuviana; acque che in precedenza defluivano (Figura 5), rispettivamente, verso la piana dei Regi Lagni e del Sarno.

Già a partire dal 1992 (Comune di Napoli, 1994), si osserva un'inversione di tendenza della falda: i livelli incominciano a risalire, attestandosi a 8÷9 m s.l.m., nella zona di Lufrano, e a 1÷2 m, nella zona della stazione centrale di Napoli (Figura 8).

Nel 1993 (Figura 9) e nel 1994 (Figura 10), il fenomeno di risalita diventa più generalizzato, tant'è che si ricostituisce il vecchio spartiacque sotterraneo rilevato nel periodo 1978÷1979 (Celico, 1983) lungo la congiungente Cancellò-Caivano (Figura 5).

Tuttavia le medesime quote piezometriche, se confrontate con quelle rilevate nel 1978÷1979, evidenziano che il recupero della falda è, per il momento, solo parziale. Ciò è confermato anche dai dati piezometrici registrati nel 1997 (Figura 11), per il centro urbano di Napoli (Celico, 1999a; 1999b); infatti questi ultimi, se comparati con quelli del 1992 (Figura 8), mostrano un locale fenomeno di risalita della falda (1÷2,5 m circa), ma se raffrontati con i dati storici del 1900÷1901 (Figura 3) indicano valori più bassi di circa 1,5÷2,5 m.

Nel marzo 2001 sono state registrate (Comune di Napoli - C.U.G.R.I., 2001) quote piezometriche variabili da 12 m s.l.m., per l'area a ridosso di Ponticelli-Porchiano, a 4÷5 m s.l.m., per l'area del Centro Direzionale, fino a 1 m, per la zona più prossima al mare (Figura 12), confermando che il fenomeno di risalita della falda è ancora in atto. Nel periodo ottobre-novembre 2002 (Figura 13) le quote piezometriche più elevate rilevate sono di 5 m s.l.m., nella zona più prossima alla stazione centrale di Napoli, e di 14÷18 m s.l.m., nella zona compresa tra Lufrano, Casalnuovo e Pomigliano d'Arco.

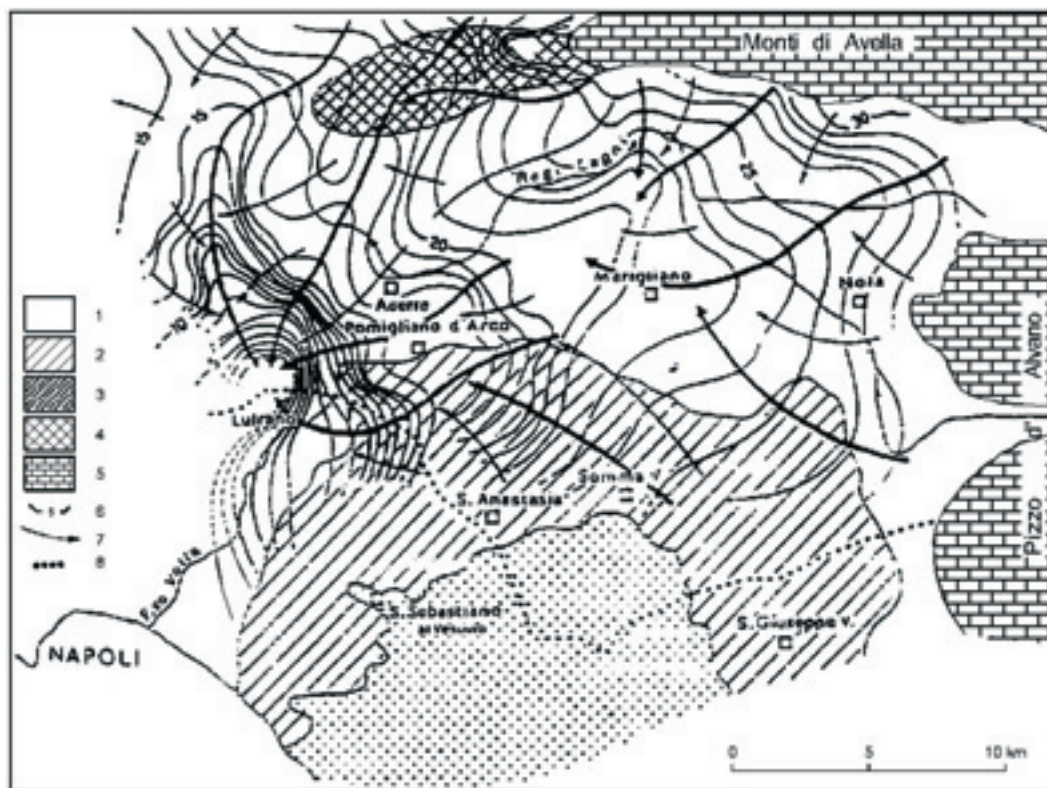


Figura 7 – Carta a curve isopiezometriche della piana ad Oriente di Napoli nel 1989 (Celico & de Paola, 1992, modificata). Legenda: 1) Depositi piroclastico-alluvionali; 2) Depositi piroclastici e lave; 3) Lave; 4) Depositi travertinosi; 5) Rocce carbonatiche; 6) Curve isopiezometriche e relativa quota in m s.l.m.; 7) Direttrici di flusso idrico sotterraneo; 8) Spartiacque superficiale.

Figure 7 – Water table morphology of the eastern plain Naples in 1989 (Celico & de Paola, 1992, modified). Legend: 1) Pyroclastic-alluvial deposits; 2) Pyroclastic deposits and lavas; 3) Lavas; 4) Travertine deposits; 5) Carbonatic rocks; 6) Piezometric contour lines (m a.l.m.); 7) Direction of groundwater flow; 8) Drainage divide.



I livelli idrici, coerenti con quanto osservato nel 2004 (Regione Campania, 2006), sembrano essere molto simili a quelli registrati nel periodo 1978÷1979 e nel 1924 (Figure 3 e 5), a testimonianza del quasi totale recupero dei livelli piezometrici pregressi.

In figura 14 è schematizzata l'evoluzione dei diversi scenari osservati nell'ultimo secolo in alcune zone della piana.

### Cause dell'evoluzione idrodinamica e problematiche idrogeologiche connesse

Le cause della complessa evoluzione della falda ad Oriente di Napoli sono da ricercare essenzialmente:

- nella variazione temporale di una o più componenti che concorrono a definire il bilancio idrico sotterraneo, con particolare riferimento alle dinamiche: 1)

della ricarica naturale della falda, dovute ad un eventuale cambiamento del regime pluviometrico dell'area; 2) dei prelievi idrici sotterranei; non sono state prese in considerazione le ulteriori variabili (es.: travasi da altri corpi idrici, perdite della rete acquedottistica, perdite della rete fognaria, uscite verso altri corpi idrici, minore infiltrazione dovuta all'impermeabilizzazione di aree urbane, etc.) per la scarsa quantità di dati disponibili e/o perché ritenute poco influenti;

- nella modificazione del deflusso della falda a seguito della realizzazione di opere in sottterraneo (es.: gallerie ferroviarie, fondazioni profonde, etc.) o in superficie (opere di impermeabilizzazione di corsi d'acqua o canali), come quelle realizzate negli ultimi decenni nella zona orientale di Napoli.



Figura 8 – Carta a curve isopiezometriche del centro urbano di Napoli: valori medi del 1992 (Comune di Napoli, 1994, modificata e integrata). Legenda: 1) Curve isopiezometriche e relativa quota in m s.l.m.; 2) Direttrici di flusso idrico sotterraneo.

Figure 8 – Map of the piezometric contour lines in the urban area of Naples: medium value in 1992 (Comune di Napoli, 1994, modified and integrated). Legend: 1) Piezometric contour lines (m a.l.m.); 2) Direction of groundwater flow.



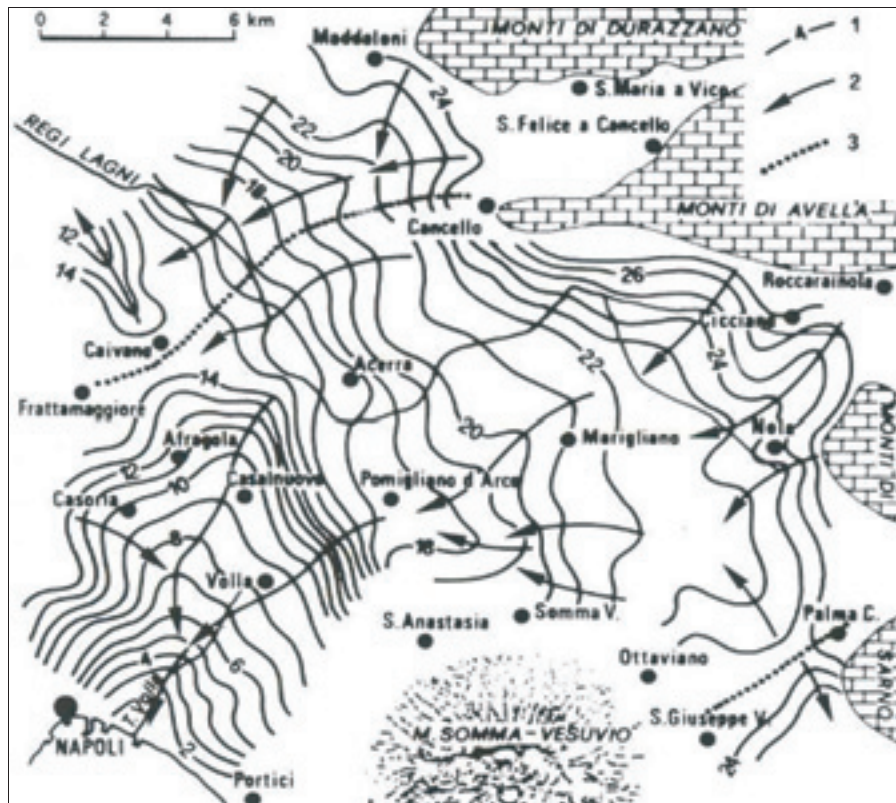


Figura 9 – Carta a curve isopiezometriche della piana ad Oriente di Napoli nel gennaio-1993 (Esposito, 1998, modificata). Legenda: 1) Curve isopiezometriche e relativa quota in m s.l.m.; 2) Direttrici di flusso idrico sotterraneo; 3) Spartiacque sotterraneo.

Figure 9 – Water table morphology of the eastern plain of Naples in January 1993 (Esposito, 1998, modified). Legend: 1) Piezometric contour lines (m a.l.m.); 2) Direction of groundwater flow; 3) Groundwater divide.

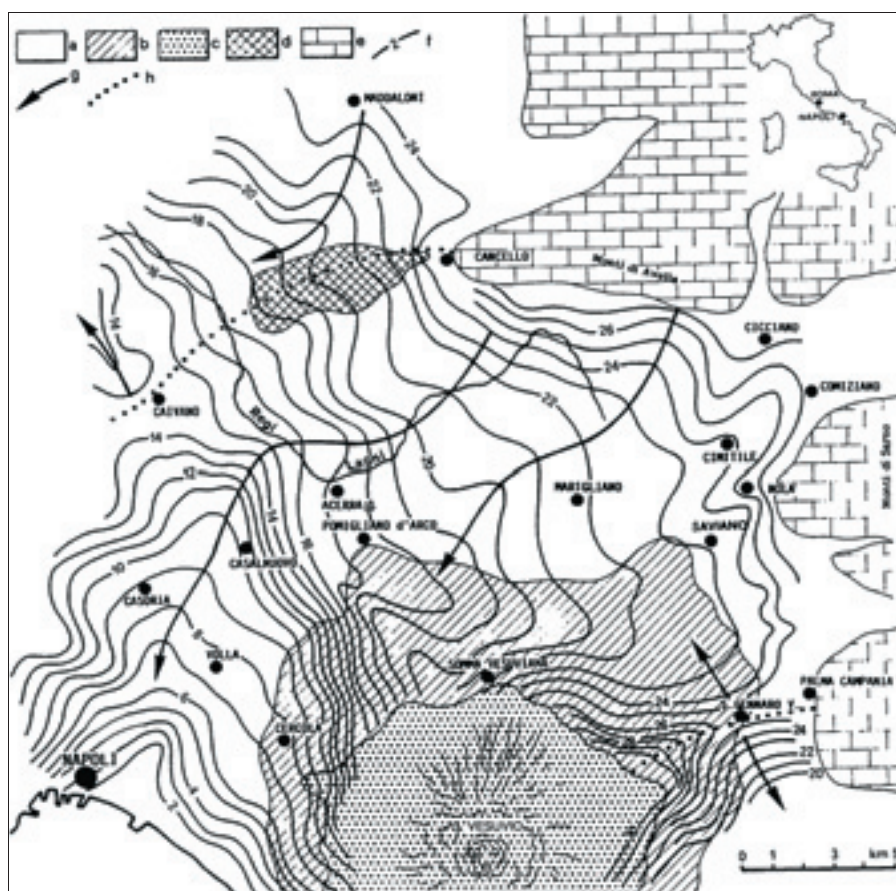


Figura 10 – Carta a curve isopiezometriche della piana ad Oriente di Napoli nel 1994 (Celico et alii, 1995, modificata). Legenda: a) Depositi piroclastici e alluvionali; b) Depositi piroclastici e lave; c) Lave; d) Depositi travertinosi; e) Rocce carbonatiche; f) Curve isopiezometriche e relativa quota in m s.l.m.; g) Asse di drenaggio preferenziale; h) Spartiacque sotterraneo.

Figure 10 – Water table morphology of the eastern plain of Naples in 1994 (Celico et alii, 1995, modified). Legend: a) Pyroclastic-alluvial deposits; b) Pyroclastic deposits and lavas; c) Lava; d) Travertine deposits; e) Carbonatic rocks; f) Piezometric contour lines (m a.l.m.); g) Axis of groundwater drainage; h) Groundwater divide.



**Cause e problematiche connesse con l'abbassamento della falda**

I primi significativi abbassamenti dei livelli di falda, dell'ordine di 7÷8 m, sono stati registrati nella zona di Lufrano nel periodo 1955÷1962 (Viparelli, 1978), in ragione dei considerevoli prelievi, a scopo potabile, dal campo-pozzi dell'attuale ARIN S.p.A. (Azienda Risorse Idriche Napoli). Tale fenomeno, ben evidente a scala locale (Figura 15), è risultato tuttavia trascurabile in altri settori della piana; infatti, le serie storiche delle stazioni

freatimetriche (Figura 5) dell'ex Servizio Idrografico Mareografico Nazionale (Ducci & Onorati, 1993) non hanno mostrato alcun particolare trend dominante (Figura 15).

Dopo un breve recupero dei livelli di falda nel successivo periodo 1963÷1966, la zona di Lufrano ha fatto registrare un ulteriore decremento dei livelli piezometrici nel periodo 1970÷1975 (Figura 15), ascrivibile ugualmente all'incremento dei prelievi idrici dal medesimo campo-pozzi.

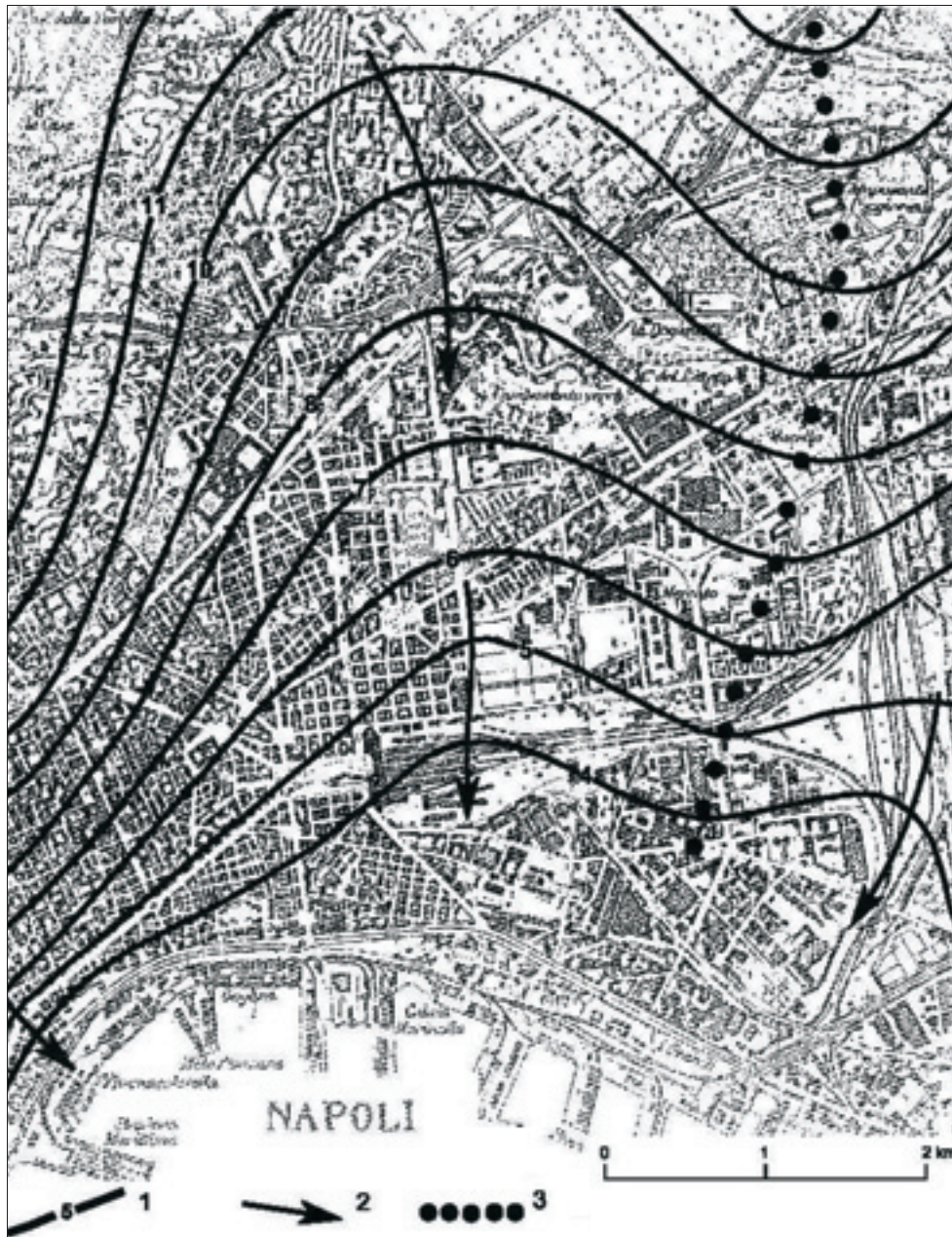


Figura 11 – Carta a curve isopiezometriche del centro urbano di Napoli relativa al 1997 (Celico, 1999a, modificata e integrata).  
Legenda: 1) Curve isopiezometriche e relativa quota in m s.l.m.; 2) Direttrici di flusso idrico sotterraneo; 3) Spartiacque sotterraneo.  
Figure 11 – Water table morphology in the urban area of Naples in 1997 (Celico, 1999a, modified and integrated). Legend: 1) Piezometric contour lines (m a.l.m.); 2) Direction of groundwater flow; 3) Groundwater divide.



Figura 12 – Piezometria del 2001 dell'area urbana di Napoli (Comune di Napoli - C.U.G.R.I., 2001, integrata).

Legenda: 1) Curve isopiezometriche e relativa quota in m s.l.m.; 2) Direttrici di flusso idrico sotterraneo; 3) Spartiacque sotterraneo.

Figure 12 – Piezometric map of Naples urban area in 2001 (Comune di Napoli - C.U.G.R.I., 2001, integrated).

Legend: 1) Piezometric contour lines (m a.l.m.); 2) Direction of groundwater flow; 3) Groundwater divide.

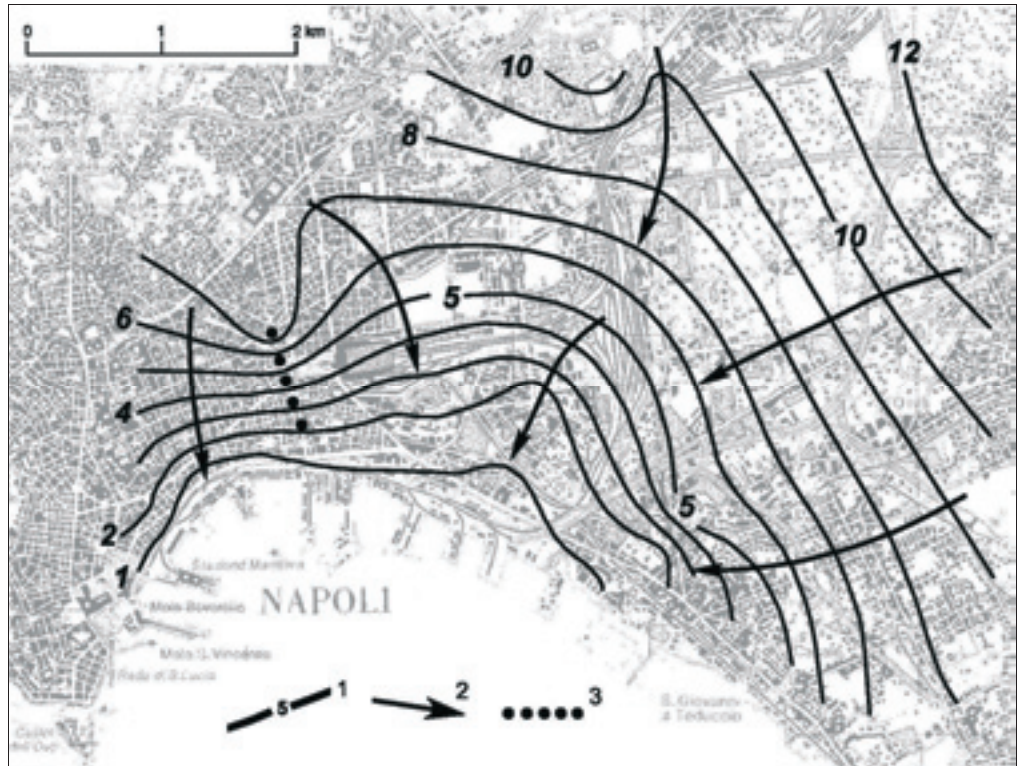


Figura 13 – Carta a curve isopiezometriche della piana ad Oriente di Napoli nel periodo ottobre-novembre 2002 (Autorità di Bacino Nord Occidentale della Campania, 2004, modificata e integrata).

Legenda: 1) Depositi piroclastico – alluvionali; 2) Lave preva-lenti e depositi piro-clastici; 3) Rocce car-bonatiche; 4) Curve isopiezometriche e quote in m s.l.m.: a) relative alla falda profonda; b) relative alla falda superficiale; 5) Direttrici di flusso idrico sotterraneo: a) relative alla falda profonda; b) relative alla falda superficiale; 6) Spartiacque setterraneo.



Figure 13 – Water table morphology of the eastern of Naples in October-November 2002 (Autorità di Bacino Nord Occidentale della Campania, 2004, modified and integrated). Legend: 1) Pyroclastic-alluvial deposits; 2) Lavas and pyroclastic deposits; 3) Carbonatic rocks; 4) Piezometric contour lines (m a.l.m.): a) semiconfined aquifer; b) unconfined aquifer; 5) Direction of groundwater flow: a) semiconfined aquifer; b) unconfined aquifer; 6) Groundwater divide.

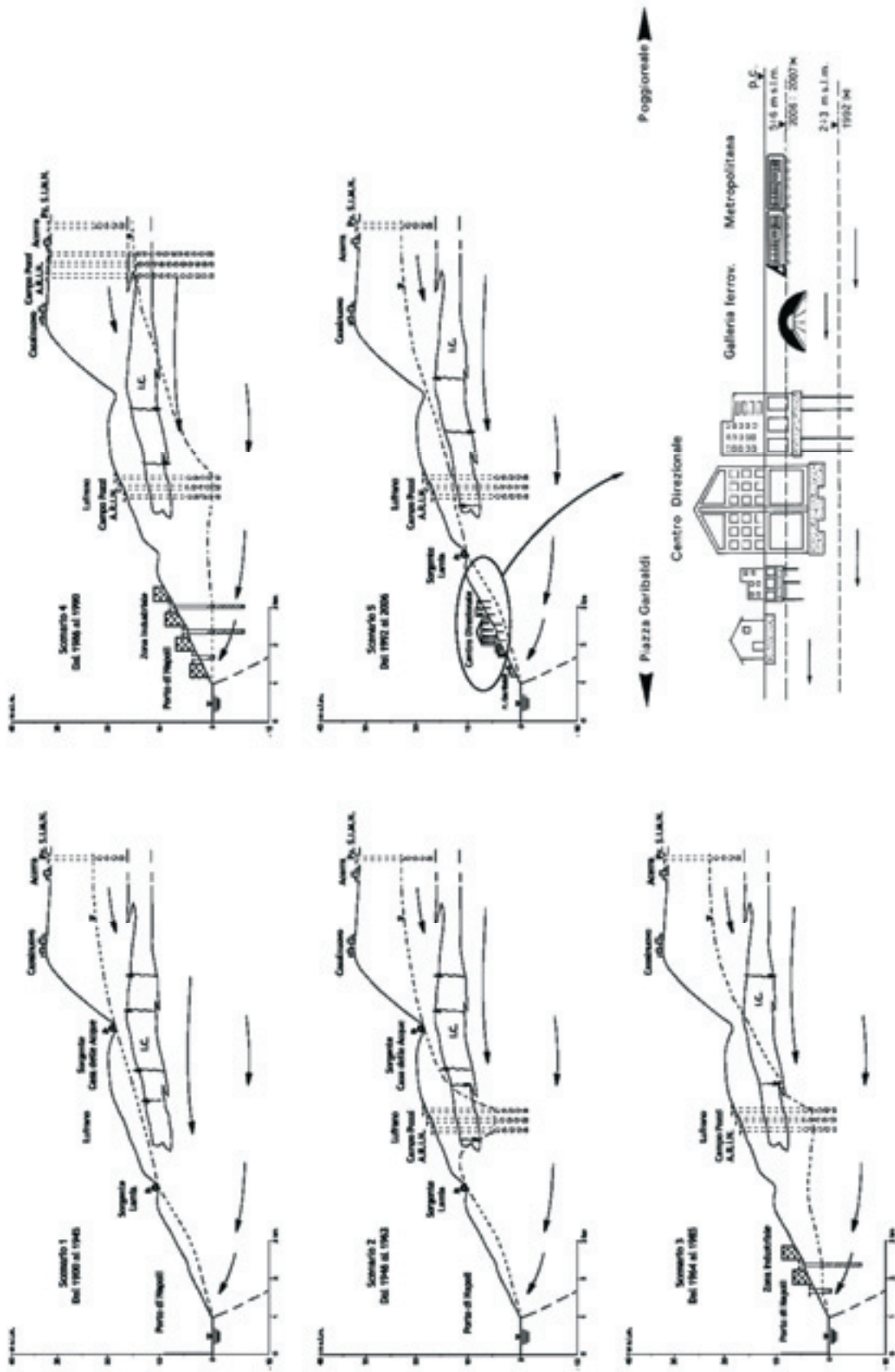


Figura 14: La discarica è a pagina 188. Figure 14: Caption at page 188.



Figura 14 – Schema concettuale dei principali scenari idrodinamici registrati nella piana ad Oriente di Napoli, nell'ultimo secolo. Scenario 1: (dal 1900 al 1945) Situazione idrodinamica della falda pressoché indisturbata, evidenziata anche dalla presenza di deflussi sorgivi; Scenario 2: (dal 1946 al 1963) Gli emungimenti dal campo-pozzi di Lufrano determinano una situazione di disturbo locale della falda, con inversione dei locali rapporti tra la falda superficiale e quella profonda; Scenario 3: dal 1964 al 1985) L'incremento dei prelievi idrici dal campo-pozzi di Lufrano e lo sviluppo di attività industriali determinano una significativa modificazione locale della falda, senza tuttavia interessare le zone più interne della piana (cfr. livelli piezometro S.I.M.N. di Acerra); Scenario 4: dal 1986 al 1990) L'ulteriore incremento dei prelievi dal campo-pozzi di Lufrano, l'attivazione del campo-pozzi di Acerra, nonché l'uso sempre più intenso ed incontrollato, a scopo industriale ed irriguo, delle acque sotterranee, determinano uno scenario profondamente modificato, anche per le aree più interne della piana (cfr. livelli piezometro S.I.M.N. di Acerra). Scenario 5: dal 1992 al 2006) Risalita dei livelli di falda e conseguente impatto sul sistema infrastrutturale locale. La sigla I.C. indica, in maniera schematica, la presenza dell'orizzonte ignimbritico. Le frecce al suo interno indicano il verso del flusso di drenanza tra la falda superficiale e quella profonda nella zona di Lufrano; per motivi grafici, dato il limitato dislivello fra le due falde (dell'ordine di decimetri o al massimo di un metro), è stato rappresentato un unico profilo piezometrico, anche laddove c'è la presenza di falde sovrapposte; [●] 1992: periodo di riferimento dei livelli di falda.

Figure 14 – Main hydrodynamic scenarios of the eastern plain of Naples, over last century. Scenario 1: (1900÷1945) Hydrodynamic condition unchanged; Scenario 2: (1946÷1963) Pumping from the well field of Lufrano caused local alteration of the water table; Scenario 3: 1964÷1985) The increase of the pumping activities in the Lufrano well field along with new industrial activities caused a remarkable change in the water table; Scenario 4: 1986 ÷ 1990) A further rise in the pumping in the Lufrano area, the new pumping in Acerra area and the increasing exploitation of groundwater severely affected the hydrodynamics of the area, also in the inner side of the plain. Scenario 5: 1992 ÷ 2006) The rise in the piezometric level and its impact on local infrastructural system. The abbreviation I.C. stands for Ignimbrite Campana. Arrows show the water table vertical flow; [●] 1992: reference period of the piezometric levels.

Nel successivo periodo 1988÷1991, gli abbassamenti hanno interessato tutta la piana (Figura 15), con quote della falda, localmente, anche al di sotto del livello medio marino (Figura 16).

Confrontando i dati piezometrici del 1978÷1979 (Celico, 1983) con quelli del 1989 (Celico & de Paola, 1992) si osserva (Figura 17) che gli abbassamenti maggiori (in media: 8÷14 m) sono stati generalmente registrati in prossimità dei principali centri di pompaggio,

mentre abbassamenti minori (in media variabili da 1 a 6 m) sono stati ovviamente osservati nelle zone di drenaggio preferenziale della falda, ovvero nelle zone di travaso dove c'è alimentazione dagli acquiferi adiacenti (Figure 5, 7, 9, 10 e 13). Considerando un abbassamento medio della falda di circa 5 m ed una porosità efficace media dell'acquifero saturo pari all'8%, il volume idrico svuotato, tra il 1978 ed il 1989, per l'intero bacino (circa 300 km<sup>2</sup>), è risultato pari a circa 120×106 m<sup>3</sup>.

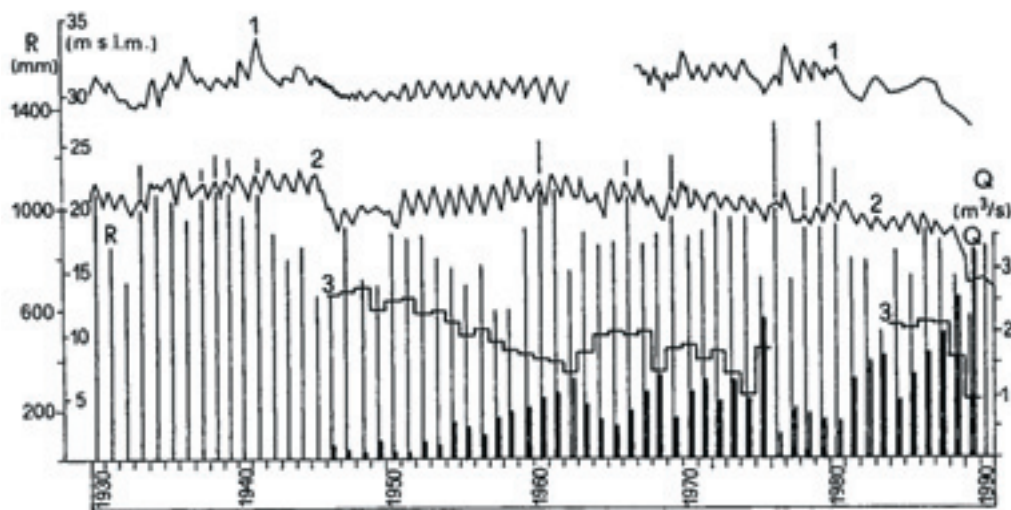


Figura 15 – Confronto tra prelievi idrici a scopo potabile dal campo-pozzi di Lufrano, precipitazioni e livelli piezometrici misurati ad Acerra e Nola (Esposito & Piscopo, 1997, modificato). Legenda: 1) Livelli piezometrici registrati in corrispondenza della stazione freaticometrica di Nola dell'ex S.I.M.N., indicata in figura 5; 2) Livelli piezometrici registrati in corrispondenza della stazione freaticometrica di Acerra dell'ex S.I.M.N., indicata in figura 5; 3) Livelli piezometrici registrati in corrispondenza del campo-pozzi di Lufrano; Istogramma (Q): prelievi idrici dal campo-pozzi di Lufrano; Istogramma (R): precipitazioni (mm).

Figure 15 – Pumping of Lufrano well field, rainfall and piezometric level of Acerra and Nola (Esposito & Piscopo, 1997, modified). Legend: 1) Piezometric level of the Nola phreatimetric station former S.I.M.N., reported in figure 5; 2) Piezometric level of the Acerra phreatimetric station former S.I.M.N., shown in figure 5; 3) Piezometric levels of the Lufrano well filed; Hystogram (Q): Pumping of Lufrano well filed; Hystogram (R): rainfall (mm).



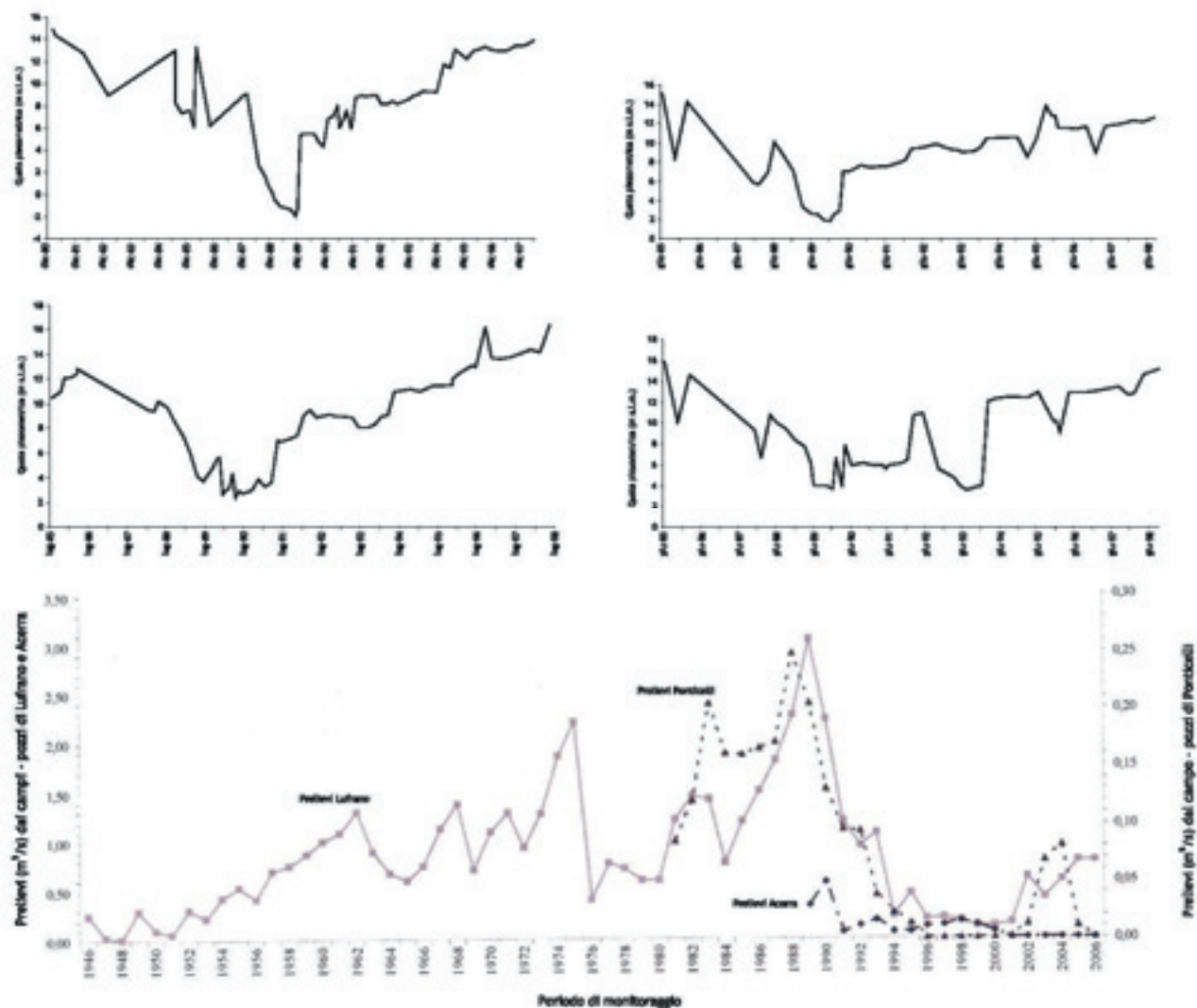


Figura 16 – Prelievi idrici (m<sup>3</sup>/s) dai campi-pozzi di Lufrano, Acerra e Ponticelli e abbassamenti piezometrici (in m) osservati nell’ambito del campo-pozzi di Lufrano.

Figure 16 – Pumping from well fields in Lufrano, Acerra and Ponticelli (m<sup>3</sup>/s) and groundwater mining in Lufrano well filed (m a.l.m.).

Detti abbassamenti, data l’entità e la distribuzione spazio-temporale, sono senz’altro ascrivibili al sovrasfruttamento della falda, ad opera:

- dei prelievi a scopo potabile; infatti, i maggiori emungimenti dai campi pozzi di Lufrano, Acerra e Ponticelli, con portate anche maggiori di 3 m<sup>3</sup>/s, stati registrati proprio nel periodo 1986÷1991 (Figura 16);
- dei prelievi ad uso industriale ed irriguo, mediante pozzi la cui densità è anche di 100 per km<sup>2</sup> (Celico, 1990; Celico & de Paola, 1992; Celico et alii, 1995); infatti, nel periodo 1975÷1991, nella sola zona industriale orientale di Napoli, a seguito del progressivo sviluppo di attività nei settori metallurgico e petrolchimico, gli emungimenti sono aumentati di circa il 130%, passando da 11×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a a 25×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a circa (Funel, 1994; Comune di Napoli, 1994); lo stesso trend evolutivo ha

caratterizzato gli attingimenti nell’area industriale di Pomigliano d’Arco e Acerra, nel periodo compreso tra il 1975 e il 1990.

Viceversa, le variazioni climatiche hanno avuto una scarsa o nulla incidenza sulla fenomenologia osservata, come testimonia l’assenza di tendenza nella serie pluviometrica 1921–2001 (Figura 18). Pertanto, la crisi pluviometrica registrata nel periodo 1985÷1990, a scala locale (Figure 15 e 18) e regionale (De Vita & Fabbrocino, 2005), ha solo innescato l’incremento dei prelievi pubblici e privati da pozzi, ma non è stata la causa diretta degli abbassamenti piezometrici osservati, poiché periodi siccitosi simili (es.: periodo 1942÷1950, 1953÷1958, etc.) non hanno sortito lo stesso effetto sull’idrocinamica della falda.

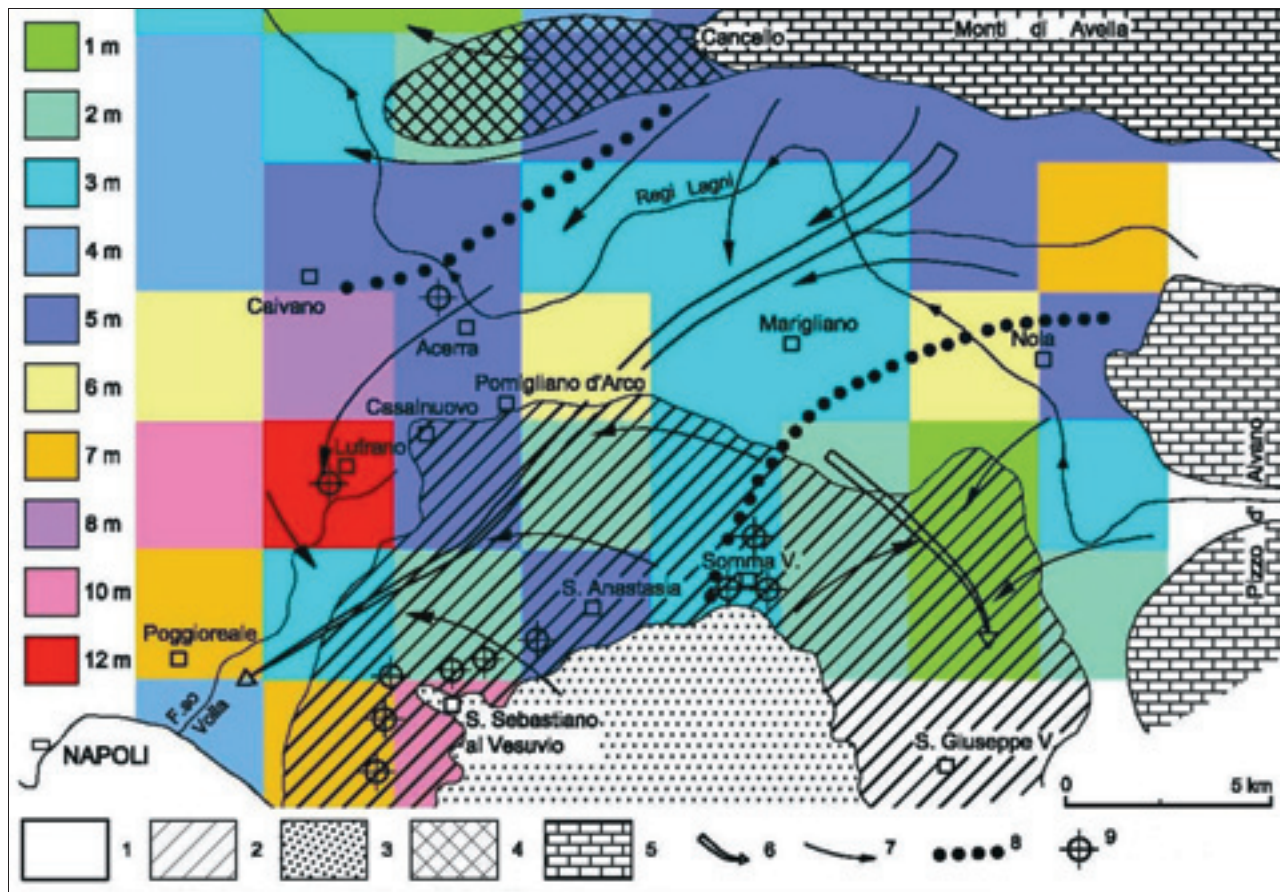


Figura 17 – Abbassamenti piezometrici medi (in m) registrati tra il 1978÷1979 ed il 1989. Legenda: 1) Depositi piroclastico-alluvionali; 2) Depositi piroclastici prevalenti e lave; 3) Lave; 4) Travertini; 5) Rocce carbonatiche; 6) Asse di drenaggio preferenziale dello schema di figura 5; 7) Direttrici di flusso idrico sotterraneo secondarie dello schema di figura 5; 8) Spartiacque sotterraneo dello schema di figura 5; 9) Principali centri di pompaggio.

Figure 17 – Average groundwater mining (m) between 1978÷1979 and 1989. Legend: 1) Pyroclastic-alluvial deposits; 2) Pyroclastic deposits and lavas; 3) Lavas; 4) Travertine deposits; 5) Carbonatic rocks; 6) Axis of groundwater drainage shown in figure 5; 7) Direction of groundwater flow shown in figure 5; 8) Groundwater divide shown in figure 5; 9) Main pumping centre.

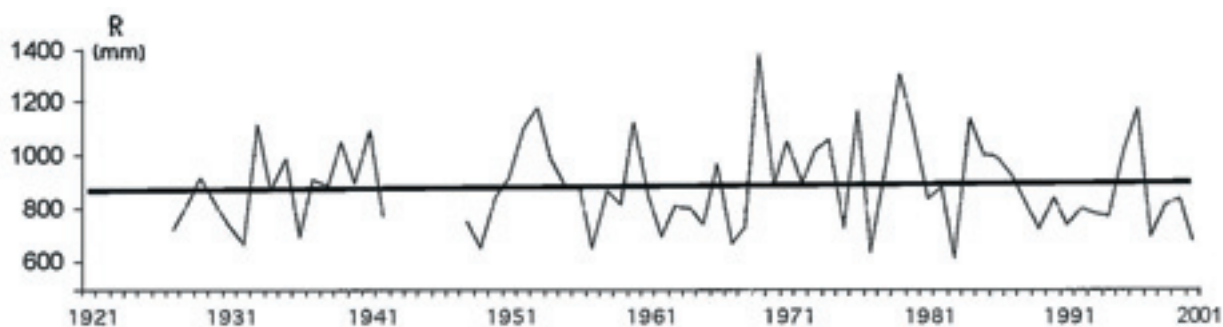


Figura 18 – Dati pluviometrici (mm/a) per il periodo 1921÷2001, registrati alla stazione di Napoli – ex S.I.M.N..

Figure 18 – Rainfall data (mm/a) during 1921÷2001 monitored at the Naples station former S.I.M.N..

Il significativo deficit di bilancio (Tab. 1) conferma la notevole incidenza dei massicci prelievi sull'equilibrio generale della falda e sui conseguenti abbassamenti piezometrici registrati.

Le implicazioni sull'assetto idrogeologico e urbano

sono state:

- prosciugamento della falda superficiale, laddove presente (es.: zona di Acerra, Cancelli, Cicciano, Nola), e di molteplici pozzi poco profondi, oltre che la totale scomparsa delle sorgenti del Volva (Figure 3, 5 e 6);





Una visione più ampia del complesso fenomeno di risalita della falda si osserva in figura 20. Gli innalzamenti piezometrici più significativi (mediamente di 10÷14 m) sono stati ovviamente registrati in corrispondenza dei centri di pompaggio parzialmente o totalmente disattivati (es.: Lufrano, Acerra, Ponticelli). Viceversa, laddove gli emungimenti sono rimasti attivi, sono stati riscontrati innalzamenti molto più contenuti (1÷2 m circa) o, in taluni casi, abbassamenti di qualche metro, come quelli visibili lungo il versante settentrionale del Somma-Vesuvio e nella fascia di territorio compresa tra Cancello, Marigliano e Nola (Figura 20).

La complessità dello scenario idrodinamico è confermata anche a scala locale. Infatti, se si confrontano i livelli piezometrici misurati per il centro urbano di Napoli nel periodo 1999÷2001 (Figure 21 e 22) (Comune di Napoli - C.U.G.R.I., 2001) con quelli osservati nel 1992, si nota che (Figura 23; Tab. 2):

- a Nord della stazione centrale di Napoli, lungo una fascia semicircolare compresa tra piazza S. Francesco di Paola, piazza Carlo III, Poggioreale e Porchiano (punti P7, P8, P16, P17, P20 e P22), la risalita della falda è

risultata variabile tra 1,50 m e 6 m circa;

- a ridosso della fascia costiera, compresa tra Gianturco e S. Giovanni a Teduccio (punti P14, P15 e P18), il sollevamento della falda è risultato variabile tra 0,30 e 3,50 m circa;

- viceversa, immediatamente ad Ovest e a Sud della stazione centrale di Napoli (punti P1, P2, P3, P4, P5, P6, P9, P10, P11, P12, P13, P19 e P21), la falda si è abbassata tra 0,02 e 2,13 m (Figura 21); tale comportamento, in contrasto con la fenomenologia osservata nelle altre zone della città e della piana, è ascrivibile:

- al drenaggio esercitato dai lavori in sotterraneo, tutt'ora in corso, lungo la Linea 1 della Metropolitana di Napoli - Tratta Dante - Centro Direzionale (Figura 21);

- ai prelievi ancora attivi nella zona della stazione centrale di Napoli, a difesa di alcune infrastrutture ivi presenti (Comune di Napoli - C.U.G.R.I., 2001);

- ai pompaggi operati per la salvaguardia di edifici e seminterrati posti lungo via Nuova Marina e il Corso Umberto I.

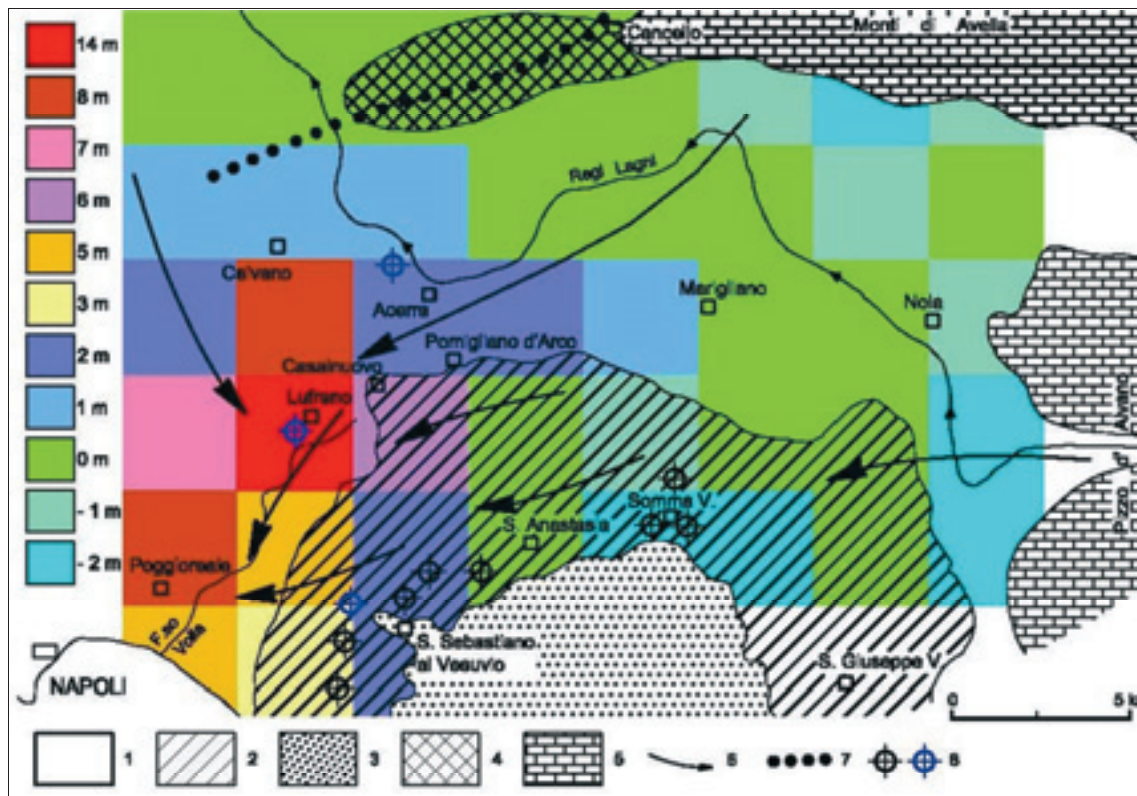


Figura 20 – Innalzamenti (e abbassamenti) piezometrici medi (in m) registrati tra il 1989 ed il 2003. Legenda: 1) Depositi piroclastico-alluvionali; 2) Depositi piroclastici prevalenti e lave; 3) Lave; 4) Depositi travertinosi; 5) Rocce carbonatiche; 6) Direttrici di flusso idrico sotterraneo dello schema di figura 13; 7) Spartiacque sotterraneo dello schema di figura 13; 8) Principali centri di pompaggio (in blu quelli parzialmente o totalmente disattivati).

Figure 20 – Average rise of the piezometric surface (and groundwater mining) between 1989 and 2003. Legend: 1) Pyroclastic-alluvial deposits; 2) Pyroclastic deposits and lavas; 3) Lavas; 4) Travertine deposits; 5) Carbonatic rocks; 6) Direction of groundwater flow shown in figure 13; 7) Groundwater divide shown in figure 13; 8) Main well filed (blue: partially or fully deactivated).

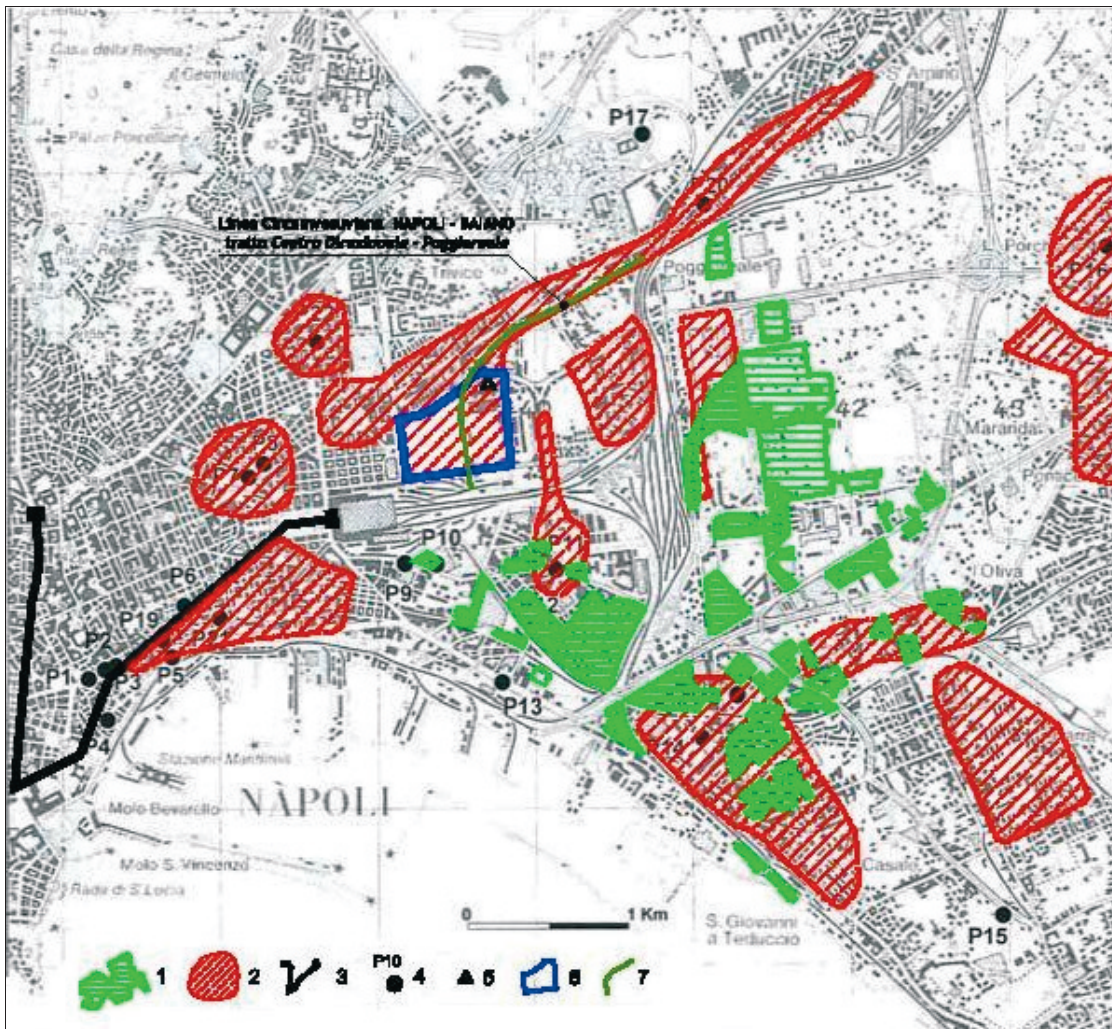


Figura 21 – Punti di monitoraggio della falda nel centro urbano di Napoli, zone industriali dismesse e principali aree di impatto. Legenda: 1) Siti industriali dismessi; 2) Zone impattate; 3) Linea 1 della Metropolitana di Napoli – Tratta Dante - Centro Direzionale; 4) Punti di monitoraggio della falda; 5) Piezometro del Palazzo di Giustizia del Centro Direzionale di Napoli; 6) Area perimetrale del Centro Direzionale di Napoli; 7) Circumvesuviana: Linea Napoli-Baiano – Tratta Centro Direzionale - Poggioreale.

Figure 21 – Monitoring stations in the urban area of Naples, dismissed industrial sites and main impact areas. Legend: 1) Dismissed industrial site; 2) Impact zones; 3) Underground Line 1 of Naples – route Dante - Centro Direzionale; 4) Monitoring station; 5) Borehole near to the Justice Court of Naples; 6) Surrounding area of Centro Direzionale; 7) Underground Line Circumvesuviana – route Centro Direzionale - Poggioreale.

Da quanto finora esposto è evidente che anche il fenomeno di risalita della falda è riconducibile:

- alla massiccia diminuzione dei prelievi a scopo potabile; infatti, dopo il 1991, gli emungimenti sono enormemente diminuiti; infatti, nel 2000, la portata media del campo-pozzi di Lufrano è stata di appena 0,10 m<sup>3</sup>/s, dopo un periodo di totale interruzione dei pompaggi, mentre i prelievi dai campi pozzi di Acerra e Ponticelli sono stati quasi completamente azzerati (Figura 16); viceversa, i prelievi eseguiti dai vari campi pozzi dell'ex Acquedotto Vesuviano S.p.A. (Figura 24), lungo il versante settentrionale del Somma-Vesuvio, sembrano influire solo localmente sulle dinamiche della falda (Figura 20);

- alla significativa diminuzione dei prelievi idrici, a seguito del processo di de-industrializzazione che tutt'ora sta interessando la zona orientale di Napoli; durante il periodo 1991÷2001, gli emungimenti noti (Comune di Napoli, 1994; Funel, 1994) sono infatti diminuiti di circa il 90%, variando da 25×10<sup>6</sup> a 3,10×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a; non a caso, molte delle zone di crisi, già impattate, ricadono in prossimità o all'interno delle aree industriali dismesse (Figura 21); stessa sorte ha interessato il polo industriale di Pomigliano d'Arco e Acerra; successivamente al 1990, infatti, è stato registrato un forte calo dei consumi idrici, quale conseguenza della significativa riduzione delle attività industriali;

- alla diminuzione dei prelievi idrici a scopo irriguo,



quale conseguenza del forte cambiamento dell'uso dei suoli che ha interessato l'area periurbana di Napoli negli ultimi decenni; infatti, i dati ISTAT (Provincia di Napoli, 2001) indicano che, dal 1990 al 2001, il numero totale di aziende agricole ricadenti nell'ambito della piana è diminuito di oltre il 25%, variando da poco più di 16000 a meno di 12000 unità; anche la SAU (Superficie Agricola Utile) ha subito la stessa evoluzione, diminuendo mediamente di circa il 25% sull'intera piana (passando da 15950 a 11957 ettari circa) e raggiungendo punte del 50% circa, per la sola zona immediatamente ad oriente di Napoli.

Viceversa, è da escludere ogni possibile influenza delle variazioni di ricarica naturale della falda, tanto è

vero che i dati pluviometrici indicano, per lo stesso periodo, dei trends in diminuzione (Figura 25).

Da quanto finora esposto non sembra quindi possibile attribuire ad altre cause antropiche un fenomeno di risalita della falda così diffuso, ancorché differenziato per i diversi settori della piana.

Le stesse opere in sotterraneo che dagli inizi degli anni 1990÷1991 ad oggi sono state realizzate nella zona orientale di Napoli, solo in alcuni casi, hanno interagito con la falda, causando un effetto locale e marginale rispetto a quello indotto dalla diminuzione dei prelievi anzidetti. Infatti, per il Centro Direzionale (Figura 21), i dati raccolti (Comune di Napoli, 1994; Ministero LL.PP., 1999) indicano che, a seguito della realizzazione di palificate e fondazioni profonde, il deflusso delle acque è stato solo in parte modificato e per areali molto contenuti; ciò perché, tali interferenze interesserebbero solo la porzione più superficiale dell'acquifero saturo (Corniello et alii, 2003), caratterizzato localmente da un'ampia sezione di flusso (altezza e lunghezza sono, rispettivamente, dell'ordine di 150÷200 m e 2,0÷2,5 km).

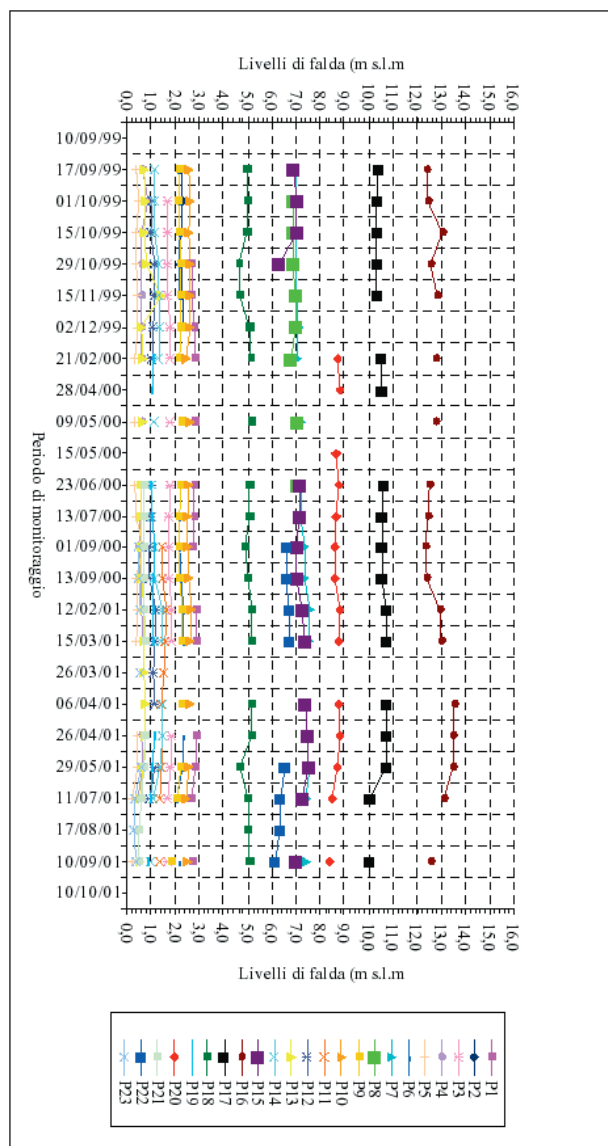


Figura 22 – Andamento dei livelli idrici della falda (m s.l.m.) del centro urbano di Napoli, nel periodo 1999÷2001.  
 Figure 22 – Piezometric level (m a.l.m.) in the urban area of Naples in 1999÷2001.

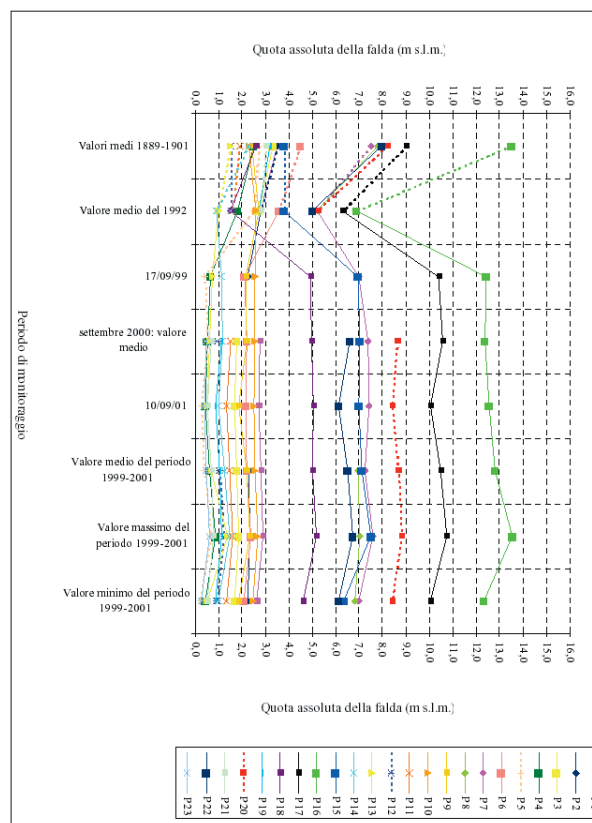


Figura 23 – Confronto tra i livelli di falda del centro urbano di Napoli rilevati nel 1999÷2001 (Comune di Napoli - C.U.G.R.I., 2001), nel 1992 (Comune di Napoli, 1994) e nel 1889÷1901 (D'Amelio, 1928).  
 Figure 23 – Piezometric level in the urban area of Naples, comparison among 1999÷2001 (Comune di Napoli - C.U.G.R.I., 2001), 1992 (Comune di Napoli, 1994) 1889÷1901 (D'Amelio, 1928).



A tal proposito, sono significativi i livelli idrici registrati (Ministero LL.PP., 1999) in corrispondenza del piezometro ubicato in prossimità del Palazzo di Giustizia (Figura 21). Il trend crescente, rilevato per il periodo 1992÷2004 (Figura 26), è ascrivibile più alla graduale

risalita delle acque indotta dalla riduzione dei prelievi idrici, anziché all'effetto "barriera" esercitato dalle opere in sotterraneo, e sembra riprodurre, a scala locale, la stessa fenomenologia osservata per gli altri settori della piana.

Tabella 2 – Dati piezometrici rilevati per il centro urbano di Napoli nel periodo 1999÷2001 (Comune di Napoli - C.U.G.R.I., 2001, modificato), nel 1992 (Comune di Napoli, 1994) e nel 1889÷1901 (D'Amelio, 1928, modificato).  
 Table 2 – Piezometric data in the urban area of Naples during 1999÷2001 period (Comune di Napoli - C.U.G.R.I., 2001, modified), in 1992 (Comune di Napoli, 1994, modified) and during 1889÷1901 (D'Amelio, 1928, modified).

Periodo di riferimento	Punti di controllo e quota della falda (m s.l.m.)																						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23
Valori medi 1889-1901	3,50	3,50	3,30	2,50	2,70	4,50	7,50	7,80	2,40	2,30	1,90	1,50	1,50	2,30	3,80	13,50	9,00	2,60	3,20	8,20	3,00	8,00	
Valore medio del 1992	2,80	2,80	2,70	1,80	2,50	3,60	5,20	5,20	2,70	2,60	1,60	1,50	1,00	0,90	3,80	6,90	6,30	1,50	2,70	5,20	2,80	5,00	1,50
17/09/99		2,25		0,66	0,37	2,13	6,99		2,17	2,56			0,73	1,12	6,93	12,42	10,38	4,93					
settembre 2000: valore medio	2,74		1,76	0,52	0,53	2,21	7,37		2,20	2,53	1,49	0,94	0,59	1,15	7,02	12,37	10,57	4,96	1,11	8,61	0,71	6,61	0,49
10/09/01	2,72		1,70	0,43	0,24	2,17	7,40		1,85	2,50	1,35		0,53	1,00	6,99	12,57	10,04	5,05	0,85	8,39	0,51	6,14	0,40
Valore medio del periodo 1999-2001	2,78	2,27	1,75	0,59	0,39	2,21	7,23	6,93	2,19	2,56	1,46	1,06	0,70	1,23	7,12	12,82	10,49	5,00	1,04	8,68	0,67	6,50	0,46
Valore massimo del periodo 1999-2001	2,91	2,35	1,85	0,86	0,65	2,36	7,57	7,05	2,31	2,66	1,61	1,20	1,39	1,47	7,52	13,54	10,74	5,19	1,13	8,81	0,76	6,72	0,60
Valore minimo del periodo 1999-2001	2,65	2,25	1,67	0,43	0,21	2,09	6,98	6,82	1,85	2,44	1,34	0,92	0,53	1,00	6,33	12,34	10,04	4,61	0,85	8,39	0,50	6,14	0,28
Variazioni di livello dal 1889-1901 al 1992	-0,70	-0,70	-0,60	-0,70	-0,20	-0,90	-2,30	-2,60	0,30	0,30	-0,30	0,00	-0,50	-1,40	0,00	-6,60	-2,70	-1,10	-0,50	-3,00	-0,20	-3,00	
Variazioni di livello dal 1889-1901 al 1999		-1,25		-1,84	-2,33	-2,37	-0,51		-0,23	0,26			-0,77	-1,18	3,13	-1,08	1,38	2,33					
Variazioni di livello dal 1889-1901 al 2000	-0,76		-1,54	-1,98	-2,17	-2,30	-0,14		-0,20	0,23	-0,41	-0,57	-0,91	-1,15	3,22	-1,13	1,57	2,36	-2,10	0,41	-2,29	-1,39	
Variazioni di livello dal 1889-1901 al 2001	-0,78		-1,60	-2,07	-2,46	-2,33	-0,10		-0,55	0,20	-0,55		-0,97	-1,30	3,19	-0,93	1,04	2,45	-2,35	0,19	-2,49	-1,86	
Variazioni dal 1992 al 2001	-0,08		-1,00	-1,37	-2,26	-1,43	2,20		-0,85	-0,10	-0,25	-1,50	-0,47	0,10	3,19	5,67	3,74	3,55	-1,85	3,19	-2,29	1,14	-1,10
Variazioni tra i valori medi del 1999-2001 e i valori medi del 1992	-0,02	-0,53	-0,95	-1,21	-2,12	-1,39	2,03	1,73	-0,51	-0,04	-0,14	-0,45	-0,30	0,33	3,32	5,92	4,19	3,50	-1,66	3,48	-2,13	1,50	-1,05

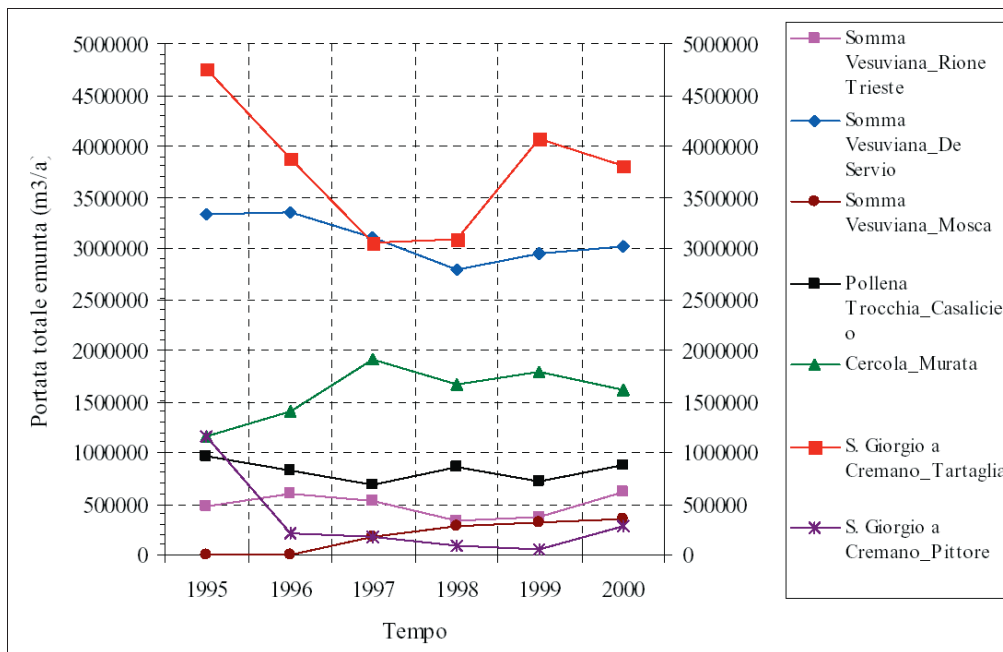


Figura 24 – Prelievi idrici (m3/s) a scopo potabile dai campi pozzi dell'ex Acquedotto Vesuviano S.p.A.  
 Figure 24 – Public pumping (m3/s) from former Acquedotto Vesuviano S.p.A. well fields

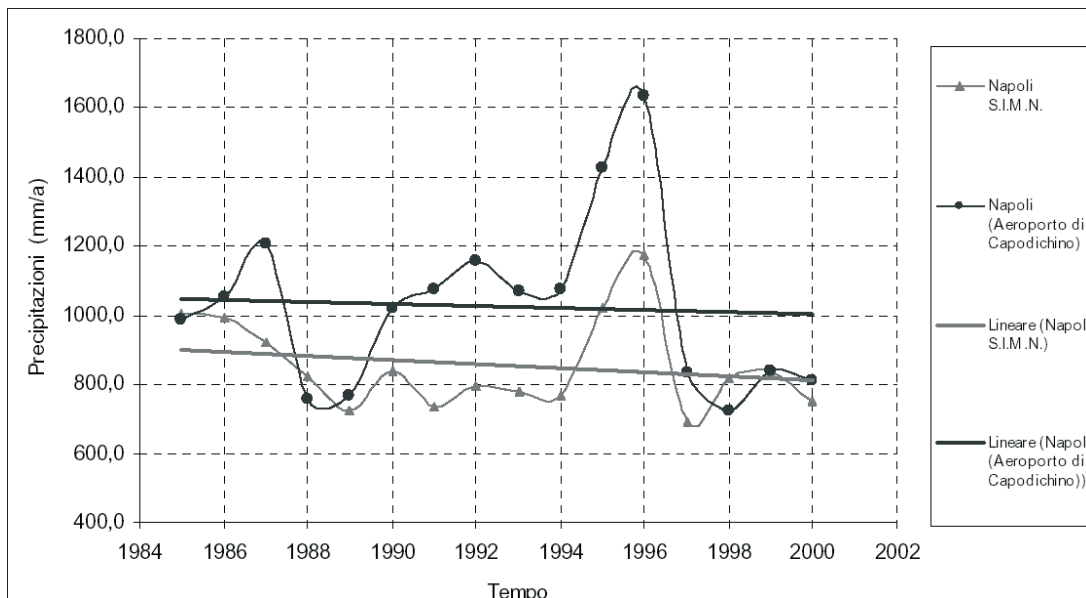


Figura 25 – Trends pluviometrici per il periodo 1986÷2000, nel settore di piana ad Oriente di Napoli.

Figure 25 – Rainfall trends during 1986÷2000, eastern plain of Naples

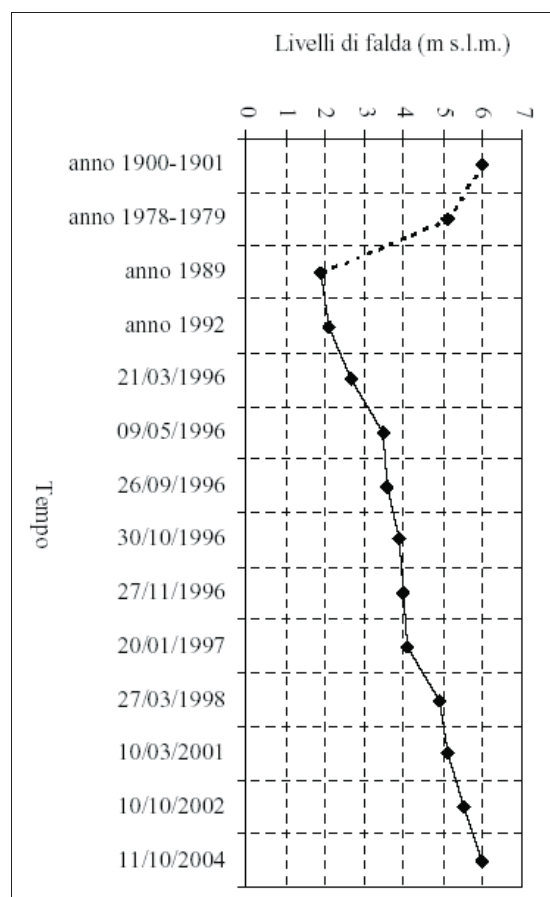


Figura 26 – Innalzamenti piezometrici in corrispondenza del piezometro ubicato nei pressi del Palazzo di Giustizia del Centro Direzionale di Napoli (in tratteggio: dati ricostruiti).

Figure 26 – Rise of the piezometric level monitored near the Justice Court of Naples (thick line: estimated data).

Per le due gallerie ferroviarie della Circumvesuviana (Figura 21), i dati acquisiti (Comune di Napoli - C.U.G.R.I., 2001), sebbene poco dettagliati, sembrano evidenziare in modo marginale la circolazione idrica setterranea (Comune di Napoli - C.U.G.R.I., 2001), considerato che i più significativi innalzamenti piezometrici (Figure 21, 23; Tab. 2) sono stati registrati a valle, in senso idrodinamico, del tracciato dell'opera; viceversa, la linea ferroviaria Napoli-Baiano (Figura 21) interferisce con le acque sotterranee solo per una limitata zona, compresa tra il Centro Direzionale e Poggioreale, senza causare significativi incrementi del gradiente idraulico.

Per la galleria ferroviaria dell'ex Alifana, i dati acquisiti (Ministero dei Trasporti e della Navigazione, 2000) non indicano alcuna interazione con la falda.

Per la galleria di sottopasso IDP, prevista lungo la nuova linea TAV Milano-Napoli (Nodo di Napoli - Penetrazione Urbana 2° Lotto e Variante Cassino), i dati disponibili evidenziano una modesta interferenza dell'opera con la falda; infatti, il maggior carico piezometrico è stato calcolato in qualche decina di centimetri (Celico, 2003). Si tratta chiaramente di un disturbo locale e marginale, aggiuntivo ad un fenomeno di risalita della falda più ampio ed esteso indotto, come anzidetto, dalla drastica e prolungata diminuzione dei prelievi idrici.

Il complesso scenario di risalita dei livelli idrici ha dunque avuto un impatto diversificato sul sistema idrogeologico ed urbano, in relazione, tra l'altro, alle locali condizioni geomorfologiche del territorio, al differente assetto infrastrutturale locale e alla maggiore e/o minore distanza delle opere dai centri di pompaggio. Le aree maggiormente colpite ricadono nel settore

orientale del centro urbano di Napoli (Figura 21).

## Discussione e conclusioni

Lo studio dell'evoluzione temporale della falda ad Oriente di Napoli ha evidenziato, nel corso dell'ultimo secolo, la presenza di scenari idrodinamici particolarmente complessi; scenari legati soprattutto ad un uso, spesso insostenibile, delle risorse idriche sotterranee rispetto alla potenzialità naturale della risorsa.

L'analisi storica degli schemi piezometrici, integrata con i dati pluviometrici e quelli inerenti ai prelievi idrici da parte di Enti pubblici e di privati, ha consentito di rilevare che i fenomeni di abbassamento piezometrico, prima, e di risalita della falda, poi, sono risultati connessi, rispettivamente:

con i massicci prelievi idrici a scopo potabile, come quelli effettuati dai campi pozzi di Lufrano, Acerra e Ponticelli, nonché con un uso industriale ed agricolo delle acque sotterranee sempre più spinto (almeno fino ai primi anni '90) ed incontrollato;

con la drastica riduzione dei medesimi prelievi, avvenuta successivamente al 1991, anche a seguito del processo di de-industrializzazione che tutt'ora sta interessando la zona orientale di Napoli e dei cambiamenti sull'uso dei suoli agricoli dell'area periurbana.

In particolare, sul complesso fenomeno di risalita della falda, solo in alcuni casi, ha influito, localmente, anche la presenza di talune opere in sotterraneo realizzate nell'ultimo decennio; tuttavia, considerata l'entità e la dinamica spazio-temporale della fenomenologia osservata, tale influenza è sicuramente subordinata rispetto a quella derivante dalla massiccia riduzione dei prelievi idrici.

Viceversa, data l'assenza di significativi e prolungati trends delle precipitazioni sul lungo periodo, si può ritenere scarso o nullo il contributo derivante dalle temporanee variazioni di ricarica della falda sulle fenomenologie osservate.

## Bibliografia

- Allocca V., Celico P., 2004a. Acque termali e minerali della provincia di Napoli. In: "Indagine su Risorse Geotermiche, Acque Termali e Minerali, Risorse minerarie (cave)", 21-90. Assessorato Industria, Energia, Miniere e Risorse Geotermiche, Provincia di Napoli (2004), Napoli.
- Allocca V., Celico P., 2004b. Carta idrogeologica della provincia di Napoli (scala 1:50.000). In: "Indagine su Risorse Geotermiche, Acque Termali e Minerali, Risorse minerarie (cave)". Assessorato Industria, Energia, Miniere e Risorse Geotermiche, Provincia di Napoli (2004), Napoli.
- Allocca V., Celico F., Celico P., De Vita P., Fabbrocino S., Mattia C., Monacelli G., Musilli I., Piscopo V., Scalise A. R., Summa G., Tranfaglia G., 2007. Note illustrative della Carta Idrogeologica dell'Italia Meridionale. Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, 1-211 (2007), ISBN 88-448-0215-5.
- Autorità di Bacino Regionale Nord Occidentale della Campania, 2004. Il contributo al Piano di Tutela delle Acque della Regione Campania. Voll. I, II e III. Autorità di Bacino Regionale Nord Occidentale della Campania, Grafica Montese snc, Napoli, 2004.
- Bellucci F., 1994. Nuove conoscenze stratigrafiche sui depositi vulcanici del sottosuolo del settore meridionale della Piana Campana. *Boll. Soc. Geol. It.*, 113, 395-420, Roma.
- Bellucci F., 1998. Nuove conoscenze stratigrafiche sui depositi effusivi ed esplosivi nel sottosuolo dell'area del Somma-Vesuvio. *Boll. Soc. Geol. It.*, 117, 385-405, Roma.
- Bellucci F., Corniello A., de Riso R., Russo D., 1990. Idrogeologia della piana a N-E di Napoli. *Mem. Soc. Geol. It.*, 45, 339-349, Roma.
- Cantarino F., 1888. Sulle acque sotterranee di Napoli. Studi e proposte per la esecuzione del progetto esecutivo della fognatura generale della città di Napoli. Tipografia Giannini & Figli, 1-12, Napoli.
- Carrara E., Iacobucci F., Pinna E., Rapolla A., 1974. Gravity and magnetic survey of the Campanian volcanic area, Southern Italy. *Boll. Geof. Ter. Appl.*, 15/57, 39-51.
- Celico F., Celico P., Esposito L., Guadagno F. M., Habetswallner F., Mele R., 1995. Sull'evoluzione idrogeologica dell'area del Sebeto (Campania). *Geologia Applicata & Idrogeologia*, XXX, 567-581, Bari.
- Celico F., Esposito L., Mancuso M., 2001. Complessità idrodinamica e idrochimica dell'area urbana di Napoli: scenari interpretativi. *Geologia Tecnica & Ambientale*, 2 (2001), 35-54, Roma.
- 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). *Quaderni della Cassa per il Mezzogiorno*, 4/2, 1-225, Roma.
- Celico P., 1990. Brevi considerazioni sulle possibili cause dell'aumento del tenore in nitrati, ferro e manganese nella falda di Lufrano (Napoli). *L'Appennino Meridionale*, 2, 161-170, Napoli.
- Celico P., 1999/a. Interpretazione della fenomenologia di risalita della falda idrica in corrispondenza del parcheggio di Piazza S. Francesco. Comune di Napoli. Lavoro inedito.
- Celico P., 1999/b. Interpretazione della fenomenologia di risalita della falda idrica in corrispondenza del parcheggio di Piazza Nazionale. Comune di Napoli. Lavoro inedito.
- Celico P., 2003. Studio idrogeologico generale dell'area interessata dal fenomeno di interferenza tra la falda idrica sotterranea e le opere di fondazione del sottopasso IDP tra le sezz. 236 e 244. Italferr S.p.A.. Lavoro inedito.
- Celico P., 2006. Arenile di S. Giovanni a Teduccio (Napoli): conoscenze idrogeologiche, problematiche di intervento e possibili soluzioni progettuali per la realizzazione delle opere di messa in sicurezza e di bonifica. Sviluppo Italia Aree Produttive S.p.A.. Lavoro inedito.
- Celico P., Esposito L., de Gennaro M., Mastrangelo E., 1994. La falda ad Oriente della città di Napoli: idrodinamica e qualità delle acque. *Geologica Romana*, XXX, 653-660, Roma.
- Celico P., de Gennaro M., Ferreri M., Ghiara M. R., Russo D., Stanzione D., Zenone F., 1980. Il margine orientale della Piana Campana: indagini idrogeologiche e geochimiche. *Periodico di Mineralogia*, XLIX, n. 2-3, 241-270, Roma.
- Celico P. & de Paola P., 1992. La falda dell'area napoletana: ipotesi sui meccanismi naturali di protezione e sulle modalità di inquinamento. *Atti Giornata di Studio "Acque per uso potabile"*. Proposte per la tutela ed il controllo della qualità. CI ESSE I Centro Scientifico Internazionale, 387C-412C.
- Celico P., Esposito L., Francani V., 1998. Le "carte di flusso" dei nitrati nello studio della contaminazione chimica delle acque sotterranee: l'esempio dell'acquifero di Lufrano (Campania). *Quaderni di Geologia Applicata*, 2, 5-10, Pitagora Editrice Bologna.
- Celico P., Esposito L., Guadagno F. M., 1997. Sulla qualità delle acque sotterranee



- nell'acquifero del settore orientale della Piana Campana. *Geologia Tecnica e Ambientale*, 4/97, 17-27, Roma.
- Civita M., de Medici G. B., de Riso R., Nicotera P., Nota d'Elogio E., 1973. Carta idrogeologica della Campania Nord-Occidentale. Memoria descrittiva. Atti del II° Convegno Internazionale Acque Sotterranee, I.A.H., 1-39, 28 aprile - 2 maggio, 1973 Palermo.
- Commissariato di Governo per l'Emergenza Rifiuti, Bonifica e Tutela delle Acque nella Regione Campania, 2002a. Sito di interesse nazionale di Napoli Orientale - Studio geologico-stratigrafico e idrogeologico quantitativo. Lavoro inedito.
- Commissariato di Governo per l'Emergenza Rifiuti, Bonifica e Tutela delle Acque nella Regione Campania, 2002b. Sito di interesse nazionale di Napoli Orientale - Studio geologico ed idrogeologico qualitativo. Lavoro inedito.
- Comune di Napoli, 1994. Piano Regolatore di Napoli: indagini geologiche per l'adeguamento del P.R.G. alla Legge Regionale del 7 Gennaio 1983 n. 9 in difesa del territorio dal rischio sismico. Lavoro inedito.
- Comune di Napoli - C.U.G.R.I., 2000. Il sistema fognario della città di Napoli alle soglie del 2000. Comune di Napoli. Lavoro inedito.
- Comune di Napoli - C.U.G.R.I., 2001. Studi sull'assetto piezometrico della zona orientale di Napoli. Comune di Napoli. Lavoro inedito.
- Corniello A., de Riso R., Ducci D., 1990. Idrogeologia e idrogeochimica della Piana Campana. *Mem. Soc. Geol. It.* 45 (1990), 351-360, Roma.
- Corniello A. & Ducci D., 2002. Hazardous piezometric Levels Rising in Naples Urban Area (Italy) as a Consequence of Overexploitation Reduction. *Proceedings of the SINEX, Symposium of Intensive Use of Groundwater*, 1-10. Valencia (Spain), December 2002.
- Corniello A., Ducci D., Catalano O., Monti G.M., 2003. Variazioni piezometriche nella zona orientale della città di Napoli. *Quaderni di Geologia Applicata*, 10 - 2 (2003), 43-57, Pitagora Editrice, Bologna.
- D'Amelio A., 1928. L'acqua latente nel sottosuolo della città di Napoli. *Annuali del Sindacato degli Ingegneri*, 2/4, 1-13, Napoli.
- Dati F., 2006. Emungimenti e subsidenza nell'area nord-orientale di Napoli. Tesi in *Idrogeologia*, Università degli Studi di Napoli Federico II.
- De Seta C., 1999. Napoli, Le città nella storia d'Italia. Editori Laterza.
- De Vita P. & Fabbrocino S., 2005. L'oscillazione del Nord Atlantico e la variabilità pluriennale delle risorse idriche sotterranee negli acquiferi carbonatici dell'Italia meridionale. *Giornale di Geologia Applicata*, 2 (2005), 357-362.
- Ducci D. & Onorati G., 1993. Analisi di una lunga serie di dati piezometrici in Piana Campana. Atti del 2° Convegno Internazionale di Geoidrologia: "La cooperazione nella ricerca con i Paesi in via di sviluppo e quelli dell'Est Europeo", Firenze, 29 Novembre - 3 Dicembre 1993. *Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale*, 49, 340-357, Pitagora Editrice, Bologna.
- Esposito L., 1998. Nuove conoscenze sulle caratteristiche idrogeochimiche della falda ad Oriente della città di Napoli (Campania). *Quaderni di Geologia Applicata*, 5 - 1/98, Pitagora Editrice, Bologna.
- Esposito L., Guadagno F. M., Mele R., 1996. Su alcuni aspetti paleo-idrografici della Valle di fiume Sebeto (Campania). V Convegno Nazionale dei Giovani Ricercatori in *Geologia Applicata*. Cagliari, 8-11 Ottobre, 1996.
- Esposito L. & Piscopo V., 1997. Groundwater flow evolution in the circumvesuvian plain, Italy. IAH, British Committee XXVII Congress Nottingham, 21-27 September. In "Groundwater in the Urban Environment", Vol. I. Edited by John Chilton et alii (eds), 309-314. 1997 Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 837 1.
- Fiorelli T., 1926. Cenni sull'andamento della falda acquifera nel sottosuolo della zona tra Napoli e Somigliano d'Arco in relazione alla costituzione geologica e la topografia e idrologia superficiale del territorio medesimo. *Annuali del Genio Civile*, Fascicolo VII, 613-626, Roma.
- Funel C., 1994. Studio della circolazione dell'acqua superficiale nella zona dello stabilimento della KUWAIT Raffinazione e Chimica S.p.A.. Raffinazione e Chimica S.p.A.. Lavoro inedito.
- GEOLAB, 1988. Indagini integrative e di dettaglio per lo studio idrogeologico della Piana Campana, dal fiume Savone allo spartiacque con il bacino del Sarno tra Ottaviano e Palma Campania. ASMEZ, Agenzia per la Promozione dello Sviluppo del Mezzogiorno, Rip. CSI, Div. 4, Napoli. Lavoro inedito.
- Ippolito F., Ortolani F., Russo M., 1973. Struttura marginale tirrenica dell'Appennino campano: reinterpretazione di dati di antiche ricerche di idrocarburi. *Mem. Soc. Geol. It.*, 12, 232-249, Roma.
- Kuwait Raffinazione e Chimica S.p.A. (KRC S.p.A.), 2000. Studio idrogeologico-ambientale e attività di messa in sicurezza: siti KRC di Napoli. KRC S.p.A.. Lavoro inedito.
- La Torre P., Nannini R., Sbrana A., 1982. Geothermal exploration in Southern Italy: geophysical interpretation of the Vesuvian area. 44th Meeting Eur. Ass. Explor. Geophys., 45-62, Cannes (1982).
- Marzano V., 2001. Applicazione e confronto dei metodi SINTACS e TOT per la valutazione della vulnerabilità all'inquinamento dell'acquifero piroclastico nel settore sud-orientale della Piana Campana. Tesi sperimentale in *Idrogeologia*, 1-78, Università degli Studi di Napoli Federico II.
- Ministero dei LL.PP., 1999. Nuovo Palazzo di Giustizia. Primo Lotto. Lavoro inedito.
- Ministero dei Trasporti e della Navigazione, 2000. Verifica idraulica delle opere di costruzione delle sedi ferroviarie Circumvesuviana ed Alifana nel Centro Direzionale di Napoli. Lavoro inedito.
- Ortolani F. & Aprile F., 1979. Sulla struttura profonda della Piana Campana. *Boll. Soc. Nat.*, in Napoli, 88, 243-261, Napoli.
- Ortolani F. & Aprile F., 1985. Principali caratteristiche stratigrafiche e strutturali dei depositi superficiali della Piana Campana. *Boll. Soc. Geol. It.*, 104, 195-206, Roma.
- Piscopo V., Baiocchi A., Fantucci R., Lotti F., 2005. La risposta al pompaggio di acquiferi vulcanici: alcuni esempi delle aree napoletane e viterbese. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 1 (2005), 21-35, Roma.
- Provincia di Napoli, 2001. Primo rapporto sull'ambiente della provincia di Napoli. Assessorato all'Ambiente della Provincia di Napoli. [http://www.provincia.napoli.it/ambiente/rapporto\\_ambiente.htm](http://www.provincia.napoli.it/ambiente/rapporto_ambiente.htm).
- Regione Campania, 2006. Piano di Tutela delle Acque della Campania. Regione Campania, 2006. Lavoro inedito.
- Regione Campania - Comune di Marigliano, 2002. La qualità delle acque sotterranee nell'area di Marigliano: studio dei fenomeni di contaminazione chimica ad opera delle piccole e medie industrie. Regione Campania - Comune di Marigliano, 2002. Lavoro inedito.
- Tedeschi C., 1974. Ravvenamento di pozzi artesiani e nuova trivellazione profonda per la Centrale Termoelettrica di Napoli Levante. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 8 (4), 221-231.
- Viparelli C., 1967. Le acque sotterranee. Atti VIII Convegno di Geotecnica (Cagliari, 1967), 147-164. ESI - Edizione Scientifiche Italiane, Napoli 1968.
- Viparelli M., 1978. Le acque sotterranee ad oriente di Napoli. Fondazione Politecnica per il Mezzogiorno d'Italia, Napoli, 111, 1-48, Napoli.

# Modellizzazione del bilancio idrico ed azotato della pianura Reggiana per la valutazione della capacità di attenuazione dei suoli all'inquinamento delle acque sotterranee da nitrati di origine agricola

Letizia Fumagalli<sup>1</sup>, Marina Guermandi<sup>2</sup>, Nicola Laruccia<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Università di Milano-Bicocca, Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio, letizia.fumagalli@unimib.it,

<sup>2</sup>Regione Emilia Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, mguermandi@regione.emilia-romagna.it, nlaruccia@regione.emilia-romagna.it

*The role of the soil in controlling groundwater pollution from diffuse nitrate sources: use of numerical modelling in the Reggio Emilia plain*

**Abstract:** Soil water and nitrogen balance in soils subjected to characteristic agronomic practices have been analyzed in order to assess the vulnerability of Reggio Emilia plain. The MACRO and SOILN coupled models, calibrated and validated for similar agro-environmental conditions, have been used. Simulations were performed with several scenarios, representative of the typical agroclimatic zones and of the different agronomic practices. Spatial and temporal distribution of the results concerning soil water and nitrate leaching were analyzed in order to identify critical elements in soil and climate characteristics and in agronomical practices. For each soil, intrinsic vulnerability was evaluated on the basis of water percolation and a risk level was attributed to each agronomic practice on the basis of nitrate leaching. These results represent a good tool to improve Action Programs. A future link with groundwater hydro-geological analysis will contribute to better evaluate the supportability of agronomic practices in terms groundwater nitrate pollution.

**Key terms:** Vulnerability, Soils, Agronomical practice, MACRO, SOILN

**Termini chiave:** Vulnerabilità, Suoli, Scenari agronomici, MACRO, SOILN

## Riassunto

Il bilancio idrico e azotato dei suoli è stato analizzato nell'area di pianura della Provincia di Reggio Emilia nell'ambito di un progetto regionale finalizzato alla elaborazione di una carta della vulnerabilità ai nitrati delle acque sotterranee che tenesse conto della capacità protettiva dei suoli. A tal fine sono state implementate simulazioni per scenari colturali tipici dell'area utilizzando i modelli MACRO e SOILN e pedofunzioni di trasferimento calibrate e validate in ambito regionale.

I risultati ottenuti, in termini di percolazione delle acque e dilavamento di azoto nitrico, forniscono indicazioni sulla capacità protettiva dei suoli e valutano l'impatto delle diverse pratiche agronomiche, rappresentando in tal modo un contributo alla definizione di Programmi di Azione.

L'integrazione di tali informazioni con la carta di vulnerabilità intrinseca dell'area definita in base alle sue caratteristiche idrogeologiche, può contribuire a migliorare la valutazione dell'impatto agronomico sull'inquinamento da nitrati delle acque sotterranee.

## 1. Introduzione

L'inquinamento diffuso da nitrati che interessa gli

acquiferi dell'alta pianura emiliano romagnola, attribuito per lo più al settore agricolo, oltre che a sorgenti urbane ed industriali, ha indotto la regione Emilia-Romagna, fin dal 1994, a definire le zone vulnerabili ai nitrati (scala 1:250.000) e le azioni preventive consistenti nel limitare per esse lo spandimento di liquami zootecnici per un massimo di 170 kg<sub>N</sub>/ha/anno (PTRRA – Stralcio per il comparto zootecnico).

In seguito, in risposta alla Direttiva 91/676/CEE, al fine di migliorare i Programmi d'Azione sulla base di una miglior conoscenza dei processi di trasporto dei nitrati, la Regione ha promosso progetti di ricerca-sperimentazione (progetto SINA- Cartografia Pedologica in Aree a Rischio Ambientale, progetto GeTraMiN- Controllo della Genesi, Trasformazione e Migrazione dei nitrati dal suolo alle acque superficiali e sotterranee) che hanno condotto alla definizione di una metodologia per la valutazione della capacità di protezione dei suoli mediante un approccio modellistico.

Tale metodologia comprende l'utilizzo dei modelli di bilancio idrico MACRO (Jarvis, 1994, Larsson et Jarvis, 1999) e di bilancio azotato SOILN (Eckjersten et al., 1996) unitamente all'utilizzo di pedofunzioni di trasferimento per la stima dei caratteri fisico-idrologici dei suoli. Le pedofunzioni ed i modelli sono stati calibrati

e validati in differenti scenari climatici e colturali tipici della Regione Emilia-Romagna (Marchetti et al., 2000, 2001, 2004; Calzolari et al., 2001a, 2001b; Ungaro e Calzolari, 2001; Ungaro et al., 2005).

La scelta di modelli che considerano la presenza di macroporosità nei suoli, è stata effettuata in riferimento alla buona capacità di stima ottenuta a scala puntuale in suoli che presentano elevati contenuti in argille espandibili, frequenti nella pianura emiliano-romagnola e generalmente di complessa simulazione. Tali prestazioni hanno suggerito l'estensione dell'approccio modellistico a scala territoriale, previa predisposizione del sistema di informazioni necessarie su tutto il territorio della pianura emiliano romagnola. Il presente lavoro rappresenta una sperimentazione di applicazione di tale metodica nell'area di pianura della Provincia di Reggio Emilia, col fine di definire la capacità protettiva dei suoli nell'ambito di un progetto di elaborazione di una carta di vulnerabilità provinciale di dettaglio.

Tale carta, comprensiva anche dell'aspetto pedologico, è stata l'obiettivo del progetto coordinato dal Servizio Geologico, sismico e dei suoli della Regione Emilia Romagna, al quale partecipano la Provincia di Reggio Emilia, l'ARPA di Reggio Emilia, il gestore idrico ENIA, il Centro Ricerche Produzioni Animali C.R.P.A.

## 2. Materiali e metodi

L'applicazione della metodologia per la definizione della capacità protettiva dei suoli messa a punto dalla Regione Emilia Romagna è stata preceduta da un approccio originale di raccolta ed analisi dei parametri climatici e colturali locali che ha condotto a definire scenari tipici dell'area d'interesse.

Tali scenari, di base alle simulazioni, costituiscono situazioni rappresentative per quanto concerne sia le caratteristiche climatiche e pedologiche dell'area, sia le pratiche di gestione agronomica praticabili, differenziate queste ultime per entità/tipologia degli apporti azotati alla coltura. Questo approccio è mirato a considerare le caratteristiche idrologiche del suolo nell'ambito di un sistema suolo-clima-coltura specifico per ottenere risposte, in termini di valori di flusso e di trasporto alla base del profilo, il più possibile indicatrici della realtà tipica locale; su queste sono basate la valutazione di una capacità protettiva a scala provinciale e considerazioni comparative nell'adozione di procedure controllate di pratica agronomica.

### 2.1. Scenari colturali

La procedura seguita al fine di definire scenari di simulazione rappresentativi del territorio e della sua gestione ha compreso la individuazione delle tipologie di suoli, degli scenari gestionali, delle condizioni climatiche tipiche dell'area e di un periodo temporale significativo.

Considerata la finalità ultima del lavoro di elaborazione di una carta di vulnerabilità, nella definizione degli scenari ci si è posti nelle situazioni cautelative, ossia di maggior rischio per le acque sotterranee.

Gli scenari comprendono i seguenti elementi:

**Suolo** – Sono stati individuati dalla Carta dei Suoli in scala 1:50.000 della Provincia di Reggio Emilia n. 39 profili rappresentativi per distribuzione ed estensione areale. Essi comprendono suoli con caratteristiche tessiturali molto varie, con valori di argilla compresi tra 1-64% e di sabbia tra 1.8-98% di sabbia; lo scheletro (5-70%) è presente in n.8 profili. In particolare gli orizzonti appartengono per l'81% alle classi tessiturali USDA franco-limoso, franco-limoso argilloso e franco-argilloso, mentre il 28% è rappresentato da tessiture argilloso-limose ed argillose e l'11% da tessiture da sabbiose a franche. I valori di densità apparente e di conducibilità idraulica, che derivano da stime di esperto, variano rispettivamente tra 1.4 a 1.7 g/cm<sup>3</sup> e tra 0.01 e 50 cm/h.

I profili sono stati normalizzati alla profondità di 150 cm per consentire un confronto tra i risultati

**Clima** – Sono stati analizzati i dati pluviometrici e termometrici giornalieri relativi a n.9 stazioni della Provincia di Reggio Emilia e a n.2 regionali dell'ARPA-SIM. La presenza di lacune nelle serie temporali delle stazioni della Provincia di Reggio Emilia ha guidato alla scelta della stazione extraprovinciale di Modena Burana come stazione di riferimento, scelta supportata dalla similitudine tra i rispettivi regimi pluviometrici.

Per quanto riguarda la definizione del periodo di simulazione, sono stati elaborati i regimi pluviometrici per diversi periodi compresi tra il 1951 ed il 2000, individuando nel decennio 1991-2000 quello che appare essere a maggior rischio in termini di percolazione delle acque, in quanto presenta la precipitazione media annua più elevata (838 mm), con particolare rilievo per i mesi autunnali. In tale decennio i valori di precipitazione annui sono compresi tra 634 e 1095 mm e mostrano il massimo assoluto ad ottobre e massimi relativi a giugno ed aprile, mentre i minimi cadono a febbraio e a luglio. La temperatura media del decennio è di 14.4°C (media delle massime e delle minime annue rispettivamente di 19.1 e di 9.8 °C), con un'escursione media annua di 21.8 °C (temperature medie mensili: massima 25.8°C in agosto e minima 3.9°C in gennaio).

L'andamento annuale delle precipitazioni e delle temperature nel periodo considerato indicano il succedersi di anni umidi e di anni siccitosi (Figura 1).

L'evapotraspirazione potenziale giornaliera è stata calcolata col metodo di Hargreaves e Samani (Hargreaves, Samani, 1982); il valore medio annuo è di 1030.4 mm, con un massimo medio mensile di 174 mm a luglio e un minimo di 17.8 mm a dicembre.





170 kg<sub>N</sub>/ha di liquame sono distribuiti in autunno, in prearatura, considerando la necessità, diffusa nel territorio, di svuotare le vasche di stoccaggio dei liquami;

d) Apporto di una dose di liquame suino di 500 kg<sub>N</sub>/ha/anno con efficienza medio bassa (500MB): prevede 250 kg<sub>N</sub>/ha di liquame in presemina e 250 kg<sub>N</sub>/ha di liquame in autunno in prearatura.

*Volatilizzazione* – La distribuzione di liquami in campo, rappresentati in media per il 70% da azoto ammoniacale e per il 30% da azoto organico, determina una volatilizzazione della frazione ammoniacale, con perdita dell'azoto distribuito, funzione delle caratteristiche del liquame e delle condizioni atmosferiche, perdita che deve essere computata ai fini modellistici esternamente al modello. Tale valutazione è stata ottenuta utilizzando un foglio di calcolo messo a punto nell'ambito del Progetto Europeo ALFAM (Ammonia Losses from Field-applied Animal Manure) (Sogaard, et al., 2002) sulla base di dati di volatilizzazione disponibili a livello europeo. Le frazioni volatilizzate stimate sono funzione della dose di liquame applicata, dei contenuti in azoto della frazione secca, dell'umidità del terreno, della temperatura dell'aria, della velocità del vento. Per tale computo sono state considerate caratteristiche del liquame e velocità del vento medie rispetto a quelle misurate in campo nel corso di progetti precedenti (progetto GeTraMiN, Mantovi et al., 2003,2004) e i dati climatici del periodo considerato. I valori di volatilizzazione ottenuti sono congruenti con quanto direttamente misurato in campo nel medesimo progetto.

*Falda* - Per tutte le tipologie di suolo presenti nell'area la simulazione è stata effettuata in assenza di falda nel profilo.

## 2.2. Modello matematico

Per la determinazione dell'entità dei flussi idrici ed azotati alla base dei profili di suoli sono stati utilizzati, in accordo con la metodica messa a punto in ambito regionale, gli output dei modelli di simulazione MACRO (Jarvis, 1994) e SOILN (Eckersten et al., 1996; Larsson et al., 1999), tra loro collegati (Larsson, Jarvis, 1999).

### 2.2.1 Caratteristiche dei modelli matematici adottati

La scelta dei modelli di simulazione di bilancio idrico MACRO (Jarvis, 1994) e di bilancio azotato SOILN (Eckersten et al., 1996; Larsson e Jarvis, 1999) è legata all'importanza che in essi riveste l'influenza della macroporosità nel determinare l'entità del flusso idrico e del trasporto di soluti.

MACRO, infatti, consente di suddividere il suolo in due domini di flusso, micropori e macropori, ciascuno caratterizzato da un proprio contenuto idrico e dalla propria intensità di flusso. Il flusso nel dominio dei micropori viene descritto mediante l'equazione di Richards, mentre quello nei macropori è di tipo laminare-gravitativo, secondo la legge di Darcy.

Le caratteristiche idrauliche del dominio dei micropori sono rappresentate dai modelli di Brooks e Corey (Brooks e Corey, 1964) per la curva di ritenzione e del modello di Mualem (Mualem, 1976) per la conducibilità idraulica.

SOILN, invece, utilizza come variabili guida gli output di MACRO in termini di bilancio idrico e termico del suolo. Così come in MACRO, anche in SOILN il suolo viene suddiviso in strati nei quali l'azoto minerale è rappresentato da due componenti, una di azoto ammoniacale ed una di azoto nitrico.

Entrambe le componenti sono soggette, in maniera diversa, a molteplici processi (mineralizzazione dell'humus, mineralizzazione e/o immobilizzazione del carbonio e dell'azoto organico nei residui del raccolto e nei fertilizzanti, nitrificazione, denitrificazione, dilavamento del nitrato, prelievo da parte della vegetazione) controllati da costanti di trasformazione delle forme azotate, dal rapporto azoto/carbonio, dal contenuto idrico, dalla temperatura, dalle caratteristiche delle piante e dal periodo vegetativo.

Anche per SOILN le perdite per lisciviazione vengono distinte tra i due domini di porosità che caratterizzano il profilo di simulazione.

### 2.2.2 Applicazione dei modelli matematici

Per l'applicazione dei modelli sono stati considerati profili normalizzati a 150 cm di profondità, suddivisi in n.10 orizzonti con caratteristiche tali da rispettare la distribuzione degli orizzonti originali.

Le proprietà fisico-idrauliche degli orizzonti dei suoli necessarie per la simulazione sono state definite sulla base delle caratteristiche fisico-chimiche degli stessi (tessitura, scheletro, struttura, contenuto in azoto, sostanza organica, densità apparente) mediante l'utilizzo di pedofunzioni di trasferimento (Calzolari et al., 2001a, 2001b; Ungaro e Calzolari, 2001; Ungaro et al., 2005), mentre i valori di conducibilità idraulica a saturazione relativi alla macroporosità sono derivati da stime in campo da esperto.

Per quanto riguarda la simulazione del trasporto delle forme azotate, oltre agli apporti di azoto antropici sono considerate le deposizioni atmosferiche secca ed umida, valutate in base a misure effettuate nell'area (Progetto GeTraMiN). Per la definizione di parte dei parametri che regolano la trasformazione delle forme azotate e dei parametri colturali si è fatto riferimento ai citati studi di taratura della metodologia applicata. In particolare per i fertilizzanti chimici azotati è stato utilizzato un tasso di dissoluzione di 0.3 d<sup>-1</sup>, mentre il rapporto C/N per i liquami somministrati al terreno e il rapporto tra azoto nitrico ed ammoniacale sono stati assunti i valori rispettivamente di 4 e di 5.

Per contro, il rapporto C/N della biomassa e della sostanza organica humificata, il tasso di decomposizione dei liquami, il tasso di mineralizzazione dell'humus, il tasso di decomposizione dei residui colturali e il tasso di nitrificazione sono stati considerati funzioni del contenuto

in argilla dell'orizzonte di suolo.

I fattori di controllo delle attività biologiche dovuti all'umidità del suolo sono funzione della porosità totale, della porosità della matrice e del punto di appassimento.

Anche per la denitrificazione il modello usa il contenuto idrico come espressione indiretta dello stato di ossigeno all'interno del suolo; il tasso potenziale di denitrificazione è stato considerato funzione del contenuto in argilla.

Relativamente ai parametri colturali del mais, il massimo sviluppo radicale è stato considerato di 1.5 m, mentre il prelievo di azoto potenziale è di 33 gN/m<sup>2</sup> (ISA-MO, RER, 2003).

### 3. Risultati

Per ogni suolo e per ogni scenario sono stati simulati i bilanci idrici e i bilanci azotati. Tra i risultati sono stati

considerati in particolare quelli relativi ai flussi idrici e ai flussi di azoto nitrico alla base dei profili.

In termini di flussi idrici dei diversi profili, i valori simulati variano tra 33.9 e 290.1 mm/a, con valori relativi rispetto alle precipitazioni oscillanti tra il 3.7 ed il 30.2%.

Sulla base di una classificazione di capacità protettiva dei suoli definita in n.4 classi (alta: <80 mm/anno, medio alta: 80-150 mm/a, medio bassa: 150-250 mm/a e bassa: >250 mm/anno), i suoli presentano nella maggior parte una protezione medio bassa o bassa, con l'eccezione di quelli a tessitura più fine che risultano molto protettivi o con protezione medio alta.

In termini di perdite di azoto nitrico, il grado di protezione dei suoli è funzione dello scenario culturale. Trattandosi di un impatto antropico, si è preferito in questo caso definire classi di rischio, piuttosto che classi di capacità di protezione.

Tabella 2 - Classi di capacità protettiva e di rischio dei suoli sulla base dell'entità dei flussi idrici ed azotati alla base del profilo. Sono rappresentati i flussi idrici, i flussi di azoto nitrico e le concentrazioni in nitrati medie simulate per il periodo 1991-2000.

Table 2 – Classification of soil protection capacity and agronomic management risk on the basis of water and nitrate leaching. Average water and nitrate fluxes and nitrate concentration are represented for the period 1991-2000.

CAPACITÀ PROTET.	SUOLI	FLUSSO IDRICO mm/a	DPI		340 MA		340MB		500MB		DPI		340 MA		340MB		500MB	
			NH4NO3 kg/ha/a	RISCHIO	NH4NO3 kg/ha/a	RISCHIO	NH4NO3 kg/ha/a	RISCHIO	NH4NO3 kg/ha/a	RISCHIO	NH4NO3 mg/l	RISCHIO	NH4NO3 mg/l	RISCHIO	NH4NO3 mg/l	RISCHIO	NH4NO3 mg/l	RISCHIO
MOLTO ALTA	RSD1	33.9	0.3	MB	0.5	MB	0.6	MB	0.7	MB	2.2	MB	6.0	MB	25.6	B	46.8	A
	TERZ	53.9	0.4	MB	0.6	MB	0.8	MB	1.0	MB	3.3	MB	20.1	B	42.2	A	69.1	MA
	GHI1	63.7	0.2	MB	13.9	B	26.2	B	34.9	A	6.2	MB	14.1	B	45.6	A	70.3	MA
	CPOZ	67.9	1.8	MB	3.4	MB	7.3	MB	11.2	B	5.4	MB	14.3	B	51.4	MA	81.4	MA
	MFA2	71.4	0.2	MB	1.9	MB	12.3	B	18.3	B	28.9	B	141.8	MA	185.1	MA	225.0	MA
ALTA	MDC2	110.6	0.7	MB	1.3	MB	4.2	MB	9.9	MB	5.3	MB	26.5	B	62.3	MA	88.4	MA
	CDV2	117.3	1.3	MB	25.2	B	55.4	MA	74.7	MA	5.9	MB	39.6	A	82.7	MA	115.8	MA
	LBA1	123.2	0.5	MB	0.7	MB	7.0	MB	14.2	B	11.8	B	29.0	B	65.6	MA	98.5	MA
BASSA	MFA3	164.4	1.3	MB	12.7	B	37.8	A	53.4	MA	4.3	MB	95.1	MA	209.0	MA	281.8	MA
	GRG1	167.8	1.3	MB	40.1	A	53.1	MA	67.7	MA	6.3	MB	115.2	MA	171.0	MA	215.2	MA
	RNVW	174.9	0.7	MB	14.8	B	36.8	A	50.5	MA	2.9	MB	10.6	B	41.9	A	69.8	MA
	MFA1	181.1	0.3	MB	7.8	MB	27.8	B	42.8	A	6.2	MB	18.8	B	58.4	MA	93.3	MA
	MOR2	185.0	0.2	MB	38.1	A	55.4	MA	75.4	MA	10.3	B	22.5	B	47.5	A	73.3	MA
	TAL1	187.5	0.8	MB	15.9	B	45.1	A	63.6	MA	4.5	MB	28.6	B	82.8	MA	121.2	MA
	BEL1	200.9	1.6	MB	9.1	MB	19.1	B	31.4	A	6.3	MB	25.7	B	72.4	MA	103.0	MA
	CTL7	203.7	0.9	MB	4.4	MB	21.7	B	37.3	A	6.3	MB	21.8	B	62.5	MA	93.9	MA
	RNV1	204.4	2.2	MB	10.3	B	25.5	B	39.4	A	1.8	MB	9.5	MB	47.1	A	81.0	MA
	BAR1	211.1	1.2	MB	2.8	MB	12.2	B	22.3	B	1.3	MB	96.3	MA	182.2	MA	242.4	MA
	MDC1	211.4	3.0	MB	9.7	B	27.0	B	39.2	A	3.2	MB	105.9	MA	140.0	MA	178.6	MA
	CASZ	211.5	6.2	MB	13.9	B	31.3	A	47.1	A	5.6	MB	14.9	B	63.0	MA	101.3	MA
	SEC1	217.9	1.2	MB	9.9	B	29.7	B	45.3	A	1.7	MB	2.6	MB	25.0	B	50.9	MA
	SMB1	219.9	1.6	MB	8.0	MB	27.3	B	43.8	A	5.6	MB	20.3	B	56.5	MA	82.1	MA
	TEG2	220.3	4.2	MB	22.3	B	51.2	MA	70.4	MA	2.7	MB	5.2	MB	16.8	B	39.6	MA
	CAS2	221.1	3.3	MB	19.8	B	41.3	A	57.9	MA	7.5	MB	46.7	A	98.5	MA	125.7	MA
	PRD1	231.0	2.6	MB	10.1	B	25.8	B	39.4	A	0.6	MB	19.1	B	67.8	MA	104.6	MA
	CTL1	234.5	2.6	MB	15.1	B	43.9	A	64.2	MA	1.4	MB	11.7	B	76.2	MA	113.5	MA
	CTL4	235.1	3.7	MB	11.6	B	33.2	A	49.9	MA	3.0	MB	34.2	A	101.7	MA	143.8	MA
	CTL3	242.9	3.8	MB	14.1	B	39.7	A	56.5	MA	0.5	MB	91.1	MA	132.6	MA	180.4	MA
CON5	244.4	3.8	MB	10.4	B	32.2	A	51.5	MA	23.6	B	54.8	MA	99.0	MA	130.1	MA	
CAS1	246.2	3.3	MB	14.7	B	34.7	A	49.1	A	4.4	MB	19.4	B	49.4	A	75.4	MA	
BOR1	246.4	3.4	MB	8.0	MB	28.6	B	45.3	A	4.2	MB	22.3	B	55.2	MA	85.3	MA	
MOLTO BASSA	BOG1	258.0	4.0	MB	8.2	MB	26.6	B	41.0	A	1.7	MB	37.6	A	93.0	MA	127.9	MA
	PIS1	261.6	15.5	B	32.4	A	58.5	MA	76.9	MA	3.5	MB	6.6	MB	7.2	MB	9.4	MB
	CNOZ	264.3	4.2	MB	68.8	MA	102.1	MA	128.5	MA	2.1	MB	20.1	B	60.2	MA	92.1	MA
	SMB2	269.8	4.0	MB	9.8	B	32.5	A	48.5	A	2.9	MB	16.1	B	54.9	MA	88.2	MA
	CAN1	270.6	19.6	B	86.7	MA	113.2	MA	137.6	MA	5.9	MB	16.0	B	53.4	MA	79.6	MA
	MEZ1	276.6	5.2	MB	29.2	B	61.6	MA	78.6	MA	1.6	MB	37.6	A	106.4	MA	150.2	MA
	GRZ1	277.5	3.9	MB	9.4	MB	39.5	A	63.5	MA	7.7	MB	44.8	A	102.9	MA	141.4	MA
	CON4	290.1	2.1	MB	6.9	MB	27.5	B	45.8	A	3.1	MB	5.2	MB	7.0	MB	8.4	MB



Come si osserva in Tabella 2, sulla base di una definizione del rischio in n. 4 classi (basso: <1 g<sub>N-NO3</sub>/m<sup>2</sup>/anno, medio basso: 1-3 g<sub>N-NO3</sub>/m<sup>2</sup>/anno, medio alto: 3-5 g<sub>N-NO3</sub>/m<sup>2</sup>/anno ed alto: >5 g<sub>N-NO3</sub>/m<sup>2</sup>/anno) quasi tutti i suoli presentano un basso rischio nel caso di un apporto azotato effettuato secondo il Disciplinare di Produzione Integrata (DPI) e un rischio medio basso nel caso di un apporto azotato di 340 kg<sub>N</sub>/ha/anno ad alta efficienza culturale (340MA). In questo caso le concentrazioni di nitrato rilevate nell'eluato alla base del profilo, risultano superare i 50 mg/l previsti dal limite normativo per le acque potabili nel 17% dei suoli.

Gli scenari che invece comportano l'utilizzo di liquami nel periodo autunnale con efficienza medio bassa (340 e 500 kg<sub>N</sub>/ha/anno - 340MB; 500MB) determinano situazioni di rischio che raggiungono un livello medio alto ed alto. In termini di concentrazioni in nitrato delle acque percolate, tali apporti, al crescere dei dosaggi rispetto ai bisogni culturali, determinano valori superiori ai 50 mg/l nel 72% e 92% dei suoli analizzati.

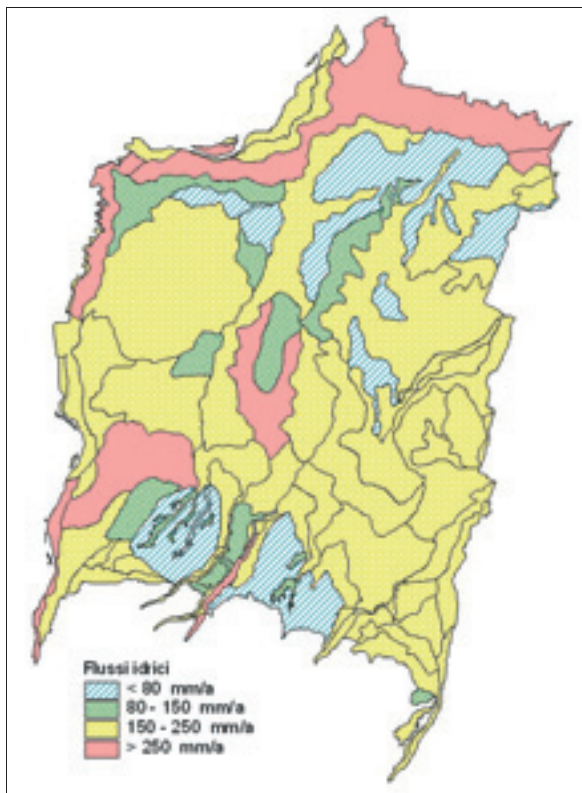


Figura 2 – Classi di capacità protettiva dei suoli sulla base dell'entità dei flussi idrici medi alla base del profilo (1991-2000); (Capacità protettiva MB/B/A/MA = Molto Basso, Basso, Alto, Molto Alto)

Figure 2 – Soil protection capacity defined on the basis of average water leaching (1991-2000); (Protection capacity MB/B/A/MA = Very High, High, Low, Very Low).

Per quanto concerne il confronto tra le pratiche culturali adottate, i risultati indicano perdite medie di

azoto nitrico alla base dei profili che, rispetto allo scenario di gestione secondo il Disciplinare di Produzione Integrata, sono 13 volte superiori per lo scenario ad alta efficienza e 28 e 40 volte superiori per gli scenari di liquamazione a bassa efficienza.

La distribuzione areale dei risultati descritti, effettuata sulla base della distribuzione percentuale dei tipi di suolo nelle singole delineazioni della carta dei suoli 1:50.000, ha consentito di considerare sul territorio le situazioni analizzate relativamente alla capacità di protezione (Figura 2) ed al rischio (Figure 3a, 3b, 3c, 3d). Più in dettaglio, l'analisi temporale dei flussi alla base dei singoli profili ha consentito di definire le condizioni climatico/stagionali che più favoriscono fenomeni di dilavamento in suoli specifici.

Si osserva in tal caso, in particolare nei casi di apporti di azoto in eccesso, un accumulo di azoto nitrico nel suolo nei periodi caldo-umidi e una migrazione nei periodi piovosi, dimostrando la criticità delle stagioni piovose con suolo nudo. Il tempo intercorso tra accumulo e perdita alla base del profilo è legato alle caratteristiche idrologiche dei suoli ed appare massimo nei suoli fini.

#### 4. Conclusioni

Le simulazioni dei flussi idrici ed azotati effettuata per differenti scenari tipici dell'area di pianura della Provincia di Reggio Emilia hanno messo in evidenza i diversi comportamenti dei suoli e la rilevanza delle pratiche di gestione agronomica su di essi condotte in relazione allo spazio ed al tempo.

I risultati evidenziano come pratiche conformi al Disciplinare di Produzione Integrata conducano a perdite di azoto nitrico molto basse, con basse concentrazioni in nitrati delle acque di percolazione, così come anche risulta per quasi tutti i suoli in seguito a pratiche con un uso controllato di liquame, ossia distribuito con efficienza medio alta.

Per contro apporti di liquami con bassa efficienza in periodi critici, specialmente se in dosaggi superiori ai bisogni culturali, causano perdite di azoto nitrico elevate ed elevate concentrazione in nitrati delle acque liscivate nella maggioranza o nella quasi totalità dei suoli.

Lo studio sottolinea come l'analisi in suoli rappresentativi e la modellistica con scenari differenti possano costituire validi strumenti per valutare scenari complessi, teorici ma realistici ed identificare le conseguenti misure preventive ottimizzando i programmi d'azione per aree specifiche.

Nell'ambito del progetto in atto, finalizzato all'elaborazione della carta di vulnerabilità provinciale, i risultati saranno messi in relazione con le caratteristiche idrogeologiche degli acquiferi e con le relative variazioni della falda sottostante, per una integrazione tra bilancio idrico del sistema suolo-clima-cultura ed analisi idrogeologica.

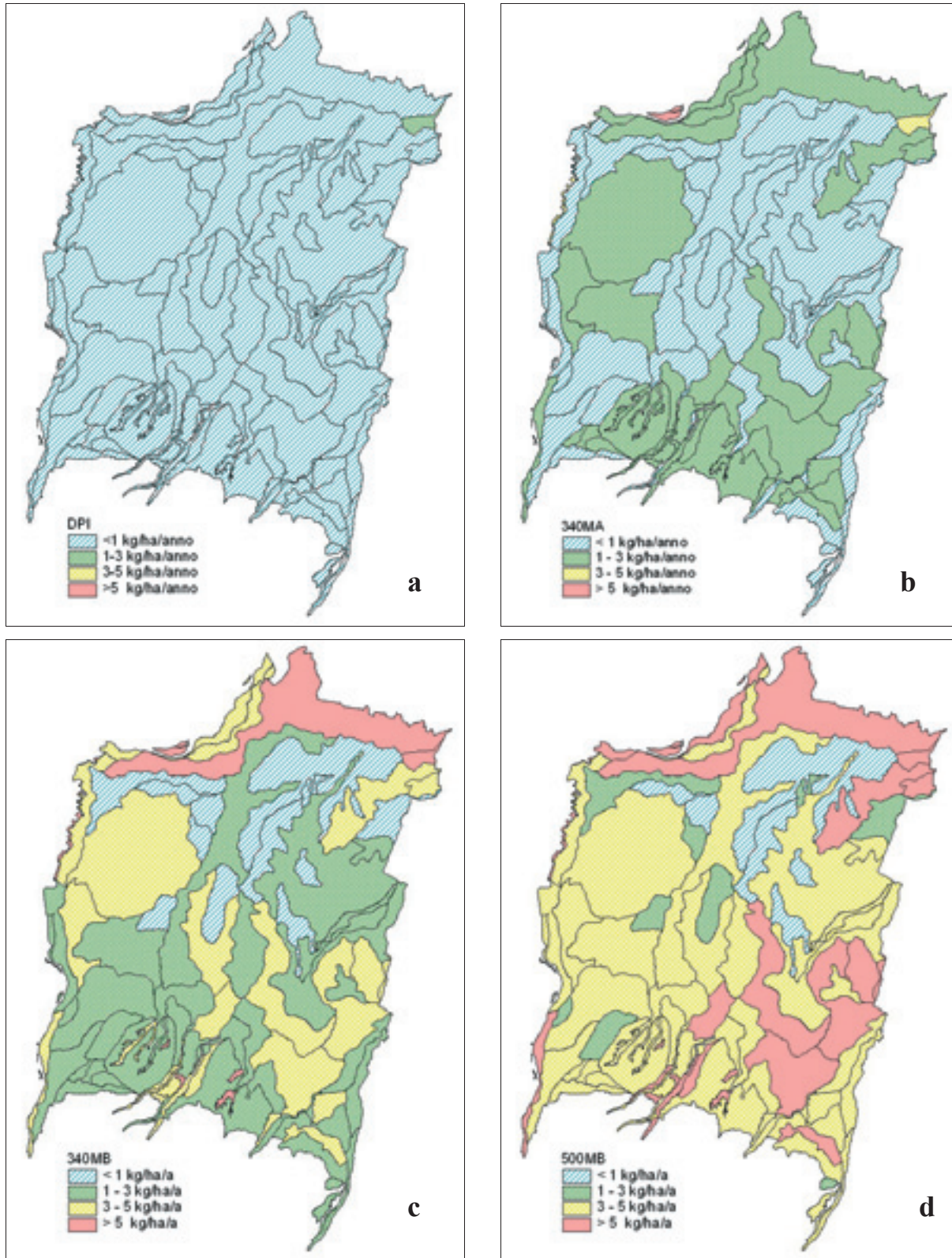


Figure 3a, 3b, 3c, 3d – Classi di rischio delle pratiche agronomiche nei n.4 scenari di simulazione sulla base dell’entità dei flussi azotati (N-NO<sub>3</sub>) medi alla base del profilo (1991-2000); (Rischio MB/B/A/MA = Molto Basso, Basso, Alto, Molto Alto).

Figure 3a, 3b, 3c, 3d – Classification of soil agronomic management risk for the n.4 simulation scenarios on the basis of averaged nitrate (N-NO<sub>3</sub>) leaching (1991-2000); (Risk MB/B/A/MA = Very Hight, Hight, Low, Very Low).



## Bibliografia

- Brooks R.H., Corey A.T. 1964: *Hydraulic properties of porous media*, Hydrology Paper 3, Colorado State University, Fort Collins CO.
- Calzolari C., Ungaro F., Busoni E., Salvador P. 2001<sup>o</sup>: *Metodi indiretti per la stima delle proprietà fisico idrologiche dei suoli. - I. Validazione di pedofunzioni da letteratura - II. Definizione di nuove pedofunzioni*. Rapporti Progetto SINA - Regione Emilia Romagna.
- Calzolari C., Ungaro F., Marchetti R., Ponzoni G., Spallacci P., Guermandi M., Fumagalli L., Mantovi P. 2001: *I modelli MACRO e SOILN: l'esperienza del progetto SINA - Carta pedologica in aree a rischio ambientale*. Modellistica e qualità ambientale dei suoli, ANPA - RTI CTN\_SSC 1/2001, Stampa ARPA Piemonte 2001, Torino, pp. 79-103.
- Eckjersten, H., Jansson, P.E., Johnsson, H. 1996: *SOILN model, user's manual*, 3<sup>th</sup> Ed. Comm. 96:1, Swedish Univ. Agric. Sci., Dpt. of Soil Sciences, Uppsala.
- Hargreaves, G.H., and Samani, Z. A. 1982; *Estimating potential evapotranspiration*. Tech. Note, J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 108(3):225-230.
- ISA-MO, Regione Emilia-Romagna, Servizio geologico, sismico e dei suoli 2003: *Valutazione di modalità alternative di definizione dei parametri idrogeologici per la stima del Bilancio Idrico dei suoli rappresentativi della Pianura Emiliano-Romagnola*. Rapporto di attività.
- Jarvis, N.J. 1994: *The MACRO model (version 3.1) Technical description and sample simulations*. Reports and dissertations n. 19, Swedish University of Agricultural Sciences, Dept. of Soil Sciences, Uppsala, pp. 51.
- Larsson M.H., Jarvis N. J. 1999: *A dual porosity model to quantify macropore flow effect on nitrate leaching*. J. Environ. Qual., 28: 1298-1307.
- Mantovi P., Beretta G.P., Cortellini L., Fumagalli L., Guermandi M., Preti D. 2003: *Monitoraggio e modellazione della migrazione dei nitrati nel mezzo insaturo in un'area vulnerabile della provincia di Reggio Emilia*. Ingegneria Ambientale vol.XXXII n.6, Ed.C.I.P.A., Milano, pp.314-327.
- Mantovi P., Tabaglio V., Ligabue M., Fumagalli L., Davolio R., Guermandi M., Beretta G.P. 2004: *Il Progetto GeTraMiN: Controllo della genesi trasformazione e migrazione dei nitrati dal suolo alle acque superficiali e sotterranee*. Atti del Convegno Internazionale Sistemi Agricoli e Inquinamento da Nitrati, libri/ARPA Umbria, Ed. CRACE, Perugia, pp. 227-243.
- Marchetti, R., Ponzoni, G., Spallacci, P., Ceotto, E., Ungaro, F., Calzolari, C. 2000: *Simulating water flow in areas at environmental risk with the MACRO model. Model evaluation with data from lysimeter studies*. Atti del Congresso.
- Marchetti, R., G. Ponzoni, and P. Spallacci 2001: *Simulating nitrate leaching under crops fertilized with pig-slurry in lysimeters*. Soil Use Manage. 17:245-253.
- Marchetti R., Ponzoni G., Spallacci P. 2004 *Simulated Nitrogen Dynamics in Agricultural Soils Fertilized with Pig Slurry and urea J. Environ. Qual. 33 (2004), 1217-1229 (2004)*.
- Mualem Y. 1976: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12(3).
- Regione Emilia Romagna 1998: *Catalogo Regionale dei Tipi di Suolo - Pianura Emiliana Romagnola*. R.E.R., Servizio Cartografico - Ufficio Pedologico.
- Regione Emilia-Romagna 1995: *Adozione quale piano-stralcio di settore del Piano territoriale per il risanamento e la tutela delle acque per il comparto zootecnico*. Deliberazione del Consiglio Regionale n. 2409 dell'8 marzo 1995, Boll. Uff. Regione Emilia-Romagna n. 97 del 7 giugno 1995, Bologna.
- Repubblica Italiana 1999: *Disposizioni sulla tutela delle acque dall'inquinamento e recepimento della Direttiva 91/271/CEE concernente il trattamento delle acque reflue urbane e della direttiva 91/676/CEE relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole*. D.Lgs 11 maggio 1999, n.152, Suppl.Ord. alla G.U. n. 124 del 29 maggio 1999, Roma.
- Repubblica Italiana 2000<sup>o</sup>: *Disposizioni correttive e integrative del decreto legislativo 11 maggio 1999, n.152 in materia di tutela delle acque dall'inquinamento, a norma dell'articolo 1, comma 4 della legge 24 aprile 1998, n.128*. D.Lgs 18 agosto 2000, n.258, G.U. n. 152/L del 18 settembre 2000, Roma.
- Repubblica Italiana 2000b: *Testo aggiornato del decreto legislativo 11 maggio 1999, n.152 recante "Disposizioni sulla tutela delle acque dall'inquinamento e recepimento della Direttiva 91/271/CEE concernente il trattamento delle acque reflue urbane e della direttiva 91/676/CEE relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole"*. A seguito delle disposizioni correttive ed integrative di cui al decreto legislativo 18 agosto 2000, n.258, G.U. n. 246 del 20 ottobre 2000, Roma.
- Sogaard, H.T., Sommer S.G., Hutchings N.J., Huijsmans J.F.M., Bussink D.W., Nicholson F. 2002: *Ammonia volatilization from field-applied animal slurry - The ALFAM model*. Atmospheric Environment 36:3309-3319.
- Ungaro, F., Calzolari, C. 2000: *Soil water content estimation: performance of available pedotransfer functions for predicting the water retention properties in areas at high environmental risk of the Pianura Padano-Veneta (Northern Italy)*. In Atti del 7<sup>o</sup> Convegno Internazionale ICCTA Computer Technology in Agricultural Management and Risk Prevention, Firenze, 15-18 novembre 1998, 147-156.
- Ungaro, F., Calzolari, C. 2001: *Using existing soil databases for estimating water-retention properties for soils of the Pianura Padano-Veneta region of North Italy*. Geoderma, 99, 99-121.
- Ungaro, F., Calzolari, C., Busoni, E. 2005: *Development of pedotransfer functions using a group method of data handling for the soil of the Pianura Padano-Veneta region of North Italy. Water retention properties*. Geoderma, Vol 124/3-4, 293-317.



# Caso di studio di un acquifero freatico a doppia porosità. Caratterizzazione, modellazione numerica e bonifica di un sito contaminato da solventi organici

Andrea Gigliuto, Davide Tangari, Alessandra Tognoni e Marialuisa Cremonesi

ENSR Italia, Milano

agigliuto@ensr.aecom.com, dtangari@ensr.aecom.com, atognoni@ensr.aecom.com; mcremonesi@ensr.aecom.com

*Dual porosity aquifer case study. Characterization, numerical modeling and remediation in a organic solvents impacted site*

**Abstract:** Below a dismantled pharmaceutical manufacture, a dual porosity aquifer was impacted by BTEX, petroleum hydrocarbons and chlorinated solvents. The site is currently protected by means of a pump and treat hydraulic barrier. Remediation is under final design procedure. The subsoil is characterized by a vadose layer hosting limited perched aquifers. The phreatic aquifer is located in a concreted conglomeratic unit. A second aquifer is present below a clay horizon. Contamination impacts only perched waters and the “shallow” aquifer. The final design remediation opted for a biosparging approach for the “shallow” aquifer and a dual-phase extraction system for the perched water. A 3D groundwater flow numerical model was performed to support remediation planning together with a Biosparging bench test and a Dual Phase Extraction pilot test. Next steps include Biosparging field tests and tracer tests.

**Key terms:** Organic solvents, Dual porosity aquifer, Hydraulic barrier, Numerical modeling, Dual phase extraction, Biosparging

**Termini chiave:** Contaminazione, BTEX, Idrocarburi petroliferi, Solventi organici, Acquifero a doppia porosità, Barriera idraulica, Modello numerico

## Riassunto

La nota presenta un caso di studio inerente la progettazione della bonifica di un sito industriale contaminato da BTEX (Benzene, Toluene, Etilbenzene e Xileni), idrocarburi petroliferi e solventi clorurati. Il sito è stato precedentemente utilizzato da una industria farmaceutica, la cui produzione è terminata alla fine degli anni '90.

Successivamente alle prime indagini di caratterizzazione, è stata attivata una barriera idraulica, tuttora operativa, funzionale come sistema di messa in sicurezza della falda acquifera.

Il sottosuolo dell'area si presenta costituito da una porzione vadosa superficiale in cui sono riconoscibili alcuni limitati acquiferi sospesi; sottostante tale porzione è presente l'unità conglomeratica, a doppia porosità, del “Ceppo”, in cui è sito l'acquifero freatico, al di sotto del quale un orizzonte di argille separa tale acquifero dagli acquiferi profondi dell'unità “Villafranchiana”.

La contaminazione interessa unicamente le acque dell'acquifero freatico e degli acquiferi sospesi mentre gli acquiferi profondi sono protetti dall'argilla.

Ai fini della progettazione della bonifica sono stati eseguiti test di laboratorio per valutare la biotratatabilità delle acque dell'acquifero freatico e si è proceduto con

l'esecuzione di un test pilota di Dual Phase Extraction per la bonifica dell'orizzonte vadoso. Un modello numerico 3D del flusso idrico sotterraneo è stato inoltre realizzato per supportare la progettazione del futuro assetto della barriera idraulica e della bonifica del sito.

Il progetto definitivo di bonifica è stato redatto prevedendo la realizzazione di un sistema di Biosparging per la bonifica dell'acquifero freatico e di un sistema Dual Phase Extraction per l'orizzonte vadoso.

La realizzazione finale dei sistemi di bonifica sarà preceduta dall'esecuzione di test pilota in situ di biosparging e di test con traccianti artificiali; da ultimo si procederà con l'implementazione di un modello numerico di trasporto dei contaminanti presenti in falda.

## Introduzione

Nel presente lavoro viene descritto un caso di studio inerente un sito contaminato ubicato nel nord Italia; tale sito è stato utilizzato in passato da una industria farmaceutica che ha interrotto la produzione alla fine degli anni '90.

A partire dagli anni '90, si sono succedute numerose campagne di investigazione che hanno rivelato una significativa contaminazione a carico dei terreni e delle acque sotterranee da parte di solventi clorurati, BTEX

(Benzene, Toluene, Etilbenzene e Xileni) e idrocarburi petroliferi. In accordo con la legislatura vigente sono state eseguite una serie di azioni di bonifica per le acque sotterranee come misure di messa in sicurezza di emergenza.

A partire dal 2000, ENSR Italia è stata incaricata della progettazione della bonifica del sito e delle indagini integrative necessarie per mappare e contenere la contaminazione presente nelle acque sotterranee; il sistema di messa in sicurezza, di tipo pump and treat, è tutt'ora mantenuto attivo. Nel 2005 sono stati eseguiti test di laboratorio finalizzati alla valutazione dell'efficienza di tecniche di bioremediation; inoltre è stato condotto un test pilota in-situ di dual-phase extraction (DPE). Sulla base dei risultati ottenuti da tali test, nel 2006 è stato redatto un Progetto Definitivo di Bonifica per il sito.

### Inquadramento geologico e idrogeologico

Il sito è ubicato nel nord Italia, in prossimità delle Alpi meridionali, in una zona a morfologia collinare caratterizzata da numerosi corsi d'acqua superficiali. L'area in cui si colloca il sito è caratterizzata da media urbanizzazione e presenta un uso del suolo prevalentemente residenziale e agricolo; il sito ha destinazione urbanistica commerciale/industriale.

Dal punto di vista geologico l'area è caratterizzata da sedimenti di origine glaciale sovrapposti ad una unità conglomeratica denominata "Ceppo" (Provincia di Milano, 1995). Al di sotto del conglomerato è osservabile l'unità "Villafranchiana", costituita da limi e argille intercalati da potenti lenti sabbiose (Figura 1).

L'unità glaciale che costituisce la porzione vadosa dei terreni sottostanti il sito, è costituita da un'orizzonte argilloso e limoso-argilloso di circa 30 m di spessore; tale orizzonte è intercalato da limitate lenti sabbioso-limose in cui sono rinvenibili locali acquiferi sospesi. In questa unità si osserva inoltre una profonda ed estesa alterazione della porzione sommitale dei terreni, conosciuta nel nord Italia con il nome di "Ferretto". Dal punto di vista

granulometrico è possibile individuare tre orizzonti differenziati in base al contenuto in sedimenti fini (Orizzonti A, B ed C di Figura 2).

Alla base dell'unità superficiale si rinviene il "Ceppo", un conglomerato cementato, di spessore pari a circa 20 m, in cui è osservabile l'acquifero freatico (Orizzonte D di Figura 2). La profondità della tavola d'acqua è circa 35-40 m da piano campagna e lo spessore dell'acquifero è mediamente di 10-15 m. In tale unità è riconoscibile un sistema di fratture interconnesse che determina la natura a "doppia porosità" dell'acquifero freatico: la permeabilità primaria è legata alla natura conglomeratica del "Ceppo" mentre la permeabilità secondaria è causata dalla presenza del reticolo di fratture. La porzione sommitale del "Ceppo" presenta inoltre un andamento abbastanza irregolare in cui è riconoscibile l'effetto erosivo di un paleo-fiume antecedentemente alla messa in posto dei depositi glaciali.

All'interno dell'unità "Villafranchiana" (Orizzonte E di Figura 2), il cui tetto è presente a circa 50 m di profondità dal piano campagna, è ubicato il secondo acquifero, protetto da un orizzonte argilloso di circa 10 m che preclude potenziali percolazioni di contaminanti dall'acquifero superficiale verso il profondo.

### Modello concettuale della contaminazione

Il sito ha una estensione areale di circa 25.000 m<sup>2</sup> ed è attualmente dismesso. A partire dal 2001 la maggior parte delle costruzioni presenti sono state demolite per cui attualmente sono presenti solo alcuni edifici adibiti in passato a uffici e laboratori. Tutte le strutture e gli impianti destinati alla produzione farmaceutica sono stati rimossi.

A partire dal 1990 sono state eseguite nel sito numerose campagne di indagine con la perforazione di sondaggi, l'installazione di piezometri, il prelievo di campioni di acque e terreni e l'esecuzione di prove idrogeologiche.

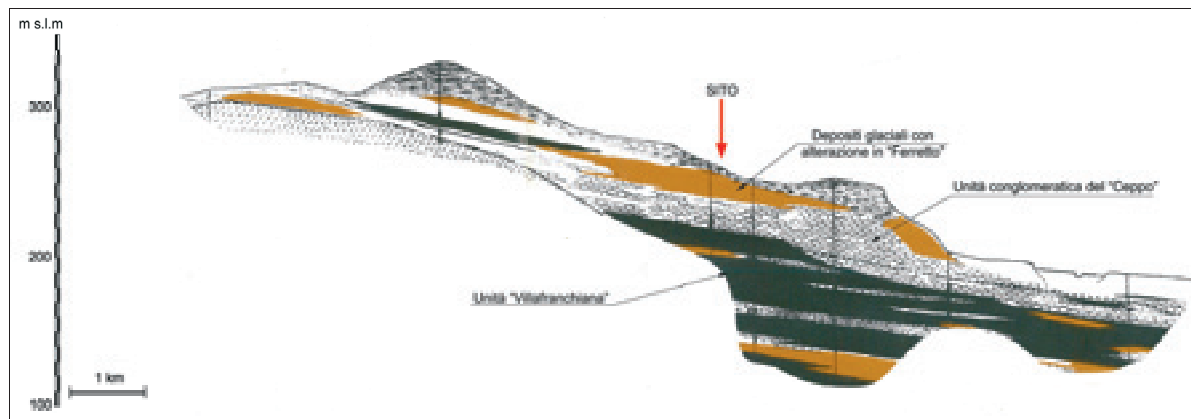


Figura 1: Sezione idrogeologica Nord-Sud.  
*Figure 1: North-South hydrogeological section.*

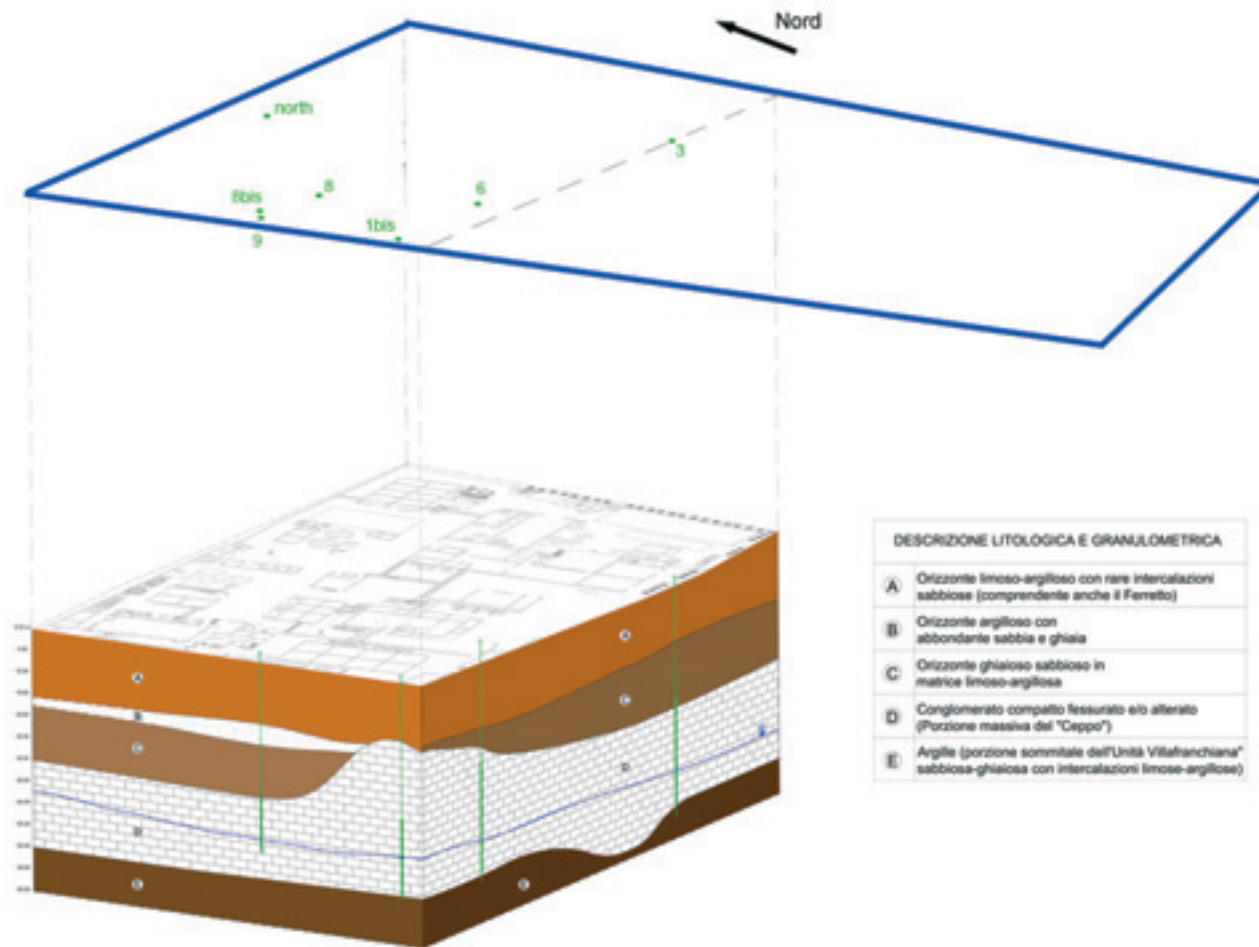


Figura 2: Modello geologico 3D del sito.  
 Figure 2: 3D site geological model.

I risultati analitici hanno rivelato la presenza nelle acque sotterranee di un plume di contaminazione costituito, in particolare, da BTEX, ad esempio Toluene in concentrazioni variabili da 20.000 a 65.000 µg/l nell'area centrale del plume, e Solventi clorurati, ad esempio Cloroformio in concentrazioni variabili da 2 a 50 µg/l nell'area centrale del plume. Nel sito è stata riscontrata anche una contaminazione minore a carico di Idrocarburi petroliferi, Arsenico, Ferro, Manganese e altri metalli.

La sorgente di contaminazione risulta essere nella porzione nord occidentale del sito e i contaminanti appaiono strettamente confinati negli acquiferi sospesi (lenti sabbiose presenti negli orizzonti A, B, C) e nell'acquifero superficiale (orizzonte D), risultando quasi unicamente a carico delle acque. I terreni che costituiscono l'orizzonte vadoso presentano una ridotta contaminazione a carico dei medesimi contaminanti individuati nelle acque sotterranee. L'acquifero profondo appare protetto dall'orizzonte argilloso che costituisce la base del "Ceppo" (Orizzonte E).

Nelle Figure 3 e 4 è evidenziato l'andamento del plume di contaminazione dall'ottobre 2004 al maggio 2007; in tali immagini è possibile osservare che il plume ha origine nella porzione nord occidentale dello stabilimento ed è diretto verso sud est, in accordo con la naturale linea di deflusso della falda sotterranea, diretta da NO a SE.

Dal 2000 è attiva una barriera idraulica costituita da una serie di pozzi di emungimento profondi drenanti l'acquifero conglomeratico. Nell'ottobre del 2004 è stato attivato un nuovo impianto di trattamento delle acque provenienti dalla barriera idraulica, andando a sostituire il pre-esistente impianto. Nello stesso periodo si è ottimizzata l'efficienza della barriera idraulica, andando ad utilizzare una configurazione costituita da 6 pozzi di emungimento (Figura 3 e 4). L'andamento delle isoconcentrazioni dei contaminanti riferite al maggio 2007 mostra che il sistema di contenimento idraulico (attualmente costituito da 6 pozzi) permette un efficace contenimento del plume e una progressiva riduzione dello stesso.



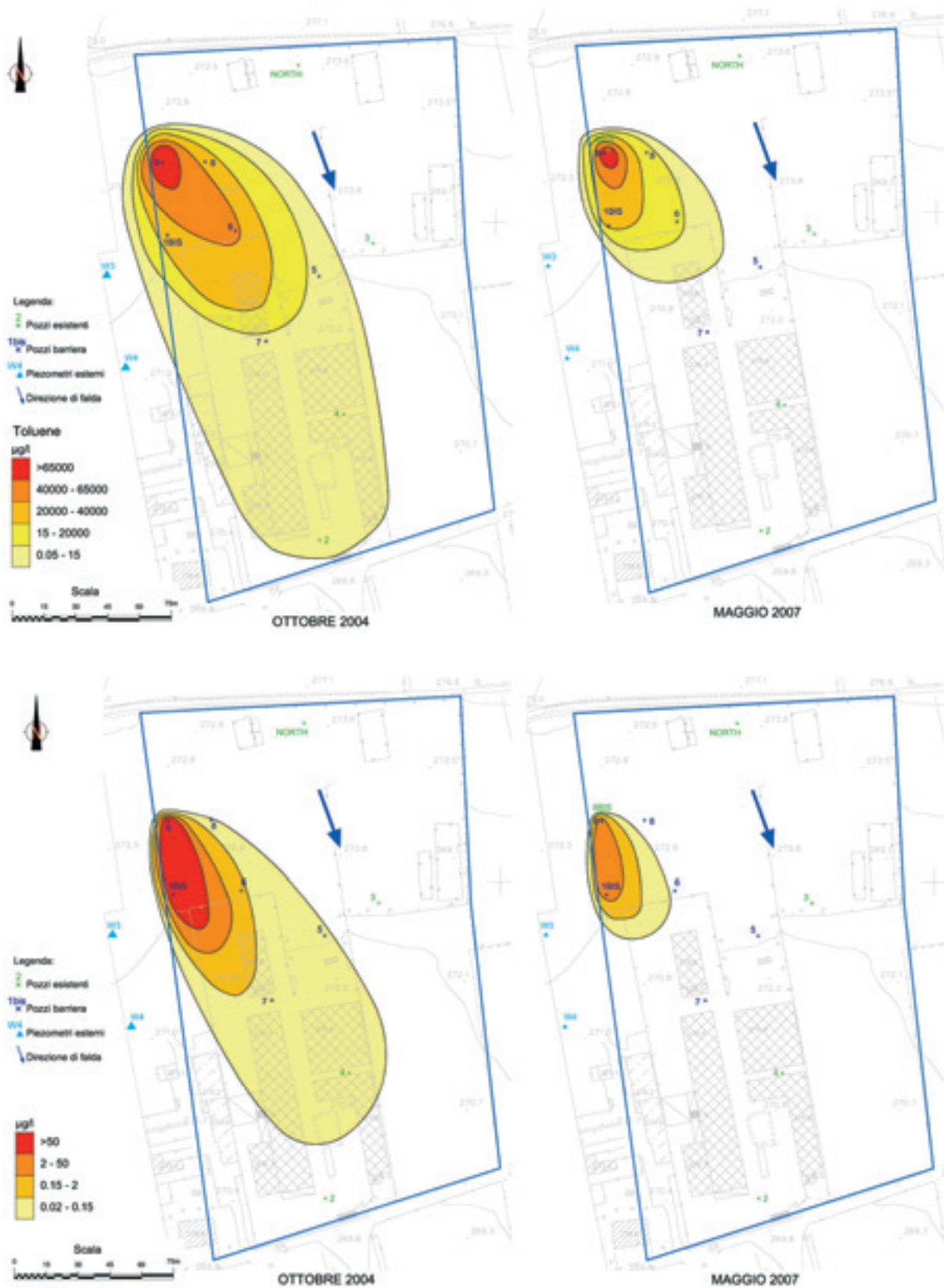


Figure 3 e 4: Andamento della contaminazione di Toluene e Cloroformio nel tempo (Il sistema di emungimento è attivo).  
 Figure 3 and 4: Behavior of the Toluene and Chloroform contamination across the Time (P&T system is active).

Numerosi test di pompaggio sono stati condotti nell'acquifero freatico per determinarne i parametri idraulici e per confermarne il comportamento "dual porosity". La porosità primaria è stata associata alla natura conglomeratica del "Ceppo" mentre la permeabilità secondaria è stata attribuita al reticolo di fratture dell'ammasso roccioso. Attraverso le prove idrauliche è stata definita la conducibilità idraulica media del sito, variabile tra  $1E-5$  e  $5.5E-6$  m/s. Durante i test si è provveduto a monitorare la contaminazione attraverso periodiche analisi delle acque prelevate dai pozzi, in corrispondenza dei tratti fenestrati saturi degli stessi (tra 40 e 50 m da p.c., come osservabile in Figura 2). Nel corso di tali prove si sono osservati rapidi incrementi di contaminante in alcuni pozzi che hanno permesso di rivelare la presenza di vie di scorrimento preferenziale della falda attraverso linee di frattura a permeabilità elevata, precedentemente osservate nel corso dei sondaggi eseguiti nell'area.

Potenziale recettore della contaminazione risulta essere un corso d'acqua superficiale, drenante l'acquifero freatico circa 300 m a ovest dell'area in esame.

### Modellazione numerica dell'acquifero freatico

Al fine di ottenere uno strumento di supporto per la progettazione di nuovi sistemi di messa in sicurezza dell'acquifero e per la valutazione delle opere di bonifica, è stato implementato un modello numerico 3D del flusso

idrico (Figura 5). A tal fine è stato utilizzato il codice Modflow dell'USGS attraverso l'interfaccia grafica Visual Modflow®. L'area interessata dal modello numerico, estesa circa  $270.000$  m<sup>2</sup>, è stata discretizzata attraverso una griglia alle differenze finite costituita da 60 righe, 80 colonne e 6 layer.

Le condizioni al contorno sono state assegnate in base alla ricostruzione del sistema idrogeologico (come riportato in precedenza) e dell'idrografia superficiale. Per simulare l'effetto del fiume sull'acquifero al margine occidentale del modello è stata utilizzata una condizione al contorno del III tipo (flusso dipendente dal carico); i bordi settentrionali e meridionali del modello sono stati simulati attraverso due limiti del I tipo (carico costante).

Per modellare il comportamento "dual porosity" dell'acquifero conglomeratico è stato utilizzato il metodo del mezzo poroso a conducibilità equivalente (EPM - Equivalent Porous Media, Anderson and Woessner, 1992): il modello è stato quindi implementato utilizzando i valori di conducibilità idraulica media ricavati dalle prove di pompaggio, modificati in seguito durante il processo di calibrazione.

Il modello è stato sottoposto a procedure di calibrazione e validazione che hanno riguardato in particolare la conducibilità idraulica, la ricarica e la conduttanza del fiume, al fine di ottenere la migliore corrispondenza tra i valori simulati di carico idraulico e i valori misurati (Figura 5), in basso a sinistra).

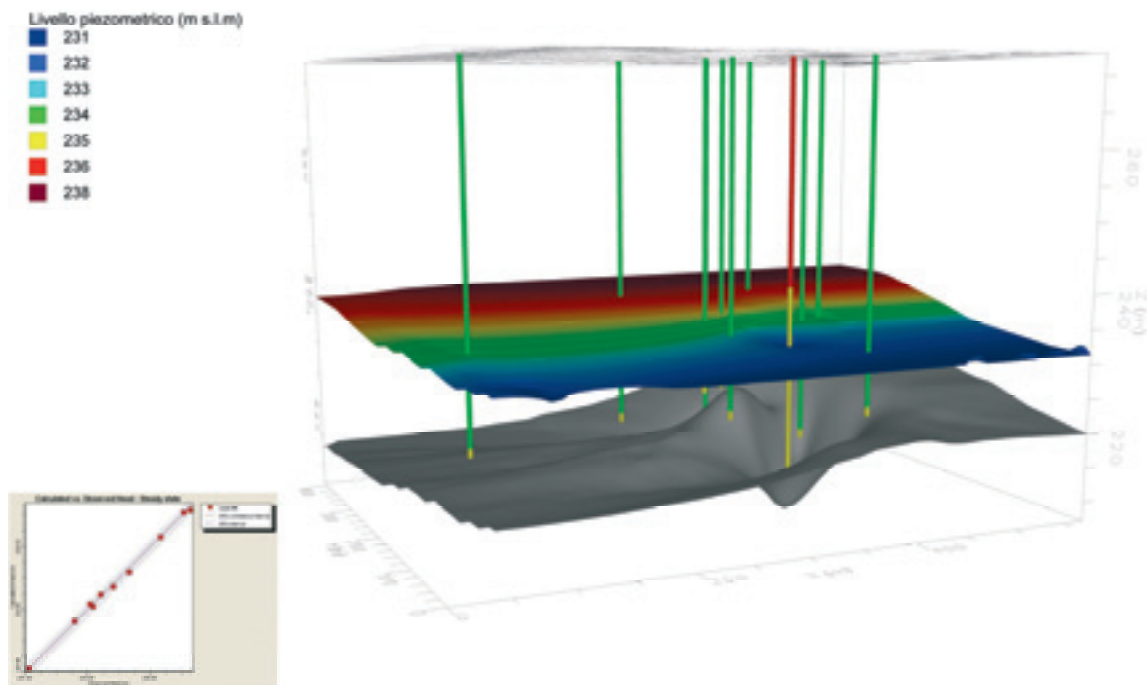


Figura 5: Modello numerico 3D del flusso delle acque sotterranee (in grigio è rappresentata la base dell'acquifero, in verde sono indicati i piezometri di monitoraggio e in rosso il pozzo in emungimento). Nell'angolo in basso a sinistra è riportato il grafico che illustra la corrispondenza tra valori di carico idraulico misurato e valori simulati.

Figure 5: 3D groundwater flow numerical model (in gray is showed the base of the aquifer, in green monitoring well and in red pumping well). On the bottom left calibration graph shows the correspondence between observed and calculated head.

Al termine delle operazioni di calibrazione e verifica, il modello è stato utilizzato per simulare una serie di scenari volti a verificare l'efficienza della barriera idraulica esistente, costituita da sei pozzi di emungimento, e a progettare il futuro assetto della barriera, realizzato attraverso l'installazione di un singolo pozzo di grande diametro (Figura 6).

### Test pilota e progetto di bonifica

Al fine di valutare l'efficacia di due tecnologie di bonifica, la prima per l'acquifero freatico e la seconda per gli acquiferi sospesi nell'orizzonte vadoso, si è proceduto all'esecuzione di un test di laboratorio di bioremediation e di un test pilota in-situ di Dual Phase Extraction (DPE).

Nelle acque dell'acquifero freatico sono state infatti rinvenute notevoli quantità di biomassa (batteri eterotrofi, di cui la maggior parte degradatori del Toluene). Per valutare le condizioni maggiormente adatte per un trattamento biologico in-situ delle acque dell'acquifero freatico, è stato eseguito un test di laboratorio in cui si sono analizzati gli sviluppi di differenti microcosmi, come riportato in Tabella 1.

I risultati del test, presentati in Figura 7, rivelano una crescita generale di biomassa associata ad un aumento della quantità di batteri degradatori del Toluene, in particolare nei microcosmi A e N.

Considerando che il delta tra la quantità di Toluene residua (in beuta e sulle fiale) e quella iniziale può ragionevolmente essere ascritto a processi biodegradativi, la rimozione per biodegradazione nei diversi microcosmi va da un massimo di circa l'80% in 2% in A ad un minimo, comunque significativo, di circa il 72% in SN.

In conclusione, il test di laboratorio mostra che aumentando l'ossigenazione dell'acquifero attraverso una

insufflazione artificiale (Biosparging) è possibile incrementare il tasso di biodegradazione dei contaminanti

Tabella 1: Differenti microcosmi utilizzati durante il test di laboratorio.

Table 1: Different microcosms used during the bench tests.

<b>B</b>	2 Beute di controllo	Sistema chiuso in miscelazione senza iniezione di aria
<b>A</b>	3 Beute	Come B ma aerato ad intervalli regolari
<b>N</b>	3 Beute	Come A ma con aggiunta di nutrienti inorganici: azoto e fosforo
<b>S</b>	3 Beute	Come A ma con l'aggiunta di biosurfattanti
<b>SN</b>	3 Beute	Come A ma con aggiunta contestuale di nutrienti inorganici e biosurfattanti

Per verificare la reale efficacia di tale tecnologia di bonifica in futuro si procederà all'esecuzione di un test pilota di bioremediation (U.S. Army Corps of Engineers, 1997); in dettaglio il sistema pilota sarà costituito da un pozzo di biosparging, 3 punti di monitoraggio e un pozzo di Soil Vapour Extraction finalizzato alla rimozione di eventuali contaminanti in fase gassosa, volatilizzati durante l'insufflazione di aria (Figura 8). Il test pilota permetterà quindi di definire i tassi di biodegradazione reali nell'acquifero, il raggio di influenza dei pozzi di biosparging e di valutare i possibili effetti secondari di tale tecnologia di bonifica, come ad esempio la precipitazione di ossidi di ferro nell'acquifero.

Il campo prova sarà inoltre predisposto al fine di poter eseguire un test con traccianti artificiali nelle acque sotterranee, per poter valutare i parametri idrodispersivi dell'acquifero e verificare i rapporti tra gli acquiferi sospesi e la falda freatica. Tali informazioni saranno utilizzate per implementare un modello di trasporto dei contaminanti nell'acquifero freatico.

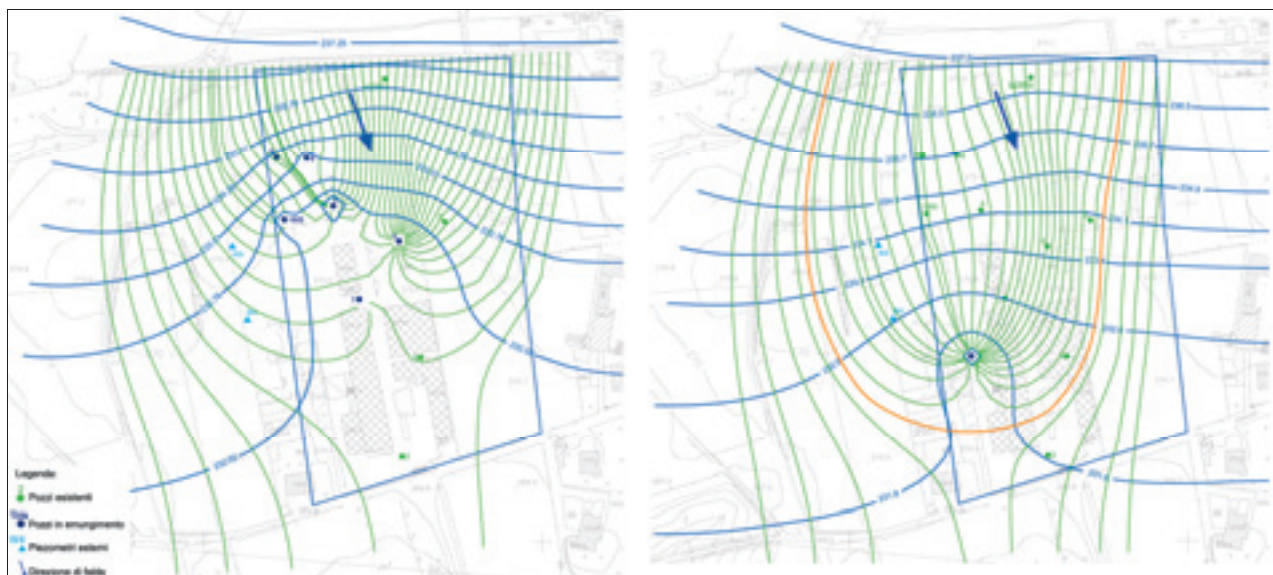


Figura 6: Paragone tra la barriera idraulica esistente e il futuro assetto in fase di progettazione.

Figure 6: Comparison between existing hydraulic barrier and new barrier design.



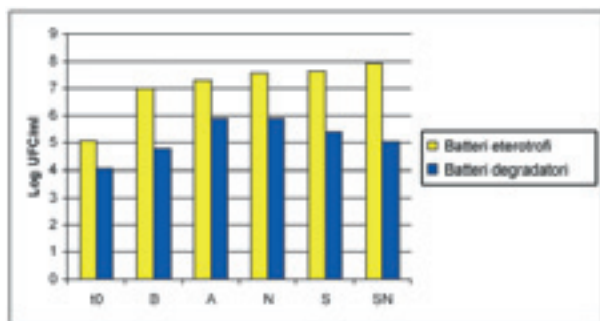


Figura 7: Andamento della biomassa totale e specializzata.  
 Figure 7: Total and specialized biomass trend.

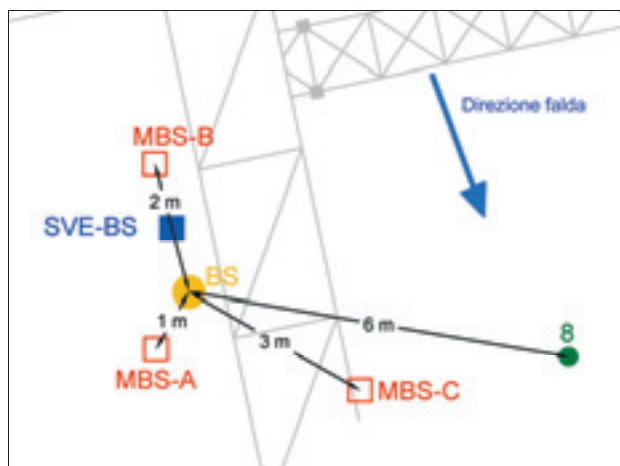


Figura 8: Campo prova di Bioremediation.  
 Figure 8: Bioremediation test field.

Nel 2005 è stato eseguito un test pilota di Dual Phase Extraction (DPE, U.S. Army Corps of Engineers, 1999), finalizzato alla valutazione dell'efficacia di tale tecnologia per la bonifica dell'orizzonte vadoso e degli acquiferi sospesi. Il campo prova è stato realizzato attraverso l'installazione di 3 pozzi di estrazione, fenestrati a differenti profondità (3-13 m, 13-23 m e 22-33 m da p.c.), e 3 pozzi di monitoraggio, ciascuno dei quali attrezzato con 3 micropiezometri per poter valutare l'effetto dei pozzi di aspirazione a differenti profondità (Figura 9). La posizione delle fenestrature dei pozzi di estrazione è stata definita in modo da interessare con la tecnologia l'intero orizzonte insaturo.

A seguito di un preliminare test a gradini di portata e di 3 prove di aspirazione a portata costante eseguite sui singoli pozzi, si è proceduto all'esecuzione di un test completo di aspirazione della durata di sette giorni. Tale test ha previsto l'aspirazione a portata costante da tutti i pozzi installati e il monitoraggio degli effetti nelle linee di estrazione e nei punti di monitoraggio. Al fine di valutare l'efficacia del sistema sono state eseguite sia analisi chimiche dei solventi organici totali e del Toluene sia misure strumentali di pressione, temperatura, velocità etc.

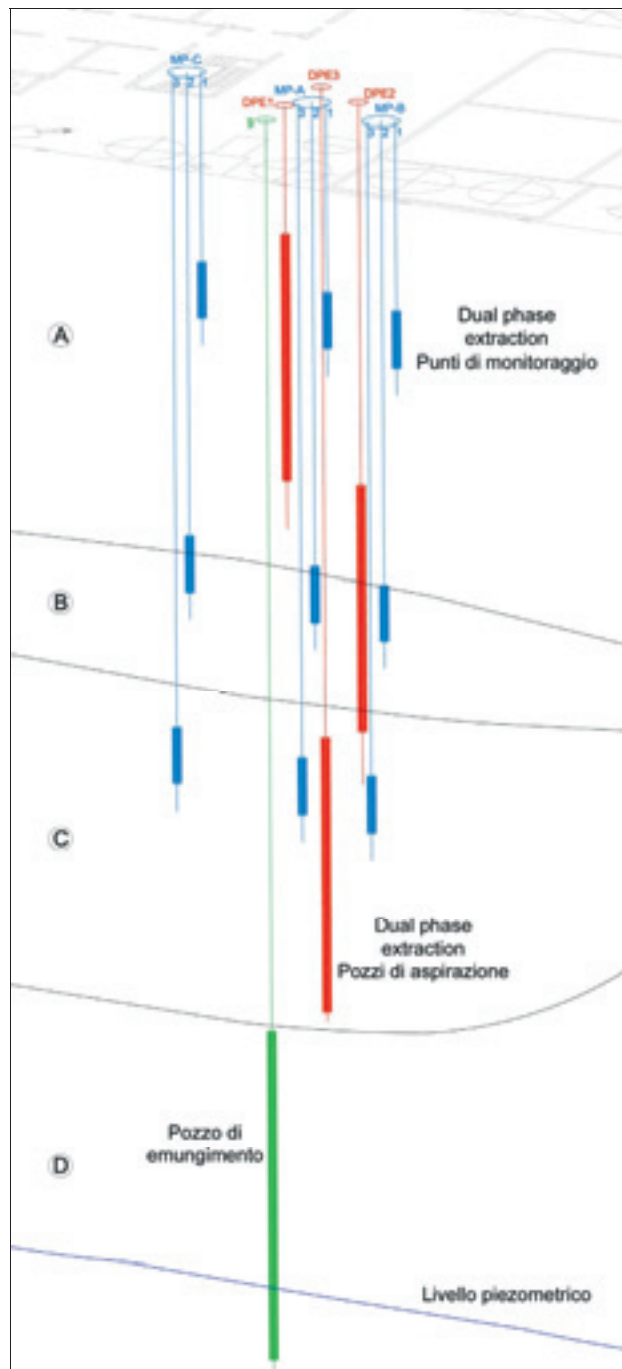


Figura 9: Sistema pilota DPE. Le lettere indicano i differenti orizzonti idrogeologici.  
 Figure 9: DPE pilot test system. The letters indicate hydrogeologic horizons.

Durante il test completo, eseguito alla portata complessiva di 18 Nm<sup>3</sup>/h per una durata di 7 giorni, sono stati estratti approssimativamente 9 kg di Toluene, in particolare dal pozzo superficiale DPE 1. In aggiunta è stato estratto 1 kg di Toluene dagli 8 m<sup>3</sup> di acqua emunta durante il test dai pozzi DPE 2 e DPE 3.

Il test pilota ha evidenziato un raggio di pressione (aria) del pozzo superficiale pari a 6 m e un raggio di influenza (acqua) di 7,5 m per i pozzi profondi. È stato infatti osservato che i pozzi profondi contribuiscono particolarmente alla desaturazione degli acquiferi sospesi mentre l'aspirazione dei gas viene per lo più eseguita dai pozzi superficiali. Inoltre è importante sottolineare che la depressione indotta dall'aspirazione di aria dai pozzi DPE permette di aumentare la produttività stessa dei pozzi, contribuendo a richiamare maggiori quantitativi di acqua nonostante la presenza di sedimenti a bassa permeabilità.

Sulla base dei risultati ottenuti nel corso del test pilota, è stato redatto un progetto di bonifica del nucleo di contaminazione dell'orizzonte vadoso, esteso su un'area di 40x40 m<sup>2</sup>. In tale progetto è stata prevista l'installazione di 2 tipologie di pozzi: 16 pozzi superficiali da cui estrarre principalmente aria e 7 pozzi profondi che contribuiscano a desaturare l'orizzonte vadoso e gli acquiferi sospesi.

### Discussioni e conclusioni

Attraverso l'utilizzo del modello numerico 3D, implementato con il codice Modflow, è stato progettato un nuovo assetto di barriera idraulica che andrà a sostituire la barriera esistente, in funzione da molti anni. Un nuovo impianto di trattamento sarà progettato per sostituire l'impianto esistente e per poter trattare le acque e i vapori provenienti dal sistema DPE. La barriera idraulica sarà mantenuta attiva fino a che il futuro sistema di biosparging non avrà contribuito a ridurre la concentrazione dei contaminanti nella falda freatica.

Il progetto definitivo di bonifica redatto per il sito prevede un sistema di biosparging per la bonifica

dell'acquifero freatico e un sistema di dual-phase extraction per il risanamento degli acquiferi sospesi. L'esecuzione dei test di campo di biosparging e di tracciamento artificiale permetteranno di approfondire l'applicabilità del trattamento biologico delle acque sotterranee e di ottenere i parametri di trasporto dei contaminanti nell'acquifero freatico.

I test con traccianti artificiali saranno inoltre utilizzati per approfondire la comprensione del comportamento "dual porosity" dell'acquifero conglomeratici, in associazione con l'analisi delle carote dei terreni attraversati durante i futuri sondaggi e l'esecuzione di ulteriori test idraulici. La conoscenza in merito all'orientazione del sistema di fratturazione del "Ceppo" e delle caratteristiche idrauliche delle fratture macroscopiche risulteranno fondamentali per valutare una idonea metodologia di bonifica dell'acquifero freatico.

Per definire i tempi necessari alla bonifica della falda e il rischio sanitario per i target di contaminazione presenti in prossimità dell'area, sarà infine implementato un modello numerico di trasporto dei contaminanti (Fetter, 1999. Spitz & Moreno, 1996). Tale modello sarà integrato dai risultati dei test di campo e sarà fondamentale ai fini della progettazione definitiva del sistema di bonifica dell'acquifero freatico sottostante il sito.

### Ringraziamenti

Desideriamo ringraziare l'Ing. Gerardo Bozzetto, il Dott. Gilberto Micaelli e il Geom. Bruno Cervo per il cortese supporto al presente lavoro e i nostri colleghi Dott. Paolo Pucillo, Geom. Andrea Pecora, Geom. Marco Notarnicola et al. per il loro contributo al progetto.

### Bibliografia

- Anderson, M.P. & Woessner, W.W., 1992. Applied Groundwater Modeling: Simulation of flow and Advective Transport. Academic Press, Inc., New York.
- Fetter, C.W., Prentice Hall Inc., 1999. Contaminant Hydrogeology. Second edition. Upper Saddle River, New Jersey, U.S.
- Provincia di Milano, Assessorato all'Ambiente, Politecnico di Milano – DSTM – Geologia Applicata. 1995. Le risorse idriche sotterranee nella Provincia di Milano. Vol. I: Lineamenti idrogeologici, Milano.
- Spitz, K. & Moreno, J., 1996. A practical guide to groundwater and solute transport modeling. John Wiley & Sons, Inc., NY, U.S.
- U.S. Army Corps of Engineers; Multi-Phase Extraction Engineer Manual (EM 1110-1-4010); 1999.
- U.S. Army Corps of Engineers; In Situ Air Sparging Engineering Manual (EM 1110-1-4005); 1997.

## Applicazione di tecniche di mappatura ad alta risoluzione nel fiume Arno (Firenze)

Samuele Segoni<sup>1</sup>, Stefano Morelli<sup>1</sup>, Minja Kukavicic<sup>1</sup>, Alessandro Camorani<sup>1</sup>,  
Filippo Catani<sup>1</sup>, Leonardo Ermini<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze

<sup>2</sup>Provincia di Firenze, Direzione Centrale Sviluppo e Territorio

samuele.segoni@unifi.it, stefano.morelli@unifi.it, minja.kukavicic@gmail.com, alessandro.camorani@gmail.com,  
filippo.catani@unifi.it, leonardo.ermi@provincia.fi.it

*Application of high-resolution mapping techniques in the Arno river (Florence, Italy)*

**ABSTRACT:** In this paper the first results of the PLANTARIO Project are presented. The project consists in the creation of a GIS-related database containing all the natural, urban, hydrological and morphological elements close to the main rivers within the Florence urban and suburban area. The greatest part of the data were newly acquired from aerial photographs or by direct surveys. An extensive GPS mapping survey was carried out granting a very accurate spatial localization of the elements (less than 5cm 3D error). This project provides local public administrations with an helpful tool for managing hydrological risk, hydraulic policy, urban planning and river restoration. We discuss also two applications resulted from the use of the database: a study to identify the weirs and the contiguous buildings suitable to be converted to the generation of hydroelectric energy and a preliminary study on the Arno dikes stability.

*Key terms:* GPS, GIS, Geodatabase, Urban planning, Dikes stability

*Termini chiave:* GPS, SIT (Sistema Informativo Territoriale), Geodatabase, Pianificazione territoriale, Stabilità arginale

### Riassunto

Nel presente lavoro vengono esposti i primi risultati del Progetto Plantario che coinvolge il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze e la Direzione Centrale Sviluppo e Territorio della Provincia di Firenze. Il progetto nasce dall'esigenza di migliorare gli strumenti di gestione e conoscenza nel monitoraggio dei principali corsi d'acqua interni al territorio provinciale, attraverso la creazione di un Sistema Informativo Territoriale relativo sia all'asta fluviale che alle principali opere idrauliche del corso del fiume Arno. L'obiettivo generale prevede la realizzazione di una mappatura, all'interno della Provincia di Firenze, delle aree contermini ai corsi d'acqua interessate da fenomeni di antropizzazione e l'integrazione in ambiente GIS dei dati provenienti da rilievi effettuati sul campo con dati pregressi disponibili in formato sia digitale che cartaceo. Gli elementi morfologici rilevati ed elaborati sono stati principalmente il ciglio di sponda e gli argini, per un totale di 106 km, a cui si sono aggiunti altri elementi come manufatti, insediamenti, restringimenti, opere idrauliche e scarichi. La loro collocazione è molto accurata in quanto è stata determinata mediante un'estesa campagna di misure GPS condotta in modalità RTK (Real Time Kinematic) che assicura una rapida acquisizione con un errore inferiore ai 5 cm. Il rilievo di dettaglio è stato

impiegato per l'attuazione di due applicazioni di estremo interesse. La prima ha riguardato uno studio sul recupero delle pescaie per la loro riconversione alla produzione di energia di tipo idroelettrico; la seconda invece si basa su uno studio di stabilità degli argini condotto su un'area pilota nel comune di Figline Valdarno, volto ad una valutazione più accurata del rischio idraulico attraverso modellazioni numeriche, indagini di laboratorio ed indagini di campagna.

### Introduzione

La dinamica evolutiva di un alveo fluviale e degli elementi morfologici contenuti nelle adiacenti fasce di pertinenza è un argomento di particolare rilevanza per le comunità che legano le proprie attività socio-economiche a queste aree. Le aree contermini al fiume Arno sono costantemente soggette ad un rischio idraulico più o meno elevato ed è perciò necessario tenere aggiornata la distribuzione dei principali elementi naturali ed antropici presenti al loro interno e determinarne la descrizione spaziale e strutturale (dimensioni, funzionalità, stato di conservazione, legame fra i vari elementi, ecc..) (Cherubini, 1977; Marzolo, 1989). Tutto ciò deve essere realizzato nell'ottica di una adeguata valutazione di vulnerabilità e/o efficienza degli elementi classificati in relazione ad eventi di dinamica fluviale ordinaria



(normale evoluzione) e straordinaria (esondazioni) e di una eventuale riutilizzazione degli stessi o conversione d'uso al fine di mitigare il rischio (Agnelli et al., 1998). Queste considerazioni hanno portato all'idea di realizzare un "dettagliato plantario delle aste fluviali della Provincia di Firenze" con lo scopo di fornire alle amministrazioni locali uno strumento operativo utile per gestire al meglio le risorse del proprio territorio, pianificare una corretta politica di urbanizzazione e, in generale, amministrare meglio il rischio idrogeologico.

Tale progetto, ideato e sostenuto con molto interesse dalla stessa amministrazione provinciale, intende approfondire per la prima volta la conoscenza dei principali corsi d'acqua interni al territorio di propria competenza, con particolare interesse per le aree soggette a fenomeni di antropizzazione.

Il presente articolo in particolare si riferisce ai rilievi condotti lungo il corso del fiume Arno per i 106 km dell'area oggetto di studio (Figura 1) che vanno dal confine sud con la Provincia di Arezzo (in corrispondenza della confluenza con il Borro Vacchereccia) al confine occidentale con la Provincia di Prato (sponda destra all'altezza della confluenza con l'Ombrone) e con il Comprensorio Empolese-Valdelsa (sponda sinistra in località Camaioni).

Nel tratto in questione il fiume Arno attraversa ambienti fisiograficamente diversi assumendo di conseguenza caratteristiche morfologiche e idrodinamiche distinte.

I primi 11 km del corso dell'Arno all'interno dell'area di studio avvengono nell'ambito della pianura alluvionale del Valdarno Superiore, dove il fiume ha sviluppato un letto ampio più di 100 m ed un corso quasi rettilineo in cui sono molto frequenti barre fluviali vegetate. Questo

tratto risulta scarsamente antropizzato (tranne in corrispondenza degli abitati di Figline Valdarno e di Incisa) ma entrambe le sponde sono quasi interamente arginate. Successivamente il fiume attraversa la "Soglia dell'Incisa", un tratto tortuoso di circa 3 km in cui il corso è confinato su un letto roccioso incassato tra sponde molto ripide. L'ampiezza del letto in questo caso è intorno ai 70-100 m. Gli affioramenti e la presenza di quattro pescaie hanno mantenuto sostanzialmente immutati in tempi storici sia il profilo altimetrico che lo sviluppo planimetrico dell'Arno. Dopo questo angusto passaggio il fiume sbocca nella pianura alluvionale di Rignano, in cui per 4 km scorre in direzione S-N con assenza di corpi sedimentari e con un'ampiezza di 70-100 m. Segue un tratto di circa 7 km in cui il fiume torna ad essere confinato entro sponde e letto in roccia fino a sboccare nella gola di Pontassieve, dove le caratteristiche fisiografiche sono quelle di una stretta pianura alluvionale in cui però il corso del fiume, che riduce ulteriormente la sua ampiezza a 50-100 m, è condizionato da frequenti affioramenti rocciosi. In molti casi la sponda sinistra è costituita da pareti rocciose di montagna e si osservano numerose barre laterali. Infine l'Arno entra nella pianura alluvionale fiorentina (circa 19 km), un tratto caratterizzato da numerosi interventi di rettificazione che a partire dal XII secolo (Natoni, 1944) hanno permesso di passare da un letto a canali anastomizzati ad un letto dal corso rettilineo e dall'ampiezza considerevolmente minore (massimo 150 m invece dei circa 1000 m osservabili in alcuni disegni storici). L'ultimo tratto (circa 7 km) percorso dall'Arno prima di abbandonare il territorio provinciale è la Gola della Gonfolina, in cui il letto è confinato in sponde rocciose costituite da arenarie del Macigno.

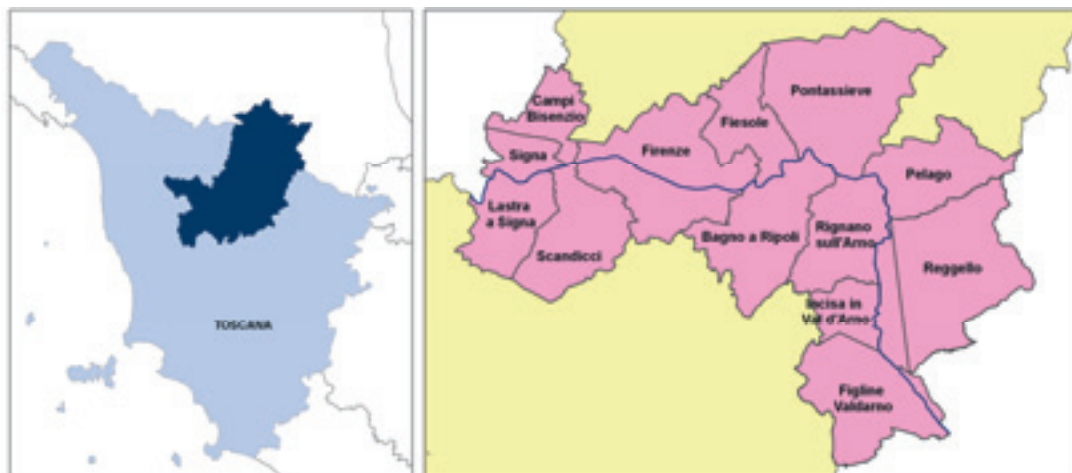


Figura 1: Localizzazione dell'area di studio. A sinistra è evidenziato il territorio della Provincia di Firenze all'interno della regione Toscana. A destra viene mostrata l'asta del fiume Arno compresa nei limiti provinciali (in giallo) e i 13 comuni coinvolti nel progetto (in rosa).

Figure 1: Location map of the study area. On the left is shown the Province of Florence in the Tuscany region; on the right is shown the course of the Arno river within the Florence province boundaries (yellow) and the 13 municipalities involved in the project (pink).

Il Progetto Plantario prevede l'integrazione in ambiente GIS dei dati conoscitivi disponibili in formato digitale e cartaceo con dati provenienti da nuovi rilievi sul campo. Le fasi caratterizzanti il progetto si articolano nell'esecuzione dei rilievi di campagna, nella ricostruzione di un quadro conoscitivo di dettaglio e nella sua predisposizione a sistema mediante Web-GIS delle banche dati costruite.

Le indagini sono state estese lateralmente a tutta la fascia "di assoluta protezione del corso d'acqua" che, definita in base al DCR 12\2000, comprende l'alveo, la golena, gli argini e le aree comprese nelle due fasce della larghezza di 10m misurate a partire dal piede esterno dell'argine o, in mancanza di questo, dal ciglio di sponda.

Ad oggi non esiste un sistema standard e strutturato che costituisca linee guida per la mappatura di precisione di intere aste fluviali e che assicuri al tempo stesso valutazioni di dettaglio in tempi di acquisizione rapidi. La mancanza di banche dati esaurienti, ben organizzate ed intercomunicanti tra loro a cui fare riferimento rende ancora più difficile operare in tale direzione. Questo lavoro si prefigge lo scopo di individuare le metodologie disponibili ed applicare all'area in esame quelle più idonee alle necessità di questo tipo di lavoro e di proporle come schema di riferimento per la creazione di banche dati dello stesso tipo.

## Metodologie

Per effettuare rapidi rilievi degli elementi naturali ed antropici situati nelle aree contermini ai corsi d'acqua in oggetto sono state utilizzate le tecniche analitiche legate all'uso di strumenti di georeferenziazione satellitare GPS di nuova generazione, unitamente all'interpretazione di foto aeree. I dispositivi utilizzati durante i sopralluoghi sono stati Leica SR530 e Leica 1200 nella modalità operativa RTK, ossia cinematica in tempo reale (Scrini et al., 2000; Piras, 2006). Gli strumenti hanno consentito in particolare il rilievo in campagna di elementi morfologici quali "ciglio di sponda" e "argini", distinguendo in questi ultimi i cigli, il piede esterno ed interno ed eventualmente i banchi secondari e le rampe di accesso (Marzolo, 1989). Il passo massimo fra i punti di acquisizione è stato solitamente di 25m con un errore di localizzazione sia in quota sia nel posizionamento planimetrico inferiore ai 5cm. Il passo è stato ridotto per quelle zone morfologicamente più irregolari in modo da descrivere al meglio la geometria dell'oggetto. Assieme agli argini e al ciglio di sponda sono stati identificati e rilevati elementi antropici e naturali connessi con l'ambiente fluviale quali per esempio manufatti, insediamenti, restringimenti nelle sezioni di deflusso, opere idrauliche, scarichi ed elementi morfologici di un certo interesse (Apat, 2004).

La fase del rilievo in campagna è stata integrata annotando su apposite schede monografiche informazioni differenti a seconda della categoria dell'elemento in

questione. In particolare, per i manufatti è stata riportata essenzialmente la tipologia e la posizione planimetrica rispetto all'alveo, mentre per i restringimenti di sezione è stata determinata la collocazione dei diversi tipi di opere che riducono il perimetro bagnato del corso d'acqua (ponte, guado, tombamento o semplice restringimento artificiale), indicando per gli alvei naturali lo stato di attività del fiume in quel punto (erosione, equilibrio o deposito). Per le opere idrauliche invece è stata rilevata la posizione specifica di quelle che sono le opere estese, longitudinali e trasversali rispetto al corso dell'acqua, indicandone di volta in volta il tipo, lo stato di conservazione e, nei casi particolari, la geometria. Per gli scarichi è stato indicato essenzialmente il punto in cui essi compaiono, segnalando anche la forma, le dimensioni, il materiale costruttivo, lo stato di manutenzione, l'eventuale presenza di vegetazione e il tipo di flusso (se presente). Per quanto riguarda infine gli elementi morfologici di un certo interesse (sponda in arretramento attivo, nicchie di frana, barre fluviali, ecc..) si è evidenziata la loro distribuzione rispetto agli elementi limitrofi, indicando il loro stato di attività ed eventualmente la necessità di intervenire per stabilizzarli o mettere in sicurezza l'area. Oltre alla scheda monografica compilata sul posto, per ogni elemento rilevato è stata raccolta una dettagliata documentazione fotografica.

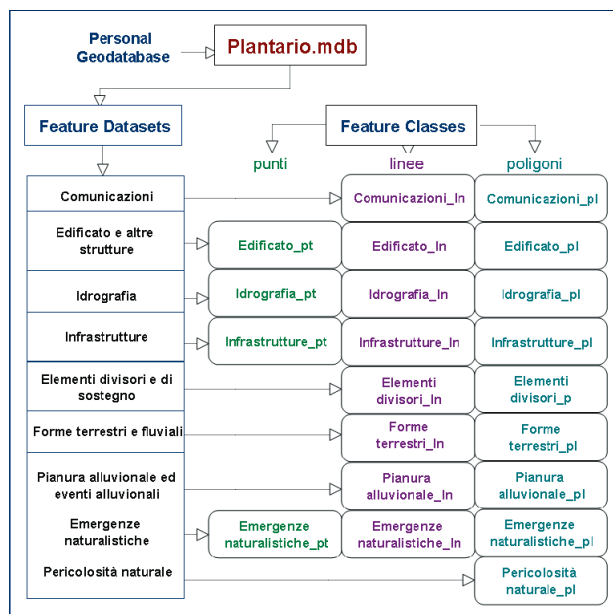


Figura 2: Strutturazione del geodatabase, dove sono confluiti i rilievi GPS, opportunamente separati nelle corrispondenti categorie di appartenenza (feature dataset) e a loro volta digitalizzati come punti, linee o poligoni a seconda dell'evenienza (feature classes).

Figure 2: Structure of the geodatabase, where the GPS measurements were divided in the proper categories (feature datasets) and digitalized as feature classes of points, lines or polygons as more appropriate.

Tutti i dati acquisiti mediante rilevamento in campagna o estratti dai supporti ottici e digitali (cartografia ed ortofoto) sono stati organizzati all'interno di un SIT, costituito da un geodatabase realizzato tramite applicativi del pacchetto ArcGIS™ 9.0 della Esri® ed organizzato in più Feature Datasets (Figura 2). Quest'ultimi costituiscono le diverse categorie in cui sono stati ripartiti tutti gli oggetti mappati e classificati, definiti come elementi puntuali, lineari o poligonali a seconda dell'estensione areale dell'oggetto in questione.

L'inserimento dei dati acquisiti tramite il rilievo GPS ha richiesto la loro trasformazione dal formato originario in raw data a quello rinex file (di scambio), successivamente portato in ascii e convertito in file numerico con software dedicato. Il software Verto ha consentito il passaggio da coordinate WGS 84 geografiche a coordinate piane Gauss Boaga fuso Ovest (utilizzate dalla maggior parte delle amministrazioni pubbliche) e le relative quote ellissoidiche sono state trasformate in geoidiche (reali); il formato finale .dbf ha reso possibile l'importazione in ambiente ArcGIS, dove è stata eseguita anche una verifica del corretto posizionamento dei punti tramite confronto con dati ancillari di tipo cartografico, raster, vettoriale e foto aeree 1:2000 (Figura 3).

L'importazione in ambiente ArcGIS di tutti i punti GPS (per un totale di 15.688 punti) ha permesso la loro ripartizione all'interno di appropriati feature dataset del geodatabase.

Gli elementi puntuali (come ad esempio gli scarichi) sono semplicemente rappresentati dal punto GPS, mentre gli elementi estesi sono rappresentati da linee o poligoni realizzati utilizzando i punti GPS come nodi.

Ogni feature class è contraddistinta da una specifica tabella di attributi in cui sono state inserite le informazioni contenute nelle schede monografiche compilate in campagna.

Per rendere più completo possibile il SIT, oltre a tutti gli elementi mappati in campagna durante il rilievo GPS, molti altri sono stati acquisiti dalle foto aeree 1:2000 (tramite ricalco a video) o sono stati estratti dalle Carte tecniche regionali 1:2000. Il ricorso ai dati di tipo ancillare si è reso necessario in particolare per tutti quegli oggetti di cui non è stato possibile acquisire l'esatta posizione tramite GPS per motivi logistici (impossibilità di accedere all'elemento a causa di proprietà private o altri ostacoli) o per motivi tecnici (l'effetto "multipath" ad esempio rende impossibile l'acquisizione della posizione con la precisione richiesta) (Tranquilla, 1986).

Il rilevamento ha compreso entrambe le rive dell'Arno per una lunghezza complessiva di 106,5 km ed ha evidenziato un ciglio di sponda che si sviluppa per 53,1 km mentre i restanti 53,4 km sono caratterizzati da arginature di vario tipo.

Per disegnare in maniera accurata lo sviluppo di ogni elemento morfologico di queste opere idrauliche sono stati digitalizzate linee per una lunghezza totale di 189,2 km utilizzando 10.025 punti GPS.

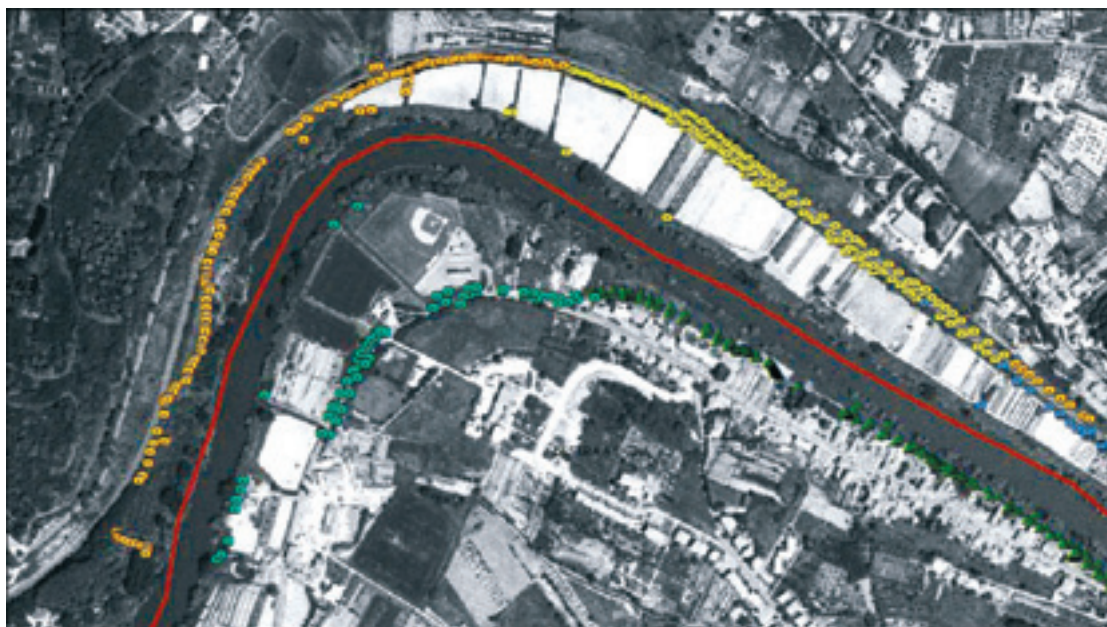


Figura 3: Esempio di sovrapposizione in ambiente GIS dei punti GPS ricalcolati relativi ai Comuni di Lastra a Signa e Signa (in rosso il confine comunale) con foto aeree in scala 1:10000. I diversi colori dei punti indicano rilievi eseguiti in differenti uscite di campagna.

Figure 3: Example of the overlapping in GIS environment of GPS points with 1:10000 scale aerial photograph. The figure refers to the municipalities of "Lastra a Signa" and "Signa" (the red line identifies the administrative boundary between the two) and the different colors of the points show distinct GPS fieldworks.



Per il ciglio, trattandosi solo di un elemento lineare, ne sono stati necessari appena un terzo. Solo metà delle aree contermini al corso d'acqua risultano quindi protette da difese arginali e se si considera che in quasi tutti i tratti di pianura il ciglio è stato più volte rimaneggiato per favorire un miglior scorrimento dell'acqua o una migliore fruibilità agli abitanti si capisce quando l'antropizzazione sia stata intensa in questi luoghi.

Sono state inoltre mappate altre 184 opere idrauliche di minore estensione (109 poligonali di cui 20 pescaie, 74 lineari e 1 puntuale) attraverso 2.130 punti GPS. L'area coperta dai poligoni è complessivamente di 100.205,72 m<sup>2</sup>, mentre le opere lineari si estendono in totale per 6.890,92 m.

Sono stati individuati 51 restringimenti (208 punti GPS) di cui 28 attraversamenti dell'Arno (26 strade e ferrovie, 2 passaggi pedonali), e 16 attraversamenti su impluvi o torrenti affluenti, 5 tombamenti di fossi, 1 guado, 1 restringimento di sezione associato ad un gasdotto. E' importante sottolineare che solo i ponti più antichi riducono la sezione idraulica più del 50%: Ponte Vecchio (Firenze) e il ponte D'Annibale (Bruscheto, Reggello). Infine sono stati rilevati 295 punti GPS associati a scarichi, ai quali vanno sommati quelli fisicamente non raggiungibili dallo strumento per un totale di circa 350 sbocchi diretti in Arno. Il rilevamento

si è completato con altri 755 punti di vario tipo fra i quali manufatti, spigoli di edifici, linee di sponda in arretramento attivo ecc.

Gli argini, che sono stati gli elementi maggiormente mappati, risultano essere stati costruiti secondo tre principali metodologie: in terra, in muratura o con tecniche miste. Quelli in muratura si ritrovano di solito nei centri storici delle città che, avendo un'economia strettamente dipendente dal fiume Arno, sono sorte in prossimità delle sponde. E' il caso del centro storico di Firenze (Figura 4), ma anche di Incisa, Ponte a Signa, Porto di Mezzo e Brucianesi. Laddove questa esigenza di spazio a ridosso del letto del fiume non era così esasperata la costruzione di argini è avvenuta generalmente in terra realizzando geometrie più ampie che vanno dal semplice trapezio a forme più complesse comprendenti un numero variabile di banchi di sostegno. Anche in questi casi comunque il successivo sviluppo urbanistico spesso ha comportato la necessità di contendere al fiume superficie edificabile e di concentrare in pochi metri abitazioni e difese idrauliche, per cui queste ultime sono state spesso ritoccate associando ai classici rilevati in terra degli elementi in muratura come sostegno e rinforzo. Un caso del genere è ben rappresentato a Signa.

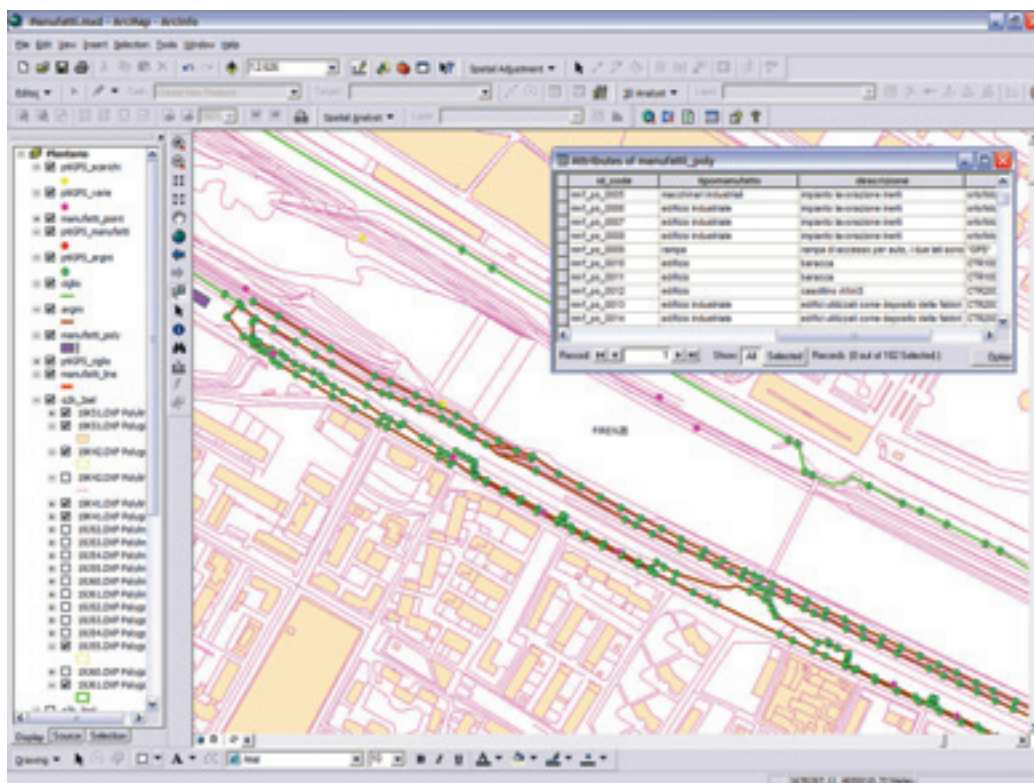


Figura 4: Elaborazione in ambiente GIS dei punti GPS; in figura viene mostrata la sovrapposizione dei dati ancillari (CRT 10000) con i punti GPS relativi agli argini e la loro digitalizzazione per il centro di Firenze.

Figure 4: The GPS points elaborated in a GIS environment; the figure shows ancillary data (topography at 1:10000 scale) and the dikes and their digitalization in the centre of Florence.

Attualmente solo il 15% degli argini sono costruiti in muratura ed i rilevati in terra sono prevalenti. Essi costituiscono la principale opera di difesa contro le piene dell'Arno sia per le aree urbanizzate che per quelle agricole e generalmente sono strutture molto antiche di cui si è persa qualsiasi informazione sulle modalità di fabbricazione e sui materiali utilizzati. Inoltre i vari agricoltori per proteggere i propri campi hanno più volte rinforzato gli argini, alzato il loro livello e ricostruito i loro cedimenti con materiali trovati sul posto, conferendo ai rilevati arginali una complessa disomogeneità strutturale. A fronte di tali osservazioni ottenere un quadro conoscitivo della capacità di tenuta di queste strutture risulta quanto mai necessario per la gestione del rischio idraulico.

### Applicazioni

Il database del Plantario costituisce la base di partenza conoscitiva ed operativa per qualsiasi nuovo studio o lavoro che verrà realizzato attorno al fiume Arno, sia per quanto riguarda la pianificazione e la gestione territoriale, sia per la pericolosità ed il rischio idraulico ed idrogeologico. Questo strumento è già stato impiegato per due applicazioni che verranno qui riassunte: la realizzazione di un quadro conoscitivo delle pescaie del fiume Arno finalizzato ad una loro conversione d'uso per la produzione di energia idroelettrica e un'analisi di stabilità degli argini.

#### *Le pescaie dell'Arno*

Per pescaie si intendono quegli sbarramenti fluviali trasversali atti alla realizzazione di un accumulo d'acqua immediatamente a monte e all'incanalamento della medesima in derivazioni laterali (gore) per ricavarne energia meccanica (Figura 5).

Nell'area di studio sono presenti venti pescaie ed alcune di esse risalgono addirittura al medioevo. Esse rappresentavano per la comunità locale un'importante risorsa in quanto fornivano energia meccanica a mulini e gualchiere (stabilimenti protoindustriali per la lavorazione

della lana che dal sec. XIV al sec. XVIII contribuirono alla ricchezza delle più potenti famiglie fiorentine).

Dal secolo XVIII fino all'epoca contemporanea tali strutture, perdendo progressivamente rilevanza economica, sono cadute lentamente in disuso e molte sono state pesantemente danneggiate dai bombardamenti della seconda guerra mondiale o dall'alluvione del 1966 e non sono mai state recuperate. Addirittura la pescaia di S. Andrea negli anni '80 fu distrutta di proposito per abbassare il livello idrometrico a monte e agevolare così la costruzione di un ponte ferroviario.

L'amministrazione provinciale ha mostrato interesse al recupero di quello che è un patrimonio storico del territorio fiorentino e che potrebbe essere nuovamente convertito in una risorsa economica per la comunità sia in qualità di attrazione turistica (a fini anche didattici), sia per la conversione in impianti per la generazione di energia idroelettrica.

All'interno del progetto Plantario è stata quindi intrapresa una ricerca parallela, finalizzata al recupero delle pescaie e degli edifici storici annessi (AAVV, 2006). Il database del Plantario ha fornito il quadro conoscitivo di base, da cui è emersa la presenza di 20 pescaie e 18 annessi correlati ad esse (Figura 6). Le schede tecniche allegate al database, oltre ad aver contribuito alla stima dei costi di recupero, hanno fornito informazioni geometriche, come il salto idraulico, in base alle quali è stata effettuata una valutazione orientativa del quantitativo di energia idroelettrica producibile. Parallelamente è stata condotta anche un'indagine catastale per risalire ai proprietari degli edifici e dei terreni connessi con le pescaie. Sono state reperite e documentate anche notizie storiche, in base alle quali è stato possibile indicare le strutture più rilevanti da un punto di vista storico-architettonico (AAVV, 2007).

I risultati di queste indagini hanno portato a verificare che delle 20 strutture (pescaia + annesso) presenti nell'area di studio, 12 hanno ad oggi i requisiti tecnici per poter essere proficuamente convertite in centrali idroelettriche.



Figura 5: Il Mulino di San Moro. Questo edificio è connesso alla pescaia di Santa Rosa tramite un canale artificiale lungo circa 8 km.  
*Figure 5: The Saint Moro Moulin. This building is connected to the St. Rosa weir by an 8km long artificial channel.*



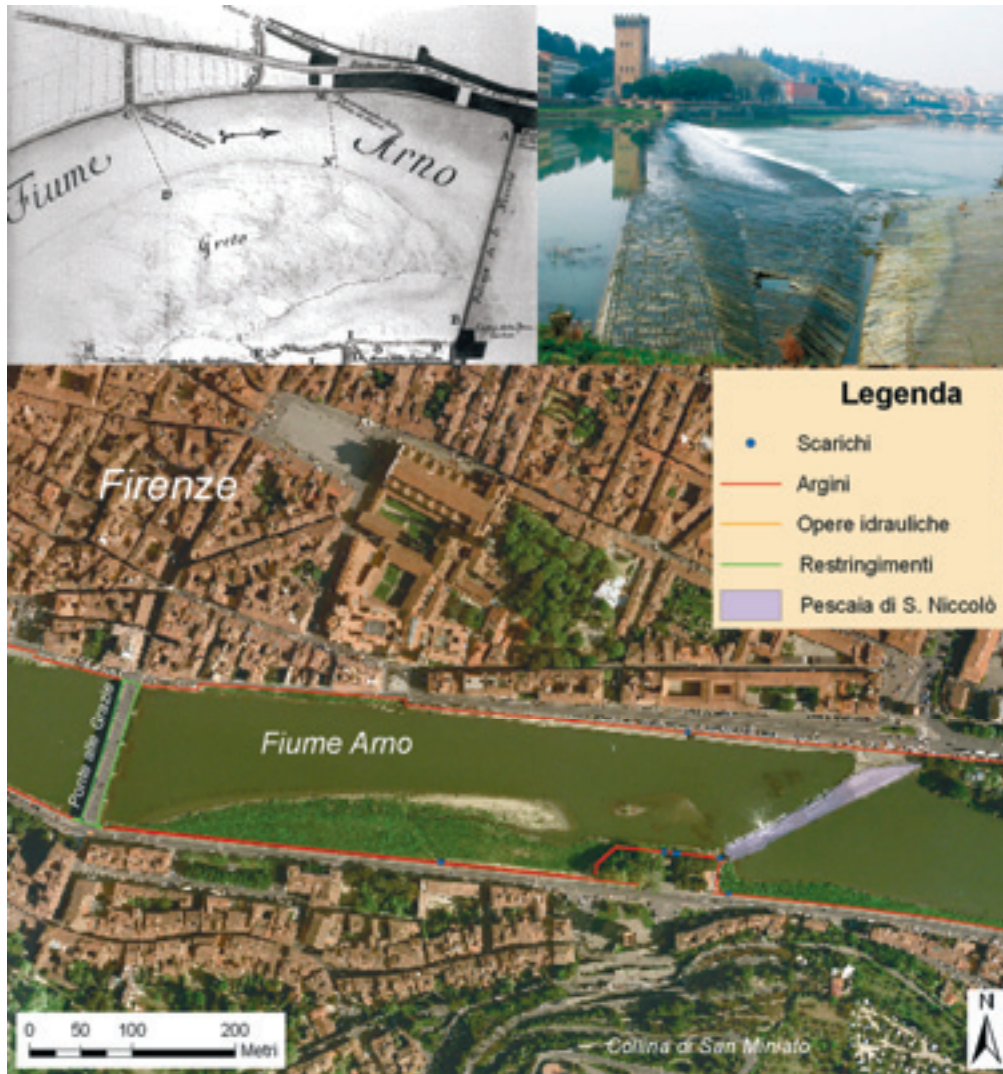


Figura 6: La pescaia di San Niccolò, ubicata nel centro di Firenze, in un'immagine storica del 1804 (Guerrini, 1990) (in alto a sinistra), in una foto recente (in alto a destra) e nella visualizzazione in ambiente GIS di una foto aerea con sovrapposizione degli elementi mappati durante il rilievo GPS (in basso).

Figure 6: The Saint Niccolò weir, situated in the center of Florence, from an historical image dated 1804 (Guerrini, 1990) (upper left), from a recent photograph (upper right) and from an aerial photograph shown in GIS environment with the overlapping of the elements mapped during the GPS survey (down).

Un simile intervento garantirebbe una produzione energetica di 45,67 GW/h (stima su base annua) e richiederebbe un investimento di circa 47 milioni di euro (recuperabile in poco più di 5 anni di attività) per l'acquisto e l'installazione dei macchinari e per il completo restauro delle pescaie e degli annessi (AAVV, 2007).

Questa ingente quantità di denaro potrà essere reperita con project financing e investitori privati che in cambio avranno la gestione degli impianti idroelettrici (unitamente ai proventi della vendita dell'energia elettrica). È previsto comunque che i privati versino alla Provincia un canone annuo di 200.000 €. Tale somma verrà utilizzata dall'amministrazione provinciale per

effettuare manutenzione ordinaria e straordinaria sulle opere idrauliche dell'Arno.

In definitiva quindi al recupero architettonico delle pescaie si aggiungerà anche il recupero d'uso, reinterpretato in chiave moderna: una volta tali strutture venivano utilizzate per produrre energia meccanica, ben presto saranno preposte alla generazione di energia elettrica. In tal modo, come nella Firenze medioevale, le pescaie ed il fiume Arno torneranno ad essere un elemento di ricchezza per investitori privati e per la comunità in generale.

**Analisi di stabilità e caratterizzazione geotecnica degli argini del fiume Arno**

Il Plantario è uno strumento utile anche per la gestione del



rischio idraulico: visualizzando il database in ambiente GIS o WebGis si possono localizzare con estrema precisione gli elementi a rischio nelle immediate vicinanze dell'Arno e si può stimare l'efficacia degli elementi di contenimento delle piene (disposizione e quote dei rilevati arginali e dei cigli di sponda).

Attualmente tutti i piani di emergenza relativi al rischio di esondazione dell'Arno postulano che gli argini mantengano pienamente la loro integrità e la loro funzionalità in qualsiasi condizione (AAVV, 2002). Le situazioni più critiche invece si verificano proprio quando le opere di difesa cedono e questa eventualità può verificarsi a seguito di diversi meccanismi come la trascinazione, lo sfiancamento, la corrosione o la presenza di fontanazzi (Marzolo, 1989).

Di conseguenza, una seria e realistica trattazione del rischio idraulico deve includere anche un'analisi di stabilità degli argini, che deve essere basata su una adeguata caratterizzazione geotecnica degli stessi e da un'efficace modellizzazione delle condizioni al contorno presupposte in base agli scenari di rischio attesi.

Il quadro conoscitivo acquisito con la realizzazione del Plantario ha permesso di effettuare una simulazione preliminare della stabilità degli argini in un sito pilota situato in sinistra idrografica dell'Arno in località Restone (Figline Valdarno).

Nel sito pilota è stata operata una caratterizzazione geotecnica dei terreni che costituiscono i rilievi arginali attraverso prove in situ di tipo Borehole Shear Test (Lutenegger et al., 1978; Lutenegger et al., 1981) e Amoozometer Test (Amoozegar, 1989; Amoozegar, 1992) e prove di laboratorio per determinare la

granulometria ed i limiti di Atterberg. Le prove in situ ed il campionamento per le analisi di laboratorio sono stati realizzati arrecando il minor disturbo possibile alla funzionalità della struttura, a profondità variabili dai 30 ai 70 cm, ubicandoli sia nella corona che nei fianchi dell'argine lungo un tratto arginale di poco più di 1km. Poiché le proprietà geotecniche hanno presentato una variabilità spaziale minima il materiale che costituisce il rilevato è stato considerato omogeneo. In Tabella 1 sono riportati tutti i valori delle proprietà geotecniche del tratto d'argine preso in esame e in Figura 7 vengono riportati i risultati delle prove granulometriche in base alle quali è stato classificato il materiale.

L'analisi di stabilità degli argini è stata eseguita in cinque sezioni utilizzando i programmi SLOPE/W e SEEP/W v.5.1 della Geo-Slope International.

La geometria degli argini è stata inserita nella modellizzazione con estrema precisione utilizzando i dati del rilevamento GPS presenti nel database, mentre le proprietà geotecniche sono state inserite in base alla caratterizzazione dell'argine e vengono presupposte spazialmente costanti. Nonostante tale assunzione rappresenti un'approssimazione, questa modalità operativa è supportata dalle misure di campagna e costituisce comunque una prima importante innovazione rispetto alla consuetudine di considerare gli argini infinitamente resistenti.

Attraverso il programma SEEP/W v.5.1 è stato possibile modellare l'evoluzione spaziale e temporale delle pressioni interstiziali nell'argine in funzione dei processi di filtrazione determinati da un evento di piena.

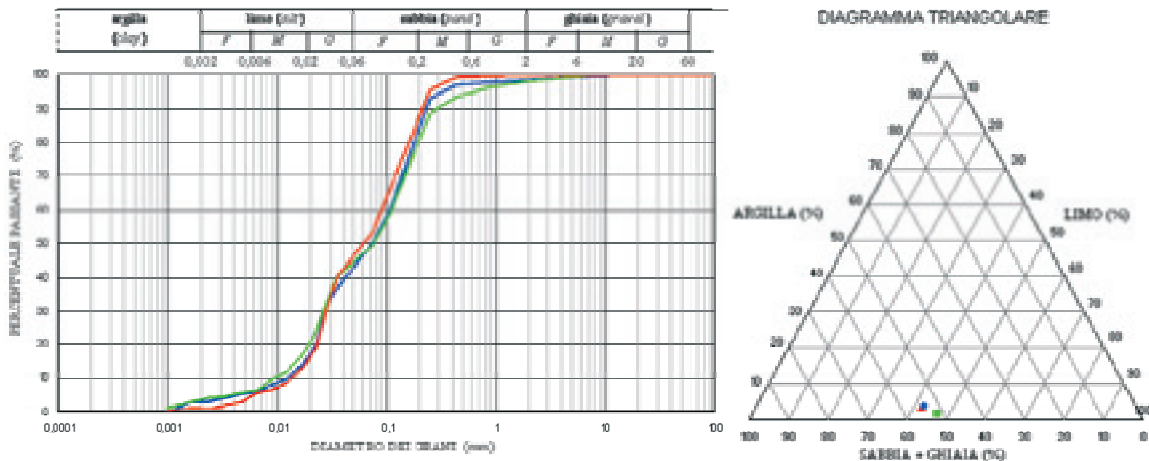


Figura 7: Risultati delle prove granulometriche effettuate su tre campioni prelevati in punti diversi dell'area pilota. Ogni campione è contraddistinto da un colore diverso. Il terreno che costituisce l'argine è stato classificato come "sabbia con limo" in base alla nomenclatura AGI (Associazione geotecnica Italiana) mentre in base alla classificazione USCS (Unified Soil Classification System) in un caso è risultato costituito da "argilla inorganica di bassa plasticità" e in due casi da "sabbia argillosa".

Figure 7: Results of the granulometric classification carried out on three samples taken from different locations at the Restone test site. Each sample is painted in a different color. The soil forming the dike has been classified as "sand with silt" according with AGI (Associazione Geotecnica Italiana) terminology, while according with USCS (Unified Soil Classification System) one sample has been classified as "low plasticity inorganic clay" and two samples as "clayey sand".

Tale programma richiede l'inserimento di alcune funzioni e, in particolare, l'inserimento della curva caratteristica del terreno (suzione di matrice in funzione del contenuto volumetrico d'acqua) e della curva *k* (conduttività idraulica in funzione della suzione). Questi dati, molto difficili da ottenere sperimentalmente, sono stati ricavati tramite le librerie presenti all'interno del programma. Il software tramite l'algoritmo di Arya e Paris (Arya & Paris, 1981) permette il calcolo della curva caratteristica partendo da quella granulometrica e dalla porosità del terreno (ricavate dalle analisi in laboratorio, cfr. Figura 7 e Tabella 1). Il calcolo della curva *k* si basa invece sull'algoritmo di Green e Corey (Green & Corey, 1971) tramite l'inserimento della curva caratteristica precedentemente calcolata e del valore di permeabilità satura *K<sub>s</sub>* (cfr. Tabella 1) ricavato da prove in situ mediante un permeometro compatto a carico costante (Amoozemeter Test). Una procedura analoga è stata eseguita per la sponda fluviale, supponendo fosse costituita da una sabbia limosa, granulometria che sembra essere la più frequente nelle sponde della zona analizzata (Dapporto, 2003).

Le condizioni al contorno sono state inserite nella modellizzazione ipotizzando una rapida risalita della falda in occasione di un importante evento di piena che raggiungesse il ciglio dell'argine.

In base alla forma degli idrogrammi di piena registrati in occasione dell'alluvione del 1966 (M.LL.PP., 1951-1973) è stato ipotizzato un evento di piena con durata complessiva di 50 ore in cui la portata al colmo viene raggiunta in 15 ore e con una curva di decrescita e di esaurimento che raggiunge gradualmente il livello di base in 35 ore. L'evento così articolato è stato suddiviso in 25 intervalli temporali (step) di due ore ciascuno.

La superficie freatica all'interno del terreno è stata costruita in maniera tale da essere in equilibrio con il livello del fiume prima dell'inizio dell'evento, mentre per quanto riguarda la pressione dell'acqua nei pori essa varia con la distanza al di sopra della tavola d'acqua con un

limite massimo imposto di -9,8kPa, corrispondente ad un carico di -1m (Dapporto, 2003).

È opportuno far presente che in questa analisi, essendo un'elaborazione preliminare e quindi in parte semplificata, non è stato tenuto in considerazione l'effetto delle precipitazioni collegate all'evento ipotizzato.

Dopo queste fasi preparatorie, il software SEEP ha permesso di simulare l'evoluzione temporale dell'evento di piena e di calcolare la distribuzione delle pressioni interstiziali nell'argine e nella sponda distintamente per ogni step temporale. I risultati sono stati importati nel programma SLOPE\W, che ha calcolato per ogni step temporale il fattore di sicurezza in maniera distribuita su tutta la sezione indagata.

I parametri di resistenza al taglio, ottenuti con le prove BST, sono stati applicati all'argine mentre per quanto riguarda la sponda fluviale sono stati ricavati dalla bibliografia (Dapporto, 2003). Questa scelta è giustificata anche dal fatto che lo scopo della presente applicazione è l'analisi di stabilità dell'argine ed i risultati in merito non sono influenzati dalla stabilità della sponda, che al massimo può essere influenzata da fenomeni di crollo o scivolamento in corrispondenza del ciglio di sponda che è situato ad almeno 20m di distanza dall'argine.

L'analisi di stabilità è stata attuata con il metodo dell'equilibrio limite di Morgenstern-Price che fornisce il valore del fattore di sicurezza per tutte le superfici di scivolamento ritenute teoricamente possibili (nel nostro caso circa 26.000 superfici) in base alle impostazioni geometriche di partenza. Per ogni timestep il programma visualizza la superficie di scivolamento contraddistinta dal FS minore.

Queste procedure sono state ripetute per ognuna delle cinque sezioni arginali prese in considerazione. Ricordiamo che in questa analisi gli argini sono stati considerati omogenei dal punto di vista geotecnico e quindi i risultati dipendono esclusivamente dalla loro geometria.

Tabella 1: parametri per la caratterizzazione geotecnica degli argini del sito pilota.  
*Table 1: parameters for the geotechnical characterization of the Restone test-site dikes.*

Peso di volume totale	Peso di volume del terreno secco	Peso di volume del terreno saturo	Conducibilità idraulica satura	Angolo di resistenza al taglio efficace	Coesione apparente
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	<i>k<sub>s</sub></i> (m/s)	$\phi'$ (°)	<i>c<sub>a</sub></i> (kPa)
13,2	12,3	17,53	$8,17 \cdot 10^{-6}$	38,9	0
Limite liquido	Limite plastico	Indice di plasticità	Indice di consistenza	Indice di liquidità	Indice di attività
<i>W<sub>L</sub></i> (%)	<i>W<sub>P</sub></i> (%)	<i>I<sub>P</sub></i> (-)	<i>I<sub>C</sub></i> (-)	<i>I<sub>L</sub></i> (-)	<i>A</i> (-)
23,7	14,3	10	2,1	-1,1	3,6
Coefficiente di uniformità	Indice di compressione	Contenuto d'acqua	Indice dei vuoti	Grado di saturazione	Porosità
<i>U</i> (-)	<i>C<sub>c</sub></i> (-)	<i>w</i> (%)	<i>e</i> (-)	<i>S</i> (%)	<i>n</i> (%)
9,2	0,6	6,75	1,13	16,2	52,9

In ognuna delle cinque sezioni il fattore di sicurezza rimane costante finché l'acqua dell'Arno non invade la zona golenale e lambisce il piede interno dell'argine. Da questo momento in poi il valore del fattore di sicurezza tende ad aumentare per effetto della pressione di confinamento esercitata dall'acqua sul petto dell'argine (Figura 8). In tutti i casi analizzati il valore di FS più alto viene raggiunto in corrispondenza della quota massima raggiunta dal livello dell'acqua, per poi diminuire durante la discesa di tale livello, rimanendo comunque ad un valore maggiore di uno (condizione di stabilità) per tre sezioni su cinque. Nelle restanti due sezioni il fattore di sicurezza assume valori negativi (condizione di instabilità) quando il livello dell'acqua è calato fino a raggiungere il piede dell'argine ed il valore minimo si riscontra in corrispondenza dello step temporale immediatamente successivo (Figura 8). In entrambi i casi, si tratta di argini costruiti con un'altezza notevole e superiore alla media in cui la rottura avviene al piede interno dell'argine per scivolamento rotazionale (Figura 9). Lo scivolamento simulato non ha dimensioni estese ma è comunque indice di una situazione preoccupante perché il programma non tiene in considerazione gli effetti destabilizzanti che un tale fenomeno potrebbe avere negli intervalli temporali successivi.

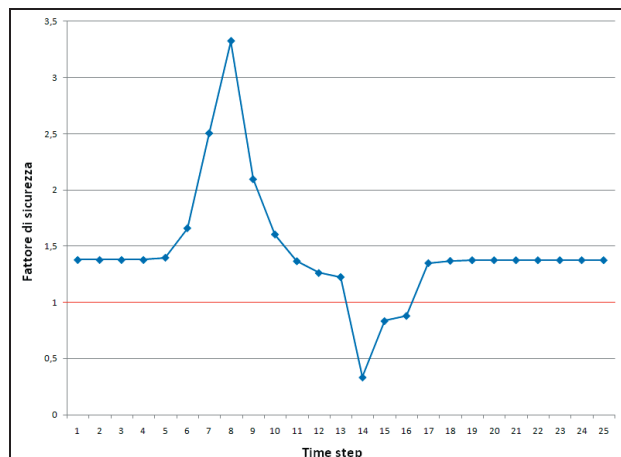


Figura 8: Evoluzione temporale del fattore di sicurezza. In ascissa sono riportati e numerati in maniera progressiva gli intervalli temporali (con ampiezza pari a due ore); in ordinata viene mostrato il valore di FS minore riscontrato all'interno dell'argine per ogni timestep.

*Figure 8: Temporal evolution of the factor of safety in the modeling scenario. In the x-axis the time steps are shown while in the y-axis it's possible to check the lowest value of FS calculated in the dike section for each time-step.*



Figura 9: Analisi di stabilità degli argini in località Restone. Visualizzazione della sezione arginale in cui nella modellizzazione si verifica la condizione più critica: il settore che nella simulazione si distacca per scivolamento rotazionale è colorato in rosso, la linea azzurra rappresenta la superficie freatica.

*Figure 9: Dikes stability analysis in the Restone test-site. Visualization of the dike section in which the modelization foresees the most critic condition: the sector interested by a rotational slide is painted in red, the light-blue line represents the water table.*

## Conclusioni

Si sono condotte indagini con metodi di elevata precisione e dettaglio lungo 106 km di estensione del fiume Arno localizzati nel territorio provinciale fiorentino. All'interno del rilievo sono stati catalogati elementi morfologici, sia naturali che artificiali, quali ciglio di sponda, argini, opere idrauliche, scarichi e manufatti che costituiscono nel loro insieme una banca dati che non ha precedenti per il territorio fiorentino.

Nel lavoro, oltre alle modalità di rilievo ed acquisizione dati, sono discusse le prime due applicazioni della banca dati creata. Per le pescaie è stato eseguito uno studio di dettaglio ai fini della loro riconversione per la produzione di energia idroelettrica, studio che ha

dimostrato la fattibilità del progetto e prenderà avvio nei prossimi anni.

La seconda applicazione ha riguardato invece lo studio di stabilità degli argini nell'area test di Restone (Figline Valdarno) tramite l'impiego coordinato di strumentazione in situ, prove di laboratorio e modellizzazione numerica. I risultati forniscono i dati per poter estendere l'analisi di stabilità all'intera serie di argini rilevati sulla base del materiale costituente e della loro geometria. Gli sviluppi futuri del progetto prevedono la realizzazione del rilievo di dettaglio dei maggiori affluenti, già in corso d'opera, e lo sviluppo di una piattaforma WebGIS per la gestione e l'utilizzo della banca dati del Plantario, che costituirà anche il contenitore dei prossimi aggiornamenti.



## Bibliografia

- AAVV, 2002. Progetto di piano stralcio per l'assetto idrogeologico. Autorità di Bacino del Fiume Arno. Firenze.
- AAVV, 2006. Progetto di realizzazione di un plantario delle aste fluviali – Studio relativo alle pescaie \ traverse del corso dell'Arno e degli edifici annessi per lo sfruttamento dell'acqua come forza motrice, nel tratto compreso tra i comuni di Figline Valdarno e Signa – Lastra a Signa. Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze, rapporto d'attività.
- AAVV, 2007. Approfondimento e completamento dello studio relativo alle pescaie \ traverse del corso dell'Arno e degli edifici annessi per lo sfruttamento dell'acqua come forza motrice nel tratto compreso tra i comuni di Figline Valdarno e Lastra a Signa. Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze, rapporto d'attività.
- Agnelli, A., Billi, P., Canuti, P., Rinaldi, M., 1998. Dinamica morfologica recente dell'alveo del fiume Arno. CNR-GNDCI 1739, Pacini Editore, Pisa.
- Amoozegar, A., 1989. Compact constant head permeameter for measuring saturated hydraulic conductivity of the vadose zone. *Soil Sci Soc Am J* 53:1356–1361
- Amoozegar, A., 1992. Compact constant head permeameter: a convenient device for measuring hydraulic conductivity. In: C.G. Topp, Editor, *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory Into Practice*, Special Publication vol. 30, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA (1992), pp. 31–42.
- APAT, 2004. Atlante delle opere di sistemazione fluviale. Manuali e linee guida. Dipartimento Difesa del Suolo, Roma.
- Arya, L.M., Paris, J.F., 1981. A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45, 1023-1030.
- Cherubini, G., 1977. La società toscana fra il XII ed il XV secolo: vie di comunicazione fluviali e marittime in Toscana fra il XII e il XV secolo, seminario di storia medievale. Università degli Studi di Firenze.
- Dapporto, S., 2003. Processi di erosione e meccanismi di instabilità di sponde fluviali: monitoraggio, modellazione e analisi. Tesi di dottorato, Università degli Studi di Firenze.
- Green, R.E., Corey, J.C., 1971. Calculation of hydraulic conductivity: A further evaluation of some predictive methods, *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 35, 3-8.
- Guerrini, S., 1990. L'Arno in Pian di Ripoli. Centro studi sulla cultura contadina, Bagno a Ripoli.
- Lutenegger, A.J., Hallberg, G.R., 1981. Borehole Shear Test in geotechnical investigation, *Special Technical Publ. ASTM*, 740, 566-578.
- Lutenegger, A.J., Remmes, B.D., Handy, R.L., 1978. Borehole shear test for stiff soils. *Journal of the Geotechnical Engr. Division, ASCE*, 104, 1403-1407.
- Marzolo, F., 1989. Costruzioni idrauliche. CEDAM, Padova.
- M.LL.PP. Ministero dei Lavori Pubblici, Servizio Idrografico Ufficio di Pisa, 1951-1973. *Annali Idrologici*, parte seconda. Istituto Poligrafico dello Stato, Roma.
- Natoni, E., 1944. Le piene dell'Arno e i provvedimenti di difesa. Felice Le Monnier Editore, Firenze.
- Piras, M., 2006. Monitoring of deformations in real time using GPS measurements: data analysis and calculus procedures. Tesi di dottorato, Politecnico di Milano.
- Scrinzi, G., Floris A., Picci M., 2000. GPS e inventari forestali: posizionamento e ritrovamento di precisione di punti di campionamento in bosco. Comunicazioni di ricerca dell'ISAF 99/1, Trento.
- Tranquilla, J.M., 1986. Multipath and imaging problems in GPS receivers antennas. *IV Int. Geodetic Symposium on Satellite Positioning*, vol. 1, 557-571.



## Relazioni temporali pluridecennali di dati pluviometrici, idrologici e piezometrici nella pianura lombarda tra Ticino e Oglio<sup>1</sup>

Tullia Bonomi, Paola Canepa, Francesca Del Rosso, Alessia Rossetti

Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Università degli studi di Milano – Bicocca  
tullia.bonomi@unimib.it, paola.canepa@unimib.it, francesca.delrosso@unimib.it, alessia.rossetti@gmail.com

*Pluridecennial temporal relationship between rainfall, hydrologic and piezometric data in the lombardy plain, between Ticino and Oglio*

**ABSTRACT:** During the last years, natural events related to hydrogeologic cycle have been increasing because it rains less frequently but more heavy. It's necessary to know the relationship between water balance input and output in order to manage water resources in sustainable way, using data measured by subsurface and surface water Monitoring Networks. This aim is being pursued by RICLIC (Regional Impact of Climatic Change in Lombardy Water Resources: Modelling and Applications), a scientific working projects in Lombardy that evaluates climatic impacts on water resources. For this reason rainfall data, hydrometric data, discharge data and piezometric data have been collected in Lombardy plain from Ticino to Oglio river, digitalized and organized (for the period 1951-2005). Their temporal trend and spatial distribution have been analyzed in order to underline their possible relationships both in time and in space, to understand when and how different hydrologic basins reply to climatic events.

**Key terms:** Climate change, Groundwater, Monitoring network, RICLIC-WARM, SPI index, Water balance

**Termini chiave:** Cambiamenti climatici, Acque sotterranee, Rete di monitoraggio, RICLIC-WARM, Indice SPI, Bilancio idrologico

### Riassunto

Nel corso degli ultimi anni si è osservata un'estremizzazione degli eventi naturali legati al ciclo idrologico dovuti a piogge meno frequenti, ma di intensità maggiore, distribuite in modo differente nell'anno. Al fine di una corretta e sostenibile gestione delle risorse idriche, è necessario conoscere le relazioni che intercorrono tra gli apporti meteorici, le acque sotterranee, le acque superficiali e le altre voci del bilancio all'interno di un sistema idrogeologico. E' fondamentale la ricostruzione di dati storici pluridecennali per comprendere la risposta storica del sistema superficiale e sotterraneo, capirne il comportamento e poterne quindi ipotizzare una evoluzione, sulla base di scenari di precipitazione probabili. Diventa quindi necessaria la continua raccolta, l'omogenizzazione e l'organizzazione dei dati provenienti da reti di monitoraggio meteo-climatico e da quelle delle acque superficiali e sotterranee, gestite perlopiù dalle ARPA regionali.

In Lombardia, all'interno del progetto RICLIC (Regional Impact of Climatic Change in Lombardy Water Resources: Modelling and Applications, Università Milano Bicocca, Università Milano, Università di Pavia, ARPA Lombardia, Fondazione Lombardia per l'Ambiente) si analizzano gli effetti delle variazioni climatiche sulle risorse idriche superficiali e sotterranee.

L'area interessata dalla studio riguarda la zona appartenente alla pianura della regione Lombardia, compresa tra il fiume Ticino e il fiume Oglio, suddivisa in due bacini idrogeologici (Ticino-Adda e Adda-Oglio).

Dal punto di vista geologico, la pianura lombarda è formata da depositi fluviali e fluvio-glaciali che formano una complessa alternanza di strati ghiaiosi, sabbioso-ghiaiosi, sabbiosi, siltosi e argillosi. In quest'ambito sono stati raccolti, in parte digitalizzati e strutturati i dati giornalieri di precipitazione, di livelli idrometrici, di portata e di freaticimetrie nell'area di pianura lombarda compresa tra Ticino ed Oglio e qui presentati, dal 1951 al 2005. Le serie storiche dei parametri considerati sono state confrontate tra loro per un'analisi spazio-temporale con lo scopo di individuare eventuali interrelazioni, per capire i tempi e le entità delle risposte, nei diversi bacini idrogeologici. Per i dati meteo-climatici sono stati organizzati i dati giornalieri di 88 stazioni, per i dati idrologici 20 stazioni di misura e 10 per le freaticimetrie, sempre con dati giornalieri dal 1951 al 2005.

<sup>1</sup> Ricerca effettuata nell'ambito del Progetto RICLIC (Regional Impact of Climatic Change in Lombardy Water Resources: Modelling and Applications), finanziato da Università degli Studi di Milano-Bicocca, Fondazione Lombardia Ambiente e Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Lombardia.



Una prima analisi dei trend pluviometrici ha messo in luce che si individuano due periodi con precipitazioni superiori alla media dal 1959 alla fine del 1961 e dal 1975 al 1979. Si individuano alcuni picchi negativi particolarmente pronunciati, come quelli avvenuti tra il 1970-1971 e quello del 1983. Per le acque superficiali ogni evento positivo si riflette rapidamente sul deflusso diretto, mentre su un trend pluriennale si registra, per le stazioni in cui sono disponibili i dati di portata, una lieve diminuzione variabile da 10 a 20 m<sup>3</sup>/s all'anno.

Infine le acque sotterranee necessitano di tempi sufficientemente lunghi per rispondere al sistema e la superficie piezometrica ne è la risposta. Quando la situazione positiva o negativa, si ripete per più anni, allora anche il sistema sotterraneo ne risente positivamente o negativamente. Tale corrispondenza presenta uno sfasamento temporale di circa un anno. Per ora non si riscontrano significative variazioni negative della risorsa idrica sotterranea.

## Introduzione

Il presente lavoro si pone come obiettivo l'analisi preliminare dell'evoluzione temporale del sistema idrogeologico di pianura compreso tra i fiumi Ticino ed Oglio e delle relazioni intercorrenti tra acque sotterranee e superficiali. Lo studio è focalizzato sull'osservazione ed il confronto di lunghe serie storiche giornaliere (dal 1951 al 2005) di dati pluviometrici, idrometrici, di portata e freaticometrici ricavate, principalmente, dai dati delle stazioni del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale le cui competenze sono passate, dal 2003, alle ARPA regionali. Tali dati forniscono un'immagine nel tempo della distribuzione della risorsa idrica e permettono l'analisi delle relazioni intercorrenti tra i diversi parametri, necessarie per capire i tempi e le entità delle risposte del sistema idrologico e idrogeologico. L'intervallo temporale prescelto per lo studio (1951-2005) deriva dalle indicazioni della World Meteorological Organization (WMO), che afferma che per definire la climatologia di un'area è necessario disporre di almeno 30 anni di dati. La scelta di un intervallo più ampio è stata dettata dalla necessità di mettere in risalto periodi di scarsità od eccesso di precipitazioni, rispetto alla media, e come questi hanno influito sulle risorse idriche sotterranee e sulle acque superficiali.

Le analisi e i dati qui presentati fanno parte di un più ampio progetto di ricerca dal titolo "*Regional Impact of Climatic Change in Lombardy Water Resources: Modelling and applications*" (RICLIC-WARM) in cui collaborano Enti di ricerca (Università di Milano-Bicocca, Università di Milano e Università di Pavia) ed Enti gestori (ARPA Lombardia) ([www.riclic.unimib.it](http://www.riclic.unimib.it)). Tale progetto si pone come obiettivo l'analisi degli effetti sinergici dei processi naturali ed antropici legati al cambiamento climatico, sulle risorse idriche della Lombardia, per

fornire una metodologia per l'individuazione e la gestione delle criticità ambientali ad esse connesse.

## Caratteristiche dell'area di studio

### Inquadramento geografico

La Lombardia si estende su di una superficie di 23.861 Km<sup>2</sup> e ha un paesaggio fortemente differenziato in territorio montano (42%) collinare (13%) e di pianura (45%). Ha una popolazione di 9.562.034 abitanti, con densità di 400,7 ab./Km<sup>2</sup>.

E' una delle regioni d'Italia più ricche d'acqua (Figura 1): appartengono al suo territorio, almeno in parte, circa 68 laghi, di cui 4 sono i più grandi della penisola, Maggiore, Como, Iseo, Garda; i fiumi più importanti, oltre al Po (1500 m<sup>3</sup>/s di portata media), sono quelli che affluiscono e defluiscono dai grandi laghi, rispettivamente Ticino (con una portata media di circa 350 m<sup>3</sup>/s), Adda (con una portata media di circa 180 m<sup>3</sup>/s), Oglio (con una portata media di circa 130 m<sup>3</sup>/s) e Mincio (con una portata media di circa 60 m<sup>3</sup>/s), che sono caratterizzati da un regime stabile dei deflussi (Autorità di Bacino del fiume Po). Altri corsi d'acqua, quali i fiumi Olona, Lambro, Brembo, Serio, Mella e Chero, hanno regime unicamente torrentizio.

L'area interessata dalla studio riguarda la zona appartenente alla pianura della regione Lombardia, compresa tra il fiume Ticino e il fiume Oglio, suddivisa in due bacini idrogeologici (Ticino-Adda e Adda-Oglio) e coinvolge l'intero territorio delle province di Milano, Lodi, Cremona, parte di quello di Pavia fino al fiume Ticino, Varese, Como e Lecco, al limite con le Prealpi (Figura 1).

Un altro importante elemento idrografico della pianura sono gli affioramenti naturali d'acqua, definiti risorgive o fontanili, che suddividono la pianura in alta e bassa: il cambiamento di permeabilità tra una zona con depositi grossolani ed una a granulometria fine provoca la risalita in superficie delle acque sotterranee; i fontanili hanno un andamento parallelo a quello prealpino e sono utilizzati principalmente per l'irrigazione (Figura 1). Il reticolo idrico è completato dalla presenza della fitta rete di canali artificiali, costruiti per scopi irrigui o di bonifica. Nella prima categoria, nell'area di studio, tra i più importanti ci sono il canale Villaresi, che scorre dal Ticino all'Adda per 86 km e la Muzza, che prende acqua dall'Adda e ad esso la restituisce, scorrendo parallelamente al fiume (Figura 1).

### Inquadramento idrogeologico

Dal punto di vista geologico, la pianura lombarda è formata da depositi fluviali e fluvio-glaciali che formano una complessa alternanza di strati ghiaiosi, sabbioso-ghiaiosi, sabbiosi, siltosi e argillosi. Tali depositi che si sono formati durante il quaternario, hanno elevato spessore e sono sede di un acquifero di rilevante interesse sia per continuità areale che per volume.

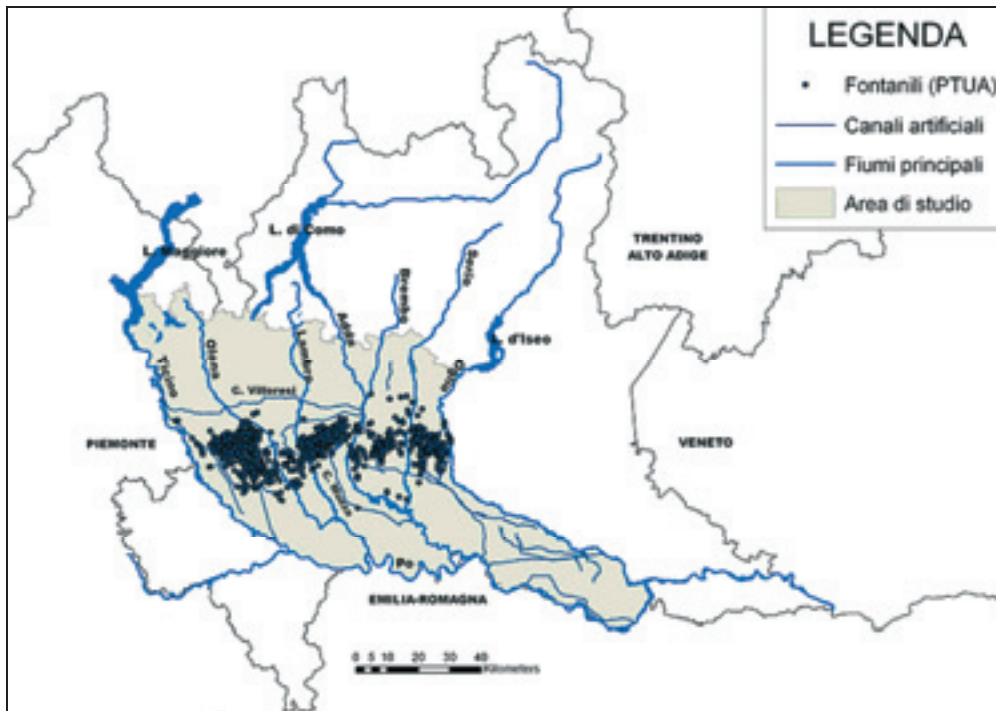


Figura 1 - Inquadramento geografico dell'area di studio.

Figure 1 – Study area

Da un punto di vista strutturale ed a scala regionale, l'acquifero padano costituisce un sistema "monostrato".

In maggior dettaglio, ai piedi della catena alpina, le ghiaie e le sabbie formano uno strato indifferenziato, spesso senza coperture a bassa permeabilità e con falda libera, mentre spostandosi verso valle esso si divide in più strati ("monostrato compartimentato") tra loro separati da livelli limo-argillosi a bassa pressione in cui si riscontrano falde confinate (Cavallin, Francani e Mozzarella, 1983, Denti, Francani, Fumagalli, Pezzerà e Sala, 1988, Regione Lombardia, Eni Divisione Agip, 2002).

L'acquifero viene ricaricato dalle precipitazioni, dalle acque irrigue, da quelle dei corsi d'acqua e da quelle delle falde più a monte, in maniera differenziata nei diversi settori. In base alla distribuzione dei depositi a ridotta permeabilità, si può affermare che l'alimentazione diretta della falda avviene, soprattutto, nell'alta pianura dove le infiltrazioni delle acque meteoriche possono raggiungere anche il 25-30% del totale annuo. Nelle aree a carattere irriguo, una aliquota fondamentale della ricarica della falda è costituita dalla dispersione dalla rete dei canali irrigui. Nella parte centrale della pianura le falde in pressione sono in parte rialimentate per fenomeni di drenanza attraverso acquitardi semipermeabili (Regione Lombardia, 2006).

Nell'ambito del progetto sono stati già archiviati e codificati oltre 20.000 pozzi per acqua, sia per l'approvvigionamento idrico a scopo potabile che per processi industriali, tramite i quali si prevede di effettuare una ricostruzione dettagliata tridimensionale delle

caratteristiche tessiturali e idrogeologiche del sistema in esame.

### Reti di monitoraggio e serie storiche di dati nella pianura lombarda

La base dati presentata in questo articolo è costituita, principalmente, da serie storiche di dati meteo-climatici, idrometrici, di portata e freaticometrici assemblate a partire dalle misure degli strumenti manuali o meccanici del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN), ora gestiti dalle ARPA regionali ed, in particolare, in Lombardia dall'U.O. Idrografia (Ing. Roberto Serra, Ing. Chiara Manenti e Ing. Angela Sulis).

L'intervallo temporale che si è scelto di analizzare va dal 1951 al 2005; in base ad esso, sono state selezionate, tra tutte le stazioni SIMN, solo quelle di cui era possibile ottenere serie complete (o quasi) di dati a frequenza giornaliera.

Individuate le stazioni di interesse, sono state raccolte, per ciascuna di esse, alcune informazioni di base che costituiscono una sintetica, ma essenziale caratterizzazione anagrafica, contenente le coordinate geografiche, il nome della stazione e del luogo in cui è ubicata, la quota in m sul livello del mare, la tipologia di strumenti installati e, per le stazioni idrometriche e freaticometriche, rispettivamente, lo zero idrometrico e la quota del caposaldo di riferimento in m s.l.m.

E' stato, quindi, svolto un lungo e complesso lavoro di raccolta, digitalizzazione delle misure ancora in formato

cartaceo ed integrazione dei dati. Presso l'U.O. Idrografia di ARPA Lombardia, parte di tali dati erano archiviati, in formato digitale, nel database Wingadi, che viene utilizzato per la preparazione e pubblicazione degli annali idrologici, o nel database del Programma di Tutela e Uso delle Acque della Lombardia. I dati non informatizzati sono stati ricavati, innanzi tutto, dagli annali pubblicati e, in secondo luogo, dalla digitalizzazione delle schede e dai diagrammi di rilevazione originali.

### **I dati meteo-climatici**

La raccolta di dati termo-nivo-pluviometrici all'interno del Bacino dell'Adda è una delle attività fondamentali svolte nell'ambito del progetto Riclic-Warm, finalizzata all'integrazione, al controllo ed alla validazione delle serie climatiche, prevalentemente di precipitazione e di temperatura, disponibili nell'area del Bacino Idrografico dell'Adda, con eventuale ricostruzione delle serie strumentali incomplete.

Sono stati integrati dati provenienti da varie fonti: ARPA Lombardia, ERSAF, Dipartimento di Produzione vegetale dell'Università degli Studi di Milano, Ufficio Centrale di Ecologia Agraria, Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio dell'Università di Milano

Bicocca, la rete dell'Aeronautica Militare ed infine Programma di Tutela e Uso delle Acque (PTUA) della Regione Lombardia. Sono inoltre stati convertiti in formato digitale dati presenti solo su Annali Idrologici e Schede di Registrazione originali. Si sono così ottenute delle serie meteo-climatiche sia di temperature che di precipitazioni formate dall'integrazione di dati provenienti da più fonti ma riguardanti le medesime stazioni.

Di seguito è riportato l'andamento giornaliero delle precipitazioni per l'intero intervallo temporale disponibile per la stazione di Chiari (Figura 2). Come è possibile osservare, nonostante l'integrazione, alcuni anni rimangono tuttora privi di dati.

Questa integrazione di dati, che ha richiesto due anni d'impegno, ha portato all'individuazione di 88 serie storiche di dati meteo-climatici, provenienti da stazioni meccaniche e manuali che coprono circa un cinquantennio (1951-2005) ed un'area più estesa del solo bacino idrografico dell'Adda, occupando buona parte della regione Lombardia; rimane esclusa l'area della provincia di Mantova coperta però da stazioni meteorologiche automatiche.

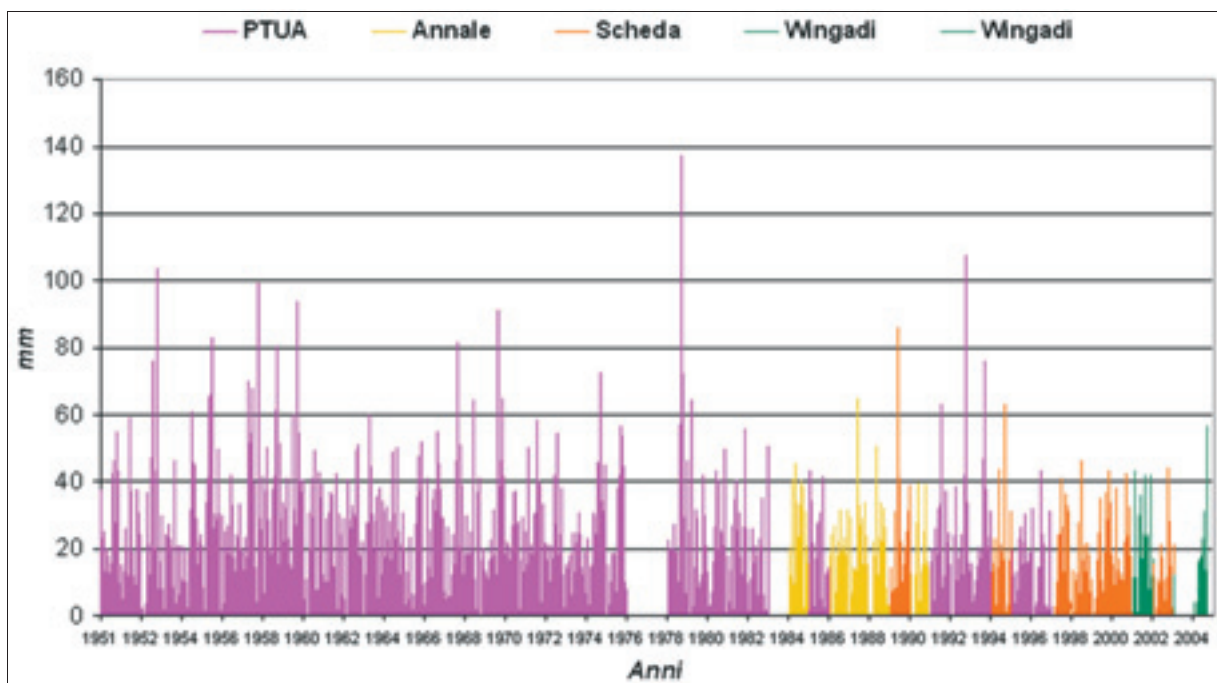


Figura 2 - Andamento giornaliero (i dati sono aggregati giornalmente, come previsto dal SIMN, dalle ore 9 a.m. alle ore 9 a.m. del giorno seguente), delle precipitazioni per la stazione di Chiari (BS) dal 1951 al 2005. I differenti colori rappresentano fonti differenti di dati riguardanti la stessa stazione. In rosa i dati presenti nella banca dati del PTUA, in arancione i dati digitalizzati da Schede di registrazione, in giallo i dati digitalizzati da Annali Idrologici ed in verde i dati provenienti dal software Wingadi utilizzato da Arpa Lombardia per redigere gli Annali Idrologici.

Figure 2 – Temporal trend of daily rainfall in the weather station of Chiari (BS) (cumulated daily rainfall from 9 a.m. to 9 a.m. of the following day, according to SIMN rules) Different colours represent different data sources, in the same weather station. Data stored in the PTUA database are pink, data digitalized from registration cards are orange, data digitalized from Hydrologic Annali are yellow and data extracted from Wingadi (a software used by Arpa Lombardia to write up Hydrologic Annali) are green.



I dati raccolti confermano bene le generali considerazioni sulle caratteristiche climatiche lombarde: si parla infatti di *mesoclina padano* caratterizzato da una precipitazione media annua che cresce da sud-est verso nord-ovest, con un minimo nel basso mantovano (meno di 700 mm/anno) ed un massimo nella zona dei laghi prealpini (oltre 2000 mm/anno) (Mariani,1998).

All'interno di tale mesoclina si possono individuare due mesoclimi intermedi differenti tra loro: mesoclina insubrico e mesoclina urbano.

Il *mesoclina insubrico* è tipico della zona dei laghi prealpini e si distingue dal mesoclina padano sia dal punto di vista pluviometrico che termometrico, presentando un'escursione termica media annua inferiore. Le precipitazioni hanno un comportamento differenziato: sul lago di Garda presentano un massimo principale in autunno, ed uno secondario in primavera-estate; sul lago Maggiore, di Como ed Iseo, presentano invece due massimi indifferenziati uno estivo ed uno autunnale.

Il *mesoclina urbano* è il clima delle aree urbane, che in una regione fortemente urbanizzata ed antropizzata come la Lombardia riveste un ruolo sempre più rilevante. E' caratterizzato da temperature sensibilmente superiori a

quelle delle aree rurali circostanti per la presenza di un fenomeno noto come *isola di calore*, mentre non sono visibili variazioni nella distribuzione delle precipitazioni medie mensili che ricalca l'andamento delle precipitazioni del mesoclina padano come è possibile osservare dall'istogramma della stazione di Milano Brera (Figura 3), con due picchi, uno principale autunnale (ottobre-novembre) ed uno secondario primaverile (maggio-giugno), e due minimi, uno estivo ed uno invernale.

**I livelli idrometrici e le portate**

Per quanto riguarda i livelli idrometrici, sono state considerate 20 stazioni di misura (Figura 4) ubicate sui principali corsi d'acqua della regione che ricadono nell'area di studio (Ticino, Adda, Oglio, Po, Lambro, Serio e Brembo). I dati hanno cadenza giornaliera e provengono da strumenti di misura manuali (aste graduate su cui l'operatore legge il livello una volta al giorno, generalmente alle ore 12) o meccanici (idrometri registratori che producono un grafico continuo sul quale si è letto il valore di livello alle ore 12 di ogni giorno).

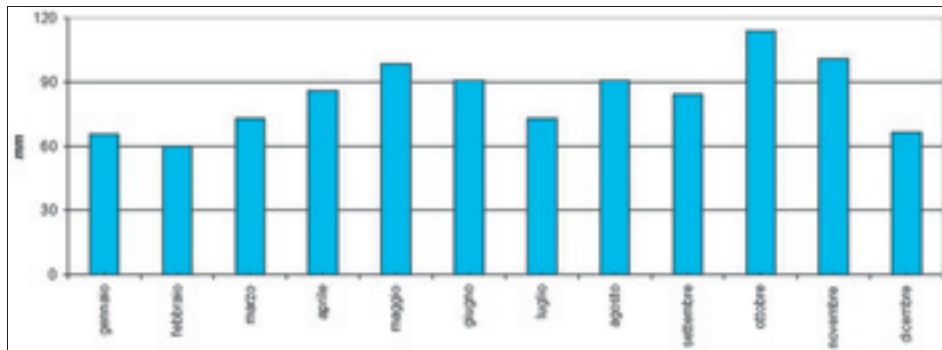


Figura 3 - Andamento delle precipitazioni medie mensili per il periodo 1961-1990 per la stazione di Milano Brera.   
 Figure 3 – Monthly average rainfall from 1961-1990 in the weather station of Milano Brera.



Figura 4 – Ubicazione delle stazioni idrometriche e di portata dell'ex-Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale considerate nel presente lavoro (20) e più in generale nel progetto RICLIC (24) in relazione ai bacini idrografici dei principali fiumi dell'area di studio, che ricade nel bacino idrografico del Po.

Figure 4 – The picture shows the location of water gages and discharge stations of the ex-Servizio Idrografico and Mareografico Nazionale, that have been used in the present work (20) and in the RICLIC scientific project (24). They are located in drainage basins of main rivers of the study area, that is in the Po drainage basin.

Nonostante il lavoro di integrazione svolto, raggruppando i dati da Wingadi, dal PTUA, dagli Annali Idrologici, dalle schede e diagrammi di rilevazione, alcuni dati risultano comunque mancanti per problemi di malfunzionamento degli strumenti di misura e per lo smantellamento, negli anni novanta, di alcune stazioni.

Per colmare, almeno in parte, le lacune presenti negli ultimi anni si è provato ad abbinare ai dati manuali/meccanici il dato proveniente da stazioni automatiche. In Figura 5 è riportata, come esempio, la serie storica di Casalmaggiore sul fiume Po; i colori indicano la tipologia di dato utilizzato.

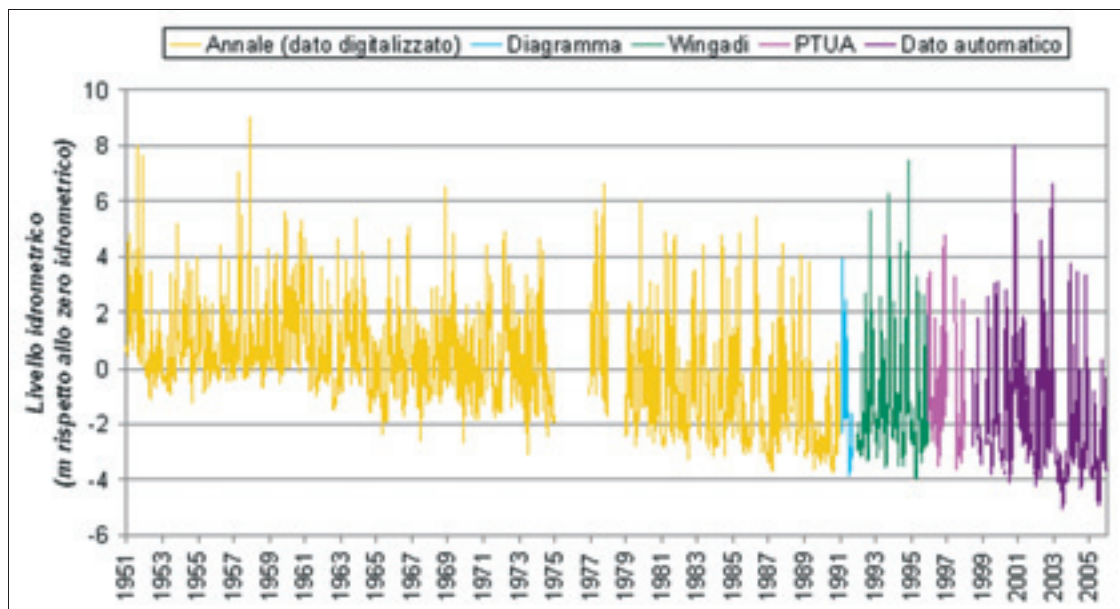


Figura 5 - Serie storica del livello idrometrico a Casalmaggiore sul PO, con frequenza giornaliera, per l'intervallo temporale 1951-2005. I colori mettono in evidenza il formato di dato utilizzato per ricostruire la serie storica. L'altezza dello zero idrometrico in m s.l.m. è 23,49 per la stazione manuale/meccanica mentre non è nota per la stazione automatica.

Figure 5 – Temporal trend of daily hydrometric level at Casalmaggiore sul Po from 1951 to 2005. Colours show different data sources, used to rebuild the dataset. The base gage of the manual and mechanic station is 23,49 m a.s.l., it is not known the one of the automatic station.

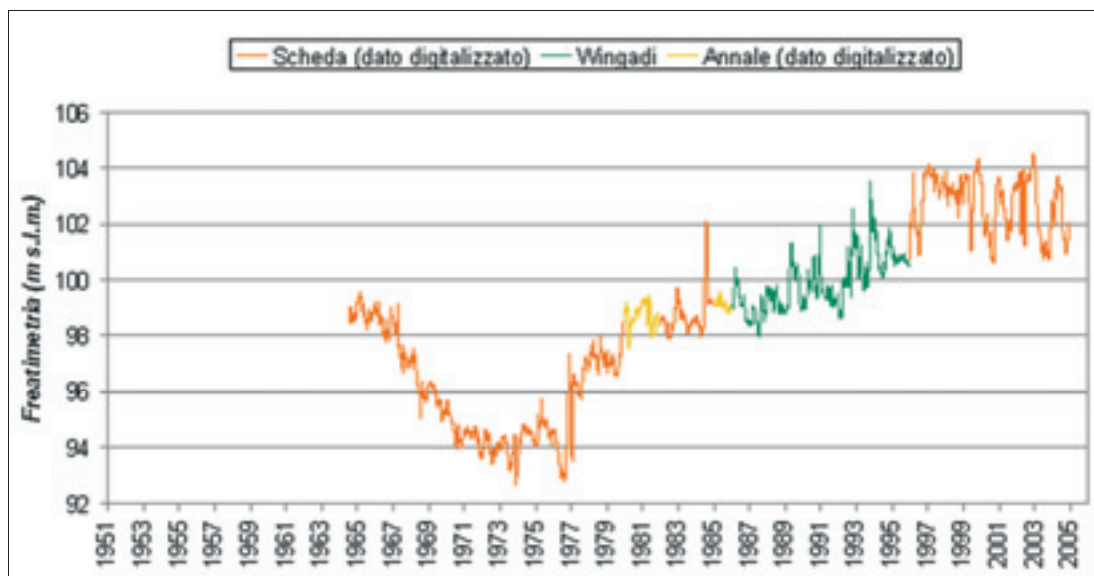


Figura 6 – Serie storica dell'altezza freaticometrica nella stazione di “Milano – Via Morsenchio”, misurata ogni 3-4 giorni, per l'intervallo temporale 1951-2005. I colori mettono in evidenza il formato di dato utilizzato per ricostruire la serie storica.

Figure 6 – Temporal trend of water table level in the piezometric station of Milano – Via Morsenchio, measured every 3-4 days, from 1951 to 2005. Colours show different data sources, used to rebuild the dataset.

Per monitorare l'andamento dei deflussi superficiali, è però fondamentale considerare anche i dati di portata, in quanto è ben noto che l'evoluzione del livello può essere legata a differenti cause, non semplicemente ad una diminuzione di risorsa in alveo (Natale e Savi, 1990). All'interno del Progetto RICLIC, sono in fase di acquisizione, già in formato digitale o digitalizzati, i dati di portata pubblicati sugli Annali Idrologici di 10 stazioni di misura.

**Le freatimetrie e piezometrie**

Le stazioni freatimetriche, cioè i pozzi in cui si misurava il livello della falda freatica superficiale, (installate sempre dal SIMN) sono, in Lombardia, storicamente una cinquantina. L'altezza freatimetrica veniva misurata ogni 3-4 giorni, ma negli anni molte stazioni sono state abbandonate e purtroppo sono pochissime quelle tuttora in misurazione, mentre la maggior parte si ferma prima del 1998. Come per i livelli idrometrici, anche per le freatimetrie è stato svolto un lavoro di integrazione dei dati, relativamente alle stazioni con le serie più lunghe, raggruppando i pochi dati in formato digitale estratti da Wingadi con quelli digitalizzati da annali e schede. In Figura 6 è riportato, come esempio, l'andamento dell'altezza della falda nella Stazione di Milano in Via Morsenchio. Anche in questo caso, i colori evidenziano la tipologia di dato utilizzato.

La distribuzione e la densità delle stazioni freatimetriche permettono un'analisi dell'evoluzione temporale della falda a scala regionale. Per avere informazioni a dettaglio più locale e relativi ad anni più recenti ci si deve basare sui dati di Reti di Monitoraggio a

scala provinciale, la più sviluppata delle quali, in Lombardia, è la Rete del CAP (Consorzio per l'Acqua Potabile) di Milano; è attiva dal 1979 e ha effettuato una misura della falda ogni mese fino al 2002 su oltre 150 pozzi, variandone nel tempo il numero. Dopo tale data, le misurazioni sono state ridotte a 3-4 all'anno, rendendo vana ogni possibile analisi quantitativa sia dei trend stagionali che pluriannuali. In Figura 7 è riportato un esempio significativo della variabilità temporale dei pozzi monitorati (8 pozzi dal 1975) in un comune dell'hinterland milanese (codice ISTAT 152). Si nota bene come la frammentarietà delle misure recenti non consenta alcun tipo di analisi.

**Precipitazioni**

A partire dalle lunghe serie storiche di dati di precipitazione è stato possibile analizzare le variazioni delle precipitazioni rispetto alla media di riferimento calcolata sul trentennio 1961-1990, imposta dal WMO (World Meteorological Organization), al fine di evidenziare anomalie nelle precipitazioni cumulate annue. Nelle Figure 8, 9, 10, 11 e 12 sono riportate come esempi, la differenza delle precipitazioni cumulate rispetto alle precipitazioni media del periodo 1961-1990 rispettivamente nella stazione di Olginate (CO) con una precipitazione media di 1300,2 mm, Milano Brera con una media di riferimento di 978,1 mm, Monza (MI) con una media di 1118 mm, Cremona, con una media pari a 802,7 mm e Lodi con una media di 801,3 mm.

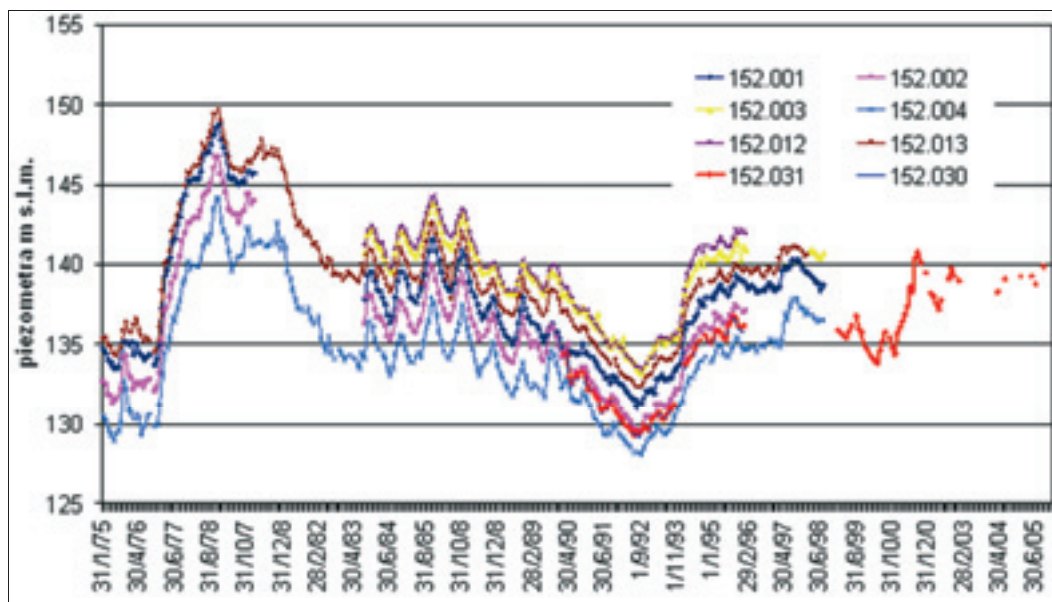


Figura 7 – Confronto tra l'andamento mensile della piezometria a Muggiò e della pluviometria a Monza. I dati piezometrici provengono dal CAP di Milano, la cui rete è entrata in funzione a partire dal 1975.

Figure 7 – Comparison between the temporal trend of monthly water table at Muggiò and the temporal trend of monthly rainfall at Monza. Piezometric data come from CAP of Milano, its network have worked from 1975.



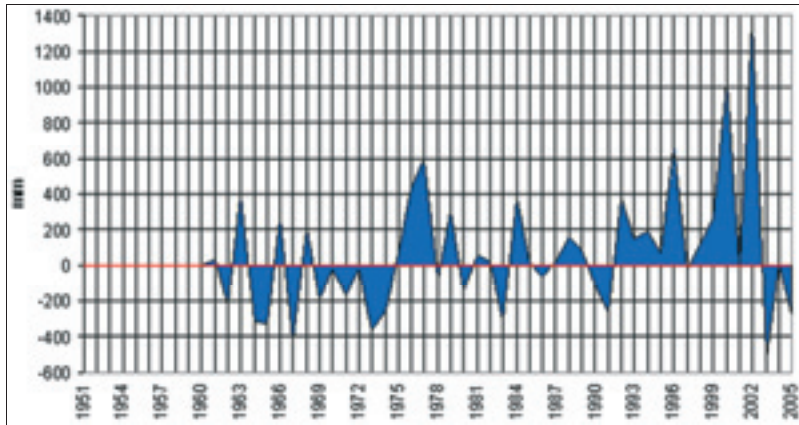


Figura 8 - Differenza delle precipitazioni cumulate annue rispetto alla media calcolata sul trentennio di riferimento 1961 - 1990 nella stazione di Olginate (CO).  
*Figure 8 - Difference between yearly cumulated rainfall and the average rainfall from 1961-1990 at Olginate (CO).*

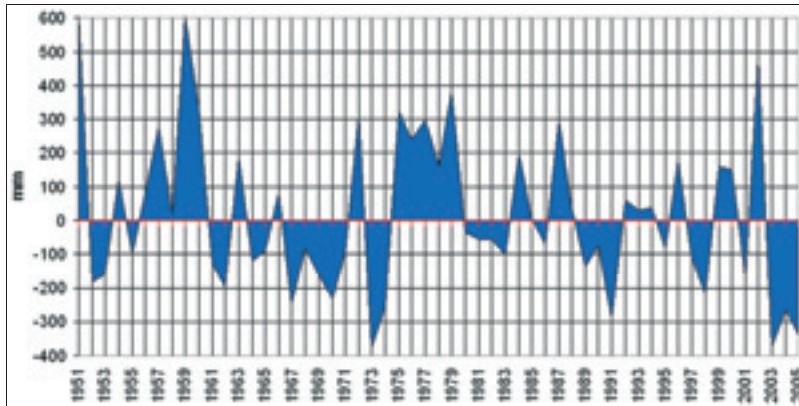


Figura 9 - Differenza delle precipitazioni cumulate annue rispetto alla media calcolata sul trentennio di riferimento 1961-1990, nella stazione di Milano Brera (MI).  
*Figure 9 - Difference between yearly cumulated rainfall and the average rainfall from 1961-1990 at Milano Brera (MI).*

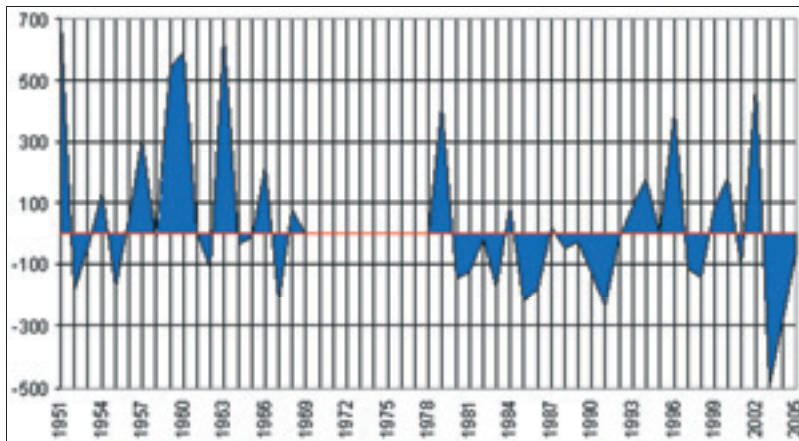


Figura 10 - Differenza delle precipitazioni cumulate annue rispetto alla media calcolata sul trentennio di riferimento 1961-1990, nella stazione di Monza.  
*Figure 10 - Difference between yearly cumulated rainfall and the average rainfall from 1961-1990 at Monza (MI).*

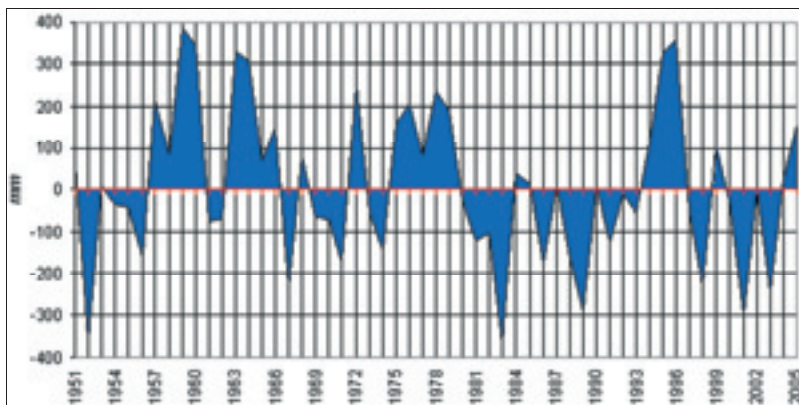


Figura 11 - Differenza delle precipitazioni cumulate annue rispetto alla media calcolata sul trentennio di riferimento 1961-1990, nella stazione di Cremona.  
*Figure 11 - Difference between yearly cumulated rainfall and the average rainfall from 1961-1990 at Cremona (CR).*

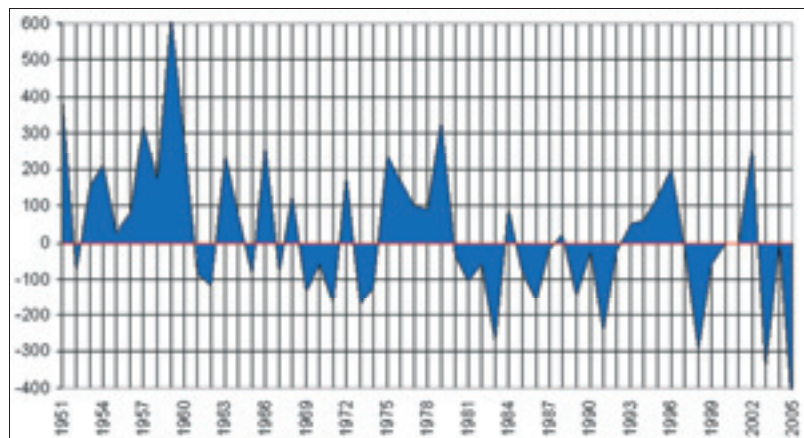


Figura 12 - Differenza delle precipitazioni cumulate annue rispetto alla media calcolata sul trentennio di riferimento 1961-1990, nella stazione di Lodi.

Figure 12 - Difference between yearly cumulated rainfall and the average rainfall from 1961-1990 at Lodi (LO).

Osservando tutte le stazioni utilizzate per lo studio è possibile individuare in linea di massima alcuni andamenti comuni alle diverse stazioni, come: anomalia positiva dal 1959 al 1960, ampio periodo di anomalia positiva dal 1975 al 1979 già evidenziato (Bonomi e Cavallin, 1996), anomalia negativa nel 1983, periodo di anomalia negativa dal 1989 al 1991 (in alcune 1993), anomalia positiva nel 2002 e anomalia negativa dell'anno 2003 e, in minor misura, del 2005 (tranne a Cremona).

**Standardized Precipitation Index (SPI)**

Si è successivamente provato ad applicare l'Indice di Precipitazione Standardizzato (SPI), sviluppato da McKee et al. (1993), per discriminare gli eventi umidi o secchi in rapporto alla loro durata nel tempo e, quindi, al loro impatto sulle diverse risorse idriche. L'SPI rappresenta il numero di deviazioni standard rispetto alle condizioni normali, la classificazione adottata da McKee va intesa in termini probabilistici interpretando i segnali come frequenze di eventi che cadono in ciascuna classe, così valori di SPI inferiori a -1.0 accadranno 16 volte in 100 anni, valori di SPI inferiori a -2.0 avverranno da due a tre volte in 100 anni e valori di SPI inferiori a -3.0 si verificheranno 1 volta ogni 200 anni (Hayes, Svoboda, Wilhite e Vanyarkho, 1999).

Tale indice viene utilizzato per monitorare deficit di precipitazione su scale temporali diverse (3, 6, 12, 24 mesi) misurando un'anomalia di precipitazione. Poiché su scale temporali minori all'anno la precipitazione non è normalmente distribuita, i valori sono descritti con una probabilità di distribuzione che viene poi trasformata in una distribuzione normale, tale che l'SPI medio sia pari a zero e la varianza unitaria (McKee, Doesken e Kleist, 1993), così valori positivi (tra 0 e 3) indicano piogge superiori al dato normalmente atteso sulla scala di tempo utilizzata e valori negativi (tra 0 e -3) deficit di precipitazioni.

Ulteriori dettagli sulla matematica impiegata nella realizzazione dell'indice di precipitazione standardizzata possono essere trovate nella tesi di master di Dan Edwards disponibile sul sito web del Colorado Climatic

Center (<http://climate.atmos.colostate.edu/standardizedprecipitation.on.shtml>).

Il programma per il calcolo dell'SPI è stato scaricato dal sito internet del National Drought Mitigation Center (<http://www.wamis.org/index.php>, Tools & Resources).

Essendo un indice standardizzato, l'SPI ha il pregio di poter confrontare stazioni collocate in aree climaticamente differenti, consente di utilizzare esclusivamente la precipitazione come variabile necessaria per il calcolo e può essere calcolato a differenti scale temporali; questo permette di osservare i differenti impatti del deficit di precipitazione sulle riserve idriche. Il principale svantaggio consiste nel fatto che per essere rappresentativo l'SPI necessita di serie storiche lunghe (possibilmente un trentennio) di dati pluviometrici mensili ed essenzialmente prive di dati mancanti e per questo difficilmente reperibili.

In questo lavoro si è utilizzata come scala di classificazione quella in uso presso l'Agenzia Regionale Protezione Ambiente dell'Emilia-Romagna di seguito riportata (Tab. 1).

Tabella 1 – Classificazione dei valori di SPI utilizzata dall'ARPA Emilia-Romagna per discriminare i periodi umidi o secchi al di fuori della media.

Table 1 – SPI values, used by ARPA Emilia-Romagna to identify anomalous wet or dry periods.

SPI	Classe
>2	Estremamente umido
Da 1,5 a 1,99	Molto umido
Da 1,0 a 1,49	Moderatamente umido
Da - 0,99 a 0,99	Nella norma
Da - 1,0 a - 1,49	Moderatamente secco
Da -1,5 a - 1,99	Molto secco
<-2	Estremamente secco

Al fine di poter caratterizzare significativamente l'area di studio sono state utilizzate numerose stazioni meteorologiche posizionate nella pianura Padana (Figura 15). Nonostante si siano selezionate le stazioni con serie pluviometriche più complete possibili, le stazioni non

sempre presentano una continuità di dati mensili. Pertanto i mesi mancanti sono stati colmati con i valori ricostruiti attraverso una regressione multipla lineare: stazioni che presentano la miglior correlazione appartenenti allo stesso gruppo geo-climatico della stazione d'interesse (almeno tre stazioni) sono state accostate, successivamente è stata calcolata la regressione lineare multivariata tra coppie di valori così da ricostruire il terzo valore. Le stazioni che hanno subito il maggior numero di ricostruzioni presentano circa il 3% di mesi ricostruiti. Dove a mancare

era l'intero anno non è stato ricostruito.

Per le stazioni considerate, è stato calcolato l'SPI a 12 (Figura 14) e a 24 mesi, ovvero a scale temporali lunghe, per poter evidenziare solo gli eventi umidi o secchi così prolungati nel tempo da poter influire anche sulle risorse idriche sotterranee, la cui risposta alle sollecitazioni esterne è generalmente più tardiva; come esempio è riportato il grafico relativo alla stazione di Cremona (Figura 13).

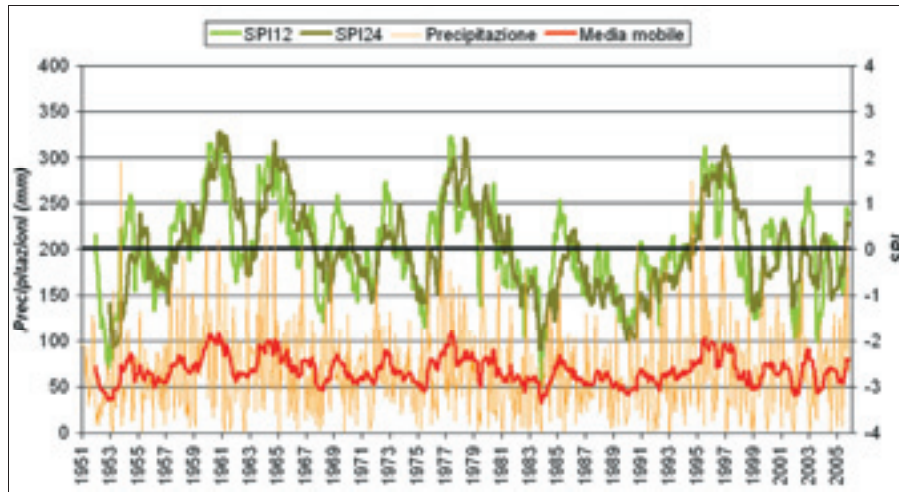


Figura 13 – Precipitazione cumulata mensile e valore di SPI calcolato su 12 e 24 mesi nella stazione di Cremona  
 Figure 13- Cumulated monthly rainfall and SPI 12 and 24 trend in the weather station of Cremona.

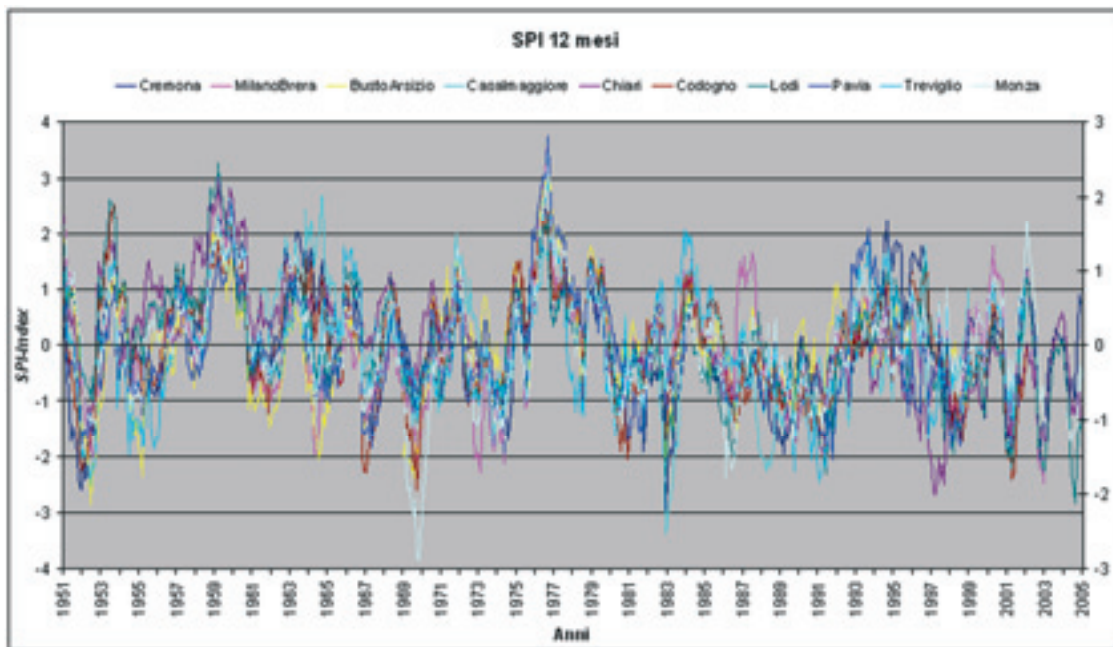


Figura 14 - Calcolo dello Standardized Precipitation Index a 12 mesi per 10 stazioni posizionate nell'area d'interesse. Valori dell'indice superiori a 2 indicano un evento estremamente umido, inferiori a -2 indicano un evento estremamente secco e deficit di precipitazioni.

Figure 14 –SPI 12 for 10 weather stations in the study area. SPI values higher than 2 show an extremely wet event, while SPI values lower than -2 show an extremely dry period and a rainfall deficit.



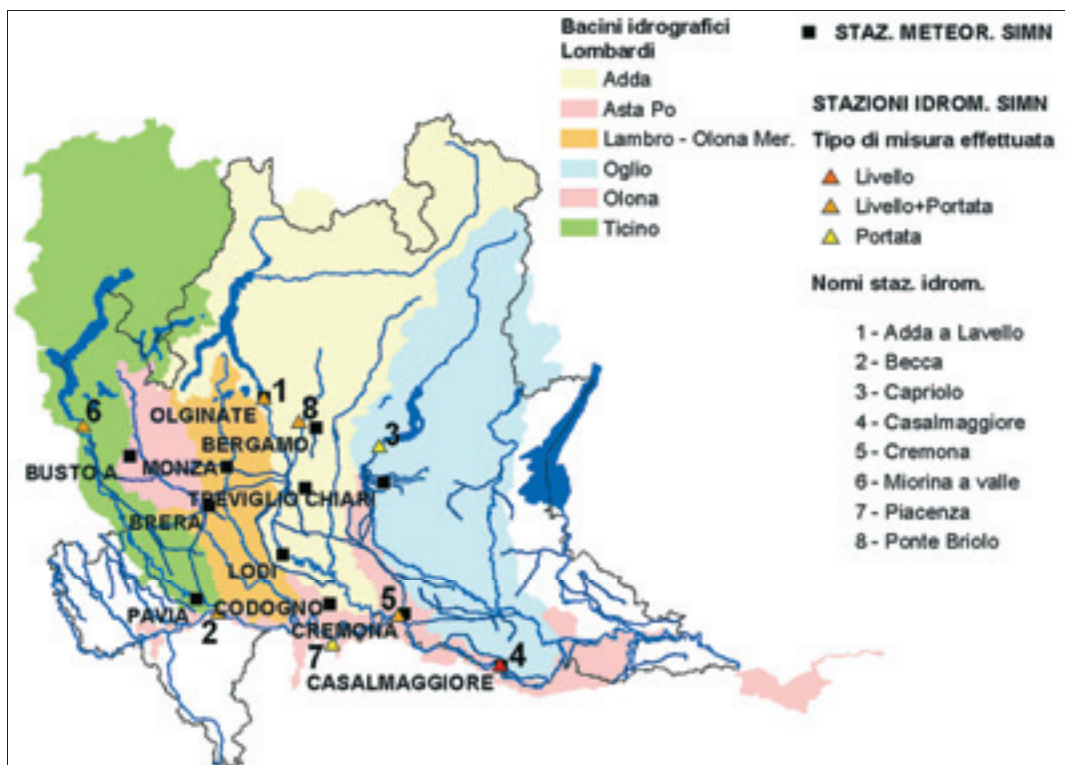


Figura 15 - Ubicazione delle stazioni meteorologiche, idrometriche e di portata dell'ex-Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale, raccolte per il progetto RICLIC, considerate nel presente lavoro per il confronto tra precipitazioni, livelli idrometrici e portate in relazione ai bacini idrografici dei principali fiumi dell'area di studio.

Figure 15 – The picture shows the location of weather and discharge stations and of water gages of ex-Servizio Idrografico and Mareografico Nazionale, collected for the RICLIC research project and used to compare rainfall, hydrometric level and discharge, according to drainage basins of the main rivers in the study area.

Nonostante ogni stazione presenti un proprio comportamento è possibile individuare un andamento comune. In particolar modo si osserva che periodi particolarmente umidi o di deficit nelle precipitazioni sono individuabili in ognuna delle stazioni considerate, con differenze nell'intensità ma non nella durata. Di seguito sono riportati gli andamenti dell'SPI a 12 mesi (Figura 14) riferiti a 10 stazioni meteorologiche considerate. Il valore di SPI a 12 mesi, per un tempo generico  $t$ , è calcolato in base alle precipitazioni dei 12 mesi precedenti, così da evidenziare deficit di precipitazione più prolungati nel tempo; è interessante notare, ad esempio, che per l'anno 2003 il valore di SPI a 12 mesi è fortemente negativo mentre il valore a 24 mesi è prossimo a -1 ad indicare che il deficit di precipitazione è stato limitato nel tempo.

Si individuano due periodi con precipitazioni superiori alla media dal 1959 alla fine del 1961 e dal 1975 al 1979.

Si individuano alcuni picchi negativi particolarmente pronunciati, come quelli avvenuti tra il 1970-1971 e quello del 1983, ma particolare attenzione va attribuita agli anni dal 1989 al 1991 che mostrano un deficit non particolarmente intenso ma lungo, in grado, quindi, di ripercuotersi anche sulle risorse idriche sotterranee.

### Confronto tra precipitazioni, livelli idrometrici e portate

Il confronto tra livelli idrometrici e portate rispetto alle precipitazioni, consente di capire come il sistema risponde ad eventi meteorici particolarmente significativi o per quantità o per durata, oltre a determinare quale sia l'evoluzione fluviale in atto. E' noto infatti che l'evoluzione del livello può essere legata a differenti cause, non semplicemente ad una diminuzione di risorsa in alveo (Natale e Savi, 1990), mentre la misurazione della portata riflette realmente i quantitativi defluiti.

Il confronto è stato realizzato analizzando le sequenze storiche più lunghe possibili, in alcune stazioni lungo le principali aste fluviali dell'area di studio, come il Ticino, l'Adda, il Lambro, l'Oglio e il Po, utilizzando i dati ad oggi pubblicati e nelle quali siano presenti la portata e il livello o almeno la portata; l'ubicazione delle diverse stazioni considerate è riportata in Figura 15. I dati idrologici sono stati confrontati con i dati pluviometrici della stazione più vicina significativamente temporalmente e territorialmente.

Di seguito sono riportati i grafici mensili suddivisi in base all'asta fluviale a cui fanno riferimento (dalla Figura 16 alla Figura 23).

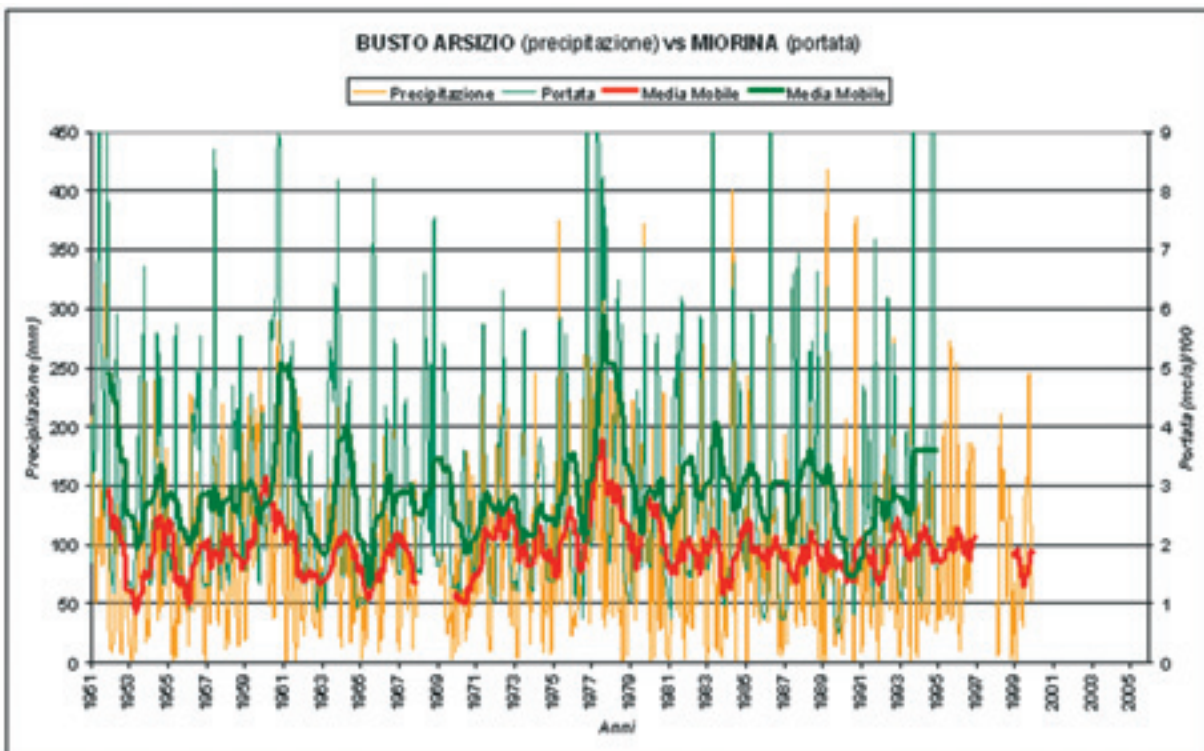


Figura 16 - Confronto tra l'andamento mensile della portata a Miorina e della pluviometria a Busto Arsizio (Fiume Ticino).  
 Figure 16 – Comparison between the temporal trend of the monthly discharge at Miorina and the rainfall at Busto Arsizio (Ticino river).

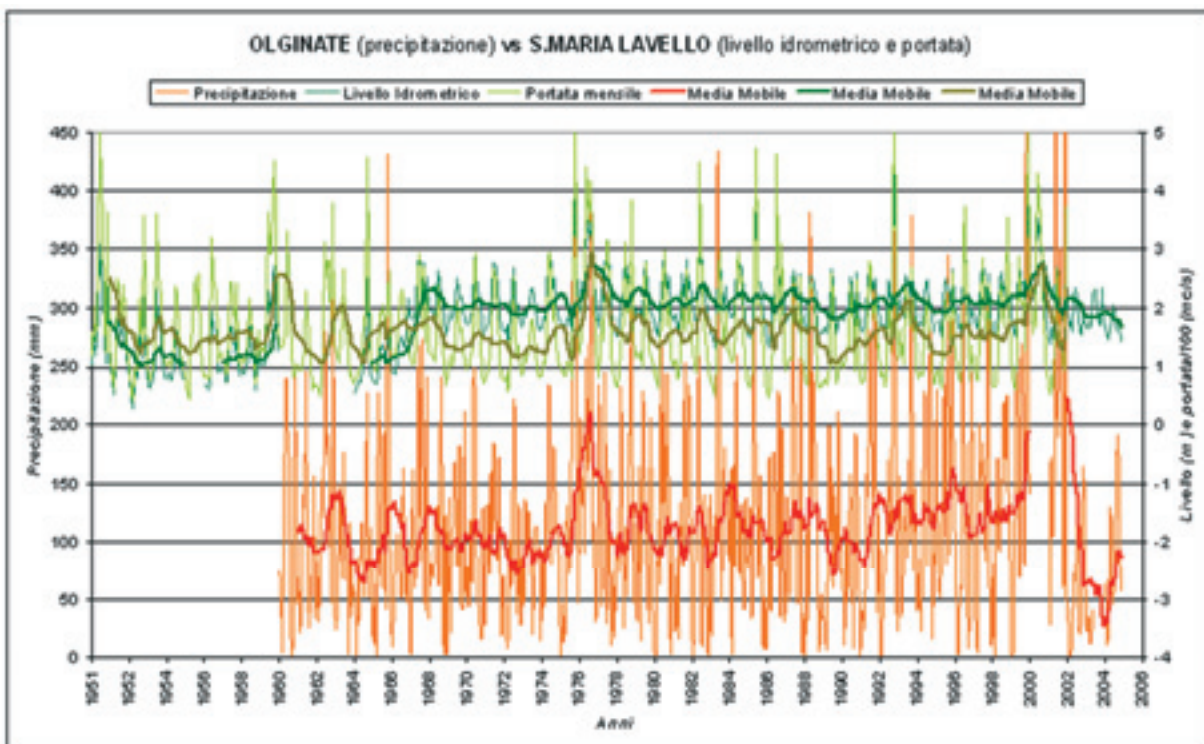


Figura 17 – Confronto tra il livello idrometrico e la portata a S. Maria Lavello e la pluviometria a Olginate (Fiume Adda).  
 Figure 17 - Comparison between the temporal trend of the monthly hydrometric level at S. Maria Lavello and the rainfall at Olginate (Adda river).



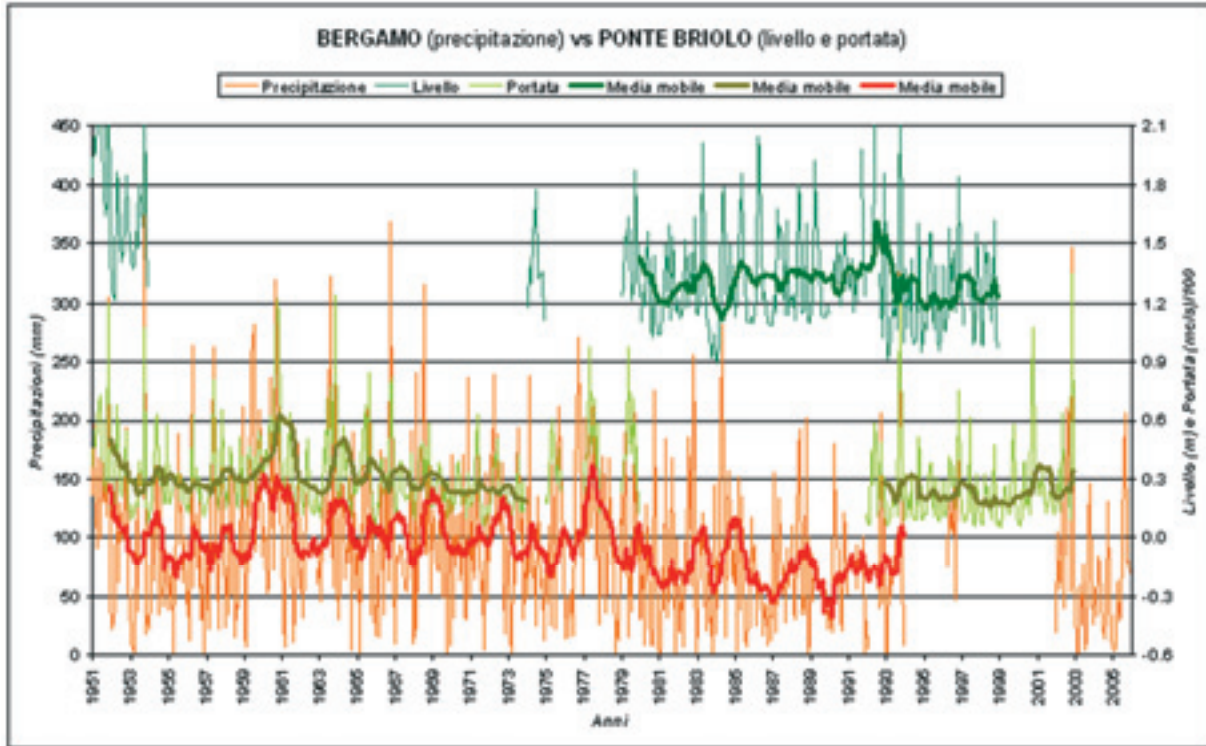


Figura 18 – Confronto tra il livello idrometrico e la portata a Ponte Briolo e la precipitazione a Bergamo (Fiume Grembo).  
 Figure 18 - Comparison between the temporal trend of the monthly hydrometric level, the monthly discharge at Ponte Briolo and the rainfall at Bergamo (Brembo river).

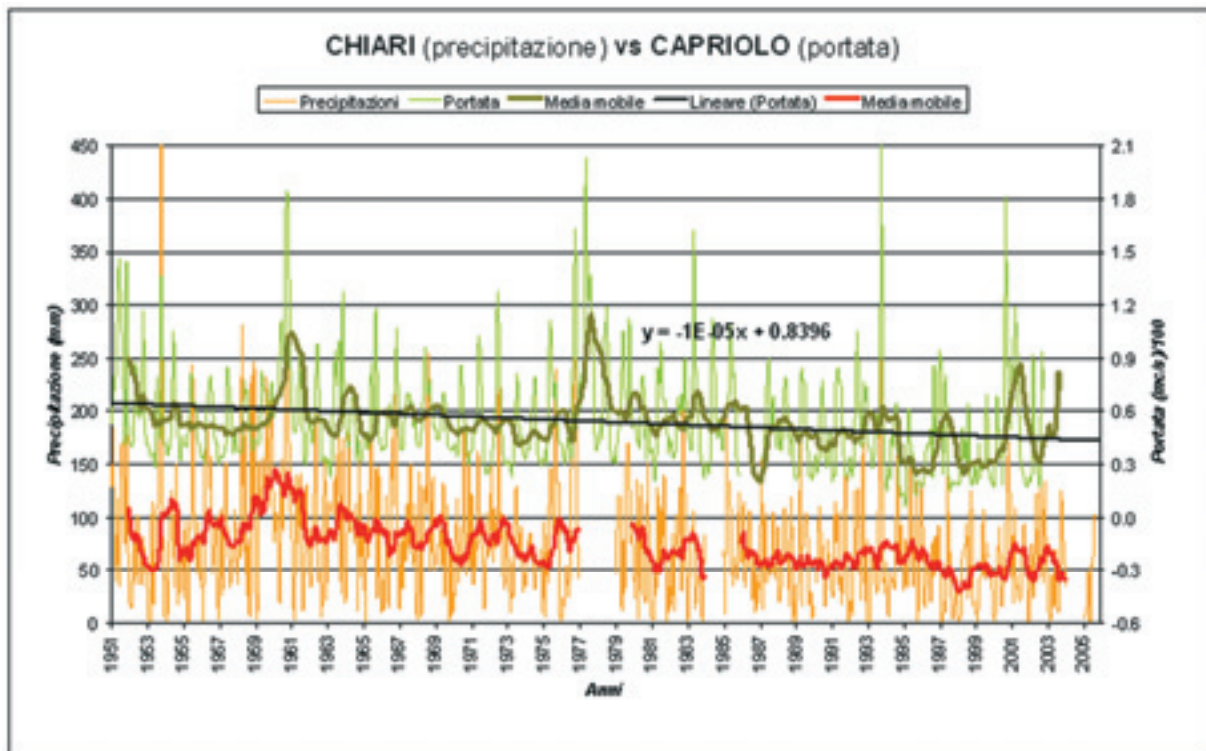


Figura 19 – Confronto tra la portata a Capriolo e la precipitazione a Chiari (Fiume Oglio).  
 Figure 19 - Comparison between the temporal trend of the monthly discharge at Capriolo and the rainfall at Chiari (Oglio river).



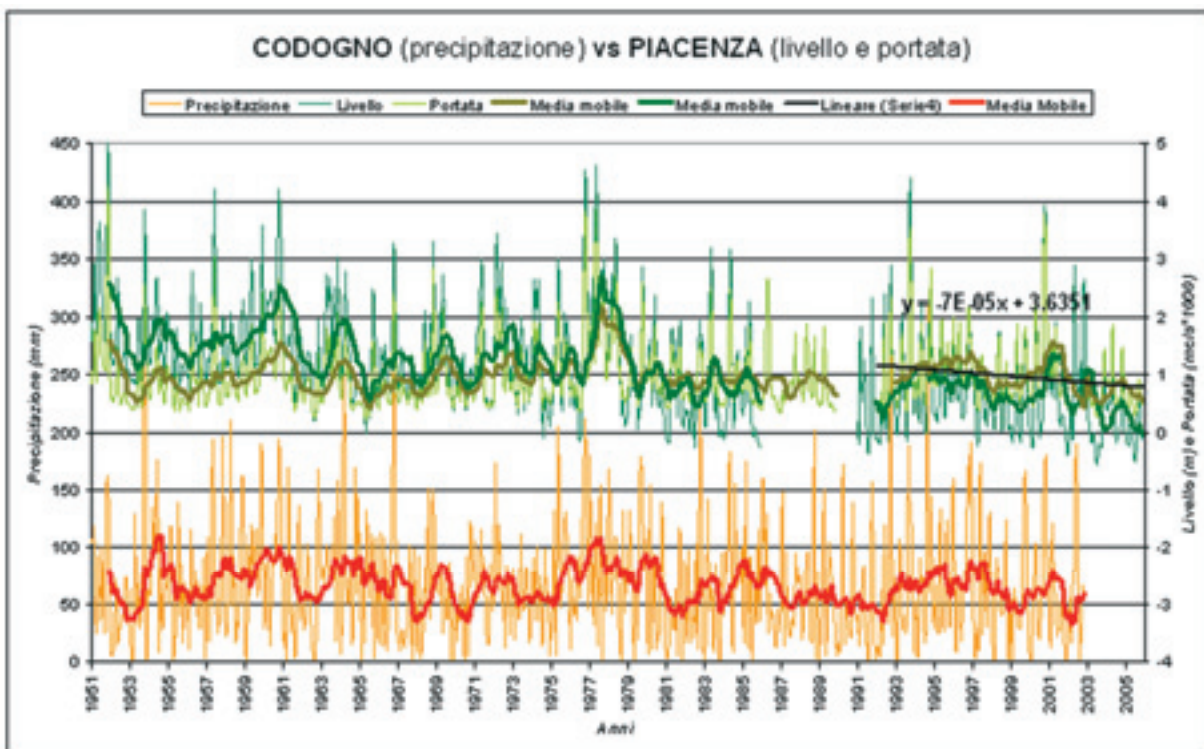


Figura 20 – Confronto tra il livello idrometrico e la portata a Piacenza e la precipitazione a Codogno (Fiume Po).  
 Figure 20 - Comparison between the temporal trend of the monthly hydrometric level, the discharge at Piacenza and the rainfall at Codogno (Po river).

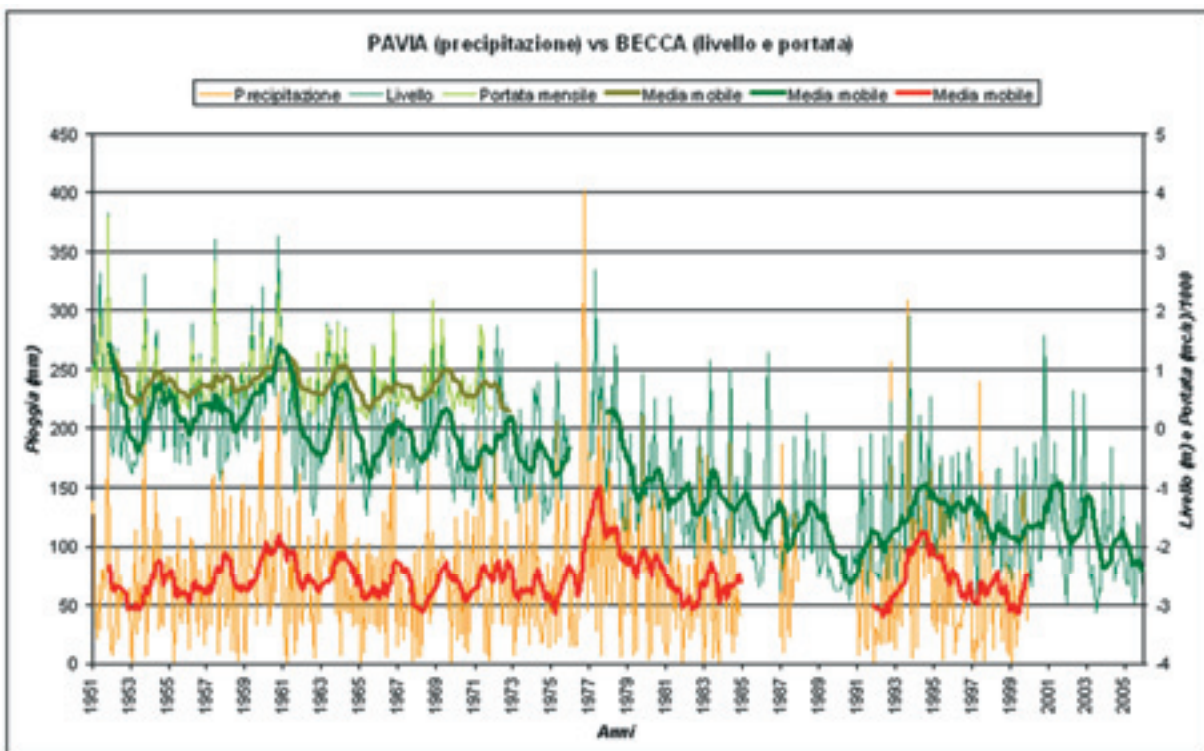


Figura 21 – Confronto tra il livello idrometrico e la portata a Becca e la precipitazione a Pavia (Fiume Po).  
 Figure 21 - Comparison between the temporal trend of the monthly hydrometric level, the discharge at Becca and the rainfall at Pavia (Po river).

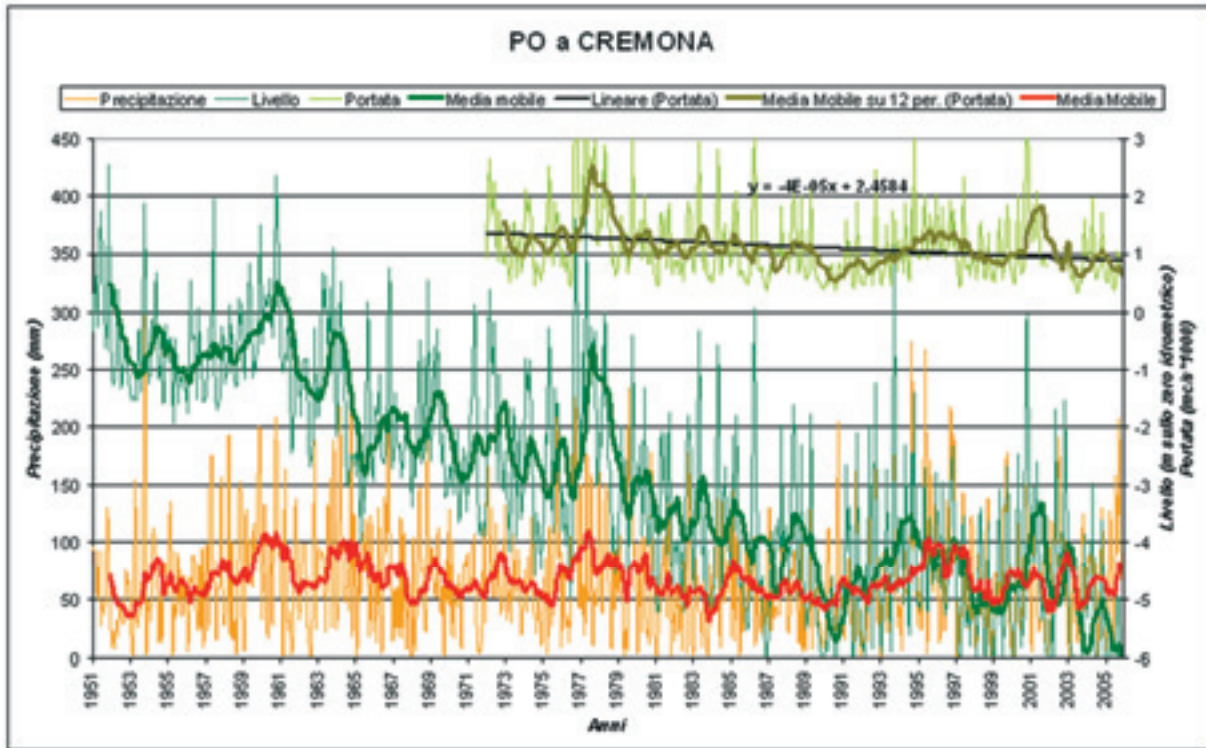


Figura 22– Confronto tra il livello idrometrico, la portata e la precipitazione a Cremona (Fiume Po).  
 Figure 22 - Comparison between the temporal trend of the monthly hydrometric level, the discharge and the rainfall at Cremona (Po river).

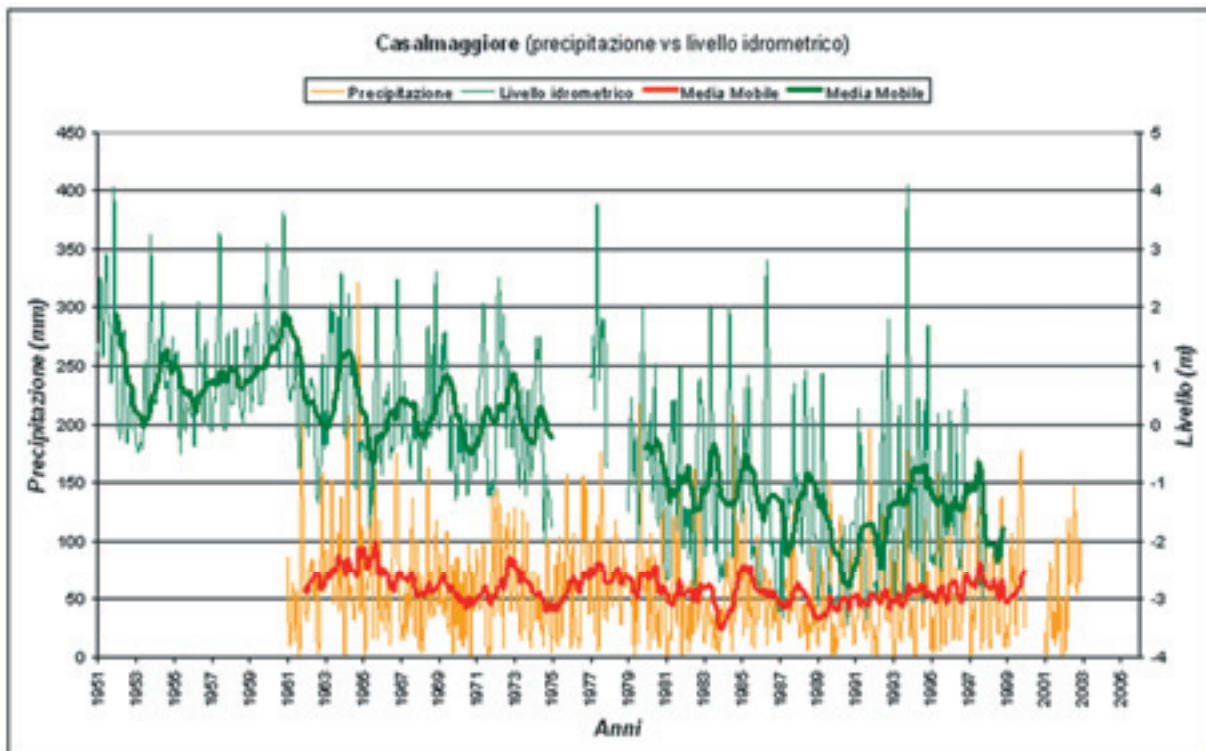


Figura 23 - Confronto tra il livello idrometrico e la precipitazione a Casalmaggiore (Fiume Po).  
 Figure 23 - Comparison between the temporal trend of the monthly hydrometric level and the rainfall at Casalmaggiore (Po river).

Il primo aspetto molto evidente è la frammentarietà del dato, sia relativamente al periodo che alla tipologia. Purtroppo ove è pubblicato il livello idrometrico non è sempre presente la portata e anche viceversa.

Gli affluenti in sponda sinistra del Po in Lombardia sono tutti regimati dagli sbarramenti posti a valle dei laghi (Figura 15), tranne il Brembo ed il Serio: il Ticino è regimato dal Lago Maggiore, l'Adda dal lago di Como, l'Oglio dal lago di Iseo. Questo determina una ulteriore difficoltà di lettura perché si deve correlare con la gestione antropica del lago.

La portata a Santa Maria Lavello risulta quindi molto costante, intorno a valori di 150-200 m<sup>3</sup>/s, in quanto controllata dalla diga di Olginate (Figura 17); anche il livello mostra un andamento corrispondente. Solamente negli ultimi anni, dal 2003 al 2005, si evidenzia una discreta diminuzione della portata e anche del suo livello, in quanto la diminuzione di acqua meteorica (Figura 8) e, di conseguenza, quella apportata al lago ha reso necessario una diminuzione della portata in uscita. In Marino 2007, si registra circa 120 m<sup>3</sup>/s nel 2003, circa 125 m<sup>3</sup>/s nel 2004, circa 88 m<sup>3</sup>/s nel 2005.

Anche la portata a Miorina, sul Ticino (Figura 16), mostra un trend molto costante e non si può cogliere un eventuale peggioramento in corso in quanto i dati disponibili arrivano fino al 1994. La frammentarietà dei dati condiziona anche la lettura per la stazione di Ponte Briolo (BG) sul fiume Brembo (Figura 18), dove però si inizia a vedere una lieve tendenza in diminuzione negli ultimi anni.

Alcuni aspetti sono comuni a tutte le stazioni di misura. Il livello idrometrico corrisponde molto bene ai picchi di precipitazione, in quanto viene incrementato il deflusso diretto del sistema (Marchetti, 2002). Si osserva in tutte le stazioni un significativo innalzamento del livello, e quindi della portata, in corrispondenza dei periodi di precipitazione più alti della media: dal 1959 alla fine del 1961 e dal 1975 al 1979; meno evidente con i singoli picchi negativi di precipitazione, come il 1971 e il 1983. In alcune stazioni si osserva un abbassamento generalizzato tra il 1989 e il 1993. Vi è quindi una buona corrispondenza rispetto all'SPI. Viceversa il livello non risulta in alcun modo significativo nelle aste fluviali in cui si verifica un netto approfondimento del letto, come sul Fiume Po (Rossetti 1970, Natale e Savi 1990, Marchetti 2002). Si osserva infatti un abbassamento del livello idrometrico a Casalmaggiore (Figura 23) di circa 6 m dal 1951 al 2005; il medesimo abbassamento è evidente a Piacenza (Figura 20), Becca (Figura 21), Cremona (Figura 22). La maggior parte di esso è legato all'approfondimento del letto fluviale, spesso dovuto a motivazioni antropiche, come l'impianto di isola Serafini (Commissione Canali, 1976a e 1976b). L'approfondimento risulta costante dal 1951 fino agli anni '90, dopodiché si registra una situazione un po' più stabile, anche per il fatto che in quegli anni è stata

terminata l'autostrada del Sole i cui rilevati sono stati costruiti in buona parte con materiali estratti dal Po e dai suoi affluenti. Anche attualmente è comunque presente un continuo approfondimento del letto, anche se meno marcato.

E' difficile valutare la reale diminuzione legata a riduzione di apporti meteorici non avendo ancora a disposizione tutti i valori di portata.

Le prime valutazioni indicano comunque una lieve diminuzione della portata, costante negli ultimi anni. Sul fiume Oglio, nella stazione di Capriolo (Figura 19), si registra dal 1951 al 2003, una correlazione negativa con una pendenza -0.001 che, rapportata ad una serie giornaliera, corrisponde a circa 0.36 m<sup>3</sup>/s di diminuzione di portata all'anno. Sul periodo corrisponde ad una diminuzione media di circa 18 m<sup>3</sup>/s negli ultimi 50 anni.

Nella stazione di Piacenza, sul PO (Figura 20), i dati sono in parte frammentati; dal 1992 al 2005 si registra una diminuzione di portata con un'inclinazione pari a -0.07 che, rapportata ad una serie giornaliera, corrisponde a circa 25 m<sup>3</sup>/s di diminuzione di portata all'anno. Sul periodo corrisponde ad una diminuzione totale di circa 330 m<sup>3</sup>/s.

Per la stazione di Cremona (Figura 22), i dati di portata dal 1972 al 2005, permettono di evidenziare un leggero trend negativo con una pendenza pari a -0.04 che, sempre su scala giornaliera, corrispondono ad una diminuzione di circa 14 m<sup>3</sup>/s all'anno. Sul periodo corrisponde ad una diminuzione totale di circa 480 m<sup>3</sup>/s.

Ove esistono i dati degli anni più recenti, sembra essere riconoscibile un aumento di portata nel 2002 ed una diminuzione dal 2003 al 2005. Questo conferma i dati presentati alla Conferenza Nazionale 2007 sui Cambiamenti Climatici (Tibaldi, 2007), ove si indicava una diminuzione del 20-25% a Pontelagoscuro e del 40% a Piacenza dal 1976 al 2006, pur se molto più evidente nel periodo estivo e praticamente nulla nel periodo autunnale.

## Piezometrie

L'area di studio considerata, dal punto di vista delle acque sotterranee, può essere suddivisa in due bacini idrogeologici, delimitati a sud dal Po e, ad ovest e a est, rispettivamente dal Ticino e dall'Adda e dall'Adda e l'Oglio. All'interno di questi bacini, si possono individuare, spostandosi da nord verso sud, aree in cui si riscontrano andamenti della falda differenti tra loro in funzione delle diverse voci di bilancio prevalenti in ogni settore. Per effettuare valutazioni quantitative sugli apporti al sistema sotterraneo, è però necessario avere sequenze storiche molto ampie per cogliere non solo i trend stagionali ma anche quelli pluriannuali e relazionarli con eventi meteorici significativi. Valutazioni significative sono quindi possibili solo all'interno della provincia di Milano, ove esiste, come detto, una rete piezometrica storica ancora attiva, pur con notevoli



problemi. I dati freaticometrici, interrotti ormai per la maggior parte, che erano così importanti per la loro frequenza di misura, la loro distribuzione capillare e perché disponibili già dal 1951, perdono di significato per analisi quantitative.

In Figura 24 sono ubicate tutte le stazioni considerate in questa analisi: pluviometriche, piezometriche e freaticometriche. Le tipologie principale considerate sono: zone con assenza di irrigazioni, zone irrigue e zone fortemente urbanizzate.

**Zone non irrigue**

Nei settori a nord, al limite con le prealpi e i rilievi di origine morenica, si hanno le principali aree di ricarica diretta delle falde; in queste aree, le precipitazioni rappresentano il principale ingresso alla falda il cui andamento nel tempo rispecchia bene l'andamento delle precipitazioni, come si può notare dal confronto tra gli andamenti temporali della piezometria a Muggiò (MI), Sesto San Giovanni (MI) e Cinisello Balsamo (MI) rispetto alla pluviometria nella stazione di Monza (Figura 25). Si osserva come il trend pluriennale piezometrico sia molto più marcato del trend pluviometrico, ma sono riconoscibili periodi con anomalie positive, significativamente superiori alla media del 1975-1979 e del 1992-1996. La differente entità esalta i trend

piezometrici rispetto ai pluviometrici, ma si deve tenere presente il fatto che le pluviometrie rappresentano reali quantitativi d'acqua caduti al suolo e quindi reali volumi, mentre l'innalzamento piezometrico va rapportato alla porosità efficace del terreno e non quindi traducibile in volumi d'acqua presenti nel sottosuolo.

Per cogliere meglio le correlazioni si riporta anche il confronto tra l'andamento piezometrico a Muggiò (MI) rispetto all'indice SPI12 della vicina stazione meteorologica di Monza (Figura 26). Da questo grafico traspare meglio la corrispondenza tra l'andamento piezometrico e l'andamento dei valori di SPI a 12 mesi, soprattutto per le anomalie, positive o negative, che si protraggono per più anni successivi. Infatti le acque sotterranee necessitano di tempi sufficientemente lunghi per rispondere al sistema e la superficie piezometrica ne è la risposta. Il singolo evento meteorico siccitoso o eccessivo giornaliero o mensile o anche un anno con episodi o periodi significativamente differenti rispetto alla media, non riescono a riflettersi sulle acque sotterranee in modo marcato. Quando la situazione si ripete invece per più anni, allora anche il sistema sotterraneo ne risente positivamente o negativamente e vengono modificati i quantitativi stoccati nel sottosuolo.

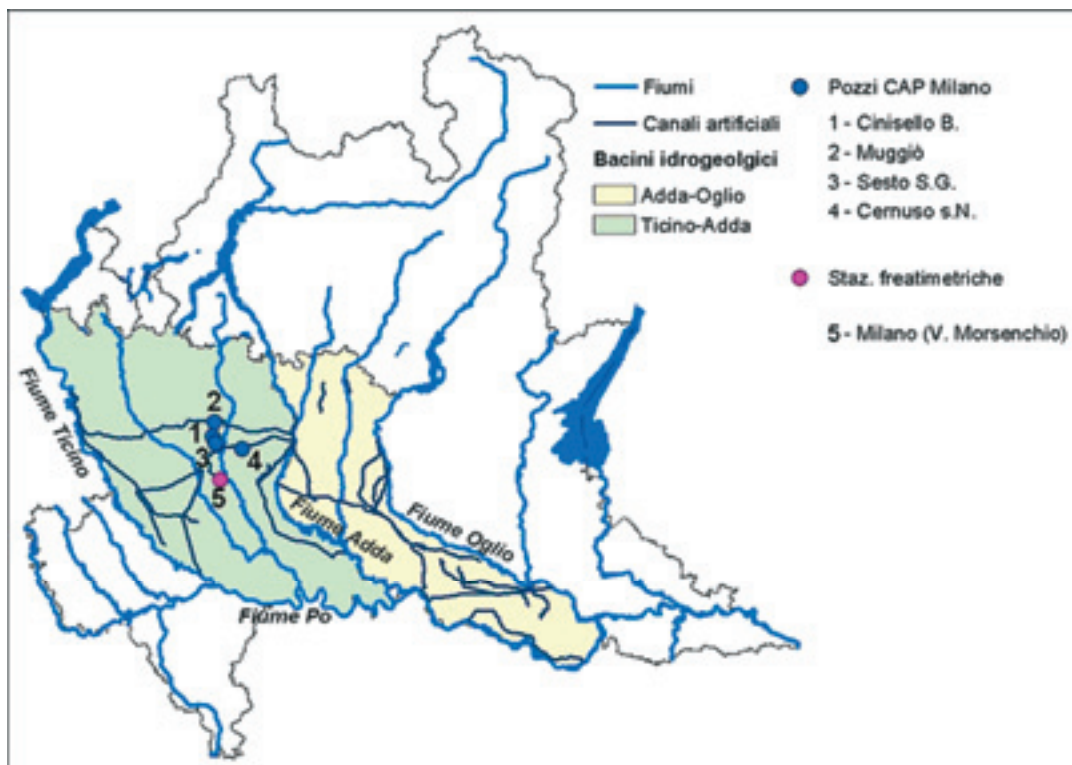


Figura 24 - Ubicazione delle stazioni piezometriche del CAP di Milano e freaticometriche dell'ex-Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale, in relazione ai due bacini idrogeologici (Ticino –Adda e Adda – Oglio) dell'area di studio.

Figure 24 – The picture shows the location of piezometric stations of CAP Milano and of freaticometric stations of ex-Servizio Idrografico and Mareografico Nazionale. They are located in the two groundwater basins (Ticino-Adda and Adda – Oglio) of the study area.

Dal grafico di Figura 26 si osservano bene come periodi prolungati di precipitazioni superiori o inferiori alle medie, abbiano un riscontro evidente sull'andamento delle acque sotterranee, ove non vi siano altre voci di bilancio nettamente prevalenti. Tale corrispondenza presenta uno sfasamento temporale di circa un anno. Ove le misurazioni piezometriche non sono temporalmente continue, almeno mensili, non è possibile fare alcuna

valutazione.

**Zone irrigue**

Più a sud, ed in particolare a sud dei grandi canali di irrigazione come il Villoresi e la Muzza, nelle aree agricole l'andamento della falda è controllato dalle irrigazioni e stagionalmente presenta un analogo andamento ciclico.

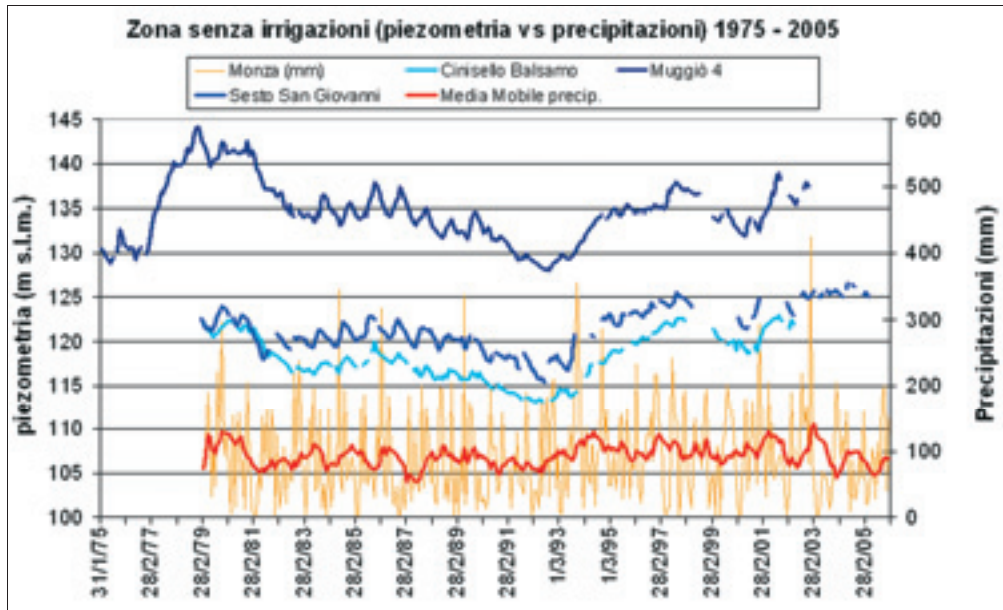


Figura 25 – Confronto tra la piezometria a Cinisello Balsamo (MI), Muggiò (MI) e Sesto San Giovanni (MI) e la precipitazione a Monza, in una zona senza irrigazioni a Nord di Milano.

Figure 25 - Comparison between the temporal trend of the depth of water table level at Cinisello Balsamo (MI), Muggiò (MI) and Sesto San Giovanni (MI), and the rainfall at Monza (MI), in a no-irrigate area, North to Milano.

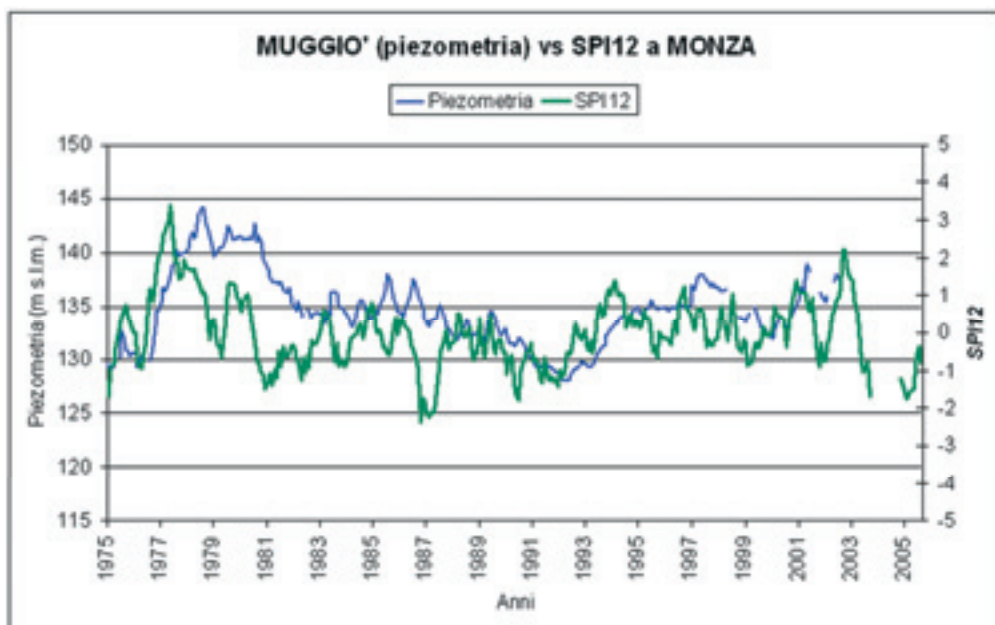


Figura 26 – Confronto tra la piezometria a Muggiò (MI) e SPI 12 a Monza.

Figure 26 - Comparison between the temporal trend of the water table level at Muggiò and the SPI12 at Monza (MI).

Nelle Figura 27 è riportato il confronto tra l'andamento piezometrico a Cernusco sul Naviglio (MI) (in due differenti pozzi) rispetto alle precipitazioni e, in Figura 28, rispetto alle derivazioni a scopo irriguo dal Canale della Martesana i cui dati sono stati resi disponibili dal Consorzio dell'Adda. Normalmente i quantitativi irrigui vengono distribuiti da aprile a settembre con apporti molto ridotti in inverno (Figura 28).

La falda ne risente con una forte stagionalità molto marcata su tutto il periodo ma, temporalmente, con qualche mese di ritardo; esso è dovuto a vari fattori tra i quali il tempo di utilizzo dell'acqua da parte delle coltivazioni, la tipologia di suolo presente e il tempo di transito e percolazione nella zona non satura.

Il trend pluriennale del livello della falda è invece influenzato anche in questo caso dalle precipitazioni: il

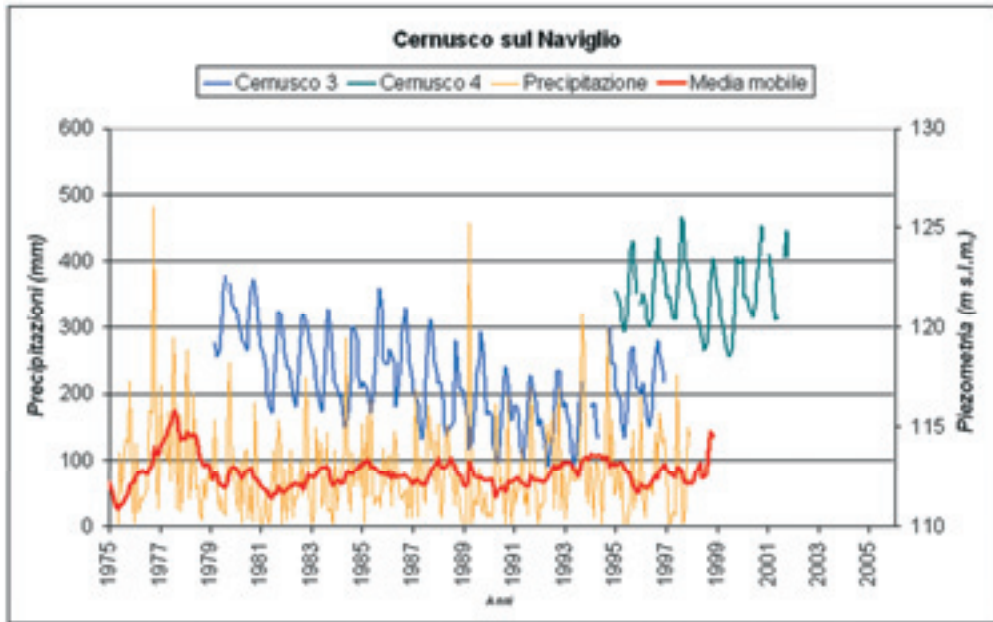


Figura 27 – Precipitazione e piezometria a Cernusco sul Naviglio (MI), in un'area irrigua a est di Milano.  
 Figure 27 – Temporal trend of rainfall and water table level at Cernusco sul Naviglio (MI), in a irrigated area, East to Milano.

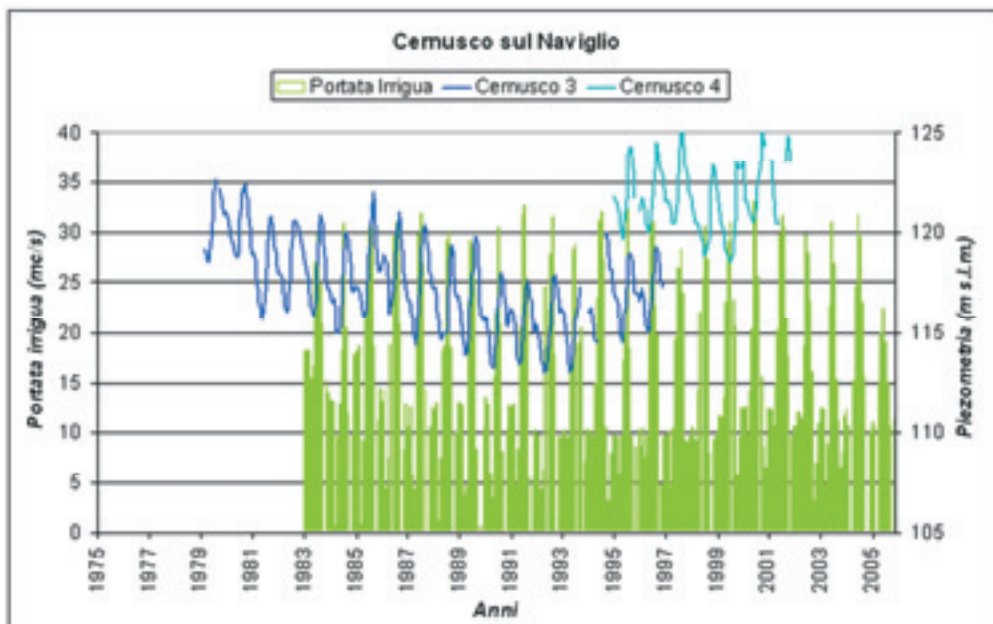


Figura 28 – Piezometria a Cernusco sul Naviglio (MI) e portata derivata dal canale della Martesana per scopi irrigui.  
 Figure 28 – Temporal trend of water table level at Cernusco sul Naviglio (MI) and temporal trend of discharge, come from Martesana canal for irrigation uses.



livello più alto nell'intervallo temporale registrato si ha infatti proprio in seguito al periodo di elevate precipitazioni della fine degli anni settanta (1975-1979).

Una analoga ciclicità si ritrova nei pozzi in prossimità della aree con fontanili che mostrano un andamento stagionale tipico delle aree irrigue, ma con un intervallo di oscillazione molto più ristretto per la maggiore vicinanza della falda alla superficie topografica che esercita quindi una azione di sfioro regolatore.

### **Zone fortemente urbanizzate**

Nelle aree urbane ed industriali, prime fra tutte quella di Milano, sono evidenti gli effetti del prelievo ad uso potabile ed industriale che negli anni settanta ha determinato un drastico abbassamento della falda, come si può vedere nella stazione freaticometrica di Milano in Via Morsenchio (Figura 29), oltre che a notevoli problemi di gestione del sottosuolo (Cavallin, Bonomi, De Amicis, Rizzi, Trafiletti e Tizzone, 1999, Bonomi e Cavallin 2007). Il grande sfruttamento ad uso potabile ed industriale della risorsa idrica sotterranea nell'area metropolitana milanese avvenuto nei decenni scorsi, ha infatti contribuito ad una evoluzione negativa della qualità, con conseguente degrado della risorsa idrica per uso potabile ed un forte depauperamento della sua disponibilità. Contemporaneamente si è assistito ad una utilizzazione della zona non satura a profondità sempre maggiori per lo sviluppo di sistemi di trasporto, parcheggi ed anche attività sociali e commerciali, senza la previsione progettuale di adeguate opere di protezione. Le recenti evoluzioni socioeconomiche dell'area hanno prodotto una inversione di tendenza del trend della falda che ha comportato effetti positivi sulla ricostruzione della

risorsa, ma effetti negativi sulle infrastrutture ormai presenti, anche legate a servizi primari, quali la metropolitana o gli ospedali (Airoldi, Casati, De Amicis e Peterlongo, 1997; Provincia di Milano 1995, Provincia di Milano 1996, Provincia di Milano 1997; Raffaelli, Raimondi e Rosti, 1996).

Il trend piezometrico, risposta del sistema al bilancio idrico, mostra quindi il massimo approfondimento intorno al 1975, per poi mostrare un trend in netta risalita, con al suo interno lievi innalzamenti ed abbassamenti relativi. Essi possono essere in parte legati ad apporti meteorici più o meno intensi, sempre quando questi sono rappresentati da periodi sufficientemente lunghi di variazione.

E' evidente come la risalita del 1976-1979 sia stata favorita dall'ampio periodo di elevato apporto meteorico. Si riscontra un minor ritardo nella risposta del sistema sotterraneo rispetto alle zone irrigue, in quanto l'acqua di irrigazione tende a percolare in quantità maggiore perché il terreno è arido, ma con tempi più lunghi perché viene gestita ed utilizzata dal sistema radicale e fogliare superficiale prima di percolare nel non saturo. La zona non satura è in entrambe i casi paragonabile (Figura 27 e Figura 29) (nel 1975, circa 13-15 m).

### **Conclusioni**

La comprensione delle variazioni climatiche sulle risorse idriche sotterranee necessita di dati relativi a sequenze storiche molto lunghe, per poter capire la risposta del sistema nel tempo.

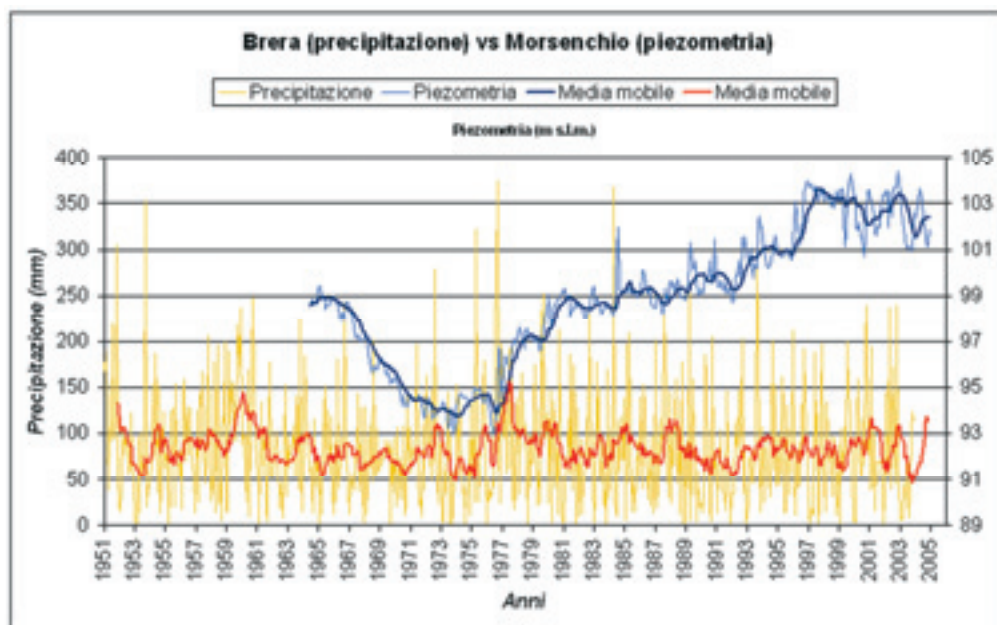


Figura 29 – Piezometria e precipitazione nell'area urbana di Milano  
 Figure 29 – Temporal trend of water table and rainfall in the urban area of Milano.

Gli apporti meteorici mostrano una elevata variabilità spaziale e temporale anche in una zona di pianura ed è quindi necessario conoscere con la stessa frequenza e distribuzione anche gli altri aspetti della lunga catena del bilancio idrico, per cogliere le reciproche relazioni. Nell'ambito del progetto RICLIC (Regional Impact of Climatic Change in Lombardy Water Resources: Modelling and Applications, Università di Milano Bicocca, Università di Milano, Università di Pavia, ARPA Lombardia, Fondazione Lombardia per l'Ambiente) si analizzano gli effetti delle variazioni climatiche sulle risorse idriche superficiali e sotterranee, basando l'analisi su dati giornalieri di precipitazione, di livelli idrometrici, di portata e di freaticimetrie e piezometrie nell'area di pianura lombarda compresa tra Ticino ed Oglio, dal 1951 al 2005. Il progetto mira a sviluppare le relazioni tra questi aspetti, sia temporalmente che spazialmente, per capire i tempi e le entità delle risposte, nei diversi bacini idrogeologici.

Una prima analisi dei trend pluviometrici ha messo in luce che si individuano due periodi con precipitazioni superiori alla media dal 1959 alla fine del 1961 e dal 1975 al 1979.

Si individuano alcuni picchi negativi particolarmente pronunciati, come quelli avvenuti tra il 1970-1971 e quello del 1983, ma particolare attenzione va attribuita agli anni dal 1989 al 1993 che mostrano un deficit non particolarmente intenso ma lungo, in grado, quindi, di ripercuotersi anche sulle risorse idriche sotterranee, la cui risposta alle sollecitazioni esterne è solitamente più tardiva.

Non ci si è soffermati sulla distribuzione delle precipitazioni nell'arco dell'anno, in quanto già ampiamente trattate nell'ambito della Conferenza sui cambiamenti climatici del 2007.

Successivamente le serie storiche dei parametri considerati sono state confrontate tra loro per un'analisi spazio-temporale con lo scopo di individuare eventuali interrelazioni.

Il primo aspetto molto evidente è la frammentarietà del dato pubblicato e il non sempre giusto valore attribuito al dato storico, fonte così preziosa di informazioni.

Un continuo e costante monitoraggio evidenzia bene come, per esempio, il livello idrometrico corrisponde molto bene ai picchi di precipitazione, in quanto viene incrementato il deflusso diretto del sistema. Si osserva infatti in tutte le stazioni un significativo innalzamento del livello, e quindi della portata, in corrispondenza dei periodi di precipitazione più alti della media: dal 1959 alla fine del 1961 e dal 1975 al 1979; meno evidente con i singoli picchi negativi di precipitazione, come il 1971 e il 1983.

Viceversa, l'analisi del livello, non risulta in alcun modo significativo nelle aste fluviali in cui si verifica un approfondimento del letto.

E' difficile valutare la reale diminuzione legata a riduzione di apporti meteorici non avendo ancora a disposizione tutti i valori di portata, ma le prime analisi evidenziano una lieve diminuzione della portata, costante negli ultimi anni. Sul fiume Oglio, nella stazione di Capriolo si registra, dal 1951 al 2003, una correlazione negativa che corrisponde a circa 0.36 m<sup>3</sup>/s di diminuzione di portata all'anno, pari ad una diminuzione media di circa 18 m<sup>3</sup>/s negli ultimi 50 anni. Nella stazione di Piacenza sul Po, dal 1992 al 2005 si registra una diminuzione di portata che corrisponde a circa 25 m<sup>3</sup>/s di diminuzione di portata all'anno, pari ad una diminuzione totale di circa 330 m<sup>3</sup>/s. Per la stazione di Cremona sul Po, i dati di portata dal 1972 al 2005, permettono di evidenziare un leggero trend negativo che corrisponde ad una diminuzione di circa 14 m<sup>3</sup>/s all'anno, pari ad una diminuzione totale di circa 480 m<sup>3</sup>/s.

Ove esistono i dati degli anni più recenti, sembra essere riconoscibile un aumento di portata nel 2002 ed una diminuzione dal 2003 al 2005. Questo conferma i dati presentati alla Conferenza Nazionale 2007 sui Cambiamenti Climatici.

Infine le acque sotterranee necessitano di tempi sufficientemente lunghi per rispondere al sistema e la superficie piezometrica ne è la risposta. Il singolo evento meteorico siccitoso o eccessivo giornaliero o mensile o anche un anno con episodi o periodi significativamente differenti rispetto alla media, non riescono a riflettersi sulle acque sotterranee in modo marcato. Quando la situazione si ripete invece per più anni, allora anche il sistema sotterraneo ne risente positivamente o negativamente e vengono modificati i quantitativi stoccati nel sottosuolo, ove non vi siano altre voci di bilancio nettamente prevalenti. Tale corrispondenza presenta uno sfasamento temporale di circa un anno. Per ora non si riscontrano significative variazioni negative della risorsa idrica sotterranea. Ove le misurazioni piezometriche non sono temporalmente continue, almeno mensili, non è possibile fare alcuna valutazione.

La frammentarietà del dato disponibile evidenzia anche come sia necessario ancora lavorare molto sulla sinergia tra gli Enti operanti sul territorio e tutti devono essere consapevoli che qualunque dato è prezioso per la comprensione di un fenomeno così complesso e, soprattutto, la non continuità nel tempo e nello spazio dei sistemi di monitoraggio può rendere completamente vano il lavoro di tanti anni di servizi che capillarmente hanno raccolto dati sul territorio.

#### **Ringraziamenti**

I dati sono stati raccolti nell'ambito del Progetto RICLIC, finanziato da Università degli Studi di Milano-Bicocca, Fondazione Lombardia Ambiente e Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Lombardia. Si ringrazia il Settore Sistemi Informativi Ambientali (SIA), nelle persone del Dott. Enrico Zini, Ing. Roberto Serra, Ing. Chiara Manenti e Ing. Angela Sulis.

## Bibliografia

- Airoldi R., Casati P., De Amicis M., Peterlongo G., 1997. Oscillazioni del livello sotterraneo della falda idrica sotterranea milanese nel periodo 1990-1995. *Acque sotterranee*, Segrate (Mi).
- Autorità di Bacino del fiume Po, sito: <http://www.hortus.it/adbp/Home.asp>.
- Cavallin A., Bonomi T. 1996. Effetti degli eventi meteorologici estremi sulle acque sotterranee: esempio nell'area milanese. Eventi estremi: previsioni meteorologiche ed idrogeologia. *Accademia Nazionale dei Lincei*. Roma, pp 117-130.
- Bonomi T., Cavallin A., 2007. La struttura idrogeologia e le variazioni piezometriche: elementi critici nella gestione delle acque sotterranee. *Giornale di Geologia Applicata* 5 (2007) 125-134.
- Cavallin, A., Bonomi, T., De Amicis, M., Rizzi, S., Trefiletti P., Tizzone R. 1999. Evoluzione della dinamica piezometrica nell'area milanese in funzione di alcuni fattori socio-economici. *Atti della Giornata Mondiale dell'acqua: acque sotterranee: risorsa invisibile*. 23 marzo 1998. Pubblicazione CNR-GNDCI n. 1955, 9-17.
- Cavallin A., Francani V., Mozzarella S. 1983. Studio idrogeologico della pianura compresa fra Adda e Ticino. *Riv. Costruzioni*, 326-327, 39 pp., Milano.
- Denti E., Francani V., Fumagalli L., Pezzera G., Sala P. 1988. Studio idrogeologico del foglio Vimercate I.G.M. 1:50.000. In *Studi Idrogeologici sulla Pianura Padana n.4*, Politecnico di Milano, 1988, Litotipografie Grafiche Somalia, Cormano, 1.1-1.39.
- Commissione Canali, (1976a). Commissione per lo studio dei problemi connessi con l'abbassamento dell'alveo del Po, relazione Idrogeologica, Navigazione interna, Gennaio-Marzo 1976. Magistrato per il Po, Parma.
- Commissione Canali, (1976b). Commissione per lo studio dei problemi connessi con l'abbassamento dell'alveo del Po, Relazione sui danni provocati dall'abbassamento dell'alveo del Po, Navigazione interna, Aprile-Giugno 1976. Magistrato per il Po.
- Marchetti M., 2002. *Geomorfologia fluviale*. Pitagora Editrice Bologna.
- Mariani L., 1998 - *Meteorologia e clima* - in *Programma regionale di previsione e prevenzione di protezione civile*, Regione Lombardia, 22-46.
- Marino C.M., 2007. L'acqua in Lombardia (atti del convegno RICLIC, 21 novembre 2007, pubblicati in [www.riclic.unimib.it](http://www.riclic.unimib.it))
- McKee, T.B., N.J. Doesken and J. Kleist, 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Preprints, 8th Conference on Applied Climatology*, 17-22 January, Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc., 179-184.
- Michael J. Hayes, Mark D. Svoboda, Donald A. Wilhite, and Olga V. Vanyarkho, 1999. Monitoring the 1996 Drought using the Standardized Precipitation Index. *American Meteorological Society*.
- Natale L. & Savi F., 1990. L'assetto del Po. *Consorzi di Bonifica associati alla derivazione di Boretto*, Reggio Emilia a Boretto. Provincia di Milano, 1995. *Le risorse idriche sotterranee nella Provincia di Milano. Volume I: Lineamenti idrogeologici*. Assessorato all'Ambiente-Settore Ecologia, Milano.
- Provincia di Milano, 1996. *Brevi considerazioni relative all'innalzamento della falda in Provincia di Milano*. Assessorato all'Ambiente-Settore Ecologia, Milano.
- Provincia di Milano, 1997. *Sintesi delle elaborazioni predisposte dagli uffici provinciali per la progettazione di massima degli interventi di propria competenza*. Assessorato all'Ambiente-Settore Ecologia, Milano.
- Raffaelli L., Raimondi P., Rosti G., 1996. *Valutazioni sull'innalzamento della falda nella città di Milano nei primi anni '90*. Provincia di Milano.
- Regione Lombardia, 2006. *Usi e tutela delle acque in Lombardia. Linee strategiche, pianificazione e regole per un utilizzo razionale e sostenibile della risorsa idrica*.
- Regione Lombardia, Eni Divisione Agip, 2002. *Geologia degli Acquiferi Padani della Regione Lombardia*.
- Rossetti M., 1970. La decadenza morfologica degli alvei di corsi d'acqua della regione padana. *Atti dell'incontro sul trasporto solido dei corsi d'acqua della Valle Padana. Il Frantoio*, 8 (4), 29-42.
- Tibaldi, 2007. *Conferenza Cambiamenti Climatici*, Parma aprile 2007.



## Modellazione di flusso a densità variabile di un acquifero freatico salinizzato

Leonardo Piccinini, Valentina Vincenzi, Alessandro Gargini

Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Ferrara, pcr@unife.it, vncvnt@unife.it, gga@unife.it

### *Variable density flow modelling of a brackish water table aquifer*

**ABSTRACT:** In Padana plain, paleo-channels represent important fresh groundwater resources and are suitable for sand quarry excavations. In coastal zones, most of underground sediments are saturated by salt/brackish waters due to marine or lagoonal deposition environments; the reclamation of territories below the sea level produced the substitution with fresh infiltration waters, mainly where high permeability paleo-channels outcrop. Sands quarries below groundwater table in these shallow aquifers can affect groundwater flow. In the studied site salinity, temperatures and groundwater levels have been monitored continuously over 1 year and allowed the definition of the aquifer conceptual model. Then a variable density groundwater flow model has been set up and different simulation with SEAWAT-2000 have been performed, in order to predict the effects of the sand quarry on the interface position. First results show that 5 years after the quarry excavation the groundwater level in the aquifer decreases and a significant widening of the transition zone takes place below the excavation area.

**Key terms:** Variable density groundwater flow modelling, SEAWAT, Salinization, Continuous monitoring, Coastal aquifer

**Termini chiave:** Modellazione del flusso a densità variabile, SEAWAT, Salinizzazione, Monitoraggio in continuo, Acquifero costiero.

### **Riassunto**

Nei territori della pianura Padana i paleoalvei costituiscono importanti riserve d'acqua dolce, e rappresentano anche siti idonei all'estrazione di inerti sabbiosi. In particolare, nelle zone costiere gran parte dei sedimenti sono saturi di acque salate/salmastre di origine marina o lagunare; la bonifica di questi terreni, prevalentemente al di sotto del livello del mare, ha favorito la progressiva sostituzione con acque dolci di infiltrazione efficace, soprattutto nelle zone dei paleoalvei ad elevata permeabilità. In tali contesti l'escavazione di inerti al di sotto della superficie piezometrica può indurre modificazioni nella rete di flusso e nella profondità della zona di transizione tra acque dolci e salate. Lo studio idrogeologico di un acquifero freatico salinizzato, oggetto di escavazione di inerti, ha previsto la realizzazione di prove *in situ*, di un programma di monitoraggio del livello piezometrico, della temperatura e della salinità, su un intervallo temporale di oltre 1 anno idrologico, ed infine la modellazione numerica del flusso a densità variabile con SEAWAT-2000. Il modello concettuale derivato dai dati e riprodotto nella modellazione è quello di una lente di acqua dolce in galleggiamento sulle originarie acque salmastre. Successivamente alla calibrazione sui dati reali, sono state realizzate diverse simulazioni allo scopo di prevedere gli effetti di una cava sulla posizione e sullo

spessore della zona di transizione acqua dolce/salata. I primi risultati mostrano che dopo 5 anni dal termine delle operazioni di scavo, la realizzazione di un lago di cava induce una diminuzione dei livelli di falda nel suo intorno, mentre la zona di transizione subisce, al di sotto del lago, un sensibile aumento di spessore.

### **Introduzione**

La porzione nord orientale della Regione-Emilia Romagna è costituita da una pianura costiera che, per la gran parte, si trova al di sotto del livello del mare ed in cui i numerosi paleoalvei sabbiosi del sistema deltizio del fiume Po (Castiglioni *et alii*, 1999) costituiscono spesso un'importante riserva di acqua dolce, in equilibrio con le acque salate o salmastre tipiche degli ambienti deposizionali di transizione. Data l'elevata permeabilità relativa, i paleoalvei costituiscono le principali zone di ricarica sia diretta, dalle precipitazioni, che laterale, dai numerosi canali per l'irrigazione o la navigazione che ne seguono il tracciato.

Il blocco delle escavazioni di inerti su tutti gli alvei della Regione Emilia-Romagna nel 1990, volto a garantire il ripristino del trasporto solido dei fiumi verso il litorale, ha spostato l'interesse sui paleoalvei come siti idonei all'escavazione di sabbia. L'escavazione di sabbia in questi contesti di pianura comporta l'asportazione della

porzione più superficiale dell'acquifero freatico e la creazione progressiva di un lago artificiale: tutto ciò può indurre locali modificazioni alla rete di flusso sotterranea attraverso l'innalzamento della zona di transizione tra acque dolci ed acque salate/salmastre, con un aumento della salinità complessiva dell'acquifero in un ecosistema già intrinsecamente fragile.

La realizzazione di un'area di cava nella pianura costiera ferrarese, che interesserà un acquifero freatico ad acque salmastre, ha richiesto il monitoraggio e la modellazione del sistema per la sua comprensione e la previsione dei possibili effetti indotti dalla cava.

### Inquadramento geologico dell'area

Il sito è localizzato nella porzione orientale del comune di Ostellato (provincia di Ferrara), nei pressi della confluenza fra i canali Circondariale (ad uso irriguo) e Navigabile (Idrovia Ferrarese), ad una distanza di circa 8 km dalla costa adriatica; si tratta di una porzione di pianura con quote comprese tra 0 e -4 m s.l.m. (Figura 1). L'area di cava interesserà il più meridionale tra i principali paleoalvei del Po, caratterizzato dalla presenza di sabbie a partire da circa 2 m da p.c.; si tratta del Padòa-Eridano o Padovetere (Bondesan, 1990; Bondesan &

Giovannini, 1994; Castiglioni et al., 1999) antico ramo del Po già estinto nei secoli VII°-VIII° d.C. (Veggiani, 1974; Bondesan, 1985).

La ricostruzione stratigrafica, derivata dalle stratigrafie di oltre 39 tra pozzi e piezometri perforati tra il 1960 ed il 2004 (database geognostico Regione Emilia-Romagna), integrate dalla realizzazione, nel 2005, di 3 nuovi sondaggi per l'installazione di altrettanti piezometri nei pressi della futura area di cava (PZP1, PZP2 e PZP6), ha evidenziato al tetto la presenza di una formazione eterogenea a prevalente componente limosa che aumenta progressivamente di spessore verso Nord in allontanamento dal Canale Navigabile e dall'asse del paleoalveo (Figura 2 e Figura 3). L'orizzonte sabbioso principale si estende da circa 2 m di profondità da p.c. sino a circa 17 m, quindi per uno spessore massimo di 15 m, ed è costituito da sabbie fini e medie con intercalazioni limose che divengono più frequenti verso il basso. Segue un livello di circa 5 m rappresentato da limi e limi argillosi, che separa il primo litosoma sabbioso da un secondo di spessore inferiore (5-7 m, fra circa 22 e 27-29 m da p.c.) e costituito da sabbie fini e sabbie limose. La base del sistema si rinviene tra 27 e 29 m da p.c. con la comparsa di un orizzonte di argille grigie compatte.

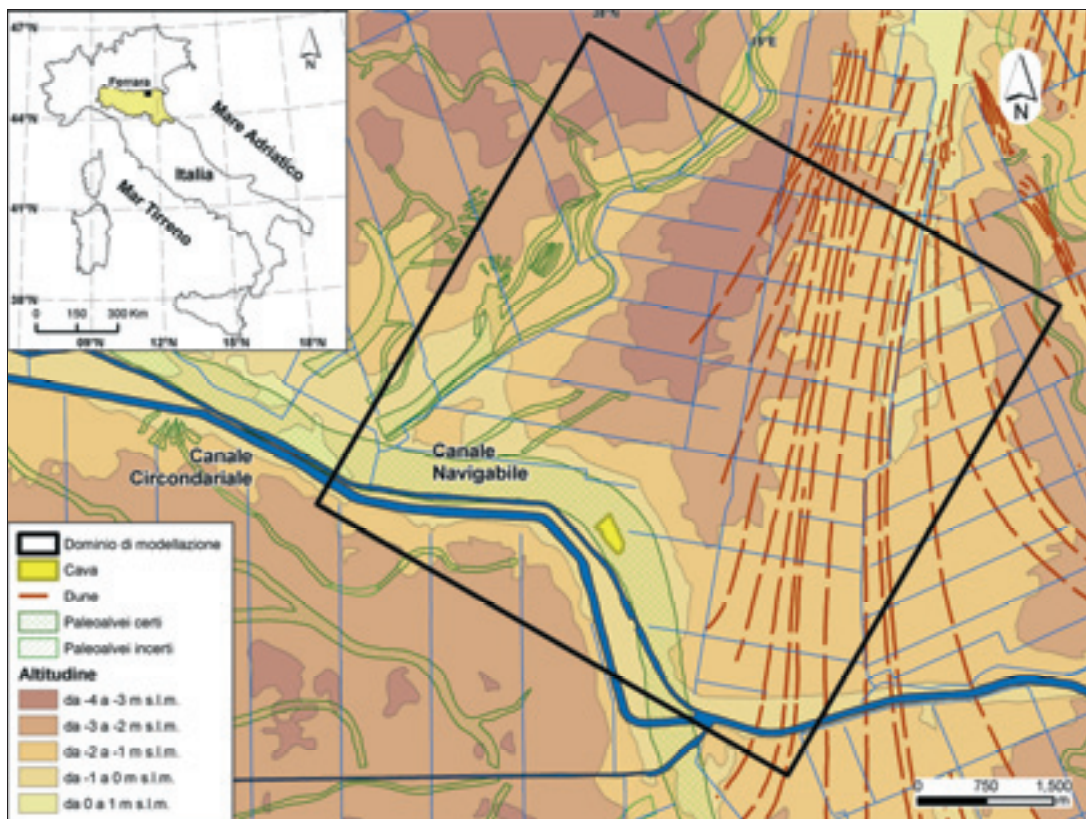


Figura 1. Carta geomorfologica (modificata da Castiglioni *et alii*, 1999) con ubicazione del sito di studio e del dominio di modellazione; per quote del piano campagna inferiori ai -2 m s.l.m. la litologia affiorante è limoso-argillosa.

Figure 1. Geomorphological map (modified from Castiglioni *et alii*, 1999) with test site location and model domain; where ground level is below -2 m a.s.l., the lithology is represented by silts and clays.



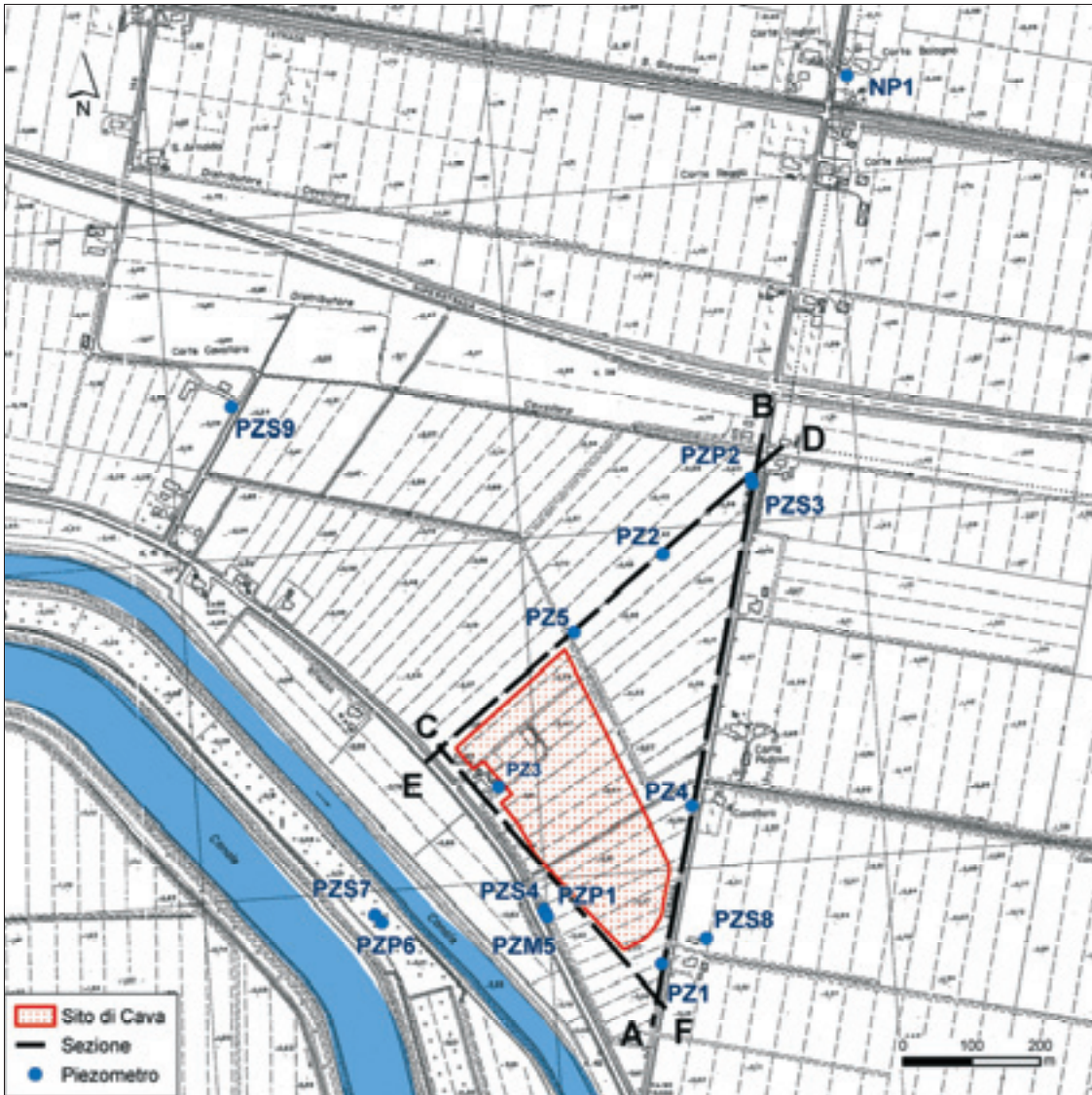


Figura 2. Planimetria del sito oggetto di studio con le tracce delle sezioni geologiche.  
 Figure 2. Map of the test site and traces of the geological sections.

Lateralmente il litosoma sabbioso principale passa gradualmente a depositi sabbiosi di duna verso Est ed a depositi limoso-argillosi propri di ambienti lagunari sia verso Nord sia verso Sud; tali transizioni laterali di facies sedimentaria sono tipiche dei sistemi deposizionali deltizi dove i canali distributori si insinuano all'interno di aree di intercanale e di cordoni litorali.

### Metodologia

La ricerca ha previsto una fase di prove e monitoraggi *in situ* ed una fase di modellazione numerica.

Al fine di definire un modello idrogeologico concettuale dettagliato nonché di acquisire dati di *input* e di calibrazione per la modellazione del flusso a densità variabile, sono state eseguite prove in foro per la parametrizzazione idrodinamica dell'acquifero, campagne

di monitoraggio discontinuo della conducibilità elettrica ed è stata messa in opera una rete di monitoraggio in continuo sia dei livelli piezometrici, sia della conducibilità elettrica.

La determinazione sperimentale della conducibilità idraulica (K) dell'acquifero sabbioso ha previsto, su 9 piezometri, l'esecuzione di *Slug* e *Bail Test* (Civita *et alii*, 1999), elaborati secondo i metodi di *Hvorslev* (1951) e di *Bouwer & Rice* (1976). Non si è ricorso a prove di pompaggio di lunga durata onde evitare il richiamo di acqua salata dalle porzioni inferiori dell'acquifero con effetti indesiderati di modifica del regime di salinità e di interferenza con il monitoraggio. Sul corpo arginale del Canale Navigabile sono state eseguite 5 prove infiltrometriche *in situ* con *Amoozometer* (Amoozegar, 1992).



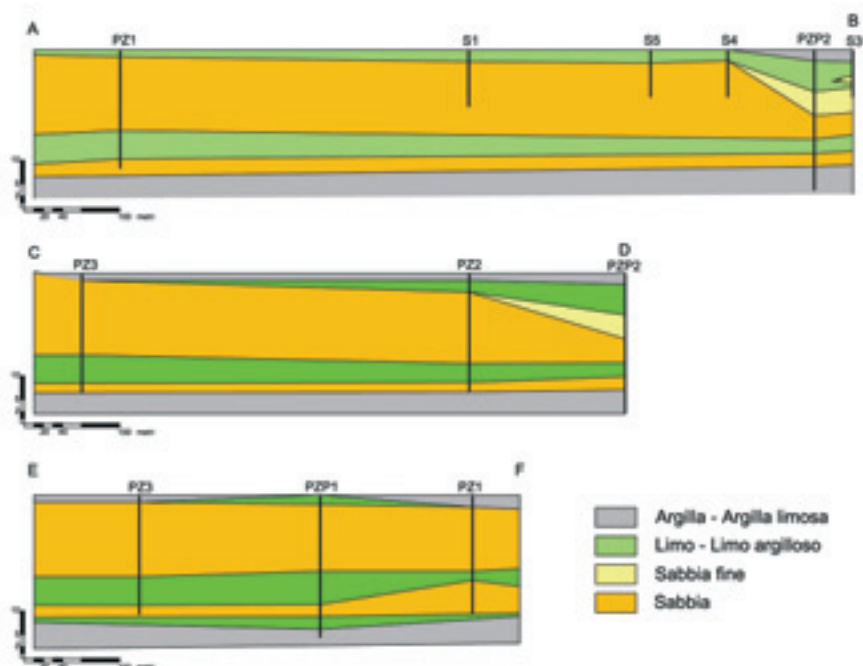


Figura 3. Sezioni geologiche (il piano campagna corrisponde mediamente a 0 m s.l.m.; traccia in Fig. 2).  
 Figure 3. Geological sections (ground surface is about 0 m a.s.l.; trace in Fig.2).

Il monitoraggio discontinuo è consistito nella misura della conducibilità elettrica (con sonda multiparametrica) per ogni metro in direzione verticale all'interno dei piezometri più profondi, filtranti l'acquifero per l'intero suo spessore (Tabella 1). Sono state realizzate 15 campagne di misura durante il periodo di monitoraggio (agosto 2005 - settembre 2006). La ricostruzione di questi profili verticali ha permesso di individuare la zona di interfaccia tra acque dolci e acque salmastre.

La rete di monitoraggio in continuo si è avvalsa di un totale di 27 sensori distribuiti in 8 piezometri di profondità variabile, ubicati in un intorno significativo all'area di cava (Tabella 1; Figura 2). I parametri monitorati sono stati: il livello piezometrico, la temperatura e la conducibilità elettrica specifica (espressa in  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e riferita ad una temperatura dell'acqua di  $25^\circ\text{C}$ ). Tutti i parametri sono stati acquisiti con cadenza oraria su un intero anno idrologico, dal 25 agosto 2005 al 20 settembre 2006. Particolarmente interessante è stata la realizzazione di una verticale di misura in continuo della conducibilità elettrica attraverso l'installazione di 3 sensori, a profondità variabile, in un piezometro filtrante tutto lo spessore dell'acquifero (PZP1).

Per la previsione degli effetti indotti sull'acquifero dalla realizzazione del lago di cava è stato implementato un modello 3D di flusso a densità variabile con il codice SEAWAT-2000 sviluppato da U.S. Geological Survey (Guo & Langevin, 2002; Langevin et al., 2003); esso accoppia MODFLOW-2000 (Harbaugh et alii, 2000) con MT3D-MS (Zheng & Whang, 1998), entrambi codici numerici per la risoluzione, alle differenze finite,

rispettivamente del flusso e del trasporto nei mezzi porosi. È stata utilizzata l'interfaccia Visual Modflow 4.1 (©Waterloo Hydrogeologic, Inc.).

Tabella 1. Principali caratteristiche dei piezometri di monitoraggio; ubicazione in Fig. 2.  
 Table 1. Main features of monitoring boreholes; location in Fig. 2.

ID	Quota bocca foro (m s.l.m.)	Profondità (m da p.c.)	Diametro (")	Inizio filtro (m da p.c.)	Fine filtro (m da p.c.)
PZP1	-0.15	27	4	3	27
PZP2	-0.45	24	3	21	24
PZS3	-0.51	13	3	6	13
PZS4	-0.08	12	3	6	12
PZM5	-0.14	25	3	21	25
PZP6	0.62	27	3	21	27
PZS7	0.62	13	3	6	13
PZS8	0.11	12	3	6	12
PZS9	-0.40	12	3	6	12
PZ1	0.61	25	3	8	25
PZ2	0.63	25	3	4	25
PZ3	0.63	25	3	4	25
PZ4	0.33	20	3	4	20
PZ5	0.51	20	3	4	20

### Modello concettuale dell'interfaccia in zone altimetricamente depresse

In Figura 4 il livello nei piezometri PZP1 e PZS3 è comparato con le precipitazioni durante l'anno di monitoraggio (stazione pluviometrica "Valle Lepri", del Consorzio di Bonifica II Circondario Polesine di San Giorgio). Il rapido innalzamento del livello piezometrico a seguito degli eventi di precipitazione individua un comportamento da acquifero libero, nonostante la presenza di una copertura prevalentemente limosa.

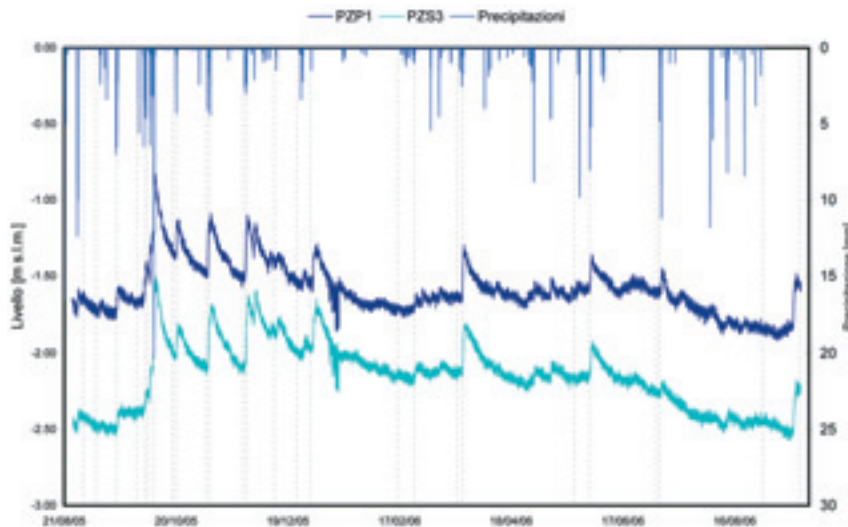


Figura 4. Andamento dei livelli piezometrici orari e delle precipitazioni giornaliere; le linee verticali indicano la suddivisione in *stress period*.

Figure 4. Hourly hydraulic heads and daily rainfall vs. time; vertical lines indicate stress periods subdivision.

La recessione estiva inizia a giugno e termina a settembre: in questo periodo si registrano i livelli minimi e le precipitazioni non hanno alcun effetto di ricarica sull'acquifero. Il livello nel piezometro PZP1, nei pressi del canale Navigabile, è sempre più elevato che nel piezometro PZS3 indicando una direzione di flusso preferenziale verso Nord-Est e confermando il ruolo dei canali come limiti a potenziale imposto.

I profili verticali della conducibilità elettrica rappresentano una sorta di istantanea, con risoluzione metrica, della distribuzione della salinità nell'acquifero. I *logs* di conducibilità che meglio caratterizzano la distribuzione verticale della salinità nell'area di studio sono quelli rilevati ai piezometri PZP1 e PZ2 (Figura 5). In entrambi si individua una zona di transizione che inizia fra -16 m (PZP1) e -14 m (PZ2) s.l.m. e presenta uno spessore, rispettivamente, di circa 3 e 4 metri. La profondità del limite superiore della zona di transizione tende ad aumentare allontanandosi dal Canale Navigabile.

L'acqua posta al di sotto della zona di transizione presenta valori diversi di conducibilità elettrica, differenziando questa situazione dai casi di intrusione marina tradizionale in cui, al di sotto dell'interfaccia, la salinità è tipicamente quella dell'acqua marina (circa 57000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ): infatti, mentre al PZP1, al di sotto della zona di transizione, il valore della conducibilità elettrica specifica è pari a circa 16000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , al PZ2 è pari a più di 40000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La salinità varia comunque anche superficialmente passando da 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  presso il Navigabile a 3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  verso Nord-Est.

Sia lo spessore di acqua dolce che la profondità di ritrovamento dell'acqua salata diminuiscono, quindi, seguendo la direzione preferenziale di flusso. Anche nell'ambito di uno stesso "strato" di acqua è presente un gradiente di concentrazione secondo la direzione di flusso

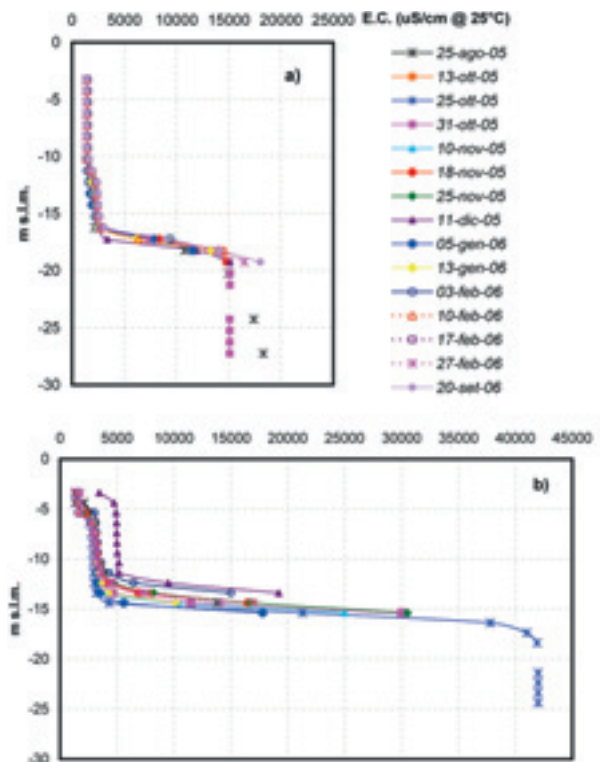


Figura 5. Profili verticali di conducibilità elettrica delle acque sotterranee all'interno di due piezometri rappresentativi del sito: a) PZP1, in prossimità del canale (minor salinizzazione e maggior profondità della zona di transizione); b) PZ2, distante dal canale, acque più salinizzate ed interfaccia più alta; ubicazione in Fig. 2.

Figure 5. Groundwater specific conductance vertical profiles inside two representative boreholes: a) PZP1, near to the canal (lower salinization and higher depth to transition zone); b) PZ2, faraway from the canal (higher salinization, lower depth to transition zone).

principale ed in allontanamento dal limite di alimentazione.

Questo, pertanto, indica la presenza all'interno dell'acquifero di una lente di acqua dolce allungata secondo la direzione del sistema paleoalveo/canale e sovrapposta ad un originario strato di acqua salata. La forma e la dimensione della lente è regolata dalla ricarica laterale del canale, dalla ricarica zenitale sul paleoalveo e dalle proprietà idrodinamiche dell'acquifero (permeabilità e immagazzinamento).

La bonifica meccanica e le relative sistemazioni idrauliche dell'ultimo secolo hanno generato un fenomeno di diluizione e progressiva sostituzione dell'acqua salata da parte di acqua dolce di infiltrazione efficace e ricarica laterale. Tale processo è ostacolato dalla bassa altitudine dei territori e dal fenomeno di ingressione marina lungo la rete di canali, laghi e lagune costiere, oltre che lungo il tratto terminale del fiume Po. Nelle zone poste sotto il livello del mare, pertanto, l'interfaccia è sub-orizzontale e tende ad approfondirsi al di sotto delle fasce dove il carico idraulico "dolce" è maggiore (canali disperdenti, paleo-alvei; Bondesan *et alii*, 2000). Del resto proprio i valori di salinità alla base dell'acquifero indicano che non vi è relazione diretta con acque del cuneo di ingressione marina vera e propria che studi a carattere regionale pongono per la zona ad oltre 50 m di profondità (Regione Emilia – Romagna & ENI - AGIP, 1998).

La presenza di 3 sensori di conducibilità elettrica nel piezometro PZP1, installati rispettivamente alle profondità di 7, 15 e 22 m da p.c., mette in luce le variazioni di CE lungo una stessa verticale (Figura 6a). A 7 m di profondità CE varia da 1219 a 1325  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; a 15 m varia da 1380 a 2630  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con un valore medio di 2309  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; a 22 m varia da 5070 a 20170  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con un valore medio di 16000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Durante le stagioni in cui l'infiltrazione efficace è attiva, la risposta rapida e diretta agli eventi di precipitazione è ben evidente: l'infiltrazione diretta di acque dolci produce un immediato innalzamento del livello nel piezometro ed un altrettanto rapido abbassamento dell'interfaccia.

Diverso è il comportamento nel piezometro PZS3 (Figura 6b) dove la salinità in superficie è più elevata, in relazione alla distanza dal limite di alimentazione costituito dal canale, variando da 5370 a 8470  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con un valore medio di 6507  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La spiegazione risiede nel fatto che il piezometro si trova al limite della zona di transizione, in posizione distale rispetto al canale ed al paleoalveo; allontanandosi da questi ultimi, infatti, un livello superficiale di limi e limi argillosi, con una matrice sabbiosa solo localmente rilevante, isola parzialmente l'acquifero dando luogo a condizioni di semi-confinamento: le repentine variazioni di carico piezometrico in risposta alle precipitazioni (Figura 4) sono da imputare all'innalzamento piezometrico generale per ricarica efficace nella zona del paleoalveo; mentre

l'andamento della conducibilità è spiegabile con una lenta risposta del sistema alla ricarica stessa. In altre parole, allontanandosi dal paleoalveo il *transfert* di pressione si dimostra progressivamente più rapido del *transfert* di massa (come dimostrato, in un contesto idrogeologico analogo di ricarica laterale da Po, in Gargini & Messina, 2004). Questa ipotesi trova conferma nell'andamento della CE nel piezometro PZ4 (Figura 6b), in posizione intermedia tra PZP1 e PZS3: la minor salinità e le oscillazioni di minor ampiezza confermano tra l'altro il modello concettuale del corpo di acqua dolce in galleggiamento sulle acque salmastre.

## Modellazione numerica a densità variabile

### Discretizzazione del dominio

Le 42 stratigrafie disponibili hanno permesso una buona rappresentazione della geometria del sistema; le superfici sono state ottenute attraverso l'interpolazione dei dati puntuali con il metodo della minima curvatura (Briggs, 1974). Il dominio di modellazione è stato individuato in un'area di 6x6 km (riportato in Figura 1 e Figura 7), discretizzato secondo una griglia a dimensione variabile suddivisa in 21 *layers*, con dimensione delle celle compresa tra 10x10 m, nei pressi dell'area di cava, e 200x200 m sui bordi del dominio.

Il primo *layer* è stato utilizzato per la rappresentazione dei limi superficiali; l'acquifero principale è stato suddiviso in 12 *layers* di circa 1 metro di spessore per una riproduzione ottimale delle variazioni di salinità lungo la verticale; l'acquifero argilloso sottostante è costituito da 3 *layers*; la porzione più profonda di acquifero è rappresentata da 4 *layers*, mentre l'ultimo *layer* riproduce l'acquifero alla base del sistema.

### Parametrizzazione idrodinamica

Alla porzione superiore dell'acquifero è stato assegnato un valore iniziale di conducibilità idraulica (K) compreso nel range  $1-2 \times 10^{-4}$  m/s mentre alla inferiore è stato assegnato un valore compreso nel range  $10^{-5}-10^{-6}$  m/s. Alle celle rappresentanti il corpo arginale del canale è stata assegnata una K di  $10^{-7}$  m/s, derivata da prove infiltrometriche *in situ* con *Amoozometer* (Amoozegar, 1992) eseguiti sulle arginature. Per l'assegnazione dei valori di K allo strato limoso superficiale ed agli acquiferi all'interno ed alla base dell'acquifero sono stati utilizzati dati sperimentali derivanti da litologie analoghe in contesti limitrofi (Colombani *et alii*, 2007). I valori di conducibilità idraulica di tutte le zone sono stati successivamente affinati durante il processo di calibrazione automatica eseguito con PEST (Doherty, 2001); i valori finali sono presentati in Tabella 2 e la loro distribuzione sul dominio è visualizzata in Figura 7.

### Condizioni iniziali e condizioni al contorno

I valori iniziali relativi all'immagazzinamento sono stati desunti da letteratura (Anderson & Woessner, 1992), a



causa della mancanza di dati sito-specifici, ed analogamente a K sono stati affinati durante la calibrazione; i valori finali sono presentati in Tabella 2. Le condizioni iniziali per il flusso sono state ottenute da una campagna piezometrica appositamente realizzata

all'inizio dell'anno idrologico, mentre per il trasporto sono state derivate dai profili verticali di conducibilità elettrica attraverso l'interpolazione tridimensionale delle salinità.

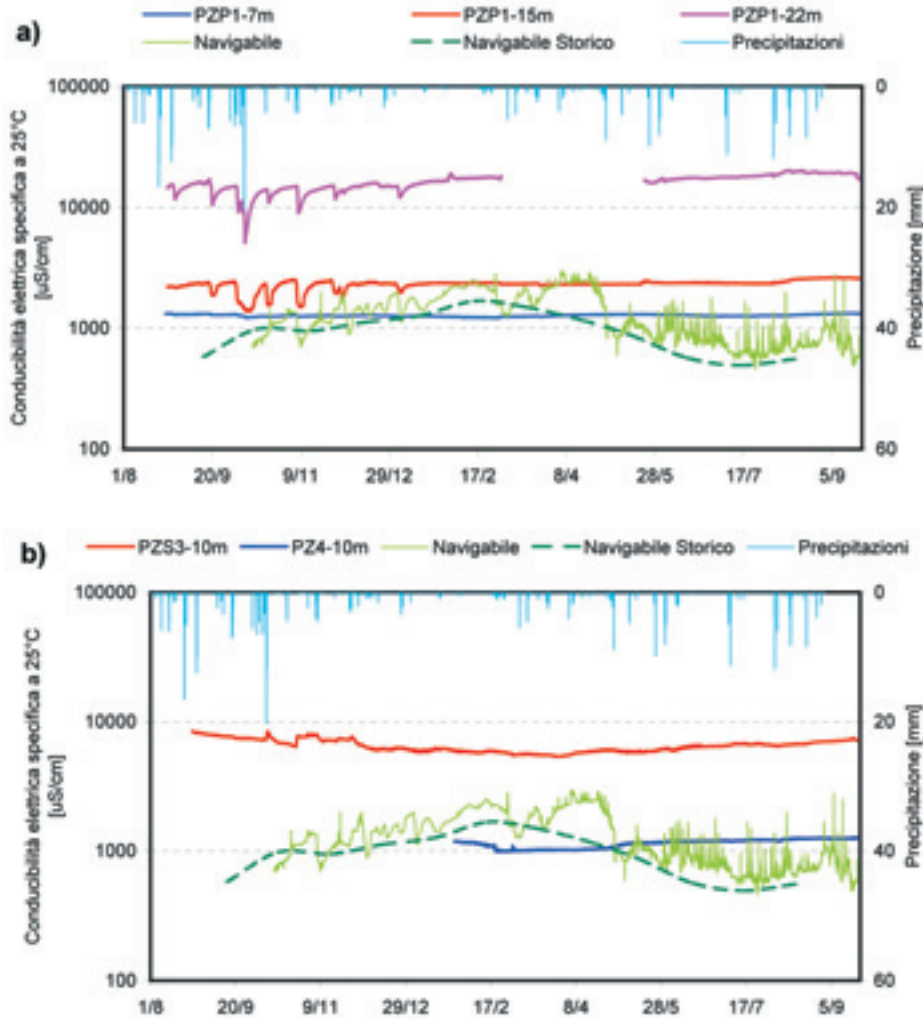


Figura 6. Regime di conducibilità elettrica nei piezometri di monitoraggio in relazione con le precipitazioni giornaliere e la conducibilità del Canale Navigabile (dati giornalieri e medie storiche mensili relative al periodo 1995-2004, dati ARPA Emilia-Romagna): a) 3 diverse profondità nel piezometro PZP1; b) piezometri PZS3 e PZ4.

Figure 6. Specific conductance vs. time inside monitoring boreholes, compared to daily rainfall and canal specific conductance (daily monitoring and 1995-2004 monthly historic means): a) 3 different depth inside PZP1 borehole; b) PZS3 and PZ4 boreholes.

Tabella 2. Parametrizzazione dell'acquifero: conducibilità idraulica e valori di immagazzinamento assegnati alle differenti zone del dominio di Fig. 6.

Table 2. Aquifer parameterization: hydraulic conductivity and storage values assigned to the different zones of Fig. 6.

Zona	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)	Ss (1/m)	Sy ( )	ne ( )	n ( )
1	2.28E-04	2.28E-04	2.28E-04	2.30E-05	0.20	0.20	0.30
2	1.00E-07	1.00E-07	1.00E-08	2.00E-02	0.06	0.06	0.45
3	3.80E-05	3.80E-05	3.80E-05	1.00E-03	0.03	0.03	0.35
4	1.27E-06	1.27E-06	1.27E-07	2.00E-02	0.10	0.10	0.35
5	3.97E-06	3.97E-06	3.97E-07	2.65E-03	0.15	0.15	0.35
6	0.1	0.1	0.1	0.9	0.9	0.9	0.9

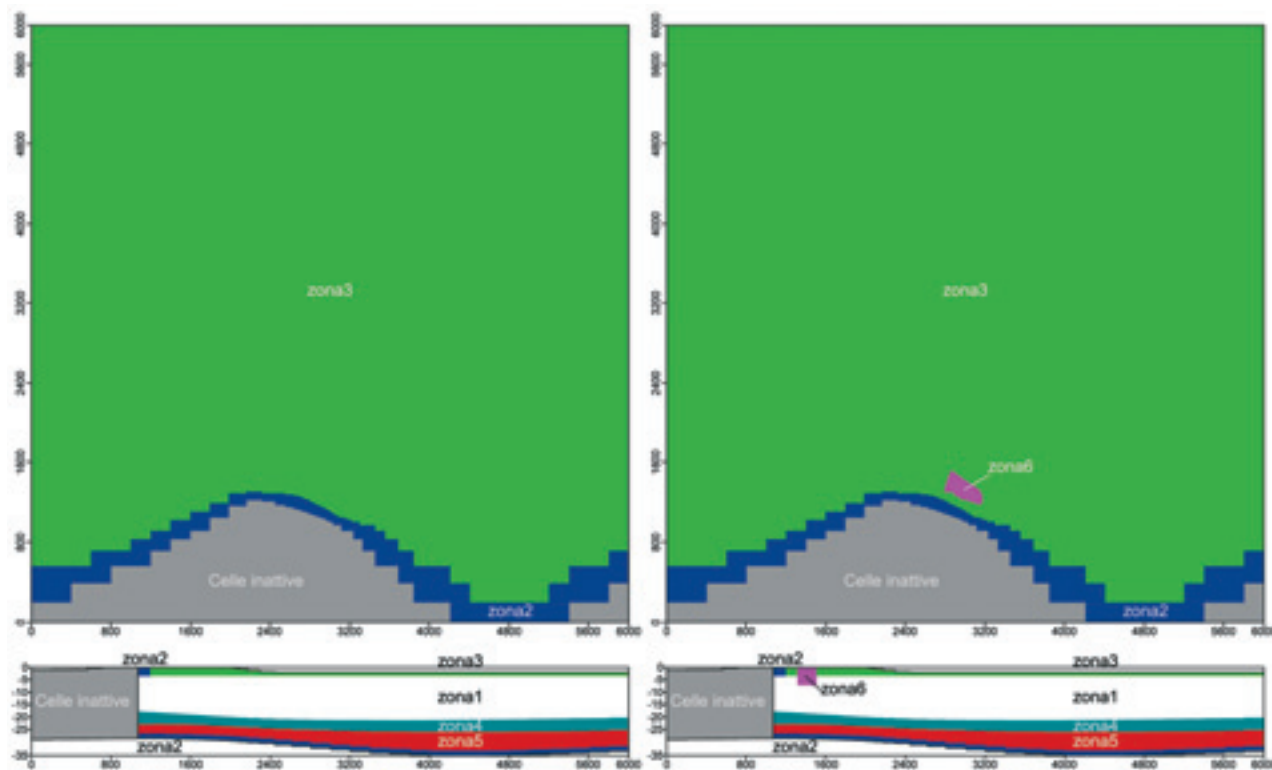


Figura 7. Parametrizzazione idrodinamica dell'acquifero (a sinistra senza il lago di cava, a destra con il lago di cava).  
 Figure 7. Aquifer hydrodynamic parameterisation (on the left without the quarry lake; on the right with the quarry lake).

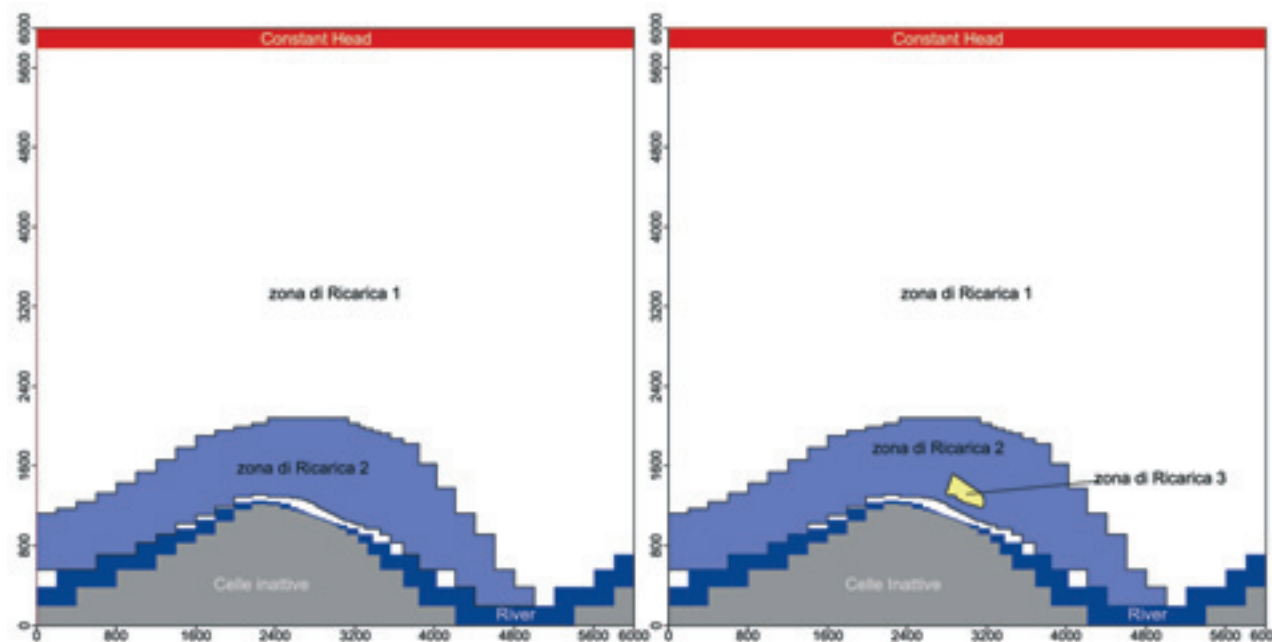


Figure 8. Condizioni al contorno (a sinistra senza il lago di cava, a destra con il lago di cava).  
 Figure 8. Boundary conditions (on the left without the quarry lake; on the right with the quarry lake).

Una condizione al contorno del 3° tipo (RIVER nel pacchetto MODFLOW; McDonald and Harbaugh 1988) è stata applicata per simulare il canale alimentante

l'acquifero (Figura 8) ed una condizione del 1° tipo (CONSTANT HEAD nel pacchetto MODFLOW) è stata assegnata al limite settentrionale per simulare un flusso

uscite dal limite stesso. I valori di ricarica per i 24 *stress period* sono stati inizialmente calcolati dalle precipitazioni giornaliere, applicando un semplice modello analitico di bilancio del suolo (Alley, 1984) e successivamente ottimizzati con PEST. I valori di ricarica più elevati sono stati applicati alla porzione di dominio coincidente con il paleoalveo (zona 2 in Figura 8), come risultato della permeabilità più elevata e/o del minor spessore dell'orizzonte limoso superficiale.

#### Relazione sperimentale Conducibilità Elettrica-Salinità

Fondamentale è stata la ricerca di una relazione empirica che legasse la conducibilità elettrica specifica alle concentrazioni di cloruro (mg/l) o al *Total Dissolved Solids* – TDS (mg/l). Langevin (2001), a partire da dati sperimentali raccolti in un contesto di intrusione marina, ha derivato una relazione empirica che lega la concentrazione di ione cloruro disciolto Cl<sup>-</sup> (mg/l) alla Conducibilità Elettrica specifica CE (Figura 9). Per il presente studio sono stati utilizzati alcuni dati idrochimici derivanti da campionamenti svolti in fase di progettazione della cava (sia di acque superficiali del canale Navigabile che di piezometri nella zona di cava); in Figura 9 è riportata la relazione sperimentale ottenuta, la cui equazione è la seguente:

$$\text{Cl}^- (\text{mg/l}) = 10^{-6} \times \text{CE}^2 + 0,2857 \times \text{CE} - 99,484$$

Per il successivo passaggio da cloruro a TDS si è utilizzata la semplice proporzione che assume, per l'acqua di mare, una concentrazione di cloruro pari a 19800 mg/l ed un TDS pari a 35000 mg/l (Parker *et alii*, 1955); questa relazione lineare porta ad errori piccoli (minori dell'1-2%) ed è stata quindi ragionevolmente utilizzata in molti studi di modellazione dell'intrusione marina (tra cui i recenti: Langevin, 2001; Dausman & Langevin, 2005). Ne è risultata la seguente relazione sito-specifica tra

conducibilità elettrica specifica a 25°C e TDS, rappresentata in Figura 9:

$$\text{TDS} (\text{mg/l}) = 2 \times 10^{-6} \text{CE}^2 + 0,505 \text{CE} - 175,86$$

con la quale sono stati trasformati tutti i valori di conducibilità elettrica del monitoraggio in valori di soluto disciolto espresso come TDS (mg/l).

#### Modellazione del flusso a densità variabile

Il codice numerico scelto per le simulazioni è SEAWAT-2000 (Guo & Langevin, 2002; Langevin *et al.*, 2003). I risolutori, utilizzati rispettivamente per il flusso e per il trasporto, sono PCG2 (*Preconditioned Conjugate-Gradient Package*; Hill, 1997) e TVD (*Third-Order Total-Variation-Diminishing method*; Zheng & Wang, 1999).

I valori iniziali di dispersività sono stati desunti da letteratura (Schulze-Makuch, 2005) e sono stati affinati durante la calibrazione; i valori finali, post-calibrazione, sono presentati in Tabella 2. La dispersività longitudinale ( $\alpha_L$ ) è risultata di 10 m, quella trasversale ( $\alpha_T$ ) di 1 m e quella verticale ( $\alpha_V$ ) di 0,1 m; il basso valore di  $\alpha_V$  è giustificato dal sottile spessore dell'interfaccia acqua dolce/salata. Inoltre è stato utilizzato un valore del coefficiente di diffusione molecolare di  $10^{-2} \text{m}^2/\text{g}$ .

Una prima simulazione in transitorio, relativa all'anno idrologico di monitoraggio, è stata eseguita per comparare i risultati del modello con i dati acquisiti. La discretizzazione temporale in 24 *stress period* tiene conto dei dati piezometrici del monitoraggio in continuo e della relazione con gli eventi di precipitazione: in Figura 4 le linee verticali individuano e separano i 24 *stress period*. Attraverso l'uso di PEST è stato raggiunto un buon grado di calibrazione per i livelli ed un grado ritenuto sufficiente per la concentrazione di soluto.

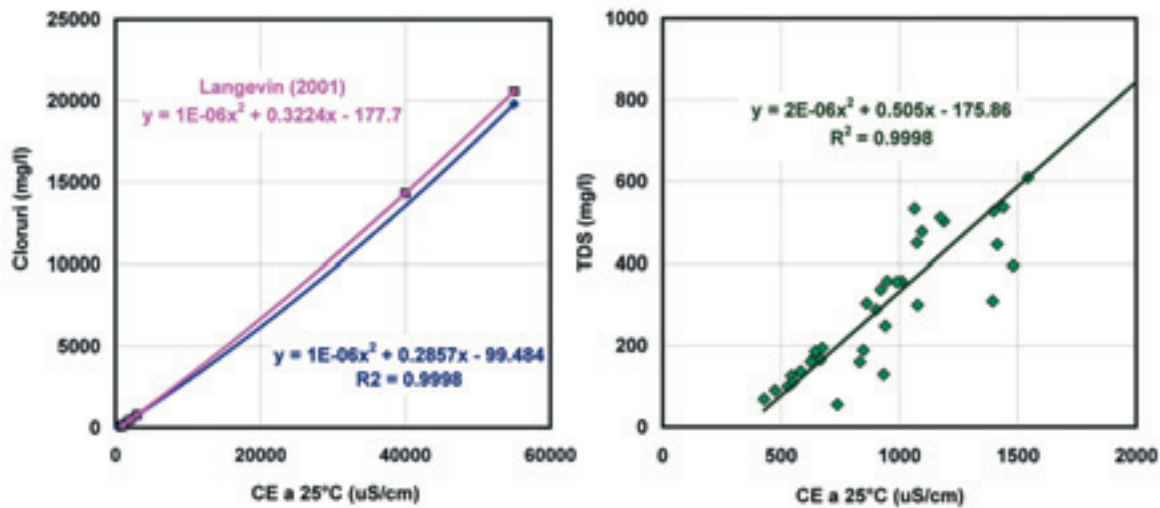


Figura 9. Relazione empirica “Cloruri vs. Conducibilità Elettrica” e “TDS vs CE” determinate sul sito e confronto con equazione sperimentale da bibliografia (Langevin, 2001).

Figure 9. Empirical relationships “Chloride vs. Specific Conductance” and “TDS vs CE” calculated with on site data and compared with literature data derived from Langevin (2001).



### **Simulazioni previsionali**

Per prevedere l'evoluzione dei livelli e delle salinità in condizioni naturali (senza il lago di cava) ed in condizioni perturbate (lago di cava per escavazione fino ad una profondità di 7 m da p.c.) sono state eseguite diverse simulazioni allo stato transitorio. Le simulazioni, su un intervallo temporale di 5 anni, sono state discretizzate in 60 *stress periods* di durata mensile.

Nella simulazione in condizioni naturali l'unica condizione al contorno modificata rispetto alla calibrazione è la ricarica: ad ogni *stress period* è stato assegnato un valore pari al 1.9% delle precipitazioni medie mensili sul periodo 1990 - 1998, ad esclusione dell'area del paleoalveo a maggior permeabilità, su cui è stata applicata una percentuale maggiore (19%). Questi valori sono stati applicati ciclicamente e derivano dal processo di calibrazione sull'anno idrologico di monitoraggio (rapporto tra ricarica alla falda e precipitazioni).

Nelle simulazioni in condizioni perturbate, il corpo d'acqua superficiale (ossia il lago che si crea per emergenza della falda sotterranea) è stato modellato assegnando alle celle rappresentanti l'area di scavo (primi 4 *layers*) valori molto elevati di  $K$  ( $10^{-1}$  m/s), del coefficiente di immagazzinamento (0.9) e della porosità efficace (0.9); sono indicate come zona 6 in Tabella 2, Figura 7 e Figura 8.

Le condizioni al contorno si differenziano dalla condizione naturale per l'applicazione sulle celle del lago di una ricarica pari alla precipitazione media mensile della zona (periodo 1990-1998) e di un'evaporazione da superficie di acqua libera, stimata utilizzando due diversi metodi: la classica formula di Visentini (1937) ed una più recente formula sperimentale reperita in Dragoni e Valigi (1994), dove viene anche dimostrato che la formula di Visentini tende a sovrastimare l'evaporazione mensile fino al 60%.

### **Risultati**

Il modello concettuale derivato dai dati sperimentali mette in evidenza le peculiarità del sito di studio, rappresentative di acquiferi superficiali nella pianura Padana costiera, dove il piano campagna si trova al livello del mare o al di sotto di esso, come conseguenza della bonifica idraulica di aree altimetricamente depresse e dei fenomeni di subsidenza indotti (questi ultimi anche causati dall'estrazione di metano nell'immediato dopoguerra).

Successivamente alla bonifica, l'acqua dolce, proveniente dalla ricarica e dall'irrigazione, comincia a sostituire l'originaria acqua salata/salmastra intrappolata all'interno dei sedimenti depositi in ambienti marini o di transizione. Questo processo è rapido sia dove sono presenti depositi permeabili sin dal piano campagna, per ricarica zenitale, sia lungo la rete idrografica dove la

disponibilità di acqua dolce è continua, per ricarica laterale.

I dati di monitoraggio e le simulazioni numeriche confermano il modello idrogeologico concettuale che individua, all'interno dell'acquifero, una lente di acqua dolce allungata secondo la direzione del sistema paleoalveo/canale sovrapposta ad un originario strato di acqua salata/salmastra. Allontanandosi dall'asse del paleoalveo, a causa di condizioni di maggior confinamento idrogeologico e della minore permeabilità dei sedimenti, il processo di progressiva sostituzione non è ancora avvenuto, perciò le acque presentano caratteristiche idrochimiche riconducibili agli originari ambienti di deposizione. In tali contesti la transizione tra acque dolci e salate non avviene secondo la tipica forma convessa verso mare, come previsto dalla legge di *Ghyben-Herzberg* (Ghyben, 1888; Herzberg, 1901) ma tramite una superficie più complessa, da sub-orizzontale a variamente inclinata in funzione del carico idraulico di acqua "dolce" e della permeabilità dell'acquifero.

In corrispondenza del paleoalveo, dove l'acquifero è libero, la profondità dell'interfaccia risulta particolarmente sensibile all'infiltrazione efficace: poche ore dopo un evento di precipitazione, la tavola d'acqua risale verso il piano campagna ed i valori di CE diminuiscono, poiché l'interfaccia si abbassa per effetto dell'aumento del carico di acqua dolce. Al di fuori del paleoalveo, dove l'acquifero diviene progressivamente confinato per la presenza di un livello superficiale di limi argillosi, a risentire dell'infiltrazione efficace in maniera immediata è solamente il carico piezometrico; l'interfaccia subisce oscillazioni che non sono più direttamente correlabili con il singolo evento pluviometrico ma con la stagionalità del fenomeno a lungo termine.

Le particolarità del modello idrogeologico concettuale rendono il processo di modellazione estremamente complesso. Il processo di calibrazione ha permesso una buona riproduzione dell'andamento dei livelli, mentre è risultata più difficoltosa la simulazione dei repentini cambi di conducibilità elettrica in risposta alle precipitazioni, a causa di una discretizzazione temporale troppo ampia per la riproduzione del fenomeno ma dettata dalla necessità di lavorare con tempi-macchina di calcolo ragionevoli.

La comparazione fra le simulazioni in transitorio su 5 anni (con e senza lago di cava) evidenzia un allargamento in senso verticale della zona di transizione al di sotto del lago (Figura 10), fenomeno che deriva dall'abbassamento medio del livello di falda per effetto sia dell'escavazione, sia dell'evaporazione diretta dalla superficie del lago. A questo proposito in Figura 10 vengono presentati i risultati di due simulazioni con valori di evaporazione diversi: il primo, pari ad un totale annuo di 1436 mm/anno, derivato applicando la formula di Visentini (1937; Figura 10b), il secondo pari a 1076 mm/anno

(formula di Dragoni & Valigi, 1994; Figura 10c). Il modello evidenzia l'influenza dell'evaporazione da superficie libera nel bilancio di massa del sistema, regolando la distribuzione verticale delle salinità al di sotto del lago.

Anche considerando lo scenario più sfavorevole l'effetto indotto sul sistema è minimo: rispetto alle condizioni naturali l'interfaccia acqua dolce/salata aumenta il proprio spessore di circa 1.5 metri al di sotto del lago. Considerando invece il limite di legge per la

potabilità delle acque ad uso umano (1100 TDS mg/L, pari a 2.5 mS/cm a 20°C secondo il D.Lgs. 31/01) la relativa isocona risale di circa 8 metri. La differenza tra i diversi scenari di evaporazione simulati è minima se si prende come riferimento la zona di interfaccia (compresa tra le isocone 4500 e 21500 mg/L al di sotto del lago; Figura 10); è di 0.5 m considerando l'isocona 1100 mg/L.

La rimozione del mezzo poroso e l'evaporazione vengono parzialmente contrastati dall'aumento della ricarica laterale di acqua dolce, dovuto all'instaurarsi di un maggiore gradiente idraulico tra canale e lago. Poiché il canale garantisce comunque una fonte costante di acqua dolce, in grado di contrastare la completa salinizzazione del lago di cava e della porzione di acquifero oltre il lago stesso, si può concludere che l'escavazione di sabbia nell'area oggetto di studio non comporta particolari criticità ambientali se realizzata al di sopra della zona di transizione tra acque dolci ed acque salate.

#### Post-audit della modellazione

L'escavazione del lago di cava, prevista per la metà del 2008, con una durata complessiva di 4 anni, prevede un'attività di monitoraggio in corso d'opera, allo scopo di verificare il reale impatto sul sistema idrogeologico e di validare il modello e gli scenari previsionali implementati.

Preliminarmente alla progettazione del piano di monitoraggio, è stato eseguito un nuovo sondaggio geognostico alla profondità di 30 m, successivamente completato a piezometro (con tratto filtrato da 1 a 24 metri da p.c.) ed ubicato 620 m dal PZS3 in direzione NE (Figura 2). Si è così verificata la congruenza della successione stratigrafica e del modello idrogeologico concettuale esternamente all'area oggetto del primo monitoraggio. La successione stratigrafica è risultata simile a quella nei pressi dell'area di cava, mentre la distribuzione dei valori di conducibilità ha confermato la progressiva scomparsa delle acque dolci allontanandosi progressivamente dal canale secondo la direzione preferenziale di flusso.

In Figura 11 sono confrontati i logs di conducibilità e temperatura eseguiti nell'ottobre 2007 nei piezometri PZP1,

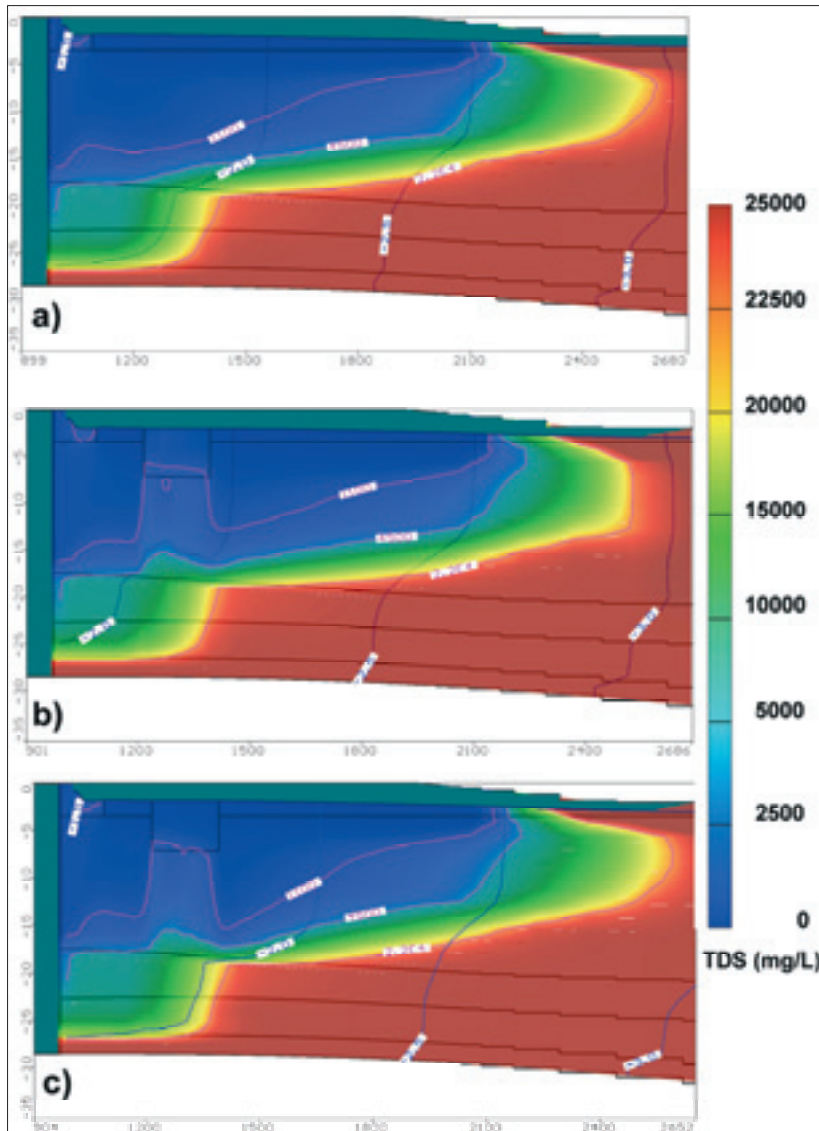


Figura 10. Risultati delle simulazioni: a) senza lago di cava; b) con il lago di cava ed evaporazione da superficie libera secondo Visentini (1953); c) con il lago di cava ed evaporazione da superficie libera secondo Dragoni & Valigi (1994); le linee magenta sono isocone corrispondenti a 1100, 4500 e 21500 TDS (mg/L).

Figure 10. Simulation results: a) without the quarry lake and evaporation from surface water estimated as in Visentini (1953); b) with the quarry lake and evaporation from surface water estimated as in Dragoni & Valigi (1994); the magenta lines represent the isoconcentrations of 1100, 4500 and 21500 TDS (mg/L).

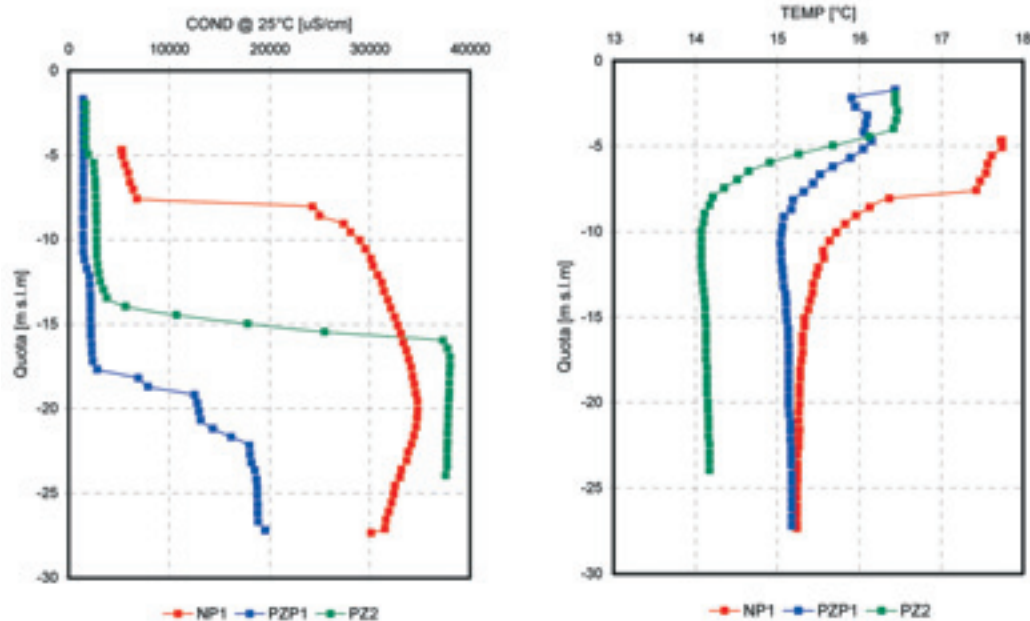


Figura 11. Logs di conducibilità elettrica ai piezometri PZP1, PZ2 e NP1 (in ordine da SO a NE).

Figure 11. Specific conductance logs measured inside the boreholes PZP1, PZ2 and NP1 (ordered from SW to NE).

PZ2 e NP1 (piezometro di nuova realizzazione): come si può vedere spostandosi in direzione NE dal canale si ha una progressiva risalita della zona di transizione acqua dolce/salata ed un progressivo aumento della salinità complessiva (sia in superficie che in profondità). Nel piezometro di nuova realizzazione immediatamente al di sotto dello strato superficiale di limi-limi argillosi compaiono acque salate/salmastre; l'acquifero, in questa zona, è saturato interamente da acque dall'elevato contenuto salino. E' interessante notare come anche gli andamenti della temperatura dell'acqua (Figura 11), soprattutto negli strati più superficiali dell'acquifero, confermino il progressivo confinamento dell'acquifero per la comparsa e l'aumento di spessore dell'aquitardo superficiale allontanandosi dal limite di alimentazione e dal paleoalveo.

## Conclusioni

Il monitoraggio in continuo dimostra ancora una volta la sua importanza per la comprensione di modelli idrogeologici complessi, dove il regime idrodinamico dipende da condizioni al contorno fortemente variabili in base alla stagionalità, dove la necessità di definire scenari previsionali richiede la conoscenza dei campi di

variabilità dei fenomeni e dove la modellazione numerica richiede un *dataset* consistente per le fasi di calibrazione e validazione.

La modellazione numerica si conferma un processo fondamentale per la comprensione e validazione del modello idrogeologico concettuale, soprattutto in sistemi complessi: la fase di integrazione dei dati, infatti, obbliga l'idrogeologo alla formulazione di un modello concettuale univoco, che sia in grado di spiegare tutti i dati nel modo più semplice e ragionevole possibile. Peraltro, un modello è un ottimo strumento per la definizione/ampliamento di una rete di monitoraggio, ad esempio in fase di post-audit, poiché individua le zone più sensibili su cui concentrare l'attenzione.

I risultati derivanti dal monitoraggio e dalla modellazione numerica rappresentano un valido contributo alla comprensione del flusso sotterraneo a densità variabile negli acquiferi delle pianure costiere. Essi mettono comunque in evidenza la fragilità degli equilibri fra acque superficiali e sotterranee in simili contesti e l'importanza di una gestione integrata di tali risorse, basata sul monitoraggio in continuo e sulla simulazione a scopo previsionale dei processi.

## Bibliografia

Alley, W. M., 1984. On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting, and aquifer recharge in monthly water balance models. *Water Resources Research*, 20, 1137-1149.

Amoozegar, A., 1992. Compact constant head

permeameter: A convenient device for measuring hydraulic conductivity. pp. 31-42. In Topp *et alii* (ed.) *Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice*. Special Publication No. 30, Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI.

Anderson M.P., Woessner W.W., 1992. *Applied groundwater modelling - Simulation of flow and advective transport*. San Diego, Calif., Academic Press, 381 p.

Bondesan, M., 1985. Quadro schematico dell'evoluzione geomorfologica olocenica del



- territorio costiero compreso tra Adria e Ravenna. in Atti Tav.rot. "Il Delta del Po-Sezione Geologica-Bologna 24 Novembre 1982", Acc.Sc.Ist.Bologna, Tip.Compositori, Bologna, 21-36.
- Bondesan, M., 1990. L'area deltizia padana: caratteri geografici e geomorfologici. in "Il Parco del Delta del Po - studi ed immagini - Vol.1 - L'ambiente come risorsa": 9-48, Spazio Libri Ed., Ferrara, Offset Invicta, Padova.
- Bondesan, M., Giovannini, A., 1994. Evoluzione geomorfologica della pianura costiera fra Codigoro e Comacchio (Ferrara). Ann.Univ.Ferrara, sez. Scienze della Terra, 5 (3), 27-38.
- Bouwer H., Rice R. C., 1976. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. Water Resources Research, v. 12, no. 3, p. 423-428.
- Briggs, I., C., 1974. Machine Contouring Using Minimum Curvature. Geophysics, 39 (1), 39-48.
- Castiglioni, G., B, Biancotti, A., Bondesan, M., Cortemiglia, G., C., Elmi, C., Bavero, V., Gasperi, G., Marchetti, G., Orombelli, G., Pellegrini, G., B., Tellini, C., 1999. Geomorphological map of the Po plain, Italy, at scale of 1:250.000. Earth Surf. Process, Landforms, 24,1115-1120.
- Civita M., Fiorucci A., Pizzo S., Vigna B. (1999) - *Utilizzazione estensiva delle prove rapide d'acquifero per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento*. Quaderni di geologia applicata, Pitagora editrice, Bologna. Vol I, pp. 1105-1113.
- Colombani N., Gargini A., Mastrocicco M., Messina A., 2007. L'acquifero di Settepolesini di Bondeno: una risorsa idrica potenzialmente alternativa per l'attingimento idropotabile della Provincia di Ferrara. Monitoraggio idrogeologico e modellazione numerica per la verifica della produttività del sistema. In: Risorse idriche sotterranee della Provincia di Ferrara, DBMAP, Firenze 2007, 63-80.
- Dausman A., Langevin C.D., 2005. Movement of saltwater interface in the surficial aquifer system in response to hydrologic stresses and water-management practices. Broward County, Florida: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2004-5256, 73 pp.
- Doherty J., 2001. PEST-ASP User's Manual. Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia.
- Dragoni W., Valigi D., 1994. Contributo alla stima dell'evaporazione dalle superfici liquide nell'Italia Centrale. Geologica Romana, v. 20, pp. 151-158.
- Gargini A., Messina A., 2004. Processi di trasferimento di massa e pressione in un acquifero sabbioso ricaricato lateralmente dal fiume Po: osservazioni basate su un sistema di monitoraggio in continuo. Atti XXIX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Trento (Settembre 2004), Vol. 2, pp.595-601.
- Ghyben, W., B., 1888. Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam. Tijdschrift van het Koninklijk Inst. Van. Ing.
- Guo, W., Langevin, C., D., 2002. User's guide to SEAWAT: A computer program for simulation of three-dimensional variable-density ground-water flow. U. S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A7, 77pp.
- Herzberg, A., 1901. Die Wasserversorgung einiger nordseebader. J. Gasbeleucht, Wasserversog., 44, 815-819.
- Hill, M., C., 1997. Preconditioned Conjugate-Gradient 2 (PCG2).A computer program for solving Groundwater Flow equations. USGS Water-Resources Investigations Report 90-4048.
- Hvorslev, M.J., 1951. Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations. Bull. No. 36, Waterways Exper. Sta. Corps of Engrs, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi, pp. 1-50.
- Langevin, C., D., 2001. Simulation of ground-water discharge to Biscayne Bay, southeastern Florida. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4251, 127 p.
- Langevin, C., D., Shoemaker, W., B., Guo, W., 2003. MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model – Documentation of the SEAWAT-2000 Version with the Variable-Density Flow Process (VDF) and the Integrated MT3DMS Transport Process (IMT). U.S. Geological Survey Open-File Report 03-426, 43 p.
- McDonald, M., G., Harbaugh, A., W., 1988. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1.
- Parker G.G., Ferguson G.E., Love S.K., and others, 1955. Water resources of southeastern Florida. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1255, 965 pp.
- Regione Emilia - Romagna, ENI – AGIP, 1998. Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna. A cura di Di Dio G., Ed. SELCA, Firenze.
- Schulze-Makuch D., 2005. Longitudinal Dispersivity Data and Implications for Scaling Behavior. Ground Water, 2005, 43-3, 443-456.
- Veggiani, A., 1974. Le variazioni idrografiche del basso corso del Po negli ultimi 3000 anni. In: "Padusa", Boll. del Centro Polesano di Studi Storici Archeologici ed Etnografici, 10 (1-2), 39-60.
- Visentini M., 1937. L'evapotraspirazione dagli specchi liquidi. Mem. e Studi idrografici, Pubblicazione n. 2 del Servizio idrografico, Ist. Poligrafico dello Stato, 9, Roma.
- Zheng, C., Wang, P. P., 1999. MT3DMS: A modular three-dimensional multispecies model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. Documentation and User's Guide, Contract Report SERDP-99-1, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS (USA).



## Indici

### Indice degli Autori

Allocca Vincenzo 175  
Baldi Bruna 153  
Bonomi Tullia 227  
Camorani Alessandro 215  
Canepa Paola 227  
Capelli Giuseppe 133  
Carmignani Luigi 153  
Catani Filippo 215  
Celico Pietro 175  
Cimino Antonio 93  
Clemente Paolo 163  
Cogo Elena 113  
Cosentino Claudia 93  
Cremonesi Marialuisa 207  
De Luca Domenico Antonio 163

Del Rosso Francesca 227  
Ermini Leonardo 215  
Fumagalli Letizia 199  
Gargini Alessandro 249  
Gigliuto Andrea 207  
Gorla Maurizio 103  
Guermanni Marina 199  
Kukavcic Minja 215  
Laruccia Nicola 199  
Mazza Roberto 133  
Menegon Alan 163  
Morelli Stefano 215  
Nucci Enrico 125  
Oieni Antonino 93

Perna Massimo 153  
Piccinini Leonardo 249  
Puppini Umberto 103, 125  
Quaranta Nicola 113  
Rainero Alberto 103 125  
Remonti Michele 103, 125  
Rossetti Alessia 227  
Rossetto Rudy 153  
Segoni Samuele 215  
Tangari Davide 207  
Taviani Sara 133  
Tognoni Alessandra 207  
Tranchina Luigi 93  
Vincenzi Valentina 249

### Indice dei termini chiave

Abbassamenti piezometrici, 175  
Acque sotterranee 163, 227  
Acquiferi costieri 93, 249  
Acquifero a doppia porosità 207  
Aree urbane 133  
Barriera idraulica 207  
Bilancio idrologico 227  
BTEX 207  
Cambiamenti climatici 227  
Campo pozzi 103  
Chiusura 163  
Contaminazione 207  
Delimitazione delle aree di salvaguardia 113  
Emungimenti 175  
Fontanili 103  
GALDIT 93  
Geodatabase 153, 215  
Gestione risorse idriche 153  
GIS153

GPS 215  
Idrocarburi petroliferi 207  
Idrogeologia 133  
Indice SPI 227  
Italia Meridionale 175  
MACRO 199  
Metodi a punteggi e pesi 93  
Modellazione del flusso a densità variabile 249  
Modello di flusso della falda 103  
Modello di simulazione 113  
Modello di trasporto di calore in falda 125  
Modello numerico 207  
Monitoraggio in continuo 249  
Napoli 175  
Opere in sottterraneo 175  
Pianificazione territoriale 215  
Pozzi 163  
Quantificazione misure mitigative 103  
Rete di monitoraggio 227

RICLIC-WARM 227  
Ricondizionamento 163  
Risalita della falda 175  
Rischi geologici 133  
Salinizzazione 249  
Scenari agronomici 199  
Scenari idrodinamici 175  
SEAWAT 249  
Sicilia Nord-Orientale 93  
SIT (Sistema Informativo Territoriale) 215  
SOILN 199  
Solventi organici 207  
Stabilità arginale 215  
Studio di fattibilità 125  
Studio Impatto Ambientale (SIA) 103  
Suoli 199  
Tracciamento delle particelle 113  
Vulnerabilità 199  
Vulnerabilità all'inquinamento 93

### Key terms index

Agronomical practice 199  
Climate change 227  
Coastal aquifer 249  
Coastal aquifers 93  
Continuous monitoring 249  
Dikes stability 215  
Dual phase extraction 207  
Dual porosity aquifer 207  
Environmental Impact study 103  
Evaluation of mitigatory measures 103  
Feasibility study 125  
Fontanili springs 103  
GALDIT 93  
Geodatabase 153, 215  
Geological hazard 133  
GIS 153, 215  
GPS 215  
Groundwater 163, 227  
Groundwater mining 175

Groundwater model 103  
Heat transport model 125  
Hydraulic barrier 207  
Hydrodynamics scenarios 175  
Hydrogeology 133  
MACRO 199  
Monitoring network 227  
North-Eastern Sicily 93  
Numerical modelling 207  
Organic solvents 207  
Particle-tracking 113  
Point and count systems 93  
Pollution vulnerability 93  
Pumping rate 175  
Reconditioning 163  
RICLIC-WARM 227  
Rise of the water table 175  
Salinization 249

Sealing 163  
SEAWAT 249  
Simulation model 113  
SOILN 199  
Soils 199  
Southern Italy 175  
SPI index 227  
Underground structures 175  
Urban areas 133  
Urban planning 215  
Variable density groundwater flow modelling 249  
Vulnerability 199  
Water management 153  
Water wellfield 103  
Wellhead protection areas 113  
Wells 163



Finito di stampare  
nel dicembre 2008  
presso Media Print, Livorno

## Note per gli autori

**Lingua.** La lingua ufficiale della rivista è l'Italiano, ma sono benvenuti anche lavori in Inglese e, occasionalmente, si accettano anche lavori nelle altre lingue più diffuse della Unione Europea (Francese, Spagnolo, Tedesco). Tutti gli articoli devono essere preceduti da un riassunto in Inglese (Abstract), a sua volta preceduto dal titolo dell'articolo tradotto in Inglese. Le didascalie delle Figure e delle Tabelle, nella lingua originale dell'articolo, devono avere anche la traduzione in Inglese. Dopo l'Abstract in Inglese, ogni articolo in lingua diversa dall'Inglese inizierà con un riassunto nella lingua dell'articolo.

**Invio del manoscritto.** Ogni manoscritto proposto per la stampa dovrà essere inviato al seguente indirizzo di posta elettronica: [giornale@geoitalia.org](mailto:giornale@geoitalia.org). I manoscritti saranno revisionati da almeno due revisori. Gli autori sono invitati a segnalare i nomi di studiosi che potrebbero revisionare il manoscritto, senza che questo costituisca un impegno per la rivista. La politica della rivista per la revisione dei manoscritti prevede che il nome dei revisori non sia segreto, salvo il caso di specifica richiesta da parte dei revisori stessi. L'invio di un manoscritto alla rivista significa che lo stesso rappresenta un'opera di ingegno originale degli autori, che il manoscritto non è stato pubblicato in precedenza e che non è stato inviato contemporaneamente ad altre riviste.

**Preparazione del manoscritto.** Il manoscritto deve essere preparato con un word processor, con interlinea doppia, in una sola colonna e con ampi margini. L'Abstract in Inglese non deve superare le 150 parole, deve essere formato da un unico paragrafo, non deve contenere citazioni bibliografiche e neppure riferimenti al testo. L'Abstract deve essere considerato come un testo autosufficiente, che può essere diffuso anche separatamente dall'articolo. Il riassunto nella lingua originale dell'articolo può essere più lungo, senza tuttavia superare le 500 parole.

Gli autori sono invitati ad utilizzare la terminologia della IUGS e le unità di misura S.I.

La prima pagina dovrà contenere il titolo dell'articolo il nome (per esteso) ed il cognome degli autori, il nome dell'Istituzione di appartenenza e l'indirizzo e-mail di ogni autore, l'Abstract in Inglese. Dovrà essere inoltre indicato a quale degli autori deve essere inviata la corrispondenza relativa all'articolo (autore corrispondente) e, per quest'ultimo dovrà essere indicato anche l'indirizzo postale e il numero del Fax. Dalla seconda pagina in poi troverà posto il riassunto nella lingua dell'articolo ed il testo dell'articolo. Non utilizzare per il titolo del lavoro il carattere tutto maiuscolo.

Le didascalie delle Figure e delle Tabelle e la Bibliografia dovranno trovare posto in pagine separate da quelle del testo.

**Citazioni bibliografiche.** Nel testo, le citazioni bibliografiche possono avere due forme: (a) tra parentesi rotonda il cognome (o i cognomi) dell'autore, seguito da una virgola e dall'anno di pubblicazione dell'articolo, (b) il cognome dell'autore (o degli autori) seguito dall'anno di pubblicazione tra parentesi rotonda. Non utilizzare per le citazioni nel testo il maiuscoletto o il carattere tutto maiuscolo. L'espressione *et alii* è preferita a quella *et al.* Tutte le citazioni nel testo devono trovare corrispondenza nella Bibliografia e viceversa.

**Tabelle.** Le Tabelle devono essere compilate in fogli separati e devono essere numerate secondo la loro successione nel testo. Le Tabelle potranno essere accompagnate da una didascalia esplicativa del contenuto. Nel testo si dovranno trovare riferimenti a tutte le Tabelle, nella forma: Tabella 1, Tabella 2 ecc.

**Figure.** Tutte le Figure devono essere numerate secondo la loro posizione nel testo, nel quale si devono trovare riferimenti a tutte le Figure, nella forma: Figura 1, Figura 2 ecc.

Le scritte presenti nei disegni devono avere dimensioni adeguate, e comunque devono essere leggibili anche dopo l'eventuale riduzione della dimensione del disegno. Nel preparare i disegni sarà necessario tenere conto del formato della pagina di stampa.

Le fotografie devono essere di buona qualità, in modo da essere leggibili anche nella stampa.

Gli autori che rivogliono indietro gli originali delle Figure devono comunicarlo al momento dell'invio del lavoro o, al più tardi, quando restituiscono le bozze.

**Bibliografia.** I riferimenti bibliografici devono essere riportati in ordine alfabetico, utilizzando il carattere normale, cioè senza maiuscoletto, tutto maiuscolo, corsivo o grassetto. La forma deve essere la seguente: "Cognome, N., 2005. Titolo dell'articolo per esteso. Nome della rivista 24 (2), 234-251". Gli ultimi numeri rappresentano: il numero del volume, (il numero del fascicolo, se è necessario), le pagine iniziale e finale dell'articolo.

**Testo finale per la stampa.** Completato il processo di revisione, gli autori dovranno redigere il testo finale per la stampa in forma elettronica e con le seguenti modalità. Il manoscritto dovrà essere suddiviso in differenti files, contenenti rispettivamente: (a) Titolo, Autori, Titolo in Inglese ed Abstract; (b) Riassunto e Testo; (c) Didascalie delle Figure e delle Tabelle; (d) Bibliografia; (e) Tabelle; (f) Figure (eventualmente). Ogni file deve avere un nome che permetta di riconoscere facilmente il contenuto del file.

Il testo deve essere in una sola colonna, con interlinea singola, non giustificato a destra, senza spaziatura alla fine dei paragrafi e con il minimo di formattazione automatica.

**Bozze.** Sarà predisposta una sola serie di bozze, che saranno inviate all'autore corrispondente per essere controllate prima della stampa. E' necessario che gli autori non facciano sulle bozze correzioni che consistono in una modifica del testo accettato per la stampa.

**Estratti.** Di ogni articolo saranno predisposti 25 estratti gratuiti. Ulteriori copie degli estratti devono essere ordinate, a pagamento, in occasione della restituzione delle bozze.

**Contributo per la stampa.** L'Aiga richiede agli autori un contributo per la stampa pari a 18 Euro per ogni facciata del lavoro.

