

## 22. - L'USO DI TECNICHE DI MODELLAZIONE NUMERICA DATA-DRIVEN PER LO STUDIO DELLA RISPOSTA DEGLI ACQUIFERI ALLE PRECIPITAZIONI

COTECCHIA V., DOGLIONI A. (\*)

### 22.1. - INTRODUZIONE

Lo studio della risposta dinamica di un acquifero alle precipitazioni e la relativa modellazione è un problema di fondamentale importanza per la gestione delle risorse idriche sotterranee. I sistemi idrogeologici naturali presentano, tuttavia, un'intrinseca complessità e non linearità dei processi che ne regolano il comportamento e la risposta agli *input* esterni, sicché la loro modellazione è spesso molto difficoltosa.

I processi che concorrono alla ricarica degli acquiferi, il cui calcolo è necessario per eseguire il bilancio idrico, sono fortemente non lineari e dipendenti da diversi fattori tra i quali le caratteristiche del suolo e delle precipitazioni (intensità e durata), lo stato iniziale del suolo e le caratteristiche ambientali (temperatura, umidità, velocità del vento). Ad un dato apporto meteorico possono pertanto corrispondere differenti valori di infiltrazione e quindi negli acquiferi in falda in funzione sia delle caratteristiche della pioggia che del suolo e del suo stato iniziale. Un bilancio idrico eseguito senza tener conto della complessità e non linearità dei processi di infiltrazione può fornire solo indicazioni di carattere qualitativo, spesso poco affidabili e fuorvianti. Ai fini gestionali è quindi necessario ricorrere a modelli complessi che simulano in maniera più affidabile la dinamica dei sistemi idrogeologici. Detti modelli devono fornire risultati direttamente correlabili con grandezze misurabili in sito attraverso il monitoraggio dello stato quantitativo delle falde regionali, come ad esempio la quota piezometrica della falda, secondo un approccio ingegneristico-gestionale basato sui principi dell'idraulica sotterranea. A tali fini solo un attento sistema di monitoraggio, affiancato da modelli che interpretano la risposta dell'acquifero, può consentire di ottenere risultati affidabili, di sostegno per le politiche decisionali e gestionali (cap. 30).

I modelli da utilizzare nell'interpretazione del

monitoraggio idrogeologico se da un lato devono essere in grado di descrivere la complessità dei fenomeni fisici, dall'altro devono evitare di introdurre un numero elevato di variabili e parametri, spesso difficilmente stimabili e non sempre di immediato significato fisico. Essi devono quindi essere relativamente semplici, ma allo stesso tempo affidabili e tarabili sulla base dei dati disponibili, così da poter procedere alla loro validazione. La grande scala spaziale che caratterizza lo studio della ricarica degli acquiferi, spesso rende difficile la conoscenza e la misura di tutti i parametri fisici coinvolti e loro variabilità nello spazio e nel tempo. È pertanto necessario scegliere con attenzione il modello da utilizzare in funzione delle conoscenze disponibili, così da poter definire il modello più adatto all'interpretazione del fenomeno descritto dai dati disponibili.

### 22.2. - TIPOLOGIE DI MODELLI

I modelli utilizzati in idrogeologia sono spesso di tipo concettuale e si basano sulla schematizzazione e semplificazione del fenomeno fisico da modellare (LEDOUX *et alii*, 1989; FRANS *et alii*, 2011; TOMIYAMA *et alii*, 2012). Le leggi che regolano la dinamica del sistema sono assunte note a priori e si procede alla taratura dei diversi parametri, ai quali di norma è possibile dare un ben preciso significato fisico (coefficiente di permeabilità, porosità, ecc.). Le informazioni utilizzate per la costruzione del modello derivano dalla concettualizzazione e schematizzazione della fisica del problema e non dai dati disponibili, i quali invece vengono usati per tarare i vari parametri necessari a definire compiutamente il modello stesso. In funzione del livello di conoscenza di base è quindi possibile costruire modelli più o meno complessi. I modelli di tipo concettuale più complessi sono in generale più prossimi ai modelli fisicamente basati, i quali invece si basano su relazioni e parametri che derivano dalla fisica elementare del sistema e possono essere utilizzati solo per analizzare specifici particolari sistemi naturali e difficilmente si prestano all'analisi di tutto il sistema nel suo complesso.

(\*) Ing. Angelo Doglioni. Assegnista di ricerca - Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria Civile e dell'Architettura. Politecnico di Bari

Grazie alle potenzialità computazionali resesi disponibili negli ultimi anni, anche in campo idrogeologico si stanno diffondendo, a fianco dei modelli “concettuali tradizionali”, una nuova classe di modelli: i cosiddetti modelli *data-driven*. Essi sono basati su relazioni matematiche flessibili, atte a rappresentare la dinamica del sistema, a partire da sequenze storiche di dati ingresso-uscita (*input-output*). Le leggi che regolano la dinamica del sistema ed i relativi parametri forniscono relazioni fra i dati di *input* e di *output* di grande affidabilità ed accuratezza. Esse sono identificate attraverso tecniche numeriche, in una fase di taratura che viene anche denominata apprendimento (*training*). Appartengono a questa classe di modelli quelli legati alla *Genetic Programming* (GP), che consente di identificare relazioni funzionali esplicite, ovvero equazioni in forma esplicita, o chiusa. Pur trattandosi di un approccio puramente numerico, la disponibilità di una funzione esplicita consente di sviluppare una serie di valutazioni sulle relazioni esistenti fra i dati di *input* e di *output* ed ottenere, sia pur in forma indiretta, informazioni sulla fisica del sistema. Appartiene a questa classe di modelli la tecnica *EPR* (*Evolutionary Polynomial Regression*) (GIUSTOLISI & SAVIC, 2006, 2009), di recente sviluppata dal Politecnico di Bari, finalizzata alla costruzione di modelli simbolici a carattere polinomiale.

Essa si è dimostrata uno strumento di modellazione per la previsione ed il controllo in vari settori dell'ingegneria, e che presenta interessanti potenzialità di applicazione allo studio dei sistemi idrogeologici ed in particolare nella modellazione dinamica della risposta della falda alle precipitazioni (GIUSTOLISI *et alii*, 2008; MANCARELLA & SIMEONE, 2008; DOGLIONI *et alii*, 2010; 2011a; 2011b). I risultati ottenuti sono stati soddisfacenti e in alcuni casi pienamente coerenti con le caratteristiche geologiche ed idrogeologiche note degli acquiferi, mentre in altri casi hanno consentito di evidenziare alcuni comportamenti peculiari dell'acquifero carbonatico profondo pugliese.

### 22.3. - LA TECNICA EPR-MOGA

La tecnica *EPR-MOGA* è una tecnica di modellazione evolutiva multi-obiettivo che permette di determinare equazioni esplicite a partire da un insieme di dati misurati (VAN VELDHUIZEN & LAMONT,

2000; GIUSTOLISI *et alii*, 2004; GIUSTOLISI & SAVIC, 2009), esprimendo le relazioni esistenti fra il comportamento di un sistema e le forzanti esterne che lo condizionano, come ad esempio la risposta della falda alle precipitazioni. La struttura della relazione funzionale fra dati di *input* ed *output* ha una forma polinomiale in cui i termini monomi possono essere combinazioni più o meno complesse delle variabili di ingresso e uscita. La metodologia si basa su due fasi: in una prima fase si procede ad una identificazione del modello strutturale, nella seconda si stimano le costanti del modello attraverso la tecnica dei minimi quadrati, ossia minimizzando gli scarti quadratici medi (funzione obiettivo) tra i valori previsti dalla stessa equazione e i valori della variabile misurati. *EPR-MOGA* costruisce quindi più modelli, a diverso grado di complessità strutturale, che possono poi essere oggetto di ulteriori valutazioni e giudizi.

L'algoritmo *EPR-MOGA* può contemporaneamente ottimizzare fino a tre funzioni obiettivo: la minimizzazione della somma degli errori al quadrato, la minimizzazione dei termini monomi che concorrono a definire il modello e la minimizzazione dei termini di *input* selezionati fra i possibili candidati alla modellazione del problema. Il primo obiettivo consente di ottimizzare il risultato del modello sulla base dei dati disponibili, il secondo consente di ottenere un modello il più semplice possibile ed il terzo di limitare il numero di termini di *input* (GIUSTOLISI & SAVIC (2009)).

L'utilizzo di questa tecnica permette quindi di ricostruire il modello di risposta della falda attraverso un polinomio che correla l'altezza piezometrica in un determinato istante di tempo all'altezza piezometrica ed alle precipitazioni misurate in istanti di tempo precedenti. Facendo riferimento al caso di un polinomio semplice con sole funzioni di potenza, l'espressione generale del modello è del tipo:

$$H = a_0 + \sum_{j=1}^m a_j \cdot (\mathbf{X}_1)^{ES(j,1)} \cdot \dots \cdot (\mathbf{X}_1)^{ES(j,k)} \quad (22.1)$$

Nel caso di studio delle variazioni dei livelli di falda al variare delle precipitazioni si ha:

- $H$  è il valore dell'altezza piezometrica da prevedere;
- $\mathbf{X}_k$  sono i termini di *input* del modello, ossia le

precipitazioni e le altezze piezometriche della falda misurati negli intervalli precedenti a quello in cui si vuol prevedere l'altezza piezometrica  $H$ ;

- $a_j$  sono i parametri del modello da tarare;
- $a_0$  è una costante opzionale rappresentante un termine noto;
- $m$  è il numero di monomi coinvolti nell'equazione del modello;
- $k$  è il numero di termini di *input* significativi ai fini del modello. Non tutti i parametri di *input* influenzano infatti il parametro da prevedere. Nel caso specifico, esso consente di individuare i mesi antecedenti le cui piogge influenzano l'altezza piezometrica della falda nel mese in cui avviene la valutazione;
- $ES(j,k)$  è l'esponente selezionato.

#### 22.4. - APPLICAZIONI DELLA TECNICA EPR-MOGA

La tecnica EPR-MOGA è stata applicata con buoni risultati per analizzare la risposta alle precipitazioni di alcuni acquiferi pugliesi (GIUSTOLISI *et alii*, 2008; MANCARELLA & SIMEONE, 2008; DOGLIONI & *alii*, 2011a; 2011b; DOGLIONI & SIMEONE, 2011). In questo paragrafo sono richiamati alcuni dei risultati riportati in letteratura scientifica, ed in particolare quelli ottenuti per l'acquifero superficiale e permeabile per porosità ospitato nei Depositi marini terrazzati pleistocenici della Piana di Brindisi (cap. 16) e per l'acquifero carbonatico mesozoico salentino, permeabile per fratturazione e carsismo (cap. 18), integrati con alcuni casi di studio inediti, riferiti all'acquifero carbonatico mesozoico murgiano (cap. 17). In figura 22.1 è riportata la localizzazione delle aree oggetto di studio.

L'acquifero superficiale della Piana di Brindisi e quello carbonatico salentino sono stati oggetto di monitoraggio da parte del Servizio Idrografico del Ministero dei Lavori Pubblici mediante pozzi freatici nel periodo 1953 – 2002, e ciò ha consentito di disporre di una lunga serie di dati. Per i pozzi situati nell'acquifero carbonatico murgiano, utilizzati come pozzi di controllo dall'Acquedotto Pugliese, si è fatto riferimento ad una serie storica di dati mensili di altezza piezometrica della falda, che va dal 1975 al 1991. Queste ultime serie, pur

presentando qualche lacuna, sono abbastanza lunghe per consentire delle valutazioni in merito alla risposta dell'acquifero. Le analisi sono state svolte facendo riferimento alle serie storiche mensili. Nei casi in cui erano presenti più dati piezometrici riferiti ad uno stesso mese, è stato adottato il valore medio mensile.

Si assume inoltre che i pozzi studiati siano posti in aree dove lo sfruttamento della falda è modesto, tanto da poterli considerare rappresentativi di uno stato indisturbato della stessa, ipotizzando quindi che le altezze piezometriche della falda siano influenzate solo dal regime pluviometrico.

I valori di precipitazione mensile adottati per l'analisi sono quelli misurati dalla stazione pluviometrica più vicina al pozzo considerato (cap. 7). Pur non potendo affermare con certezza che la stazione pluviometrica più vicina alla stazione di misura del livello piezometrico sia la più significativa ai fini della ricarica, si può ritenere che le precipitazioni ivi misurate siano in qualche modo correlate a quelle rappresentative delle condizioni di ricarica che si sviluppano nel bacino di alimentazione e pertanto possano essere utilmente utilizzate ai fini dello studio delle correlazioni. A tal riguardo si osservi l'andamento dell'altezza piezometrica della falda rilevato per i pozzi della Piana di Brindisi e del Salento e quello delle precipitazioni rilevato nelle stazioni pluviometriche ad essi più prossime qui scelte per le analisi (fig. 22.2).

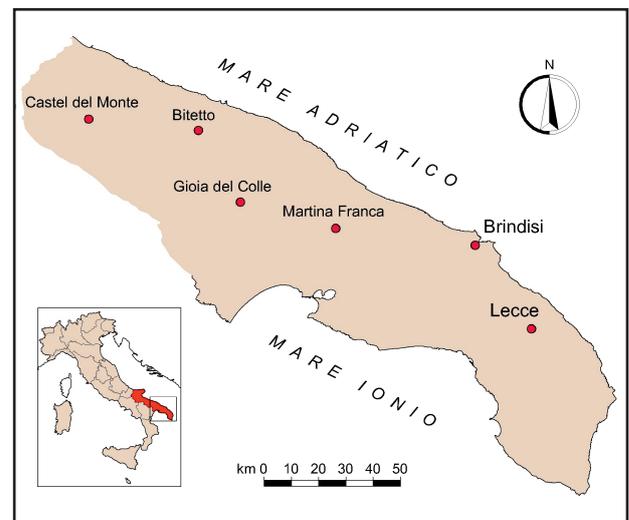


Fig. 22.1 - Localizzazione delle aree oggetto di studio.  
- Location of the study areas.

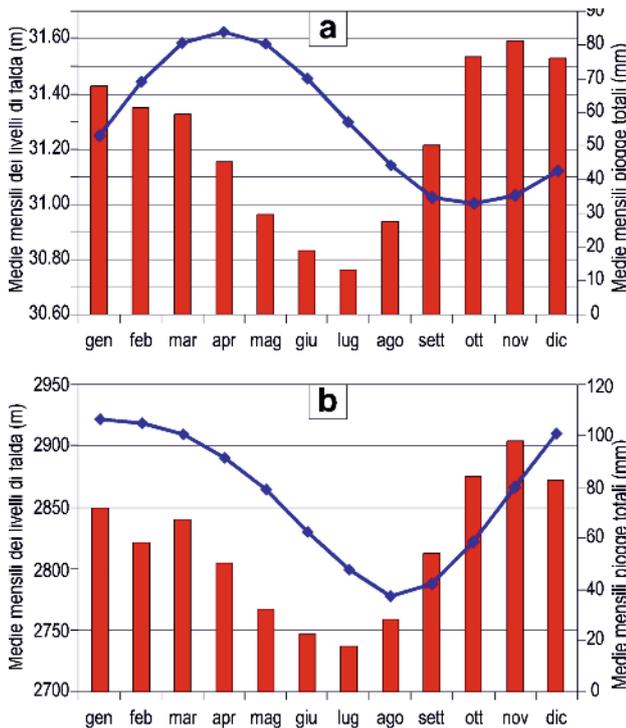


Fig. 22.2 - Precipitazioni cumulate mensili medie e altezze piezometriche medie della falda per l'acquifero di: a) Brindisi; b) Lecce.  
- Average monthly cumulated rainfall and average piezometric groundwater levels for the aquifers of: a) Brindisi; b) Lecce.

Prima ancora di procedere ad una analisi quantitativa dei dati con la tecnica EPR, è possibile osservare che l'acquifero di Brindisi, di tipo poroso, è caratterizzato da una risposta alle precipitazioni sfalsata di alcuni mesi, con un massimo in marzo ed un minimo alla fine della stagione estiva, mentre l'acquifero salentino, in prossimità della città di Lecce, ha una risposta molto rapida alle piogge, con un minimo nella stagione estiva.

L'insieme dei dati di *input* utilizzati nelle analisi è costituito dai valori dell'altezza piezometrica media mensile della falda e delle precipitazioni cumulate mensili misurate nei mesi precedenti a quello in cui si vuol determinare l'*output*, ossia l'altezza piezometrica media mensile. Il modello può essere utilizzato in termini di previsionali, ossia per la previsione del livello piezometrico della falda per 1, 2, .. n mesi in avanti. Ovviamente l'affidabilità della previsione in avanti si abbassa man mano che aumenta il numero di mesi in avanti in cui avviene la previsione. Questo consente tuttavia di fare previsioni in relazione agli scenari di pioggia. Il modello può essere usato anche in simulazione, cioè

partendo dal livello piezometrico iniziale e valutando in avanti il livello piezometrico per tutto il periodo. Se nel lungo periodo il livello piezometrico stimato non si discosta troppo da quello misurato o se vi sono per brevi periodi delle discordanze, ma vi è poi un riallineamento, questo evidenzia la affidabilità complessiva delle espressioni trovate.

I dati misurati nelle diverse stazioni di misura sono stati suddivisi in due gruppi: il *training set* usato per identificare il modello e stimare i suoi parametri, ed il *test set* utilizzato per validare il modello. Il modello viene costruito e calibrato con i soli dati del *training set*, mentre la sua capacità di previsione viene testata esclusivamente sui dati del *test set*. In generale i due terzi dei dati sono stati utilizzati per il *training set*, mentre il restante ultimo terzo è stato utilizzato come *test set* (fig. 22.3).

EPR-MOGA ha fornito gruppi di equazioni che esprimono, con diverso grado di complessità, il legame esistente tra le precipitazioni cumulate mensili e l'altezza piezometrica della falda per gli acquiferi considerati. Fra queste si sono selezionate quelle più affidabili e meno complesse, ossia caratterizzati da un minor numero di termini (GIUSTOLISI & SAVIC, 2009; MANCARELLA & SIMEONE, 2008). Modelli più complessi, pur consentendo di ottenere un maggior adattamento ai dati, sono di più difficile leggibilità ed interpretazione. Inoltre i modelli più complessi possono avere una povera capacità di generalizzazione su nuovi dati. Per contro, i modelli più semplici possono prestarsi ad interpretazioni fisiche, contribuendo a comprendere i

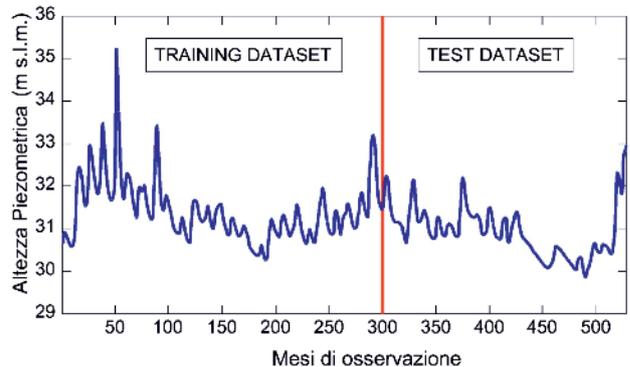


Fig. 22.3 - Piana di Brindisi. Suddivisione della serie storica di altezze piezometriche in *training data set* e *test data set*.  
- Brindisi Plain. Subdivision of the historical series of piezometric levels in *training data set* and *test data set*.

meccanismi di risposta dell'acquifero alle precipitazioni. In altri termini, allorquando la qualità e quantità dei dati è soddisfacente, è possibile leggere la dinamica del sistema idrogeologico, così come appare dalle serie storiche delle sue variabili di stato (quote piezometriche) e forzanti (precipitazioni).

In questa sede non si esporranno quindi tutti i modelli ottenuti ma ci si limiterà a descrivere solo quelli più efficaci, sia in termini di capacità di generalizzazione nelle previsioni in avanti per differenti orizzonti temporali, sia in termini di leggibilità ed interpretabilità dei risultati.

L'affidabilità dei modelli è stata valutata attraverso i valori del coefficiente di determinazione CoD:

$$CoD = 1 - \frac{N-1}{N} \frac{\sum_N (\hat{H} - H_{est})^2}{\sum_N (H_{exp} - avg(H_{exp}))^2} \quad (22.2)$$

in cui  $N$  è il numero di dati nel *test set*,  $\hat{H}$  è il vettore di tutte le previsioni della grandezza  $h$  (altezza piezometrica della falda), ed  $H_{exp}$  sono le corrispondenti osservazioni registrate nel *test set*.

Il valore assunto dal CoD rappresenta la porzione di varianza presente nei dati, ossia la loro variabilità intorno alla media, che effettivamente è spiegabile dal modello.

#### 22.4.1. - Acquifero poroso superficiale dell'area idrogeologica della Piana di Brindisi

L'acquifero superficiale della Piana di Brindisi, già largamente descritto nel capitolo 16 cui si rimanda per approfondimenti, è costituito da sabbie, calcareniti, conglomerati e depositi alluvionali e colluviali in forma di Depositi marini terrazzati (Pleistocene medio – superiore), ed è sostenuto alla base dai litotipi argillosi ascrivibili alle Aegille subappennine (Pleistocene inferiore). Esso è permeabile per porosità ed è alimentato esclusivamente dalle piogge.

Lo studio è stato svolto utilizzando i dati piezometrici della falda misurati nella stazione freaticometrica del Servizio Idrografico e Mareografico presso la Casa Cantoniera (Via Appia, km 717) ed i dati di pioggia della Stazione di Brindisi (cap. 7).

I migliori modelli sono risultati quelli a due e tre termini monomi. Le previsioni effettuate sui

dati del *test set* appaiono decisamente buone, e ciò anche sulla base del CoD (DOGLIONI *et alii*, 2011a; 2011b). Tra i modelli determinati considerando i dati di pioggia fino a sei mesi prima, il migliore è risultato il seguente:

$$h_t = 10.1 \cdot \sqrt{b_{t-1}} + 5.94 \cdot 10^{-6} p_{t-2} \cdot (h_{t-2})^2 \cdot \sqrt{b_{t-1} \cdot p_{t-3} \cdot p_{t-4}} - 25.3 \quad (22.3)$$

Nella simbologia di questa equazione e di quelle successive,  $h_t$  ed  $h_{t-1}$  rappresentano rispettivamente la quota piezometrica della falda al mese  $t$  e  $t-1$ , mentre  $p_{t-1}, p_{t-2}, p_{t-3}, p_{t-4}, p_{t-5}$  le precipitazioni nei cinque mesi precedenti a  $t$ .

Nell'equazione 22.3 compare un termine di persistenza non lineare in cui la quota piezometrica della falda è isolata rispetto alle altre variabili di previsione, ed un altro termine monomio non lineare, costituito invece da una combinazione di numerose variabili di ingresso, sul quale si riporteranno alcune considerazioni nel seguito.

Nella figura 22.4 è mostrato il confronto tra l'*output* del modello (eq. 22.3) e i dati di taratura (*training set*), per la previsione ad orizzonte temporale di 1 mese. Essa mostra un'eccellente aderenza ai dati sperimentali da parte del modello. In figura 22.5 sono riportati i risultati, in termini di previsione a breve (1 mese), medio (3 mesi) e lungo (6 mesi) termine, nonché in termini di simulazione, dell'equazione 22.3 per tutto il periodo 1953-2002.

Nella tabella 22.1 sono riportati a confronto i valori del CoD che esprimono l'adattamento del modello al *test-set* ottenuti da modelli EPR a variabile grado di complessità.

Merita una menzione particolare la regressione simbolica a due termini ottenuta da EPR applicando una tecnica di ricerca con forte penalizzazione di complessità:

$$h_t = 0.069 \cdot p_{t-2} + 10.47 \cdot \sqrt{b_{t-1}} - 27.38 \quad (22.4)$$

Tale modello non risulta effettivamente utile nelle previsioni, dati i significativi errori riscontrabili. Tuttavia, tra tutti i modelli costruiti da EPR sulle serie storiche pluvio-freatimetriche di Brindisi, l'equazione 22.4 rappresenta il più semplice, e ciò in quanto i termini selezionati per la sua costruzione sono solo  $h_{t-1}$  e  $p_{t-2}$ . Va inoltre osservato che dette variabili compaiono come fondamentali in tutti gli altri modelli più complessi (tab. 22.1).

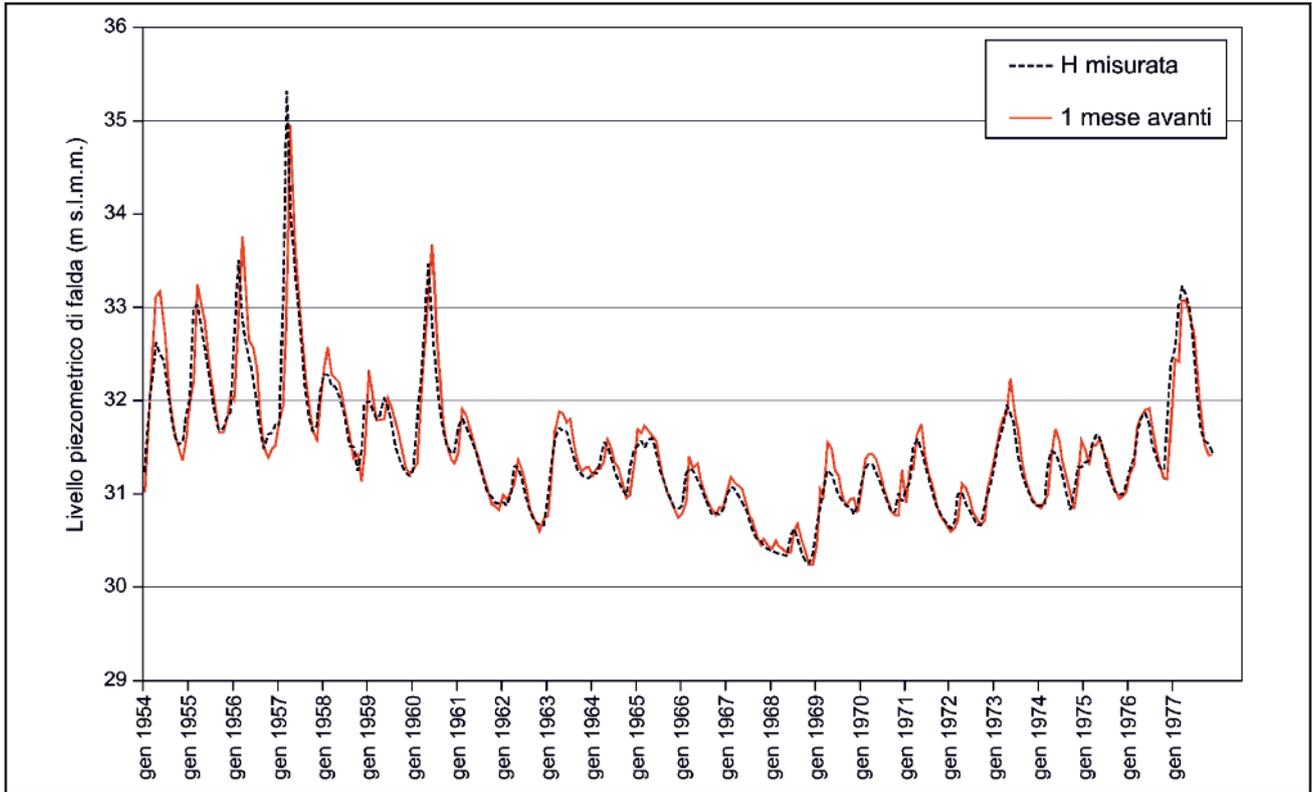


Fig. 22.4 - Acquifero superficiale della Piana di Brindisi. Confronto tra altezze piezometriche calcolate con il modello EPR in termini di previsione a breve termine (1 mese) ed i dati sperimentali di taratura del training set.

- Shallow aquifer of the Brindisi Plain. Comparison between the piezometric levels calculated by the EPR model in terms of short-term forecast (1 month) and the experimental calibration data of the training set.

Tab. 22.1 - Acquifero poroso superficiale della Piana di Brindisi. Valori del coefficiente di determinazione CoD ottenuti da modelli EPR a variabile grado di complessità.

- Shallow porous aquifer of the Brindisi Plain. Values of the coefficient of determination CoD obtained from EPR models of variable complexity.

| CoD                   | modello a 2 termini <sup>1</sup> ajZj | modello a 3 termini <sup>2</sup> | GIUSTOLISI et alii (2008) <sup>3</sup> |
|-----------------------|---------------------------------------|----------------------------------|--|
| precipitazione 1 mese | 95.78 %                               | 95.36 %                          | 95.34 %                                |
| precipitazione 2 mesi | 89.09 %                               | 89.42 %                          | 88.82 %                                |
| precipitazione 4 mesi | 76.96 %                               | 78.83 %                          | 76.47 %                                |
| precipitazione 6 mesi | 70.14 %                               | 73.59 %                          | 70.73 %                                |
| Simulazione           | 30.95 %                               | 50.55 %                          | 47.68 %                                |

$$1) h_t = 0.069 \cdot p_{t-2} + 10.47 \cdot \sqrt{h_{t-1}} - 27.38$$

$$2) h_t = 10.1 \cdot \sqrt{h_{t-1}} + 5.94 \cdot 10^{-6} \cdot p_{t-2} \cdot (h_{t-2})^2 \cdot \sqrt{h_{t-1} \cdot p_{t-3} \cdot p_{t-4}} - 25.3$$

$$3) h_t = 0.00052034 \cdot p_{t-3}^2 \cdot p_{t-4} \cdot p_{t-2}^2 + 0.041465 \cdot p_{t-1} \cdot p_{t-2}^{0.5} + 0.0063853 \cdot p_t^2 + 0.90026 \cdot h_{t-1} + 2.9772$$

h [m] = altezza piezometrica della falda; p [mm] = precipitazione cumulata mensile

Ciò indica quindi che l'altezza piezometrica della falda è molto legata a quella del mese precedente ed alla precipitazione cumulata mensile di due mesi precedenti, evidenziando quindi un ritardo di circa 2 mesi fra il momento in cui si verificano gli afflussi e quello in cui si risente degli stessi in termini di sollevamento piezometrico.

Molti dei modelli EPR costruiti, come quello descritto dall'equazione 22.3, contengono, come abbiamo visto, un termine di persistenza non lineare in cui la quota piezometrica della falda è isolata rispetto alle altre variabili di previsione. Si può pertanto ipotizzare che, in assenza di precipitazioni nei mesi precedenti, questo termine di persistenza, insieme al termine noto, rappresenti la legge di decadimento della quota piezometrica della falda. Ipotizzando una quota piezometrica iniziale di 34 m s.l.m, che è rappresentativa per la falda in esame in condizioni particolarmente favorevoli di ricarica (fig. 22.5), e assenza di pioggia per svariati mesi, si ottiene per  $h(t)$  l'andamento mostrato in figura 22.6. La curva di decadimento dei livelli di falda presenta una lieve concavità rivolta verso l'alto. Essa indica

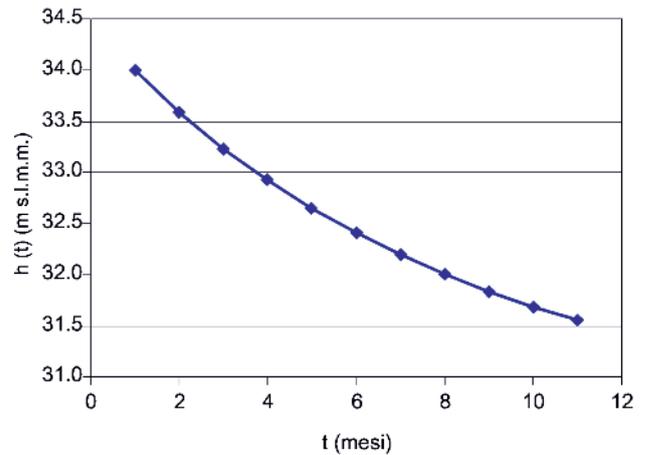


Fig. 22.6 - Acquifero superficiale della Piana di Brindisi. Decadimento del livello di falda in assenza di precipitazioni.  
- Shallow aquifer of the Brindisi Plain. Groundwater drawdown in the absence of rainfall.

quindi che, con il passare dei mesi non piovosi, si ha una riduzione della velocità di abbassamento della quota piezometrica, in accordo con la progressiva riduzione della cadente piezometrica della falda che rallenta lo svuotamento dell'acquifero.

Sempre nell'equazione 22.3 compare un altro termine monomio piuttosto complesso, sul quale si

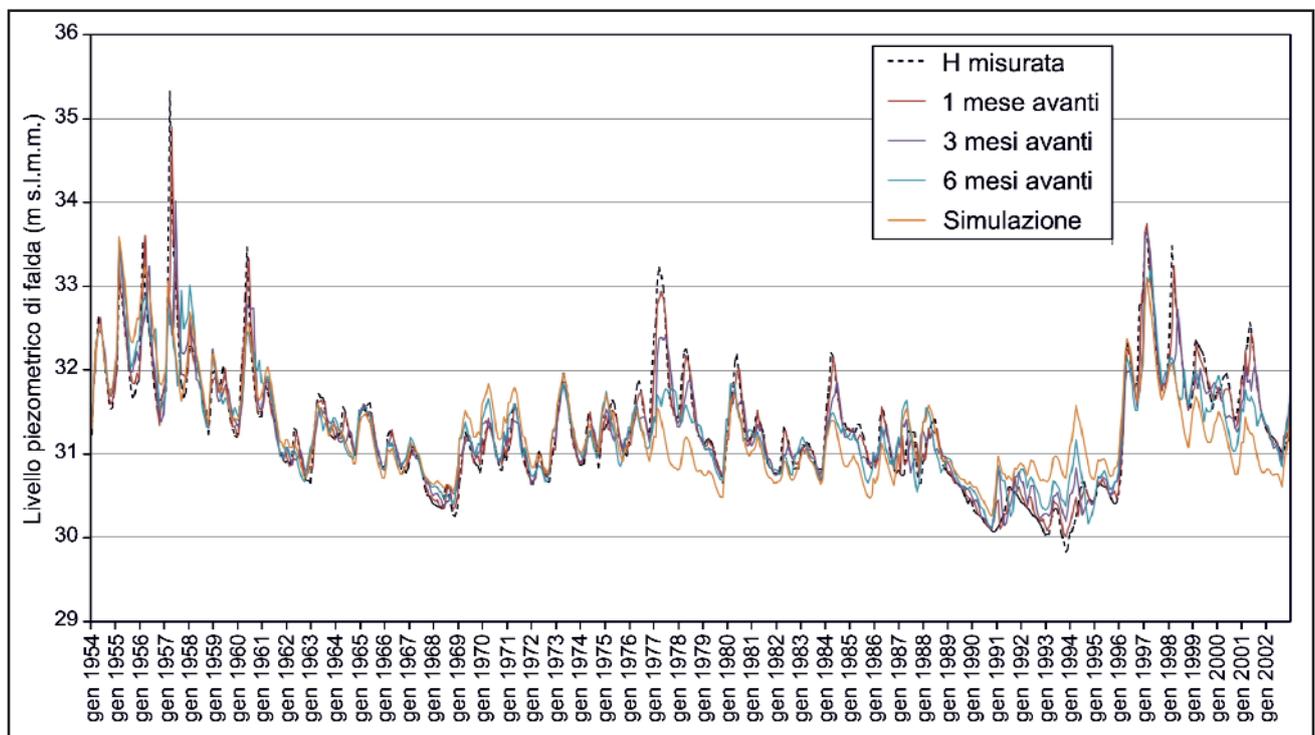


Fig. 22.5 - Acquifero superficiale della Piana di Brindisi. Confronto tra altezze piezometriche calcolate con il modello EPR, in termini di previsione a breve (1 mese), medio (3 mesi) e lungo termine (6 mesi) nonché in termini di simulazione, ed i dati sperimentali in tutto il data set.  
- Shallow aquifer of the Brindisi Plain. Comparison between the piezometric levels calculated by the EPR model, in terms of short- (1 month), medium- (3 months) and long-term (6 months) forecasts, and in terms of simulation, with the experimental data of the entire data set.

possono fare alcune considerazioni. Questo termine monomio è costituito da una combinazione che è il prodotto di numerose variabili di ingresso, tra le quali non compare però la precipitazione cumulata del mese precedente  $p_{t-1}$ . Ciò indica quindi che il tempo di risposta dell'acquifero alle precipitazioni nel pozzo considerato è generalmente superiore ad un mese. Va inoltre osservato che la pioggia totale mensile al tempo  $t-2$  compare nell'equazione 22.3 con un esponente maggiore rispetto agli altri mesi, assumendo quindi un ruolo dominante. Tutto il secondo termine si annulla se non si sono avute contestualmente precipitazioni nel secondo, terzo e quarto mese precedente. In questo caso solo la legge di decadimento determina la dinamica del sistema. Il modello è pertanto insensibile alle precipitazioni che avvengono dopo mesi siccitosi, mentre indica un incremento dell'altezza piezometrica della falda a seguito di periodi con piovosità regolare. Il secondo termine monomio contiene anche il prodotto di  $h_{t-2}$  e  $h_{t-1}$  che smorza o accentua l'incidenza delle precipitazioni sull'uscita del modello. Se questi livelli sono più elevati, le precipitazioni dei mesi precedenti hanno un effetto maggiore nel causare l'incremento delle quote piezometriche. Una delle possibili spiegazioni di detto fenomeno è che un'elevata altezza piezometrica nell'anno idrologico medio, può essere indirettamente rappresentativa di un certo grado di saturazione del sottosuolo. Una precipitazione che trova un suolo relativamente umido produce maggior infiltrazione efficace ai fini della ricarica.

Le analisi eseguite hanno quindi evidenziato che l'acquifero poroso superficiale della Piana di Brindisi risponde alle precipitazioni con circa due mesi di ritardo. I modelli più complessi indicano inoltre una certa influenza anche delle precipitazioni che avvengono 3 mesi e 4 mesi prima del mese in cui si vuol calcolare l'altezza piezometrica della falda. Le precipitazioni che avvengono 1 mese prima non producono effetti rilevanti sull'altezza piezometrica della falda.

#### 22.4.2. - *Acquifero mesozoico costiero dell'area idrogeologica del Salento*

La risposta alle precipitazioni dell'acquifero mesozoico costiero salentino è stata studiata con un pozzo ubicato alla periferia Ovest di Lecce (fig.

22.1). Come è stato già illustrato nel capitolo 18, cui si rimanda per approfondimenti, l'acquifero mesozoico salentino è alimentato in massima parte dalle precipitazioni che insistono nella stessa area idrogeologica del Salento, ed in parte anche dall'alimentazione sotterranea proveniente dall'area idrogeologica della Murgia (cap. 15). Tuttavia si può ritenere che, in prossimità del pozzo preso in esame, l'andamento nel tempo delle altezze piezometriche della falda possa analizzarsi facendo riferimento ai dati di pioggia misurati nella Stazione di Lecce (cap. 7).

Il miglior modello EPR ottenuto è (DOGLIONI *et alii*, 2011a; DOGLIONI & SIMEONE, 2011):

$$h_t = 0.0080995 \cdot p_t^{0.5} + 0.9819 \cdot h_{t-1} \quad (22.5)$$

In figura 22.7 si riportano i risultati, in termini di previsione a breve (1 mese, CoD = 0,95), medio (3 mesi, CoD = 0,835) e lungo (6 mesi, CoD = 0,770) termine, nonché in termini di simulazione (CoD = 0,606), relativamente all'equazione 22.5 e per tutto il periodo 1953-2002.

Particolarmente interessante è il confronto tra la struttura dell'equazione 22.5 ed il risultato ottenuto per l'acquifero poroso superficiale della Piana di Brindisi descritto nel paragrafo precedente. L'equazione 22.3, ottenuta per l'acquifero poroso superficiale della Piana di Brindisi, contiene dei termini che sono combinazione non lineare delle precipitazioni di un lungo periodo, antecedente a quello in cui si vuol calcolare l'altezza piezometrica della falda. Detto risultato è coerente con il comportamento di un acquifero poroso di media permeabilità, per il quale la risposta della falda è condizionata non da eventi di pioggia impulsivi, ma da lunghi periodi di precipitazione e/o siccità. L'equazione 22.5, ottenuta per l'acquifero fratturato e carsico del Salento, presenta invece una struttura particolarmente semplice. L'altezza piezometrica della falda dipende, infatti, solo da un termine di persistenza  $h_{t-1}$  e dalla precipitazione caduta al suolo nello stesso mese in cui viene calcolata la quota piezometrica, evidenziando una risposta impulsiva alle precipitazioni. Ciò è in accordo con la natura carsica dell'acquifero, caratterizzato da percorsi di infiltrazione preferenziali molto rapidi. L'acquifero profondo salentino è

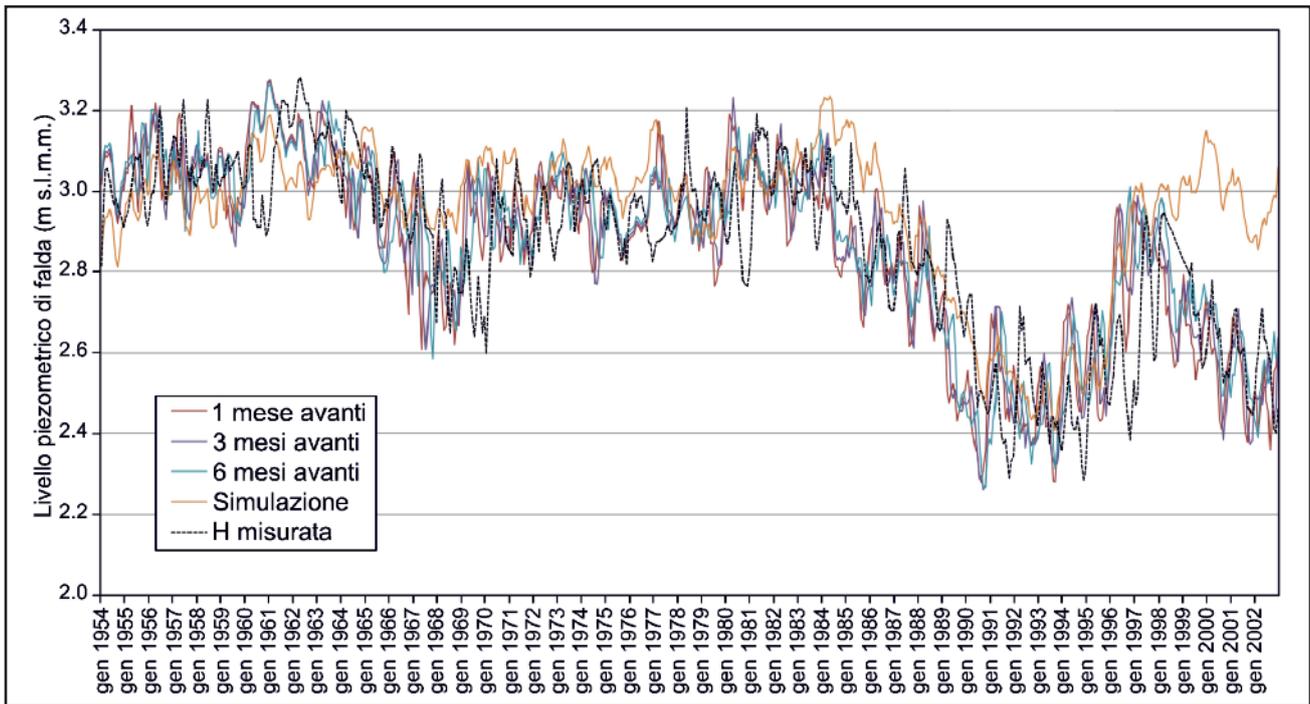


Fig. 22.7 - Acquifero mesozoico costiero del Salento. Confronto tra altezze piezometriche calcolate con il modello EPR in termini di previsione a breve (1 mese), medio (3 mesi) e lungo termine (6 mesi) nonché in termini di simulazione, ed i dati sperimentali in tutto il *data set*.

- Coastal Mesozoic aquifer of Salento. Comparison between the piezometric levels calculated by the EPR model in terms of short- (1 month), medium- (3 months) and long-term (6 months) forecast, and in terms of simulation, with the experimental data of the entire *data set*.

contraddistinto infatti da una permeabilità dovuta principalmente a fratture e fenomeni carsici, pertanto la pioggia si infiltra con facilità nel sottosuolo e la risposta della falda è pressoché immediata.

#### 22.4.3. - Acquifero mesozoico dell'area idrogeologica della Murgia

I caratteri idrogeologici dell'acquifero mesozoico dell'Area Idrogeologica della Murgia sono stati illustrati nel capitolo 15, dove è stata evidenziata, in particolare, la complessità che caratterizza la circolazione idrica sotterranea in corrispondenza dell'Alta Murgia. Qui la circolazione idrica sotterranea si svolge, in generale, a notevoli profondità, ed è caratterizzata da quote piezometriche molto elevate. L'esistenza di vie di comunicazione rapida tra la superficie del suolo e l'acquifero, costituite da fratture e fenomeni carsici, consente alle acque meteoriche di raggiungere rapidamente la falda anche a notevoli profondità. Per contro, l'epicarso, il notevole volume di ammasso roccioso soprastante l'acquifero e gli acquiferi superficiali costituiti da terreni post-cretacei, ove presenti,

determinano invece un certo ritardo nei fenomeni di ricarica. In detto ambiente la modellazione numerica con la tecnica EPR ha fornito interessanti informazioni circa i meccanismi di ricarica dell'acquifero, riuscendo a distinguere dette componenti.

Lo studio è stato sviluppato con riferimento ad alcuni pozzi per i quali è disponibile una discreta serie storica di dati. In particolare sono stati studiati 3 pozzi (Castel del Monte, Gioia del Colle e Martina Franca) distribuiti sull'Alta Murgia ed un pozzo (Bitetto) ubicato in una zona di passaggio tra l'Alta Murgia e la costa (fig. 22.1).

Per lo studio sono stati utilizzati dei pozzi di controllo dell'Acquedotto Pugliese e si è fatto riferimento a serie storiche di dati mensili dell'altezza piezometrica della falda nell'intervallo di tempo 1975–1991.

Per quanto attiene le precipitazioni si è scelto di fare riferimento, per ciascun pozzo, alle stazioni pluviometriche più vicine, così come fatto per le altre aree analizzate e per gli stessi motivi.

##### *Area di Bitetto*

Per l'acquifero murgiano in corrispondenza di Bitetto sono stati utilizzati i dati di pioggia della Stazione di Grumo Appula (cap. 7). Il modello

ottenuto è il seguente:

$$b_t = 2.6457 \cdot 10^{-6} \cdot p_t \cdot p_{t-1}^2 + 0.9884 \cdot b_{t-1} \quad (22.6)$$

La figura 22.8 rappresenta i risultati, in termini di previsione a breve (1 mese, CoD = 0,917), medio (3 mesi, CoD = 0,796) e lungo (6 mesi, CoD = 0,620) termine, nonché in termini di simulazione (CoD = -0,113), relativamente all'equazione 22.6 e per tutto il periodo 1975-1991. Le differenze tra i valori di altezza piezometrica previsti e quelli misurati sono molto modeste, anche se nelle previsioni a più mesi in avanti il modello calcola i picchi dell'altezza piezometrica con un certo ritardo rispetto a quelli misurati. In simulazione il modello è piuttosto approssimato e ciò molto probabilmente a causa dell'esistenza di *extra-input* sconosciuti, come l'esistenza di emungimenti prossimi al pozzo oggetto di studio. In ogni caso anche il modello in simulazione riesce a descrivere molto bene la dinamica generale della risposta della falda alle precipitazioni.

Il modello ottenuto è abbastanza semplice ed è costituito da un termine di persistenza che incide

per circa il 99% sull'*output*, più un termine legato alle precipitazioni del mese precedente. Pertanto, si evidenzia una risposta molto rapida, anche se non immediata come nel caso di Lecce, della falda alle precipitazioni. È interessante osservare che le precipitazioni non hanno esponenti inferiori ad 1 che ne attenuino l'impatto, evidenziando quindi una significativa capacità di assorbimento ed infiltrazione delle precipitazioni nel loro insieme.

#### Area di Gioia del Colle

Per l'acquifero murgiano in corrispondenza di Gioia del Colle sono stati utilizzati i dati di pioggia della Stazione di Gioia del Colle (cap. 7). Il modello ottenuto è il seguente:

$$b_t = 9.2147 \cdot 10^{-5} \cdot p_{t-3}^2 + 1.7567 \cdot 10^{-5} \cdot p_{t-2}^2 \cdot p_{t-5}^{0.5} + 0.00010327 \cdot p_{t-1}^2 + 0.95456 \cdot b_{t-1} + 3.9395 \quad (22.7)$$

La figura 22.9 rappresenta i risultati, in termini di previsione a breve (1 mese, CoD = 0,985), medio (3 mesi, CoD = 0,951) e lungo (6 mesi, CoD = 0,926) termine, nonché in termini di simulazione (CoD = 0,903), relativamente all'equazione 22.7 e per tutto il periodo 1976-1991.

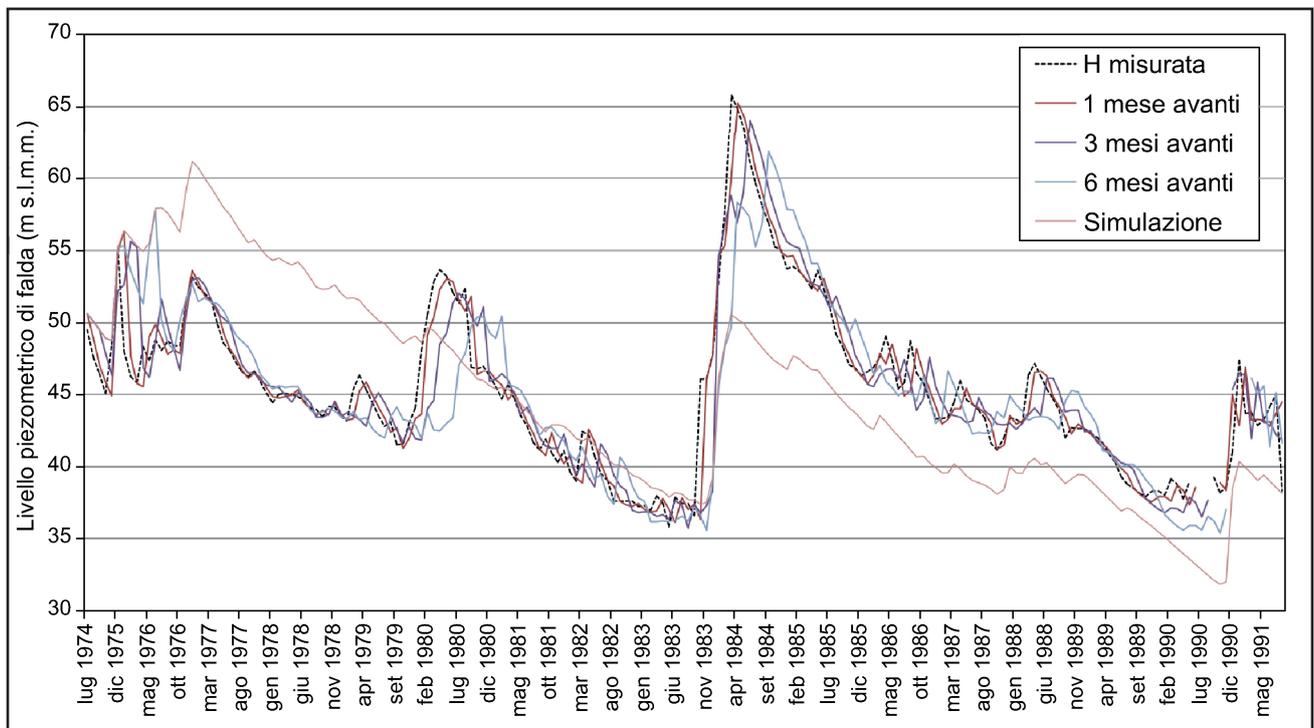


Fig. 22.8 - Acquifero mesozoico della Murgia - Bitetto. Confronto tra altezze piezometriche calcolate con il modello EPR, utilizzando come forzante la pioggia fino a 12 mesi prima, in termini di previsione a breve (1 mese), medio (3 mesi) e lungo termine (6 mesi) nonché in termini di simulazione, ed i dati sperimentali in tutto il data set.

- Mesozoic aquifer of Murgia - Bitetto. Comparison between the piezometric levels calculated by the EPR model, using as input data the antecedent rainfall (up to 12 months), in terms of short- (1 month), medium- (3 months) and long-term (6 months) forecast, and in terms of simulation, and the experimental data of the entire data set.

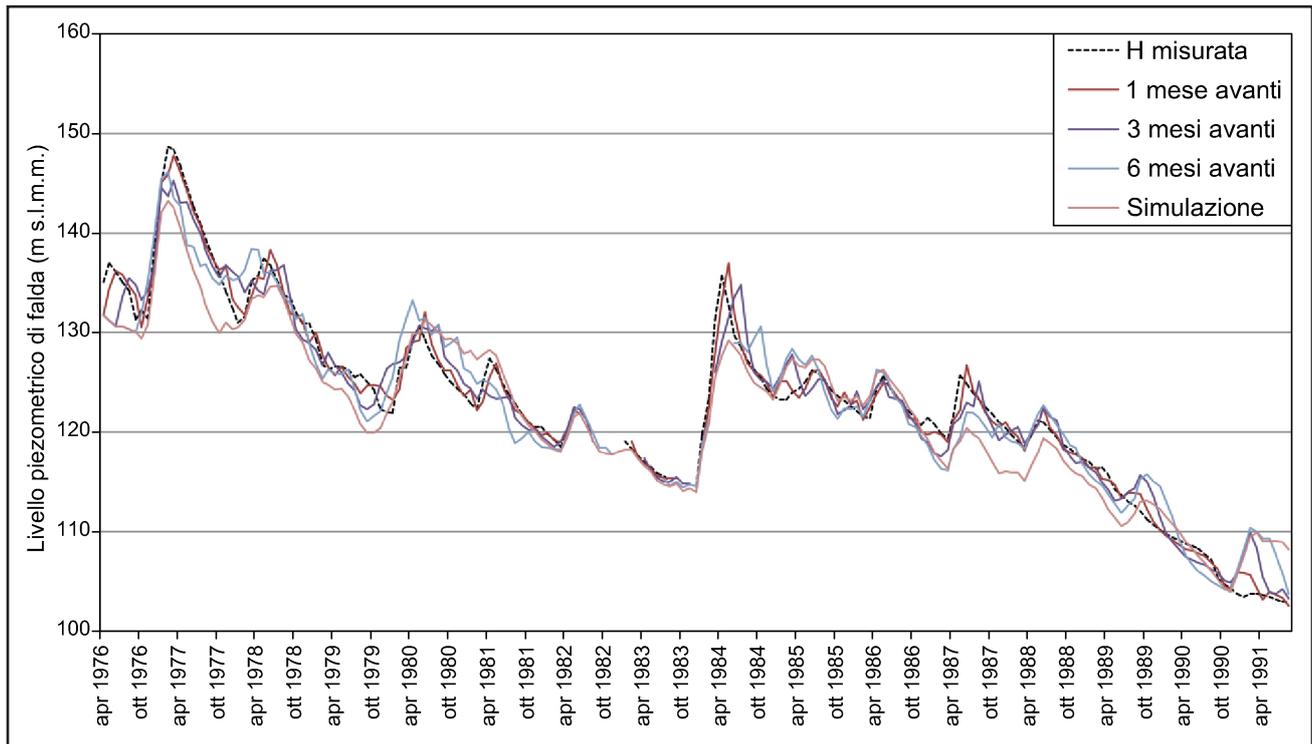


Fig. 22.9 - Acquifero mesozoico dell'Alta Murgia - Gioia del Colle. Confronto tra altezze piezometriche calcolate con il modello EPR, utilizzando come forzante la pioggia fino a 12 mesi prima, in termini di previsione a breve (1 mese), medio (3 mesi) e lungo termine (6 mesi) nonché in termini di simulazione, ed i dati sperimentali in tutto il data set.

- Mesozoic aquifer of Alta Murgia - Gioia del Colle. Comparison between the piezometric levels calculated by the EPR model, using as input data the antecedent rainfall (up to 12 months), in terms of short- (1 month), medium- (3 months) and long-term (6 months) forecast, and in terms of simulation, and the experimental data of the entire data set.

La differenza tra le altezze piezometriche calcolate e quelle misurate è molto piccola sia in previsione che in simulazione, evidenziando quindi un'ottima capacità previsionale del modello, così come indicato dai coefficienti di determinazione. Il modello ottenuto è abbastanza complesso ed è costruito da un termine di persistenza, avente un peso del 95% sull'*output*, e termini che fanno dipendere la risposta della falda sia da piogge vicine nel tempo, con un esponente quadratico, che da piogge anche molto distanti ( $p_{t-3}, p_{t-5}$ ). Ciò sembra evidenziare che, a percorsi rapidi di infiltrazione, si sovrappongono percorsi molto più lunghi, che forniscono una ricarica differita nel tempo. Quest'ultima circostanza potrebbe in parte essere dovuta a lunghi percorsi di infiltrazione legati ad una scarsa fratturazione della piattaforma carbonatica, o alla presenza di livelli poco fratturati e carsificati che fungono da barriera intermedia all'alimentazione profonda, ritardando la percolazione degli afflussi verso il basso. Va inoltre considerato che l'area di Gioia del Colle è caratterizzata

da un'ampia conca di copertura di depositi sabbiosi post-cretacei, che contengono una falda superficiale (cap. 15), che possono fungere da elemento di ritardo nell'alimentazione dell'acquifero profondo mesozoico, condizionando e ritardando la percolazione verso la falda profonda.

#### Area di Martina Franca

Per l'acquifero murgiano in corrispondenza di Martina Franca sono stati utilizzati i dati di pioggia della Stazione di Grottaglie (cap. 7). Il modello ottenuto è il seguente:

$$b_t = 0.00031945 \cdot p_{t-1}^{0.5} \cdot p_{t-3} \cdot p_{t-4}^{0.5} + 8.9153 \cdot 10^{-6} \cdot p_{t-1}^{0.5} \cdot p_{t-2} \cdot p_{t-5} \cdot p_{t-6}^{0.5} + 0.90301 \cdot b_{t-1} + 4.9879 \quad (22.8)$$

La figura 22.10 rappresenta i risultati, in termini di previsione a breve (1 mese, CoD = 0,981), medio (3 mesi, CoD = 0,930) e lungo (6 mesi, CoD = 0,880) termine, nonché in termini di simulazione (CoD = 0,798), relativamente all'equazione 22.8 e per tutto il periodo 1976-1991.

La differenza tra l'altezza piezometrica calcolata

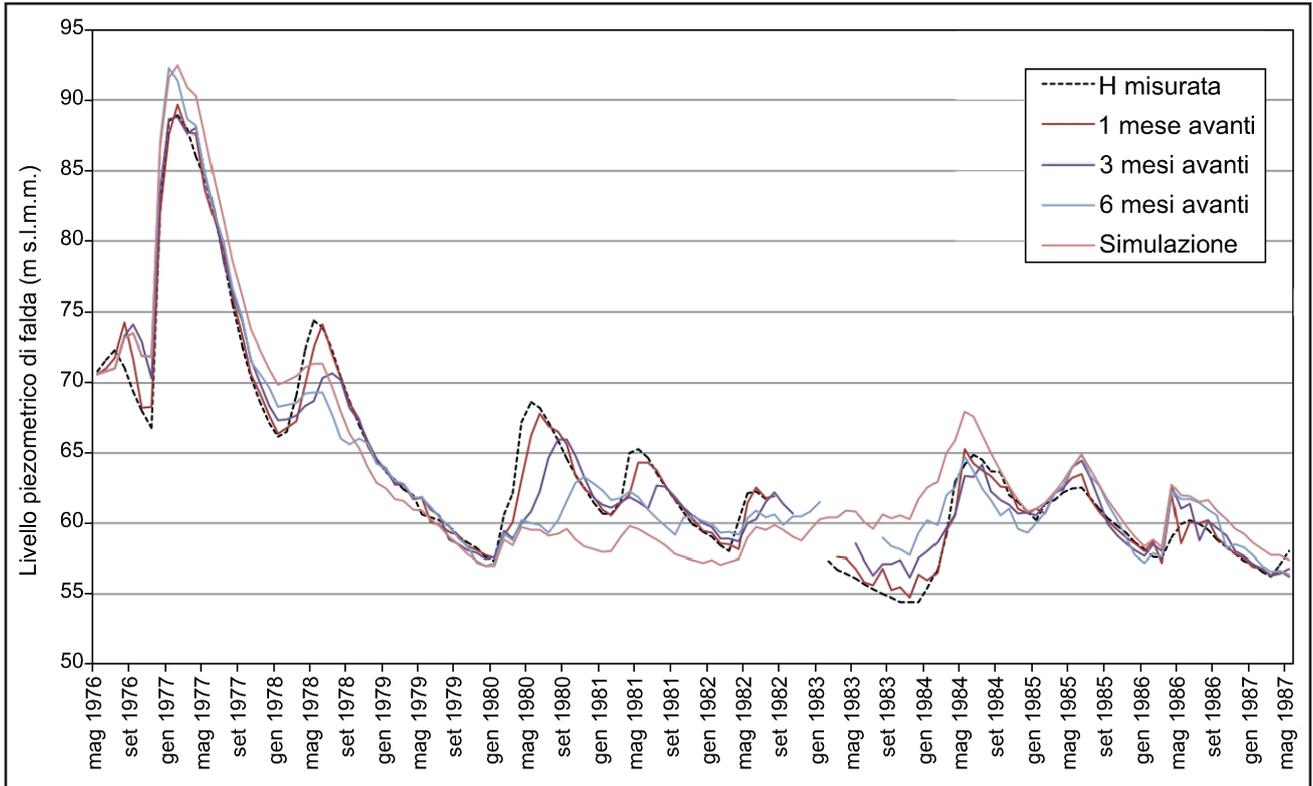


Fig. 22.10 - Acquifero mesozoico della Murgia - Martina Franca. Confronto tra altezze piezometriche calcolate con il modello EPR, utilizzando come forzante la pioggia fino a 12 mesi prima, in termini di previsione a breve (1 mese), medio (3 mesi) e lungo termine (6 mesi) nonché in termini di simulazione, ed i dati sperimentali in tutto il data set.

- Mesozoic aquifer of Murgia - Martina Franca. Comparison between the piezometric levels calculated by the EPR model, using as input data the antecedent rainfall (up to 12 months), in term of short- (1 month), medium- (3 months) and long-term (6 months) forecast, and in terms of simulation, and the experimental data of the entire data set.

e quella misurata è molto piccola sia in previsione che in simulazione, evidenziando una discreta capacità previsionale del modello, così come indicato dai coefficienti di determinazione. Il modello ottenuto è abbastanza complesso ed è costituito da un termine di persistenza, avente un peso del 90% sull'*output*, un termine relativo a piogge temporalmente vicine ( $p_{t-1}$ ) all'*output*, e piogge abbastanza distanti ( $p_{t-3}, p_{t-4}, p_{t-5}, p_{t-6}$ ) nel tempo rispetto all'*output*. Ciò evidenzia, in modo analogo a quanto già visto per l'area di Gioia del Colle, che gli eventi di pioggia forniscono il loro contributo alla falda sia rapidamente sia in modo ritardato nel tempo. Tuttavia, nel caso in esame, mancano acquiferi superficiali porosi post-cretacei cui possano essere attribuiti i ritardi nell'alimentazione, la cui causa deve essere ricercata interamente nell'ambito della formazione carbonatica cretacea. Pertanto, il ritardo può essere dovuto sia alla presenza di strati meno permeabili (roccia pressoché intatta o livelli di terre rosse) che ritardano la percolazione, sia ad

afflussi provenienti dalle zone più interne della Murgia, che giungono in quest'area con un certo ritardo rispetto all'alimentazione.

#### Castel del Monte

Per l'acquifero murgiano in corrispondenza di Castel del Monte sono stati utilizzati i dati di pioggia della Stazione di Castel del Monte (cap. 7). Il modello ottenuto è il seguente:

$$h_t = 0.0056017 \cdot p_t \cdot p_{t-1}^{0.5} \cdot p_{t-2}^{0.5} + 0.27321 \cdot h_{t-2} + 0.48127 \cdot h_{t-1} + 0.05312 \quad (22.9)$$

La figura 22.11 rappresenta i risultati, in termini di previsione a breve (1 mese, CoD = 0,833), medio (3 mesi, CoD = 0,735) e lungo (6 mesi, CoD = 0,689) termine, nonché in termini di simulazione (CoD = 0,675), relativamente all'equazione 22.9 e per tutto il periodo 1975-1991.

La differenza tra le altezze piezometriche calcolate e quelle misurate è molto piccola sia in previsione che in simulazione, evidenziando una buona capacità del modello di descrivere la dinamica del-

l'acquifero, così come indicato dai coefficienti di determinazione. Il termine che più incide sull'alimentazione è quello della precipitazione del mese stesso e in maniera minore (esponente 0.5) le precipitazioni del mese precedente e di 2 mesi precedenti. Si evidenzia quindi una risposta immediata con modesti contributi ritardati, il che è abbastanza caratteristico di un acquifero carsico. È interessante osservare che il termine di persistenza è costituito da due contributi, che tengono conto dell'altezza piezometrica della falda sia del mese precedente ( $b_{t-1}$ ) che dei due mesi precedenti ( $b_{t-2}$ ). Ciò indica una sorta di effetto memoria dell'acquifero, che può essere spiegato dal fatto che la circolazione idrica sotterranea è in pressione, coerentemente con le forti escursioni di altezza piezometrica misurate. È importante sottolineare che le escursioni della falda illustrate in figura 22.11 non rappresentano le quote piezometriche rispetto al livello medio mare, ma piuttosto ri-

spetto ad un piano preso come riferimento. Pertanto i valori negativi non sono rappresentativi di escursioni al di sotto del livello del mare.

## 22.5. - CONCLUSIONI

La metodologia EPR-MOGA si è dimostrata in grado di interpretare efficacemente la risposta della falda alle precipitazioni sia per gli acquiferi mesozoici delle Aree idrogeologiche della Murgia e del Salento sia per quello poroso superficiale della Piana di Brindisi, per i quali i modelli ottenuti sono risultati coerenti con le conoscenze idrogeologiche generali. Essi sono riusciti a descrivere sia la risposta lenta della falda alle precipitazioni meteoriche tipica dell'acquifero poroso superficiale di Brindisi, sia la risposta rapida tipica dell'acquifero mesozoico del Salento in prossimità della città di Lecce. È stato inoltre possibile analizzare una condizione

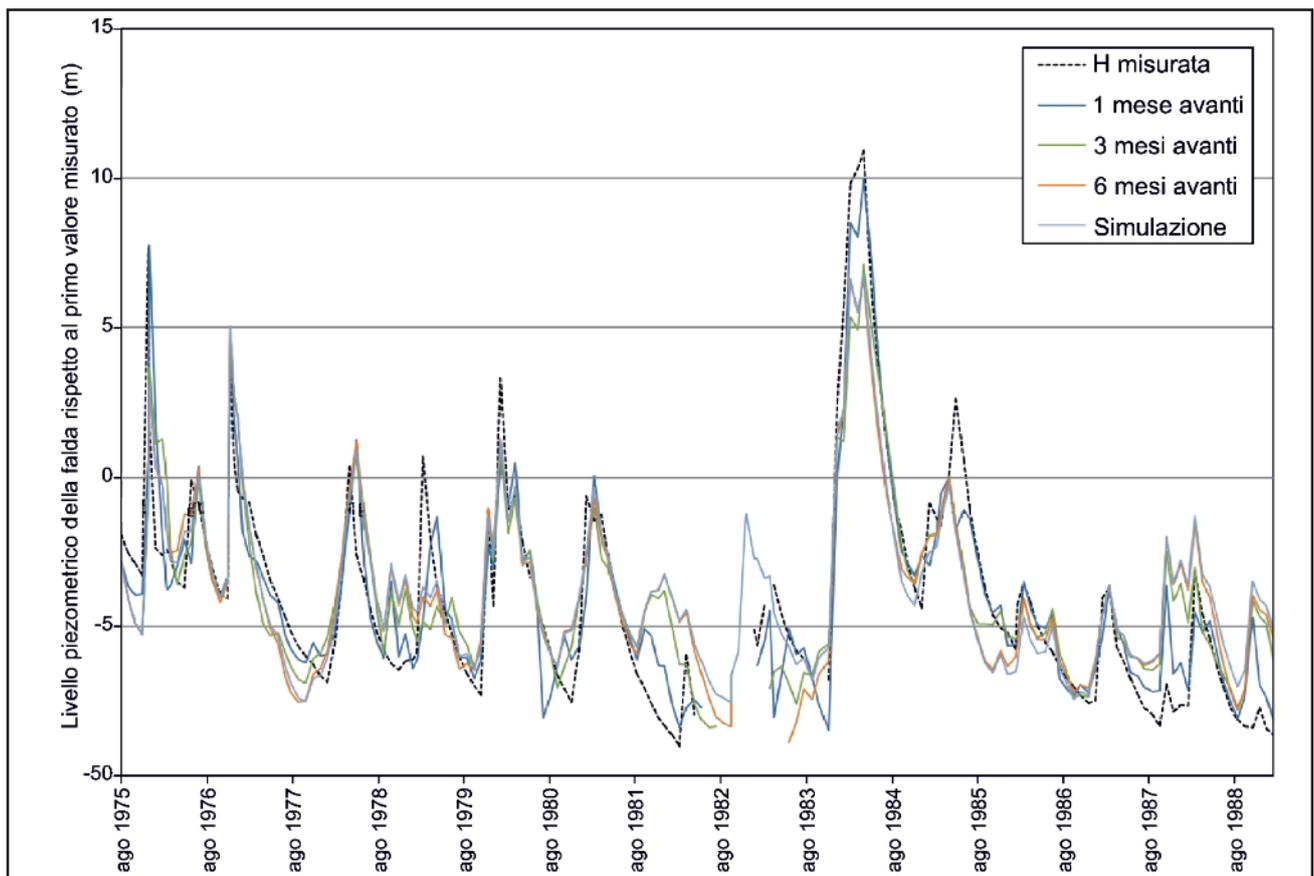


Fig. 22.11 - Acquifero mesozoico della Murgia - Castel del Monte. Confronto tra altezze piezometriche calcolate con il modello EPR, utilizzando come forzante la pioggia fino a 12 mesi prima, in termini di previsione a breve (1 mese), medio (3 mesi) e lungo termine (6 mesi) nonché in termini di simulazione, ed i dati sperimentali in tutto il data set.

- Mesozoic aquifer of Murgia - Castel del Monte. Comparison between the piezometric levels calculated by the EPR model, using as input data the antecedent rainfall (up to 12 months), in term of short- (1 month), medium- (3 months) and long-term (6 months) forecast, and in terms of simulation, and the experimental data of the entire data set.

che può essere definita intermedia, tipica dell'Alta Murgia, ove la complessità dei meccanismi di ricarica determina una certa influenza delle precipitazioni sulle altezze piezometriche della falda sia nel breve che nel lungo periodo. La risposta della falda contenuta nell'acquifero mesozoico murgiano alle precipitazioni è quindi profondamente differente rispetto a quella contenuta nell'acquifero mesozoico del Salento, confermando quindi che detti acquiferi non possono essere considerati come un unicum dal punto di vista idrogeologico, e che quindi anche in un acquifero carsico possano verificarsi ritardi, anche significativi, nella risposta dello stesso alle precipitazioni.

Nel complesso lo studio ha consentito di evidenziare le potenzialità e prospettive di questo tipo di approccio nello studio dei sistemi idrogeologici, sia per la comprensione dei meccanismi di ricarica, sia, e soprattutto, in prospettiva gestionale degli acquiferi. Questo tipo di modelli si presta, per la loro grande affidabilità e semplicità, alla costruzione e simulazione di scenari relativi al comportamento della falda in relazione sia alle attività di sfruttamento sia agli eventi climatici estremi, quali prolungate siccità o periodi di notevole afflusso. Gli enti preposti alla gestione delle risorse idriche sotterranee possono, attraverso espressioni matematiche semplici, pianificare l'uso e controllare lo stato quantitativo della risorsa idrica sotterranea. Dette espressioni, se ricavate sulla base di un numero sufficiente di dati affidabili, consentono infatti di eseguire previsioni sia nel breve che nel lungo periodo, diventando quindi uno strumento utile sia in fase di interpretazione del monitoraggio idrogeologico in tempo reale (cap. 30) sia in fase di pianificazione idrica, sulla base della costruzione di possibili scenari di pioggia. Inoltre, l'approccio evolutivo dei modelli e la loro spiccata semplicità consentono, laddove si rendono disponibili nuovi dati, di eseguire rapidamente il loro aggiornamento. Variazioni nelle leggi che legano le altezze di pioggia alle precipitazioni potranno così essere individuate e studiate, al fine di comprendere se esse siano da imputare a cambiamenti nel tipo di

pioggia, incremento dei prelievi o alterazioni nelle condizioni di deflusso e ricarica della falda.

Le tecniche di modellazione *data-driven*, ove si disponga di dati rivenienti da un'adeguata rete di monitoraggio, possono fornire elementi utili alla costruzione di un bilancio idrico affidabile degli acquiferi. Esse infatti consentono di raffrontare il volume di pioggia caduto al suolo con quello effettivamente immagazzinato nell'acquifero, creando relazioni affidabili tra afflussi e deflussi. L'aliquota del volume di pioggia che si infiltra nel sottosuolo sarebbe così determinata a partire da correlazione che tengono conto della complessità e non linearità dei processi di infiltrazione e di alimentazione della falda, tipiche per ciascuna area di studio.