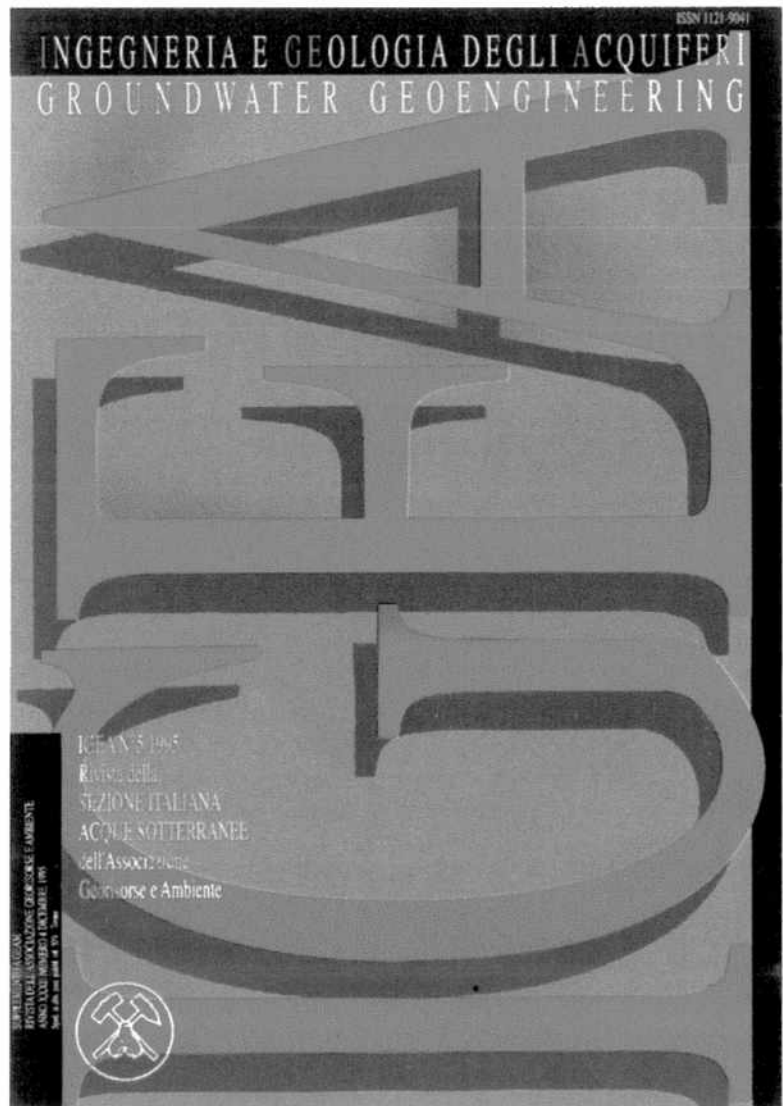


Un codice di calcolo automatico per la determinazione della dispersività applicato a misure sperimentali con tracciante *

Carmine FALLICO, Roberto COSCARELLI, Mario MAIOLO (**)

(*) Lavoro svolto nell'ambito della Convenzione ENEL-C.N.R. - Sottoprogetto 3 -
 Linea di ricerca 3.3 - Contratto di ricerca ENEL - Università della Calabria n. 3.3.1.
 (**) Dipartimento di Difesa del Suolo "V. Marone" Università della Calabria.



Estratto

Un codice di calcolo automatico per la determinazione della dispersività applicato a misure sperimentali con tracciante *

Carmine FALLICO, Roberto COSCARELLI, Mario MAIOLO (**)

SOMMARIO

Dopo un breve richiamo alle tecniche più comunemente utilizzate per la determinazione della dispersività, vengono esposte le caratteristiche del codice di calcolo IRPADIAS, valido nell'ambito deterministico e che utilizza esclusivamente i dati forniti da prove sperimentali con l'uso di traccianti. Inoltre, per una particolare esperienza effettuata presso il campo prove di Montalto Uffugo (CS), si effettua un confronto tra i risultati ottenuti tramite tale codice di calcolo e quelli ricavati mediante un calcolo manuale secondo le procedure tradizionali.

1. INTRODUZIONE

La capacità di propagazione degli inquinanti nelle falde sotterranee e il moto idrico al loro interno vengono caratterizzati mediante i parametri idrodispersivi. La misura di questi, in particolare della dispersività, richiede necessariamente il ricorso a relazioni matematiche in cui compaiono, oltre alle grandezze da determinare, anche i dati sperimentali relativi ad altri parametri. Mentre questi ultimi sono misurabili direttamente, per la misura dei parametri idrodispersivi è necessario far ricorso a misure di tipo indiretto. Le relazioni matematiche adoperate, che possono anche risultare notevolmente complesse, presuppongono modelli concettuali che schematizzano il fenomeno reale conservandone il significato fisico. Nelle suddette relazioni le grandezze misurabili direttamente non sempre sono rappresentate con valori sperimentali, spesso restano tali solo potenzialmente. Mentre alle difficoltà di calcolo per la soluzione delle relazioni matematiche si riesce a far fronte con l'uso di idonei codici di calcolo, per evitare le difficoltà derivanti da una corretta campagna sperimentale, del resto non sempre effettuabile per motivi che possono essere numerosi e di vario genere, spesso si utilizzano serie di dati di letteratura, che rischiano di fornire simulazioni a volte molto distanti dalla particolare realtà.

I modelli di simulazione del fenomeno in esame attualmente disponibili sono, infatti, numerosi, mentre i valori sperimentali risultano in numero notevolmente ridotto. In uno studio effettuato nel 1992 (TROISI et al.; 1992b) si era reperita traccia in letteratura di poco più di 100 indagini sperimentali, condotte in sito e in laboratorio, sulla propagazione di inquinanti in acquiferi sotterranei, in cui erano riportati i valori rilevati

per la dispersività longitudinale, per quella trasversale, per la velocità dell'acqua in falda, per la trasmissività, per la porosità, per la scala ed altre notizie sui singoli acquiferi e sulle modalità di conduzione delle prove (TROISI et al., 1993a).

Nel presente studio viene effettuata un'applicazione di un codice di calcolo ai risultati di un'esperienza condotta presso il campo prove del Dipartimento di Difesa del Suolo (Montalto Uffugo - Cosenza) dell'Università della Calabria; gli esiti di tale applicazione vengono, inoltre, confrontati con quelli ottenuti con altre procedure.

2. IL CODICE DI CALCOLO

La procedura che permette di stimare i parametri idrogeologici sulla base di dati sperimentali viene indicata nella letteratura tecnica con diverse definizioni: problema inverso, identificazione o calibrazione di parametri, identificazione di un acquifero.

Le soluzioni correntemente proposte differiscono tra loro per i metodi computazionali di base, per la modalità di impiego dei dati sperimentali disponibili, per la interpretazione della natura stessa (deterministica o stocastica) delle incognite (TROISI et al., 1991a). Considerando, ad esempio, il tipo di impostazione di base, le varie procedure possono essere divise in due categorie: quelle facenti capo a modelli deterministici e quelle basate su un approccio stocastico.

I modelli deterministici, a loro volta, possono essere classificati in due sottogruppi (NEUMAN, 1973; UMARI et al., 1979; YOON et al., 1976): i metodi diretti, — per i quali i parametri incogniti vengono considerati come variabili dipendenti delle equazioni differenziali di base —, ed i metodi di ottimizzazione o indiretti, per i quali invece il problema inverso viene impostato come un problema di ottimizzazione formale.

Le procedure sviluppate di recente, invece, prendono avvio essenzialmente dall'assunzione che i parametri idrogeologici siano più correttamente interpretabili come variabili stocastiche. Sotto quest'ottica, i valori dei parametri misurati sono di per sé rappresentativi solo a livello puntuale e, pertanto, utilizzabili esclusivamente come parametri di un modello stocastico (NEUMAN, 1982).

L'utilizzo di tali modelli richiede, come evidenziato da molti autori (CARRERA et al., 1986, a, B), l'accoppiamento dei metodi di identificazione tradizionali a tecniche di gestione ottimale di tutte le informazioni sperimentali disponibili per il sito, come il "kriging" (DELHOMME, 1978; DE WRACHEN,

(*) Lavoro svolto nell'ambito della Convenzione ENEL-C.N.R. - Sottoprogetto 3 - Linea di ricerca 3.3 - Contratto di ricerca ENEL - Università della Calabria n. 3.3.1.
(**) Dipartimento di Difesa del Suolo "V. Marone" Università della Calabria.

1980) e il "Maximum Likelihood Method" (CARRERA et al., 1986a).

Ritornando all'approccio deterministico si fa riferimento al modello matematico rappresentato dall'equazione di moto:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t}$$

e da quella di trasporto di massa:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (u_1 c) - \frac{\partial}{\partial y} (u_2 c) = S \frac{\partial c}{\partial t}$$

dove:

$$D_{i,j} = D_L \frac{u_i u_j}{u^2} + D_T \frac{u_j u_i}{u^2} + D_0$$

con $i \neq j$ e $i, j = 1, 2$

$$D_L = \alpha_L u$$

$$D_T = \alpha_T u$$

in cui:

S = coefficiente di immagazzinamento [0];

C = concentrazione dell'inquinante [ML⁻³];

D_{xx} = coefficiente di dispersione idrodinamica lungo x [L²T⁻¹];

D_{yy} = coefficiente di dispersione idrodinamica lungo y [L²T⁻¹];

D_L = coefficiente di dispersione idrodinamica longitudinale [L²T⁻¹];

D_T = coefficiente di dispersione idrodinamica trasversale [L²T⁻¹];

D_{i,j} = coefficiente di dispersione idrodinamica [L²T⁻¹];

D₀ = coefficiente di diffusione molecolare [L²T⁻¹];

u₁ = componente della velocità lungo x [LT⁻¹];

u₂ = componente della velocità lungo y [LT⁻¹];

α_L = dispersività longitudinale [L];

α_T = dispersività trasversale [L];

T = trasmissività [L²T⁻¹];

h = carico piezometrico [L].

Nell'ambito di tale teoria, diverse sono le tecniche e le procedure proposte in letteratura per la determinazione dei parametri idrodispersivi. SAGAR (1973), ad esempio, fa ricorso a funzioni "Spline" per valutare le derivate della variabile dipendente e trasforma l'equazione differenziale di partenza in un sistema algebrico; i parametri di trasporto vengono quindi ottenuti con un processo di ottimizzazione basato sul metodo di minimizzazione sequenziale non vincolata. FRIND e PINDER (1973) utilizzano un metodo agli elementi finiti per risolvere il problema inverso relativo alla trasmissività. Il metodo proposto da BRUCH et al. (1974) per l'identificazione dei parametri si basa su un processo di minimizzazione della funzione che

rappresenta la somma dei quadrati degli scostamenti tra la soluzione della equazione di dispersione e alcuni valori sperimentali disponibili. MURTY e SCOTT (1977), per determinare i valori della dispersività longitudinale e trasversale, propongono un algoritmo basato su polinomi di concentrazione, sviluppati tramite doppia interpolazione su un set di valori selezionati della dispersività longitudinale e di quella trasversale.

È proprio l'algoritmo di Murty e Scott che sta alla base del codice utilizzato per l'interpretazione dei dati di concentrazione della prova di dispersione oggetto del presente lavoro. Il codice in questione, denominato IRPADIAS (I_ dentificazione R_ apida dei PA_ rametri di DI_ spersione di un A_ cquifero (Zona S_ atura)), è stato scritto in FORTRAN 77 Standard ed è implementabile su Personal Computer del tipo IBM compatibile, — sotto sistema operativo MS-DOS e compilatore FORTRAN Microsoft 5.0 — (CASTELLANO, 1991).

Il codice IRPADIAS considera un sistema che può essere al più bidimensionale e trascura i fenomeni di scambio liquido-solido nonché i processi di decadimento.

L'osservazione che sta alla base del codice è che la concentrazione C_i = C(x_i, t) a un qualsivoglia istante t ed in un qualsivoglia punto x_i, di un determinato dominio con definite condizioni iniziali e al contorno, è una funzione della velocità media u, della dispersività longitudinale α_L e del rapporto R tra la dispersività longitudinale e dispersività trasversale (R = α_L/α_T):

$$C_{i, \tau} = f_{i, \tau} (u, \alpha_L, R)$$

Ammettendo la conoscenza di u, si può senz'altro scrivere

$$C_{i, \tau} = f_{i, \tau} (\alpha_L, R)$$

ovvero

$$C_j = f_j (\alpha_L, R) \quad j = 1, 2, \dots, N_{C, \text{spe}}$$

essendo il pedice j inteso a contare tutte le N_{C, spe} concentrazioni note per via sperimentale, sia misurate in un dato punto in diversi istanti, sia misurate nello stesso istante in punti diversi. Considerando la natura dell'acquifero possono, inoltre, essere selezionati i limiti minimi e massimi dei possibili valori di α_L ed R. Tali limiti, infatti, possono essere ricavati da dati di letteratura riguardanti acquiferi geologicamente simili.

Tramite i valori massimo, minimo e medio così scelti di α_L ed R, i valori della concentrazione possono essere calcolati (risolvendo l'equazione di trasporto) nei punti assegnati dell'acquifero e per gli istanti temporali desiderati.

Per mezzo di questi valori di concentrazione, di α_L e di R, si può sviluppare un polinomio per ciascuno dei valori di concentrazione C, in funzione di α_L ed R. Dato che le variabili indipendenti sono due, lo sviluppo del polinomio necessita di una doppia interpolazione.

La determinazione di una funzione interpolante per un assegnato set di punti viene fatta tramite un'estensione del principio di interpolazione binomiale di Newton, che conduce ad un'espressione del tipo:

$$f_j = (1 + x\delta_x + 0.5x(x-1)\delta_x^2 + \dots)(1 + y\delta_y + 0.5y(y-1)\delta_y^2 + \dots)f_j^{1,1}$$

in cui:

$$x = (\alpha_L - \alpha_{L,\min}) / (\alpha_{L,\text{med}} - \alpha_{L,\min})$$

$$y = (R - R_{\min}) / (R_{\text{med}} - R_{\min})$$

$$\alpha_{L,\text{med}} = (\alpha_{L,\min} + \alpha_{L,\max}) / 2$$

$$R_{\text{med}} = (R_{\min} + R_{\max}) / 2$$

$$f_j^{1,1} = f_j(\alpha_{L,\min}, R_{\min})$$

$$\delta_x f_j^{1,1} = f_j^{2,1} - f_j^{1,1}$$

$$\delta_y f_j^{1,1} = f_j^{1,2} - f_j^{1,1}$$

$$\delta_x^2 f_j^{1,1} = f_j^{3,1} - 2f_j^{2,1} + f_j^{1,1}$$

$$\delta_y^2 f_j^{1,1} = f_j^{1,3} - 2f_j^{1,2} + f_j^{1,1}$$

$$\delta_x \delta_y f_j^{1,1} = \delta_y \delta_x f_j^{1,1} = f_j^{2,2} - f_j^{1,2} - f_j^{2,1} - f_j^{1,1}$$

$$\delta_x^2 \delta_y f_j^{1,1} = \delta_y \delta_x^2 f_j^{1,1} = f_j^{3,2} - f_j^{3,1} - 2(f_j^{2,2} - f_j^{2,1}) + f_j^{1,2} - f_j^{1,1}$$

$$\delta_x \delta_y^2 f_j^{1,1} = \delta_y^2 \delta_x f_j^{1,1} = f_j^{2,3} - f_j^{1,3} - 2(f_j^{2,2} - f_j^{1,2}) + f_j^{2,1} - f_j^{1,1}$$

$$\delta_x^2 \delta_y^2 f_j^{1,1} = f_j^{3,3} - 2f_j^{2,3} + f_j^{1,3} - 2f_j^{3,2} + 4f_j^{2,2} - 2f_j^{1,2} + f_j^{3,1} - 2f_j^{2,1} + f_j^{1,1}$$

Nelle espressioni precedenti, i parametri indicati con $f_j^{k,1}$ ($k = 1, 2, 3; l = 1, 2, 3$) possono ricavarsi, come già detto, risolvendo l'equazione di trasporto, nelle stesse posizioni (coordinate) ed in corrispondenza degli stessi istanti temporali delle concentrazioni sperimentali C_j e assegnando ai parametri α_L ed R le combinazioni di valori indicati nella tabella seguente.

	$\alpha_L = \alpha_{L,\min}$	$\alpha_L = \alpha_{L,\text{med}}$	$\alpha_L = \alpha_{L,\max}$
$R = R_{\min}$	$f_j^{1,1}$	$f_j^{2,1}$	$f_j^{3,1}$
$R = R_{\text{med}}$	$f_j^{1,2}$	$f_j^{2,2}$	$f_j^{3,2}$
$R = R_{\max}$	$f_j^{1,3}$	$f_j^{2,3}$	$f_j^{3,3}$

Appare quindi chiaro che se per un acquifero si conosce un set di valori di concentrazione, misurati a distanze note dal punto di immissione e in assegnati intervalli temporali, i polinomi di concentrazione permettono la determinazione dei valori dei parametri α_L ed R . La risoluzione dei sistemi di polinomi di concentrazione dipende ovviamente dal numero di dati di concentrazione disponibili; per tale scopo si distinguono due possibili approcci: un approccio per così dire "deterministico" ed un approccio di ottimizzazione.

Approccio "deterministico"

Tale tipo di approccio viene utilizzato nel caso in cui si è nella

condizione minima di dati di concentrazione disponibili, ossia solo due dati sperimentali. In questo caso il problema, infatti, consiste solo nella risoluzione di un sistema di due equazioni algebriche (i polinomi di concentrazione) in due incognite (α_L ed R). Dato che le equazioni sono non-lineari in α_L ed R , è necessario ricorrere ad un metodo iterativo per risolvere il sistema. Il codice IRPADIAS utilizza una "routine" di larga affidabilità basata sul metodo di Newton (CONTE and DE BOOR, 1972).

Approccio di ottimizzazione

Quando si dispone di più di due dati sperimentali, in alternativa all'approccio "deterministico" consistente in tal caso nell'utilizzare "a due a due" i dati sperimentali, può adoperarsi una procedura di ottimizzazione, che permette di utilizzare tutti i dati sperimentali, o comunque a gruppi maggiore di due. La procedura utilizzata dall'IRPADIAS consiste nella minimizzazione della somma dei quadrati degli errori tra concentrazioni sperimentali e concentrazioni ricavate numericamente per incrementi dei parametri α_L ed R , ossia:

$$e_i = C_i - f_i(\alpha_L, R) = e_i(\alpha_L^0, R^0) + (e_i)_{\alpha_L} d\alpha_L + (e_i)_R dR$$

L'errore è pari, cioè, alla somma dell'errore "iniziale", che si ha con i valori α_L ed R di primo tentativo, e degli errori "successivi", che si ottengono per gli incrementi/decrementi dei valori di α_L ed R .

Essendo la funzione da minimizzare pari, quindi, a:

$$F = \sum_{i=1}^{n_{\text{dat}}} (e_i)^2$$

con n_{dat} eguale al numero di concentrazioni sperimentali utilizzate, la determinazione dei parametri α_L ed R può ottenersi dalla risoluzione del sistema costituito dalle seguenti due espressioni:

$$\frac{\partial F}{\partial \alpha_L} = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial R} = 0$$

Detto sistema viene risolto all'interno del codice con lo stesso metodo utilizzato per l'approccio deterministico.

È evidente che, per quelle che sono le basi teoriche del codice di calcolo, non sono numerosi i dati di ingresso richiesti per le elaborazioni. L'input, che deve essere memorizzato a parte in un file di tipo "dat", riguarda essenzialmente: le velocità medie effettive longitudinale e trasversale, gli estremi inferiori e superiori dei parametri α_L ed R , le concentrazioni sperimentali con corrispondenti tempi e coordinate del punto di misura ed, in ultimo, una serie di informazioni necessarie per la procedura di calcolo (precisione, numero massimo di iterazioni, ecc.).

Nel seguito vengono riportati i risultati di un'applicazione del codice ai dati sperimentali ricavati da una prova con traccianti effettuata nel campo prove del Dipartimento di Difesa del Suolo dell'Università della Calabria.

3. DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DELLA DISPERSIVITÀ LONGITUDINALE

Il campo prove per la misura dei parametri idrodispersivi del Dipartimento di Difesa del Suolo dell'Università della Calabria è ubicato in località S. Antonello, nel comune di Montalto Uffugo (CS), e presenta 5 coppie di pozzi, ognuna costituita da un pozzo in falda profonda e da uno in quella superficiale, secondo lo schema riportato in Fig. 1, ossia con una coppia centrale di pozzi, due altre allineate con questa secondo la direzione prevalente di flusso in falda, e le restanti due sempre allineate con la coppia centrale, ma ortogonalmente alla direzione di flusso (TROISI et al., 1993b).

La situazione idrogeologica dell'area in esame, approfonditamente indagata in altri studi (TROISI et al., 1995a), risulta complessa; tuttavia, in corrispondenza dei pozzi si è riscontrata una coltre di copertura spessa circa 7 m, costituita da terreni detritici e alluvionali, in cui si origina la falda superficiale, separati tramite una lente di argilla, dello spessore di circa 4,2 m, da un sottostante banco di terreno sabbioso-limoso e limoso-

argilloso, sede della falda profonda, che arriva oltre i 50 m di profondità, da dove si origina un potente substrato di argille compatte.

La prova cui si fa riferimento è stata effettuata il 23-05-1994 in falda superficiale, considerando condizioni di moto uniforme naturale, immettendo nel pozzo centrale P6 il tracciante ed effettuando i prelievi nel pozzo di valle P4, essendo la direzione prevalente di flusso nella falda in esame quella nord-sud. La sostanza scelta come tracciante è stata il cloruro di sodio (NaCl), preparato in apposita soluzione con concentrazione pari a ~ 245 g/l, immessa in falda in tempi brevi e utilizzando particolari accorgimenti affinché essa risultasse omogenea in tutta la colonna d'acqua contenuta nel pozzo (TROISI et al., 1993a).

I valori di concentrazione rilevati nel pozzo di osservazione P4 sono stati analizzati, secondo quanto previsto dalla teoria deterministica, sia nell'ipotesi di moto monodimensionale uniforme, sia in quella di moto bidimensionale uniforme (TROISI et al., 1995b).

Nelle ipotesi di moto monodimensionale uniforme, immissione istantanea e tracciante conservativo, assumendo come soluzione dell'equazione generale di trasporto di massa la relazione (SAUTY, 1977):

$$C_R = \frac{k}{\sqrt{t_R}} \exp \left[-\frac{P}{4t_R} (1 - t_R)^2 \right]$$

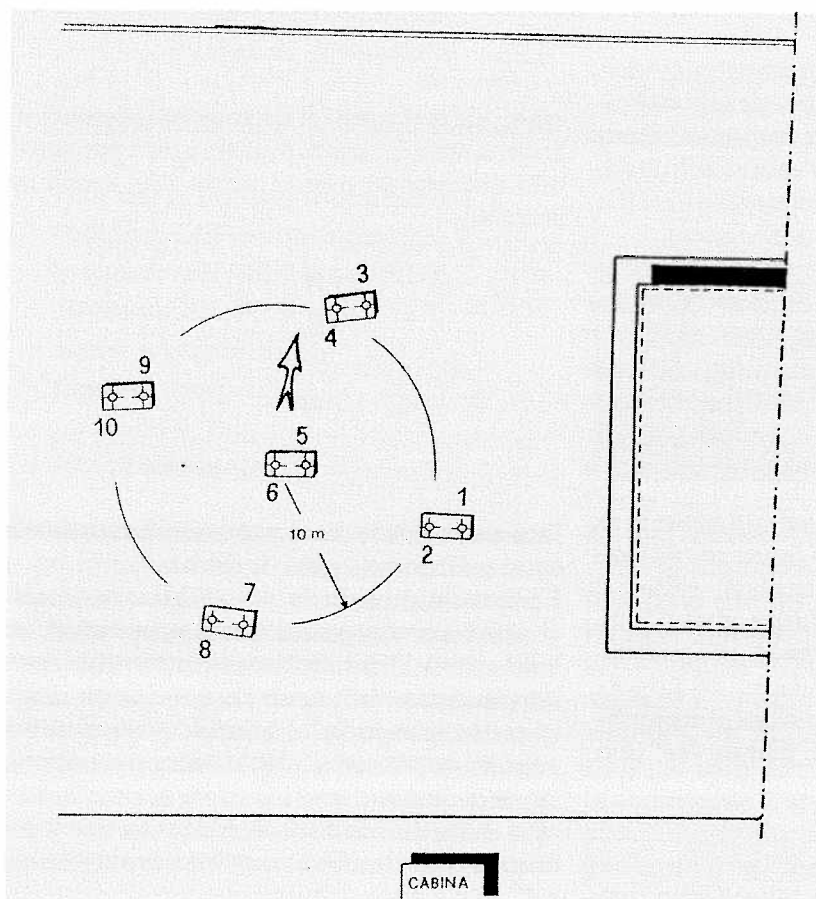


FIG 1 - Schema del campo prove del Dipartimento di Difesa del Suolo dell'Università della Calabria e ubicazione dei pozzi in falda superficiale (numerazione pari) e in falda in pressione (numerazione dispari) (Tratta da TROISI S. et al., 1993b)

ove

$$C_R = \frac{C}{C_{\max}}$$

$$t_R = \frac{v_e \cdot t}{X}$$

$$k = \sqrt{t_{R \max}} \exp \left[\frac{P}{4t_{R \max}} (1 - t_{R \max})^2 \right]$$

$$t_{R \max} = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{P}\right)^2} - \frac{1}{P}$$

$$x = 10 \text{ m}$$

con velocità effettiva $v_e = \bar{v} = 0,827 \text{ m/d}$ e numero di Péclet $P = 3,83$ determinati sulla base dei valori sperimentali, si è ottenuta la curva teorica di identificazione dei dati sperimentali con aggiustamento sul ramo di monte e sul picco ($t_c = 12,09$ giorni), rispetto alla quale è stato ricavato il valore di dispersività $\alpha = 2,61 \text{ m}$, e quella con aggiustamento globale, con riferimento alla quale il valore della dispersività è risultato leggermente maggiore ($\alpha = 2,98 \text{ m}$; $t_c = 14$ giorni), entrambe riportate in Fig. 2.

Per quanto riguarda l'ipotesi di moto bidimensionale uniforme, immissione istantanea e traccianti conservativo, si è assunta, come soluzione dell'equazione generale di trasporto di massa, la relazione:

$$C_R(x_R, y_R, t_R) = \frac{k''}{t_R} \exp \left[- \left[\frac{x_R}{4} \cdot \frac{(1-t_R)^2}{t_R} + \frac{y_R^2}{4x_R t_R} \right] \right]$$

ove

$$x = 10$$

$$x_R = \frac{x}{\alpha_L} = 2,398$$

$$\alpha_T = \frac{\alpha_L}{10} = 0,417 \text{ m}$$

$$y_R = \frac{y}{\sqrt{\alpha_L \alpha_T}} = 2,081$$

$$t_R = \frac{v_e t}{X}$$

$$k'' = t_{R \max} \exp \left[\frac{x_R}{4} \cdot \frac{(1 - t_{R \max})^2}{t_{R \max}} + \frac{y_R^2}{4x_R t_{R \max}} \right]$$

$$t_{R \max} = \sqrt{1 + \left(\frac{2}{x_R}\right)^2 + \left(\frac{y_R}{x_R}\right)^2} - \frac{2}{x_R}$$

Tramite la relazione sopra riportata si è ottenuta la curva teorica di identificazione con aggiustamento sul ramo di monte e sul picco, rispetto al quale si è ricavato il seguente valore di dispersività longitudinale: $\alpha_L = 4,2 \text{ m}$ ($v_e = \bar{v} = 0,827 \text{ m/d}$ e $t_c = 12,09$ giorni); mentre per la curva di identificazione con aggiustamento globale ($t_c = 13,98$ giorni) il valore della dispersività longitudinale diventa: $\alpha_L = 5,48 \text{ m}$. Entrambe queste curve teoriche relative all'ipotesi di moto bidimensionale sono riportate in Fig. 3.

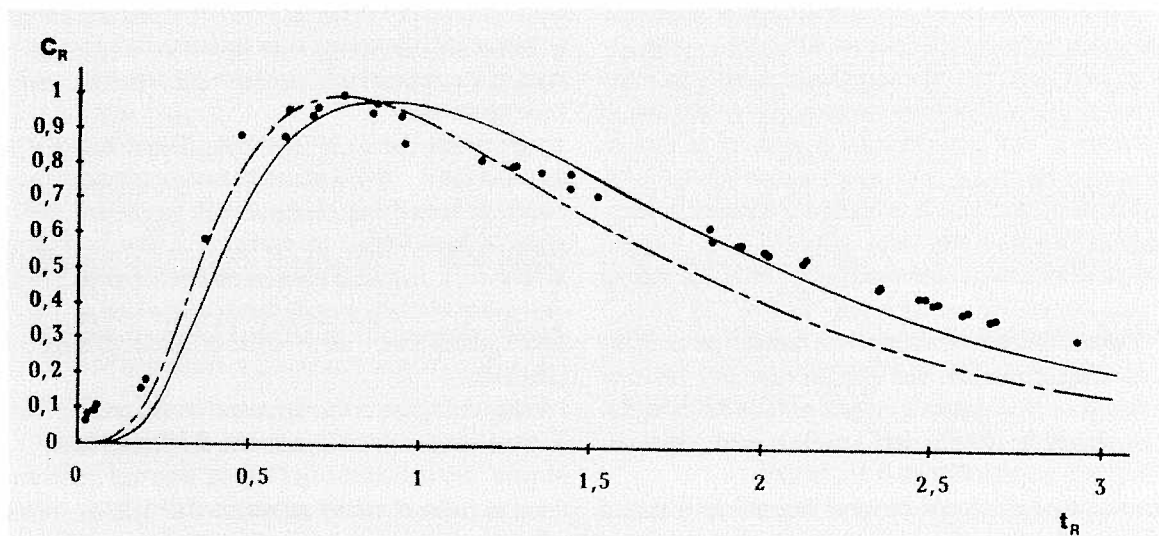


FIG. 2 - Flusso monodimensionale - Immissione istantanea: Identificazione della curva teorica rappresentativa con adattamento globale e confronto con quella relativa all'adattamento sul ramo di monte e sul picco (Tratta da TROISI S. et all., 1995b)

Aggiustamento globale ——— ($t_c = 14$ giorni; $\alpha = 2,98 \text{ m}$)

Aggiustamento sul ramo di monte e sul picco - - - - ($t_c = 12,09$ giorni; $\alpha = 2,61 \text{ m}$)

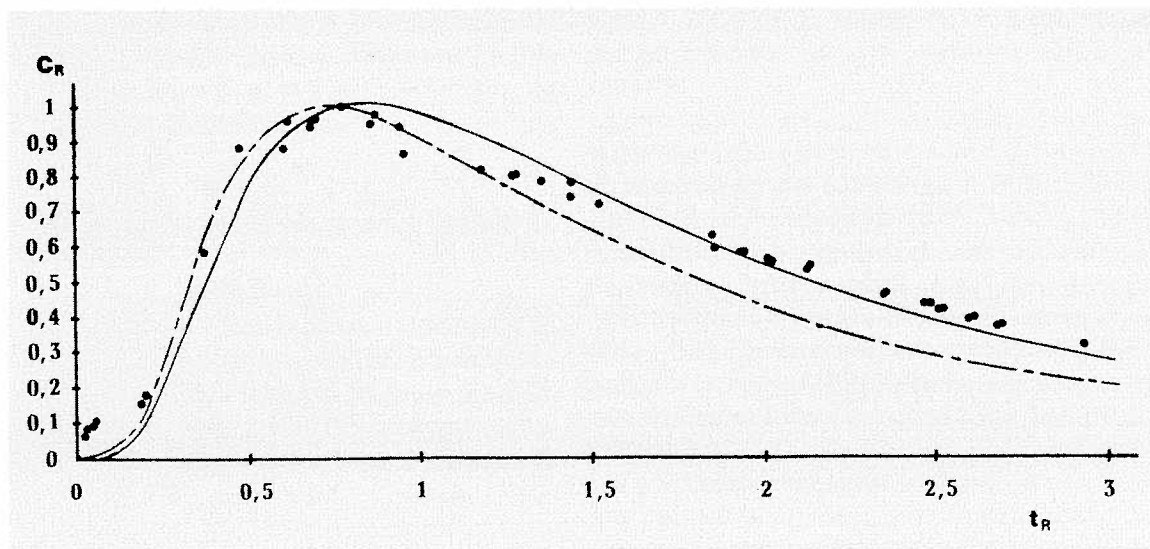


FIG. 3 - Flusso bidimensionale - Immissione istantanea: Identificazione della curva teorica rappresentativa con adattamento globale e confronto con quella relativa all'adattamento sul ramo di monte e sul picco ($\theta = 17^\circ.05'$) (Tratta da TROISI S. et al., 1995b)

Aggiustamento globale ——— ($t_c = 13,98$ giorni; $\alpha_L = 5,48$ m)

Aggiustamento sul ramo di monte e sul picco - - - - - ($t_c = 12,09$ giorni; $\alpha_L = 4,20$ m)

4. APPLICAZIONE DEL CODICE DI CALCOLO

Nel caso in esame, l'applicazione del codice IRPADIAS è stata di tipo monodimensionale, in quanto la mancanza di dati sperimentali di concentrazione in direzione trasversale a quella principale di moto non poteva permettere la determinazione della dispersività trasversale e, quindi, del rapporto R. I dati utilizzati riguardano, infatti, uno stesso punto ma istanti temporali diversi.

I valori di concentrazione, per così dire "teorici", cioè calcolati tramite risoluzione dell'equazione di trasporto, — nelle stesse posizioni (coordinate) ed in corrispondenza degli stessi istanti temporali delle concentrazioni sperimentali C_i e assegnando ai parametri α_L ed R le combinazioni di valori indicati nella tabella sopra riportata —, sono quindi ottenuti utilizzando l'espressione che costituisce la soluzione dell'equazione differenziale del trasporto di massa nelle condizioni di moto bidimensionale ed immissione istantanea (SAUTY, 1977). Tale calcolo è stato inserito direttamente in una "Routine" del codice.

Per quanto concerne i limiti minimo e massimo per la dispersività longitudinale sono stati utilizzati valori pari rispettivamente ad 1 e 10, in quanto la maggior parte dei dati di letteratura, ricavati per acquiferi simili a quello in esame, ricade nell'intervallo predetto (TROISI et al., 1992b).

Sono state eseguite diverse iterazioni differenti per il numero di dati sperimentali utilizzati: sono stati adoperati, infatti, sia l'insieme globale dei dati sperimentali disponibili sia dei gruppi di dati di concentrazione relativi ai tratti caratteristici della curva di restituzione (ramo ascendente, picco, ramo discendente). I valori di α_L in uscita dal codice IRPADIAS variano fra 2,02 e 2,70.

5. CONCLUSIONI

La determinazione dei parametri idrodispersivi, come già evidenziato in precedenza, è una procedura di tipo indiretto, cioè richiede l'utilizzo di metodi o formule di non diretta applicabilità, non essendo possibile l'applicazione di un tipo di sperimentazione in situ con la quale ricavare immediatamente tali parametri. Nell'approccio classico o "deterministico", infatti, sono, il più delle volte, i valori di concentrazione di una prova di tracciamento ad essere utilizzati ed interpretati per la determinazione della dispersività di un acquifero. Tale interpretazione, inoltre, richiede l'utilizzo di procedure numeriche, a volte anche complesse.

Appare evidente, perciò, la necessità di utilizzare innanzitutto dei codici che ricorrano a procedure teoriche realmente compatibili con le condizioni e le metodologie sperimentali, utilizzando dei mezzi semplici per restringere al massimo il range di valori in cui ricercare la stima dei parametri in gioco, condizione questa necessaria prima di passare all'applicazione di procedure matematiche, e relativi codici di calcolo, di maggiore complessità.

I risultati della prova di tracciamento effettuata presso il campo prove sperimentale del Dipartimento di Difesa del Suolo "V. Marone" dell'Università della Calabria, sono stati interpretati con un codice di calcolo automatico (IRPADIAS), basato sulla formulazione proposta da MURTY e SCOTT (1977).

L'applicazione di tale codice, oltre a dare soluzioni che, come già riportato, sono risultate concordi con quelle ottenute con i metodi sopra riportati, ha messo in evidenza la buona efficienza del codice stesso. L'IRPADIAS, infatti, risponde in pieno alle caratteristiche che deve possedere un codice di calcolo, aven-

do lo scopo di stimare un valore di primo tentativo della dispersività di un dato acquifero. La sua applicazione può quindi essere un primo passo verso la formulazione e l'utilizzo di codici più sofisticati.

La sostanziale concordanza scaturita dal confronto dei risultati ottenuti utilizzando il codice e tramite le procedure di calcolo richiamate costituisce, inoltre, una verifica del codice stesso.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano vivamente il Prof. Salvatore Troisi per aver suggerito l'argomento della ricerca e per i consigli forniti durante lo svolgimento della stessa.

BIBLIOGRAFIA

- BRUCH J.C., LAM C.M., SIMUNDICHI T.M., (1974): "Parameter identification in field problems", *Water Resour. Res.*, 10 (1).
- CARRERA J., NEUMAN S.P., (1986a): "Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions. — 1. Maximum likelihood method incorporating prior information". *Water Resour. Res.* 22 (2).
- CARRERA J., NEUMAN S.P., (1986b): "Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: application to synthetic and field data". *Water Resour. Res.*, (22 (2)).
- CASTELLANO L., (1991): *IRPADIAS: codice di calcolo per la identificazione rapida dei parametri di dispersione di un acquifero (zona saturata)*. Matec s.r.l., MTC/EC 36/91.
- CONTE S.D., DE BOOR C., (1972): *Elementary Numerical Analysis*. McGraw-Hill, New York.
- DE WRACHEN D., (1988): "Una libreria di programmi per la simulazione interattiva del trasporto convettivo-dispersivo di soluti in mezzi porosi". *Atti del XXI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*.
- DELHOMME J.P., (1978): "Kriging in the hydrosciences". *Adv. Water Resour.* 1 (5).
- FRIND E.O., PINDER G.F., (1973): "Galerkin solution of the inverse problem for aquifer transmissivity". *Water Resour. Res.*, 9 (5).
- MURTY V.V.N., SCOTT V.H., (1977): "Determination of transport model parameters in groundwater aquifers". *Water Resour. Res.*, 13 (6).
- NEUMAN S.P., (1973): "Calibration of distributed parameter groundwater models viewed as a multi-objective decision process under uncertainty". *Water Resour. Res.*, pp. 1006-1021.
- NEUMAN S.P., (1982): *Statistical characterization of aquifer heterogeneities: an overview*. Scol. Soc. of America, Special paper n. 189.
- SAGAR B., (1973): "Calibration and validation of aquifer models". *Tech. Rep. 17*. Univ. of Ariz. Tucson.
- SAUTY J.P., (1977): *Contribution a l'identification des paramètres de dispersion dans les aquifères par interprétation des expériences de traçage*, Bureau de Recherches Géologique et Minières - Service Géologique National.
- TROISI S., FALLICO C., (1992a): "Metodi di stima delle grandezze e dei parametri che identificano i processi di trasporto di massa in mezzi porosi saturi", in *La salvaguardia delle acque sotterranee* di R. Giura, D. De Wrachien, S. Troisi, C. Gandolfi, C. Fallico, Editoriale BIOS, Cosenza,
- TROISI S., FALLICO C., COSCARELLI R., CARAMUSCIO P., (1992b): "Considerazioni sulle misure sperimentali dei parametri idrodispersivi di falde sotterranee". *Atti del 23° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche. Firenze, 31 agosto - 4 settembre*.
- TROISI S., FALLICO C., COSCARELLI R., CARAMUSCIO P., (1993a): "Misure sperimentali della dispersività in falde sotterranee". *Atti del Congresso biennale "ANDIS '93"*. Palermo.
- TROISI S., FALLICO C., MAIOLO M., COSCARELLI R., (1993b): "Un campo prove per la misura dei parametri idrodispersivi in acquiferi porosi". *Memorie e Studi n. 230. Dipartimento di Difesa del Suolo, Università della Calabria*.
- TROISI S., FALLICO C., MAIOLO M., COSCARELLI R., (1995a): "La caratterizzazione dell'acquifero interessato da un campo prove per lo studio sperimentale di fenomeni idrodispersivi in mezzi porosi. 2° Convegno Nazionale sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi. Nonantola (Modena).
- TROISI S., FALLICO C., COSCARELLI R., (1995b): "Misure sperimentali di dispersività nella falda superficiale di Montalto Uffugo (CS). *Memorie e Studi n. 249. Dipartimento di Difesa del Suolo, Università della Calabria*.
- UMARI A., WILLIS R., LIU P.L.F., (1979): "Identification of aquifer dispersion in two-dimensional transient groundwater contaminant transport: an optimization approach", *Water Resour. Res.* 15 (4).
- YOON Y.S., YEH W.W.G., (1976): "Parameter identification in an heterogeneous medium with the finite element method". *Soc. Petr. Eng. Jour.*, 16 (4).