

E.CUSTODIO M.R.LLAMAS

IDROLOGIA SOTTERRANEA



Traduzione a cura di Roberto Spandre
UNIVERSITÀ DI PISA

Indice

Preambolo	pag. XXV	
Coordinatori.....	» XXVI	
Prologo.....	» XXVII	
Autori e collaboratori	» XXX	
SEZIONE 12		
TRACCIATI E TECNICHE RADIOISOTOPICHE		
IN IDROLOGIA SOTTERRANEA		
0.1 Introduzione generale	» 1105	
0.2 Breve cenno storico.....	» 1105	
0.3 Ringraziamenti	» 1106	
Capitolo 12.1		
Spostamento di fluidi miscibili in mezzi porosi e		
dispersione idrodinamica		
1.1 Introduzione.....	» 1107	
1.2 Diffusione e dispersione idrodinamica in mezzi porosi	» 1107	
1.3 Commenti su spostamento di fluidi non miscibili ed estensione a fluidi miscibili	» 1109	
1.4 Formulazione elementare dei fenomeni di diffusione e dispersione	» 1109	
1.4.1 Tracciante stabile e non trattenuto	» 1110	
1.4.2 Tracciante stabile trattenuto dal terreno	» 1111	
1.4.3 Tracciante radioattivo	» 1112	
1.5 Valori dei coefficienti di dispersione e diffusione ..	» 1112	
1.5.1 Formule	» 1112	
1.5.2 Valori numerici	» 1114	
1.5.3 Considerazioni sulla dispersività negli acquiferi reali	» 1114	
1.6 Determinazione sperimentale dei coefficienti di dispersione	» 1115	
1.7 Risoluzione dell'equazione della dispersione	» 1116	
1.7.1 Spostamento a velocità costante e con flusso parallelo.....	» 1116	
1.7.2 Spostamento radiale	» 1117	
1.7.3 Spostamento di una piccola massa di tracciante stabile a velocità uniforme in un mezzo omogeneo	» 1118	
1.7.4 Movimento di un piano di tracciante	» 1119	
1.7.5 Movimento di una linea di tracciante stabile ..	» 1120	
1.7.6 Movimento di masse finite di tracciante ..	» 1120	
1.7.7 Dispersione di due fluidi miscibili che viaggiano insieme	» 1120	
1.7.8 Dispersione in uno spostamento con ritenzione e decadimento	» 1120	
1.8 Passaggio del tracciante per un punto.....	» 1120	
1.9 Tempo di arrivo del tracciante. Tempo di transito ..	» 1126	
1.10 Determinazione della dispersività	» 1131	
1.11 Curve cumulative	» 1132	
1.12 Curve effettive di penetrazione	» 1133	
Capitolo 12.2		
Traccianti chimici e radioattivi per acque sotterranee.		
Selezione e determinazione		
2.1 Introduzione.....	» 1134	
2.2 Condizioni del tracciante ideale	» 1134	
2.3 Traccianti reali	» 1134	
2.4 Tipi di traccianti artificiali.....	» 1135	
2.4.1 Traccianti solidi in sospensione	» 1135	
2.4.2 Traccianti chimici solubili elettroliti forti..	» 1135	
2.4.3 Traccianti chimici coloranti	» 1136	
2.4.4 Traccianti radioattivi.....	» 1137	
2.4.5 Traccianti isotopici stabili.....	» 1137	
2.5 Traccianti radioattivi	» 1137	
2.5.1 Vantaggi e inconvenienti.....	» 1137	
2.5.2 Selezione del tracciante radioattivo dal punto di vista chimico. Portatori	» 1138	
2.5.3 Selezione del tracciante dal punto di vista del periodo radioattivo	» 1138	
2.5.4 Selezione del radioisotopo dal punto di vista della rivelazione e misurazione	» 1139	

Idrogeologia sotterranea

VIII

2.5.5	Selezione del tracciante radioattivo dal punto di vista sanitario	» 1139
2.5.6	Selezione del tracciante radioattivo dal punto di vista economico	» 1139
2.5.7	Traccianti radioattivi di uso più comune ..	» 1140
2.5.8	Metodi di rivelazione dell'attività dell'acqua marcata con un tracciante radioattivo	» 1142
2.5.9	Sensibilità di rivelazione.....	» 1142
2.6	Iniezione e campionamento del tracciante	» 1144
2.7	Percorso del tracciante e ampiezza della banda tracciata	» 1145
2.8	Quantità di tracciante da utilizzare	» 1147

Capitolo 12.3

Tecniche di applicazione dei traccianti artificiali

3.1	Introduzione.....	» 1148
3.2	Studio della comunicazione idraulica tra due punti..	» 1148
3.3	Tempo di transito tra due punti	» 1150
3.4	Metodo con pozzo di iniezione del tracciante e pozzo di pompaggio	» 1151
3.4.1	Determinazione della porosità	» 1151
3.4.2	Determinazione delle permeabilità relative in acquiferi stratificati.....	» 1159
3.5	Metodi di iniezione in un pozzo unico	» 1161
3.5.1	Acquifero omogeneo.....	» 1161
3.5.2	Acquifero stratificato	» 1163
3.5.3	Recupero di tracciante in acquiferi con gradiente naturale o molto permeabili	» 1164
3.6	Pozzo di iniezione e pozzo di pompaggio. Metodo dei due pozzi	» 1167
3.7	Metodi di diluizione puntuale	» 1169
3.7.1	Misura della velocità del flusso orizzontale dell'acqua sotterranea in un sondaggio	» 1169
3.7.2	Misurazione della velocità verticale nei sondaggi	» 1173
3.7.3	Metodo semplificato con marcatura di tutta la colonna piezometrica. (Metodo spagnolo)	» 1175
3.7.4	Misurazione della direzione e del verso del flusso dell'acqua sotterranea.....	» 1176
3.7.5	Metodi in formazioni alluvionali di spessore ridotto	» 1179
3.8	Applicazione dei traccianti nello studio di sorgenti carsiche	» 1180

Capitolo 12.4

Datazione e tracciamento naturale e accidentale delle acque sotterranee

4.1	Introduzione.....	» 1181
4.2	Principio generale della datazione radioattiva	» 1182
4.3	La datazione con il tritio	» 1182
4.3.1	Dati di base	» 1182

4.3.2	Origine naturale del tritio e variazione nella sua produzione	» 1182
4.3.3	Effetto dei test nucleari sul contenuto di tritio dell'acqua piovana	» 1183
4.3.4	Misurazione e campionamento del tritio ..	» 1187
4.3.5	Meccanismo di apporto di tritio all'acqua sotterranea.....	» 1188
4.3.6	Alterazioni del contenuto di tritio negli acquiferi	» 1189
4.3.7	Considerazioni relative al contenuto di tritio.....	» 1190
4.4	La datazione con radiocarbonio	» 1191
4.4.1	Dati di base	» 1191
4.4.2	Campionamento e determinazione del radiocarbonio	» 1191
4.4.3	Origine del radiocarbonio, variazione della sua produzione e contenuto nella materia organica moderna	» 1192
4.4.4	Meccanismi di apporto di C-14 all'acqua sotterranea.....	» 1193
4.4.5	Alterazioni del contenuto di radiocarbonio negli acquiferi	» 1195
4.4.6	Utilità delle variazioni isotopiche del C-13 al fine di correggere le anomalie prodotte nel contenuto di C-14	» 1196
4.4.7	Età di un'acqua in base al suo contenuto di C-14	» 1197
4.4.8	Interpretazione e validità dei risultati ottenuti con il radiocarbonio.....	» 1198
4.5	Datazione con altri radioelementi	» 1199
4.5.1	Datazione con radiosilicio	» 1199
4.5.2	Datazione con uranio	» 1200
4.6	Principio della datazione e tracciamento chimico e isotopico naturale e accidentale.....	» 1200
4.7	Applicazione delle variazioni isotopiche dell'idrogeno e dell'ossigeno agli studi di idrologia sotterranea..	» 1202
4.7.1	Dati di base	» 1202
4.7.2	Misurazione delle variazioni isotopiche dell'acqua e campionamento	» 1202
4.7.3	Variazioni del contenuto di isotopi dell'idrogeno e dell'ossigeno nell'acqua piovana	» 1202
4.7.4	La composizione isotopica dell'acqua di fiumi e laghi	» 1204
4.7.5	Studio del rapporto D/O-18	» 1204
4.7.6	Apporto di deuterio e ossigeno-18 agli acquiferi	» 1205
4.7.7	Utilità dello studio di altre variazioni isotopiche in idrologia sotterranea	» 1206
4.8	Tracciamento tramite gas naturali	» 1206
4.9	Modelli di mescolamento e dispersione per la datazione radioattiva negli acquiferi	» 1207

4.9.1	Acquifero confinato e acquifero libero con ricarica localizzata	» 1207	A.1.3	Recupero per pompaggio di un volume d'acqua iniettata in un acquifero.....	» 1230
4.9.2	Modello di mescolamento esclusivamente verticale con ricarica localizzata.....	» 1209	A.1.4	Movimento dell'acqua tra un pozzo di ricarica e un pozzo di pompaggio	» 1231
4.9.3	Modello a mescolamento totale o modello esponenziale	» 1209	A.1.5	Movimento dell'acqua in un campo di pozzi	» 1233
4.9.4	Acquifero con ricarica uniforme e stratificazione dell'acqua	» 1210	A.1.6	Valutazione della dispersività	» 1235
4.10	Modelli di mescolamento e dispersione negli acquiferi per la datazione con sequenza di variazioni	» 1212	A.1.7	Movimento di contaminanti in sistemi multifase ..	» 1236
4.11	Diverse applicazioni della datazione e del tracciamento naturale e accidentale.....	» 1214	Appendice 12.2		
4.11.1	Studi di acque antiche. Confronto dei risultati ottenuti con diversi radioisotopi e isotopi stabili	» 1214	Equazioni della dispersione		
4.11.2	Studio relativo al funzionamento degli acquiferi	» 1215	A.2.1	Equazione di conservazione della massa	» 1237
4.11.3	Analisi del grado di sfruttamento degli acquiferi	» 1217	A.2.2	Equazione di conservazione del tracciante	» 1237
4.11.4	Studio del rapporto tra acque superficiali e sotterranee	» 1217	A.2.3	Equazione del flusso	» 1238
4.11.5	Studio dell'origine dell'acqua delle sorgenti	» 1218	A.2.4	Equazioni della dispersione.....	» 1238
4.11.6	Studio dei rapporti acqua dolce-acqua salata	» 1219	<i>Bibliografia</i>		
4.11.7	Interpretazione dell'origine delle acque in aree geotermiche e in salamoie naturali sotterranee.....	» 1219	SEZIONE 13		
4.11.8	Studio del movimento dell'acqua nella zona non satura	» 1220	RAPPORTI TRA ACQUE DOLCI E SALATE NELLE REGIONI COSTIERE		
4.12	Considerazioni relative al numero di campioni necessari	» 1221	Introduzione.....		
Capitolo 12.5			» 1253		
Altre tecniche nucleari in idrologia sotterranea			Capitolo 13.1		
5.1	Introduzione.....	» 1222	Principi generali		
5.2	Tecniche che utilizzano le radiazioni emesse da una sorgente separata dal mezzo	» 1222	1.1	Introduzione e definizioni	» 1255
5.2.1	Log gamma-gamma	» 1223	1.2	Posizione del cuneo salino in assenza di mescolamento	» 1257
5.2.2	Log neutronici.....	» 1223	1.2.1	Formula di Ghyben-Herzberg.....	» 1257
5.2.3	Considerazioni generali	» 1224	1.2.2	Modifiche della legge di Ghyben-Herzberg. Correzione di Hubbert	» 1257
5.3	Tecniche basate sull'analisi per attivazione	» 1225	1.2.3	Inclinazione dell'interfaccia	» 1258
5.4	Tecniche che utilizzano la radioattività naturale dei terreni.....	» 1225	1.3	Profondità dell'interfaccia con acqua dolce e acqua salata in movimento	» 1259
5.5	Tecniche di marcatura radioattiva	» 1225	1.3.1	Motivazione dell'esistenza di un'interfaccia dinamica	» 1259
5.6	Tecniche che utilizzano esplosioni nucleari	» 1226	1.3.2	Formula di Hubbert.....	» 1260
Appendice 12.1			1.4	Applicazione ad acquiferi in pressione	» 1261
Movimento di masse di acqua in un acquifero			1.4.1	Acquiferi confinati	» 1261
A.1.1	Introduzione.....	» 1227	1.4.2	Acquiferi semiconfinati	» 1263
A.1.2	Movimento di un volume di acqua iniettata attraverso un pozzo in un acquifero con flusso naturale	» 1227	1.5	Zona di dispersione e flusso dell'acqua sotterranea con salinità variabile	» 1263
			1.5.1	Potenziale di acqua puntuale, potenziale di acqua dolce e di acqua ambientale o locale	» 1263
			1.5.2	Formula di Lusczynski e confronto con le formule di Hubbert e Ghyben-Herzberg....	» 1265
			1.5.3	Calcolo della profondità dell'acqua salina	» 1265
			1.5.4	Velocità di flusso dell'acqua sotterranea ..	» 1266
			1.6	Effettivi dei cambiamenti di potenziale sul livello dell'acqua	» 1266
			1.7	Effetti lavori sperimentali	» 1267
			1.8	Ampiezza della zona di mescolamento ed effetto delle maree	» 1270

Idrogeologia sotterranea

X

1.9	Aspetti chimici dei rapporti acqua dolce-acqua salata	» 1272
1.10	Rapporti acqua dolce-acqua salata in massicci calcarei.....	» 1273
1.11	Effetto di mutamenti della posizione del mare o del clima	» 1274

Capitolo 13.2

Sfruttamento di acquiferi costieri e limitazione dell'intrusione marina

2.1	Introduzione.....	» 1275
2.2	Principi generali relativi allo sfruttamento di acquiferi costieri	» 1275
2.2.1	Riduzione del flusso verso il mare	» 1275
2.2.2	Utilizzazione della riserva iniziale	» 1276
2.2.3	Captazione sulla costa dell'acqua che fluisce verso il mare	» 1277
2.3	Effetti dello sfruttamento in acquiferi semiconfinati	» 1277
2.4	Sfruttamento di dune costiere	» 1278
2.5	Formazione di coni di acqua salata sotto le captazioni.....	» 1279
2.6	Metodi di prevenzione e controllo dell'intrusione marina	» 1281
2.6.1	Diminuzione del pompaggio.....	» 1281
2.6.2	Riubicazione dei centri di pompaggio	» 1281
2.6.3	Ricarica artificiale.....	» 1282
2.6.4	Creazione di barriere fisiche.....	» 1282
2.6.5	Barriera idraulica di iniezione	» 1283
2.6.6	Depressione di pompaggio	» 1285
2.7	Alternative per la gestione di acquiferi costieri	» 1286
2.8	Effetti delle opere di ingegneria sui rapporti acqua dolce-acqua salata in regioni costiere e altre conseguenze.....	» 1287
2.9	Effetto delle estrazioni sullo spessore della zona di mescolamento	» 1288

Capitolo 13.3

Calcoli relativi ai rapporti acqua dolce-acqua salata in acquiferi costieri

3.1	Introduzione.....	» 1289
3.2	Calcolo approssimato della profondità dell'interfase e del flusso di acqua dolce verso il mare, in assenza di zona di mescolamento	» 1289
3.2.1	Acquifero libero ricaricato uniformemente dalla pioggia	» 1289
3.2.2	Acquifero confinato	» 1291
3.2.3	Calcoli più precisi della posizione dell'interfase quando non esiste zona di mescolamento. Formula di Glover	» 1292
3.2.4	Lunghezza di scarico in mare in un acquifero semiconfinato	» 1294
3.2.5	Rapporti acqua dolce-acqua salata in isole oceaniche.....	» 1295

3.3	Installazione di captazioni di acqua sotterranea. Nuovo regime stazionario	» 1296
3.3.1	Linea di pozzi o dreno parallelo alla costa in un acquifero libero ricaricato uniformemente dalla pioggia	» 1296
3.3.2	Linea di pozzi o dreni paralleli alla costa in un acquifero confinato	» 1297
3.3.3	Estrazioni in isole oceaniche	» 1298
3.4	Movimento dell'interfase acqua dolce-acqua salata	» 1298
3.4.1	Movimento su un piano verticale, perpendicolare alla costa.....	» 1298
3.4.2	Movimento su un piano orizzontale	» 1301
3.5	Formazione di coni e creste saline sotto i pozzi e i dreni.....	» 1303

Appendice 13.1

Tecniche di studio dei rapporti acqua dolce-acqua salata nelle regioni costiere

A.1.1	Introduzione.....	» 1309
A.1.2	Determinazione diretta della posizione dell'interfase acqua dolce-acqua salata	» 1309
A.1.3	Misurazione dei livelli.....	» 1313
A.1.4	Frequenza delle misurazioni	» 1314
A.1.5	Applicazione dei modelli per lo studio dei rapporti acqua dolce-acqua salata in acquiferi costieri.....	» 1314

Appendice 13.2

Note relative alle leggi del flusso in mezzi con fluidi non omogenei

		» 1316
<i>Bibliografia</i>		» 1319

SEZIONE 14

LA PROSPEZIONE GEOFISICA APPLICATA ALL'IDROGEOLOGIA

Capitolo 14.1

Fondamenti. Classificazione. Il metodo elettrico-resistivo

1.1	Fondamenti e storia	» 1327
1.2	Classificazione dei metodi.....	» 1328
1.3	Coordinazione	» 1328
1.4	Metodo magnetico	» 1328
1.5	Metodo gravimetrico	» 1329
1.6	Correnti telluriche	» 1329
1.7	Potenziale proprio	» 1329
1.8	Potenziale indotto	» 1329
1.9	Metodo elettrico resistivo	» 1330
1.9.1	Resistività del terreno	» 1330
1.9.2	Deduzione delle formule.....	» 1331
1.9.3	Dispositivi	» 1332

1.9.4	Interpretazione	»	1332
1.9.5	Interpretazione di un sondaggio elettrico (SEV)	»	1334
1.9.6	Limiti nell'interpretazione dei SEV	»	1337
1.9.7	Strumentazione e metodi di campagna.....	»	1338
1.9.8	Profili elettrici resistivi. Profili di iso-resistività	»	1339
1.9.9	Piani di iso-resistività apparenti.....	»	1340
1.10	Caduta di potenziale	»	1340
1.11	Metodi elettromagnetici	»	1340

Capitolo 14.2

Prospezione sismica

2.1	Storia	»	1341
2.2	Onde elastiche	»	1341
2.3	Metodo di rifrazione	»	1342
2.3.1	Fondamenti e principi dell'interpretazione	»	1342
2.3.2	Interpretazione	»	1345
2.3.3	Strumenti della prospezione sismica a rifrazione	»	1345
2.3.4	Applicazione all'Idrogeologia	»	1346
2.3.5	Tiri a ventaglio	»	1347
2.3.6	Riflessione sismica	»	1348

Capitolo 14.3

Registrazioni di sondaggi. Costi e rendimenti in geofisica

3.1	Sviluppo e metodi di registrazione	»	1349
3.2	Registrazione della salinità e della temperatura	»	1350
3.3	Registrazioni elettriche	»	1351
3.3.1	Fondamenti	»	1351
3.3.2	Potenziale spontaneo.....	»	1351
3.3.3	Registrazioni resistive.....	»	1352
3.4	Registrazioni radioattive	»	1354
3.4.1	Registrazione gamma	»	1354
3.4.2	Registrazione gamma-gamma.....	»	1356
3.4.3	Registrazione neutronica.....	»	1356
3.5	Registrazione sonica	»	1357
3.6	Metodi vari	»	1358
3.7	Riassunto	»	1358
3.8	Costo dei lavori di geofisica	»	1359
3.9	Rendimento e costo a sondaggio o a implantazione	»	1361

<i>Bibliografia</i>	»	1362
---------------------------	---	------

SEZIONE 15

ESPLORAZIONE DI ACQUE SOTTERRANEE

Capitolo 15.1

Obiettivo dell'esplorazione di acque sotterranee e relativi metodi

1.1	Introduzione.....	»	1365
-----	-------------------	---	------

1.2	Contenuto della sezione	»	1366
1.3	Tipi di studi relativi all'esplorazione	»	1366
1.3.1	Studi preliminari o di rilevamento	»	1366
1.3.2	Studi idrogeologici generali	»	1367
1.3.3	Studi di dettaglio.....	»	1367
1.4	Tecniche ausiliarie negli studi idrogeologici.....	»	1367
1.4.1	Raccolta di informazioni.....	»	1367
1.4.2	Studio della domanda d'acqua	»	1367
1.4.3	Metodi geologici	»	1368
1.4.4	Metodi geofisici	»	1369
1.4.5	Studi climatologici	»	1369
1.4.6	Metodi di idrologia di superficie	»	1370
1.4.7	Metodi idrochimici	»	1370
1.5	Metodi idrogeologici propriamente detti.....	»	1371
1.5.1	Raccolta dei dati di base.....	»	1371
1.5.2	Sintesi idrogeologica.....	»	1373
1.6	Tecniche speciali	»	1375

Capitolo 15.2

Esplorazione di acque sotterranee in rocce non consolidate

2.1	Introduzione.....	»	1377
2.2	Caratteristiche geologiche e geometriche dei depositi non consolidati.....	»	1377
2.2.1	Principi fondamentali della classificazione	»	1377
2.2.2	Depositi di origine fluviale.....	»	1378
2.2.3	Depositi in valli di origine tettonica.....	»	1379
2.2.4	Depositi di origine eolica	»	1380
2.2.5	Depositi delle pianure costiere	»	1380
2.2.6	Depositi di origine glaciale.....	»	1381
2.2.7	Ruolo della tettonica	»	1381
2.3	Porosità	»	1382
2.4	Permeabilità.....	»	1383
2.5	Qualità chimica	»	1385
2.6	Sistemi di captazione di acque sotterranee	»	1386
2.7	Peculiarità dei metodi di esplorazione	»	1386
2.7.1	Metodi geologici	»	1386
2.7.2	Metodi geofisici	»	1388
2.7.3	Metodi idrologici	»	1388
2.7.4	Sondaggi meccanici e pozzi sperimentali..	»	1388

Capitolo 15.3

Esplorazione di acque sotterranee in rocce intrusive e metamorfiche

3.1	Introduzione.....	»	1390
3.2	Tipi di rocce e caratteristiche strutturali di interesse idrogeologico.....	»	1390
3.2.1	Generalità	»	1390
3.2.2	Rocce intrusive, plutoniche o cristalline ..	»	1390
3.2.3	Rocce filoniane	»	1391
3.2.4	Rocce metamorfiche	»	1391
3.2.5	Importanza del tipo litologico di roccia	»	1391
3.2.6	Dimensioni geometriche	»	1391

Idrogeologia sotterranea

XII

3.2.7	L'alterazione meteorica.....	»	1391
3.2.8	La fratturazione.....	»	1392
3.3	Porosità	»	1392
3.4	Permeabilità e portata dei pozzi	»	1393
3.5	Rapporti tra le caratteristiche litologiche e la composizione chimica delle acque	»	1395
3.6	Sistemi di captazione di acque	»	1396
3.7	Peculiarità dei metodi di esplorazione	»	1396
3.7.1	Parte generale	»	1396
3.7.2	Metodi geologici.....	»	1397
3.7.3	Metodi geofisici	»	1397
3.7.4	Inventario di pozzi e sorgenti	»	1398
3.7.5	Programmazione di sondaggi meccanici e pozzi sperimentali.....	»	1398

Capitolo 15.4

Esplorazione di acque sotterranee in rocce vulcaniche

4.1	Introduzione.....	»	1401
4.2	Classificazione e disposizione strutturale delle formazioni vulcaniche dal punto di vista idrogeologico.....	»	1401
4.2.1	Classificazione	»	1401
4.2.2	Disposizione strutturale	»	1402
4.2.3	Caratteristiche geometriche degli acquiferi nelle formazioni vulcaniche	»	1402
4.3	Porosità	»	1404
4.4	Permeabilità.....	»	1405
4.5	Rapporti tra le caratteristiche litologiche e la composizione chimica delle acque	»	1406
4.6	Sistemi di captazione delle acque	»	1407
4.7	Peculiarità dei metodi di esplorazione	»	1408
4.7.1	Parte generale	»	1408
4.7.2	Metodi geologici.....	»	1408
4.7.3	Metodi geofisici	»	1408
4.7.4	Inventario di captazioni d'acqua e sorgenti..	»	1408
4.7.5	Metodi idrologici	»	1409
4.7.6	Programmazione di sondaggi meccanici o captazioni sperimentali	»	1409

Capitolo 15.5

Esplorazione di acque sotterranee in rocce sedimentarie (eccetto sistemi carsici)

5.1	Introduzione.....	»	1410
5.2	Classificazione e disposizione strutturale dal punto di vista idrogeologico	»	1410
5.2.1	Classificazione	»	1410
5.2.2	Caratteristiche strutturali.....	»	1412
5.2.3	Caratteristiche geometriche degli acquiferi	»	1412
5.3	Porosità	»	1413
5.3.1	Rocce detritiche a granulometria fine.....	»	1413
5.3.2	Arenarie e conglomerati	»	1414
5.4	Permeabilità.....	»	1415

5.4.1	Rocce a granulometria fine.....	»	1415
5.4.2	Arenarie e conglomerati	»	1415
5.5	Rapporto tra le caratteristiche litologiche e la composizione chimica delle acque	»	1416
5.6	Sistemi di captazione di acque	»	1416
5.7	Peculiarità dei metodi di esplorazione	»	1417
5.7.1	Parte generale	»	1417
5.7.2	Metodi geologici e geofisici	»	1417
5.7.3	Programmazione di pozzi e sondaggi.....	»	1417

Capitolo 15.6

Esplorazione di acque sotterranee in zone carsiche

6.1	Introduzione.....	»	1418
6.1.1	Definizioni	»	1418
6.1.2	Importanza pratica del carsismo	»	1418
6.1.3	Idrologia carsica, geomorfologia e speleologia	»	1419
6.2	Classificazione e disposizione strutturale delle rocce carsiche	»	1420
6.2.1	Classificazione	»	1420
6.2.2	Caratteristiche strutturali.....	»	1421
6.2.3	Aspetti geomorfologici del carsismo	»	1421
6.2.4	Estensione delle formazioni carsiche	»	1422
6.3	Porosità	»	1423
6.4	Permeabilità.....	»	1424
6.5	Qualità chimica delle acque sotterranee in rocce carbonatate o evaporitiche	»	1426
6.6	Sistemi di captazione di acque	»	1427
6.7	Peculiarità dei metodi di esplorazione	»	1428
6.7.1	Parte generale	»	1428
6.7.2	Metodi geologici e geomorfologici	»	1428
6.7.3	Metodi geofisici	»	1430
6.7.4	Metodi idrologici	»	1431
6.7.5	Le sorgenti sottomarine	»	1433
6.7.6	Programmazione di sondaggi di ricerca e pozzi sperimentali	»	1434

Capitolo 15.7

Peculiarità dell'esplorazione di acque sotterranee in climi estremi

7.1	Introduzione.....	»	1435
7.2	Deserti	»	1435
7.2.1	Il ciclo idrologico nei deserti	»	1435
7.2.2	Qualità dell'acqua	»	1437
7.2.3	Esplorazione dell'acqua sotterranea nei deserti	»	1438
7.3	"Permafrost" o terre perennemente gelate	»	1439
7.3.1	Distribuzione del "permafrost"	»	1439
7.3.2	Esplorazione dell'acqua in zone di "permafrost"	»	1441
7.3.3	Difficoltà particolari nelle regioni polari ..	»	1443

Capitolo 15.8

La redazione di rapporti idrogeologici

8.1	Introduzione.....	»	1444
8.1.1	Scopo	»	1444
8.1.2	Importanza	»	1444
8.1.3	Tipi di rapporti e articoli.....	»	1444
8.2	Tappe successive dell'elaborazione di un rapporto	»	1444
8.2.1	Definizione degli obiettivi e dei mezzi necessari o disponibili.....	»	1444
8.2.2	Primo schema del rapporto	»	1445
8.2.3	Conclusione della prima bozza.....	»	1445
8.2.4	Supervisione della prima bozza	»	1445
8.2.5	Conclusione del testo e figure definitive ..	»	1445
8.3	Contenuto dei rapporti.....	»	1445
8.3.1	Copertina o frontespizio	»	1446
8.3.2	Il prologo o prefazione	»	1447
8.3.3	L'indice o sommario	»	1447
8.4	Alcuni aspetti interessanti	»	1448
8.4.1	La sintesi o "Abstract"	»	1448
8.4.2	I riferimenti ad altri lavori	»	1448
8.4.3	Lo stile	»	1448
8.4.4	Terminologia, definizioni e concetti	»	1448
8.4.5	Cifre significative	»	1449
8.5	Alcune questioni di etica e pratica corretta.....	»	1449
8.6	Esempi di indici di rapporti idrogeologici	»	1449
8.6.1	Indice di un rapporto di sfruttamento	»	1449
8.6.2	Esempio di indice dello Studio generale di Risorse Idriche Totali	»	1450
8.6.3	Esempio di uno studio idrogeologico breve	»	1453

Capitolo 15.9

Programmazione, valutazione e controllo degli studi idrogeologici

9.1	Introduzione.....	»	1455
9.1.1	Importanza da un punto di vista economico ..	»	1455
9.1.2	Situazione attuale	»	1455
9.1.3	Finalità e approccio del capitolo.....	»	1455
9.4.1	Definizione degli obiettivi e dei mezzi.....	»	1456
9.2	Valutazione relativa a personale, tempo e costi delle diverse operazioni.....	»	1456
9.2.1	Criteri generali	»	1456
9.2.2	Studio della domanda d'acqua	»	1457
9.2.3	Cartografia geologica	»	1457
9.2.4	Prospezione geofisica	»	1459
9.2.5	Studi climatologici	»	1459
9.2.6	Idrologia di superficie.....	»	1459
9.2.7	Inventario di pozzi e sorgenti	»	1459
9.2.8	Acquisizione ed elaborazione dei dati sulla qualità chimica	»	1460
9.2.9	Livellazione e misurazione del livello di pozzi e piezometri.....	»	1460
9.2.10	Sondaggi meccanici e piezometri	»	1460

9.2.11	Pozzi sperimentali e prove di pompaggio ..	»	1461
9.2.12	Valutazione di lavori speciali	»	1461
9.2.13	Spese di direzione, gestione, consulenza, supervisione	»	1462
9.2.14	Alcuni esempi di valutazione delle spese in studi idrogeologici	»	1462
9.3	Sistemi di coordinamento tra le diverse attività	»	1463
9.4	Enti per la realizzazione di studi idrogeologici.....	»	1467
9.4.1	Chi realizza gli studi idrogeologici?.....	»	1467
9.4.2	Il ruolo delle imprese private per gli studi idrogeologici	»	1467
9.4.3	Il problema della scelta e dell'assunzione del consulente	»	1468

Capitolo 15.10

Carte idrogeologiche

10.1	Introduzione.....	»	1469
10.2	Elementi delle carte idrogeologiche	»	1469
10.2.1	Scala	»	1469
10.2.2	Dati geografici	»	1470
10.2.3	Dati climatici.....	»	1470
10.2.4	Dati geologici	»	1470
10.2.5	Dati di idrologia di superficie.....	»	1471
10.2.6	Dati di idrologia sotterranea	»	1471
10.2.7	Dati di idrochimica	»	1471
10.3	Definizione e presentazione delle carte idrogeologiche	»	1472
10.3.1	Definizione	»	1472
10.3.2	Presentazione delle carte idrogeologiche ..	»	1472
10.4	Classificazione delle carte idrogeologiche	»	1472
10.4.1	Scala	»	1472
10.4.2	Obiettivi o finalità.....	»	1473
10.4.3	Contenuto	»	1473
10.5	Legenda internazionale delle carte idrogeologiche	»	1473

Appendice 15.1

Inventario dei punti d'acqua

A.1	Introduzione.....	»	1481
A.2	Natura dell'inventario dei punti d'acqua.....	»	1481
A.2.1	Definizione di punto d'acqua	»	1481
A.2.2	Breve descrizione dei modelli di stampati utilizzati per l'inventario.....	»	1482
A.2.2.1	Scheda o dossier del punto d'acqua	»	1482
A.2.2.2	Atlante dei punti d'acqua	»	1482
A.3	Preparazione dell'inventario	»	1483
A.4	Utilità idrogeologica	»	1484
A.4.1	Sfruttamento totale della zona	»	1484
A.4.2	Distribuzione spaziale dei punti d'acqua ..	»	1484
A.4.3	Calcolo della trasmissività dell'acquifero ..	»	1484
A.4.4	Conoscenza della geologia del sottosuolo ..	»	1485
A.4.5	Evoluzione storica di portate, livelli piezometrici e caratteristiche chimiche	»	1485
A.4.6	Utilità per studi futuri	»	1485

<i>Bibliografia</i>	»	1486
---------------------------	---	------

Idrogeologia sotterranea

XIV

SEZIONE 16

MODELLI IN IDROLOGIA SOTTERRANEA

0	Introduzione.....	»	1499
0.1	Note generali	»	1499
0.2	Brevi note storiche	»	1499
0.3	Ringraziamenti	»	1500

Capitolo 16.1

Sistemi e modelli

1.1	L'acquifero come sistema	»	1501
1.2	Modello di un acquifero	»	1502
1.3	Tipi di modelli	»	1503
1.3.1	Modelli analitici	»	1503
1.3.2	Modelli matematici	»	1503
1.3.3	Modelli analogici	»	1503
1.4	Processo di modellizzazione. Modello concettuale	»	1504
1.5	Utilizzazione dei modelli di acquifero	»	1504
1.6	Confronto tra modelli analogici e digitali	»	1505
1.7	Capacità di risolvere i problemi	»	1505
1.7.1	Problemi non lineari	»	1505
1.7.2	Problemi dello stato iniziale	»	1506
1.8	Costruzione del modello. Lettura e analisi dei risultati	»	1506
1.9	Soluzione dei problemi con gran numero di nodi..	»	1507
1.10	Visione diretta del comportamento del sistema	»	1507

Capitolo 16.2

Ricompilazione e presentazione dei dati di base per la costruzione, taratura e utilizzazione di un modello di simulazione di un sistema acquifero

2.1	Introduzione e concetti fondamentali	»	1508
2.2	Considerazioni relative alla calibrazione del modello	»	1508
2.3	Dati precisi e modo per ottenerli	»	1509
2.4	Conseguimento dei dati	»	1513
2.5	Selezione del periodo e dell'intervallo di tempo ..	»	1513
2.6	Bilanci ed espressione delle portate	»	1514
2.7	Presentazione dei dati	»	1515
2.7.1	Dati geometrici	»	1515
2.7.2	Parametri fisici	»	1515
2.7.3	Entrate ed uscite d'acqua	»	1516
2.7.4	Livelli d'acqua	»	1516
2.8	Errori nei dati	»	1516
2.9	Alcune precisioni riguardo ai dati per il modello ..	»	1517
2.9.1	Geometria del sistema.....	»	1517
2.9.2	Parametri fisici	»	1517
2.9.3	Entrate ed uscite d'acqua	»	1518
2.9.4	Livelli piezometrici.....	»	1519

Capitolo 16.3

Modelli analogici di fluidi viscosi

3.1	Introduzione.....	»	1520
3.2	Fondamenti	»	1520

3.3	Modelli verticali	»	1522
3.4	Modelli orizzontali	»	1524
3.5	Esempi	»	1525

Capitolo 16.4

Modelli analogici elettrici

4.1	Modelli di foglio conduttore	»	1527
4.1.1	Principi	»	1527
4.1.2	Fattori di scala.....	»	1528
4.1.3	Confini di ricarica e di drenaggio.....	»	1529
4.2	Modelli di resistenze (R).....	»	1531
4.3	Modelli di resistenze e capacità (R-C)	»	1531
4.3.1	Principi	»	1531
4.3.2	Equazioni basilari	»	1532
4.3.3	Impostazione del calcolo della rete	»	1534
4.3.4	Calcoli complementari	»	1534
4.3.5	Impianto di eccitazione e risposta	»	1537
4.3.6	Programmi di pompaggio	»	1538
4.3.7	Risposte.....	»	1539
4.3.8	Sovrapposizione. Regolazione del modello (validazione)	»	1541

Capitolo 16.5

Impostazione generale dei modelli matematici degli acquiferi

5.1	Nozioni	»	1542
5.2	Equazione del flusso nell'acquifero e metodi generali di trattamento numerico.....	»	1542
5.2.1	Metodi a maglia rettangolare	»	1542
5.2.2	Metodi a maglia poligonale	»	1548
5.3	Condizioni al contorno	»	1549
5.3.1	Introduzione	»	1549
5.3.2	Discretizzazione spaziale dell'acquifero ..	»	1549
5.3.3	Condizioni di contorno spaziali	»	1550
5.3.4	Condizioni di limiti temporanei	»	1551
5.3.5	Portate prestabilite	»	1552

Capitolo 16.6

Metodi di risoluzione dei modelli matematici

6.1	Introduzione.....	»	1553
6.1.1	Schemi impliciti di risoluzione.....	»	1553
6.1.2	Metodi diretti di risoluzione di sistemi di equazioni lineari	»	1554
6.1.3	Metodi indiretti o iterativi.....	»	1556
6.2	Metodo esplicito	»	1557
6.2.1	Impostazione	»	1557
6.2.2	Convergenza e stabilità	»	1558
6.2.3	Conclusioni	»	1558
6.3	Metodi impliciti	»	1558
6.3.1	Metodi di rilassamento	»	1558
6.3.2	Metodo diretto in senso alternante (ADI)..	»	1563
6.3.3	Metodo iterativo in senso alternante (IADI)	»	1565

6.3.4	Criteri di convergenza.....	»	1565
6.4	Confronto tra i diversi metodi	»	1566
6.5	Metodi dell' Illinois State Water Survey	»	1566
6.6	Metodi dello U.S. Geological Survey	»	1567
6.7	Metodo del Servizio Geologico di Opere Pubbliche spagnolo.....	»	1567

Capitolo 16.7

Trattamento di problemi particolari mediante modelli matematici

7.1	Introduzione.....	»	1568
7.2	Acquiferi semiconfinati	»	1568
7.3	Infiltrazione di fiumi	»	1569
7.4	Acquiferi costieri.....	»	1569
7.5	Drenaggio differito	»	1570
7.6	Evapotraspirazione	»	1570
7.7	Prosciugamento e inondamento dei nodi	»	1570

Capitolo 16.8

Preparazione, taratura e utilizzazione di un modello matematico

8.1	Scelta della maglia	»	1572
8.2	Scelta del metodo di soluzione	»	1573
8.3	Calibrazione del modello	»	1574
8.4	Criteri generali sull'utilizzo dei modelli matematici	»	1576
8.4.1	Azioni esterne all'acquifero	»	1576
8.4.2	Parametri di qualità del funzionamento	»	1577
8.4.3	Ipotesi di stato iniziale	»	1578
8.4.4	Generalizzazione dei risultati	»	1578

Appendice 16.1

I metodi degli elementi finiti applicati all'idrologia

A.1	Introduzione.....	»	1579
A.2	Definizione del problema	»	1579
A.3	Derivazione dei funzionali	»	1580
A.4	Il metodo di Raleigh-Ritz	»	1580
A.4.1	Scelta delle funzioni e suddivisione in elementi.....	»	1581
A.5	Formulazione dell'equazione matriciale	»	1582
A.6	Il metodo di Galerkin	»	1583
A.7	Confronto tra i metodi degli elementi finiti e quelli delle differenze finite.....	»	1584

<i>Bibliografia</i>	»	1585
---------------------------	---	------

Sezione 17

progettazione e costruzione di captazioni di acqua sotterranea

Capitolo 17.1

Caratteristiche generali del progetto di una captazione

1.1	Introduzione.....	»	1591
-----	-------------------	---	------

1.2	Gallerie filtranti, canali di drenaggio, pozzi scavati e pozzi puntuali	»	1591
1.3	Pozzi radiali	»	1592
1.4	Pozzi verticali	»	1593
1.4.1	Parte generale	»	1593
1.4.2	Profondità	»	1593
1.4.3	Metodo di perforazione.....	»	1593
1.4.4	Tubazione di rivestimento	»	1593
1.4.5	Diametro	»	1594
1.4.6	Filtro e ghiaia di riempimento	»	1595
1.4.7	Sviluppo	»	1597
1.4.8	Protezione sanitaria.....	»	1597
1.4.9	Abbandono dei pozzi	»	1598
1.5	Controllo e vigilanza dell'opera. Efficienza di una captazione	»	1598

Capitolo 17.2

Metodi di perforazione dei pozzi

2.1	Perforazione a percussione	»	1599
2.1.1	Introduzione	»	1599
2.1.2	Colonna o batteria di perforazione	»	1599
2.1.3	Cavo	»	1602
2.1.4	Sonda o macchina perforatrice	»	1604
2.1.5	Sistemi di lavoro	»	1606
2.2	Perforazione a rotazione con circolazione diretta ..	»	1607
2.2.1	Introduzione	»	1607
2.2.2	Colonna di perforazione	»	1608
2.2.3	Macchina perforatrice	»	1616
2.2.4	Fanghi di perforazione	»	1617
2.2.5	Additivi dei fanghi di perforazione	»	1620
2.2.6	Composizione di un fango per la perforazione di pozzi	»	1621
2.3	Perforazione a rotazione con circolazione inversa ..	»	1622
2.3.1	Introduzione	»	1622
2.3.2	Sistemi di perforazione con circolazione inversa	»	1622

Capitolo 17.3

Tubazioni di rivestimento e cementazione dei pozzi

3.1	Tubazioni di rivestimento	»	1626
3.1.1	Scopo della tubazione di rivestimento	»	1626
3.1.2	Tipi di tubi di rivestimento	»	1626
3.1.3	Scelta del tubo di rivestimento	»	1627
3.1.4	Tubi di rivestimento telescopici	»	1630
3.2	Cementazioni.....	»	1632
3.2.1	Scopo della cementazione.....	»	1632
3.2.2	Metodi di cementazione	»	1632
3.2.3	Materiale di iniezione e dosaggio.....	»	1635
3.3	Verticalità ed allineamento	»	1636
3.3.1	Parte generale	»	1636
3.3.2	Metodi di misurazione	»	1636

Idrogeologia sotterranea

XVI

Capitolo 17.4

Zona di ingresso dell'acqua nei pozzi

4.1	Parte generale	»	1639
4.2	Griglie	»	1639
4.2.1	Funzione del filtro.....	»	1639
4.2.2	Tipi comuni di griglie	»	1640
4.2.3	Criteri di selezione e dimensionamento dei filtri	»	1644
4.2.4	Metodi di installazione delle griglie.....	»	1645
4.3	Riempimento con ghiaia	»	1649
4.3.1	Parte generale	»	1649
4.3.2	Casi che richiedono riempimenti di ghiaia..	»	1650
4.3.3	Scelta dello strato di riempimento di ghiaia..	»	1650
4.3.4	Posizionamento del materiale di riempimento	»	1654
4.3.5	Metodi di installazione di filtri nei pozzi con riempimento di ghiaia	»	1655
4.4	Considerazioni finali	»	1656

Capitolo 17.5

Sviluppo e stimolazione dei pozzi

5.1	Aspetti generali	»	1658
5.2	Sviluppo in materiali granulari non consolidati	»	1658
5.3	Sviluppo e stimolazione di pozzi in materiali consolidati	»	1660
5.4	Sviluppo tramite sovrappompaggio	»	1660
5.5	Sviluppo tramite lavaggio controcorrente, pompaggio intermittente ed estrazione con sonda ..	»	1660
5.6	Sviluppo tramite aria compressa	»	1662
5.6.1	Metodo del pozzo aperto	»	1662
5.6.2	Metodo del pozzo chiuso	»	1663
5.7	Sviluppo di pozzi con pistone o stantuffo.....	»	1665
5.8	Sviluppo mediante getti d'acqua orizzontali ad alta velocità	»	1667
5.9	Stimolazione e sviluppo tramite acidificazione	»	1669
5.10	Stimolazione e sviluppo con esplosivi	»	1673
5.10.1	Stimolazione	»	1674
5.10.2	Sviluppo e riabilitazione	»	1675
5.10.3	Trattamento con esplosivi ad effetto vibratorio.....	»	1675
5.10.4	Esplosivi perforanti.....	»	1676
5.11	Fratturazione idraulica.....	»	1676
5.12	Sviluppo con ghiaccio secco	»	1676
5.13	Utilizzo di agenti disperdenti	»	1678
5.14	Miglioramenti prodotti dalla stimolazione dei pozzi..	»	1679

Capitolo 17.6

Corrosione ed incrostazione dei pozzi

6.1	Introduzione.....	»	1681
6.2	Incrostazioni delle captazioni d'acqua	»	1682
6.3	Tipi di incrostazioni.....	»	1682
6.4	Importanza della composizione chimica delle acque	»	1683
6.5	Incrostazione e caratteristiche costruttive e di funzionamento dei pozzi	»	1684

6.6	Misure per prevenire le incrostazioni dei pozzi	»	1684
6.7	Disincrostazione dei pozzi.....	»	1685
6.7.1	Aspetti generali	»	1685
6.7.2	Tipi di agenti chimici disincrostanti	»	1686
6.7.3	Applicazione dei metodi disincrostanti	»	1687
6.7.4	Disincrostazione di pozzi non rivestiti	»	1689
6.8	Corrosione	»	1689
6.8.1	Aspetti generali relativi alla corrosione	»	1689
6.8.2	Ossidazione.....	»	1689
6.8.3	La dissoluzione dei metalli.....	»	1689
6.8.4	Fenomeni elettrolitici	»	1690
6.8.5	Autoprotezione e passivazione	»	1691
6.9	La corrosione dei pozzi	»	1691
6.9.1	Cause della corrosione	»	1691
6.9.2	Corrosione generale	»	1692
6.9.3	Corrosione intergranulare e fessurante	»	1692
6.9.4	Corrosione selettiva	»	1692
6.9.5	Corrosione bimetallica	»	1692
6.9.6	Corrosione alveolare o camolatura.....	»	1692
6.9.7	Tensiocorrosione.....	»	1693
6.9.8	Corrosione per fatica.....	»	1694
6.9.9	Corrosione per correnti vaganti	»	1694
6.9.10	Corrosione batterica	»	1694
6.10	Importanza della composizione dell'acqua nella corrosione dei pozzi.....	»	1694
6.11	Come proteggersi dalla corrosione	»	1695
6.11.1	Miglioramento delle condizioni di funzionamento del pozzo	»	1695
6.11.2	Isolamenti elettrici durante la costruzione del pozzo	»	1696
6.11.3	Protezione con rivestimenti	»	1696
6.11.4	Protezione catodica.....	»	1696
6.11.5	Utilizzo di materiali resistenti alla corrosione	»	1697
6.11.6	Precauzioni complementari.....	»	1698
6.11.7	Le prove di corrosione	»	1699

Capitolo 17.7

Protezione sanitaria e abbandono dei pozzi

7.1	Esigenza di protezione sanitaria	»	1700
7.2	Agenti e metodi di disinfezione	»	1700
7.3	Procedure costruttive per ottenere un'adeguata protezione sanitaria	»	1701
7.3.1	Localizzazione del pozzo	»	1701
7.3.2	Protezione superiore	»	1701
7.3.3	Cementazione	»	1702
7.4	Abbandono dei pozzi. Sigillatura	»	1703
7.5	Recupero del filtro dai pozzi.....	»	1705

Capitolo 17.8

Gallerie drenanti, canali di drenaggio e pozzi scavati

8.1	Introduzione.....	»	1706
8.2	Gallerie drenanti	»	1706

8.2.1	Tipi di gallerie.....	»	1706	11.1.1	Ruolo del sondaggio meccanico di rilevamento nell'idrologia su scala regionale	»	1742
8.2.2	Costruzione delle gallerie	»	1709	11.1.2	Ruolo del sondaggio meccanico di rilevamento precedente alla costruzione di pozzi di produzione.....	»	1742
8.2.3	Esecuzione di sondaggi meccanici nelle gallerie.....	»	1711	11.2	Dati necessari e successiva utilizzazione del sondaggio meccanico di rilevamento idrogeologico	»	1743
8.3	Pozzi con gallerie	»	1712	11.2.1	Dati necessari	»	1743
8.4	Canali dreni	»	1713	11.2.2	Successiva utilizzazione del sondaggio di rilevamento	»	1743
8.5	Pozzi scavati	»	1714	11.3	Esecuzione del sondaggio meccanico di rilevamento con finalità idrogeologiche	»	1743
8.5.1	Utilizzo	»	1714	11.4	Carotaggio meccanico	»	1744
8.5.2	Costruzione	»	1718	11.4.1	Campionamento di carote con metodi a rotazione	»	1744
8.5.3	Limiti.....	»	1722	11.4.2	Carotaggio a percussione	»	1747
Capitolo 17.9				11.5	Vantaggi e svantaggi dei diversi sistemi di perforazione.....	»	1748
Piezometri e pozzi puntuali				11.5.1	Rotazione	»	1748
9.1	Definizione ed utilizzazione dei piezometri	»	1723	11.5.2	Percussione	»	1748
9.2	Progettazione dei piezometri	»	1723	11.6	Controlli e prove durante la perforazione	»	1748
9.2.1	Diametro	»	1723	11.6.1	Controlli	»	1748
9.2.2	Tubazione di rivestimento	»	1724	11.6.2	Prove	»	1749
9.2.3	Zona filtrante.....	»	1724	11.7	Presentazione dei risultati di un sondaggio pilota..	»	1751
9.3	Posizionamento e rifinitura dei piezometri	»	1725	11.8	Metodi di perforazione per sondaggi geognostici a diametro ridotto o per l'installazione di piezometri..	»	1757
9.3.1	Preparazione del foro e posizionamento del tubo piezometrico	»	1725	Capitolo 17.12			
9.3.2	Sigilli di separazione	»	1726	Contratti per la costruzione di captazioni di acqua sotterranea			
9.3.3	Pulizia dei piezometri.....	»	1726	12.1	Introduzione.....	»	1764
9.4	Prove di funzionamento dei piezometri	»	1726	12.2	Formule contrattuali	»	1764
9.5	Protezione dei piezometri	»	1727	12.2.1	Formula a "prezzi unitari"	»	1764
9.6	Pozzi puntuali	»	1727	12.2.2	Formula a "corpo"	»	1765
9.7	Caratteristiche dei pozzi puntuali	»	1730	12.2.3	Formula a "portata garantita"	»	1765
9.7.1	Progettazione.....	»	1730	12.2.4	Sintesi	»	1765
9.7.2	Diametro	»	1730	12.3	Capitolati d'appalto	»	1765
9.7.3	Tubazione di rivestimento	»	1730	12.3.1	Parte generale	»	1765
9.7.4	Zona filtrante.....	»	1731	12.3.2	Schema generale	»	1766
9.7.5	Posizionamento e prove di idoneità	»	1731	12.3.3	Esempi.....	»	1767
9.7.6	Protezione	»	1731	<i>Bibliografia</i>			
Capitolo 17.10				SEZIONE 18			
Pozzi a dreni orizzontali				QUALITÀ DELL'ACQUA SOTTERRANEA			
10.1	Introduzione.....	»	1732	0.1	Introduzione generale	»	1795
10.2	Sistemi di costruzione	»	1733	0.2	Breve nota storica	»	1795
10.3	Processo costruttivo.....	»	1733	Capitolo 18.1			
10.3.1	Pozzo verticale	»	1733	Qualità dell'acqua sotterranea			
10.3.2	Dreni orizzontali	»	1733	1.1	Concetto di qualità dell'acqua a seconda del suo utilizzo	»	1796
10.3.3	Portate	»	1734				
10.4	Caratteristiche comparate tra pozzi verticali e pozzi a dreni orizzontali	»	1734				
10.5	Calcolo di un pozzo radiale.....	»	1735				
10.5.1	Parte generale	»	1735				
10.5.2	Calcolo esterno	»	1736				
10.5.3	Calcolo interno	»	1737				
10.6	Considerazioni finali	»	1738				
Capitolo 17.11							
Sondaggi meccanici di rilevamento e a diametro ridotto							
11.1	Parte generale	»	1742				

Idrogeologia sotterranea

XVIII

1.2	Concetto di potabilità. Norme	»	1796
1.3	Norme di potabilità O.M.S.	»	1797
1.3.1	Caratteristiche chimiche e fisiche.....	»	1797
1.3.2	Caratteristiche batteriologiche	»	1798
1.3.3	Caratteristiche biologiche	»	1798
1.3.4	Caratteristiche radioattive.....	»	1799
1.4	Legislazione spagnola (primi anni '70 N.d.T.)	»	1799
1.5	Regolamentazioni comparative	»	1800
1.6	Qualità per gli usi agricoli e d'allevamento. Norme	»	1802
1.6.1	Classificazione per gli usi agricoli	»	1802
1.6.2	Classificazione per gli usi destinati al bestiame	»	1804
1.7	Qualità dell'acqua per gli usi industriali	»	1805
1.7.1	Impieghi generali	»	1805
1.7.2	Impieghi nei vari processi.....	»	1808

Capitolo 18.2

Contaminazione delle acque e trattamenti correttivi

2.1	Concetti d'inquinamento e contaminazione	»	1809
2.2	Cause della contaminazione	»	1809
2.3	Indici di contaminazione	»	1810
2.4	Trattamenti delle acque sotterranee.....	»	1811
2.4.1	Addolcimento mediante precipitazione chimica	»	1811
2.4.2	Addolcimento e demineralizzazione per scambio ionico	»	1812
2.4.3	Eliminazione del ferro	»	1814
2.4.4	Eliminazione del manganese	»	1814
2.4.5	Sterilizzazione.....	»	1814

Capitolo 18.3

Contaminazione delle acque sotterranee

3.1	Introduzione.....	»	1816
3.2	Possibili origini della contaminazione degli acquiferi	»	1817
3.3	Modi di contaminazione delle acque sotterranee ..	»	1819
3.4	Reazione degli acquiferi contro la contaminazione..	»	1822
3.5	Influenza della forma di contazione nella reazione degli acquiferi	»	1823
3.6	Comportamento dei diversi tipi di contaminanti....	»	1824
3.6.1	Contaminanti minerali	»	1824
3.6.2	Contaminanti minerali metallici pesanti e di elementi minori.....	»	1824
3.6.3	Contaminanti radioattivi	»	1825
3.6.4	Contaminazione dovuta ai derivati del petrolio	»	1825
3.6.5	Contaminazione dovuta ai detersivi	»	1826
3.6.6	Contaminazione per composti azotati.....	»	1827
3.6.7	Contaminazione dovuta ai pesticidi	»	1827
3.6.8	Contaminazione da composti organici vari	»	1828
3.6.9	Contaminanti biologici: i batteri.....	»	1828
3.6.10	Contaminanti biologici: i virus.....	»	1829
3.7	Procedimenti di decontaminazione di acquiferi ...	»	1829

3.8	Smaltimento di acque reflue nel sottosuolo	»	1831
3.8.1	Acque reflue domestiche	»	1831
3.8.2	Acque reflue industriali	»	1831
3.8.3	Prodotti radioattivi	»	1832
3.9	Contaminazione associata a depositi e discariche..	»	1833
3.10	Problemi sanitari derivati dalla ricarica artificiale	»	1836
3.11	Protezione di acquiferi e captazioni: aree di protezione	»	1836
3.11.1	Aspetti generali.....	»	1836
3.11.2	Aree di protezione delle captazioni	»	1836
3.11.3	Protezione batteriologica. Distanze di sicurezza	»	1838
3.11.4	Protezione contro lo smaltimento degli idrocarburi.....	»	1839
3.12	Protezione ed abbandono di pozzi.....	»	1840

Capitolo 18.4

Iniezione profonda di salamoie, acque reflue industriali e di liquidi radioattivi

4.1	Introduzione.....	»	1841
4.2	L'iniezione profonda nel mondo	»	1841
4.3	Caratteristiche dei pozzi di iniezione esistenti	»	1842
4.4	Tipi di acque reflue iniettate mediante i pozzi profondi	»	1842
4.5	Classificazione dei residui liquidi secondo la loro tossicità	»	1843
4.6	Aspetti geologici e idrogeologici	»	1844
4.7	Aspetti chimici	»	1845
4.8	Zona di Estensione dell'acqua iniettata.....	»	1846
4.9	Portata di iniezione ed aumento di pressione	»	1847
4.10	Pressione massima d'iniezione	»	1847
4.11	Effetti sismici dell'iniezione profonda di acque residuali	»	1848
4.12	Esplorazione di acquiferi profondi	»	1848
4.12.1	Studi previ.....	»	1848
4.12.2	Sondaggi di riconoscimento	»	1849
4.12.3	Osservazioni e prove nei sondaggi.....	»	1849
4.13	Installazione del pozzo di iniezione	»	1850
4.14	Sviluppo del pozzo di iniezione	»	1852
4.15	Intasamento del pozzo e trattamento dell'acqua di iniezione	»	1857
4.16	Monitoraggio dei pozzi di iniezione	»	1858
4.17	Problemi termici	»	1859
4.18	Rottura ed abbandono dei pozzi	»	1859
4.19	Fissaggio dei residui per iniezione profonda	»	1860
4.20	Aspetti economici	»	1860
4.21	Aspetti legali dell'iniezione profonda.....	»	1861

Appendice 18.1

Note e determinazione della qualità batteriologica delle acque

A.1	Generalità	»	1863
-----	------------------	---	------

A.2	Analisi	»	1863
A.3	Membrane filtranti	»	1865
	<i>Bibliografia</i>	»	1867

SEZIONE 19

LA RICARICA ARTIFICIALE DEGLI ACQUIFERI SOTTERRANEI

0.1	Introduzione generale	»	1875
0.2	Note storiche e realizzazioni attuali	»	1876

Capitolo 19.1

Metodi di ricarica artificiale: aspetti generali

1.1	Introduzione.....	»	1878
1.2	Obiettivi	»	1878
1.3	Metodi di ricarica	»	1881
1.4	Sistemi di ricarica dalla superficie	»	1882
1.5	Sistemi di ricarica in profondità	»	1886
1.6	Problemi costruttivi e di funzionamento dei pozzi di ricarica.....	»	1887
1.7	Sistemi misti di ricarica.....	»	1892
1.8	Viabilità della ricarica artificiale.....	»	1893
1.9	Considerazioni per il progetto.....	»	1893
1.10	Qualità dell'acqua per la ricarica	»	1894
1.11	Studio economico della ricarica	»	1895
1.12	Aspetti legali e amministrativi	»	1897

Capitolo 19.2

Aspetti idraulici della ricarica artificiale

2.1	Introduzione.....	»	1898
2.2	Aspetti idraulici della ricarica artificiale.....	»	1898
2.3	Le fasi della ricarica artificiale	»	1900
2.4	Dati per lo studio idraulico della ricarica	»	1901
2.5	Metodi di risoluzione	»	1901
2.6	Ricarica in regime permanente	»	1902
	2.6.1 Ricarica e scarica mediante fossati e dreni	»	1902
	2.6.2 Ricarica e/o drenaggio mediante sistemi radiali di pozzi e vasche circolari.....	»	1908
2.7	Ricarica in regime variabile	»	1908
2.8	Ricarica in un acquifero inclinato	»	1911

Capitolo 19.3

Considerazioni sulla ricarica artificiale

3.1	Introduzione.....	»	1913
3.2	Capacità di infiltrazione dei terreni.....	»	1913
	3.2.1 Aspetti generali	»	1913
	3.2.2 Sistemi di ricarica di superficie	»	1913
	3.2.3 Sistemi di ricarica in profondità: i pozzi ..	»	1915
3.3	Riduzione progressiva della permeabilità. La colmatazione degli acquiferi	»	1916
3.4	Diminuzione del ritmo di colmatazione	»	1917

3.5	Pulizia e mantenimento della capacità d'infiltrazione	»	1918
3.6	Variazioni di qualità nell'acquifero.....	»	1919
3.7	Ricarica con acque reflue	»	1921
3.8	Immagazzinamento di acqua dolce in acquiferi di acqua salata	»	1922
3.9	Progetto e analisi della ricarica artificiale.....	»	1922

Appendice 19.1

Ricarica a partire da una superficie circolare	»	1926
<i>Bibliografia</i>	»	1929

SEZIONE 20

IDROECONOMIA E PIANIFICAZIONE IDRAULICA

0.1	Introduzione generale	»	1935
-----	-----------------------------	---	------

Capitolo 20.1

Concetti fondamentali di idroeconomia

1.1	Introduzione.....	»	1936
1.2	Concetti di matematica finanziaria	»	1936
	1.2.1 Interesse	»	1936
	1.2.2 Valore attuale	»	1938
	1.2.3 Annualità.....	»	1938
	1.2.4 Valore attuale di un'annualità.....	»	1938
	1.2.5 Annualità di capitalizzazione	»	1939
	1.2.6 Fattore di recupero del capitale	»	1939
	1.2.7 Valore attuale di un'annualità in crescita lineare	»	1939
1.3	Ammortamento e deprezzamento	»	1940
1.4	Comparazione dei costi	»	1940
	1.4.1 Costi del progetto	»	1940
	1.4.2 Costo annuale	»	1941
	1.4.3 Comparazione di progetti con costi annuali costanti	»	1943
	1.4.4 Comparazione di progetti con costi annuali variabili	»	1943
1.5	Valutazione dei benefici	»	1944
1.6	Scelta del progetto.....	»	1946
	1.6.1 Criteri generali	»	1946
	1.6.2 Progetti che si escludono reciprocamente	»	1946
	1.6.3 Progetti che non si escludono reciprocamente	»	1947

Capitolo 20.2

Domanda d'acqua

2.1	Introduzione.....	»	1949
2.2	Domanda e consumo	»	1949
2.3	Ricircolo	»	1950
2.4	Elasticità della domanda	»	1952
	2.4.1 Uso domestico.....	»	1952
	2.4.2 Uso industriale	»	1952
	2.4.3 Uso irriguo	»	1953

Idrogeologia sotterranea

XX

2.5	Domanda urbana	»	1953
2.6	Domanda irrigua	»	1955
2.7	Domanda industriale	»	1956

Capitolo 20.3

Costo delle captazioni di acqua sotterranea e dell'acqua ottenuta

3.1	Introduzione.....	»	1958
3.2	Captazioni di acqua sotterranea.....	»	1959
3.2.1	Lavori preliminari	»	1959
3.2.2	Pozzi di captazione	»	1960
3.2.3	Sollevamento dell'acqua.....	»	1967
3.3	Distribuzione dell'acqua	»	1970
3.3.1	Tubazioni	»	1970
3.3.2	Serbatoi di regolazione	»	1970
3.3.3	Altri costi	»	1971
3.4	Costo dell'acqua	»	1972
3.5	Studio relativo ai costi dell'acqua.....	»	1979

Capitolo 20.4

Elaborazione di un piano idrico

4.1	Introduzione.....	»	1984
4.2	Pianificazione idrica	»	1984
4.3	Fasi della pianificazione	»	1984
4.3.1	Definizione degli obiettivi	»	1985
4.3.2	Inventario dei dati	»	1985
4.3.3	Previsioni	»	1986
4.3.4	Definizione delle alternative.....	»	1987
4.3.5	Definizione del piano	»	1988
4.3.6	Finanziamento.....	»	1988
4.3.7	Definizione dell'autorità responsabile	»	1988
4.4	Pericoli e problemi della pianificazione idrica	»	1989

<i>Bibliografia</i>	»	1990
---------------------------	---	------

SEZIONE 21

LEGISLAZIONE DELLE ACQUE

0.1	Introduzione generale	»	1995
-----	-----------------------------	---	------

Capitolo 21.1

Regolamentazione delle acque pubbliche in Spagna

1.1	Brevi cenni storici concernenti la regolamentazione delle acque	»	1996
1.2	Acque pubbliche e private in Spagna	»	1997
1.3	Le acque pubbliche in Spagna.....	»	1998
1.3.1	Acque pubbliche superficiali	»	1998
1.3.2	Acque pubbliche sotterranee.....	»	1999
1.3.3	Sondaggi di rilevamento in corsi d'acqua pubblici	»	2000

Capitolo 21.2

Regolamentazione delle acque private in Spagna

2.1	Le acque private in Spagna	»	2001
-----	----------------------------------	---	------

2.1.1	Acque private superficiali.....	»	2001
2.1.2	Acque private sotterranee	»	2001
2.1.3	Pozzi ordinari	»	2002
2.1.4	Pozzi artesiani, pozzi con gruppi meccanici di sollevamento, canali e gallerie	»	2002
2.2	Acque minerali	»	2005

Capitolo 21.3

Regolamentazione delle acque nei diversi paesi

3.1	Le acque negli altri paesi.....	»	2007
3.2	Repubblica federale tedesca	»	2007
3.3	Austria	»	2008
3.4	Belgio	»	2009
3.5	Danimarca	»	2009
3.6	Francia	»	2010
3.7	Grecia	»	2011
3.8	Israele	»	2011
3.9	Italia.....	»	2012
3.10	Polonia.....	»	2013
3.11	Portogallo	»	2014
3.12	Romania.....	»	2014
3.13	Svezia	»	2015
3.14	Turchia.....	»	2015
3.15	Paesi Ispano-Americani.....	»	2016
3.16	Stati Uniti d'America	»	2016

Capitolo 21.4

Legislazione in materia di contaminazione delle acque terrestri

4.1	La contaminazione delle acque terrestri in Spagna	»	2017
4.2	La contaminazione delle acque terrestri in altri paesi.....	»	2019
4.2.1	Belgio	»	2019
4.2.2	Francia.....	»	2020
4.2.3	Regno Unito	»	2021
4.2.4	Unione delle Repubbliche Socialiste Sovietiche	»	2021
4.2.5	Cecoslovacchia	»	2022
4.2.6	Stati Uniti d'America	»	2022

Capitolo 21.5

Competenze giurisdizionali in materia di acque terrestri in Spagna

5.1	Organi che intervengono nell'ambito della regolamentazione delle acque terrestri	»	2023
5.2	Giurisdizione amministrativa del Ministero delle Opere Pubbliche	»	2023
5.3	Giurisdizione amministrativa del Ministero della Industria.....	»	2024
5.4	Giurisdizione dell'amministrazione locale	»	2026
5.5	La giurisdizione dell'autorità giudiziaria	»	2026

Appendice 21.1

Principali disposizioni di legge in materia di acque contaminate in Spagna

A.1.1 Principali disposizioni concernenti la concessione di acque pubbliche superficiali » 2027
 A.1.2 Principali disposizioni in materia di acque sotterranee » 2027
 A.1.3 Principali disposizioni ad integrazione dell'attività dei commissariati delle acque » 2028

Appendice 21.2

Disposizioni a regime speciale in vigore in Spagna

A.2.1 Introduzione » 2029
 A.2.1.2 Legge del 24 dicembre 1962 » 2029
 A.2.1.3 Decreto-legge del 17 luglio 1968 » 2029
 A.2.1.4 Decreto-legge del 16 agosto 1968 » 2030
 A.2.1.5 Decreto-legge del 3 febbraio 1969 » 2030
 A.2.1.6 Legge dell'11 febbraio 1969 » 2030
 A.2.1.7 Legge del 30 giugno 1969 » 2030

Appendice 21.3

Richieste per la concessione di acqua sotterranea in zone di giurisdizione del Ministero delle Opere Pubbliche

A.3.1 Richiesta di permessi per sondaggi di rilevamento in corsi d'acqua pubblici » 2031
 A.3.2 Richiesta di concessioni di acque sotterranee nei corsi d'acqua pubblici » 2031
 A.3.3 Richiesta di permessi per la scoperta di acque in terreni di proprietà privata e zona di polizia di corso d'acqua pubblico » 2032

Appendice 21.4

La riforma della legge sulle acque

A.4.1 Introduzione » 2034
 A.4.2 Diversi progetti di riforma in Spagna » 2034
 A.4.2.1 Il progetto di riforma del 1902 » 2034
 A.4.2.2 Il progetto di riforma del 1910 » 2034
 A.4.2.3 Il progetto di riforma del 1921 » 2035
 A.4.2.4 Il progetto di riforma del 1928 » 2035
 A.4.2.5 Gli ultimi studi sui progetti di riforma della legge sulle acque » 2035
 A.4.3 Necessità di riforma. Fattori fondamentali da considerare » 2036
 A.4.4 Riforma legislativa in altri paesi » 2038

Bibliografia » 2040

SEZIONE 22

APPLICAZIONI DELL'IDROLOGIA SOTTERRANEA ALLA GEOTECNICA

Introduzione » 2043

Capitolo 22.1

Assestamenti del terreno prodotti dal pompaggio d'acqua e di idrocarburi

1.1 Introduzione » 2044
 1.2 Importanza pratica » 2045
 1.3 Meccanica della subsidenza » 2046
 1.4 Esempi » 2048
 1.4.1 Città del Messico (Messico) » 2048
 1.4.2 Lago di Maracaibo (Venezuela) » 2048
 1.4.3 Savannah (Georgia, Stati Uniti) » 2049
 1.4.4 Long Beach (California, Stati Uniti) » 2049

Capitolo 22.2

Drenaggio

2.1 Importanza e necessità del drenaggio » 2051
 2.2 Fonti per l'approvvigionamento d'acqua controllate tramite drenaggio » 2052
 2.2.1 Infiltrazione dell'acqua attraverso le superfici pavimentate » 2052
 2.2.2 Accesso tramite movimento interno » 2053
 2.3 Elementi drenanti » 2053
 2.3.1 Materiale filtrante » 2053
 2.3.2 Tubi di captazione ed evacuazione » 2055
 2.3.3 Dispositivi di drenaggio » 2055
 2.4 Applicazione » 2055
 2.4.1 Drenaggio dell'acqua di infiltrazione in superfici pavimentate o stabilizzate » 2055
 2.4.2 Controllo del livello freatico nella costruzione di strade » 2056
 2.4.3 Stabilizzazione di scarpate tramite drenaggio » 2058
 2.4.4 Drenaggio di strutture » 2059
 2.4.5 Drenaggi agricoli » 2060
 2.4.6 Drenaggi di edifici, scavi e cantine » 2062

Capitolo 22.3

Problemi idrogeologici relativi ai bacini di superficie

3.1 Introduzione » 2063
 3.2 Permeabilità e filtrazioni di un bacino » 2063
 3.2.1 Influsso del tipo di terreno » 2063
 3.2.2 Considerazioni idrogeologiche » 2065
 3.2.3 Modificazioni introdotte nel regime delle acque sotterranee » 2068
 3.3 Effetti meccanici sulla diga e sulle fondazioni » 2070
 3.3.1 Distribuzione ed effetti della pressione interstiziale » 2070
 3.3.2 Metodi di correzione per filtrazioni e pressioni interstiziali » 2072
 3.3.3 Determinazione della permeabilità. Tecniche di rilevamento » 2073

Idrogeologia sotterranea

XXII

3.4	Bacini in regioni carsiche	»	2076
3.4.1	Metodi di ricerca utilizzati	»	2076
3.4.2	Metodi di correzione.....	»	2078
3.4.3	Valutazione delle perdite di un bacino	»	2079
3.4.4	Dighe in terreni gessiferi o salini	»	2079

<i>Bibliografia</i>	»	2080
---------------------------	---	------

SEZIONE 23

ALTRE RISORSE IDRICHE

0.1	Introduzione.....	»	2085
-----	-------------------	---	------

Capitolo 23.1

Desalinizzazione

1.1	Introduzione.....	»	2086
1.2	Origine dell'acqua da desalinizzare	»	2086
1.3	Sistemi di desalinizzazione	»	2087
1.3.1	Evoluzione storica e attività	»	2087
1.3.2	Dimensioni delle unità di desalinizzazione	»	2087
1.3.3	Principali sistemi di desalinizzazione.....	»	2091
1.4	Problemi di corrosione e incrostazione negli impianti di desalinizzazione	»	2094
1.5	Pretrattamento dell'acqua da desalinizzare	»	2095
1.6	Usi e trattamento finale dell'acqua desalinizzata ..	»	2095
1.7	Presa dell'acqua da desalinizzare e scarico della salamoia residua	»	2096
1.8	Utilizzo dei sali contenuti nei reflui di salamoie ..	»	2097
1.9	Impianti duali per la desalinizzazione e la produzione di energia	»	2097
1.10	Aspetti economici della desalinizzazione	»	2097
1.10.1	Parte generale	»	2097
1.10.2	Costo dell'acqua desalinizzata	»	2098
1.10.3	Problemi associati agli impianti duali e ripartizione dei costi	»	2099
1.10.4	Investimento in impianti di desalinizzazione	»	2101
1.10.5	Costi attuali dell'acqua desalinizzata	»	2102
1.10.6	Costi futuri dell'acqua salinizzata	»	2103
1.10.7	Desalinizzazione nucleare.....	»	2103
1.11	Confronto con altre fonti di approvvigionamento..	»	2106

Capitolo 23.2

Riutilizzo di acque reflue

2.1	Introduzione.....	»	2108
2.2	Domanda, consumo e uso complessivo	»	2108
2.3	Alterazione delle caratteristiche delle acque prodotta dall'uso	»	2109
2.4	Scarichi in acque superficiali e autodepurazione ..	»	2109
2.5	Trattamento delle acque reflue	»	2111
2.6	Riutilizzo indiretto.....	»	2113

2.7	Riutilizzo diretto	»	2113
2.8	Accettazione pubblica del riutilizzo	»	2118

Capitolo 23.3

Pioggia artificiale

3.1	Introduzione.....	»	2119
3.2	Nota storica	»	2119
3.3	Il meccanismo della pioggia	»	2120
3.4	Produzione di pioggia artificiale	»	2120
3.5	Efficacia della pioggia artificiale	»	2121
3.6	Problemi di contaminazione	»	2123
3.7	Problemi legali	»	2123
3.8	Aspetti economici	»	2123

Appendice 23.1

Complementi sui principali sistemi di desalinizzazione

A.1	Distillazione a fase multiplo	»	2125
A.2	Distillazione istantanea multistadio.....	»	2126
A.3	Distillazione a compressione di vapore o distillazione a termocompressione (VC)	»	2127
A.4	Distillazione solare	»	2128
A.5	Elettrodialisi	»	2128
A.6	Osmosi inversa	»	2130
A.7	Separazione per congelamento	»	2130
A.8	Separazione per idratazione.....	»	2131
A.9	Scambio ionico	»	2131
A.10	Demineralizzazione per estrazione tramite solvente	»	2131

<i>Bibliografia</i>	»	2132
---------------------------	---	------

SEZIONE 24

VALUTAZIONE GLOBALE

DELLE ACQUE SOTTERRANEE

0.1	Introduzione generale	»	2139
-----	-----------------------------	---	------

Capitolo 24.1

Introduzione al bilancio idrico generale e delle acque sotterranee

1.1	Introduzione.....	»	2140
1.2	Equazione generale del bilancio	»	2141
1.3	Importanza dell'intervallo di tempo	»	2141
1.4	Scelta dei limiti della regione di bilancio	»	2142
1.5	Unità dei termini del bilancio	»	2143
1.6	Ottenimento dei valori dei termini del bilancio	»	2143
1.7	Bilancio di acque sotterranee	»	2144
1.8	Realizzazione di bilanci giornalieri.....	»	2148
1.9	Peculiarità del bilancio in alcune zone carsiche	»	2152
1.10	Considerazioni complementari sui bilanci di acque sotterranee	»	2153
1.11	Validità e valutazione dei bilanci idrici.....	»	2153
1.12	Relazioni tra le variabili idrologiche.....	»	2154

Capitolo 24.2

Risorse e riserve di acqua sotterranea. Problematica generale

2.1	Introduzione.....	»	2156
2.2	Riserve.....	»	2156
2.3	Riserve regolatrici e secolari	»	2158
2.4	Risorse	»	2159
2.5	Questioni relative alla portata di sicurezza	»	2162

Capitolo 24.3

Aspetti geomorfologici e geodinamici relativi alle acque sotterranee e al bilancio idrico

3.1	Introduzione.....	»	2165
-----	-------------------	---	------

3.2	I sistemi di flusso.....	»	2165
3.3	Manifestazioni esterne delle acque sotterranee.....	»	2168
3.4	Rapporti tra geomorfologia e ricarica	»	2171
3.5	Analisi statistiche	»	2173
3.6	Significato idrogeologico della densità di drenaggio	»	2174
3.7	Considerazioni relative agli acquiferi carsici	»	2179
	<i>Bibliografia</i>	»	2185

Indice analitico	»	2189
-------------------------------	---	------

Preambolo

Il presente testo sarà pubblicato in coincidenza con l'inizio della decima edizione del Corso post-laurea internazionale di Idrologia sotterranea realizzato fin dal 1967 presso la E.T.S. degli ingegneri industriali del Politecnico di Barcellona. La Commissione dei docenti si è occupata della redazione e dell'intero coordinamento in modo che l'iniziativa assunta nel 1966 da due organi della Direzione generale delle Opere idrauliche del ministero delle Opere pubbliche e da un centro di ricerca privato, nell'ambito delle direttive del Decennio Idrologico Internazionale e dell'Istituto di idrologia del Consiglio superiore delle ricerche scientifiche, ai quali in seguito si sono uniti il Politecnico di Barcellona e un altro organo della citata Direzione generale, trova in questa opera un solido fondamento per la sua riuscita.

L'approfondimento teorico e pratico nonché l'opera di insegnamento attuata in questi anni, a cui hanno partecipato più di duecento laureati spagnoli e di ventiquattro Paesi stranieri, quasi un centinaio di professori, esperti e conferenzieri, hanno dato vita ad un'esperienza che merita di essere trasmessa a un pubblico più ampio mentre i risultati ottenuti devono concretizzarsi in un ambito più ampio e duraturo. Queste sono state in definitiva le motivazioni che hanno spinto gli organi patrocinanti ad appoggiare l'iniziativa di raccogliere in questi volumi il contenuto dell'attuale programma del Corso, basato sulle più moderne nozioni e tecniche, nonché concretamente legato ad alcune necessità pedagogiche la cui efficacia è, a nostro parere, sufficientemente consolidata, fondandosi su importanti lavori idrologici sviluppati dai professori nei dintorni di Barcellona e in diverse aree del nostro Paese.

Portato a termine l'arduo compito affidatoci, desideriamo esprimere la nostra gratitudine sincera per lo sforzo e la dedizione di coloro che lo hanno reso possibile, in particolare il team che ha coordinato la redazione, senza dimenticare tutti i professori e i professionisti che hanno collaborato direttamente o indirettamente, e ringraziamo le Edizioni Omega per l'attenta elaborazione e presentazione di tale lavoro.

È nostro sincero desiderio che questo lavoro serva, come il corso da cui ha preso spunto, ad ottenere una maggiore diffusione di alcune tecniche e nozioni veramente essenziali per il conseguimento di una gestione razionale delle risorse idrauliche e, in questo modo, contribuisca allo sviluppo economico e sociale dei Paesi e delle loro forme di vita comunitarie ed individuali.

GABRIEL FERRATÉ PASCUAL

Magnifico Rettore dell'Università Politecnica di Barcellona

MANUEL GÓMEZ DE PABLOS GONZÁLEZ

Direttore del Servizio Geologico di Opere Pubbliche

FRANCISCO VILARÓ RICOL

Commissario Capo del Commissariato delle Acque dei Pirenei Orientali

JOSÉ MARÍA LLANSÓ DE VINYALS

Ingegnere Direttore della Confederazione Idrografica dei Pirenei Orientali

GONZALO TURELL MORAGAS

Presidente del Centro di Studi, Ricerca ed Applicazioni dell'Acqua

Prologo

Negli ultimi anni si rileva a livello mondiale una grande attività nell'ambito dell'uso e dello sfruttamento delle risorse idrauliche, oltre a un notevole aumento e diffusione delle conoscenze scientifiche, tecnologiche e legali inerenti all'acqua. Questa crescita è stata maggiore nell'ambito dell'idrologia sotterranea rispetto a qualsiasi altro campo dell'idrologia generale.

Fino a pochi anni fa, l'idrologia sotterranea era una disciplina che attirava solo l'attenzione di un gruppo piuttosto ridotto di ricercatori specializzati in scienze della Terra e in ingegneria nonché di un gruppo ancora molto limitato di pianificatori di risorse idrauliche. In realtà, il numero di persone interessate dalle acque sotterranee, in campo scientifico, tecnico, socioeconomico, amministrativo e legale, è già notevole e si sta attuando una chiara presa di coscienza della loro intrinseca importanza, del ruolo essenziale nel ciclo idrologico e del loro interesse sociale ed economico sia nei paesi sviluppati che in quelli in via di sviluppo.

Un chiaro indice dell'importanza attribuita oggi alle acque sotterranee è rappresentato dalla grande quantità di programmi di ricerca su temi direttamente collegati con tale tipologia di acque, sull'insieme di programmi di ricerca idrologica. Un chiaro esempio è il Programma Idrologico Internazionale (IHP) per il 1975-1980 patrocinato dalle Nazioni Unite tramite l'UNESCO, che in realtà rappresenta la continuazione di un altro programma internazionale: il Decennio Idrologico Internazionale (IHD) concluso nel 1974.

Le acque sotterranee sono legate a un gran numero di fattori geologici, idrodinamici, fisico-chimici, biologici e antropologici, associati alle incertezze che sono proprie non solo della natura variabile e complessa ma anche della libertà di agire dell'uomo. Per il loro studio e utilizzo si deve ricorrere a tecnologie e scienze, a volte di recentissimo sviluppo o di contenuto poco noto.

Questa situazione richiede nozioni che comprendono campi diversi e molteplici del sapere per cui è necessario qualificare l'idrologia sotterranea come una scienza multidisciplinare che necessita di una buona base di fondamenti scientifici e tecnologici.

Questo fatto, da solo, giustificherebbe il tentativo di realizzare un'opera che cerchi di comporre la diversità tematica che caratterizza l'idrologia sotterranea nonché l'attuale condizione delle conoscenze in questo campo, inclusi gli aspetti ancora poco conosciuti e sui quali si concentrano o si devono concentrare gli sforzi. Al fine di giustificare ulteriormente tale tentativo si constata che fino a oggi sono molto scarsi i testi di idrologia sotterranea scritti in lingua castigliana; negli ultimi anni sono state realizzate alcune traduzioni di note opere straniere ma ci sembra che la presentazione congiunta di un considerevole gruppo di Autori ed esempi, in gran parte spagnoli, può rappresentare un contributo interessante non solo per la Spagna ma per tutti i Paesi ispano-americani e per quelli che si esprimono in lingue affini.

Non solo è necessario considerare la coincidenza o vicinanza linguistica ma anche, e non di minore rilevanza, le affinità culturali, economico-sociali, amministrative e legislative. D'altra parte, la varietà geologica, morfologica e climatica della Spagna peninsulare e insulare ha consentito di ottenere facilmente una vasta gamma di conoscenze ed esperienze tra le quali, probabilmente, rientrano buona parte delle situazioni che possono riscontrarsi nei Paesi citati in precedenza.

L'origine di questa opera va ricercata nel Corso Internazionale di Idrologia sotterranea attivato nel 1966 a Barcellona e in appunti, note e scritti prodotti durante le successive edizioni grazie al paziente lavoro di professori e conferenzieri, senza dimenticare i notevoli contributi di numerosi partecipanti, molti dei quali hanno riportato importanti esperienze e interessanti problemi pratici. Si tratta di un testo in parte a

carattere educativo sebbene riteniamo che il modo di trattare alcuni temi nonché la capacità di approfondirne altri estenda l'interesse di questo lavoro a tutti gli studiosi e professionisti dell'idrologia sotterranea o di campi correlati, che sviluppano la propria attività in centri di ricerca, aule, imprese e nell'amministrazione pubblica. Sebbene non si tratti di un "manuale" vero e proprio, la ricchezza di materiale di alcuni capitoli lo rende tale, non solo nel campo dell'idrologia sotterranea ma anche in alcuni settori dell'agronomia, edafologia, idraulica, idrologia generale, ingegneria civile, geotecnica, irrigazione e drenaggio, urbanistica, ecologia, ingegneria sanitaria, ingegneria delle risorse idrauliche, ingegneria delle risorse energetiche e minerali, ecc.

Si attribuisce a Leonardo da Vinci la frase "se t'addiuviene trattare delle acque, considera prima la esperienza e poi la ragione" che in altre parole rappresenta una prova di quel geniale artista e uomo di scienza del Rinascimento che l'idrologia non è una scienza esatta; l'applicazione pratica dei suoi concetti richiede una notevole dose di esperienza e di senso pratico. Per questa ragione, tutti gli autori e collaboratori che hanno contribuito alla stesura di questa opera dovevano avere un'ampia esperienza professionale sull'argomento trattato.

Così, solo tre di loro si dedicano principalmente all'insegnamento universitario e alla ricerca, anche se in modo non esclusivo; il gruppo più numeroso di autori e collaboratori è quello formato da persone con diversi titoli di studio e specializzazioni che lavorano nell'amministrazione pubblica, buona parte dei quali svolgono la propria professione compatibilmente con quella di docenti mentre altri si dedicano esclusivamente ad attività private.

Le 24 sezioni di questa opera possono inquadrarsi grosso modo in sei grandi gruppi:

1) DISCIPLINE AUSILIARIE, il cui intento è quello di presentare quei principi fondamentali di geologia, idraulica e idromeccanica, statistica e chimica che saranno poi utilizzati in altre sezioni.

Comprende le sezioni:

Sezione 1. Concetti geologici fondamentali di applicazione all'idrologia.

Sezione 2. Elementi di meccanica dei fluidi.

Sezione 3. Nozioni di statistica applicata all'idrologia.

Sezione 4. Principi fondamentali di chimica e radiochimica delle acque sotterranee.

2) IDROLOGIA DI SUPERFICIE, presenta i principi fondamentali di misurazione della portata, trattamento ed analisi dei dati sul flusso superficiale e di regolazione.

Comprende la sezione:

Sezione 7. Idrologia di superficie

3) IDRAULICA DELLE ACQUE SOTTERRANEE, parte principale della teoria delle acque sotterranee in cui si trattano in modo dettagliato i principi e le caratteristiche del flusso dell'acqua sotterranea, dell'idraulica delle captazioni, delle relazioni tra diversi tipi di acque sotterranee e di queste con le acque superficiali, oltre ai concetti fondamentali su pluviometria, evapotraspirazione ed infiltrazione, e sulla loro determinazione, fungendo da collegamento con l'idrologia superficiale ma focalizzati sulle acque sotterranee.

Comprende le sezioni:

Sezione 5. Concetti basilari e definizioni.

Sezione 6. Componenti primarie del ciclo idrologico.

Sezione 8. Teoria elementare del flusso dell'acqua nei mezzi porosi.

Sezione 9. Idraulica delle captazioni di acqua sotterranea.

Sezione 11. Relazione tra acque superficiali e acque sotterranee.

Sezione 13. Relazioni acqua dolce-acqua salata nelle regioni costiere.

Sezione 16. Modelli in idrologia sotterranea.

4) ASPETTI CHIMICI DELLE ACQUE SOTTERRANEE, anch'essa parte principale della teoria delle acque sotterranee che, in continua evoluzione, acquisisce giorno dopo giorno una maggiore utilità. Si trattano gli aspetti relativi a comparsa, evoluzione e studio degli ioni principali in funzione delle caratteristiche del flusso dell'acqua sotterranea senza dimenticare gli ioni minori di maggiore interesse. D'altro lato si considerano dettagliatamente gli aspetti relativi al trasporto delle sostanze disciolte e alla loro dispersione, all'utilità e applicazione delle tecniche isotopiche e radioisotopiche nonché alla qualità e contaminazione la cui rilevanza è in continuo aumento.

Comprende le sezioni:

Sezione 10. Idrogeochimica.

Sezione 12. Traccianti e tecniche radioisotopiche in idrologia sotterranea.

Sezione 18. Qualità dell'acqua sotterranea.

5) PROSPEZIONE DI ACQUE SOTTERRANEE, si espongono le tecniche di riconoscimento e localizzazione delle acque sotterranee.

Comprende le sezioni:

Sezione 14. Prospezione geofisica applicata all'idrogeologia.

Sezione 15. Esplorazione delle acque sotterranee.

6) SFRUTTAMENTO E GESTIONE DELLE ACQUE SOTTERRANEE, riunisce i diversi principi, tecnologie e metodi di sfruttamento delle acque sotterranee e la loro gestione nell'ambito delle risorse idrauliche disponibili, inoltre si trattano, a titolo di presentazione, altre possibili risorse di acqua.

Comprende le sezioni:

Sezione 17. Progettazione e costruzione di captazioni di acqua sotterranea.

Sezione 19. Ricarica artificiale di acquiferi sotterranei.

Sezione 20. Idroeconomia e pianificazione idraulica.

Sezione 21. Legislazione delle acque.

Sezione 22. Applicazioni dell'idrologia sotterranea in geotecnica e ingegneria civile.

Sezione 23. Altre risorse d'acqua.

Sezione 24. Valutazione globale delle acque sotterranee.

L'ordine di presentazione delle sezioni non coincide con quanto esposto; ciò a causa del fatto che il raggruppamento segnalato non è necessariamente il migliore da un punto di vista espositivo per l'insegnamento né l'inquadramento dato esclude che le sezioni contengano capitoli la cui tematica è più adatta di un altro gruppo.

Con queste 24 sezioni, distribuite in più di un centinaio di capitoli, si è tentato di offrire una panoramica completa dell'idrologia sotterranea con un'ottica principalmente focalizzata all'esplorazione e allo sfruttamento delle risorse idrauliche sotterranee, senza perdere di vista l'interrelazione con le risorse idrauliche superficiali.

I concetti esposti in una sezione spesso sono collegati con quelli di altre; per questo i riferimenti incrociati sono numerosi. Tuttavia, al fine di facilitare la lettura si è cercato, a rischio di una certa ripetitività, di rendere comprensibile ciascuna sezione senza dover ricorrere alla continua consultazione di altre sezioni. I riferimenti bibliografici in ciascuna sezione sono solitamente molto ampi per facilitare l'approfondimento su temi di particolare interesse per il lettore. È stato preparato un indice esteso delle materie e un altro dei concetti, collocati alla fine del secondo volume, che compren-

gono tutte le sezioni dell'opera che ci auguriamo contribuiscano efficacemente a rendere semplice la consultazione.

Non si nasconde che la presente opera, la cui preparazione è durata più di sei anni, può presentare molti difetti, evitabili con una preparazione più lunga che ne avrebbe però impedito l'utilizzo da parte di molte persone e il cui eccessivo perfezionismo si sarebbe trasformato in sterilità, nel tentativo di ottenere il meglio invece del buono.

Gli autori ritengono che il tempo dedicato a questa impresa risulterà utile se con questo testo si contribuirà ad imporre, in Spagna e in molti altri Paesi, una gestione migliore e più corretta delle risorse idriche, sempre più scarse e necessarie, minacciate di continuo dall'ignoranza e dalla negligenza che portano alla contaminazione, distruzione o spreco nonostante il loro carattere di bene vitale.

I direttori di edizione che firmano questo prologo vogliono rendere pubblico il riconoscimento in primo luogo agli organismi patrocinanti dell'opera che sono gli stessi che hanno promosso e/o patrocinato i successivi Corsi Internazionali di Idrologia sotterranea di Barcellona. Si ringraziano per la collaborazione tutti gli altri autori e collaboratori che hanno saputo dedicare una parte del loro prezioso tempo a questo lavoro di squadra. Menzione speciale la merita il segretario dei Comitati di redazione ed edizione, Dott. Martín Arnáiz che ha revisionato nei dettagli la totalità dell'opera e i collaboratori che hanno condiviso il compito della gestione ed edizione, non sempre gradevole né semplice. Non sarebbe giusto dimenticare l'interesse delle Edizioni Omega per questa opera e la volontà della Scuola Grafica Salesiana nel conseguire una presentazione efficace partendo da originali non sempre chiari e nonostante le difficoltà insorte per le continue rettifiche e aggiunte per cercare di aggiornare l'opera man mano che avanzava la stesura.

Non è possibile ignorare il lavoro di disegnatori e di dattilografi, sebbene restino nell'anonimato sono stati un elemento chiave per la preparazione di questa opera.

Emilio Custodio/Manuel-Ramón Llamas

Sezione 12

Traccianti e tecniche radioisotopiche in idrologia sotterranea

Emilio Custodio

Ingegnere Industriale

Sommario

- Capitolo 12.1 Spostamento di fluidi miscibili in mezzi porosi e dispersione idrodinamica
- Capitolo 12.2 Traccianti chimici e radioattivi per acque sotterranee. Selezione e determinazione
- Capitolo 12.3 Tecniche di applicazione dei traccianti artificiali
- Capitolo 12.4 Datazione e tracciato naturale e accidentale delle acque sotterranee
- Capitolo 12.5 Altre tecniche nucleari in idrologia sotterranea
- Appendice 12.1 Movimento di masse di acqua in un acquifero
- Appendice 12.2 Equazioni della dispersione

Simboli

A	attività (c/L^3)	n	concentrazione di tracciante naturale (M/L^3)
b	spessore dell'acquifero (L)	n_o	concentrazione iniziale di tracciante naturale (M/L^3)
C	concentrazione nel mezzo solido (M/L^3)	Q	portata (L^3/T)
c	concentrazione nel fluido (M/L^3)	Q_b	portata pompata (L^3/T)
c_n	concentrazione naturale (M/L^3)	Q_i	portata iniettata (L^3/T)
c_o	concentrazione iniziale, concentrazione originale (M/L^3)	q	capacità di ritenzione, portata per unità di sezione
c'	concentrazione nel fluido in riferimento al volume del mezzo (M/L^3)	R_e	numero di Reynolds
cte	costante	R, r	distanza radiale (L), ricarica totale (L^3/T)
D	dispersività (L^2/T)	\bar{r}	distanza radiale media (L) o distanza radiale adimensionale
D_m	diffusività molecolare (L^2/T)	r_p	raggio del pozzo
D_o	dispersività intrinseca (L)	S	coefficiente di immagazzinamento
D_x, D_y, D_z	dispersività secondo gli assi delle coordinate (L^2/T)	T	tempo trasformato (T); trasmissività (L^3/T); tritio; periodo radioattivo (T)
D_x	dispersività frontale o longitudinale (L^2/T)	t	tempo (T), età (T)
D_y, D_z	dispersività laterale o trasversale (L^2/T)	\bar{t}	tempo adimensionale
erf	funzione di errore	t_o	tempo di arrivo, tempo medio (T)
erfc	funzione complementare di errore	t_R	tempo di residenza (T)
h, H	spessore saturo (L)	V	volume (L^3)
i	gradiente piezometrico (idraulico)	V_b	volume pompato (L^3)
j_x	velocità di trasporto secondo l'asse x ($M/L^2 T$)	V_i	volume iniettato (L^3)
\underline{k}	permeabilità (L/T)	v	velocità effettiva del fluido (L/T)
k	permeabilità media (L/T)	v_x, v_y, v_z	velocità effettiva del fluido secondo gli assi delle coordinate (L/T)
k_o	permeabilità intrinseca (L^2)	v'	velocità di flusso o di Darcy (L/T)
k_q	coefficiente di ripartizione	W	ricarica (L/T)
M	massa di tracciante (M)	\bar{x}, \bar{y}	coordinate adimensionali; percorso medio (L)
M'	massa di tracciante per unità di superficie (M/L^2)	x, y, z	coordinate cartesiane fisse (L)
M''	massa di tracciante per unità di lunghezza (M/L)	X, Y, Z	coordinate cartesiani mobili (L)
m	porosità efficace	Z	variabile complessa = $x + j \cdot y$; $j = \sqrt{-1}$
N	coefficiente di flusso	α	coefficiente di correzione in diluizione puntuale; tensione di vapore; profondità caratteristica; angolo
N_o	concentrazione iniziale di materia organica vivente	β	portata di pompaggio/portata di iniezione

β^-	radiazione beta negativa
γ	$1 + k_q/m$; altri significati
γ	radiazione gamma
Δ	variazione
δ	deviazione (in %, ‰) rispetto a un campione modello (standard)
ε	frazione di miscela (quando l'acqua originaria contiene tracciante). Sostituisce c/c_0
Φ	funzione potenziale
Ψ	funzione di corrente
x	mobilità relativa
λ	costante di decadimento radioattivo
μ	viscosità dinamica
ν	viscosità cinematica
ρ	distanza radiale, densità
σ	deviazione tipo o standard
σ_K	deviazione tipo della permeabilità
Σ	sommatoria

τ	lasso di tempo tra iniezione e pompaggio
∇	operatore di Laplace = $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$
\emptyset	diametro del pozzo (L)

Unità

c	curie
$\mu\mu\text{c/cc}$	micromicrocurie per centimetro cubico = 10^{-12} c/cc
c/l	curie/litro
UT	unità di tritio = 10^{-18} T/H

NOTA: in base alle recenti raccomandazioni della OIEA, come abbreviazione di curie si dovrebbe utilizzare Ci ma si è mantenuta, al fine di evitare troppe correzioni tipografiche, l'abbreviazione c, come già avvenuto nella sezione 4.

0.1 INTRODUZIONE GENERALE

Un modo diretto di seguire il movimento dell'acqua sotterranea è quello di aggiungere alla stessa una sostanza di facile identificazione e determinazione in grado di muoversi alla stessa velocità. Tale sostanza è definita *tracciante*. Questi traccianti possono essere aggiunti artificialmente, possono derivare da azioni non controllate sul ciclo dell'acqua sotterranea, quali test nucleari o contaminazione urbana, industriale o agricola, o possono avere un'origine naturale come alcuni radioisotopi.

Il movimento dei traccianti non è sempre semplice poiché è soggetto a fenomeni di dispersione, all'interazione con il terreno e a fenomeni di distruzione sia per decadimento radioattivo sia per instabilità chimica. Per questo occorre disporre di alcuni criteri che consentano di rapportare il movimento e l'arrivo di un tracciante con la velocità dell'acqua (capitolo 12.1) e che facilitino la scelta (capitolo 12.2).

Le tecniche dei traccianti permettono non solo di determinare la velocità di movimento dell'acqua sotterranea e la sua direzione ma anche di determinare porosità del mezzo, permeabilità relative, analisi dell'anisotropia ed eterogeneità degli acquiferi, miscele di acqua e velocità di transito, ecc., alcune volte come metodi indipendenti da quelli puramente idrodinamici per ottenere un'ulteriore conferma di questi ultimi e altre volte come unici metodi disponibili. In lavori su ricarica artificiale, contaminazione, iniezione profonda e altro possono rappresentare i metodi più diretti e migliori per studiare i loro effetti. Queste tecniche saranno analizzate nel capitolo 12.3.

Le variazioni naturali o dovute ad azioni non controllate nella qualità chimica, temperatura o contenuto radioisotopico, insieme allo studio del decadimento di sostanze radioattive

generate dall'azione cosmica, consentono di determinare il tempo necessario ad un'acqua per infiltrarsi nonché il suo movimento. Questa sarà materia di studio del capitolo 12.4, presentando tecniche definite di datazione radioattiva.

Le tecniche di tracciato non sempre sono di facile applicazione e interpretazione e possono risultare più costose di quelle idrodinamiche ma non per questo cessano di essere considerate utili. Il loro impiego da parte di personale inesperto o che ne ignora i principi fondamentali è stato a volte oggetto di insuccessi e scetticismo ma spesso è risultata utile una corretta reinterpretazione dei dati da parte di personale con la necessaria preparazione.

Le diverse tecniche di traccianti e di datazione trovano l'applicazione ottimale in un determinato momento nell'ambito di uno studio di idrologia sotterranea; la loro applicazione in momenti diversi può essere inopportuna e dare scarsi risultati. L'uso indiscriminato può trasformarsi in una costosa perdita di tempo, a volte destabilizzante, mentre in alcuni casi il loro impiego è raccomandabile ed in altri ancora quasi insostituibile.

0.2 BREVE CENNO STORICO

I traccianti hanno una tradizione molto antica nel campo dello studio delle acque sotterranee poiché consentono una verifica diretta del movimento delle acque nel sottosuolo. Tuttavia, la maggior parte delle applicazioni delle epoche passate corrisponde allo studio di sorgenti in sistemi carsici e in formazioni alluvionali ordinarie. I primi lavori scientifici in mezzi porosi naturali risalgono alla fine del secolo scorso e all'inizio di quello attuale (Slichter, Thiem, ecc.) ma non si sono sviluppati completamente fino al 1950 quando si iniziarono a conoscere nei dettagli i fenomeni di dispersione e rea-

zione con il terreno, si effettuarono molte prove di laboratorio in colonne per determinarne il comportamento e si introdussero i radioisotopi come traccianti. Attualmente non sono ancora state esplorate tutte le possibilità ma il loro utilizzo in alcune applicazioni ha carattere routinario. Gli studi sul movimento di fughe di sostanze radioattive da installazioni nucleari e sull'evacuazione di scorie radioattive nel sottosuolo hanno dato avvio a numerosi e importanti progressi in questo campo.

0.3 RINGRAZIAMENTI

L'autore ringrazia per i commenti e i suggerimenti Antonio Plata Bedmar, del Gabinetto per le Applicazioni nucleari del Ministero dei Lavori pubblici nonché, per le loro osservazioni, Pedro Coll Butí e María Dolores Peláez, professori della cattedra di Tecnologia nucleare della Scuola tecnica superiore degli Ingegneri industriali di Barcellona.

Spostamento di fluidi miscibili in mezzi porosi e dispersione idrodinamica

1.1 INTRODUZIONE

Nell'ambito dello studio del movimento di traccianti occorre stabilire i meccanismi dello spostamento di due fluidi miscibili in un mezzo poroso ovvero quello del fluido originale e quello del fluido contenente il tracciante.

I fenomeni di diffusione e dispersione fanno in modo che alcune particelle di tracciante percorrano in uno stesso tempo distanze diverse con tragitti diversi; non è possibile definire correttamente la velocità del flusso se non si stabilisce il tipo di influenza esercitata da questi fenomeni, oltre agli effetti di ritenzione del terreno e di decadimento radioattivo, se del caso.

Queste informazioni sono fondamentali anche in studi relativi a ricarica artificiale, contaminazione, intrusione marina, iniezione di liquidi residui, spostamento di acqua di diversa composizione, ecc., per determinare i loro effetti, in che modo interessano altre acque o captazioni esistenti e il grado di mescolamento prodotto. L'intrusione marina sarà considerata dettagliatamente nella sezione 13 e la contaminazione e l'iniezione di liquidi residui nella sezione 18, capitoli 18.3 e 18.4.

Salvo diversamente indicato, si suppone che i diversi liquidi coinvolti siano acque con maggiore o minore quantità e proporzione di sali disciolti, che ne consentono l'identificazione, la cui densità, viscosità e permeabilità non siano influenzate dalle differenze nella composizione. Si suppone che non si producano effetti di capillarità poiché si tratta di fasi miscibili con tensione superficiale quasi identica.

Ammettendo che l'acqua naturale non contenga tracciante e considerando come c_0 la concentrazione di tracciante nell'acqua aggiunta, quando ad un certo punto questo raggiunge una concentrazione c , in quest'acqua si avrà una parte c/c_0 d'acqua aggiunta e $1 - c/c_0$ di acqua naturale. Si suppone che il tracciante non sia radioattivo e che non interagisca con il terreno.

Spesso l'acqua naturale trasporta una certa quantità di tracciante c_n ; se c_0 è la concentrazione di tracciante nell'acqua aggiunta e ad un certo punto si trova una quantità c , la parte di acqua aggiunta sarà:

$$\epsilon = \frac{c - c_n}{c_0 - c_n}$$

identificata con il valore c/c_0 , se non diversamente indicato.

1.2 DIFFUSIONE E DISPERSIONE IDRODINAMICA IN MEZZI POROSI

Se in un mezzo poroso coesistono due fluidi miscibili, tende a prodursi una miscela nella zona di contatto a causa dei fenomeni di diffusione e dispersione.

Si consideri un sistema a riposo contenente acqua nella quale è stata introdotta una goccia d'acqua chiaramente differenziabile, per esempio colorata. La macchia prodotta aumenta progressivamente durante la fase di diluizione; è un processo prodotto da agitazione molecolare dei due liquidi dovuto alla loro temperatura e definito diffusione molecolare o semplicemente diffusione. Se esiste una differenza di densità tra le due acque, si può determinare un incremento del mescolamento dovuto all'insorgere di un movimento convettivo o allo spostamento delle masse.

Se ora si considera un sistema poroso omogeneo con acqua in movimento in cui si introduce una goccia di inchiostro, quando le sue particelle si muovono attraverso il mezzo poroso si disperdono, dovendo percorrere possibili tragitti diversi attraverso canalicoli creati dai grani o dalle crepe del materiale (figura 12.1). Alcune particelle arriveranno prima e altre dopo su un piano perpendicolare alla direzione del movimento, in base al tragitto percorso; così si origina una dispersione idrodinamica longitudinale o frontale.

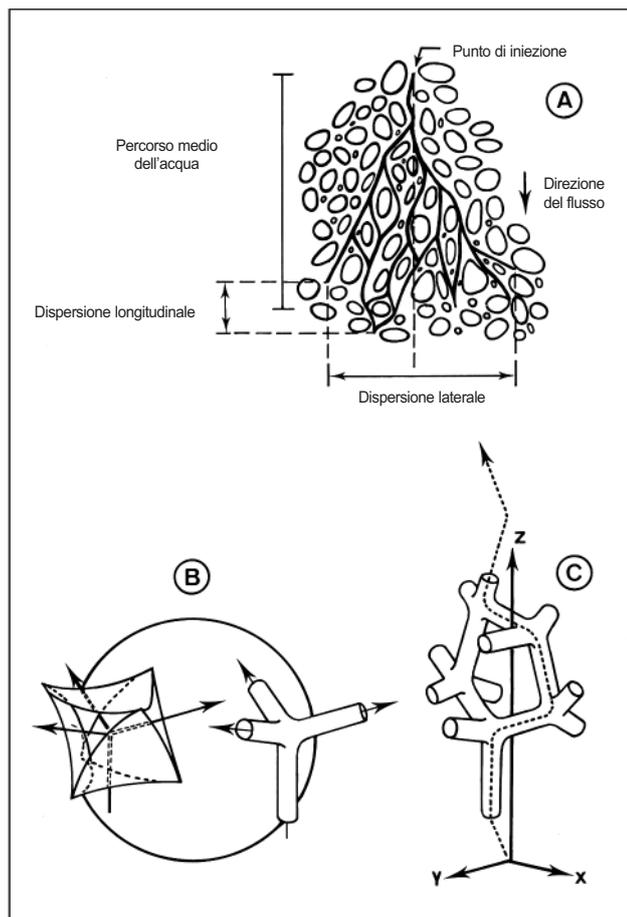


FIGURA 12.1
 Dispersione idrodinamica di un tracciante in un mezzo poroso. A) Dispersione laterale. B) Spazio tetraedrico in un mezzo poroso formato da sfere e schema con canalicoli. C) Percorso aleatorio scelto da una particella qualsiasi in moto attraverso il sistema di canalicoli

I diversi percorsi hanno, nel contempo, direzioni oblique rispetto alla direzione media del flusso e si distribuiscono all'interno di un cono (figura 12.1 A), originando una dispersione trasversale o laterale. Questo cono può essere limitato dai bordi del mezzo poroso, nel cui caso la dispersione laterale si ammortizza e cessa quando il fluido diventa omogeneo. A questi fenomeni si aggiungono la diffusione molecolare e la possibile convezione all'interno di ciascun canalicolo dovuta agli effetti viscosi cosicché la dispersione osservata è data dalla combinazione delle azioni descritte.

Per velocità di flusso relativamente elevate domina la

dispersione idrodinamica e per movimenti molto lenti domina la diffusione molecolare.

In mezzi eterogenei esistono alcuni livelli più permeabili tali che l'avanzamento del fronte tra le due acque è più rapido in alcuni punti rispetto ad altri e dà luogo a digitazioni (figura 12.2). Questo fenomeno è particolarmente accentuato in acquiferi stratificati con movimento che segue la disposizione degli strati.

Queste digitazioni possono originare una dispersione frontale (longitudinale) molto accentuata (figura 12.2). Questo tipo di dispersione è definita *dispersione per digitazione* o *dispersione (idrodinamica) macroscopica* in contrapposizione alla dispersione generata dai pori, definita *dispersione (idrodinamica) microscopica*¹.

Tra i due tipi di dispersione esiste un'importante differenza concettuale. Se si inverte la direzione del flusso, la disper-

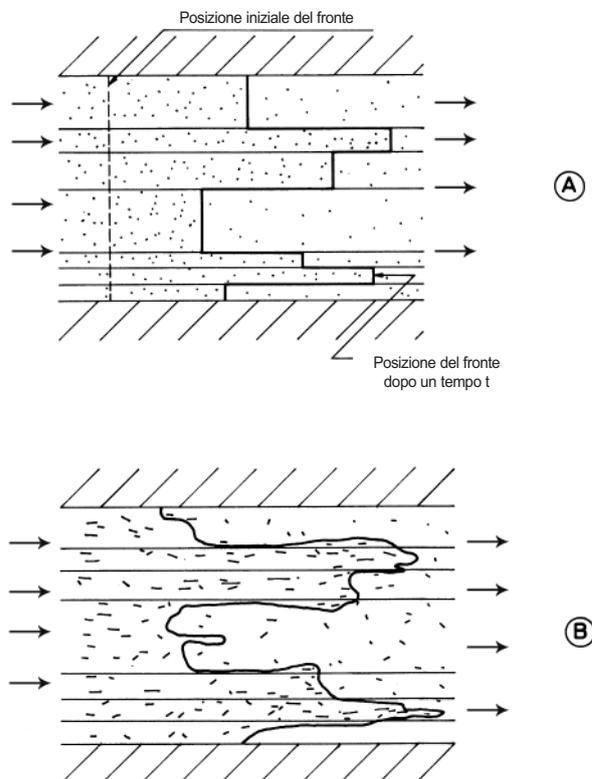


FIGURA 12.2
 Dispersione idrodinamica per digitazione (macroscopica). A) Posizione del fronte di spostamento in assenza di diffusione e dispersione macroscopica in un mezzo a strati uniformi. B) Posizione effettiva delle digitazioni. I livelli meno permeabili tendono a essere invasi per dispersione laterale e diffusione a partire da quelli più permeabili

¹ Vedere anche il capitolo 8.8, paragrafi da 8.7 a 8.10.

sione microscopica continua, quindi continuano a prodursi le azioni descritte; la dispersione idrodinamica macroscopica può in parte dissolversi poiché il regresso si attua in base alle differenze di permeabilità; persiste e si incrementa unicamente la dispersione dovuta alla diffusione e alla dispersione idrodinamica microscopica le quali coesistono in sovrapposizione alla dispersione idrodinamica macroscopica.

La dispersione idrodinamica macroscopica o per digitazioni si può produrre in modo accentuato anche in mezzi permeabili per fratturazione.

La zona di contatto e mescolamento tra i due fluidi si definisce *fronte* o *interfase*.

Quando il flusso è tridimensionale si può avere una nuova causa di dispersione dovuta alle diverse lunghezze di ciascun filetto liquido come si esporrà alla fine del paragrafo 1.9.

1.3 COMMENTI SU SPOSTAMENTO DI FLUIDI NON MISCIBILI ED ESTENSIONE A FLUIDI MISCIBILI

Se in un mezzo poroso saturato da un determinato fluido si introduce un secondo fluido non miscibile con il primo, questo viene spostato. In modo semplicistico si può supporre che tra i due fluidi si stabilisca un'interfase o fronte di spostamento che si muove modificando la sua configurazione in base al flusso che si stabilisce con una scarsa curvatura; questo è il tipo di spostamento che in una colonna di materiale poroso si definisce *a pistone*.

L'impostazione delle equazioni che determinano l'interfase è semplice e costituisce il cosiddetto *modello di Muskat*² (Muskat, 1937, pp. 453-476; Scheidegger, 1960, pp. 195-201; Collins, 1961, pp. 170-189) ma la cui risoluzione, tranne in casi speciali, è complicata e deve essere generalmente effettuata con metodi di calcolo numerico o con modelli viscosi. La presenza di un fluido immobile (congenito) nel campo dell'altro fluido³ può rendere difficile la risoluzione.

La mobilità relativa x dei due fluidi 1 e 2 (1 sposta 2) è:

$$x = \frac{k_{o1}/\mu_1}{k_{o2}/\mu_2}$$

dove k_o è la permeabilità intrinseca (funzione del grado di saturazione⁴) e μ la viscosità dinamica; si tratta di un fattore di grande importanza per la stabilità dell'interfase o fronte di spostamento. Se in questo fronte di spostamento si produce

una piccola protuberanza generata da una variazione locale di permeabilità o dal tipo di flusso (presenza di un pozzo nelle vicinanze), con $x \leq 1$ questa deformazione si estingue o si mantiene ma con $x > 1$ cresce in modo indefinito creando una digitazione. Così, quando il liquido spostante è più mobile di quello spostato si producono facilmente digitazioni e l'interfase risulta instabile trasformandosi in una frangia più o meno ampia, che aumenta nel tempo, dove si trovano i due fluidi in movimento. Risulta evidente che in mezzi eterogenei il fenomeno si produce in modo più accentuato.

Nella realtà gli effetti di differenza di densità e di capillarità tendono generalmente a ridurre le digitazioni che non scompaiono se la velocità del flusso è superiore a un certo valore critico (Collins, 1961, pp. 197-198; Muskat, 1937, pp. 476-480).

Nel caso di fluidi miscibili, in prima approssimazione, si ammette che il movimento della superficie di separazione o interfase avviene come nel caso di due fluidi non miscibili, in genere di uguale mobilità, se si tratta di acqua con e senza tracciante, sebbene le notevoli differenze di salinità e/o temperatura nonché di composizione possono rivestire un ruolo importante. In questo caso, le differenze di tensione superficiale (capillarità) non entrano in gioco. Spesso si ha $k_{o1} = k_{o2}$. Con $x = 1$, l'interfase tende ad essere stabile ma a volte si possono produrre digitazioni crescenti se, per le cause indicate, x è leggermente maggiore di 1; così può accadere nello spostamento di acqua fredda da parte di acqua calda ($\mu_1 < \mu_2$) o nello spostamento di acqua salata da parte di acqua dolce nelle regioni costiere, se la variazione di salinità influisce sulla permeabilità intrinseca. L'acqua della fase spostata che resta intrappolata dalla fase spostante con il passare del tempo viene disciolta da questa.

Occorre evidenziare che quanto esposto si riferisce alla stabilità dell'interfase ma che non si oppone alla formazione di digitazioni se il mezzo è stratificato come affermato nel paragrafo precedente. Queste digitazioni sono stabili o tendono molto lentamente ad attenuarsi o a crescere in base al valore di x e su queste agiscono la diffusione e la dispersione.

1.4 FORMULAZIONE ELEMENTARE DEI FENOMENI DI DIFFUSIONE E DISPERSIONE

La corretta formulazione dei fenomeni di diffusione e dispersione è complessa poiché è molto difficile simulare fisicamente e matematicamente i fenomeni che hanno luogo nel flusso attraverso un mezzo poroso, anche in casi semplici. Con alcune limitazioni è possibile trovare formule, la cui validità è stata confermata dalla pratica, contenenti alcuni coefficienti, quali i coefficienti di diffusione e di dispersione, che

² Vedere appendice A.12.

³ Vedere il capitolo 8.8, paragrafi da 8.7 a 8.10.

⁴ Vedere i paragrafi 1.7 e 8.8 della sezione 8.

integrano diverse proprietà del flusso e del mezzo che in genere si devono determinare sperimentalmente. La presenza di una dispersione longitudinale e di una dispersione laterale, con caratteri distinti, introduce un nuovo fattore di difficoltà.

Il problema può essere impostato da un punto di vista statistico, con sviluppi complicati, o più elementarmente ammettendo che in un mezzo omogeneo e isotropo con due liquidi con proprietà simili a regime laminare si compie la legge di Fick sia per la diffusione che per la dispersione. La legge di Fick stabilisce che il trasporto delle masse è proporzionale al gradiente di concentrazione di un liquido nell'altro.

Così, nel caso di diffusione molecolare, la velocità di trasporto di massa, j_x (g/cm²/sec), nella direzione x , vale:

$$j_x = -D_m \frac{\partial c}{\partial x} \quad (12.1)$$

dove c rappresenta la concentrazione (g/cm³) e D_m (cm²/sec) il coefficiente di diffusione molecolare o diffusività molecolare.

Anche per la dispersione si presume che si compia la legge di Fick con un coefficiente di dispersione o dispersività D (m²/giorno):

$$j_x = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (12.2)$$

Nella realtà si può supporre che D_m sia quasi indipendente dalla direzione ma non accade lo stesso con D per il quale il valore in direzione trasversale è varie volte minore (da 5 a 10) di quello in direzione longitudinale (De Josselin de Jong, 1968). In questo caso l'equazione (12.2) è un po' più complessa ed il coefficiente D acquisisce una forma tensoriale simmetrica (Scheidegger, 1969, pp. 167-168)⁵.

1.4.1 Tracciante stabile e non trattenuto

L'equazione differenziale di base che determina il fenomeno è l'equazione della continuità che può essere determinata effettuando il bilancio delle masse in un volume elementare che si ottiene per la diffusione pura (velocità molto ridotte)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_m \nabla^2 c \quad (12.3)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial X^2} + \frac{\partial}{\partial Y^2} + \frac{\partial}{\partial Z^2}$$

essendo $X = x - v_x t$; $Y = y - v_y t$; $Z = z - v_z t$.

v_x , v_y e v_z sono le componenti della velocità media effettiva del fluido \mathbf{v}

x , y , z sono le coordinate fisse di riferimento.

Per la dispersione la formulazione è più complicata (vedere appendice A.12.2):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} - v_x c \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial c}{\partial y} - v_y c \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial c}{\partial z} - v_z c \right) \quad (12.4)$$

ovvero

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \text{div} (D \cdot \text{grad } c) - \mathbf{v} \cdot \text{grad } c$$

dove D_x , D_y e D_z sono le dispersività secondo gli assi delle coordinate (con mezzo omogeneo).

Se il flusso è unidirezionale secondo l'asse x si ha $v_y = v_z = 0$ e se le dispersività sono costanti, resta:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - v_x \frac{\partial c}{\partial x} \quad (12.5)$$

Se si tratta del movimento lungo una colonna a sezione variabile con composizione uniforme in ciascuna sezione, non esiste dispersione laterale possibile, essendo $D_y = D_z = 0$ resta:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial c}{\partial x} \quad (12.6)$$

e se D_x è variabile:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} - v_x c \right) \quad (12.6 a)$$

Per quanto concerne il trattamento statistico della diffusione e dispersione esistono diverse approssimazioni con diverse ipotesi fondamentali. Scheidegger (1964) utilizza una descrizione statistica del mezzo poroso e suppone che le particelle seguano al suo interno lo stesso percorso aleatorio arrivando alle equazioni differenziali descritte nelle quali c esprime la probabilità che una particella si trovi in una certa posizione in un determinato periodo. Lo stesso autore (Scheidegger, 1964)

⁵ In Bear e Bachmat (1967) si può trovare una trattazione dettagliata.

descrive in modo probabilistico il fenomeno attraverso leggi termodinamiche basate sui processi statistici di Gibbs, assumendo come costante del sistema la quantità di fluido che si disperde o la quantità di tracciante contenuta nel fluido invece dell'energia del sistema.

I lavori di De Josselin de Jong (1958) sono basati sulla sostituzione del mezzo poroso con un mezzo formato da canalicoli incrociati (figura 12.1 B e C); ciascuna particella sceglie il suo percorso. La formulazione si attua analizzando in modo probabilistico il percorso seguito da un gran numero di particelle. Dato che le deviazioni tipo σ_1 delle distribuzioni si collegano con i coefficienti di diffusione D mediante la relazione $D = \sigma^2/2 t$, dove t è il tempo, si possono ottenere i valori di dispersione longitudinale e trasversale in funzione delle caratteristiche del mezzo fluido (vedere paragrafo 1.7).

Un altro metodo di analisi statistica è quello stabilito da un processo di ramificazione dal quale si può dedurre la deviazione tipo della distribuzione in funzione del percorso medio (Liao e Scheidegger, 1969).

Lo studio di tubi capillari nei quali si produce una dispersione per effetti viscosi di velocità è stato assunto come modello di ciò che accade in mezzi porosi (Collins, 1961, pp. 202-207) ma la similitudine non è del tutto ammissibile sebbene si arrivi a risultati comparabili (figura 12.3).

1.4.2 Tracciante stabile trattenuto dal terreno

In un mezzo poroso esiste un interscambio di masse tra la fase solida e la fase liquida, in particolare se sono presenti argille.

L'acqua naturale viene spostata da un'acqua con tracciante ed il mezzo poroso entra in contatto con un fluido con cui

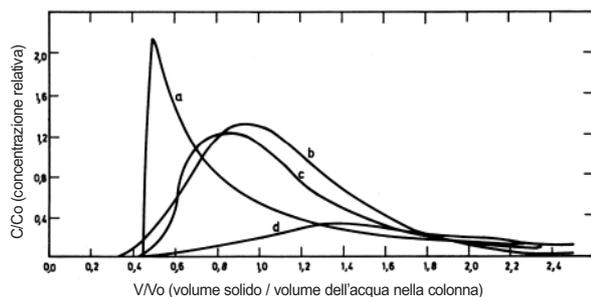


FIGURA 12.3
Curve di passaggio di un impulso del tracciante attraverso una colonna piena di materiale poroso. a) Curva teorica secondo il modello capillare. b) Curva teorica secondo il modello statistico. c) Curva sperimentale senza ritenzione né adsorbimento. d) Curva sperimentale con forte adsorbimento. (Halevy e Nir, 1960)

non è in equilibrio; inizia così l'interscambio di masse tramite interscambio ionico o per diffusione tra l'acqua mobile e l'acqua contenuta nei pori chiusi o semichiusi. Inoltre, in base al tipo di tracciante, questo può essere assorbito irreversibilmente o distrutto.

Il risultato è che le prime particelle di tracciante sono tratteneute e, dato che sono le più rapide, la velocità media di movimento del tracciante diminuisce.

Quando il tracciante è passato, la porzione scambiata viene restituita lentamente (eluizione), prolungandosi così notevolmente il periodo di passaggio per un punto.

Nella figura 12.4 si segnalano le curve di penetrazione corrispondenti a volumi di acqua marcata che si spostano in colonne riempite con diversi materiali. Uno dei traccianti

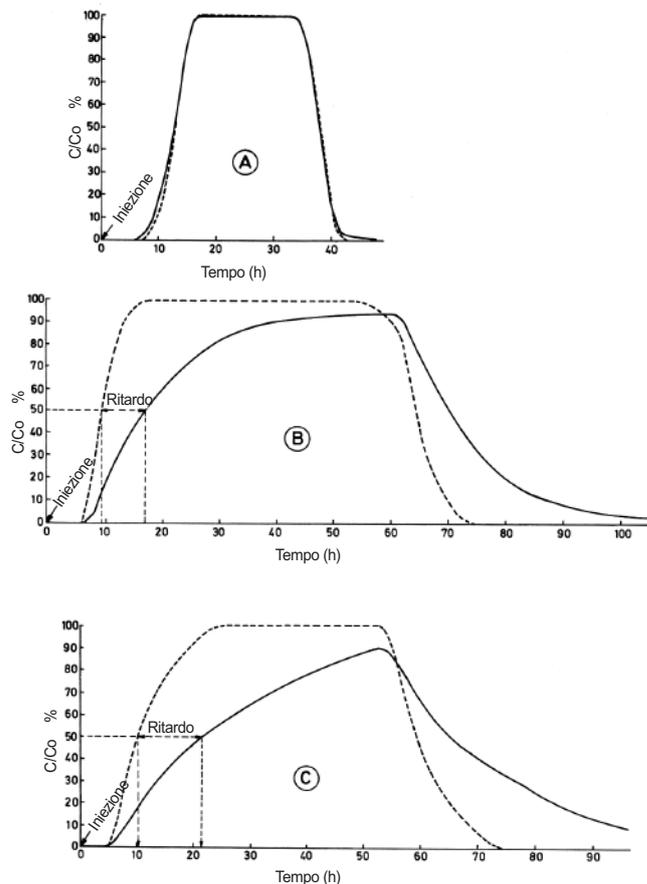


FIGURA 12.4
Curve di penetrazione attraverso colonne piene di sabbia dell'acqua marcata con tritio (linea tratteggiata) e 0,01 ppm di Cr-51 EDTA (linea continua). A) Sabbia silicea con 10% di moscovite. B) Sabbia silicea con 10% di goethite. C) Sabbia silicea con 10% di clorite (secondo Knutsson e Forsberg, 1966)

viene a stento trattenuto ma il secondo subisce un notevole assorbimento nel caso C e si può osservare chiaramente il ritardo e l'attenuazione del fronte di arrivo e la lunga scia di eluizione.

Se c'è la concentrazione del tracciante nella fase liquida e C la concentrazione nel mezzo solido, entrambe riferite all'unità di volume del mezzo poroso, in prima approssimazione si può ammettere che $C/c' = kq$, essendo kq un valore costante definito *coefficiente di ripartizione*; kq dipende dalla concentrazione e dalla capacità di ritenzione q . Questa relazione suppone il raggiungimento dell'equilibrio di interscambio delle masse, di norma ammissibile data la lentezza del flusso dell'acqua sotterranea.

L'equazione generale della dispersione con interscambio di masse è (Inoue e Kaufman, 1963; Gershon e Nir, 1969):

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} \left(1 + \frac{kq}{m} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \\ &- \frac{\partial}{\partial x} (v_x c) - \frac{\partial}{\partial y} (v_y c) - \frac{\partial}{\partial z} (v_z c) \end{aligned} \quad (12.7)$$

posto che $c = c'/m =$ concentrazione nel fluido e $m =$ porosità efficace.

In una colonna con distribuzione uniforme nella sezione si ottiene:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} \left(1 + \frac{kq}{m} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (v_x c) &= \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (12.7 \text{ bis})$$

Se si effettua la trasformazione temporale

$$t = \left(1 + \frac{kq}{m} \right) T$$

si riducono le equazioni della dispersione prima descritte (12.4 e 12.6) sostituendo t con T . La trasformazione introduce un coefficiente di ritardo tale che nella risoluzione questo ritardo cresce all'aumentare del percorso.

In un mezzo con movimento unidimensionale si compie approssimativamente (Davis e De Wiest, 1966, pagina 150).

$$v_t = \frac{v_a}{1 + kq/m}$$

dove v_t e v_a sono le velocità medie del tracciante e dell'acqua; kq è adimensionale. Si utilizza più frequentemente il valore $Kq = kq/\rho$ (Baetlsé, 1966) di dimensioni cm^3/g , essendo ρ la densità apparente del mezzo poroso. A titolo esemplificativo si può affermare che in terreni sabbiosi, senza argilla e materia organica, il valore di Kq per lo Sr varia tra 0,5 e 50 cm^3/g e per il Cs tra 1 e 500 cm^3/g (Davis e De Wiest, 1966, p. 152); i valori minori corrispondono a sabbie di quarzo e i maggiori a quelle di calcite.

1.4.3 Tracciante radioattivo

Quando il tracciante che permette di differenziare i due fluidi miscibili è una sostanza radioattiva, occorre considerare che la sua quantità diminuisce nel tempo perciò è necessario tenerne conto nel bilancio delle masse.

Di conseguenza nell'equazione della dispersione si deve aggiungere un termine:

$$\frac{\partial c}{\partial t} (\text{radioattivo}) = -\lambda c$$

essendo λ la costante di decadimento (vedere il paragrafo 5.5 della sezione 4).

Se c'è adsorbimento:

$$\frac{\partial c}{\partial t} (\text{radioattivo}) = -\lambda c \left(1 + \frac{kq}{m} \right) = -\lambda \gamma c$$

con $\gamma = 1 + kq/m$.

Se il periodo radioattivo è maggiore della durata dell'esperimento, si può prescindere da questa correzione senza commettere errori apprezzabili. Se il tracciante è stato introdotto nel sistema istantaneamente e non c'è adsorbimento, si possono applicare le formule ricavate per traccianti stabili, applicando il fattore di correzione $e^{\lambda t}$ alla concentrazione c in un certo tempo t .

1.5 VALORI DEI COEFFICIENTI DI DISPERSIONE E DIFFUSIONE

1.5.1 Formule

In base ai risultati sperimentali ottenuti in laboratorio e sul campo, il coefficiente di dispersione D può essere espresso da:

$$D = D_m + D_o \quad v \quad (12.8)$$

essendo D_m la diffusività molecolare e D_o un valore intrinseco della dispersività (dispersività intrinseca, a volte definita *lunghezza di mescolamento*) che dipende esclusivamente dalla natura del mezzo ma non dalla velocità media effettiva del flusso v . Si suppone che il flusso sia stazionario o quasi stazionario.

È importante ricordare che v (effettiva) = v (di flusso)/ m dove m è la porosità efficace⁶. Se non diversamente indicato, si tratterà in seguito di velocità effettive v .

De Josselin de Jong (1958) ha dedotto:

$$\text{coefficiente di dispersione laterale } D_y = \frac{3}{16} v l$$

coefficiente di dispersione longitudinale

$$D_x = \frac{1}{6} v l (\lambda + 0,75 - \ln \gamma)$$

con:

l = lunghezza di ciascun canale elementare (porosità) · (dimensione del grano)

v = velocità media effettiva di flusso

$\ln \gamma$ = costante di Eulero = 0,577

λ = valore che rappresenta una funzione crescente della distanza percorsa da ciascuna particella nella direzione del flusso x_o tale che:

$$N = \frac{e^{2\lambda}}{2(\lambda - 0,75 - \ln \gamma)}$$

N = numero di canali percorsi dalla particella il cui valore minimo è $N_m = x_o/l$ e il cui valore più probabile è $N_o = 1,5 x_o/l$.

x_o = distanza percorsa.

Questi valori dedotti teoricamente sono conformi alla formula (12.8) per la dispersività laterale, ma per quella trasversale occorre effettuare una correzione che cresce con il tragitto percorso e che in prima approssimazione è proporzionale a $1/2 \ln x_o$.

In esperimenti relativi alla dispersione in un intervallo Δx , la variazione di D_x è irrilevante quando $\Delta x/x$ è piccolo.

Esempio 1

In un mezzo tale che $l = 0,2$ mm con $v = 1$ m/giorno a distanze di 10 e 100 m si avrà:

$$D_y = \frac{3}{16} \cdot 1 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = 3,75 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{giorno}$$

$$N_o(10) = 1,5 \frac{10}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 7,5 \cdot 10^4 \quad ; \quad N_m(10) = 5 \cdot 10^4$$

$$; \quad N_m(100) = 5 \cdot 10^5$$

$$N_o(100) = 7,5 \cdot 10^5$$

Da prove successive si ottengono i seguenti valori di γ per $N = N_o$:

$$\lambda(10) = 6,65 \quad ; \quad \lambda(100) = 7,93$$

$$D_x(10) = (1/6) \cdot 1 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} (6,65 + 0,75 - 0,577) = 2,27 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{giorno}$$

$$D_x(100) = (1/6) \cdot 1 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} (7,93 + 0,75 - 0,577) = 2,70 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{giorno}$$

$$D_x(10)/D_y = 0,6 \quad ; \quad D_x(100)/D_y = 7,2$$

Se il flusso può raggiungere velocità per le quali non si attua la legge di Darcy, in generale si può scrivere che:

$$D = D_m + D_o v^n$$

Per velocità elevate si ha $D_m \ll D$, $D = D_o v^n$ e secondo vari autori $D = \alpha \cdot Re^n \cdot v$, dove Re = numero di Reynolds = $d v'/\nu$ ($d = d_{50}$ = dimensione 50% del grano, ν = viscosità cinematica e v' velocità di flusso o di Darcy).

Secondo Li e Lai (1966) per il calcolo di D_y si ha $\alpha =$ da 0,035 a 0,12 passando da sabbia a ghiaia e $n = 0,75$; per il calcolo di D_x , $\alpha =$ da 0,02 a 0,03 per ghiaia e $n = 4/3$.

Il coefficiente α diminuisce all'aumentare del grado di rotondità del materiale. Secondo Bruch e Street (Bruch, 1970) per il calcolo di D_x si ha $\alpha = 1,8$ e $n = 1,205$ mentre per il calcolo di D_y , $\alpha = 0,11$ e $n = 0,7$. Secondo altri autori (in Liao e Scheidegger, 1969) n varia da 0,7 a 1,0; Schaffman (in Li e Lai, 1966) propone:

$$D_y = v'd \frac{S + 2}{2(S + 1)(S + 3)}$$

con $S = 1$ per flusso laminare di Darcy e $S = 0,5$ per flusso turbolento.

Tuttavia nella maggior parte delle applicazioni pratiche è sufficiente considerare:

$D = D_m$ per flussi molto lenti (dell'ordine di mm/giorno)

$D = D_m + D_o v$ per flussi intermedi

$D = D_o v$ per flussi rapidi che soddisfano la legge di Darcy (generalmente tra 1 e 10 m/giorno).

⁶ Vedere il paragrafo 1.3 della sezione 8.