

# Índice de materias

Preámbulo . . . . .	V
Coordinadores . . . . .	VI
Prólogo . . . . .	VII
Autores y colaboradores . . . . .	XI

## Sección 1

### CONCEPTOS GEOLÓGICOS BÁSICOS DE APLICACIÓN EN HIDROLOGÍA

1.0 Introducción general de la sección . . .	3
--	---

#### Capítulo 1.1

##### Los materiales: rocas plutónicas, volcánicas y metamórficas

1.1 La corteza terrestre . . . . .	5
1.2 Minerales y rocas como elementos constitutivos de la corteza terrestre . . . . .	6
1.3 Clasificación de las rocas . . . . .	7
1.3.1 Rocas eruptivas y plutónicas . . .	7
1.3.2 Rocas eruptivas filonianas . . . .	9
1.3.3 Rocas volcánicas . . . . .	9
1.3.4 Rocas metamórficas . . . . .	11

#### Capítulo 1.2

##### Los materiales:

##### sedimentos y rocas sedimentarias

2.1 Ciclo geológico de los materiales de la corteza terrestre . . . . .	13
2.2 Sedimentos . . . . .	13
2.2.1 Granulometría de las rocas sedimentarias incoherentes o no consolidadas. . . . .	14
2.2.2 Tipos de sedimentos . . . . .	14
2.2.3 Tipos de ambientes sedimentarios. . . . .	14
2.3 Consolidación o litogénesis. Factores de la misma . . . . .	15
2.4 Rocas sedimentarias . . . . .	16
2.4.1 Estructura . . . . .	16
2.4.2 Clasificación de las rocas sedimentarias coherentes . . . . .	16

#### Capítulo 1.3

##### Estratigrafía y geología histórica

3.1 Estratos: definición y características más importantes . . . . .	19
3.1.1 Características sedimentarias. Facies. . . . .	19
3.1.2 Muro, techo y espesor de los estratos. . . . .	20
3.1.3 Rumbo o dirección . . . . .	21
3.1.4 Buzamiento o inclinación de los estratos . . . . .	21
3.1.5 Utilidad del rumbo o dirección y buzamiento . . . . .	22
3.1.6 Asociación de estratos: series y columnas estratigráficas . . . . .	22
3.2 Conceptos fundamentales de la estratigrafía. . . . .	24
3.2.1 Transgresiones y regresiones . . . . .	24
3.2.2 Lagunas estratigráficas . . . . .	24
3.2.3 Concordancias y discordancias . . . . .	24
3.2.4 Los fósiles . . . . .	25
3.2.5 Principios fundamentales de la Geología Histórica . . . . .	25
3.2.6 Correlaciones y cambios de facies. . . . .	26
3.3 Dataciones absoluta y relativa en geología . . . . .	27
3.3.1 Datación absoluta . . . . .	27
3.3.2 Datación relativa . . . . .	31
3.3.3 Eras geológicas . . . . .	31

#### Capítulo 1.4

##### La disposición de los materiales: tectónica

4.1 Modificaciones de la corteza terrestre. . . . .	32
4.1.1 Plasticidad de las rocas . . . . .	32
4.1.2 Movimientos epigénicos. . . . .	33
4.1.3 Movimientos orogénicos . . . . .	33
4.2 Pliegues . . . . .	35
4.2.1 Terminología de sus elementos . . . . .	36
4.2.2 Clasificación. Tipos más importantes. . . . .	36
4.3 Fallas. Naturaleza . . . . .	39
4.3.1 Terminología de sus elementos . . . . .	39
4.3.2 Clasificación. Tipos más importantes. . . . .	39
4.4 Asociaciones de pliegues y fallas. Estilos tectónicos generales . . . . .	40
4.4.1 Estilos tectónicos generales . . . . .	40

4.5	Diaclasas. Naturaleza. . . . .	41
4.5.1	Origen y significación . . . . .	41
<b>Capítulo 1.5</b>		
<b>Mapas geológicos</b>		
5.1	Introducción . . . . .	42
5.2	Componentes de los mapas geológicos. . . . .	42
5.2.1	Escala. . . . .	42
5.2.2	Datos de base . . . . .	43
5.2.3	Datos geológicos . . . . .	43
5.3	Definición y presentación de los mapas geológicos . . . . .	43
5.4	Clasificación . . . . .	44
5.4.1	Clasificación por su escala . . . . .	44
5.4.2	Clasificación por sus objetivos . . . . .	44
5.5	Leyendas de los mapas geológicos . . . . .	46
5.5.1	Símbolos litológicos . . . . .	46
5.5.2	Símbolos tectónicos . . . . .	46
5.5.3	Símbolos estratigráficos . . . . .	46
5.6	Confección e interpretación de mapas geológicos . . . . .	47
<b>Apéndice 1.1</b>		
<b>Fotogeología</b>		
A.1.1.1	Introducción . . . . .	49
A.1.1.2	Fotografías aéreas. Su obtención y presentación . . . . .	49
A.1.1.3	Estudio de las mismas por estereoscopia . . . . .	52
A.1.1.4	Fotointerpretación . . . . .	52
	<i>Bibliografía</i> . . . . .	56

## Sección 2

### ELEMENTOS DE HIDROMECAÁNICA

<i>Símbolos</i> . . . . .	59
---------------------------	----

#### Capítulo 2.1

##### Principios básicos

1.1	Introducción . . . . .	61
1.2	Propiedades físicas de los fluidos . . . . .	61
1.2.1	Sistema de unidades. . . . .	61
1.2.2	Peso y masa . . . . .	61
1.2.3	Compresibilidad . . . . .	63
1.2.4	Viscosidad . . . . .	63
1.2.5	Tensión superficial . . . . .	64
1.2.6	Parámetros adimensionales . . . . .	64
1.3	Estática de fluidos . . . . .	65
1.3.1	Ecuaciones fundamentales. . . . .	66

1.3.2	Equilibrio de un fluido sometido a la acción de la gravedad . . . . .	67
1.3.3	Medición de presiones . . . . .	67
1.4	Cinemática de fluidos . . . . .	68
1.4.1	Partícula líquida . . . . .	68
1.4.2	Trayectoria y línea de corriente . . . . .	68
1.4.3	Movimiento permanente y movimiento variable . . . . .	68
1.4.4	Movimiento uniforme . . . . .	68
1.4.5	Movimiento laminar y movimiento turbulento . . . . .	68
1.4.6	Tubo de flujo . . . . .	68
1.5	Dinámica de fluidos . . . . .	68
1.5.1	Elementos de una sección. . . . .	69
1.5.2	Energía . . . . .	69
1.5.3	Ecuaciones fundamentales de la hidrodinámica . . . . .	69

#### Capítulo 2.2

##### Teoría de máquinas de bombeo

2.1	Elevación de líquidos. Bombas volumétricas de émbolo, rotativas, de engranajes. Ariete hidráulico. Elevadores de agua por aire . . . . .	71
	Bombas de émbolo . . . . .	71
	Bombas rotativas . . . . .	73
	Ariete hidráulico . . . . .	74
	Elevadores de agua por aire. . . . .	75
2.2	Bombas centrífugas axiales y semiaxiales. . . . .	75
2.3	Principios de mecánica de fluidos aplicados a las turbo-máquinas y reversibilidad . . . . .	77
2.4	Pérdidas en las bombas. Rendimiento manométrico, volumétrico y mecánico. Rendimiento total . . . . .	79
2.5	Relaciones de semejanza en las bombas centrífugas . . . . .	80
2.6	Número de vueltas característico . . . . .	81
2.7	Clasificación por el número de vueltas característico . . . . .	82

#### Capítulo 2.3

##### Cálculo de conductos

3.1	Definiciones . . . . .	83
3.2	Régimen laminar. Número de Reynolds . . . . .	83
3.3	Fórmulas de pérdida de carga. Fórmula de Pouiselle . . . . .	84
3.4	Régimen turbulento. Rugosidad absoluta y relativa. Tubo liso y rugoso . . . . .	85
3.5	Resumen histórico de las fórmulas de pérdida de carga: Darcy, Manning, Bazin, Hazen y Williams, Scimemi, Von Karman, Nikuradse, Colebrook . . . . .	85

3.6	Pérdidas de carga secundarias, codos, cambios de sección, válvulas, etc. . . . .	87
3.7	Longitudes equivalentes. Abaco simplificado . . . . .	90
3.8	Perfil piezométrico. Tubos de secciones varias. Tubos en paralelo. Unidades de caudal. . . . .	91
3.9	Diámetro más económico . . . . .	93

## Capítulo 2.4

### Selección de maquinaria de bombeo

4.1	Curvas características. Caudal-altura, caudal-rendimiento, caudal-potencia. Inestabilidad . . . . .	94
4.2	Curva característica de la tubería de impulsión. Funcionamiento de bombas en serie y en paralelo sobre una misma tubería . . . . .	95
4.3	Tipos de bombas centrífugas. Grado de vacío admisible en la aspiración. Cavitación. . . . .	95
4.4	Accionamiento de bombas centrífugas. Características de los motores. Transformador. Formas de arranque. Energía reactiva. . . . .	97

## Capítulo 2.5

### Dimensionado de una impulsión

5.1	Consideraciones generales . . . . .	99
5.2	Planteamiento de datos actuales y previsiones futuras. (Ejemplo) . . . . .	100
5.3	Discusión de soluciones. (Ejemplo) . . . . .	101
5.4	Especificaciones para la oferta de bombas. . . . .	104

## Capítulo 2.6

### Dispositivos de aforo

6.1	Introducción . . . . .	106
6.2	Dispositivos para lámina libre . . . . .	106
6.2.1	Ecuación fundamental . . . . .	106
6.2.2	Orificio de grandes dimensiones . . . . .	107
6.2.3	Otros tipos de orificios . . . . .	108
6.2.4	Compuertas . . . . .	108
6.2.5	Vertederos en pared delgada. . . . .	109
6.2.6	Elección del tipo de vertedero . . . . .	112
6.2.7	Vertederos en pared gruesa . . . . .	113
6.2.8	Aforador Parshall . . . . .	115
6.2.9	Tubo de Pitot. . . . .	116
6.3	Dispositivos para conductos a presión . . . . .	117
6.3.1	Medición con recipientes tarados . . . . .	117
6.3.2	Método de California . . . . .	117
6.3.3	Vertido por un tubo lleno . . . . .	118
6.3.4	Medidores Venturi . . . . .	119
6.3.5	Orificios en tuberías . . . . .	119
6.3.6	Contadores . . . . .	119

Bibliografía . . . . .	121
------------------------	-----

## Sección 3

### NOCIONES DE ESTADÍSTICA APLICADA A LA HIDROLOGÍA

<i>Símbolos</i> . . . . .	125
---------------------------	-----

0.1 Introducción general . . . . .	126
------------------------------------	-----

## Capítulo 3.1

### Definiciones y conceptos básicos

1.1	Introducción . . . . .	127
1.2	Estadística descriptiva y estadística matemática . . . . .	127
1.3	La observación de los sucesos . . . . .	127
1.4	La producción de los sucesos. . . . .	128
1.5	Obtención de datos . . . . .	128
1.6	Estudio previo de los datos primarios. . . . .	128
1.7	Elaboración de los datos . . . . .	129
1.8	Distribución estadística de una variable . . . . .	129
1.8.1	Tablas de presentación. Frecuencia . . . . .	129
1.8.2	Representaciones gráficas . . . . .	130
1.9	Parámetros estadísticos de las muestras . . . . .	131
1.9.1	Medidas de posición o tendencia central . . . . .	132
1.9.2	Medidas de dispersión o variabilidad. . . . .	132
1.9.3	Medidas de desviación o asimetría . . . . .	133
1.10	Momentos de las muestras. . . . .	134
1.10.1	Momentos respecto al origen. . . . .	134
1.10.2	Momentos centrales . . . . .	134
1.10.3	Relaciones entre los momentos respecto al origen y los momentos centrales . . . . .	134
1.11	Probabilidad matemática de un suceso. . . . .	135
1.11.1	Valores frontera de la probabilidad. . . . .	135
1.11.2	Probabilidad condicional . . . . .	135
1.11.3	Probabilidad de sucesos mutuamente excluyentes . . . . .	135
1.12	Variables aleatorias . . . . .	135
1.13	Funciones de distribución de una variable aleatoria discreta . . . . .	135
1.13.1	Función de probabilidad . . . . .	136
1.13.2	Función de distribución de probabilidades totales . . . . .	136
1.14	Funciones de distribución de una variable aleatoria continua . . . . .	136
1.14.1	Función de densidad de probabilidad. . . . .	136
1.14.2	Función de distribución de probabilidades . . . . .	136
1.15	Parámetros estadísticos de una población formada por todos los valores posibles de una variable aleatoria con función de distribución de probabilidades conocida . . . . .	137

1.15.1	Parámetros de posición o tendencia central . . . . .	137
1.15.2	Parámetros de dispersión o variabilidad . . . . .	138
1.15.3	Parámetros de desviación o asimetría. . . . .	139
1.16	Momentos de una población . . . . .	139
1.16.1	Momentos respecto al origen . . . . .	139
1.16.2	Momentos centrales. . . . .	139
1.17	La estimación estadística . . . . .	139
1.17.1	Estimación de parámetros poblacionales . . . . .	139
1.17.2	Intervalos de confianza . . . . .	140

### Capítulo 3.2

#### Distribuciones de probabilidad de una variable aleatoria

2.1	Introducción . . . . .	141
2.2	Distribuciones de probabilidad más usuales. . . . .	141
2.2.1	Distribución binomial . . . . .	141
2.2.2	Distribución de Poisson . . . . .	142
2.2.3	Distribución normal. . . . .	142
2.2.4	Distribución logarítmico-normal. . . . .	146
2.2.5	Distribución gamma . . . . .	148
2.2.6	Distribuciones extremas . . . . .	149
2.2.7	Distribución $\chi^2$ . . . . .	149
2.2.8	Distribución t de Student . . . . .	150
2.2.9	Distribución de Kolmogorof . . . . .	150
2.3	Tests de bondad del ajuste de una muestra a una distribución $\chi^2$ . . . . .	150
2.3.1	Test . . . . .	154
2.3.2	Test de Kolmogorof. . . . .	154
2.4	Métodos de estimación de los parámetros de una distribución . . . . .	158
2.4.1	Método de la máxima verosimilitud . . . . .	159
2.4.2	Método de los momentos o de Pearson . . . . .	160
2.4.3	Método de los mínimos cuadrados. . . . .	160
2.4.4	Método gráfico . . . . .	160
2.4.5	Distribución de los parámetros estimados . . . . .	160
2.5	Intervalos de confianza . . . . .	161

### Capítulo 3.3

#### Correlación y regresión

3.1	Introducción . . . . .	164
3.2	Regresión y correlación lineal. . . . .	164
3.2.1	Rectas de regresión . . . . .	164
3.2.2	Coefficiente de correlación. . . . .	166
3.3	Regresión y correlación no lineales. . . . .	168
3.4	Regresión y correlación múltiple . . . . .	168
3.5	Tratamiento de muestras interdependientes . . . . .	169

### Apéndice 3.1

#### Serie cronológicas

A.3.1.1	Introducción . . . . .	170
A.3.1.2	Metodología empleada en el estudio de series cronológicas . . . . .	170
A.3.1.3	Métodos de generación de series . . . . .	172

Bibliografía . . . . .	173
------------------------	-----

### Sección 4

#### PRINCIPIOS BÁSICOS DE QUÍMICA Y RADIOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

<i>Símbolos</i> . . . . .	177
0.1 <b>Introducción general</b> . . . . .	179
0.2 <b>Bosquejo histórico.</b> . . . .	179
0.3 <b>Agradecimientos</b> . . . . .	179

### Capítulo 4.1

#### Elementos de química del agua

1.1	Introducción . . . . .	180
1.2	El agua como sustancia química pura . . . . .	180
1.3	El agua en la naturaleza como agente físico-químico . . . . .	180
1.3.1	El agua como disolvente . . . . .	180
1.3.2	Forma en que se encuentran las sustancias disueltas . . . . .	181
1.3.3	Expresión de las concentraciones . . . . .	181
1.3.4	Fuerza iónica $\mu$ . . . . .	182
1.3.5	Actividad . . . . .	182
1.3.6	Concentración de hidrogeniones, pH . . . . .	183
1.3.7	Ley de acción de masas . . . . .	183
1.3.8	El producto de solubilidad. Efecto de ion común . . . . .	184
1.3.9	Soluciones saturadas y no saturadas . . . . .	184
1.3.10	Reacciones de oxidación-reducción. Potencial redox . . . . .	185
1.4	Leyes de la disolución de gases . . . . .	186
1.5	Disolución de líquidos . . . . .	187
1.6	Disolución de sólidos. . . . .	187
1.7	Las sustancias coloidales y los geles . . . . .	189
1.8	Mecanismos del ataque químico a los minerales . . . . .	189
1.9	Intercambio iónico . . . . .	190
1.10	Fenómenos osmóticos . . . . .	191
1.11	Química de los iones derivados del ácido carbónico. Alcalinidades . . . . .	191
1.12	La disolución de calizas y dolomías. Agresividad a caliza e incrustabilidad . . . . .	192
1.12.1	Solubilidad del carbonato cálcico y del carbonato magnésico . . . . .	192

1.12.2 pH de equilibrio y CO <sub>2</sub> de equilibrio.	194
1.12.3 Agresividad a caliza e incrustabilidad.	194
1.12.4 Validez de los cálculos de agresividad a caliza. . . . .	198

## Capítulo 4.2

### Composición de las aguas subterráneas

2.1 Introducción . . . . .	200
2.2 Sustancias que se encuentran disueltas en un agua natural subterránea. Iones fundamentales y menores . . . . .	200
2.3 Características químicas de los iones y sustancias disueltas más importantes . . . . .	201
2.3.1 Aniones y sustancias aniónicas. . . . .	201
2.3.2 Cationes y sustancias catiónicas. . . . .	203
2.3.3 Principales gases disueltos . . . . .	205
2.3.4 Aniones y sustancias aniónicas menores más importantes . . . . .	206
2.3.5 Cationes y sustancias catiónicas menores más importantes . . . . .	206
2.4 Características físicas . . . . .	207
2.4.1 Temperatura, $\theta$ . . . . .	207
2.4.2 Conductividad y resistividad, C y $\rho$ . . . . .	208
2.4.3 Densidad $\delta$ . . . . .	209
2.4.4 Color . . . . .	210
2.4.5 Turbidez o turbiedad . . . . .	210
2.4.6 Materia en suspensión . . . . .	210
2.4.7 Sabor . . . . .	210
2.5 Características químicas y fisicoquímicas . . . . .	211
2.5.1 Concentración de hidrogeniones, pH . . . . .	211
2.5.2 Residuo seco y total de sales disueltas, Rs y Sd . . . . .	211
2.5.3 Alcalinidades TAC y TA . . . . .	211
2.5.4 Acidez . . . . .	212
2.5.5 Durezas total, permanente y temporal o carbonatada (D <sub>t</sub> , D <sub>p</sub> , D <sub>c</sub> ) . . . . .	212
2.5.6 Demanda química de oxígeno (DQO) o materia orgánica (MO) . . . . .	212
2.5.7 Demanda bioquímica de oxígeno DBO . . . . .	213
2.5.8 Demanda de cloro y break-point . . . . .	213

## Capítulo 4.3

### Toma de muestras de agua subterránea

3.1 Introducción . . . . .	214
3.2 Métodos de toma de muestras en pozos . . . . .	214
3.3 Representatividad de las muestras de agua tomadas en sondeos y piezómetros . . . . .	216
3.4 Número y frecuencia de las muestras . . . . .	217
3.5 Envases para el transporte y almacenamiento . . . . .	218
3.6 Transporte al laboratorio y almacenamiento. . . . .	218
3.7 Identificación de las muestras . . . . .	218
3.8 Determinación en el campo . . . . .	220

3.9 Notas sobre el muestreo de aguas superficiales . . . . .	220
--	-----

## Capítulo 4.4

### El análisis químico

4.1 Introducción . . . . .	221
4.2 Modos de expresión de las diferentes características químicas . . . . .	221
4.3 Clases de análisis químicos. . . . .	223
4.4 Balance de aniones y cationes en un análisis químico. Errores . . . . .	223
4.5 Presentación de los análisis químicos . . . . .	224
4.6 Cálculos y comprobaciones que pueden realizarse en un análisis químico. . . . .	226
4.7 Aspectos económicos . . . . .	229

## Capítulo 4.5

### Principios de radioquímica

5.1 Introducción . . . . .	230
5.2 Isótopos . . . . .	230
5.3 Núcleos radioactivos . . . . .	230
5.4 Leyes de la desintegración radioactiva. . . . .	231
5.5 Actividad y unidades. . . . .	232
5.6 Energía de las radiaciones . . . . .	232
5.7 Interacción entre las radiaciones nucleares y la materia. . . . .	232
5.8 Detección de las radiaciones . . . . .	233
5.9 Medida de la actividad . . . . .	234
5.10 Unidades, cantidades y dosis de radiación. . . . .	235
5.11 Efectos biológicos de las radiaciones. Irradiación y contaminación . . . . .	235
5.12 Dosis permisibles de radiación y concentraciones máximas permisibles . . . . .	236
5.13 Isotopía del agua . . . . .	236
5.14 Radioisótopos naturales primarios y sus series radioactivas. Presencia en el agua subterránea . . . . .	238
5.15 Radioisótopos naturales de origen cósmico. . . . .	239
5.16 Radioisótopos artificiales generados en pruebas nucleares . . . . .	240
5.17 Otros radioisótopos artificiales . . . . .	240

## Apéndice 4.1

### Métodos de análisis químicos de aguas

A.1 Introducción . . . . .	241
A.2 Métodos gravimétricos . . . . .	241
A.3 Métodos volumétricos o valoraciones . . . . .	241
A.4 Determinaciones conductivimétricas . . . . .	243
A.5 Determinaciones electrométricas. . . . .	243
A.6 Métodos colorimétricos y espectrofotométricos . . . . .	243

A.7 Métodos de fotometría de llama . . . . .	244
A.8 Otros métodos . . . . .	244
<i>Bibliografía</i> . . . . .	245

## Sección 5

### CONCEPTOS BÁSICOS Y DEFINICIONES

#### Capítulo 5.1

##### Concepto de hidrogeología

1.1 Concepto de hidrogeología . . . . .	249
1.2 Situación de la hidrogeología en el campo de las ciencias . . . . .	250
1.3 Evolución de los conceptos hidrogeológicos a lo largo del tiempo. . . . .	251
1.3.1 La utilización de las aguas del subsuelo en las civilizaciones antiguas . . . . .	251
1.3.2 La civilización greco-romana: primeras interpretaciones científicas . . . . .	251
1.3.3 La Edad Media y el Renacimiento . . . . .	252
1.3.4 Los fundadores de la Hidrogeología (1600-1860) . . . . .	253
1.3.5 La Hidrogeología moderna (1860-1950) . . . . .	253
1.3.6 La Hidrología subterránea en España. . . . .	255
1.4 Fuentes de información científica sobre hidrología subterránea . . . . .	256
1.4.1 Selección de libros de texto . . . . .	256
1.4.2 Publicaciones especializadas . . . . .	257

#### Capítulo 5.2

##### Los acuíferos o embalses subterráneos

2.1 Introducción . . . . .	259
2.2 Definición de acuífero, acuícludo, acuitardo y acuífugo. . . . .	259
2.3 Formaciones geológicas como acuíferos . . . . .	260
2.4 Parámetros hidrológicos fundamentales . . . . .	261
2.4.1 Porosidad . . . . .	261
2.4.2 Permeabilidad o conductividad hidráulica . . . . .	262
2.4.3 Transmisividad . . . . .	263
2.4.4 Coeficiente de almacenamiento . . . . .	263
2.5 Tipos de acuíferos. . . . .	264

#### Capítulo 5.3

##### Situación y movimiento del agua en la hidrosfera

3.1 El ciclo hidrológico: concepto y elementos. . . . .	266
3.1.1 Introducción . . . . .	266
3.1.2 Localización, estado y origen del agua en el ciclo hidrológico . . . . .	266

3.1.3 Descripción del movimiento del agua. . . . .	267
3.2 Inventario o almacenamiento del agua de la hidrosfera . . . . .	268
3.3 El flujo o balance hidráulico global . . . . .	270
3.4 Definiciones de conceptos básicos . . . . .	273
3.4.1 Infiltración. Humedecimiento del suelo. . . . .	273
3.4.2 Embalse subterráneo . . . . .	274
3.4.3 Recarga y descarga natural . . . . .	274
3.4.4 Escorrentía . . . . .	274
3.4.5 Reservas hidráulicas . . . . .	275
3.4.6 Recursos hidráulicos y caudal seguro. . . . .	276
<i>Bibliografía</i> . . . . .	279

## Sección 6

### COMPONENTES PRIMARIOS DEL CICLO HIDROLÓGICO

<i>Símbolos</i> . . . . .	283
0.1 Introducción general . . . . .	284

#### Capítulo 6.1

##### Climatología aplicada de la hidrología

1.1 Introducción . . . . .	285
1.2 Radiación . . . . .	285
1.3 Temperatura . . . . .	285
1.4 Duración del día o insolación . . . . .	286
1.5 Presión . . . . .	286
humedad . . . . .	286
1.6.1 Tensión de vapor . . . . .	286
1.6.2 Humedad absoluta . . . . .	286
1.6.3 Déficit de saturación . . . . .	286
1.6.4 Humedad específica . . . . .	286
1.6.5 Humedad relativa . . . . .	286
1.6.6 Proporción de mezcla o relación de humedad . . . . .	286
1.6.7 Punto de rocío . . . . .	286
1.7 Viento . . . . .	287
1.8 Precipitación . . . . .	287
1.9 Medida de las variables meteorológicas . . . . .	287
1.10 Unidades . . . . .	287
1.11 Estaciones climatológicas e instrumentos de medida . . . . .	289
1.11.1 Medida de la radiación . . . . .	289
1.11.2 Medida de la temperatura . . . . .	289
1.11.3 Medida de la insolación . . . . .	290
1.11.4 Medida de la presión . . . . .	294
1.11.5 Medida de la humedad . . . . .	294
1.11.6 Medida de características del viento . . . . .	295
1.11.7 Medida de la lluvia. . . . .	295

1.11.8 Medida de otros tipos de precipitación . . . . .	298
1.12 Redes de observación . . . . .	298

## Capítulo 6.2

### Elaboración de datos climáticos

2.1 Introducción . . . . .	299
2.2 Reunión de información . . . . .	299
2.3 Series climáticas . . . . .	299
2.4 Análisis de datos de una variable meteorológica continua . . . . .	299
2.5 Análisis de datos de lluvia . . . . .	300
2.5.1 Módulo pluviométrico anual medio . . . . .	300
2.5.2 Lluvia media mensual . . . . .	301
2.5.3 Lluvia diaria. Curvas de altura de lluvia acumulada . . . . .	301
2.5.4 Yetograma . . . . .	301
2.5.5 Curvas de intensidad-duración . . . . .	301
2.5.6 Curvas de intensidad-duración-frecuencia . . . . .	302
2.6 Estimación de valores de las variables meteorológicas para una zona. . . . .	303
2.6.1 Lluvia media en una zona . . . . .	303
2.6.2 Intensidad media de lluvia en una zona . . . . .	304
2.7 Órdenes de magnitud de la lluvia . . . . .	305

## Capítulo 6.3

### El agua en el suelo

3.1 Introducción . . . . .	307
3.2 El suelo. Definición. Horizontes. . . . .	307
3.3 Material sólido y gaseoso del suelo. . . . .	308
3.3.1 Textura . . . . .	308
3.3.2 Estructura . . . . .	309
3.4 El agua en el suelo . . . . .	309
3.4.1 Agua retenida por fuerzas no capilares . . . . .	309
3.4.2 Agua retenida por fuerzas capilares . . . . .	309
3.4.3 Agua no retenida por el suelo . . . . .	310
3.5 Humedad del suelo, su medida . . . . .	310
3.5.1 Bloques porosos absorbentes. . . . .	310
3.5.2 Tensiómetros . . . . .	310
3.5.3 Métodos que relacionan conductividad eléctrica del suelo con su contenido de humedad . . . . .	310
3.5.4 Métodos geofísicos . . . . .	310
3.6 Contenido de humedad en el suelo. Parámetros característicos. . . . .	311
3.6.1 Grado de humedad . . . . .	311
3.6.2 Capacidad de campo . . . . .	311
3.6.3 Humedad equivalente . . . . .	311
3.6.4 Punto de marchitez permanente. . . . .	311
3.6.5 Agua utilizable por las plantas . . . . .	311

3.6.6 Grado de saturación . . . . .	312
3.6.7 Capacidad de retención específica . . . . .	312
3.7 Distribución vertical del agua en el suelo . . . . .	312
3.7.1 Zonas de humedad . . . . .	312
3.7.2 Estado de presiones del agua en el suelo . . . . .	313

## Capítulo 6.4

### Evaporación y transpiración

4.1 Introducción . . . . .	314
4.2 Evaporación . . . . .	314
4.2.1 Concepto . . . . .	314
4.2.2 Factores que afectan a la evaporación . . . . .	315
4.2.3 Unidades e instrumentos para medir la evaporación. . . . .	316
4.2.4 Métodos teóricos para cálculo de evaporación desde superficies de agua libre . . . . .	317
4.2.5 Fórmulas semi-empíricas para cálculo de evaporación desde superficies de agua libre . . . . .	319
4.2.6 Reducción de la evaporación. . . . .	320
4.2.7 Variaciones de la evaporación y órdenes de magnitud . . . . .	320
4.3 Transpiración . . . . .	321
4.3.1 Concepto . . . . .	321
4.3.2 Factores que afectan a la transpiración . . . . .	321
4.3.3 Medida de la transpiración . . . . .	322
4.3.4 Variaciones de la transpiración . . . . .	322

## Capítulo 6.5

### Evapotranspiración

5.1 Introducción . . . . .	323
5.2 Concepto de evapotranspiración. . . . .	323
5.3 Unidades y métodos para el cálculo de la evapotranspiración . . . . .	324
5.3.1 Métodos teóricos: balance de energía. . . . .	324
5.3.2 Métodos teóricos: perfiles de humedad y velocidad del viento . . . . .	325
5.3.3 Métodos teóricos: flujo turbulento de humedad . . . . .	327
5.3.4 Métodos semiempíricos: fórmula de Penman . . . . .	327
5.3.5 Medidas directas: evapotranspirómetro . . . . .	330
5.3.6 Medidas directas: lisímetros . . . . .	331
5.3.7 Medidas directas: parcelas y cuencas experimentales . . . . .	331
5.3.8 Medidas directas: perfiles de humedad del suelo . . . . .	331

5.3.9	Métodos empíricos: correlación entre medidas de evaporación en estanques y evapotranspiración . . . . .	332
5.3.10	Métodos empíricos: fórmula de Thornthwaite . . . . .	333
5.3.11	Métodos empíricos: fórmula de Blaney-Criddle . . . . .	335
5.3.12	Métodos empíricos: fórmula de Makink . . . . .	337
5.3.13	Métodos empíricos: fórmula de Turc. . . . .	337
5.4	Comentario a los métodos para cálculo de evapotranspiración . . . . .	338
5.5	Estimación de la evapotranspiración real a partir de valores de evapotranspiración potencial . . . . .	339
5.6	Fórmulas empíricas para cálculo de evapotranspiración real . . . . .	340
5.6.1	Fórmula de Turc. . . . .	341
5.7	Evapotranspiración y demanda de agua para riego . . . . .	341

## Capítulo 6.6

### Infiltración

6.1	Introducción . . . . .	342
6.2	Concepto de infiltración . . . . .	342
6.3	Factores que afectan a la infiltración . . . . .	343
6.3.1	Características del terreno o medio permeable . . . . .	343
6.3.2	Características del fluido que se infiltra . . . . .	344
6.4	Unidades y métodos para determinar la capacidad de infiltración . . . . .	344
6.4.1	Infiltrómetros . . . . .	344
6.4.2	Análisis de hidrogramas en cuencas pequeñas . . . . .	345
6.4.3	Lisímetros . . . . .	347
6.5	Índices de infiltración . . . . .	347
6.5.1	Índice $\Phi$ . . . . .	347
6.5.2	Índice W . . . . .	347
6.6	Volumen de agua infiltrada . . . . .	348
6.7	Órdenes de magnitud . . . . .	348

Bibliografía . . . . .	349
------------------------	-----

## Sección 7

### ELEMENTOS DE HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE

<i>Símbolos</i> . . . . .	353
0.1 Introducción . . . . .	354

## Capítulo 7.1

### Aforos en cursos de agua

1.1	Conocimiento del régimen de un río . . . . .	355
1.1.1	Semimódulos . . . . .	355
1.1.2	Métodos de ajuste de alturas caudales . . . . .	356
1.2	Medición de niveles-tiempos . . . . .	357
1.3	Escalas o limnímetros . . . . .	357
1.4	Limnigrafos . . . . .	357
1.4.1	El limnigrama . . . . .	357
1.4.2	Clases de limnigrafos . . . . .	358
1.5	Molinetes . . . . .	362
1.6	Práctica de aforos directos. . . . .	363
1.6.1	Aforos con molinete . . . . .	363
1.6.2	Aforos químicos . . . . .	364
1.6.3	Aforos con trazadores radioactivos . . . . .	368
1.6.4	Aforo con flotadores . . . . .	369
1.7	Emplazamiento de estaciones de aforos . . . . .	369
1.8	Clases de estaciones de aforos . . . . .	370
1.8.1	Estaciones de cauce natural . . . . .	370
1.8.2	Tramo canalizado con vertedero simple . . . . .	371
1.8.3	Tramo canalizado con vertederos múltiples . . . . .	372
1.8.4	Estaciones de resalto . . . . .	373
1.8.5	Utilización de centrales hidroeléctricas . . . . .	374
1.8.6	Observaciones finales . . . . .	374

## Capítulo 7.2

### Tratamientos de datos de aforo

2.1	Establecimiento de una red de aforos. . . . .	375
2.2	Presentación de datos . . . . .	376
2.3	Curva de caudales clasificados . . . . .	376
2.4	Distribución de frecuencia de las aportaciones . . . . .	380
2.5	Curvas de aportaciones mensuales . . . . .	381
2.6	Contraste de datos de aforo . . . . .	382
2.7	Métodos para completar datos inexistentes. . . . .	383

## Capítulo 7.3

### Análisis de hidrogramas

3.1	Componentes del yetograma . . . . .	385
3.2	La forma del hidrograma . . . . .	386
3.2.1	Influencia de la lluvia en la forma del hidrograma . . . . .	386
3.2.2	Hidrograma unitario . . . . .	388
3.2.3	Estimación de los principales elementos del hidrograma unitario cuando no se dispone de datos reales . . . . .	390
3.3	Separación de componentes de escorrentía de origen subterráneo . . . . .	392



3.3.1	Curva de agotamiento del hidrograma	392
3.3.2	Análisis de la curva de agotamiento.	394
3.4	Factores que afectan la forma del hidrograma . . . . .	396

## Capítulo 7.4

### Regulación

4.1	Conceptos generales . . . . .	399
4.2	Técnicas de generación de datos. . . . .	399
4.3	Utilización de la curva de aportaciones acumuladas. Garantía de suministro . . . . .	400
4.4	Utilización de la curva de desviaciones acumuladas . . . . .	401
4.5	Curva volumen de embalse-caudal regulado.	402
4.6	Método de Becerril . . . . .	403
4.7	Regulación de una cuenca para usos múltiples . . . . .	404
4.8	Criterios de valoración de soluciones . . . . .	405

## Capítulo 7.5

### Aplicaciones de los computadores electrónicos a la hidrología

5.1	Introducción . . . . .	406
5.2	Conceptos generales sobre el tratamiento de la información con ordenador. . . . .	406
5.2.1	Recepción de datos . . . . .	406
5.2.2	Almacenamiento en memoria . . . . .	407
5.2.3	Proceso de la información . . . . .	407
5.2.4	Transmisión de los resultados . . . . .	408
5.2.5	Sistemas operativos . . . . .	409
5.3	Aplicación de los ordenadores a la hidrología . . . . .	409
5.4	Aplicaciones a organización y control de datos hidrológicos . . . . .	409
5.4.1	Descripción . . . . .	409
5.4.2	Ejemplo de organización de datos. . . . .	410
5.5	Mecanización de métodos de cálculo generales . . . . .	411
5.6	Análisis de sistemas hidrológicos . . . . .	411
5.6.1	Concepto de sistema, métodos de análisis de sistemas . . . . .	412
5.6.2	Métodos de optimización directa . . . . .	413
5.6.3	Métodos de simulación. . . . .	421

## Apéndice 7.1

### Práctica de aforos con molinete y químicos

A.1.1	Aforo con molinete . . . . .	423
A.1.2	Aforo químico en régimen constante . . . . .	430
A.1.3	Aforo químico por el método de integración.	431

## Apéndice 7.2

### Modelo matemático de simulación para el estudio de la planificación hidráulica de la cuenca del río Llobregat

A.2.1	Introducción . . . . .	433
A.2.2	Objetivos . . . . .	433
A.2.3	Modo de operar . . . . .	434
A.2.4	Análisis de resultados . . . . .	436
A.2.5	Análisis del papel de los acuíferos subterráneos . . . . .	441

Bibliografía . . . . .	442
------------------------	-----

## Sección 8

### TEORÍA ELEMENTAL DEL FLUJO DEL AGUA EN LOS MEDIOS POROSOS

<i>Símbolos</i> . . . . .	445
0.1 Introducción general . . . . .	447
0.2 Breve nota histórica . . . . .	447
0.3 Agradecimientos . . . . .	448

## Capítulo 8.1

### Principios generales del movimiento del agua en medios porosos. Ley de Darcy

1.1	Introducción . . . . .	449
1.2	Porosidad . . . . .	449
1.3	Velocidad del agua en los medios porosos . . . . .	450
1.4	Estática y dinámica en los medios porosos. Gradiente hidráulico . . . . .	451
1.5	La ley de Darcy . . . . .	453
1.6	Ámbito de validez de la ley de Darcy . . . . .	453
1.7	Permeabilidad o conductividad hidráulica . . . . .	454
1.8	Dimensiones y unidades de los parámetros hidráulicos subterráneos . . . . .	456
1.9	Homogeneidad, heterogeneidad, isotropía y anisotropía . . . . .	457
1.10	Generalización de la ley de Darcy. . . . .	460
1.11	Tensiones efectivas y presión neutra . . . . .	460
1.12	Esfuerzos de circulación del agua subterránea . . . . .	461
1.13	Flujos subterráneos que no siguen la ley de Darcy . . . . .	462
1.14	El flujo subterráneo en medios permeables por fisuración . . . . .	462

## Capítulo 8.2

### Valores y determinación de la porosidad y de la permeabilidad

2.1	Introducción . . . . .	464
2.2	Aspectos teóricos de la porosidad . . . . .	464

2.3	Efecto de las arcillas y de la compactación en la porosidad. . . . .	465
2.4	Curvas granulométricas . . . . .	465
2.5	Valores de la porosidad de materiales naturales . . . . .	466
2.6	Determinación de la porosidad . . . . .	468
2.6.1	Determinación de la porosidad total. . . . .	468
2.6.2	Determinación de la porosidad eficaz en el laboratorio . . . . .	469
2.6.3	Determinación de la porosidad eficaz en el campo . . . . .	470
2.7	Valores de la permeabilidad de terrenos naturales . . . . .	471
2.8	Determinación de la permeabilidad. . . . .	473
2.8.1	Determinación de la permeabilidad en el campo. . . . .	473
2.8.2	Determinación de la permeabilidad en el laboratorio. Permeámetros. . . . .	474
2.8.3	Fórmulas de cálculo de la permeabilidad . . . . .	476
2.8.4	Utilización de gráficos . . . . .	479

### Capítulo 8.3

#### Ecuaciones diferenciales del flujo subterráneo

3.1	Introducción . . . . .	480
3.2	Potencial de fuerzas y potencial de velocidades . . . . .	480
3.3	Superficies equipotenciales, trayectorias y líneas de corriente. . . . .	481
3.4	Ecuación de la conservación de masa en régimen estacionario . . . . .	482
3.5	El coeficiente de almacenamiento específico en acuíferos elásticos . . . . .	484
3.6	Ecuación de la conservación de masa en régimen no estacionario. Coeficiente de almacenamiento del acuífero cautivo. . . . .	486
3.7	El coeficiente de almacenamiento en acuíferos libres . . . . .	488

### Capítulo 8.4

#### Resolución de las ecuaciones diferenciales del flujo y problemas asociados

4.1	Introducción . . . . .	489
4.2	Resolución de las ecuaciones diferenciales del flujo subterráneo . . . . .	489
4.3	Condiciones iniciales y condiciones de contorno . . . . .	492
4.4	Justificación de la existencia de la superficie de rezume o de goteo . . . . .	495
4.5	Tipos de enlace de la superficie libre con los límites físicos del medio . . . . .	496

4.6	Puntos singulares en los sistemas de flujo. . . . .	496
4.7	Transformación de la ecuación del flujo para acuíferos libres. Aproximaciones de Dupuit-Forchheimer . . . . .	497

### Capítulo 8.5

#### Propiedades y construcción de las redes de flujo

5.1	Introducción . . . . .	501
5.2	Leyes del flujo bidimensional. Función potencial y función de corriente . . . . .	501
5.3	Principios de construcción de las redes de flujo en medios homogéneos e isótropos . . . . .	503
5.4	Cálculo de los caudales en una red de flujo. . . . .	506
5.5	Cálculo de las presiones en una red de flujo. . . . .	508
5.6	Sistemas horizontales de superficie libre. . . . .	509
5.7	Redes de flujo en medios homogéneos anisótropos . . . . .	509
5.8	Redes de flujo en medios heterogéneos . . . . .	511
5.9	Redes de flujo en sistemas radiales. . . . .	512
5.10	Análisis del régimen variable con redes de flujo . . . . .	513
5.11	Introducción al método de relajación . . . . .	514

### Capítulo 8.6

#### Oscilaciones de los niveles piezométricos del agua subterránea y sus causas

6.1	Introducción . . . . .	516
6.2	Tipos de oscilaciones piezométricas del agua subterránea . . . . .	516
6.3	Oscilaciones rápidas de tipo periódico . . . . .	517
6.3.1	Oscilaciones debidas a los cambios de presión atmosférica. Eficiencia barométrica . . . . .	517
6.3.2	Oscilaciones debidas a los cambios de nivel de aguas superficiales. Eficiencia de las mareas . . . . .	519
6.3.3	Oscilaciones debidas a la evapotranspiración . . . . .	521
6.4	Oscilaciones rápidas no periódicas . . . . .	523
6.5	Variaciones del nivel piezométrico originadas por extracciones de agua subterránea . . . . .	525
6.6	Variaciones en la superficie del terreno a causa de bombeos en los acuíferos . . . . .	525
6.7	Oscilaciones de los niveles piezométricos debidas a las variaciones en la recarga por la precipitación. Efectos estacionales . . . . .	528
6.8	Oscilaciones de los niveles piezométricos en acuíferos recargados por un río . . . . .	531
6.9	Fluctuaciones de gran período y tendencia de los niveles piezométricos . . . . .	532

Capítulo 8.7

Superficies piezométricas

7.1	Introducción . . . . .	534
7.2	Determinación de los niveles piezométricos . . . . .	535
7.3	Trazado de las curvas isopiezas . . . . .	537
7.4	Tipos de superficies piezométricas . . . . .	539
7.5	Interpretación cualitativa de superficies piezométricas . . . . .	540
7.6	Ejemplos de superficies piezométricas. . . . .	545
7.7	Análisis cuantitativo de superficies piezométricas . . . . .	548
7.8	Método del balance para el cálculo de la recarga y de la porosidad eficaz. . . . .	550
7.9	Mapas derivados de las superficies piezométricas . . . . .	552

Capítulo 8.8

Capilaridad y flujo multifase

8.1	Introducción . . . . .	553
8.2	Tensión superficial . . . . .	553
8.3	Capilaridad . . . . .	554
8.4	Capilaridad en los medios porosos . . . . .	556
8.5	Velocidad de ascenso capilar . . . . .	557
8.6	Formas de agua en el suelo . . . . .	558
8.7	Introducción al flujo multifase . . . . .	559
8.8	Flujo simultáneo de dos fluidos inmiscibles. . . . .	559
8.9	Imbibición . . . . .	561
8.10	Desplazamiento de un fluido por otro inmiscible con él . . . . .	561
8.11	Efecto de los cambios de granulometría del medio . . . . .	563
8.12	Efecto de las diferencias de densidad . . . . .	563

Capítulo 8.9

Movimiento del agua en los medios porosos no saturados y teoría de la infiltración

9.1	Introducción . . . . .	565
9.2	Succión e histéresis . . . . .	565
9.3	Potencial en los medios no saturados . . . . .	567
9.4	Ley de Darcy y permeabilidad en los medios porosos no saturados . . . . .	568
9.5	Ecuación de la continuidad . . . . .	570
9.6	Valores de los parámetros que definen el flujo del agua en medios no saturados . . . . .	570
9.7	Consideraciones sobre el flujo en medios no saturados inertes y en medios no saturados activos. Efectos osmóticos . . . . .	571
9.8	Consideraciones sobre el flujo en fase vapor. . . . .	572
9.9	Teoría elemental de la infiltración . . . . .	573

Capítulo 8.10

Movimiento del agua en los medios permeables por fisuración

10.1	Introducción . . . . .	576
10.2	Comportamiento hidráulico de las rocas fracturadas . . . . .	576
10.3	Heterogeneidad y anisotropía en los medios fracturados . . . . .	578
10.4	Movimiento del agua en los terrenos fracturados . . . . .	579

Apéndice 8.1

Principios básicos sobre las ecuaciones diferenciales

A.1.1	Introducción y definiciones . . . . .	581
A.1.2	Interpretación geométrica elemental del origen de las ecuaciones diferenciales. . . . .	581
A.1.3	Principios de la resolución de las ecuaciones diferenciales . . . . .	582
A.1.4	Las condiciones en el origen y las condiciones de contorno . . . . .	583
A.1.5	Problemas de contorno con valores y funciones propias (autovalores y autofunciones). Notas sobre algunos de los métodos de resolución directa de ecuaciones diferenciales, de mayor interés en hidráulica subterránea. . . . .	584
A.1.6	Notas sobre algunos de los métodos de resolución indirecta de ecuaciones diferenciales, de más interés en hidráulica subterránea. . . . .	589
A.1.6.1	Métodos directos simples . . . . .	584
A.1.6.2	Métodos de separación de variables. . . . .	584
A.1.6.3	Métodos de las transformadas integrales lineales . . . . .	586
A.1.6.4	Transformadas de Laplace. . . . .	586
A.1.6.5	Transformadas finitas de Fourier . . . . .	588
A.1.7	Notas sobre algunos de los métodos de resolución indirecta de ecuaciones diferenciales, de más interés en hidráulica subterránea. . . . .	589
A.1.7.1	Método de superposición . . . . .	589
A.1.7.2	Método de las imágenes . . . . .	589
A.1.7.3	Método de las funciones de Green. . . . .	590
A.1.8	Métodos numéricos y gráficos de resolución. . . . .	591
A.1.9	La función delta de Dirac . . . . .	591

Apéndice 8.2

Principios de teoría vectorial de campos

A.2.1	Magnitudes escalares y vectoriales . . . . .	593
A.2.2	Representación analítica de vectores. Representación de Hamilton . . . . .	593
A.2.3	Operaciones con vectores . . . . .	593
A.2.4	Campos escalares y campos vectoriales . . . . .	594
A.2.5	Superficies equipotenciales . . . . .	594
A.2.6	Función potencial. Campos derivados de potencial . . . . .	594

A.2.7	Operador (Nabla). Operadores gradiente, divergencia, rotacional y laplaciana . . . . .	595
A.2.8	Los operadores diferenciales. Su invariancia. . . . .	596
A.2.9	Propiedades y significado físico del gradiente. Líneas de campo. . . . .	596
A.2.10	Integral de un vector a lo largo de una línea y de una superficie. Circulación y flujo . . . . .	597
A.2.11	Teoremas de Gauss-Ostrogradski y de Stokes. Propiedades y significado de la divergencia y del rotacional . . . . .	597
A.2.12	Tubos de flujo . . . . .	598
A.2.13	Trayectorias y líneas de corriente . . . . .	598
A.2.14	Expresión de los operadores Grad, div, rot y $\nabla^2$ en coordenadas cilíndricas y esféricas. . . . .	598

### Apéndice 8.3

#### Funciones de variable compleja y métodos de la teoría de funciones

A.3.1	Resumen de las propiedades de los números complejos . . . . .	600
A.3.2	Números complejos conjugados y funciones armónicas conjugadas . . . . .	601
A.3.3	La transformación conforme . . . . .	603
A.3.4	Formas simples de transformación conforme . . . . .	603
A.3.5	Transformación de la hodógrafa de velocidades . . . . .	604
A.3.6	Las funciones de Zhukovsky . . . . .	605
A.3.7	La transformación de Schwarz-Christoffel . . . . .	605
	<i>Bibliografía</i> . . . . .	606

## Sección 9

### HIDRÁULICA DE CAPTACIONES DE AGUA SUBTERRÁNEA

	<i>Símbolos</i> . . . . .	614
0.1	Objetivos del tema . . . . .	617
0.2	Introducción general . . . . .	617

#### Capítulo 9.1

##### Conceptos fundamentales de la hidráulica de captaciones de agua

1.1	Introducción . . . . .	619
1.2	Recapitulación de conceptos fundamentales. . . . .	619
1.3	Recapitulación de parámetros fundamentales de la hidráulica subterránea . . . . .	619
1.4	Captaciones de agua subterránea. Embudo de bombeo . . . . .	620

1.5	Magnitudes de uso frecuente en el estudio de una captación. Captaciones completas e incompletas . . . . .	620
1.6	Concepto de régimen permanente y régimen no permanente . . . . .	624
1.7	Efectos de la anisotropía y heterogeneidad de los acuíferos reales . . . . .	625
1.8	Concepto de caudal específico y eficiencia de un pozo . . . . .	626
1.9	Campos de bombeo . . . . .	627
1.10	Efectos de los límites de los acuíferos. . . . .	627
1.11	Ensayos de bombeo y puntos de observación. . . . .	627
1.12	Fórmulas básicas . . . . .	628

#### Capítulo 9.2

##### Formulaciones elementales de la hidráulica de pozos completos a caudal constante

2.1	Introducción e hipótesis de base. . . . .	630
2.2	Pozo en un acuífero cautivo. Régimen estacionario . . . . .	630
2.2.1	Pozo en el centro de una isla circular y en un acuífero infinito. . . . .	631
2.2.2	Casos en que el nivel es variable en el contorno . . . . .	632
2.2.3	Pozo excéntrico en una isla circular . . . . .	633
2.3	Pozo en un acuífero cautivo. Régimen no permanente . . . . .	634
2.4	Pozo en un acuífero semiconfinado. Régimen estacionario . . . . .	636
2.5	Pozo en un acuífero semiconfinado. Régimen no permanente . . . . .	639
2.6	Pozo en un acuífero libre sin recarga. Régimen permanente. . . . .	640
2.6.1	Formulación general. . . . .	640
2.6.2	Fórmulas para el cálculo de la altura de la superficie de rezume . . . . .	643
2.6.3	Corrección de Jacob . . . . .	644
2.7	Pozo en un acuífero libre sin recarga. Régimen no estacionario . . . . .	644
2.8	Pozo en un acuífero libre recargado uniformemente. Régimen estacionario . . . . .	645
2.9	Pozo en un acuífero semilibre. Régimen estacionario . . . . .	647

#### Capítulo 9.3

##### Aspectos prácticos de la teoría general de la hidráulica de pozos completos con caudal constante y en régimen estacionario

3.1	Introducción . . . . .	648
3.2	Pozo en un acuífero cautivo, en régimen permanente . . . . .	648
3.2.1	Cálculo de los descensos . . . . .	648
3.2.2	Cálculo de caudales y del caudal específico . . . . .	649

3.2.3 Influencia del radio del pozo en el caudal obtenido . . . . . 650

3.2.4 Estimación del caudal específico a partir de la transmisividad del acuífero . . . . . 651

3.2.5 Perfil de descensos . . . . . 652

3.2.6 Análisis de datos de ensayos de bombeo . . . . . 652

3.3 Pozo en acuífero semiconfinado en régimen permanente . . . . . 654

3.3.1 Cálculo de los descensos . . . . . 654

3.3.2 Cálculo de caudales y del caudal específico . . . . . 655

3.3.3 Perfil de descensos . . . . . 655

3.3.4 Análisis de los datos de bombeo. Método de coincidencia de curvas . . . . . 656

3.4 Pozos en acuíferos libres en régimen permanente . . . . . 658

3.4.1 Cálculo de los descensos . . . . . 658

3.4.2 Cálculo de caudales y del caudal específico . . . . . 660

3.4.3 Perfil de descensos de la superficie libre . . . . . 661

3.4.4 Análisis de datos de ensayos de bombeo . . . . . 662

Capítulo 9.4

Aspectos prácticos de la teoría general de la hidráulica de pozos completos con caudal constante y en régimen no estacionario

4.1 Introducción . . . . . 664

4.2 Pozo en acuífero cautivo en régimen no permanente. Método de Theis. . . . . 664

4.2.1 Cálculo de los descensos . . . . . 664

4.2.2 Cálculo de los caudales y del caudal específico . . . . . 665

4.2.3 Perfiles de descensos . . . . . 666

4.2.4 Curvas de descensos-tiempos . . . . . 666

4.2.5 Análisis de ensayos de bombeo . . . . . 667

4.3 Pozo en un acuífero cautivo en régimen no permanente. Aproximación logarítmica de Jacob . . . . . 670

4.3.1 Cálculo de los descensos . . . . . 670

4.3.2 Cálculo de los caudales y del caudal específico . . . . . 671

4.3.3 Perfiles de descensos . . . . . 671

4.3.4 Curvas de descensos-tiempos. . . . . 673

4.3.5 Análisis de ensayos de bombeo . . . . . 673

4.3.6 Empleo del método de Theis y de la aproximación logarítmica de Jacob . . . . . 675

4.3.7 Descenso medio en un período de tiempo . . . . . 675

4.4 Otros métodos de valoración de caudales específicos y ensayos de bombeo . . . . . 676

4.5 Pozo en un acuífero semiconfinado en régimen no permanente . . . . . 676

4.5.1 Método de coincidencia de Walton-Hantush . . . . . 676

4.5.2 Métodos logarítmicos . . . . . 679

4.6 Pozo en un acuífero libre en régimen no permanente . . . . . 681

Capítulo 9.5

Superposición de efectos e interferencia de pozos completos

5.1 La ley de superposición. . . . . 684

5.2 Cálculo de los descensos . . . . . 684

5.2.1 En un punto cualquiera . . . . . 684

5.2.2 En los pozos de bombeo . . . . . 685

5.2.3 Descensos en áreas de bombeo uniforme . . . . . 685

5.3 Superposición de efectos en acuíferos libres. . . . . 686

5.4 Cálculo de los caudales, conocidos los descensos en un campo de bombeo . . . . . 687

5.5 Consideraciones acerca de la distancia óptima entre pozos. . . . . 688

5.6 Par de pozos de bombeo de igual caudal. . . . . 689

5.7 Pozo de recarga y pozo de bombeo de igual caudal . . . . . 690

Capítulo 9.6

Recuperación de niveles después del cese del bombeo en un pozo

6.1 Introducción y formulación general. . . . . 691

6.2 Cálculo de las características de un acuífero cautivo a partir de los datos de recuperación . . . . . 692

6.3 Recuperación en acuíferos semiconfinados y libres . . . . . 694

6.4 Evolución de niveles en el campo de bombeo . . . . . 695

6.5 Anomalías en la recuperación . . . . . 695

Capítulo 9.7

Pozos en acuíferos limitados. Teoría de las imágenes

7.1 Introducción . . . . . 698

7.2 Principio físico de la teoría de las imágenes . . . . . 698

7.2.1 Acuífero con un borde rectilíneo impermeable . . . . . 698

7.2.2 Acuífero con un borde rectilíneo de recarga . . . . . 699

7.3 Pozo en las proximidades de un río . . . . . 699

7.3.1 Cálculo de caudales y descensos . . . . . 699

7.3.2 Curvas de descensos, tiempos y perfiles de descensos . . . . . 702

7.3.3	Ensayos de bombeo . . . . .	704	9.5.4	Notas sobre los efectos de los pozos incompletos en las curvas de descensos-tiempos . . . . .	761
7.4	Pozo en las proximidades de un borde impermeable . . . . .	704	9.6	Valoración de ensayos de bombeo con pozos incompletos . . . . .	763
7.4.1	Cálculo de caudales y descensos . . . . .	704	9.6.1	Régimen permanente. Perfiles de descensos-distancia . . . . .	763
7.4.2	Curvas de descensos-tiempos y perfiles de descensos . . . . .	705	9.6.2	Régimen variable. Curvas de descensos-tiempos . . . . .	763
7.4.3	Ensayos de bombeo . . . . .	706	9.6.3	Recuperación en los pozos incompletos . . . . .	765
7.5	Presencia de barreras en caso de acuífero semiconfinado . . . . .	707			
7.6	Presencia de varias barreras . . . . .	707			
7.7	Barreras reales . . . . .	716			
7.8	Distancias a los límites en acuíferos cautivos . . . . .	716			
7.8.1	Un solo límite . . . . .	716			
7.8.2	Varias barreras . . . . .	719			
7.9	Localización del pozo imagen. . . . .	719			
7.10	Líneas de recarga de longitud finita y semi-infinita . . . . .	720			
7.11	Volumen de agua tomada de un río por recarga inducida . . . . .	721			
7.12	Influencia de los límites en los ensayos de recuperación . . . . .	724			
7.12.1	Límite de recarga . . . . .	724			
7.13	Pozo en el centro de un recinto circular con límites impermeables . . . . .	726			
<b>Capítulo 9.8</b>			<b>Capítulo 9.10</b>		
<b>Efectos de drenaje diferido y problemas asociados a los acuíferos libres</b>			<b>Acuíferos semiconfinados. Casos complejos</b>		
8.1	Introducción . . . . .	728	10.1	Consideraciones generales . . . . .	767
8.2	Efectos del drenaje diferido en acuíferos libres . . . . .	728	10.2	Pozo en un acuífero semiconfinado por dos acuitardos en régimen permanente . . . . .	767
8.3	Efecto del descenso de la superficie freática. . . . .	735	10.3	Pozo en un acuífero semiconfinado debajo de dos acuíferos en régimen permanente . . . . .	770
8.4	Tendencias modernas respecto al drenaje diferido . . . . .	740	10.4	Sistema de dos acuíferos separados por un acuitardo, con un pozo que penetra uno de los acuíferos. Régimen variable . . . . .	770
<b>Capítulo 9.9</b>			10.5	Acuífero entre un estrato impermeable y un acuitardo a su vez limitado por otro estrato impermeable. Régimen variable . . . . .	774
<b>Pozos incompletos</b>			10.6	Efectos en los niveles en acuíferos separados del de bombeo . . . . .	775
9.1	Introducción . . . . .	741	<b>Capítulo 9.11</b>		
9.2	Pozos incompletos en régimen permanente . . . . .	742	<b>Pozos en acuíferos reales</b>		
9.2.1	Descenso en el pozo . . . . .	743	11.1	Introducción . . . . .	776
9.2.2	Cálculo del caudal . . . . .	748	11.2	Pozos en acuíferos anisótropos . . . . .	776
9.2.3	Descensos en piezómetros. . . . .	749	11.2.1	Anisotropía en un plano vertical . . . . .	776
9.3	Efectos de la estratificación en pozos incompletos . . . . .	751	11.2.2	Anisotropía en un plano horizontal. . . . .	778
9.4	Pozos asimilables a un sumidero puntual . . . . .	754	11.3	Pozos en acuíferos estratificados . . . . .	779
9.5	Pozos incompletos en régimen no permanente . . . . .	755	11.3.1	Régimen permanente . . . . .	779
9.5.1	Formulaciones generales . . . . .	755	11.3.2	Régimen variable . . . . .	781
9.5.2	Descenso en el pozo y caudal de bombeo . . . . .	759	11.4	Acuíferos heterogéneos . . . . .	783
9.5.3	Descenso en puntos de observación . . . . .	761	11.5	Efectos de la existencia de heterogeneidades en los niveles semiconfinantes . . . . .	785
			11.6	Acuíferos de espesor variable. . . . .	785
			11.7	Pozo en un acuífero inclinado con superficie piezométrica horizontal . . . . .	786
			11.8	Efectos de cambios en las propiedades del acuífero en las inmediaciones del pozo . . . . .	787
			11.9	Acuíferos cautivos que pasan a libres. . . . .	788
			11.10	Cambios de las propiedades del medio permeable . . . . .	789
<b>Capítulo 9.12</b>			<b>Capítulo 9.12</b>		
<b>Pozos en acuíferos con flujo natural</b>			<b>Pozos en acuíferos con flujo natural</b>		
			12.1	Introducción . . . . .	791
			12.2	Acuífero cautivo en régimen permanente. . . . .	791

12.3	Acuífero cautivo de espesor constante en régimen variable . . . . .	792	15.9	Gráficos de descenso específico-tiempo . . . . .	845
12.4	Acuífero libre en régimen permanente . . . . .	793	15.10	Efecto del relleno en los pozos . . . . .	845
12.5	Régimen no permanente . . . . .	794			
12.6	Pozo de recarga y pozo de bombeo en un acuífero con flujo natural . . . . .	797			
<b>Capítulo 9.13</b>			<b>Capítulo 9.16</b>		
<b>Bombeos en pozos de gran diámetro</b>			<b>Captaciones de agua horizontales.</b>		
13.1	Consideraciones generales . . . . .	799	<b>Drenes y galerías. Régimen estacionario</b>		
13.2	Bombeo en un pozo de gran diámetro construido en un material muy poco permeable. . . . .	799	16.1	Introducción . . . . .	846
13.3	Bombeo en un pozo de gran diámetro construido en un material permeable . . . . .	800	16.2	Líneas de drenaje totalmente penetrantes de gran longitud, con extracción de un caudal constante en régimen estacionario . . . . .	847
13.4	Influencia en la recuperación. . . . .	803	16.2.1	Acuífero cautivo y régimen estacionario . . . . .	847
<b>Capítulo 9.14</b>			16.2.2	Acuífero libre . . . . .	848
<b>Bombeos a caudal variable y discontinuo</b>			16.2.3	Acuífero semiconfinado . . . . .	849
14.1	Introducción . . . . .	805	16.2.4	Régimen estacionario con recarga uniforme. Acuífero entre dos ríos . . . . .	850
14.2	Bombeos a caudal variable. Cálculo de descensos . . . . .	805	16.2.5	Presencia de límites en el acuífero. . . . .	853
14.3	Aplicación a ensayos de bombeo en acuífero cautivo . . . . .	809	16.3	Líneas de drenaje parcialmente penetrantes y de gran longitud, con extracción de un caudal constante en régimen estacionario . . . . .	853
14.4	Caudal variable por descenso de nivel en el pozo . . . . .	812	16.4	Dren horizontal de gran longitud y pequeño diámetro . . . . .	854
14.5	Ensayos de recuperación en pozos bombeados a caudal variable . . . . .	813	16.5	Drenes en acuíferos con flujo natural . . . . .	857
14.6	Extracción o introducción instantánea de agua en un pozo. Cuchareo . . . . .	815	16.6	Líneas de drenaje totalmente penetrantes de longitud finita . . . . .	859
14.7	Bombeos intermitentes. Bombeos cíclicos. . . . .	818	<b>Capítulo 9.17</b>		
14.8	Pozos con bombeo a descenso constante. Pozos surgentes. . . . .	822	<b>Captaciones de agua horizontales en régimen no permanente</b>		
<b>Capítulo 9.15</b>			17.1	Introducción . . . . .	861
<b>Pozos reales. Eficiencia de un pozo y curvas características</b>			17.2	Líneas de drenaje de gran longitud con extracción de un caudal constante y en régimen no estacionario . . . . .	861
15.1	Introducción . . . . .	825	17.3	Líneas de drenaje de gran longitud a descenso constante. . . . .	863
15.2	Origen del descenso observado en los pozos de bombeo . . . . .	825	17.4	Régimen dinámico del agua subterránea entre dos zanjas paralelas . . . . .	865
15.3	Análisis del descenso en los pozos . . . . .	826	17.5	Problemas relacionados con acuíferos libres. . . . .	870
15.3.1	Fórmula básica . . . . .	826	17.6	Fluctuaciones periódicas de nivel en líneas de drenaje de gran longitud . . . . .	873
15.3.2	Realización de los ensayos . . . . .	827	17.7	Caudales y régimen de base de ríos y fuentes . . . . .	874
15.3.3	Valoración de los resultados . . . . .	829	<b>Capítulo 9.18</b>		
15.3.4	Discusión de la ecuación de descenso . . . . .	834	<b>Captaciones de drenes radiales y líneas de pozos puntuales</b>		
15.4	Eficiencia de un pozo . . . . .	838	18.1	Introducción . . . . .	876
15.5	Curvas características . . . . .	839	18.2	Caudales y descensos en un sistema de zanjas radiales en régimen estacionario. . . . .	877
15.6	Curvas características en ausencia de pérdidas en el pozo . . . . .	839	18.3	Pozos de drenes radiales . . . . .	878
15.7	Curvas características en pozos reales . . . . .	840	18.4	Líneas de pozos . . . . .	880
15.8	Anomalías en las curvas características . . . . .	842			

## Capítulo 9.19

**Introducción a la hidráulica de captaciones en medios fracturados y al análisis estadístico de datos de caudales de pozos**

19.1	Introducción . . . . .	882
19.2	Relación entre el acuífero fracturado y el pozo . . . . .	882
19.3	Productividad de los pozos en rocas fracturadas . . . . .	889
19.4	Validez de los ensayos de bombeo en pozos en rocas fracturadas . . . . .	891
19.5	Efectos de capacidad en las grietas grandes. . . . .	893
19.6	Efectos hidráulicos del desarrollo por acidificación en los terrenos calcáreos . . . . .	893
19.7	Análisis estadístico de datos de caudales de pozos . . . . .	894
19.8	Profundidad óptima de los pozos en rocas fracturadas y variación de la permeabilidad en profundidad . . . . .	900

## Capítulo 9.20

**Preparación y ejecución de ensayos de bombeo**

20.1	Introducción . . . . .	903
20.2	Tipos de ensayos de bombeo y de aforos de pozos . . . . .	903
20.3	Selección del lugar del ensayo del bombeo . . . . .	904
20.4	Conocimiento geológico del área afectada por el bombeo . . . . .	905
20.5	Características del pozo de bombeo. . . . .	906
20.6	Piezómetros y pozos de observación . . . . .	906
20.7	Selección de la maquinaria y del caudal de bombeo . . . . .	907
20.8	Medida y ajuste del caudal de bombeo . . . . .	909
20.9	Vertido del agua extraída . . . . .	910
20.10	Medida de los niveles piezométricos . . . . .	910
20.11	Duración de los ensayos . . . . .	911
20.12	Plan del bombeo y de las mediciones . . . . .	912
20.13	Partes de bombeo. . . . .	913
20.14	Observaciones previas . . . . .	914
20.15	Consideraciones generales . . . . .	914

## Capítulo 9.21

**Valoración de ensayos de bombeo en pozos a caudal constante**

21.1	Introducción . . . . .	916
21.2	Corrección de los datos de descensos . . . . .	916
21.2.1	Correcciones por influencias externas . . . . .	916
21.2.2	Correcciones por influencias internas . . . . .	917
21.3	Variaciones en el acuífero capaces de producir anomalías en los ensayos de bombeo. . . . .	918
21.4	Fiabilidad de los valores de los descensos. . . . .	919

21.5	Representación gráfica de los resultados . . . . .	920
21.6	Valoración de los ensayos de bombeo . . . . .	921
21.6.1	Principios generales . . . . .	921
21.6.2	Valoración de datos en régimen estacionario . . . . .	921
21.6.3	Valoración de los descensos obtenidos en un punto de observación (régimen no estacionario) . . . . .	923
21.6.4	Valoración de los descensos en función del tiempo y de la distancia. . . . .	927
21.6.5	Valoración de los ensayos de recuperación . . . . .	929
21.6.6	Comentarios a la valoración de los datos de descensos medidos en el pozo de bombeo . . . . .	929
21.6.7	Comentarios a las mediciones en puntos de observación en acuíferos superpuestos y en el propio acuífero. . . . .	930
21.7	Reproductividad de los ensayos de bombeo. . . . .	930
21.8	Análisis de ensayos de bombeo con calculadoras . . . . .	930

## Apéndice 9.1

**Funciones matemáticas sencillas de uso frecuente en hidráulica de captaciones de agua**

A.1.1	Introducción . . . . .	931
A.1.2	Funciones de error . . . . .	931
A.1.3	Funciones de Bessel . . . . .	931
A.1.4	Función de pozo para acuífero confinado. . . . .	933
A.1.5	Función de pozo para acuífero semiconfinado . . . . .	935
A.1.6	Función Gamma . . . . .	935
A.1.7	Función M . . . . .	936

## Apéndice 9.2

**Tablas de las funciones de uso más frecuente en la hidráulica de captaciones de agua**

## Apéndice 9.3

**Métodos especiales de análisis de datos de ensayos de bombeo en pozos completos**

A.3.1	Método de la tangente o de Chow. . . . .	954
A.3.2	Cálculo de la transmisividad conociendo el caudal específico o el descenso en un momento dado de un bombeo a caudal constante (método de Ogden) . . . . .	956
A.3.3	Método del cociente . . . . .	958
A.3.4	Método semilogarítmico de análisis de ensayos de bombeo en acuíferos semiconfinados en régimen no permanente (método de Hantush) . . . . .	960



A.3.5 Método de superposición para el análisis de ensayos de bombeo en acuíferos semiconfinados en régimen no permanente (método de Hantush) . . . . .	962
--	-----

#### Apéndice 9.4

#### **Demostración de la validez de la fórmula de Dupuit para el cálculo de los caudales**

#### Apéndice 9.5

#### **Método gráfico para analizar los datos de ensayos de bombeo escalonados**

#### Apéndice 9.6

#### **Determinación de la permeabilidad mediante ensayos en sondeos de pequeño diámetro y catas en el terreno**

A.6.1 Generalidades . . . . .	969
A.6.2 Ensayos Lefranc . . . . .	969
A.6.3 Ensayos Lugeon . . . . .	970
A.6.4 Método de Gilg-Gavard . . . . .	971
A.6.5 Ensayos del United States Bureau of Reclamation y otros . . . . .	972
A.6.6 Ensayos varios . . . . .	974
A.6.7 Ensayos de producción . . . . .	977
A.6.8 Comentarios acerca de los ensayos de permeabilidad piezométricos . . . . .	980

#### Apéndice 9.7

#### **Determinación de la porosidad de un ensayo de bombeo**

#### Apéndice 9.8

#### **Consideraciones sobre la respuesta de los piezómetros**

#### Apéndice 9.9

#### **Sistemas de medición del nivel piezométrico en los sondeos y captaciones de agua**

A.9.1 Introducción . . . . .	988
A.9.2 Casos que pueden presentarse . . . . .	988
A.9.3 Sistemas de medición . . . . .	989
A.9.3.1 Sistemas manuales eléctricos . . . . .	989
A.9.3.2 Sistemas manuales acústicos . . . . .	990
A.9.3.3 Sistemas manuales manométricos de presión (línea de aire) . . . . .	991
A.9.3.4 Sistemas manuales de flotador o por pérdida de tensión . . . . .	992
A.9.3.5 Otros sistemas manuales . . . . .	993
A.9.3.6 Sistemas automáticos no inscriptores o limnímetros . . . . .	993
A.9.3.7 Sistemas automáticos inscriptores o limnógrafos . . . . .	994

<i>Bibliografía</i> . . . . .	995
-------------------------------	-----

## **Sección 10 HIDROGEOQUÍMICA**

<i>Símbolos</i> . . . . .	1005
0.1 Introducción general . . . . .	1007
0.2 Breve bosquejo histórico . . . . .	1007

### Capítulo 10.1

#### **Aporte de sales y fenómenos modificadores**

1.1 Introducción . . . . .	1008
1.2 Sales solubles que pueden ser aportadas por los diferentes tipos de rocas . . . . .	1008
1.2.1 Rocas ígneas y ataque de los silicatos . . . . .	1008
1.2.2 Rocas metamórficas . . . . .	1009
1.2.3 Rocas sedimentarias . . . . .	1010
1.3 Origen y propiedades geoquímicas de las sustancias disueltas en las aguas subterráneas . . . . .	1010
1.3.1 Aniones . . . . .	1011
1.3.2 Cationes . . . . .	1012
1.3.3 Gases disueltos . . . . .	1012
1.4 Los fenómenos modificadores . . . . .	1012
1.4.1 Reducción de sulfatos y de hierro . . . . .	1013
1.4.2 Intercambio iónico . . . . .	1013
1.4.3 Fenómenos de oxidación-reducción . . . . .	1015
1.4.4 Concentraciones y precipitaciones . . . . .	1015
1.4.5 Efecto combinado de los efectos modificadores . . . . .	1016
1.4.6 Hidrogeoquímica en rocas carbonatadas . . . . .	1016
1.5 Efectos de los fenómenos químicos en las permeabilidades . . . . .	1018

### Capítulo 10.2

#### **Evolución geoquímica de las aguas en los acuíferos**

2.1 Introducción . . . . .	1019
2.2 La adquisición de sales durante la infiltración . . . . .	1019
2.2.1 Concentración del agua de lluvia . . . . .	1019
2.2.2 Incremento de salinidad . . . . .	1020
2.3 El agua freática en las zonas de regadío . . . . .	1021
2.4 El movimiento del agua subterránea y su composición química . . . . .	1022
2.5 Evolución de la composición química de un agua de circulación regional . . . . .	1023
2.6 Acción de los fenómenos modificadores en zonas costeras . . . . .	1024
2.7 Interés de algunas relaciones entre iones disueltos. Índices hidrogeoquímicos . . . . .	1024
2.8 Relaciones entre geología, litología y composición de las aguas subterráneas . . . . .	1027

2.8.1	Relaciones litología-composición de las aguas subterráneas . . . . .	1027
2.8.2	Relaciones geología-geomorfología-composición de las aguas subterráneas. Tiempo de permanencia . . . . .	1027
2.8.3	Variaciones laterales y verticales de la composición química del agua. Estratificación hidroquímica . . . . .	1027
2.8.4	Estudio en laboratorio de las relaciones roca-agua . . . . .	1029
2.8.5	Interés y significado de los elementos menores y de los elementos traza . . . . .	1030
2.9	Variaciones temporales en la composición del agua subterránea. . . . .	1031
2.10	Clasificación de las aguas subterráneas por su origen y tiempo de contacto con el acuífero. Origen de las salmueras naturales . . . . .	1032
2.11	Determinación de parámetros hidrológicos a partir de datos químicos . . . . .	1034
2.11.1	Notas generales . . . . .	1034
2.11.2	Determinación de la infiltración por balance de cloruros . . . . .	1034
2.11.3	Separación de la componente subterránea en el análisis de hidrogramas. . . . .	1035
2.11.4	Determinación del caudal de fuentes salinas sumergidas . . . . .	1036
2.11.5	Estudio de mezclas de aguas . . . . .	1036
2.11.6	Balances químicos . . . . .	1036

### Capítulo 10.3

#### Técnicas de estudio

3.1	Introducción . . . . .	1037
3.2	Representación gráfica de las características químicas y su utilidad . . . . .	1037
3.3	Diagramas hidroquímicos . . . . .	1037
3.3.1	Diagramas columnares. Diagramas de Collins . . . . .	1037
3.3.2	Diagramas triangulares. Diagrama de Piper . . . . .	1038
3.3.3	Diagramas circulares . . . . .	1041
3.3.4	Diagramas poligonales y radiantes. Diagrama de Stiff modificado . . . . .	1041
3.3.5	Diagramas de columnas verticales. Diagrama de columnas verticales logarítmicas de Schoeller-Berkaloff . . . . .	1042
3.3.6	Diagramas bidimensionales de dispersión . . . . .	1044
3.4	Diagramas de frecuencias . . . . .	1045
3.5	Análisis químicos representados en función de variables no químicas . . . . .	1046
3.5.1	Hidrogramas . . . . .	1046
3.5.2	Curvas de relación de calidad química con otras variables hidrológicas . . . . .	1046
3.5.3	Perfiles geoquímicos . . . . .	1046

3.6	Mapas hidrogeoquímicos . . . . .	1046
3.7	Empleo de los diagramas y gráficos . . . . .	1047
3.8	Clasificación de las aguas . . . . .	1058
3.8.1	Objeto . . . . .	1058
3.8.2	Clasificaciones simples . . . . .	1058
3.8.3	Clasificaciones geoquímicas . . . . .	1059
3.9	Clasificación mediante diagramas y planos . . . . .	1063

### Capítulo 10.4

#### Temperatura del agua.

#### Aguas minerales y aguas termales

4.1	Introducción . . . . .	1064
4.2	Aguas minerales en general y sus tipos . . . . .	1064
4.3	Notas históricas sobre las aguas minerales y termominerales . . . . .	1065
4.4	Efectos medicinales . . . . .	1065
4.5	La temperatura de las aguas subterráneas . . . . .	1066
4.5.1	Origen . . . . .	1066
4.5.2	Fluctuaciones en la temperatura del agua . . . . .	1066
4.5.3	Aporte de calor interno. Gradiente geotérmico . . . . .	1069
4.6	Relación entre el gradiente geotérmico y la temperatura del agua subterránea . . . . .	1069
4.7	Áreas geotérmicas y sistemas geotérmicos e hidrotermales . . . . .	1071
4.8	Geoquímica de las áreas geotérmicas e hidrotermales . . . . .	1073
4.9	Indicadores geoquímicos de la temperatura profunda . . . . .	1074
4.10	Formaciones asociadas a las aguas minerales y termominerales . . . . .	1075
4.11	Composición de las aguas minerales y origen de las sales disueltas . . . . .	1075

### Apéndice 10.1

#### Datos geoquímicos

A.1.1	Composición de las rocas de la corteza terrestre . . . . .	1078
A.1.2	Composición del agua del mar . . . . .	1078
A.1.3	El agua de lluvia . . . . .	1078
A.1.4	Aporte de sales por el polvo atmosférico . . . . .	1082
A.1.5	Los ciclos geoquímicos . . . . .	1082

### Apéndice 10.2

#### Flujo térmico en los acuíferos

A.2.1	Planteamiento de la ecuación de la continuidad en un medio permeable con agua en movimiento y sometida al gradiente geotérmico . . . . .	1084
A.2.2	Acuífero horizontal con flujo constante y temperatura uniforme en su sección y en régimen permanente. . . . .	1085

A.2.3	Acuífero inclinado con flujo constante, temperatura uniforme en su sección y en régimen permanente . . . . .	1086
-------	--	------

### Apéndice 10.3

#### Energía geotérmica

A.3.1	Prospección y exploración de sistemas geotérmicos . . . . .	1088
A.3.2	Producción de energía geotérmica . . . . .	1089
A.3.2.1	Situación actual y costes . . . . .	1089
A.3.2.2	Aspectos técnicos . . . . .	1090
A.3.2.3	Sistemas de producción de energía . . . . .	1091
A.3.3	Otros usos de la energía geotérmica . . . . .	1091
A.3.4	Obtención de productos químicos . . . . .	1091
	<i>Bibliografía</i> . . . . .	1091

## Sección 11

### RELACIÓN ENTRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LAS AGUAS SUPERFICIALES

<i>Símbolos</i> . . . . .	1099
---------------------------	------

#### Capítulo 11.1

##### Los manantiales

1.1	Introducción . . . . .	1101
1.2	Clasificación de los manantiales . . . . .	1101
1.2.1	Criterios de clasificación . . . . .	1101
1.2.2	Tipos representativos de manantiales . . . . .	1102
1.3	Causas de la fluctuación del caudal de los manantiales . . . . .	1105
1.4	Expresiones matemáticas del caudal de descarga de un acuífero en régimen no influenciado . . . . .	1106
1.4.1	Generalidades . . . . .	1106
1.4.2	Acuífero libre con desagüe a nivel variable . . . . .	1107
1.4.3	Acuífero cautivo o acuífero libre, de espesor considerable y desagüe a nivel constante . . . . .	1109
1.4.4	Relaciones entre el volumen de agua de un embalse subterráneo y su caudal de descarga . . . . .	1112
1.4.5	Hidrogramas compuestos correspondientes a la descarga conjunta de varios embalses subterráneos . . . . .	1114
1.5	Expresiones matemáticas del caudal de descarga de un acuífero en régimen influenciado . . . . .	1115
1.5.1	Ecuación general . . . . .	1115
1.5.2	Aplicación a acuífero libre con simetría paralela . . . . .	1115

#### Capítulo 11.2

##### Relaciones entre las escorrentías superficial y subterránea

2.1	Introducción . . . . .	1120
2.1.1	Generalidades . . . . .	1120
2.1.2	Definiciones y conceptos básicos . . . . .	1120
2.2	Tipos de conexión hidráulica entre los ríos y los acuíferos de su cuenca . . . . .	1121
2.3	Influencia de las características geológicas de la cuenca en el régimen de un río . . . . .	1122
2.4	El almacenamiento de agua en las riberas . . . . .	1124
2.5	Estimación del componente subterráneo en la escorrentía total de una tormenta . . . . .	1129
2.5.1	Métodos basados en la descomposición del hidrograma . . . . .	1129
2.5.2	Métodos basados en el estudio de la composición química de las aguas . . . . .	1131
2.6	Relación entre la escorrentía subterránea y los niveles piezométricos de la cuenca . . . . .	1132
2.7	Métodos de estimación de la escorrentía subterránea anual . . . . .	1134
2.7.1	Separación de los componentes en el hidrograma . . . . .	1134
2.7.2	Análisis de la duración de caudales . . . . .	1138
2.7.3	Métodos geohidrometeorológicos . . . . .	1138
2.8	Interés práctico de la determinación de la escorrentía subterránea . . . . .	1139

#### Capítulo 11.3

##### Modificaciones introducidas por la acción del hombre en las relaciones aguas superficiales-aguas subterráneas

3.1	Introducción . . . . .	1140
3.2	Influencia de las obras hidráulicas en el régimen de las aguas subterráneas . . . . .	1140
3.2.1	Modificaciones debidas a cambios en el régimen de los caudales del río . . . . .	1141
3.2.2	Modificaciones debidas a cambios en el nivel de ríos y lagos . . . . .	1141
3.3	Influencia de los bombeos o recargas en el régimen de ríos y manantiales . . . . .	1143
3.3.1	Consideraciones generales . . . . .	1143
3.3.2	Variación del caudal del río debida a la recarga o descarga inducida mediante pozos en los sistemas acuífero-río . . . . .	1144
3.3.3	Variaciones del caudal de un manantial debidas a los bombeos . . . . .	1151
3.3.4	Problemas debidos a los excedentes de riego . . . . .	1152

<i>Bibliografía</i> . . . . .	1154
-------------------------------	------