2 EDICIÓN



CALIDAD DEL AGUA
PARA ESTUDIANTES
DE CIENCIAS AMBIENTALES

SIL
SISTEMA DE INFORMACIÓN EN LÍNEA
COMPLEMENTO VIRTUAL

ECOE EDICIONES

Jorge Alonso Cárdenas León

CALIDAD DEL AGUA PARA ESTUDIANTES DE CIENCIAS AMBIENTALES

Jorge Alonso Cárdenas León

SEGUNDA EDICIÓN

Catalogación en la publicación - Biblioteca Nacional de Colombia

Cárdenas León, Jorge Alonso
Calidad del agua para estudiantes de ciencias ambientales / Jorge Alonso Cárdenas León. -- 2a ed. -- Bogotá : Ecoe Ediciones, 2022.
387 p. – (Ingeniería y afines. Ingeniería y afines)

Contiene datos curriculares del autor. -- Contiene referencias bibliográficas.

ISBN 978-958-503-272-9 -- 978-958-503-273-6 (e-book)

1. Calidad del agua 2. Utilización del agua 3. Gestión integrada de recursos hídricos I. Título II. Serie

CDD: 363.61 ed. 23 CO-BoBN– a1089320



Área: *Ingeniería y afines*
Subárea: *Ingenieía ambiental*

ECOE
EDICIONES

© Jorge Alonso Cárdenas León

© Ecoe Ediciones S.A.S.
info@ecoeediciones.com
www.ecoeediciones.com
Carrera 19 # 63C 32, Tel.: 919 80 02
Bogotá, Colombia

Segunda edición: Bogotá, marzo del 2022

ISBN: 978-958-503-272-9
e-ISBN: 978-958-503-273-6

Directora editorial: Claudia Garay Castro
Coordinadora editorial: Paula Bermúdez B.
Corrección de estilo: Oscar Andrés Díaz Vásquez
Diagramación: Paula Andrea Cubillos Gómez
Carátula: Wilson Marulanda
Impresión: Carvajal Soluciones de Comunicación S.A.S.
Carrera 69 #15-24

Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Impreso y hecho en Colombia - Todos los derechos reservados

DEDICATORIA

A mis hijos Nadia, Sebastián y Emmanuel,
en cuyos ojos veo a Dios.

Y a la memoria de mi esposa, Niny Johanna.

CONTENIDO

PREFACIO xxix

Introducción xxxi

Capítulo 1. El agua en la naturaleza 1
1.1 Distribución del agua en la naturaleza 2
1.2 El ciclo hidrológico y la calidad del agua 4
1.2.1 Precipitación 5
1.2.2 Escorrentía 5
1.2.3 Infiltración 6
1.2.4 Transpiración 6
1.2.5 Evaporación 7
1.3 Propiedades fisicoquímicas del agua 7
1.3.1 Capacidad calorífica 9
1.3.2 Tensión superficial 11
1.3.3 Ósmosis 12
1.4 Isotopía en el ciclo hidrológico 13
1.4.1 Isótopos 13
1.4.2 Isótopos ambientales 14

1.4.3 Expresión de la proporción de isótopos en la naturaleza 15
1.4.4 Fraccionamiento isotópico en el ciclo hidrológico 16
Referencias y lecturas sugeridas 19

Capítulo 2. Monitoreo de calidad del agua 21
2.1 Redes de monitoreo de calidad del agua 22
2.1.1 Diseño de redes de monitoreo de calidad del agua 23
2.2 Operatividad de una red de calidad del agua 26
2.2.1 Muestreo 26
2.2.2 Tipos de muestras 26
2.2.3 Sugerencias de muestreo 29
2.2.4 Selección de los sitios de muestreo 31
2.2.5 Ubicación de nuevos sitios de muestreo 32
2.3 Uso de libretas campo y carpetas del sitio 32
2.4 Equipos de muestreo en calidad del agua 33
2.5 Ejercicios y temas de reflexión 38
Referencias y lecturas sugeridas 39

Capítulo 3. Análisis organoléptico 41
3.1 Olor 43
3.2 Color 45
3.3 Turbidez y transparencia 47
3.3.1 Turbidez 47
3.3.2 Transparencia 48
3.4 Aspecto o apariencia 48
3.5 Interferencias y limitaciones 50
3.6 Consideraciones académicas 50
3.7 Ejercicios propuestos 52
Referencias y lecturas sugeridas 53

Capítulo 4. Serie de sólidos 55
4.1 Definición 55
4.2 Tipos de sólidos 56
4.2.1 Sólidos sedimentables 57
4.2.2 Sólidos totales 58
4.2.3 Sólidos disueltos 59
4.2.4 Sólidos suspendidos 60
4.2.5 Sólidos fijos y sólidos volátiles 61
4.3 Procedimiento 62
4.4 Interferencias y limitaciones 64
4.5 Materiales y equipos 64
4.6 Modelo de cálculos 65

4.7 Consideraciones académicas 66
4.8 Ejercicios propuestos 67
Referencias y lecturas sugeridas 73

Capítulo 5. pH, acidez y alcalinidad 75
5.1 Preámbulo 75
5.2 El pH 77
5.2.1 Definición de pH 78
5.2.2 Significado de pH 79
5.2.3 Formas de medición 80
5.3 Acidez y alcalinidad 84
5.3.1 El sistema carbonato 84
5.4 Acidez 87
5.4.1 Formas de medición 88
5.5 Alcalinidad 89
5.5.1 Formas de medición 90
5.6 Unidades de expresión y modelo de cálculos 91
5.7 Utilidad y aplicación de las mediciones 92
5.8 Interferencias y limitaciones 93
5.9 Muestreo y preservación 94
5.10 Preparación de reactivos 94
5.11 Operatividad en el laboratorio 95
5.12 Consideraciones académicas 96
5.13 Ejercicios propuestos 97
Referencias y lecturas sugeridas 102

Capítulo 6. Conductividad eléctrica 103
6.1 ¿Qué es la conductividad eléctrica? 103
6.1.1 Resistencia y resistividad eléctrica 103
6.1.2 Conductividad eléctrica 106
6.1.3 Conductividad eléctrica en soluciones electrolíticas 107
6.2 ¿Por qué se mide? 109
6.3 Muestreo y preservación 109
6.4 ¿Cómo se mide? 110
6.4.1 Materiales y equipos 111
6.4.2 Reactivos 111
6.4.3 Procedimiento 111
6.5 Consideraciones académicas 112
Referencias y lecturas sugeridas 114

Capítulo 7. color instrumental 115
7.1 Escala de color Hazen para aguas naturales 116
7.1.1 Color en la escala Hazen por comparación visual 118
7.1.2 Escala Hazen por espectrofotometría 119
7.2 Escala de color triestímulo 121
7.2.1 Equipos y materiales 123
7.2.2 Reactivos 123
7.2.3 Procedimiento 123
7.2.4 Cálculos y expresión de resultados 124
7.3 Consideraciones académicas 125
Referencias y lecturas sugeridas 126

Capítulo 8. Turbidez en el laboratorio 127
8.1 ¿Por qué se mide? 128
8.2 ¿Cómo se mide? 129
8.2.1 Método nefelométrico 130
8.3 Muestreo y almacenamiento 133
8.4 Transparencia 133
8.5 Consideraciones académicas 136
Referencias y lecturas sugeridas 138

Capítulo 9. El ion cloruro 139
9.1 ¿Qué es el ion cloruro? 139
9.2 ¿Por qué se mide? 140
9.3 Implicaciones en el agua 140
9.4 ¿Cómo se mide? 141
9.4.1 Titulación con nitrato mercúrico, $Hg(NO_3)_2$ 142
9.4.2 Titulación con nitrato de plata, $AgNO_3$ 143
9.5 Materiales y equipos 144
9.6 Reactivos 145
9.7 Procedimiento 145
9.8 Modelo de cálculos 146
9.9 Interferencias y limitaciones 146
9.9.1 Límite de detección y rango de medición 147
9.10 Indicadores y trazadores hidrológicos 148
9.11 Muestreo y preservación de muestras 149
9.12 Consideraciones académicas 149
9.13 Ejercicios propuestos 152
Referencias y lecturas sugeridas 155

Capítulo 10. La dureza en el agua 157
10.1¿Qué es la dureza del agua? 157
10.1.1 Jabones y detergentes 157
10.2 Dureza y calidad de agua 160
10.2.1 Orígenes del calcio y el magnesio en el agua 160
10.3 ¿Por qué se mide? 161
10.4 Implicaciones de la dureza en el agua 162
10.5 ¿Cómo se mide? 163
10.5.1 Medición de dureza por titulación con EDTA 163
10.6 Materiales y equipos 166
10.7 Reactivos 166
10.8 Muestreo y preservación 167
10.9 Procedimiento 167
10.9.1 Para la medición del ion calcio 167
10.9.2 Para la medición del calcio más el magnesio 168
10.10 Modelo de cálculos y expresión de resultados 168
10.10.1 Limitaciones del método 169
10.10.2 Límite de detección 170
10.10.3 Clasificaciones de dureza 170
10.11 Consideraciones académicas 171
10.12 Ejercicios propuestos 172
Referencias y lecturas sugeridas 175

Capítulo 11. Fundamentos de espectroscopiA 177
11.1 Espectrofotometría 180
11.2 Espectrofotometría de absorción 182
11.2.1 La ley de Lambert-Beer 185
11.3 Aplicaciones en calidad del agua 187
Referencias y lecturas sugeridas 189

Capítulo 12. El ion nitrato 191
12.1 ¿Qué es el ion nitrato? 191
12.2 ¿Por qué se mide? 193
12.3 Muestreo y preservación 194
12.4 ¿Cómo se mide? 194
12.4.1 Medición por espectrofotometría UV 195
12.5 Consideraciones académicas 198
12.6 Ejercicios propuestos 199
Referencias y lecturas sugeridas 202

Capítulo 13. El fósforo 203
13.1 ¿Qué es el fósforo? 203
13.2 ¿Por qué se mide? 205
13.3 Muestreo y preservación 206
13.3.1 Preparación de la muestra 207
13.4 ¿Cómo se mide? 208
13.4.1 Método del ácido vanado-molibdo-fosfórico 208
13.4.2 Método del ácido ascórbico 210
13.5 Consideraciones académicas 213
Referencias y lecturas complementarias 214

Capítulo 14. El ion sulfato 215
14.1 ¿Qué es el ion sulfato? 215
14.2 ¿Por qué se mide? 216
14.3 Muestreo y preservación 217
14.4 ¿Cómo se mide? 217
14.4.1 Método gravimétrico, 4500 SO4= D 218
14.4.2 Método turbidimétrico, 4500 SO4= E 218
14.4.3 Método volumétrico 221
14.5 Consideraciones académicas 225
14.6 Ejercicios de aplicación 225
Referencias y lecturas sugeridas 229

Capítulo 15. Sustancias activas al azul de metileno, saam/mbas 231
15.1 ¿Qué son las SAAM? 231
15.1.1 ¿Qué son los surfactantes o tensoactivos? 232
15.2 ¿Por qué se miden? 234
15.3 Muestreo y preservación 234
15.4 ¿Cómo se mide? 235
15.4.1 Separación de tensoactivos por sublimación 235
15.4.2 Método SAAM/MBAS 236
15.5 Consideraciones académicas 240
Referencias y lecturas sugeridas 241

Capítulo 16. Oxígeno disuelto 243
16.1 Preámbulo 243
16.2 Solubilidad del oxígeno en el agua 245
16.3 Implicaciones del oxígeno en el agua 247
16.4 Muestreo y preservación 248
16.5 Formas de medición 250
16.5.1 Medición por Winkler con modificación de azida 250

16.5.2 Medición por electrodo específico 254
16.6 Consideraciones académicas 255
16.7 Ejercicios propuestos 255
Referencias y lecturas sugeridas 257

Capítulo 17. Demanda química de oxígeno, DQO, RQO, COD 259
17.1 ¿Qué significa DQO, RQO o COD? 259
17.2 ¿Por qué se mide? 262
17.3 Muestreo y preservación 262
17.4 ¿Cómo se mide? 263
17.4.1 Digestión en sistema cerrado 263
17.4.2 Digestión a reflujo o sistema abierto 271
17.5 Ejercicios propuestos 273
Referencias y lecturas sugeridas 276

Capítulo 18. Demanda biológica de oxígeno 277
18.1 ¿Qué significa DBO? 277
18.2 ¿Para qué se mide? 279
18.3 Muestreo y preservación 279
18.4 ¿Cómo se mide? 279
18.4.1. Equipos y materiales 282
18.4.2 Reactivos 282
18.4.3 Procedimiento para la incubación de las muestras 284
18.4.4 Medición de oxígeno disuelto después de la incubación 286
18.5 Consideraciones académicas 287
18.5.1 Formas alternas de medición 288
18.6 Interpretación de resultados de DBO 291
18.7 Estimando el nivel de recuperación de un cauce 293
18.8 Cálculos sistemáticos de DBO 294
18.9 Ejercicios propuestos 304
18.9.1 De reflexión 304
18.9.2 De cuantificación 304
Referencias y lecturas sugeridas 308

Capítulo 19. Prueba de jarras 309
19.1 Sistemas coloidales 310
19.2 Coagulación 313
19.3 Floculación 314
19.4 Pruebas de jarras 315
19.4.1 Propósito del test o prueba 315
19.4.2 Alcance 315
19.4.3 Interferencias 315

19.4.4 Equipo ... 316
19.4.5 Reactivos ... 316
19.4.6 Procedimiento ... 318
19.5 Consideraciones académicas ... 320
19.6 Ejercicios de aplicación ... 320
Referencias y lecturas sugeridas ... 323

Capítulo 20. Evaluación e interpretación de datos analíticos ... 325
20.1 Validación y estandarización de pruebas ... 325
20.1.1 Linealidad ... 326
20.1.2 Precisión ... 326
20.1.3 Error y exactitud ... 327
20.1.4 Sensibilidad ... 328
20.1.5 Límite de detección ... 328
20.1.6 Porcentaje de recuperación ... 328
20.1.7 Estandarización de métodos analíticos ... 328
20.2 Evaluaciones de calidad de datos analíticos ... 329
20.2.1 Dureza total y calcio más magnesio ... 332
20.2.2 Conductividad eléctrica y sólidos disueltos ... 332
20.2.3 Acidez, alcalinidad y pH ... 332
20.2.4 Sólidos disueltos y sumatoria de aniones ... 333
20.2.5 Balance iónico o porcentaje de error ... 333
20.3 Interpretación de resultados analíticos ... 334
20.3.1 Calidad del agua para consumo humano ... 334
20.3.2 Calidad del agua para el riego de cultivos ... 335
20.3.3 Calidad del agua para uso industrial ... 340
20.4 Ejercicios de aplicación y reflexión ... 345
Referencias y lecturas sugeridas ... 349

Capítulo 21. Índices de calidad del agua (ICA) ... 351
21.1 El índice WQI ... 352
21.1.1 Peso de los parámetros considerados en el índice WQI ... 354
21.1.2 Cálculo del índice de calidad general del agua, WQI ... 362
21.1.3 Clasificación del agua según su índice WQI ... 363
21.1.4 Cálculo del índice WQI en muestras tipo ... 364
21.2 Índice WQI propuesta de modificación ... 365
21.2.1 Variación en el parámetro pH ... 365
21.2.2 Variación en el parámetro DBO ... 365
21.2.3 Variación en el parámetro delta de temperatura ... 366
21.2.4 Variación en el parámetro sólidos disueltos ... 368
21.2.5 Variación en el parámetro porcentaje de saturación de oxígeno ... 368

21.3 Ejercicios de aplicación 373
21.4 Índice de riesgo de calidad del agua para consumo humano..... 377
21.4.1 Características físicas del agua para consumo humano..... 378
21.4.2 Sustancias químicas con efecto adverso para la salud humana..... 378
21.4.3 Sustancias químicas con implicaciones sobre la salud humana..... 379
21.4.4 Sustancias de consecuencias económicas sobre la salud..... 379
21.4.5 Sustancias relacionadas con plaguicidas y compuestos afines 380
21.4.6 Sustancias químicas utilizadas en la potabilización del agua..... 381
21.4.7 Características microbiológicas del agua para consumo humano..... 383
21.4.8 Instrumentos básicos para garantizar la calidad del agua para consumo humano 384
21.5. Ejercicios de aplicación 386
Referencias y lecturas complementarias..... 387

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Estaciones temporales del ciclo del agua	2
Figura 2.	Volúmenes comparativos de agua en función de calidad	3
Figura 3.	Ciclo hidrológico en cifras, miles de km^3	4
Figura 4.	Estructura molecular, carácter dipolar y formación de puentes de hidrógeno	9
Figura 5.	Moléculas en la interfase aire-agua y descompensación de fuerzas en la superficie	11
Figura 6.	Ósmosis y presión osmótica	12
Figura 7.	Línea de agua meteórica global, GMWL	16
Figura 8.	Fraccionamiento isotópico en el ciclo del agua	17
Figura 9.	Ejemplo de una red de monitoreo de calidad de agua para el río Fucha	24
Figura 10.	Muestra puntual	27
Figura 11.	Composición en función del tiempo	28
Figura 12.	Composición en función del área transversal	29
Figura 13.	Muestreador tipo Van Dorn, abierto (izquierda) y cerrado (derecha)	34
Figura 14.	Muestreador tipo Kemmerer, abierto (izquierda) y cerrado (derecha)	35

Figura 15.	Partes de un muestreador de barrido	35
Figura 16.	Comparación de sólidos disueltos y suspendidos en tres tipos de agua	56
Figura 17.	Serie sólidos en una muestra de agua	57
Figura 18.	Cono de Imhoff y medición de sólidos sedimentables	58
Figura 19.	Efecto Tyndall en sistemas coloidales	61
Figura 20.	Formación de iones hidronio e hidroxilo en el agua líquida	76
Figura 21.	Diagrama esquemático de un pH metro de campo	82
Figura 22.	Diagrama esquemático de un electrodo de pH	82
Figura 23.	Respuesta de un electrodo ideal de pH	83
Figura 24.	pH en función del sistema carbonato y puntos críticos	86
Figura 25.	Proporciones relativas de ácido carbónico e ion bicarbonato a pH = 6	86
Figura 26.	Acidez mineral (izquierda) y carbonácea (derecha), medidas sobre una misma alícuota	88
Figura 27.	Alcalinidad p (izquierda) y m (derecha), medidas sobre una misma alícuota de muestra	91
Figura 28.	Diagrama de flujo para la medición de acidez	95
Figura 29.	Diagrama de flujo para la medición de alcalinidad	96
Figura 30.	Ley de Ohm	104
Figura 31.	Corriente eléctrica y flujo de agua	105
Figura 32.	Resistividad eléctrica, definición	106
Figura 33.	Conductividad vs. concentración para sales representativas	108
Figura 34.	Curva de calibración para medición de color por comparación visual	117
Figura 35.	Discos de comparación para la determinación del color en aguas naturales	118
Figura 36.	Curva de calibración para color en unidades Hazen	121
Figura 37.	Diagrama de cromaticidad para determinación triestímulo	122
Figura 38.	Dispersión de la luz causada por los sólidos suspendidos del agua	128
Figura 39.	Diagrama comparativo de un fotómetro y un nefelómetro	130
Figura 40.	Dispersión de la luz en el agua	134
Figura 41.	Disco Secchi (izquierda) y tubo Secchi (derecha)	135

Figura 42. Curva de calibración de turbidez usando suspensiones de leche de magnesia 136
Figura 43. Relaciones de turbidez y transparencia para suspensiones de leche de magnesia 137
Figura 44. Formación del complejo mercúrico-difenil carbazona 142
Figura 45. Titulación de ion cloruro con $AgNO^3$ 143
Figura 46. Huella hídrica de consumo de agua potable en una ciudad capital 152
Figura 47. Estructura molecular del estearato de sodio 158
Figura 48. Estructura micelar de un jabón en solución acuosa 158
Figura 49. Estructura molecular de detergentes catiónicos y aniónicos 159
Figura 50. Composición media de la corteza terrestre 161
Figura 51. Vista interna de una tubería, sin y con incrustaciones 162
Figura 52. Estructura molecular de la sal sódica del EDTA 163
Figura 53. Campos eléctricos y magnéticos que componen la radiación electromagnética 178
Figura 54. Espectro electromagnético y rango visible 179
Figura 55. Espectros de absorción en átomos y moléculas 179
Figura 56. Diagrama esquemático de un espectrofotómetro 180
Figura 57. Bandas de absorción y emisión en espectroscopia 181
Figura 58. Espectro de absorción UV/VIS típico de un ompuesto orgánico 183
Figura 59. Espectro de absorción UV/VIS de un analito y el solvente como interferente 183
Figura 60. Espectros UV/VIS del vidrio, el cuarzo y el agua 184
Figura 61. Flujos comparativos de luz blanca y luz monocromática 185
Figura 62. Ley de Lambert, intensidad vs. ancho de celda 185
Figura 63. Ley de Beer, intensidad vs. concentración 186
Figura 64. Curva espectral y curva de calibración para Cr VI 188
Figura 65. Ciclo del nitrógeno 192
Figura 66. Absorbancia vs. mg/l N-NO_3– 197
Figura 67. Ácido fosfórico y ácido fosfatídico, un fosfolípido 204
Figura 68. Seis formas diferentes del fósforo en el agua 205
Figura 69. Absorbancia vs. concentración de P-PO_4^{3-}, método vanado-molibdo-fosfórico 210

Figura 70. Absorbancia a 880 nm vs. mg P-PO43-. Método del ácido ascórbico 213
Figura 71. Curva de calibración para sulfatos por turbidimetría 220
Figura 72. Métodos alternos para la determinación de sulfatos 228
Figura 73. Reacción del azul de metileno con un tensoactivo aniónico..... 232
Figura 74. Clasificación de los surfactantes o tensoactivos 233
Figura 75. Diagrama esquemático de la separación de tensoactivos por sublimación 235
Figura 76. Curva de calibración SAAM 239
Figura 77. Concentraciones comparativas de oxígeno en el agua y el aire 244
Figura 78. Reactivo limitante de la oxidación biológica en agua y aire 244
Figura 79. Profundidad de penetración de la luz en el agua..... 247
Figura 80. Botella Winkler para oxígeno disuelto..... 249
Figura 81. Medición de oxígeno por botella Winkler..... 253
Figura 82. Oxígeno como comburente en la llama de una vela 261
Figura 83. Diferencias de concentración de oxígeno en el aire y en el agua 262
Figura 84. Figura 84. Tubos de ensayo para DQO, sistema cerrado, 16x100 mm..... 266
Figura 85. Reactor para DQO, sistema cerrado 267
Figura 86. DQO, sistema cerrado. Titulación del dicromato excedente..... 267
Figura 87. Montaje a reflujo para DQO en sistema abierto..... 272
Figura 88. Pez en un acuario con agua deficiente de oxígeno..... 278
Figura 89. DBO carbonácea y nitrogenada..... 280
Figura 90. Agua de dilución..... 283
Figura 91. Botellas Winkler y sello de agua protegido con membrana plástica..... 284
Figura 92. Mediciones de oxígeno para DBO..... 286
Figura 93. Botella de incubación para medición de DBO por CO_2..... 289
Figura 94. Curvas espectrales de diluciones sucesivas de ARD 290
Figura 95. DBO vs. área bajo la curva espectral 291
Figura 96. Decaimiento de DBO y re-oxigenación del agua en función del tiempo 294

Figura 97. Vertimiento de ARD que cae sobre un cauce receptor limpio 296
Figura 98. Variaciones de OD y DBO en función del tiempo para un vertimiento continuo 303
Figura 99. Modelo de coloide de doble capa iónica 310
Figura 100. Desestabilización de un coloide por neutralización de su carga 311
Figura 101. Efecto Tyndall, dispersión de la luz en un sistema coloidal 312
Figura 102. Acrilamida y polímeros lineales de acrilamida 314
Figura 103. Equipo clásico para prueba de jarras de seis puestos 316
Figura 104. Turbidez y color frente adiciones crecientes de agente floculante 319
Figura 105. Precisión y exactitud en resultados de laboratorio 327
Figura 106. Diagrama de Scholler para la clasificación del agua para riego 338
Figura 107. Valor del parámetro coliformes fecales en función de su concentración en el agua 354
Figura 108. Valor del parámetro pH en función del pH del agua 355
Figura 109. Valor del parámetro DBO en función de su concentración en el agua 356
Figura 110. Valor del parámetro nitratos en función de su concentración en el agua 357
Figura 111. Valor del parámetro ortofosfato en función de su concentración en el agua 358
Figura 112. Valor del parámetro delta de temperatura en función del cambio de temperatura del agua 359
Figura 113. Valor del parámetro turbidez en función de la turbidez del agua 360
Figura 114. Valor del parámetro sólidos disueltos en función de su concentración 361
Figura 115. Valor del parámetro porcentaje de oxígeno disuelto 362
Figura 116. Valor del parámetro color aparente en función de su magnitud en unidades Hazen 367
Figura 117. Valor del parámetro concentración de ion cloruro en función de su concentración 367

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Masas moleculares y puntos de fusión y ebullición comparativos 8
Tabla 2. Densidad, capacidad calorífica y calor latente de algunas sustancias comunes 10
Tabla 3. Marquilla básica para el etiquetado de muestras en campo 31
Tabla 4. Recomendaciones para la toma de muestras en campo 37
Tabla 5. Umbral de olor para diferentes grados de dilución 44
Tabla 6. Descriptores de olor para algunos tipos de aguas características 45
Tabla 7. Descriptores de olor para algunos tipos de aguas características 46
Tabla 8. Descriptores de turbidez para algunos tipos de aguas características 48
Tabla 9. Descriptores propuestos para el aspecto o apariencia de una muestra de agua 49
Tabla 10. Ficha de campo para análisis organoléptico del agua 51
Tabla 11. Ejemplos de ácidos y bases cotidianas 77
Tabla 12. Variaciones de pH y pOH en función de la concentración molar de ion hidronio 79

Tabla 13. Indicadores comunes y rangos de viraje 81
Tabla 14. Resistividad de algunos materiales del subsuelo..... 104
Tabla 15. Rangos de conductividad eléctrica en muestra de agua tipo 107
Tabla 16. Conductividad vs. concentración para soluciones de KCl 110
Tabla 17. Clasificación del agua en función de su conductividad eléctrica 111
Tabla 18. Ordenadas simplificadas para la medición del color triestímulo..... 123
Tabla 19. Tono del color para el rango de longitud de onda dominante 124
Tabla 20. Clasificación del agua por salinidad..... 148
Tabla 21. Resultados de ejercicios académicos con muestras de complejidad variable..... 150
Tabla 22. Clasificación de la dureza del agua según Water Quality Association 171
Tabla 23. Resultados de ejercicios académicos con muestras de complejidad variable..... 171
Tabla 24. Analitos potencialmente medibles por espectrofotometría UV/VIS..... 188
Tabla 25. Curva de calibración para medición de nitratos por espectrofotometría UV..... 197
Tabla 26. Resultados de mediciones de nitratos en aguas residuales domésticas..... 199
Tabla 27. Guía para la preparación de estándares de calibración 219
Tabla 28. Resultados de ejercicios académicos con muestras de complejidad variable..... 225
Tabla 29. Solubilidad del O_2 en agua dulce en función de la presión y la temperatura..... 245
Tabla 30. Solubilidad del O_2 en agua de mar en función de la presión y la temperatura..... 246
Tabla 31. Proporciones de mezcla para DQO por digestión en sistema cerrado..... 264
Tabla 32. Resultados medios de DQO en muestras típicas, 2005-2020..... 269
Tabla 33. Resultados de DBO con medición oxígeno por Winkler 286
Tabla 34. Resultados de DBO en muestras y bebidas comerciales, periodo 2010-2020..... 288
Tabla 35. Velocidad de sedimentación vs. tamaño de partícula..... 312

Tabla 36. Reporte técnico de resultados de análisis fisicoquímico de aguas 331
Tabla 37. Índice de riesgo para la calidad del agua de consumo Humano, IRCA 335
Tabla 38. Tolerancia relativa de los cultivos a las sales 339
Tabla 39. Factores numéricos para calcular el índice LSI 343
Tabla 40. Resultados de análisis fisicoquímicos de aguas 347
Tabla 41. Resultados de análisis fisicoquímicos y microbiológicos de agua para consumo humano 348
Tabla 42. Ponderación de parámetros en base unitaria 353
Tabla 43. Valores de ponderación y rangos de variación de los parámetros WQI 363
Tabla 44. Clasificación del agua de acuerdo con el índice WQI 363
Tabla 45. Composición de tres muestras tipo 364
Tabla 46. Ponderaciones de Brown y ponderaciones propuestas para regiones tropicales 369
Tabla 47. Índices WQI originales y con modificaciones propuestas 369
Tabla 48. Índice de calidad aditivo, WQIa, valor parámetro por peso ponderado, Pi x Wi 370
Tabla 49. Índice de calidad multiplicativo, WQIm, valor parámetro elevado al peso ponderado, PiWi 370
Tabla 50. WQI aditivo, valor Pi multiplicado por peso ponderado, Pi · Wi modificado, UD FJC - 2019 371
Tabla 51. WQI multiplicativo, valor Pi elevado a la potencia Wi, PiWi, modificado, UD FJC - 2019 371
Tabla 52. Clasificación del agua por carga orgánica 372
Tabla 53. Características físicas del agua para consumo humano 378
Tabla 54. Características químicas de efecto adverso para la salud humana 378
Tabla 55. Características químicas que tienen implicaciones para la salud humana 379
Tabla 56. Sustancias de consecuencias económicas indirectas sobre la salud 379
Tabla 57. Características microbiológicas del agua para consumo humano 383
Tabla 58. Puntajes de riesgo para el cálculo del IRCA 384

Sistema de Información en Línea



Al final del libro encontrará el código para ingresar al **Sistema de información en Línea** - SIL - donde podrá hallar referencias bibliográficas, guías de laboratorio y ejercicios resueltos paso a paso.

PREFACIO

La primera edición del libro *Calidad del Agua para estudiantes de Ciencias Ambientales* se publicó a mediados del 2005 bajo el sello editorial de la Oficina de Publicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. El propósito inicial de esa obra era elaborar un texto guía para los estudiantes de los cursos de Calidad del Agua de la Facultad del Medio Ambiente. Sin embargo, para nuestra sorpresa, desde el momento mismo de su aparición se percibió rápidamente una receptividad muy favorable que trascendió mucho más allá de las fronteras institucionales.

Esa receptividad tan favorable, unida a la solicitud constante de nuevas reimpresiones por parte de mis estudiantes cada semestre y a la decisión de la Universidad Distrital de no volver a reimprimir más ese documento, desde hace ya más de siete años, constituye una de las principales motivaciones para preparar esta segunda edición, que prácticamente solo se asemeja a la primera en la conservación de su nombre original.

Aproximadamente unos tres años después del lanzamiento de la primera edición, en formato físico, el documento completo fue subido a internet en el *web site* de la Universidad Distrital, porque ya para ese entonces comenzaron a circular por internet versiones fragmentadas del mismo "escritas por diversos autores". Ese documento de internet fue finalmente bajado por decisión institucional unos cinco años después, contabilizando para ese entonces más de cinco millones de visitas.

Como sucede con muchos textos universitarios, a este se puede llegar por dos caminos diferentes: por un camino empedrado y sinuoso, si se diseña como un "proyecto institucional estratégicamente concebido" o por el camino simple y espontáneo que consiste en preparar juiciosamente las clases y en diseñar las prácticas de laboratorio con creatividad. Doy fe de que, por este último, si se analizan y registran los resultados de las prácticas y se depura y organiza la información constantemente, el perfeccionamiento de los temas, semestre a semestre, conduce necesariamente a un texto.

INTRODUCCIÓN

El área de Calidad del Agua es un componente esencial en diferentes asignaturas que hacen parte de la malla curricular de varios programas académicos, tales como Ecología, Hidrología, Biología, Química y Administración Ambiental, así como de algunas ingenierías como Civil, Química, Sanitaria y Ambiental, entre otras. En esos programas académicos el área de "Calidad del Agua" se aborda desde asignaturas tradicionalmente llamadas Química del Agua, Química Sanitaria, Contaminación I y II y Calidad del Agua propiamente dicha.

En ese contexto, esta obra está concebida como un texto guía para las asignaturas antes mencionadas, pero también como un manual de campo y de laboratorio para el profesional del área. El libro se compone de 21 capítulos, donde los dos primeros le dan contexto a la obra y los dos últimos la aterrizan en un plano ambiental más amplio y práctico. Con pocas excepciones, cada capítulo puede abordarse individualmente sin estar condicionado al estudio previo de los anteriores.

Dentro de cada capítulo los temas se desarrollan mediante preguntas básicas como ¿qué es?, ¿por qué se mide?, ¿cómo se mide?, fundamento de la medición y lecturas y referencias complementarias, entre otros. Adicionalmente, se han desarrollado ejercicios de aplicación para la mayoría de los parámetros y se ha incluido un ítem denominado "consideraciones académicas" que sintetiza los resultados y la experiencia lograda en el desarrollo de las prácticas en el Laboratorio de Calidad

del Agua de la Facultad del Medio Ambiente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Como es obvio, la referencia última de los métodos analíticos tratados subyace en obras clásicas como el Standar Methods y el ASTM a nivel internacional y en manuales institucionales como los del IDEAM y el Instituto Nacional de Salud a nivel nacional. Cabe aclarar que, con respecto a esos referentes, dichas obras son esencialmente manuales de laboratorio, mientras que esta que se presenta ahora es esencialmente un texto universitario y un manual del profesional.

De mi parte, han sido más de diez años de esfuerzo constante con la mirada puesta en el horizonte, escribiendo y corrigiendo sin perder la fe pese a las múltiples dificultades que se me han presentado últimamente. De parte de mis estudiantes, más de quince años de constantes prórrogas y múltiples ensayos de prueba y error, a cambio de la promesa de un texto propio. Espero no defraudarlos.

Quiero agradecer, en primera instancia, a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, con quién aprendí a escribir mis primeros documentos, por las experiencias que me ha dejado y por honrarme con el encargo del Laboratorio de Calidad del Agua de la Facultad del Medio Ambiente durante más de quince años. Gracias a ello he tenido la oportunidad de diseñar, experimentar, modificar y aprender constantemente en esta área del conocimiento. Extiendo este agradecimiento al profesor Vidal Fernando Peñaranda Galvis, quien ha sido para mí un ejemplo y guía en el oficio de escribir durante mi permanencia en esta institución.

Agradezco también al ingeniero Juan Camilo Moreno, asistente del Laboratorio de Calidad del Agua, por su acompañamiento en la implementación de algunas prácticas de laboratorio y por su colaboración en la revisión técnica de este documento. Doy gracias también al profesor Miguel Ángel Piragauta por el diálogo académico que sostuvimos hasta el día de su partida, hace ya seis meses, y al Comité Editorial de Ecoe Ediciones, por la confianza puesta en esta obra y por llevarla finalmente a las manos de mis lectores.

Por último, permítanme ofrecer con esta obra un homenaje póstumo a mi esposa, Niny Johanna Reyes Alzate, un ángel de motivación e inspiración constante que, para mi dolor, se fue sin ver esta obra culminada hace ya casi tres años. Ahora que estoy terminando esta empresa que iniciamos juntos no puedo dejar de imaginarme su rostro encendido de alegría al verme culminar hoy esta etapa. Por todo lo que significó ella en mi vida, quiero terminar esta introducción con uno de sus poemas:

Lo que me queda

Me queda el silencio
y el frío de la madrugada,
en ausencia del alma.

Me quedan en silencio
tus manos, en las mías,
como gotas en la ventana.

Me queda el silencio y la vida desolada,
la pesadez al mirar
el sueño perdido,
el intento fallido.

Me quedas tú…
inmortal en mi alma
te quedas en mi silencio.
¡En un silencio inmutable!

Niny Johanna Reyes Alzate

Jorge Alonso Cárdenas León
Profesor de Química y Calidad de Aguas
Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
Sede El Porvenir
Octubre de 2021.

CAPÍTULO 1

EL AGUA EN LA NATURALEZA

El lenguaje debe ser matemático, geométrico y escultórico.
Cada idea debe encajar exactamente en la frase que la representa,
tan exactamente que no pueda quitarse nada de ella sin deformar la idea.

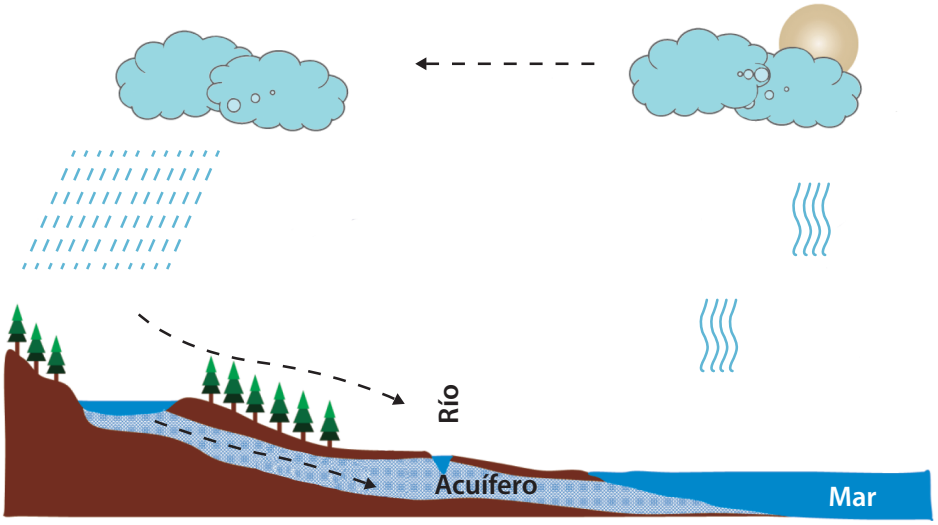
José Martí, político y escritor cubano (1853-1895).

El agua es una sustancia cotidiana, simple en apariencia, pero increíblemente compleja; tanto, que su estudio trasciende las fronteras de diversas disciplinas, pese a que se han estructurado programas específicos de pregrado para estudiarla, como la Hidrología y la Ingeniería Hidráulica, entre otras, además de numerosas especializaciones posgraduales. Así, la tan citada frase "tan claro y simple como el agua", utilizada para referirse a un hecho categórico y concluyente, no es más que una metáfora cuando se refiere al agua misma. Este primer capítulo tiene por objeto acercar al estudiante a una parte de ese inmenso objeto de estudio que es el agua, mediante una rápida mirada a algunas de sus principales facetas.

El agua pura –raras veces lo está– es un líquido incoloro, inodoro e insípido, que adquiere una tonalidad azul cuando se le observa en grandes masas líquidas. A la presión atmosférica, funde a 0 °C y bulle 100 °C. Tiene una densidad máxima de 1,0 g/cm^3 a 4 °C y se expande al congelarse. Al igual que muchos otros líquidos, el agua puede existir en "estado sobre-enfriado", lo cual significa que puede mantenerse en el estado líquido (incluso a -25 °C), aunque su temperatura sea inferior al punto de congelación.

El agua está presente no solo en los cuerpos de agua, evidentes a simple vista, sino también en la franja superior del suelo (en donde se adhiere por capilaridad) y en los intersticios de algunos estratos geológicos granulados o fragmentados, llamados acuíferos. Se encuentra también en el aire, en fase gaseosa, y en cualquier forma de materia viva (Figura 1).

Figura 1. Estaciones temporales del ciclo del agua



Fuente: elaboración propia.

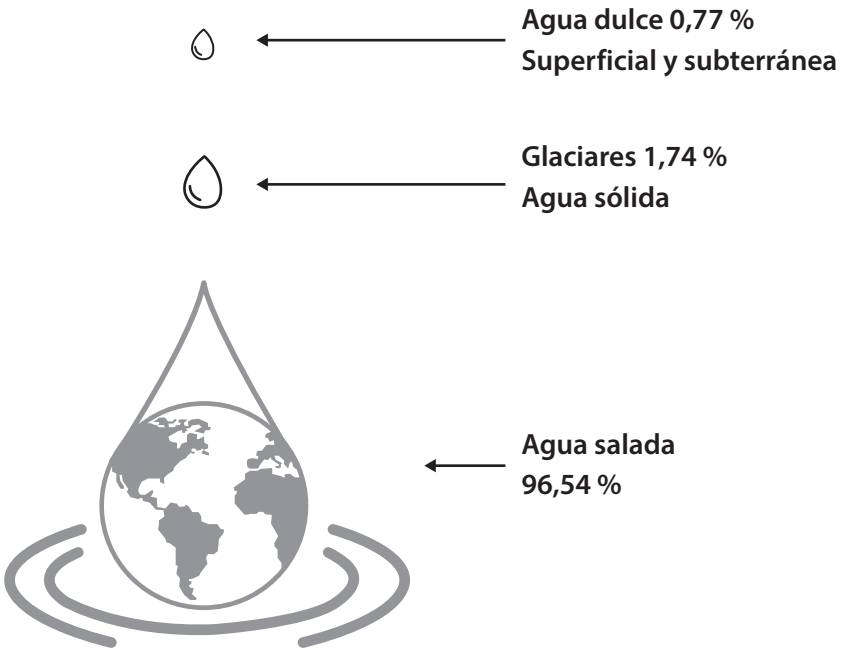
Debido a su gran capacidad para disolver sustancias de todo tipo, el agua pura prácticamente no existe en la naturaleza: en fase gaseosa se mezcla con los gases de la atmósfera y con las partículas sólidas suspendidas que provienen de la erosión causada por el viento. En fase líquida, disuelve en mayor o menor grado prácticamente todo lo que contacta.

1.1 Distribución del agua en la naturaleza

El agua forma una capa líquida que cubre aproximadamente el 70 % de la superficie terrestre y que, junto a los glaciares que se forman en los altos de las montañas, constituyen esa capa envolvente llamada hidrósfera. Su volumen total es de aproximadamente 1.400.000.000 de km^3, de los cuales, cerca del 96,5 % corresponde al agua salada en los océanos y el 1,74 % al agua sólida en los glaciares permanentes. El agua disponible para el consumo humano es apenas una pequeñísima fracción de ese total: el 0,76 % que corresponde al agua subterránea y el 0,0082 % que corresponde a cuerpos de agua dulce contenida en lagos, ríos y humedales (Figura 2). Si bien la hidrósfera es un manto dinámico que circula constantemente por cada uno de los diferentes reservorios, las fuentes hídricas superficiales son las que se

renuevan a mayor velocidad y las que posibilitan en mayor grado la existencia de vida sobre la superficie terrestre.

Figura 2. Volúmenes comparativos de agua en función de calidad



Fuente: elaboración propia.

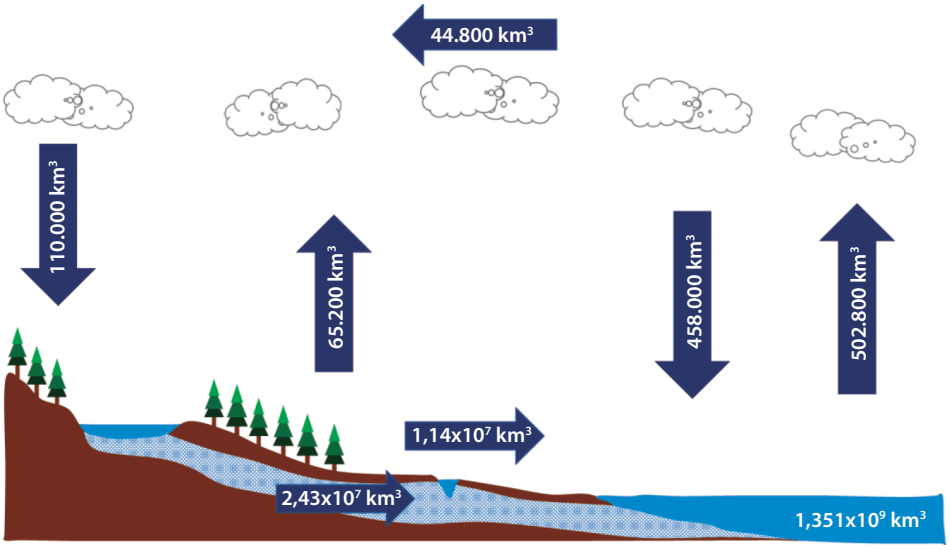
Normalmente se habla del ciclo hidrológico como el movimiento físico de grandes masas de agua a través de los diferentes reservorios, es decir, como si se tratara solamente del traslado de grandes masas de agua de un reservorio a otro. Sin embargo, una fracción considerable de esa masa de agua se renueva bioquímicamente: la fotosíntesis consume agua constantemente para producir carbohidratos y la respiración sintetiza nuevas moléculas de agua mediante la oxidación que realizan los organismos aeróbicos:

Fotosíntesis, consumo de agua: $6\,CO_2 + 6\,H_2O \xrightarrow{\textit{Luz solar}} C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2$

Respiración, generación de agua: $C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 \longrightarrow 6\,CO_2 + 6\,H_2O + ATP$

En lo que tiene que ver con la biota verde y de acuerdo con las anteriores ecuaciones, los organismos autótrofos no alteran las proporciones de oxígeno o bióxido de carbono en la atmósfera, pero es obvio que los organismos heterótrofos sí (Figura 3).

Figura 3. Ciclo hidrológico en cifras, miles de km³



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con estas cifras, aproximadamente el 0,0047 % del total de agua en el planeta se renueva periódicamente mediante respiración y fotosíntesis. Sin embargo, si se compara con el volumen total de agua dulce superficial existente, el 0,568 % de esa agua se renueva periódicamente, cifra que le confiere al ciclo del agua un carácter marcadamente fisicoquímico.

1.2 El ciclo hidrológico y la calidad del agua

El ciclo hidrológico es el flujo constante y caótico de grandes masas de agua, que son transportadas por la energía del sol a través de los diferentes reservorios del planeta y de los diferentes estados físicos en que esta puede existir. Estos reservorios incluyen también a los organismos vivos que la utilizan como sustrato en la fotosíntesis y la regeneran como subproducto en la respiración.

El ciclo del agua involucra a toda el agua existente en el plantea, desde los reservorios más evidentes como los ríos, lagos y mares, hasta los más inadvertidos como la humedad contenida en el aire o el suelo, o el agua contenida en los mantos acuíferos.

Si se observa con atención, el ciclo del agua en realidad no es un ciclo, sino la fuente de todos los demás ciclos biogeoquímicos. En efecto, sin el ciclo del agua no habría ciclos del carbono, nitrógeno, azufre, fósforo, entre otros. Sin embargo, cuando se habla del ciclo del agua, se hace referencia exclusivamente a su movimiento en el planeta, pero no a sus consecuencias e implicaciones. A grandes rasgos, ese ciclo global del agua comprende las siguientes etapas:

1.2.1 Precipitación

La precipitación es el agua meteórica que cae sobre la superficie de la tierra bajo las formas de lluvia, nieve o rocío, y constituye la "entrada", en referencia al ciclo hidrológico.

Desde el punto de vista de la calidad del agua, la precipitación –en aguas continentales, no alteradas– está formada por el agua más pura que se conoce, pues proviene de un "proceso natural de destilación" que la hace casi 100 % pura. En términos comparativos, equivale al agua, que en los laboratorios analíticos se conoce como "agua desionizada", es decir, más pura que el agua destilada. Para efectos prácticos, la precipitación está formada por agua que no contiene sustancias disueltas o suspendidas. Obviamente y como sucede con todas las reglas, existen excepciones: por ejemplo, el agua lluvia captada en zonas industriales o sobre las zonas costeras contiene pequeñas cantidades de sales disueltas y polvo en suspensión.

1.2.2 Escorrentía

La escorrentía es la precipitación que, luego de contactar la superficie terrestre, fluye por gravedad hacia las corrientes superficiales o subterráneas, hasta alcanzar nuevamente el mar. Dicho flujo puede ser rápido, cuando fluye superficialmente hacia los ríos o lagos; intermitente, cuando fluye a través del subsuelo o los mantos acuíferos e interrumpido, cuando el agua se evapora rápidamente hacia la atmósfera, poco tiempo después de haber sido precipitada.

En términos de calidad, las sustancias que el agua pueda arrastrar o disolver, después de haber sido precipitada, dependerán del tipo de materiales que contacte y del tiempo de contacto entre el agua y los materiales de la superficie terrestre.

Así, por ejemplo, si el agua lluvia cae sobre un depósito de residuos sólidos, se transformará rápidamente en lixiviados, a su paso por los desechos que contacte, mientras que, si cae sobre una reserva natural, incorporará solo unas mínimas cantidades de sustancias disueltas, que podrían hacerla aún más provechosa para el consumo humano. Esto ocurre porque el suelo y el subsuelo han sido naturalmente lavados por cientos de miles de precipitaciones, mientras que los residuos sólidos no.

Del mismo modo, si el agua recién precipitada fluye rápidamente hacia un cauce superficial, su tiempo de contacto con los materiales de la superficie terrestre será tan pequeño que escasamente podrá incorporar algunas pequeñas cantidades de sustancias disueltas o suspendidas que, o podrían ser inocuas para el consumo humano o, incluso la harán mejor. Sin embargo, si el agua se infiltra en el subsuelo y llega hasta los mantos acuíferos, el tiempo de contacto entre el agua y los minerales del subsuelo será mayor y, en consecuencia, la posibilidad de incorporar sales

disueltas será también mayor; desde tiempos de contacto relativamente cortos (décadas y cientos de años) que la transforman en "agua mineral", muy provechosa para las necesidades humanas, hasta tiempos de contacto muy grandes (miles y millones de años) que la transforman en salmueras, que normalmente acompañan al crudo en las profundidades.

1.2.3 Infiltración

La infiltración es un proceso de flujo descendente o vertical de una fracción del agua que cae como precipitación y que drena, primero, hasta saturar el subsuelo y, posteriormente, hasta formar embalses subterráneos. La proporción del agua infiltrada depende de la permeabilidad del suelo subyacente a los sitios por donde escurre el agua y a las características del evento de precipitación. Así, para una misma cantidad de agua precipitada y un mismo tipo de suelo, eventos torrenciales infiltran una menor cantidad de agua que los eventos ligeros.

En lo referente a la calidad del agua, la infiltración arrastra sustancias desde el suelo y el subsuelo hacia los mantos acuíferos. Así, por ejemplo, drenan materia orgánica, las aguas residuales domésticas, desde las redes fracturadas de los sistemas de alcantarillado hasta los niveles freáticos. Así se transportan también nitratos, desde las zonas irrigadas con agroquímicos hacia los cauces superficiales y hacia los embalses acuíferos.

Por infiltración fluyen también contaminantes al agua subterránea, como los hidrocarburos, desde los tanques de almacenamiento de las estaciones de servicio y los lixiviados que emanan de los rellenos sanitarios, entre otros. El alto grado de solubilización que caracteriza al agua facilita el transporte de contaminantes y la hace altamente vulnerable a la contaminación.

1.2.4 Transpiración

Una parte del agua infiltrada se evapora antes de llegar a la zona saturada o es interceptada por las raíces de las plantas, que la utilizan en sus procesos de transpiración. Esa parte del agua precipitada que es devuelta nuevamente en forma de vapor, desde las hojas de las plantas, es lo que se conoce como transpiración. Ahora, una fracción del agua captada por las raíces de las plantas es utilizada en la fotosíntesis y constituye "una pérdida de agua" con respecto al ciclo físico. Al mismo tiempo, una fracción equivalente de agua se sintetiza mediante la respiración vegetal y otra adicional, mediante la respiración de todos los organismos aeróbicos que habitan la tierra. Esas dos partes representan "entradas de agua nueva" que ingresan al ciclo hidrológico.

La transpiración es afectada por fenómenos climáticos y por el nivel de cobertura vegetal del suelo. Para un mismo suelo, la cobertura vegetal reduce el escurrimiento

y amortigua la respuesta del evento de precipitación en la salida de la cuenca. Sin embargo, reduce también la infiltración y con ello la recarga de los acuíferos. En términos de calidad, la evapotranspiración renueva y reemplaza permanentemente las moléculas de agua.

1.2.5 Evaporación

En términos físicos, la evaporación es un cambio de estado, de líquido a gaseoso, que puede ocurrir a cualquier temperatura, pero que se favorece a temperaturas cercanas al punto de ebullición y se reduce a temperaturas cercanas al punto de congelación. Estando el 70 % de la superficie terrestre cubierta de agua, la evaporación en el mar es mayor que en la tierra. En consecuencia, la precipitación en la tierra es mayor que en el mar.

Desde el punto de vista de la calidad del agua, la evaporación –junto con la transpiración– no son simplemente cambios de estado del agua o flujos de masas de agua de un lugar a otro. Todo lo contrario, la evaporación es un proceso de destilación natural de alta eficiencia, que separa el agua de las sustancias que esta ha disuelto y regresa el destilado como precipitación, para que agua muy pura caiga nuevamente sobre materiales de la corteza terrestre y los disuelva y transporte hacia el mar. El ciclo del agua transporta grandes cantidades de sedimentos y sales disueltas, desde los continentes hacia el fondo del mar y en ese trayecto, su calidad, entendida como su contenido en sustancias disueltas o suspendidas, va cambiando progresivamente.

1.3 Propiedades fisicoquímicas del agua

El agua pura es un líquido incoloro, inodoro e insípido. Debido a su gran capacidad para disolver sustancias de todo tipo, el agua pura prácticamente no existe en la naturaleza: en fase gaseosa se mezcla con los gases de la atmósfera y con el material particulado proveniente de la erosión o la contaminación. En fase líquida, ataca los materiales que contacta formando mezclas que le van incorporando progresivamente, sustancias en solución y en suspensión.

El agua es el óxido más importante que se conoce. Si bien, por su abundancia, parece ser una sustancia simple y cotidiana, en realidad, es más bien una sustancia muy particular, cuando se le mira desde el punto de vista de sus propiedades fisicoquímicas. Algunas de estas características particulares pueden resumirse así: el agua funde y bulle a temperaturas anormalmente altas en comparación con otras sustancias semejantes (Tabla 1).

A diferencia de otros compuestos semejantes (bióxido de carbono, CO_2, dióxido de azufre, SO_2, sulfuro de hidrógeno, H_2S, etc.), la densidad del agua en el estado sólido es menor que la del estado líquido, razón por la cual el hielo flota