

# TEORÍA Y PRÁCTICA DE LA PURIFICACIÓN DEL AGUA

TOMO I

JORGE ARBOLEDA VALENCIA  
IVÁN A. BUITRAGO LEÓN  
LUIS A. JARAMILLO GÓMEZ

Arboleda Valencia, Jorge, autor

Teoría y práctica de la purificación del agua / Jorge Arboleda Valencia, Iván A. Buitrago León, Luis A. Jaramillo Gómez. -- Cuarta edición. -- Bogotá : Ecoe Ediciones, 2023.

393 páginas. -- 2 volúmenes. -- (Ciencias de la tierra, geografía, medioambiente y planificación. Suministro y tratamiento de aguas)

Incluye datos curriculares de los autores -- Incluye bibliografía.

ISBN 978-958-503-647-5 (tomo 1) -- 978-958-503-648-2 (tomo 1, e-book) -- 978-958-503-649-9 (tomo 2) -- 978-958-503-650-5 (tomo 2, e-book)

1. Purificación del agua 2. Calidad del agua - Control 3. Química del agua I. Buitrago León, Iván A., autor II. Jaramillo Gómez, Luis Alberto, autor

CDD: 628.162 ed. 23

CO-BoBN- a1127010

---



**Área:** Ciencias de la tierra, geografía, medioambiente y planificación

**Subárea:** Suministro y tratamiento de aguas

**ECOE**  
**EDICIONES**



© Jorge Arboleda Valencia

© Iván A. Buitrago León

© Luis A. Jaramillo Gómez

© Ecoe Ediciones S.A.S.

info@ecoeediciones.com

www.ecoeediciones.com

Carrera 19 # 63 C 32

Teléfono: (+57) 321 226 46 09

Bogotá, Colombia

**Primera edición:** Bogotá, octubre del 2023

**ISBN:** 978-958-503-647-5

**e-ISBN:** 978-958-503-648-2

Directora editorial: Ana María Rueda G.

Coordinadora editorial: Paula Bermúdez B.

Editora de adquisiciones: Alejandra Cely R.

Corrección de estilo: Andrés Caro

Diagramación: Magda Barrero

Carátula: Wilson Marulanda Muñoz

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*

# AGRADECIMIENTOS

Los autores del libro expresan sus más sinceros agradecimientos a todas las personas que participaron en la actualización y ajuste de la información aquí incluida, revisión de fórmulas y renovación de gráficas.

Entre ellos queremos destacar la participación de la diseñadora industrial María Camila Niño que con toda su labor nos ayudó a actualizar las imágenes de las anteriores ediciones y traerlas a las nuevas tecnologías y estándares de dibujo. Al señor John Carlos López por la revisión general del libro, de la formulación química, la nomenclatura empleada. Al ingeniero Andrés Dimas por la revisión técnica de varios conceptos aquí presentados. A la ingeniera Clara María Corzo por su revisión en los temas referentes al diseño de los componentes de las plantas. Y en general a todo el equipo de las firmas WARP SAS y Profit Eng. SAS por su apoyo desinteresado en el desarrollo de gráficas, módulos, esquemas y la actualización de esta nueva edición.

# CONTENIDO

<b>FORWARD</b> .....	XXIII
<b>A MANERA DE PRÓLOGO</b> .....	XXV
<b>CONSIDERACIONES HISTÓRICAS</b> .....	XXVII
Primera etapa del desarrollo de la tecnología del tratamiento del agua (1850-1900) .....	XXVII
Segunda etapa del desarrollo del tratamiento del agua (1900-1950) .....	XXIX
<b>ENFOQUE DEL PRESENTE LIBRO</b> .....	XXXIII
Soluciones a los problemas planteados .....	XXXV
Componentes fisicoquímicos del proyecto .....	XXXV
Componentes mecánicos .....	XXXVI
Componentes hidráulicos .....	XXXVII
Componentes bacteriológicos .....	XXXVIII
Desarrollo progresivo de las metas de potabilidad del agua .....	XXXIX
<b>CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE QUÍMICA DEL AGUA</b> .....	1
Estructura química y propiedades del agua .....	2
Composición química del agua .....	2
Forma de la molécula (polaridad).....	2
Estructura molecular .....	4
Ionización y solvatación .....	6
Disociación del agua .....	7
Algunas propiedades físicas del agua.....	7
Sustancias dispersas en el agua.....	11
Coagulación-teoría .....	12

Los coloides, clasificación y propiedades.....	12
Forma de los coloides.....	14
Propiedades de los coloides.....	14
Movimiento browniano.....	14
Efecto Tyndall.....	15
Adsorción.....	15
Propiedades electrocinéticas.....	15
Propiedades ópticas.....	18
Propiedades de superficie.....	19
Propiedades electrocinéticas (electrocinetismo).....	21
<b>CAPÍTULO 2. TEORÍA DE LA COAGULACIÓN DEL AGUA.....</b>	<b>25</b>
Impurezas del agua.....	25
Turbiedad–aspectos ópticos.....	26
Medio diseminante.....	27
Naturaleza química de la turbiedad.....	29
Naturaleza del color.....	32
Tamaño de las partículas de color.....	33
Relación entre color y pH.....	33
Comparación entre las características del color y la turbiedad.....	34
Coagulación-floculación de las impurezas del agua.....	35
Mecanismos de adsorción- neutralización.....	37
Potenciales del coloide.....	38
Mediciones electrocinéticas.....	38
Estabilidad e inestabilidad de las suspensiones coloidales.....	40
Coagulación por neutralización de la carga.....	41
Coagulación por compresión de la doble capa.....	42
Coagulación por puente químico.....	43
Coagulación por incorporación (o de barrido).....	45
Diagramas de coagulación-turbiedad.....	45
Remoción de color.....	49
Mecanismos en la remoción de color.....	50
Factores que afectan el proceso de coagulación.....	53
Coagulantes.....	53
Coagulantes y floculantes poliméricos (polielectrolitos).....	53
Clasificación de los polielectrolitos.....	54
Polímeros sintéticos.....	55
Clasificación de los polímeros de acuerdo con su carga.....	56
Modos de empleo de los polielectrolitos.....	57
Coagulantes metálicos.....	58
Coagulación con sales de aluminio.....	58
Química de coagulación con Al (III).....	59
Coagulación con sales de hierro.....	62
Química de la coagulación con sales de hierro.....	63
Supercoagulación o coagulación de orgánicos.....	65
Planteamiento del problema.....	65
Límites permisibles de orgánicos en el agua.....	67

Mecanismos de remoción.....	69
Transporte de partículas-cinética de la floculación .....	73
Generalidades .....	73
Interacción entre partículas en floculación pericinetica	
o en el subrango viscoso .....	74
Interacción entre partículas en floculación ortocinetica	
o en el subrango inercial.....	75
Escalas de vórtices y choques de partículas .....	78
Expresiones sobre el gradiente de velocidad.....	79
Expresiones que parten de la teoría de Von Smowluchowski .....	83
Modelo de Argaman y Kaufman .....	84
Modelo de Hudson.....	86
Floculación lastrada .....	87
Fundamentos teóricos y ecuaciones básicas .....	87
Características de las plantas de floculación lastrada.....	90
<b>CAPÍTULO 3. DISEÑO DE MEZCLADORES Y FLOCULADORES .....</b>	<b>93</b>
Adición de los coagulantes .....	93
Preparación de las soluciones .....	94
Método para dosificar compuestos químicos.....	101
Sistemas de dosificación en solución por gravedad.....	103
Aplicadores de cal.....	108
Cálculo de la cantidad de reactivo por dosificar .....	110
Dispersión de los coagulantes .....	111
Relación entre tipo de coagulación y dispersión	
de los coagulantes.....	112
Mezcla en el caso de coagulación por adsorción-desestabilización.....	112
Mezcla en el caso de coagulación de barrido.....	113
Gradientes óptimos para mezcla rápida .....	114
Métodos para realizar la mezcla rápida .....	114
Cinética de la mezcla rápida .....	126
Mezcla rápida en tuberías a presión.....	131
Aglutinación de partículas.....	137
Concentración volumétrica del floc.....	138
Clasificación de los floculadores .....	140
Floculadores hidráulicos .....	140
Floculadores mecánicos.....	159
Floculador hiperbólico .....	171
Floculadores hidromecánicos .....	173
<b>CAPÍTULO 4 CONTROL DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN.....</b>	<b>181</b>
Sistemas de simulación del proceso de coagulación .....	182
Determinación de la dosis óptima de coagulante.....	183
Aparato de prueba de jarras .....	183
Turbidímetro.....	184
Comparador de color.....	185
Medidor de pH.....	185
Cristalería .....	185

Reactivos.....	186
Termómetro .....	186
Procedimiento del ensayo .....	186
Determinación de la velocidad de sedimentación de las partículas .....	194
Procedimiento.....	194
Determinación de la influencia del pH en la coagulación .....	196
Procedimiento.....	196
Determinación de la importancia de la mezcla rápida mediante ensayos de segregación .....	198
Procedimiento.....	198
Determinación de la influencia que la concentración de la solución de coagulantes tiene en la coagulación.....	199
Procedimiento.....	199
Determinación de gradiente y tiempo de detención óptimos .....	201
Procedimiento.....	201
Generalización de los datos de pruebas de jarras.....	205
Comparación entre pruebas de jarras y el comportamiento en la planta de tratamiento .....	207
Procedimiento.....	208
Evaluación de la eficiencia de los ayudantes de coagulación .....	211
Procedimiento.....	212
Otros sistemas de control de la coagulación-floculación .....	213
Determinación de las cargas electrostáticas.....	213
Sistemas de medida de la filtrabilidad del agua.....	218
<b>CAPÍTULO 5. TEORÍA DE LA SEDIMENTACIÓN DEL AGUA.....</b>	<b>221</b>
Clasificación de los procesos de clarificación por sedimentación .....	222
Decantación de partículas aisladas en un fluido en reposo .....	224
Fuerzas actuantes.....	224
Velocidad terminal de sedimentación.....	226
Caso de partículas esféricas.....	227
Valores del coeficiente de arrastre CD.....	227
Partículas no esféricas.....	229
Decantación de partículas aisladas en un fluido en movimiento .....	235
Divergencias entre el tanque ideal y los tanques reales.....	239
Sedimentación de flujo vertical.....	242
Conceptos básicos sobre el manto de lodos .....	242
Velocidad de asentamiento de la interfase.....	244
Porosidad y concentración del manto.....	245
Influencia del tipo de floc afluente .....	247
Sedimentación de flujo laminar o alta rata.....	249
Consideraciones sobre el régimen de flujo.....	253
Ecuación básica de cálculo .....	255
Interpretación de la ecuación de velocidad crítica .....	256
Relación ángulo-eficiencia.....	258
Relación profundidad-eficiencia .....	260
Eficiencia de los decantadores de placas .....	261

<b>CAPÍTULO 6. DISEÑO DE SEDIMENTADORES.....</b>	<b>267</b>
Sedimentadores convencionales .....	267
Zona de sedimentación–factores que deben considerarse.....	267
Zona de entrada.....	271
Zona de salida .....	276
Zona de lodos.....	280
Sedimentadores de flujo vertical y manto de lodos.....	281
Desarrollo de los sedimentadores de flujo vertical .....	281
Clasificación de los sedimentadores de manto de lodos.....	283
Cargas superficiales y velocidades ascendentes.....	283
Unidades con manto de suspensión hidráulica.....	284
Unidades con manto de suspensión mecánica .....	285
Eficiencia de los clarificadores de manto de lodos.....	288
Sedimentadores de flujo laminar .....	291
Cargas superficiales.....	291
Materiales de construcción y forma.....	292
Sistema de entrada.....	293
Sistema de salida.....	297
Zona de Lodos .....	299
Otros sistemas de decantación de alta rata .....	300
Sedimentación acelerada con placas profundas .....	303
Aspectos generales.....	303
Método de cálculo .....	304
Comparación de las dos tecnologías .....	307
Placas angostas.....	307
Placas profundas.....	307
Conclusiones .....	308
Manejo de lodos.....	309
Tratamiento y disposición final del lodo.....	311
Volumen total de lodos sedimentados que se esperan .....	311
Volumen del lodo después de compactado en los espesadores con ayuda de polímeros.....	312
Peso del lodo seco.....	312
Disposición final de los lodos .....	314
Ejemplo de cálculo .....	316
Tipos de evacuación.....	318
Diseño de tolvas.....	328
Métodos de descarga intermitente .....	339
Velocidades mínimas de arrastre de lodos tuberías de extracción .....	340
Flotación.....	341
Introducción.....	341
Descripción del proceso .....	341
Teoría de la flotación.....	342
Diseño de las unidades de flotación.....	344
Resultados de la flotación.....	346



<b>CAPÍTULO 7. CONTROL DEL PROCESO DE SEDIMENTACIÓN</b> .....	349
Ensayos para determinar la eficiencia.....	349
Estudio estadístico de los datos de comportamiento de los sedimentadores .....	354
Interpretación de resultados obtenidos en el análisis estadístico de los datos de operación de los clasificadores de La Atarjea.....	361
Estudio de los depósitos de lodo.....	362
a) En tanques de flujo horizontal .....	362
b) En tanques de flujo vertical .....	365
Determinación del volumen y peso seco de los lodos producidos.....	371
Paso primero .....	371
Paso segundo.....	372
Paso tercero .....	372
Columnas de sedimentación .....	372
Pruebas de trazadores.....	374
Antecedentes .....	374
Sustancias trazadoras .....	374
Procedimiento.....	375
Análisis de la curva .....	377
Interpretación de los resultados .....	379
Limitaciones de las pruebas de trazadores.....	380
 <b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	 383

# ÍNDICE DE FIGURAS

## Capítulo 1. Conceptos básicos sobre química del agua

Figura 1.1. Estructura y dimensiones de la molécula de hidrógeno.....	4
Figura 1.2. Estructura molecular del agua .....	5
Figura 1.3. Posición de las moléculas de hielo que corresponde a tres hipótesis distintas	5
Figura 1.4. Representación octaédrica de los iones hidratados de Aluminio $Al(H_2O)_6^{+++}$ .....	6
Figura 1.5. Tamaño de las partículas suspendidas .....	12
Figura 1.6. Clasificación de los coloides.....	13
Figura 1.7. La forma más común de partículas coloidales.....	14
Figura 1.8. Representación del coloide .....	16
Figura 1.9. Potencial z.....	17
Figura 1.10. Idealización del fenómeno de adsorción .....	20
Figura 1.11. Reemplazo isomórfico .....	22
Figura 1.12. Adsorción preferencial.....	22

## Capítulo 2. Teoría de la coagulación del agua

Figura 2.1. Interferencia de ondas.....	26
Figura 2.2. Esquema simplificado de interferencia y diseminación de la luz.....	27
Figura 2.3. Ángulo de la máxima diseminación de la luz .....	28
Figura 2.4. Turbiedad de una muestra de agua negra sedimentada y filtrada (según S. Hannah).....	28

Figura 2.5. Átomo de aluminio.....	30
Figura 2.6. Átomo de silicio .....	30
Figura 2.7. Formas de arcillas vistas al microscopio (dibujos hechos a partir de microfotografías).....	30
Figura 2.8. Formas de arcillas vistas al microscopio (dibujos hechos a partir de microfotografías).....	31
Figura 2.9. Nomogramas de Singley, Harrtas, Maulding para la determinación del color con el pH.....	34
Figura 2.10. Velocidad de sedimentación de partículas discretas $S=II.65$ , $T=15^{\circ}C$ .....	35
Figura 2.11. Helmholtz.....	37
Figura 2.12. Stern.....	37
Figura 2.13. Gouy Chapman .....	37
Figura 2.14. Movimiento de partículas cargadas en un fluido .....	39
Figura 2.15. Fotografía con microscopio electrónico de bacterias coaguladas con sulfato de aluminio .....	41
Figura 2.16. Adsorción de contraiones en la partícula coloidal.....	42
Figura 2.17. Adsorción de polímeros en una partícula de caolinita.....	43
Figura 2.18. Zonas de coagulación de turbiedad según los estudios de Amirtharajah y Mills para distintas dosis de sulfato de aluminio a distinto pH .....	46
Figura 2.19. Diagramas de coagulación obtenidos experimentalmente para aguas de 200 UNT de turbiedad, 5 u.c. de color verdadero y 30 mg/1 de alcalinidad con pH inicial de 7.5 (según Campos y Di Bernardo).....	47
Figura 2.20. Porcentaje de turbiedad residual para distintas dosis de coagulantes aplicadas y distintos pH del agua mezclada .....	48
Figura 2.21. Dosis de Al(III) necesaria para remover el 50 % del color y la turbiedad del agua .....	49
Figura 2.22. Efecto de sulfato férrico en coagulación de aguas B y C a pH constante (Según Black y colaboradores) .....	51
Figura 2.23. Mínima dosis de sulfato férrico en función del color del agua cruda .....	51
Figura 2.24. Adsorción de color producida por los productos poliméricos de la hidrólisis de los coagulantes. ....	52
Figura 2.25. Dominios de la remoción de color (ácido húmico inicial, 4 mg/1 (100 cu); turbiedad, 27-30 UNT.) (Según Amirtharajah) .....	52
Figura 2.26. Ejemplos de polielectrolitos .....	57
Figura 2.27. Modos de acción de los polielectrolitos.....	58
Figura 2.28. Productos de hidrólisis formados por la reacción del ion de aluminio con el agua y la alcalinidad .....	60
Figura 2.29. Potencial Zeta de partículas de caolinita a diferentes pH (Según Hall y Packham).....	62
Figura 2.30. Coagulación con hierro .....	64
Figura 2.31. Perfil de prueba de jarras para Groton, Conn .....	68
Figura 2.32. Perfil de prueba de jarras para Tampa, Flo.....	69

Figura 2.33. Adsorción de coloides de COT en partículas de hidróxido de aluminio precipitado .....	69
Figura 2.34. Remoción de turbiedad y COT a pH=5.5 y pH=7.2.....	71
Figura 2.35. COT y dosis de sulfato de aluminio en Silver Lake Water .....	71
Figura 2.36. COT versus dosis de coagulantes metálicos, según Krasner y Gary .....	72
Figura 2.37. Turbiedad y COT para distintas dosis de sulfato de aluminio en Raleigh, N.H.....	73
Figura 2.38. Interacción entre dos partículas .....	75
Figura 2.39. Idealización de la turbulencia creada en la parte posterior de un cilindro introducido en un líquido .....	76
Figura 2.40. Velocidad contra el tiempo tomada en un punto específico del campo turbulento (según Casson y Lauler (1990) .....	76
Figura 2.41. Etapas en el desarrollo de la turbulencia de un flujo que pasa a velocidades crecientes alrededor de un cilindro (según Prandtl, 1927).....	76
Figura 2.42. Idealización de las escalas de turbulencia.....	79
Figura 2.43. Fotografías de un proceso de floculación a los 0,5, 10 y 30 minutos, según Hanson y Cleasby (1990) .....	80
Figura 2.44. Gradientes de velocidad para distintas potencias disipadas según sea la escala de la turbulencia que se considere .....	82
Figura 2.45. Interrelación teórica entre el diámetro de las partículas, la escala de la turbulencia y la eficiencia de la floculación.....	82
Figura 2.46. Esquematación de rollos de vórtices diferentes, que saturan la misma área .....	82
Figura 2.47. Efecto de la compartimentalización en floculadores .....	84
Figura 2.48. Valores de $N_0$ y $N_t$ para distintos gradientes de velocidad en floculación convencional .....	88
Figura 2.49. Valores de $N_t$ para distintos gradientes de velocidad en floculación lastrada.....	89
Figura 2.50. Diagrama de flujo de una planta con floculación lastrada.....	91

### Capítulo 3. Diseño de mezcladores y floculadores

Figura 3.1. Solubilidad en agua del $Al_2(SO_4) 14H_2O$ a diferentes temperaturas .....	94
Figura 3.2. Tanques para almacenamiento de sulfato de aluminio líquido .....	96
Figura 3.3. pH de las soluciones de sulfato de aluminio .....	98
Figura 3.4. pH de las soluciones de cloruro férrico $T=20^\circ C$ .....	99
Figura 3.5. Fotografía de los equipos de la planta Wiesner .....	101
Figura 3.6. Dosificador con orificio regulable .....	104
Figura 3.7. Dosificador con orificio variable y carga fija. Modelo Integrado.....	105
Figura 3.8. Dosificador de orificio fijo–modelo separado .....	106
Figura 3.9. Dosificador de orificio fijo–modelo integrado.....	106

Figura 3.10. Dosificador con el nivel constante y orificio regulable.....	106
Figura 3.11. Dosificador tipo Roto-dip .....	107
Figura 3.12. Dosificador con bomba centrífuga.....	107
Figura 3.13. Dosificador Roto-dip .....	108
Figura 3.14. Saturador de Cal .....	109
Figura 3.15. Dosificador para suspensión de cal.....	110
Figura 3.16. Efecto del cambio en el punto de aplicación del $Al_2(SO_4)_3$ y uso de difusores en Springwell's.....	113
Figura 3.17. Dimensiones de la canaleta Parshall .....	116
Figura 3.18. Canaleta Parshall con vertedero de regulación a la salida.....	120
Figura 3.19. Ensayos en canaletas Parshall que muestran lo poco que penetra la turbulencia en el agua cuando la lámina es alta y su penetración cuando es baja.....	121
Figura 3.20. Vertedero como mezclador .....	121
Figura 3.21. Vertedero de cresta ancha para mezcla rápida.....	122
Figura 3.22. Mezclador estático para inserción en el tubo.....	123
Figura 3.23. Perfil de concentración de coagulante en la dosificación.....	123
Figura 3.24. Mezclador en o de cresta ancha .....	124
Figura 3.25. Mezclador en canaleta Parshall con turbulencia extendida.....	124
Figura 3.26. Sistemas de inyección de coagulantes en el tubo influente .....	125
Figura 3.27. Retromezcladores mecánicos.....	125
Figura 3.28. Retromezcladores hidráulicos.....	126
Figura 3.29. Valores de K para diferentes anchos de tabiques reflectores.....	128
Figura 3.30. Gradientes de velocidad para diversos valores de la potencia unitaria disipada.....	129
Figura 3.31. Sección de la estructura de conexión hacia mezcla lenta .....	133
Figura 3.32. Estructura de mezcla rápida.....	134
Figura 3.33. Porcentaje de agua y volumen de floc para diferentes gradientes.....	139
Figura 3.34. Floculadores hidráulicos de tabiques.....	140
Figura 3.35. Fotografía de un floculador de tabique.....	142
Figura 3.36. Gradiente de velocidad en floculadores de tabiques.....	143
Figura 3.37. Gradiente de energía en mezcladores de flujo horizontal.....	144
Figura 3.38. Floculador de flujo vertical .....	147
Figura 3.39. Floculador tipo Alabama.....	151
Figura 3.40. Floculador Cox .....	152
Figura 3.41. Floculador medio poroso (Tomado de Richter).....	156
Figura 3.42. Resultados de la floculación con mallas .....	157
Figura 3.43. Floculadores mecánicos de la planta de La Reforma en Cali, Colombia ...	159
Figura 3.44. Floculadores de eje vertical .....	160
Figura 3.45. Floculador de paletas de eje horizontal .....	160
Figura 3.46. Diferentes arreglos de agitadores de paletas para floculadores.....	160

Figura 3.47. Floculadores de turbina .....	161
Figura 3.48. Diferentes diseños de floculadores.....	162
Figura 3.49. Floculadores de paletas horizontales con cámaras de paso inferior .....	165
Figura 3.50. Corte de un floculador giratoria.....	167
Figura 3.51. Floculador oscilante (Carter Company).....	169
Figura 3.52. Esquema de un agitador recíprocante.....	170
Figura 3.53. Floculador de vaivén .....	170
Figura 3.54. Turbina hiperbólica .....	171
Figura 3.55. CDF Turbina hiperbólica.....	172
Figura 3.56. Ubicación de la turbina, en la cámara de floculación.....	172
Figura 3.57. Esquema de un floculador hidromecánico .....	173
Figura 3.58. Floculadores recíprocantes de balancín.....	174
Figura 3.59. Esquema de floculador recíprocante con puntos mecánicos relevantes ....	176
Figura 3.60. Comportamiento de velocidades ascensionales en floculador recíprocante .....	176
Figura 3.61. Medio ciclo de operación .....	177

#### **Capítulo 4 Control del proceso de coagulación-floculación**

Figura 4.1. Aparato agitador para la prueba de jarras manual con iluminación de la base y una jarra removida.....	183
Figura 4.2. Aparato de prueba de jarras de operación automática (cortesía de Warp SAS) .....	184
Figura 4.3. Comparador para estimar el tamaño del floc producido en la coagulación (Según el WRA) .....	189
Figura 4.4. Gradiente de velocidad para un vaso de precipitado de 2 litros con o sin deflectores como se indica .....	189
Figura 4.5. Aparato para sifonar la turbiedad residual.....	190
Figura 4.6. Sistema de sifones .....	190
Figura 4.7. Gradientes de velocidad para jarras cuadradas .....	191
Figura 4.8. Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio para el agua del río de las Velhas (Belo Horizonte, Brasil) .....	192
Figura 4.9. Floc removido a distintos tiempos de sedimentación (río Rimac, Lima) .....	196
Figura 4.10. Efecto del pH del agua cruda para una misma dosis de sulfato de aluminio en la planta de San Antonio – Cali, Colombia .....	197
Figura 4.11. Prueba de segregación.....	199
Figura 4.12. Influencia de la concentración de la solución de coagulantes .....	201
Figura 4.13. Tiempos y gradientes de velocidad óptimos en floculación .....	204
Figura 4.14. Modelo matemático de Argaman y Kaufman.....	205
Figura 4.15. Remoción de turbiedad para diferentes gradientes.....	206
Figura 4.16. Remoción de turbiedad para diferentes gradientes.....	207

Figura 4.17. Determinación de potencias consumidas velocidad de giro de las paletas = 0,882 rpm.....	209
Figura 4.18. Control de proceso de coagulación-floculación.....	210
Figura 4.19. Comportamiento de polielectrolitos con el agua del río Rimac, Lima, Perú .....	213
Figura 4.20. Conjunto del equipo Zeta Meter .....	214
Figura 4.21. Celda de Briggs (vidrio).....	215
Figura 4.22. Celda de Riddick (plástico) .....	215
Figura 4.23. Celda para medir el potencial de corriente de una suspensión.....	217
Figura 4.24. Método de control automático de la coagulación .....	217
Figura 4.25. Celda para medir el potencial de corriente de una suspensión.....	218

### Capítulo 5. Teoría de la sedimentación del agua

Figura 5.1. Modelos de decantadores de floc según el sentido del flujo .....	223
Figura 5.2. Fuerzas actuantes sobre una partícula .....	224
Figura 5.3. Movimiento de la partícula en un fluido con alto NR.....	225
Figura 5.4. Coeficiente de arrastre .....	227
Figura 5.5. Diagrama de flujo para el cálculo de la velocidad de sedimentación .....	232
Figura 5.6. Velocidad de asentamiento y flotación .....	233
Figura 5.7. Diagrama de flujo .....	233
Figura 5.8. Sedimentación de una partícula que se mueve horizontalmente.....	235
Figura 5.9. Flujo oblicuo.....	236
Figura 5.10. Velocidad de sedimentación crítica .....	236
Figura 5.11. Sedimentación convencional .....	237
Figura 5.12. Velocidad de sedimentación .....	237
Figura 5.13. Sedimentación crítica.....	238
Figura 5.14. Corrientes térmicas de densidad (sección del tanque).....	240
Figura 5.15. Corrientes de densidad por concentración.....	241
Figura 5.16. Suspensión concentrada .....	244
Figura 5.17. Velocidad de Descenso .....	245
Figura 5.18. Porosidad de un manto de partículas suspendidas en función de la velocidad ascensional .....	248
Figura 5.19. Velocidad de asentamiento de la interfase vs para diferentes valores de vi .....	248
Figura 5.20. Velocidad de asentamiento de la interfase para mantos de lodos de diferente densidad.....	249
Figura 5.21. Sedimentación en decantadores .....	250
Figura 5.22. Relaciones geométricas en un decantador inclinado.....	251
Figura 5.23. Desarrollo del flujo laminar en la entrada de un tubo.....	253
Figura 5.24. Perfil de velocidades entre dos placas paralelas para un flujo que tiene una velocidad promedio de $v = 0,24$ cm/s espaciamento entre placas=5 cm concentración de lodos = 20 %.....	254

Figura 5.25. Comparación entre la carga equivalente calculada con la ecuación (V.54) y la turbiedad removida.....	259
Figura 5.26. Relación eficiencia vs. ángulo .....	260
Figura 5.27. Comparación entre la carga superficial calculada con la ecuación (V.54) y la turbiedad removida al variar $L/e$ .....	260
Figura 5.28. Relación eficiencia vs. $l/d$ .....	261
Figura 5.29. Comparación entre la eficiencia de un decantador convencional y uno de placas inclinadas, Guayaquil, Ecuador .....	262
Figura 5.30. Eficiencia del decantador de placas de Prudentópolis, Brasil, trabajando con una carga de $185\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ equivalente a $26\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ .....	263
Figura 5.31. Comparación entre la turbiedad obtenida en prueba de jarras y la que se consiguió en los decantadores de placas de Prudentópolis, Brasil .....	264
Figura 5.32. Eficiencia del sedimentador de placas en la planta de tratamiento de Cochabamba para una velocidad de flujo ascendente de $76\text{m}/\text{día}$ .....	264
Figura 5.33. Eficiencia de los decantadores de placas de Cochabamba, Bolivia, en mayo 1, 2 Y 3 de 1976 cuando hubo bruscas variaciones en la calidad del agua cruda.....	265
Figura 5.34. Turbiedad del agua cruda y decantada en sedimentadores de placas comparados con sedimentadores convencionales .....	266

## Capítulo 6. Diseño de sedimentadores

Figura 6.1. Sedimentadores horizontales .....	269
Figura 6.2. Velocidad horizontal $v_h$ para diferente relación: longitud-profundidad $L/h$ de la zona de sedimentación .....	270
Figura 6.3. Muros dobles .....	272
Figura 6.4. Para entradas sumergidas .....	274
Figura 6.5. Efecto del vertedero de salida en las líneas de flujo en un sedimentador ...	276
Figura 6.6. Estructuras de salida en sedimentadores rectangulares .....	278
Figura 6.7. Canaletas para el agua decantada .....	279
Figura 6.8. Puente barrelados de los sedimentadores de la planta de tratamiento de Tibitó, Bogotá, Colombia .....	281
Figura 6.9. Tanque Dortmund (1880).....	282
Figura 6.10. Clarificador con fondo cónico .....	284
Figura 6.11. Sedimentador de Bacchus Marsh .....	284
Figura 6.12. Sedimentador de BRNO, Checoslovaquia.....	285
Figura 6.13. Pulsador Degremont .....	286
Figura 6.14. El Accelator-Infilco, Inc. ....	287
Figura 6.15. Sedimentador .....	288
Figura 6.16. Flujo en un cono .....	290
Figura 6.17. Distribución de turbiedad en una planta de tratamiento para $4\text{m}^3/\text{s}$ sin múltiple de entrada.....	295



Figura 6.18. Distribución del flujo en un sedimentador de placas con velocidad de entrada de 0,82 cm/s .....	296
Figura 6.19. Esquema de un decantador nuevo de alta rata con canal distribuidor y tolvas .....	297
Figura 6.20. Diagrama de velocidades en la zona de lodos entre dos placas planas.....	298
Figura 6.21. Decantador de placas .....	298
Figura 6.22. Sedimentador de placas de flujo horizontal.....	300
Figura 6.23. Sedimentador de placas de flujo descendente .....	302
Figura 6.24. Sedimentadores de placas angostas comparados con sedimentadores de placas profundas (ejemplo de cálculo).....	304
Figura 6.25. Sedimentador laminar con placas profundas .....	308
Figura 6.26. Lecho de secado de lodos por vacío .....	318
Figura 6.27. Sistemas de remoción de lodos.....	320
Figura 6.28. Vista isométrica del Clari-Vac sifón flotante colector de lodos (sistema de dos colectores).....	321
Figura 6.29. Esquema de un sistema convencional.....	322
Figura 6.30. Configuración de barredor de lodo de fondo accionado con motor y cadena.....	322
Figura 6.31. Configuración de barredor de lodo de fondo accionado con brazo hidráulico (Nordic Water) .....	323
Figura 6.32. Lodo transportado en base húmeda en diferentes Ls .....	325
Figura 6.33. Lodo seco transportado a diferentes concentraciones.....	325
Figura 6.34. Sistema de recolección de lodos Trac-Vac.....	327
Figura 6.35. Configuración de tolvas.....	329
Figura 6.36. Definición de la esfera de influencia de la velocidad.....	330
Figura 6.37. Efecto de baja velocidad de arrastre de los orificios .....	331
Figura 6.38. Distribución del flujo para un múltiple extractor considerando distintos valores de R .....	332
Figura 6.39. Ejemplo .....	335
Figura 6.40. Diámetros y número de orificios para distintas longitudes de múltiple $v_a = 0,01$ m/s, $h = 4,0$ y $5,0$ , $R = 0,42$ a $0,45$ m.....	335
Figura 6.41. Dosis de sulfato de aluminio para diversas turbiedades del agua cruda en San Antonio (Cali), Guandú (Río), La Atarjea (Lima) y Cuenca (Cuenca).....	338
Figura 6.42. Válvulas para evacuación de lodos tipo PIC o de manguito.....	340
Figura 6.43. Esquema de un proceso de flotación .....	343
Figura 6.44. Cantidad de aire rico en nitrógeno disuelto en función de la presión y la temperatura.....	344

## Capítulo 7. Control del proceso de sedimentación

Figura 7.1. Columna de sedimentación.....	351
---	-----

---

Figura 7.2. $v_s$ = Velocidades de asentamiento.....	351
Figura 7.3. Control de proceso de sedimentación .....	353
Figura 7.4. Análisis estadístico de los datos de operación de los decantadores de la planta La Atarjea en Lima, Perú.....	360
Figura 7.5. Dosis de sulfato de aluminio para diversas turbiedades del agua cruda en San Antonio en Cali, Guandú en Río, La Atarjea en Lima y Cuenca en Cuenca.....	360
Figura 7.6. Decantador .....	363
Figura 7.7. Aparatos para determinar la topografía de los depósitos de lodos .....	364
Figura 7.8. Topografía de un perfil de lodos planta de tratamiento de Quito.....	365
Figura 7.9. Aparato para tomar muestras de un manto de lodos.....	366
Figura 7.10. Velocidad de asentamiento de la interfase de un manto de lodos .....	367
Figura 7.11. Aparato para tomar muestras del manto de lodos en decantadores de flujo vertical.....	368
Figura 7.12. Concentración del manto a varias velocidades ascensionales .....	369
Figura 7.13. Clarificadores experimentales: esquema de una planta piloto de sedimentación vertical .....	373
Figura 7.14. Resultado de la prueba de trazadores en los decantadores de la planta de tratamiento de San Antonio en Cali, Colombia.....	377
Figura 7.15. Control del proceso de sedimentación .....	378
Figura 7.16. Ensayo de trazadores (noviembre 13 de 1972) llegada del trazador a la salida del decantador .....	381



# FORWARD

*“Water is so essential both to the animal and vegetable creation, either for aliment or other purposes, that its importance probably surpasses every other substance amongst the great exuberance bestowed by the beneficent author of nature. The health, comfort and enjoyment of mankind constantly require a plentiful supply, and therefore, if utility be a just criterion of value, the inventions and operations to furnish it readily and abundantly in a clear and salubrious state, would seem to be entitled to peculiar attention”.*

W. Matthews 1835

In our profession we are sometimes favored by a practitioner, who devotes the effort to passing on to the rest of us, old and young, the benefits of his experience. We are even less frequently favored by one such professional who has devoted his life to an in-depth understanding of the factors that influence many of our decisions and designs, and has then put them into practice. Jorge Arboleda-Valencia is such a professional. His book conveys that depth of knowledge that few of us are fortunate enough to have.

I have long enjoyed the first edition and looked forward to this expansion of that text. I appreciate the effort it has required and commend its content to all who desire to learn more about our field and particularly to those who will use that knowledge for the improvement of our profession. His work has profoundly affected designs in Latin America and throughout the world. It is a great privilege to endorse its message.

**J. Edward Singley, Ph.D.**

President AWWA

Vice-President, James M. Montgomery, Inc.

Gainesville, Florida

## A MANERA DE PRÓLOGO

*“El agua es tan esencial tanto para la creación vegetal como animal, ya sea para alimento u otros propósitos. Su importancia probablemente sobrepasa a la de cualquier otra sustancia entre la gran variedad de ellas con que el autor de la naturaleza nos regaló. La salud, el bienestar y el placer de la humanidad requieren un abastecimiento de agua abundante y por consiguiente, si la utilidad es el único criterio de valor de las invenciones y actividades que tienen por objetivo suministrarla, fácil y generosamente, en un estado limpio y saludable, debe dársele una atención particular”.*

**W. Matthews 1835**

En nuestra profesión, a veces nos vemos favorecidos por alguien que dedica sus esfuerzos a pasar al resto de nosotros, viejos y jóvenes, los beneficios de su experiencia. Con menos frecuencia nos vemos favorecidos por un profesional que entrega su vida a conseguir una comprensión profunda de los factores que influyen muchas de nuestras decisiones y diseños y que los ha puesto en práctica.

**Jorge Arboleda Valencia** es uno de esos profesionales. Su libro nos entrega esa profundidad de conocimientos que pocos de nosotros tienen la fortuna de poseer.

Disfruté por largo tiempo de su primer texto y estoy ansioso de contar con la versión expandida del mismo. Aprecio el esfuerzo que ha requerido prepararlo y recomiendo su contenido a todos los que desean aprender más acerca de nuestro campo, y particularmente, a aquellos que usarán sus enseñanzas para mejorar su desempeño profesional. Su trabajo ha afectado profundamente los proyectos (de tratamiento de agua) en Latinoamérica y en el mundo. Por esta razón, es un gran privilegio para mí respaldar su mensaje.

**J. Edward Singley pH D.**

Presidente de la Asociación Americana de  
Acueductos y Alcantarillado AWWA

Gainesville, Florida

Febrero de 1992

# CONSIDERACIONES HISTÓRICAS

## **Primera etapa del desarrollo de la tecnología del tratamiento del agua (1850-1900)**

Antes del siglo XIX no se trataba el agua de consumo humano en la mayoría de los países del mundo porque se desconocía que muchas de las enfermedades del hombre son debidas a organismos patógenos. Las primeras investigaciones sobre la existencia de esos organismos fueron hechas por Francesco Redi en 1649 y después por Marc von Plencis en 1850, pero solo vino a ser aceptada la existencia de esos organismos cuando Louis Pasteur en 1852 demostró, de manera incuestionable, que todo proceso de fermentación orgánica se debe a la acción de organismos vivos y no a la generación espontánea. Para demostrarlo, expuso caldos hervidos en matraces provistos de un filtro que evitaba el paso de partículas de polvo y simultáneamente matraces que carecían de ese filtro, pero que poseían un cuello largo y curvo que dificultaba el paso del aire y las partículas de polvo hasta el caldo de cultivo; y observó que en estos no se presentaba fermentación y, por tanto, la fermentación no podía haber sido producida por miasmas, sino por microorganismos vivos. Mientras eso ocurría en Francia, en Londres el médico inglés John Snow descubría que la epidemia de cólera que sufría la ciudad se debía al bombeo del agua contaminada proveniente de un pozo.

Por eso, hasta principios de siglo XIX el único tratamiento que se le daba al agua en Europa y América era el filtrado casero en piedras porosas para disminuir la turbiedad o, en el mejor de los casos, el hervido, pues se consideraba que la calidad del agua de consumo era un problema doméstico y no de la comunidad. Sin embargo, en 1804, en Paisley, Escocia, ya se había construido una de las primeras instalaciones de filtros lentos para toda una población.

Sin embargo, según La Nier (citado en Arboleda, 2000), alrededor de 1800 ya había unos 16 sistemas públicos de abastecimiento de agua en los Estados Unidos, la mayoría de los cuales se usaban básicamente para la protección contra incendios, sin que se les hiciera ningún control de la calidad. Hubo que esperar hasta 1850 para que el número de sistemas llegara a 2000, los cuales aumentaron a 3350 en 1897 y solo en el lapso entre 1891 y 1897 fueron puestos en marcha 1400.

Como la tecnología del tratamiento de agua en esa época en la América del Norte aún era incipiente, en 1865 la municipalidad de San Luis (E. U.) comisionó a *James K. Kirkwood* para que viajara a Europa y estudiara en Inglaterra, Francia y Alemania los sistemas de filtración lenta en arena, que se estaban utilizando de tiempo atrás en el viejo continente. *Kirkwood* regresó en 1869 y procedió a escribir el primer tratado que se conoce dedicado enteramente a la filtración del agua. Si bien, su propuesta para construir filtros lentos en San Luis no fue atendida, su recopilación de técnicas europeas de tratamiento fue un importante avance en ese campo.

A principios del siglo XIX, el sistema más común de tratamiento del agua, tanto en Norteamérica como en Suramérica, era el de sedimentación simple. La filtración llegaría más tarde. Uno de los primeros construidos en las Américas fue el de Richmond, Virginia, en 1832, proyectado por Albert Stein, el cual fracasó. En 1872 la ciudad de Paughkeepsie, Nueva York, adoptó los diseños de filtros lentos que *Kirkwood* había hecho para San Luis y que resultaron muy exitosos. Estos mismos diseños fueron usados después en otras ciudades, pero en algunos casos fallaron debido a la alta turbiedad del agua cruda.

Para solucionar ese problema apareció el filtro rápido o “mecánico”, una innovación típicamente norteamericana, motivada por la mayor turbiedad de los abastecimientos en los Estados Unidos. El descubrimiento de que el medio filtrante podía lavarse, invirtiendo el flujo del agua para que entrara por abajo y fuera recolectada en unas canaletas arriba, en lugar de raspando las capas superficiales como en los filtros lentos, fue una idea revolucionaria y vigorosamente combatida al principio en Europa.

El primer filtro rápido exitoso de ese tipo lo construyó *Isaias Hyatt* (1835-1885) en 1885 para la ciudad de Somerville, New Jersey, usando un sistema de coagulación previa con percloruro de hierro. Él, un año antes, ya había obtenido la primera patente que se conozca para un proceso integrado de coagulación-filtración. Es de advertir que en esa época casi todos los diseños de filtros rápidos estaban bajo patente. *Hyatt* y *Clarck* tenían cerca de 60 de ellas en 1895. La multiplicidad de patentes fue tal que dio origen a muchos litigios entre los fabricantes, pues los filtros se parecían unos a otros debido a que en su mayoría estaban fabricados de la misma manera; o sea, dentro de un cilindro de acero o madera, no siempre impermeable, parcialmente lleno de arena y con tuberías de entrada y de salida para el agua, pero sin coagulación previa.

Por la misma época, a finales del siglo XIX, en Centroamérica y Suramérica, no se le hacía ningún tratamiento al agua en casi todas las ciudades de ese continente. Solo en el Cono Sur, los ingleses montaron en 1890 en algunas poblaciones filtros lentos, como los de Rosario, en Argentina, o los de Montevideo, en Uruguay, construidos por *The Montevideo Water Works Co.*



Sin embargo, las primeras plantas de purificación de agua completas contaban solo con *coagulación, sedimentación y filtración*. Así eran las de Luisville en 1898 y la de Little Falls, Nueva Jersey, diseñada por George Fuller en 1902, la cual sigue todavía en operación. Fue él uno de los pioneros más reconocidos en este campo y el principal promotor de la construcción de plantas potabilizadoras en Estados Unidos, donde no solo se instaló la de New Jersey, sino también la de Cincinnati y la primera de Nueva York a comienzos del siglo XX.

Un hecho muy importante de las postrimerías de ese siglo fue la fundación de la Asociación Americana de Acueductos (*American Water Works Association [AWWA]*), fundada por 21 miembros en 1881, en cuyas sesiones se presentaron algunos de los trabajos investigativos más importantes de aquella época. Por ejemplo, *Algunas propiedades de la arena y la grava* de Hazen de 1892 (citado en Arboleda, 2000), en donde definió lo que era el tamaño efectivo y el coeficiente de uniformidad tal como lo conocemos hoy.

En 1898, George Fuller (citado en Arboleda, 2000), publicó *La purificación del agua del río Ohio en Louisville, Kentucky*. Alen Hazen publicó en 1904 el artículo *On sedimentation*, (citado en Arboleda, 2000), donde sentó las bases de ese proceso que todavía se utiliza en nuestro tiempo, dando origen a un sinnúmero de trabajos posteriores como los de Camp en 1946 y los de Fair en 1952 (citados en Arboleda, 2000).

Por la misma época, la AWWA creó la Sección de Química y Bacteriología en la convención anual de Minneapolis, Minnesota, de 1913 (hoy División de Purificación del Agua), la cual desde entonces ha realizado una labor fundamental en ese campo. Por la misma época, en 1912 se creó en los Estados Unidos la Secretaría de Salud Pública (USPHS), la primera que existió en el continente americano y a la cual el Congreso de ese país le encargó vigilar la polución de las fuentes de agua.

El otro hecho importante de esa época fue la creación en 1902 de la Oficina Sanitaria Panamericana, la primera de su tipo en el continente americano. Esta ha prestado desde entonces un invaluable servicio al mejoramiento de la salud y a la prevención de las enfermedades en nuestro continente.

## **Segunda etapa del desarrollo del tratamiento del agua (1900-1950)**

El hecho señero del siglo XX en el campo de la salud fue el inicio de la desinfección del agua con cloro en los Estados Unidos. Al principio se usó hipoclorito de calcio con ese propósito porque aún no se producía el cloro líquido. En 1908 la ciudad de New Jersey fue la primera que comenzó a desinfectar el agua con cloro; le siguieron luego otras ciudades. En 1909 la compañía Electro Bleaching Gas Co. fabricó por primera vez *cloro líquido* y su primera aplicación fue hecha en Niágara Falls en 1912, pero la primera en una ciudad fue en Filadelfia en 1913.

Este sistema de desinfección no tardó en ser adoptado por el resto de las ciudades norteamericanas. Según Fair (1973), en 1913 siete de las 12 ciudades más importantes de América del Norte establecieron o perfeccionaron la cloración y solamente dos de ellas la demoraron hasta 1920. Poco después de la Segunda Guerra Mundial (1948), se estimaba

que 7.000 comunidades norteamericanas lo estaban usando rutinariamente. Esto produjo una disminución notable en la tasa de mortalidad por tifo, la cual era de 329 casos por 100.000 habitantes en 1860 en Chicago. En 1913, en las 12 ciudades más grandes de Estados Unidos, era de 13 casos por 100.000 habitantes, pero bajó hasta menos de 0.1 casos por 100.000 habitantes al final de ese periodo.

La desinfección del agua con cloro llegó a la América Latina con relativa rapidez quizás debido a los graves problemas sanitarios que existían en los abastecimientos. Por ejemplo, en Bogotá, Colombia, en 1918 (cinco años después que en Filadelfia) se iniciaron los estudios para clorar el agua de la ciudad, pero solo en 1920 la Junta de Saneamiento contrató al ingeniero sanitario Geo Bunker, uno de los más grandes promotores del tratamiento del agua en el norte de Suramérica, con el fin de que instalara y operara aparatos para desinfectar los abastecimientos de San Francisco, el Arzobispo, Rosales y Chapinero.

Esto produjo airadas polémicas en la prensa local entre defensores e impugnadores del sistema, pero la verdad fue que ya en 1921 todas las aguas de la ciudad estaban cloradas y la mortalidad por tifo, que era de más de 600 por 100.000 habitantes en 1901, pasó a 50 por 100.000 al año siguiente de haberse establecido este proceso (1921).

Algo similar sucedió en Caracas, Venezuela, donde la cloración se inició en 1934, catorce años más tarde que en Bogotá, con unos *hipocloradores* traídos por el comerciante francés Roche. Por ataques de la prensa, se suspendió su aplicación en 1935 para luego reiniciarla años más tarde con carácter permanente, bajo la dirección del ingeniero Geo Bunker, quien en 1936 había pasado de Bogotá a Caracas, contratado por la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas de Venezuela.

La tecnología del tratamiento avanzó notablemente entre 1913 y 1946. Se produjo una gran cantidad de información técnica que fue configurando nuestros actuales conocimientos. Uno de los procesos más estudiados fue el de la coagulación. Deben citarse, entre los clásicos en ese tema, los trabajos de Marian Von Smoluchowski de 1917 (citado en Arboleda, 2000), quien estableció no solo las ecuaciones que describen el modelo matemático para la aglutinación de partículas tan utilizado en estudios posteriores, sino las que describen el Movimiento Browniano en conjunto con Einstein. También están los de Camp y Stein en floculación (1943, citado en Arboleda, 2000), los cuales introdujeron un nuevo concepto en el lenguaje técnico de la ingeniería sanitaria con la formulación del *gradiente de velocidad*. Así mismo, están también los estudios de Langelier (1921, citado en Arboleda, 2000), que demostraron la necesidad de hacer un acondicionamiento del floc antes de sedimentarlo, además de los estudios de Therioult y Clark (1923, citado en Arboleda, 2000), que establecieron la importancia del punto isoeléctrico en la coagulación y la influencia del pH en dicho proceso.

Igualmente, Levy y Ellms (1927, citado en Arboleda, 2000) publicaron un trabajo sobre el resalto hidráulico como sistema de mezcla rápida y Willcomb (1932, citado en Arboleda, 2000) sobre los aspectos mecánicos de la floculación en los que presentaban un sistema de clasificación del floc llamado hoy índice de *Wilcomb*. Debe mencionarse, además, la aparición en esta época de los aparatos para realizar la prueba de jarras desarrollados separadamente por Baylis y Black entre 1918 y 1920, indispensable herramienta de laboratorio usada hasta el presente.

El periodo posterior a la Segunda Guerra Mundial fue, para la ingeniería sanitaria, como para casi todas las otras ciencias, una de las épocas de mayor progreso gracias a los descubrimientos que los avatares de la guerra obligaron a desarrollar, como la computación, el helicóptero, el radar, los cohetes, los teléfonos inalámbricos, la energía nuclear, el microondas, los relojes de pulsera, las cremalleras, el tractor y muchos más, así como drogas tan conocidas como la penicilina.

Típicos de la posguerra fueron los nuevos libros sobre tratamiento del agua, entre los cuales el más célebre es *Water Supply and Waste Water Disposal* de Fair y Geyer (1954, citado en Arboleda, 2000) que marcó un hito en la historia de la enseñanza de las ciencias sanitarias, así como el *Unit Processes and Unit Operations* de Livil B. Rich (1959, citado en Arboleda, 2000), los cuales constituyeron el apoyo que la ingeniería química comenzó a prestar en ese momento y ha seguido prestando al campo de la potabilización del agua.

Además, cabe destacar entre las obras capitales de este periodo el *Manual de prácticas recomendadas para el saneamiento del agua* del Servicio de Salud Pública de los Estados Unidos (citado en Arboleda, 2000) y los llamados *Ten States Standards* que sirvieron de guía (a veces no la mejor guía) para el diseño de plantas de tratamiento en los Estados Unidos e influyeron colateralmente en América Latina.

Por la misma época, se introdujeron los conceptos básicos de la química coloidal al proceso de coagulación del agua. La publicación de textos como el de K. J. Mysels (1952, citado en Arboleda, 2000) *Introduction to Colloidal Sciences* o el de Verwey y Overbeek (1948, citado en Arboleda, 2000) *Theory of the Stability of the Lyophobic Colloids* permitieron dar una interpretación más racional a los fenómenos de desestabilización y aglutinación de partículas.

Un aporte renovador en ese periodo fue la introducción de los polielectrolitos sintéticos orgánicos poco después de la Segunda Guerra Mundial, que vinieron a reemplazar a la *silica activada*, perfeccionada por Baylis, como ayudante de floculación. Los primeros trabajos sobre aplicación de polielectrolitos a la coagulación de arcillas fueron hechos a principios de la década del cincuenta, como los de R. A. Ruehrwein de 1952 o el de Michaels de 1954. Un sinnúmero de otros autores publicó posteriormente trabajos similares sobre el mismo tema, tales como Black (1959), Cohen (1958), Conway (1955), Hudson (1954), etc., citados en Arboleda (2000).

Otra de las innovaciones de entonces fue la sedimentación de flujo vertical y manto de lodos, practicada en Europa desde principios del siglo XX cuando se construyó el tanque tipo Dormund, que después se trasformó en una multiplicidad de sistemas, patentados o no, tanto en Europa como en las Américas.

Los avances en la filtración entre 1946-1960 no fueron menos notables pues en esa época se iniciaron muchos de los cambios tecnológicos que hoy tenemos. Los estudios de Baylis de 1950 y 1956 sobre altas tasas de filtración, experimentadas en la planta de tratamiento de Chicago con el uso de una capa de antracita sobre la arena, abrieron la puerta a los lechos filtrantes dobles o triples que usamos hoy. Las investigaciones de Baylis y Hudson en 1959, sobre la conveniencia de suprimir el funcionamiento de los controladores de flujo

en los filtros, iniciaron la modalidad de la filtración con rata variable decreciente propuesta inicialmente por John Cleasby y Herber Hudson, sistema que se usa en la actualidad.

Los estudios sobre la eficiencia de la desinfección se intensificaron en el Centro Taft de Ingeniería Sanitaria de los Estados Unidos, en donde un grupo de biólogos encabezados por Paul Kabler, Shin Chang, Harold Clarke y Norman Clark, entre otros, publicaron entre 1955 y 1960 una serie de artículos sobre el efecto del cloro a distintas dosis en los microorganismos patógenos del tipo de las bacterias coliformes, las amibas y los nematodos, con lo cual sentaron las bases de la tecnología de desinfección del agua. Por la misma época, Palin en Inglaterra desarrollaba el método de la ortotolidina neutra en 1954 y estudiaba el uso del DPD para la identificación de los diferentes productos de la hidrólisis del cloro en el agua.

En América Latina el período entre 1946-1960 fue de muchas realizaciones, en especial en el campo de la construcción de plantas de tratamiento, en la mayoría de las grandes capitales del continente, gracias al apoyo de las entidades crediticias como el BID y el Banco Mundial que aportaron los fondos necesarios para ellas.

En 1965 la Oficina Sanitaria Panamericana creó en Lima, Perú, el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), cuyo primer director fue Odyer Esparandío y cuyos primeros especialistas fueron John Blunfield, Walter Castagnino, Carl Bartone, Clif Kirchner, Fabián Yanes y Jorge Arboleda; quien en 1969 publicó un *Manual de tratamiento de agua*, el cual, posteriormente, tendría tres ediciones con el título de *Teoría y práctica de la purificación del agua*, siendo la presente la cuarta edición del mismo libro. Hoy el CEPIS quedó reducido a la distribución de material técnico a nivel internacional.

## ENFOQUE DEL PRESENTE LIBRO

Este libro sigue teniendo el mismo enfoque del Manual No. 13, publicado antes por el CEPIS en 1973. Continúa, por eso, incluyendo la mayoría de los temas de las tres ediciones anteriores, pero ajustándolo en algunos aspectos a las nuevas realidades del siglo XXI. Conviene anotar que, en lo esencial, la tecnología de la purificación del agua en los cinco procesos básicos de mezcla, floculación, sedimentación, filtración y desinfección no ha cambiado mucho en las últimas décadas. La mayor o la menor mecanización de las plantas sigue siendo objeto de debate porque los mismos resultados se pueden conseguir con los procesos altamente mecanizados y con los menos mecanizados; ambos, bien operados, trabajan con la misma eficiencia. Al fin y al cabo, los filtros con galería de tubos y lavado a presión con tanque elevado o bombas son tan eficientes como los filtros de lavado mutuo y vertedero general de rebose sin galería de tubos, que son más económicos. Si los procesos básicos previos de coagulación, floculación y sedimentación son eficientes, poco importa si los filtros tienen galería de tubos o no; pero, en cambio, por lo común los costos de construcción y mantenimiento en los mecanizados son mucho más altos que en los no mecanizados.

Sean mecanizados o no, lo esencial es que el diseño sea lo *más simple posible* siempre y cuando pueda producir un efluente que cumpla con todos los estándares de calidad, incluso en lo tocante a la reducción de compuestos orgánicos y eliminación de partículas suspendidas que integran la turbiedad o el color, lo cual disminuye la eficiencia de los desinfectantes en la inactivación de bacterias, protozoarios y virus. Esto, por supuesto, sin desconocer la importancia de otros aspectos de la purificación del agua, como lo son el ablandamiento y la remoción del hierro y el manganeso, así como la alcalinización, la

prevención de la corrosión y demás tratamientos complementarios que no se tratan en este libro porque se puede encontrar amplia información en otros textos.

No es lo mismo, sin embargo, proyectar plantas de tratamiento para países de población estática o de muy lento crecimiento, como son las de los países industrializados, que para los países con rápido incremento demográfico que a veces duplican el número de habitantes urbanos de una década a otra y que, por tanto, se ven precisados a construir cada cierto tiempo nuevos sistemas de abastecimiento o a ampliar los existentes.

El ingente esfuerzo económico que esto implica fuerza a estos últimos a buscar tecnologías de bajo costo y fácil maniobrabilidad que no son prioritarias para las naciones ricas poseedoras de amplios recursos financieros, que con menos frecuencia los tienen que invertir en plantas de purificación de agua. Para estas, lo primordial es la alta contaminación industrial de sus fuentes, lo que los obliga a ir más allá de la simple remoción de partículas (minerales o biológicas). Esta es la razón por la cual sus tecnologías no siempre se ajustan a los requerimientos de los países en desarrollo, poniendo en nuestros hombros la responsabilidad de desarrollar nuestros propios enfoques al problema de la clarificación del agua.

No obstante los avances conseguidos en las últimas décadas, tenemos que reconocer que todavía en el tratamiento del agua estamos ligados a los fenómenos naturales conocidos desde épocas remotas, tales como la decantación de las partículas con mayor densidad que el agua y la percolación de ellas a través de lechos porosos granulares, semejantes a la que se efectúa comúnmente en suelos arenosos. Todo lo que le hemos agregado en realidad a estos procesos es la coagulación química o aglutinación de partículas coloidales no sedimentables económicamente, las cuales constituyen una carga demasiado grande para los filtros, si previamente no se remueven sedimentándolos con la ayuda de coagulantes y procoagulantes.

Es alrededor de estas tres ideas fundamentales (coagulación, sedimentación y filtración) como se construyó la totalidad de nuestra sofisticada tecnología de remoción de partículas.

Erróneo, sin embargo, sería pensar que, no habiendo nuevos procesos básicos distintos a esos tres, se puede seguir utilizando hoy en día los mismos conceptos que teníamos en las décadas anteriores a la del ochenta del siglo pasado; porque sucede que en estos últimos treinta años se ha estado acelerando la revolución tecnológica iniciada en los países más desarrollados del mundo, inducida, a veces, por la urgencia de solucionar algunos de sus problemas industriales más complejos. Por fortuna, las soluciones encontradas a estos problemas en esos países, sin proponérselo sus inventores, han podido ser, en muchos casos, adaptadas a las necesidades de los países en vía de desarrollo.

Como ejemplo de este tipo de soluciones, se podría citar el uso de lechos filtrantes dobles de arena y antracita que en su etapa inicial fueron usados por primera vez en la planta de desperdicios atómicos de Hatford, Estados Unidos, con el propósito de filtrar, de la forma más eficientemente posible, las partículas radiactivas que contenía el agua de enfriamiento de los reactores nucleares. Su utilización, sin embargo, se extendió luego al filtrado de cualquier tipo de partículas en las plantas de potabilización del agua al permitir la expansión de la capacidad de filtración, hasta en un 200 % o más por encima de su valor nominal, sin ninguna o con muy pocas modificaciones estructurales.

Algo similar podría decirse de las placas inclinadas para decantación. Estas fueron usadas previamente por la industria química debido a la variedad de polímeros o polielectrolitos que fueron inicialmente residuos de las industrias plásticas y que hoy se aplican en todas las estaciones de tratamiento del mundo.

Huelga advertir que la industria de la potabilización del agua está ligada más íntimamente a los factores sociopolíticos de las comunidades que las otras. Esto induce a ajustar las soluciones que se proyecten a las condiciones locales de cada colectividad a fin de conseguir que tengan buena posibilidad de éxito. Si esto no se hace o se hace mal, el castigo con frecuencia es el fracaso de los proyectos como repetidas veces se ha observado cuando esto no se hace.

El mayor progreso socioeconómico de los países desarrollados y su avanzada economía de consumo fuerza a su industria de potabilización a producir plantas de tratamiento con:

- Considerable grado de automatización.
- Empleo masivo de equipos.
- Preferencia por las soluciones mecánicas sobre las hidráulicas.

Este criterio de diseño ha dado resultados aceptables a través de más de medio siglo en esos países y ha sido exportado, juntamente con los equipos, a las regiones en vía de desarrollo en los que han creado dificultades. Donde menos problemas han producido es en los grandes centros urbanos de los países en desarrollo cuando disponen de recursos similares a los de las naciones desarrolladas. En cambio, en zonas de menor avance económico, las fallas de esta tecnología son evidentes, ya que las condiciones socioeconómicas imperantes allí son distintas y, en consecuencia, el diseño debe regirse por normas diferentes. En general, en las zonas con menos desarrollo se requiere proveer ya sea de una automatización total, incluso con control a distancia de los procesos, o control manual *in situ* de los procesos, con empleo moderado de equipos y utilización preferencial de materiales locales, siempre y cuando sean de buena calidad.

## Soluciones a los problemas planteados

Los proyectos de purificación de agua tienen cuatro componentes:

- a. el fisicoquímico.
- b. el mecánico.
- c. el hidráulico.
- d. el bacteriológico.

Estos cuatro componentes, si bien están interrelacionados, pueden analizarse en forma separada.

## Componentes fisicoquímicos del proyecto

En todo proyecto de planta de tratamiento, los factores fisicoquímicos limitan las soluciones posibles que pueden adoptarse. Estos factores se refieren a los procesos químicos y

físicos que hay que realizar para transformar determinada calidad de agua cruda en una especificada calidad de agua tratada y que cumpla con todas las normas fisicoquímicas de potabilidad establecidas en el país donde se construyen.

Básicamente, estos comprenden la adición de determinadas sustancias químicas que reaccionan con la molécula del agua y los iones presentes en ella para coadyuvar a remover las impurezas que contiene. En este campo es bien poco lo que se puede innovar o cambiar. Los mismos procesos tienen que ser usados en los países ricos que en los pobres, en las ciudades que en las zonas rurales, ya que el comportamiento químico del agua es universal. Lo más que se puede hacer es evitar, cuando resulta viable, determinados procesos que no tienen relación con el aspecto salud, por costosos o por que requieren un control químico sofisticado. Pero, una vez que se seleccione un cierto proceso, hay que realizarlo con la tecnología disponible, sin tratar de hacer simplificaciones que no suelen tener éxito y confiando más en la suerte que en los conocimientos que tenemos sobre la materia.

Por ejemplo, si se proyecta un proceso de coagulación con sulfato de aluminio, no cabe hacerle modificaciones. Hay que dispersar adecuadamente los coagulantes, hay que darles tiempo para que reaccionen y formen los flóculos y hay que separar luego las partículas por decantación y filtración. Cualquiera que sea la región donde se proyecte tal proceso debe hacerse en la misma forma.

Igual podría decirse de los procesos de floculación, sedimentación y filtración en medios granulares porosos. Los mecanismos de remoción de partículas en ellas actúan de la misma manera en cualquier parte del mundo y, por tanto, las velocidades máximas y mínimas del flujo, la adhesividad de las partículas de acuerdo con el coagulante primario que se use y los demás aspectos del tratamiento son iguales en todas partes y deben incorporarse así en los diseños.

Tal es la razón por la cual se ha puesto buen cuidado en desarrollar extensamente en este texto las teorías de la coagulación, la floculación, la sedimentación, la filtración y la desinfección, ya que, sin el conocimiento a fondo de sus mecanismos de acción fisicoquímica y bacteriológica, es imposible producir un buen diseño o realizar una buena operación.

## Componentes mecánicos

Se refieren a la manera como se proyecten los equipos para dosificación de sustancias químicas, medidas de niveles y caudales, accionamiento de válvulas, transporte de líquidos y control y registro de parámetros fisicoquímicos. Es en este aspecto en donde el proyectista de los países en vía de desarrollo puede utilizar un criterio distinto al de los países industrializados. Podrían establecerse al respecto los siguientes lineamientos generales:

1. Preferencia por la operación directa de válvulas y compuertas en lugar del accionamiento hidráulico o neumático de control remoto donde no se cuente con fluido eléctrico. Si se cuenta con este, debería escogerse el accionamiento eléctrico.
2. Determinación de flujos en elementos abiertos tales como vertederos y canaletas Parshall, en lugar de tubos Venturís que requieren sistemas de medida de presión diferencial, la cual es más complicada que la simple observación de niveles y la transmisión eléctrica de esos niveles.



3. Preferencia por dosificadores gravitacionales y en solución de sustancias químicas, sobre los dosificadores en seco que utilizan coagulantes en polvo, por ser estos más costosos, más sofisticados e ineficientes desde el punto de vista de la efectividad de la dispersión de los químicos en el agua. Sin embargo, a veces es necesario usar bombas dosificadoras para polielectrolitos o coagulantes líquidos.
4. La instrumentación debe planearse para que cumpla con el objetivo básico de facilitar el control de aquellos valores sobre los que es indispensable mantener una vigilancia continua. No se deben instalar instrumentos que el personal de operación no está interesado en mantener, porque no les hacen falta o porque pueden reemplazarlos por sistemas de observación visual más simples.
5. Preferencia por válvulas de mariposa en lugar de compuertas o válvulas de compuerta, porque tienen a la larga menos problemas de operación y mantenimiento cuando su uso es muy frecuente.
6. Reemplazo, en donde sea posible y cuando su uso no sea diario, de válvulas de toda clase por compuertas de tipo superficial (*stop logs*) de bajo costo.
7. Transmisión de señales por sistemas eléctricos preferiblemente antes que hidráulicos o neumáticos que requieran el uso permanente de bombas o compresores.
8. Manejo de sustancias químicas dentro de la planta en sentido horizontal, con depósitos a un solo nivel, para evitar el transporte mecánico vertical de dichas sustancias químicas.

## Componentes hidráulicos

Se refiere a la manera como se proyecta el flujo de agua que circula por los tanques y conductos o tuberías a los diferentes procesos. Puede hacerse con sistemas abiertos o cerrados, con sentido horizontal o vertical, por gravedad o por bombeo.

Es en este otro aspecto del proyecto en donde se pueden realizar significativas economías.

Al respecto, se podrían mencionar las siguientes:

1. Cuando sea posible, debe buscarse proyectar sistemas que trabajen enteramente por gravedad, evitando los bombeos de agua o de sustancias químicas.
2. Debe preferirse la mezcla hidráulica para dispersión de coagulantes en vez de la mecánica, por ser la primera más simple y más eficiente y no depender de equipos que pueden fallar.
3. Emplear preferentemente floculadores hidráulicos de tabiques, de flujo helicoidal o de tipo Alabama o Cox sobre los mecánicos. Sin embargo, debido a la limitación creada por la invariabilidad de estos sistemas, la floculación hidráulica resulta inconveniente a veces cuando la calidad del agua es muy variable y debe recurrirse a la mecánica.
4. Preferir métodos de decantación acelerada con placas sobre los de decantación en manto de lodos o en decantadores horizontales, esto debido al menor costo de los primeros y a su más fácil manejo. El sistema de alta rata combina la economía de espacio de los decantadores de manto de lodos con la fácil maniobrabilidad de los decantadores de flujo horizontal.

5. Filtrar siempre en medios dobles de arena y antracita o arena antracita y granate (en lugar de arena sola) para disminuir las áreas filtrantes, abaratar los costos de construcción y permitir con más facilidad el lavado mutuo de los filtros.
6. Eliminar todo control mecánico del proceso de filtración, regulando el flujo solamente por orificios o por vertederos colocados en el efluente del filtro. Esto implica el uso de ratas declinantes de filtración.
7. Lavar los filtros con el flujo proveniente de las otras unidades, lo que siempre será más económico que usar tanques elevados o bombas.
8. Proyectar sistemas de canales de concreto tanto para la introducción del agua al filtro como para evacuar el efluente y el agua proveniente del lavado. La supresión de tuberías elimina todas las complicaciones de las galerías de conductos en los filtros y simplifica considerablemente la operación del sistema, al hacer posible la utilización de válvulas de mariposa de accionamiento directo o compuertas superficiales (*stop logs*) en la operación de los filtros, todo lo cual se puede automatizar si se considera necesario a menor costo que con las plantas tradicionales.

## Componentes bacteriológicos

El tratamiento del agua debe ser tal que después de este no contenga microorganismos patógenos ni sustancias tóxicas o nocivas para la salud. Por tanto, el agua debe cumplir con las normas bacteriológicas y fisicoquímicas establecidas en cada país para que pueda ser considerada potable.

Desde el punto de vista bacteriológico, se ha establecido que no debe mostrar la presencia de *E coli*. Esta regla no tiene en cuenta los virus entéricos ni los protozoarios como la *Giardia lamblia* y el *Cristosporidium*, que pueden existir en el agua y que son peligrosos para la salud. La dificultad que entraña el aislarlos y detectarlos hace que hasta ahora, en el control rutinario de las plantas de tratamiento, no se hagan pruebas para constatar su presencia.

Hay que diferenciar entre la calidad del agua que se suministra por medio de una red de distribución a la comunidad y la que no se suministra en esta forma, partiendo del principio de que a esta última le resulta impracticable mantener los mismos patrones de calidad que a la primera. Debe también observarse que la calidad del agua que se produce en la planta no necesariamente es la misma que la que se distribuye en la red, por cuanto pueden presentarse contaminaciones en ella. Para eso se debe:

1. Mantener una presión suficientemente alta en toda la red, como para evitar la succión de líquidos contaminantes.
2. Disponer de equipos de cloración de emergencia.

El agua dentro de la red de distribución no debe tener contaminaciones que desmejoren la calidad, en vista de lo cual recomiendan que:

1. En el curso de un año, el 95 % de las muestras no deben contener ningún germen coliforme en 100 ml.

2. Ninguna muestra debe dar positiva para *E. coli* en 100 ml.
3. En ningún caso han de hallarse gérmenes coliformes en 100 ml. de dos muestras consecutivas.

## Desarrollo progresivo de las metas de potabilidad del agua

Las metas establecidas sobre la calidad del agua que deben producir las plantas de tratamiento se han ido modificando y haciéndose cada vez más estrictas a lo largo de los años. Así:

En el primer periodo de comienzos del siglo XX, lo que se pretendía era básicamente disminuir lo más eficientemente posible la turbiedad del agua hasta valores inferiores a 10 o 5 UNT y destruir con cloro todos los patógenos.

En el segundo periodo (que comienza en la década del 1970), se estableció bajar la turbiedad a valores inferiores a 5 UNT y el color inferior a 10 UC; inactivar la totalidad de los coliformes y los protozoarios y disminuir los compuestos orgánicos hasta una DBO inferior a 10 ppm. En la América Latina de esa época se buscó construir las PTP en la forma más simplificada posible, prefiriendo el control manual a la mecánica de todos los procesos y por lo mismo usando poca o ninguna instrumentación por ser muy costosa y poco confiable en ese entonces. Esta tendencia no es necesaria aplicarla en nuestros días.

El tercer periodo es el que estamos viviendo en la actualidad. En este, la tendencia es a exigir menos de 1 UNT de turbiedad en el agua filtrada para garantizar la remoción de *guardias cristoporidium*, disminuir la DBO por debajo de 10 UNT y buscar la inactivación no solo de las bacterias patógenas, sino también de todos los protozoarios.

Los capítulos que se incluyen en este libro son un esfuerzo por dar a conocer tanto los conceptos teóricos como los prácticos de cómo se proyecta este tipo de plantas de tratamiento, que hemos venido construyendo en la América Latina y el Caribe desde principios de la década del setenta; las cuales han mostrado ser altamente eficientes para capacidades que van desde unos pocos litros por segundo hasta veinte y más metros cúbicos por segundo, en las más diversas localidades de nuestro continente.