

OPS/CEPIS/PUB/04.109

Original: español

Tratamiento de agua para consumo humano

Plantas de filtración rápida

Manual I: Teoría Tomo II

Ing. Lidia de Vargas (coordinadora)



**Organización
Panamericana
de la Salud**

Oficina Regional de la
Organización Mundial de la Salud
**ÁREA DE DESARROLLO SOSTENIBLE Y
SALUD AMBIENTAL**



**Centro Panamericano de
Ingeniería Sanitaria y
Ciencias del Ambiente
CEPIS/OPS**

Lima, 2004

© Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2004

El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS/OPS) se reserva todos los derechos. El contenido de este documento puede ser reseñado, reproducido o traducido, total o parcialmente, sin autorización previa, a condición de que se especifique la fuente y de que no se use para fines comerciales.

El CEPIS/OPS es una agencia especializada de la Organización Panamericana de la Salud (OPS/OMS).

Los Pinos 259, Urb. Camacho, Lima, Perú
Casilla de correo 4337, Lima 100, Perú
Teléfono: (511) 437 1077
Fax: (511) 437 8289
cepis@cepis.ops-oms.org
<http://www.cepis.ops-oms.org>

INTRODUCCIÓN

Este volumen, *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría*, está orientado al personal profesional que labora en las plantas de tratamiento de agua para consumo humano. En él se han sintetizado los más recientes conceptos teóricos correspondientes a la calidad del agua de las fuentes superficiales de abastecimiento y de los procesos utilizados en su purificación.

Se ha buscado explicar en forma profunda y a la vez sencilla los complejos procesos de tratamiento utilizados en los sistemas de purificación de agua, con el fin de que los profesionales de diversa formación que se encuentran laborando en este campo —ingenieros sanitarios, civiles, químicos y agrícolas, biólogos, geógrafos, arquitectos e incluso zootecnistas— tengan una clara comprensión del tema y, de este modo, mediante el estudio y dedicación, puedan llegar a convertirse en especialistas.

La experiencia acumulada en el programa de capacitación desarrollado por el CEPIS/OPS en este campo nos permite asegurar que de esta forma, será posible obtener proyectos de mejor calidad y formar supervisores de operación y mantenimiento más conscientes de la problemática del agua, para que afronten con responsabilidad la importante función de producir el agua que beberán los habitantes de América Latina y el Caribe.

RECONOCIMIENTOS

Este libro, elaborado por el CEPIS/OPS, reúne y actualiza los textos publicados por el mismo Centro en 1992 con los títulos *Manual I: El agua. Calidad y tratamiento para consumo humano*, *Manual II: Criterios de selección* y *Manual III: Teoría*.

En este proceso de actualización participaron los profesores que conforman el equipo técnico encargado de los cursos de capacitación sobre tratamiento de agua para consumo humano en el CEPIS/OPS, bajo la coordinación de la Ing. Lidia Cánepa de Vargas, Asesora en Tratamiento de Agua para Consumo Humano, bajo la dirección del Dr. Mauricio Pardón, Director del Centro.

En esta edición se contó con la colaboración del Ing. Víctor Maldonado Yactayo, de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, de Lima, Perú, de la Quím. Ada Barrenechea y de la Bióloga Margarita Aurazo.

Igualmente, se reconoce la asistencia del editor del CEPIS/OPS, Lic. Luis Andrade, y de las Sras. Inés Barbieri e Irma Sánchez, del cuerpo de secretarías del Centro, quienes apoyaron en el procesamiento del texto, así como la ayuda del Sr. Washington Macutela, responsable de la impresión.

CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN	iii
AGRADECIMIENTOS	v

TOMO I

CAPÍTULO 1. ASPECTOS FÍSICOQUÍMICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA

<i>Quím. Ada Barrenechea Martel</i>	1
1. Introducción	3
1.1 El agua: un disolvente universal	3
1.2 Las fuentes de agua de origen superficial	3
1.3 Aspectos físicoquímicos	4
2. Calidad del agua	4
2.1 Características físicas	5
2.1.1 Turbiedad	5
2.1.2 Sólidos y residuos	8
2.1.3 Color	10
2.1.4 Olor y sabor	11
2.1.5 Temperatura	13
2.1.6 pH	13
2.2 Características químicas	13
2.2.1 Aceites y grasas	16
2.2.2 Agentes espumantes	16
2.2.3 Alcalinidad	17
2.2.4 Aluminio	18
2.2.5 Amonio	18
2.2.6 Antimonio	19
2.2.7 Arsénico	20
2.2.8 Asbesto	21
2.2.9 Bario	21
2.2.10 Boro	22
2.2.11 Cadmio	22
2.2.12 Cianuro	24
2.2.13 Cinc	25
2.2.14 Cloruros	26
2.2.15 Cobre	26

	Página
2.2.16 Cromo	28
2.2.17 Dureza	29
2.2.18 Fenoles	30
2.2.19 Fluoruros	31
2.2.20 Fosfatos	32
2.2.21 Hidrocarburos	33
2.2.22 Hierro	33
2.2.23 Manganeseo	34
2.2.24 Materia orgánica	35
2.2.25 Mercurio	37
2.2.26 Nitritos y nitratos	39
2.2.27 Oxígeno disuelto (OD)	41
2.2.28 pH	42
2.2.29 Plaguicidas	44
2.2.30 Plata	44
2.2.31 Plomo	45
2.2.32 Selenio	46
2.2.33 Sulfatos	47
3. Criterios de calidad para la selección de una fuente de agua cruda	48
3.1 Criterios fisicoquímicos	48
3.1.1 Contaminantes inorgánicos	48
3.1.2 Contaminantes orgánicos	48
3.1.3 Contaminantes radiológicos	49
3.2 Criterios de selección de la fuente de agua cruda tomando en cuenta los aspectos fisicoquímicos	50
4. El agua potable	51
4.1 Aspectos fisicoquímicos	51
4.2 Criterios de calidad del agua para consumo humano: las Guías de Calidad para Aguas de Consumo Humano de la OMS	52
Referencias bibliográficas	54

CAPÍTULO 2. ASPECTOS BIOLÓGICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA

<i>Bióloga Margarita Aurazo de Zumaeta</i>	57
1. Introducción	59
2. Características biológicas de las aguas superficiales	60
2.1 Organismos propios de las aguas superficiales	60
2.2 Bacterias patógenas	66
2.2.1 <i>Escherichia coli</i>	68
2.3 Virus entéricos	69

	Página
2.4 Enteroparásitos	71
2.4.1 Protozoarios patógenos	73
2.4.2 Helmintos enteropatógenos	82
2.5 Cyanobacterias (algas azul-verdes)	86
2.6 Organismos cuya presencia en el agua tratada origina reclamos en los usuarios	88
2.7 Indicadores microbiológicos de la calidad del agua	89
3. Criterios biológicos de calidad para la selección de una fuente de agua cruda	93
4. El agua potable. Aspectos biológicos	95
5. Las guías de calidad de la OMS. Aspectos microbiológicos	96
Referencias bibliográficas	98
 CAPÍTULO 3. PROCESOS UNITARIOS Y PLANTAS DE TRATAMIENTO	
<i>Ing. Lidia de Vargas</i>	103
1. Introducción	105
2. Principales operaciones unitarias empleadas en el tratamiento del agua .	105
2.1 Transferencia de sólidos	106
2.2 Transferencia de iones	107
2.3 Transferencia de gases	108
2.4 Transferencia molecular	108
2.5 Otros procesos utilizados	109
3. Plantas de tratamiento de agua o plantas potabilizadoras	110
3.1 Tipos de plantas de tratamiento de agua	110
3.1.1 Plantas de filtración rápida	110
3.1.2 Plantas de filtración lenta	114
4. Clasificación de las plantas de filtración rápida por el tipo de tecnología utilizada	116
4.1 Sistemas convencionales	117
4.2 Sistemas convencionales de alta tasa o de tecnología CEPIS/OPS	119
4.3 Tecnología importada, de patente o plantas paquete	121
5. Selección de la tecnología de tratamiento de agua	124
5.1 Criterios de selección de una solución tecnológica	125
5.2 Selección de procesos de tratamiento considerando las condiciones socioeconómicas de la comunidad	127
5.2.1 Fase predictiva	128
5.2.2 Fase evaluativa	135

	Página
5.2.3 Aplicación	140
Referencias bibliográficas	150
CAPÍTULO 4. COAGULACIÓN	
<i>Quím. Ada Barrenechea Martel</i>	151
1. Introducción	153
2. Partículas coloidales	154
2.1 Tipos de coloides de acuerdo con su comportamiento en el agua	156
2.2 Características de las partículas coloidales y las sustancias húmicas	156
2.3 Características de las arcillas	157
2.4 Propiedades de los coloides	159
2.4.1 Propiedades cinéticas	159
2.4.2 Propiedad óptica: Efecto Tyndall-Faraday	161
2.4.3 Propiedad de superficie: adsorción	161
2.4.4 Propiedad electrocinética: electroforesis	162
2.5 Naturaleza de la turbiedad y el color	162
2.5.1 Turbiedad	162
2.5.2 Color	163
2.6 Estabilidad e inestabilidad de los coloides	165
2.6.1 Carga eléctrica de los coloides. Fuerza de estabilización	165
2.6.2 La doble capa eléctrica	168
2.6.3 Energía potencial de interacción de las partículas coloidales	171
2.6.4 Efecto del aumento de la concentración iónica	172
3. Sustancias químicas empleadas en la coagulación	174
3.1 Coagulantes	174
3.1.1 Sulfato de aluminio	174
3.1.2 Cloruro férrico FeCl_3	176
3.1.3 Sulfato ferroso $\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	177
3.1.4 Sulfato férrico $\text{Fe}_2 (\text{SO}_4)_3$	177
3.1.5 Interacción de los coagulantes inorgánicos con el agua y la alcalinidad	178
3.2 Modificadores de pH	183
3.3 Ayudantes de coagulación	184
4. Mecanismos de coagulación	188
4.1 Compresión de la doble capa	188
4.2 Adsorción y neutralización de la carga	190
4.3 Captura en un precipitado de hidróxido metálico o captura por barrido	191
4.4 Adsorción y puente interparticular	192
5. Cinética o etapas de la coagulación	195

	Página
6. Mecanismos de coagulación predominantes	196
6.1 Coagulación por adsorción	197
6.2 Coagulación por barrido	198
7. Diagramas de coagulación	199
7.1 Diagrama de coagulación con sulfato de aluminio	199
7.2 Aplicabilidad de los diagramas de solubilidad del sulfato de aluminio en la coagulación	201
7.2.1 Mecanismos de coagulación-remoción de turbiedad	201
7.2.2 Restricciones del uso del diagrama de coagulación de sulfato de aluminio (figura 4-26)	203
8. Diagrama de coagulación para remoción del color	205
9. Diagrama de coagulación para filtración directa	207
9.1 Diagrama de coagulación con hierro	210
10. Factores que influyen en el proceso	213
10.1 Influencia de la concentración de coagulante	213
10.2 Factores de mayor influencia en el desarrollo del proceso	213
10.2.1 La calidad del agua cruda	213
10.2.2 Temperatura	214
10.2.3 Variables químicas	216
11. Uso de polímeros como auxiliares	219
11.1 Consideraciones generales	219
11.2 Polímeros como auxiliares de filtración	219
Referencias bibliográficas	220
Bibliografía adicional	220
 CAPÍTULO 5. MEZCLA RÁPIDA	
<i>Ing. Lidia de Vargas</i>	225
1. Introducción	227
2. Mezcla rápida para coagulación de barrido	227
3. Mezcla rápida turbulenta para neutralización de cargas	228
4. Desestabilización de partículas en campos turbulentos	229
4.1 Comprobación experimental	233
4.2 Evidencia práctica	234
5. Mezcla rápida con polímeros	235
6. Parámetros operacionales	236
6.1 Gradiente de velocidad	236
7. Factores que modifican el proceso	238
7.1 Intensidad y tiempo de mezcla	238
7.2 Sistema de aplicación del coagulante	240
7.3 Tipo de dispositivo de mezcla	242

	Página
8 Mezcladores	242
8.1 Hidráulicos	243
8.2 Mecánicos	257
8.3 Ventajas y desventajas de los mezcladores hidráulicos y mecánicos	260
Referencias bibliográficas	262
 CAPÍTULO 6. FLOCULACIÓN	
<i>Ing. Lidia de Vargas</i>	263
1. Mecánica del proceso	265
2. Teoría básica	266
2.1 Parámetros operacionales	281
3. Factores que influyen en la floculación	282
3.1 Naturaleza del agua	282
3.2 Influencia del tiempo de floculación. Compartimentalización	284
3.3 Influencia del gradiente de velocidad	285
3.4 Influencia de la variación del caudal	286
4. Floculadores	288
4.1 Floculadores de contacto de sólidos	288
4.2 Floculadores de potencia	290
4.2.1 Hidráulicos	290
4.2.2 Mecánicos	298
Referencias bibliográficas	304

TOMO II

CAPÍTULO 7. SEDIMENTACIÓN

<i>Ing. Víctor Maldonado Yáctayo</i>	1
1. Conceptos generales	3
1.1 Sedimentación de partículas discretas	3
1.2 Sedimentación de partículas floculentas	4
1.3 Sedimentación por caída libre e interferida	4
1.4 Expresiones de velocidad de sedimentación	4
1.4.1 Partículas discretas con caída libre	4
1.4.2 Sedimentación interferida	9
1.4.3 Sedimentación de partículas floculentas	12
1.5 Factores que influyen en el proceso	18
1.5.1 Calidad de agua	18

	Página
1.5.2 Condiciones hidráulicas	19
1.5.3 Factores externos	22
2. Clasificación de unidades	22
2.1 Sedimentadores y decantadores estáticos	23
2.1.1 Criterios generales	23
2.1.2 Componentes de una unidad	24
2.1.3 Tipos de unidades	25
2.2 Decantadores dinámicos	31
2.2.1 Criterios generales	31
2.2.2 Componentes de una unidad	32
2.2.3 Tipos de unidades dinámicas	32
2.3 Decantadores laminares	38
2.3.1 Teoría de la sedimentación laminar	38
2.3.2 Trayectoria de una partícula en placas paralelas	41
2.3.3 Factores que influyen en el proceso	43
2.3.4 Tipos de decantadores laminares	54
Referencias bibliográficas	58
Bibliografía adicional	58
CAPÍTULO 8. FLOTACIÓN	
<i>Ing. Lidia de Vargas</i>	63
1. Conceptos teóricos	65
2. Ecuaciones de la velocidad ascensional	67
3. Sistemas de flotación	69
3.1 Flotación por aire disperso	70
3.2 Flotación electrolítica	70
3.3 Flotación por aire disuelto	70
4. Parámetros de proyectos	72
4.1 Relación aire-sólidos	72
4.2 Cámara de presurización y recirculación de agua clarificada	73
4.3 Cámara de flotación	75
4.4 Pretratamiento	76
Referencias bibliográficas	80
Bibliografía adicional	80
CAPÍTULO 9. FILTRACIÓN	
<i>Ing. Víctor Maldonado Yáctayo</i>	81
1. Introducción	83
2. Mecanismos de la filtración	83

	Página
2.1 Mecanismos de transporte	84
2.1.1 Cernido	84
2.1.2 Sedimentación	85
2.1.3 Intercepción	85
2.1.4 Difusión	86
2.1.5 Impacto inercial	86
2.1.6 Acción hidrodinámica	87
2.1.7 Mecanismos de transporte combinados	87
2.2 Mecanismos de adherencia	88
2.2.1 Interacción combinada de las fuerzas electrostáticas y las de Van der Waals	89
2.2.2 Enlace químico entre las partículas y la superficie de los granos	92
3. Cinética de la filtración	93
3.1 Introducción	93
3.2 Balance de masas	93
3.3 Modelos para la remoción de partículas suspendidas	96
3.4 Retención y arrastre de partículas	99
3.5 Coeficiente de filtración modificado	100
3.6 Modelos matemáticos que relacionan λ con σ	100
3.7 Pérdida de carga en un medio filtrante	103
3.7.1 Pérdida de carga inicial	104
3.8 Lavado de medios filtrantes	106
3.8.1 Fluidificación de medios porosos	106
3.8.2 Expansión de medios porosos	108
3.8.3 Pérdida de carga en medios filtrantes expandidos	111
4. Factores que influyen en la filtración	112
4.1 Características de la suspensión	112
4.1.1 Tipos de partículas suspendidas	113
4.1.2 Tamaño de las partículas suspendidas	113
4.1.3 Densidad de las partículas suspendidas	113
4.1.4 Resistencia o dureza de los flóculos	113
4.1.5 Temperatura del agua por filtrar	114
4.1.6 Concentración de partículas suspendidas en el afluente	114
4.1.7 Potencial zeta de la suspensión	115
4.1.8 pH del afluente	115
4.2 Características del medio filtrante	116
4.2.1 Tipo del medio filtrante	116
4.2.2 Características granulométricas del material filtrante	117
4.2.3 El peso específico del material filtrante	119
4.2.4 El espesor de la capa filtrante	119

	Página
4.3 Características hidráulicas	120
4.3.1 Tasa de filtración	120
4.3.2 Carga hidráulica disponible para la filtración	124
4.3.3 El método de control de los filtros	124
4.3.4 Calidad del efluente	124
5. Tipos de unidades de filtración	126
5.1 Clasificación	126
5.2 Filtración por gravedad	126
5.2.1 Filtración ascendente	127
5.2.2 Filtración descendente	127
5.2.3 Filtración ascendente-descendente	128
5.3 Métodos de control operacional	130
5.3.1 Tasa constante y nivel variable	131
5.3.2 Tasa y nivel constantes	132
5.3.3 Tasa declinante	135
5.4 Medios filtrantes	140
5.4.1 Filtros de lecho simple	140
5.4.2 Filtros de lecho múltiple	141
5.4.3 Filtración a presión	141
6. Filtración directa	143
6.1 Clasificación de la filtración directa	143
6.2 Ventajas de la filtración directa	144
6.3 Desventajas de la filtración directa	144
Bibliografía	145
 CAPÍTULO 10. DESINFECCIÓN	
<i>Quím. Ada Barrenechea e Ing. Lidia de Vargas</i>	153
1. Introducción	153
2. La desinfección	153
2.1 Utilidad de la desinfección	156
3. Teoría de la desinfección	156
3.1 Factores que influyen en la desinfección	157
3.1.1 Los microorganismos presentes y su comportamiento ...	157
3.1.2 La naturaleza y concentración del agente desinfectante .	157
3.1.3 La temperatura del agua	157
3.1.4 La naturaleza y calidad del agua	158
3.1.5 El pH	158
3.1.6 El tiempo de contacto	158
3.2 Variables controlables en la desinfección	159
3.3 Acción de los desinfectantes	160

	Página
3.4 Cinética de la desinfección: la ley de Chick	160
4. Formas de desinfección	162
4.1 Agentes físicos	162
4.1.1 Sedimentación natural	162
4.1.2 Coagulación–floculación–sedimentación	163
4.1.3 La filtración	165
4.1.4 El calor	165
4.1.5 La luz y los rayos ultravioleta	165
4.2 Agentes químicos	167
4.2.1 Características de un buen desinfectante químico	167
4.2.2 Los agentes oligodinámicos de desinfección: Ag^+	168
4.2.3 Los agentes oxidantes	168
4.2.4 Estabilidad de los desinfectantes químicos	173
5. La cloración	173
5.1 Características del cloro como desinfectante	174
5.2 Comportamiento del cloro en el agua	174
5.2.1 Reacciones del cloro en el agua	175
5.2.2 Reacciones del cloro con el amoníaco	177
5.2.3 Reacciones del cloro con otros componentes del agua ..	178
5.2.4 Resumen de las reacciones del cloro en el agua y su relación con el proceso de cloración	178
5.3 Otros compuestos de cloro	180
5.3.1 Cal clorada	180
5.3.2 Hipoclorito de calcio	180
5.3.3 Hipoclorito de sodio	181
5.3.4 Dióxido de cloro	181
5.4 Cálculo de la cantidad de cloro activo de acuerdo con las especies usadas	182
5.5 El gráfico del punto de quiebre	182
5.6 Eficacia del cloro	183
5.7 Algunos aspectos toxicológicos de la cloración	186
5.7.1 Los trihalometanos	186
5.7.2 Clorofenoles	187
5.7.3 Cloraminas y sus derivados	187
5.7.4 Dióxido de cloro	188
5.8 Estaciones de cloración	188
5.8.1 Almacén	188
5.8.2 Sala de cloración	191
5.8.3 Cámara de contacto	210

	Página
Referencias bibliográficas	214
Bibliografía adicional	214
CAPITULO 11. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LOS PROCESOS Y DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LAS UNIDADES	
<i>Ing. Lidia de Vargas</i>	215
1. Selección de alternativas de tratamiento en función de la calidad de la fuente	217
2. Selección de parámetros óptimos de los procesos	219
2.1 Fundamentos	219
2.2 Equipos utilizados	220
2.2.1 Antecedentes	220
2.2.2 Descripción del equipo de prueba de jarras utilizado	221
2.2.3 Sistema de dosificación	222
2.2.4 Sistema de agitación	223
2.2.5 Descripción de las jarras	227
2.2.6 Sistema de toma de muestras	230
2.2.7 Iluminación	231
2.2.8 Equipo auxiliar	232
2.2.9 Precauciones y limitaciones	235
2.3 Consideraciones generales para la ejecución de ensayos en la prueba de jarras	236
2.3.1 Soluciones químicas empleadas	236
2.3.2 Tamaño del flóculo producido	238
2.3.3 Tiempo inicial de formación del flóculo	238
2.3.4 Determinación de pH, alcalinidad, coagulante y turbiedad o color residuales	239
2.4 Parámetros de dosificación	239
2.4.1 Selección del coagulante	240
3. Aplicaciones prácticas	265
3.1 Caso del proyecto de una planta nueva	265
Referencias bibliográficas	277
Bibliografía adicional	278

