

Juan Pablo Rodríguez Miranda

# Potabilización del agua

TEORÍA APLICADA



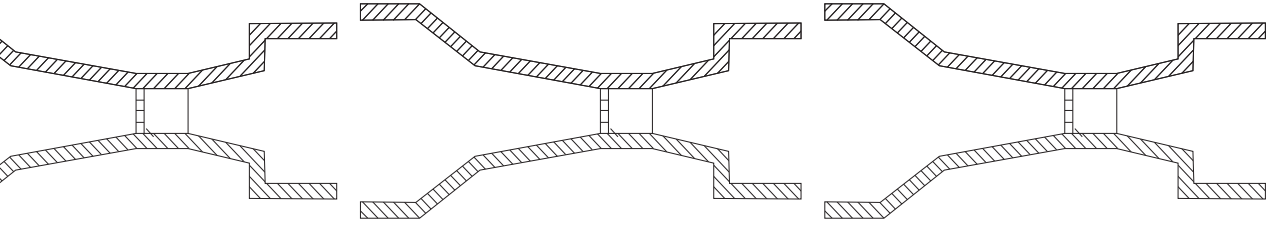
Versión  
ampliada

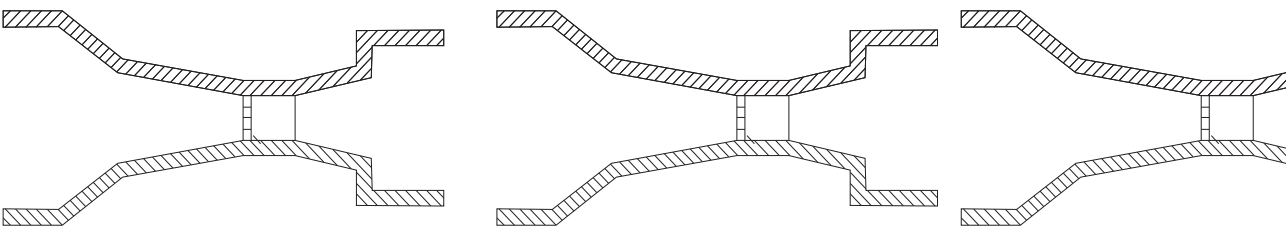


 alphaeditorial

**Juan Pablo Rodríguez Miranda**

Ingeniero sanitario y ambiental de la Universidad de la Costa, magíster en Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia y magíster en Gestión y Evaluación Ambiental de la Universidad Sergio Arboleda. Es doctor en Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas e investigador senior del Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación. Está afiliado a la Asociación Colombiana de Ingeniería Ambiental y Sanitaria (ACODAL). En la actualidad es miembro de la Red Académica y de Investigación en Control y Gestión Ambiental (RAICGA) y de la Red Internacional de Tecnología, Innovación, Competitividad y Sostenibilidad (RediTICS). Es profesor titular de la facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá, Colombia).





Juan Pablo Rodríguez Miranda

# Potabilización del agua

TEORÍA APLICADA

Versión ampliada

**Alpha**editorial

Catalogación en la publicación – Biblioteca Nacional de Colombia

Rodríguez Miranda, Juan Pablo, autor

Potabilización del agua : teoría aplicada / Juan Pablo Rodríguez Miranda ; ilustraciones, Julián Mauricio

Calderón Vásquez y Alexander de la Hoz. -- Versión ampliada. -- Bogotá : Alpha Editorial, 2023.

210 páginas.

Incluye bibliografía.

ISBN 978-958-778-930-0 -- 978-958-778-931-7 (digital)

1. Purificación del agua potable 2. Calidad del agua - Control I. Calderón Vásquez, Julián Mauricio, ilustrador II.

Hoz, Alexander de la, ilustrador

CDD: 628.162 ed. 23

CO-BoBN- a1128530

### **Alpha Editorial S.A.**

Calle 62 20-46 /esquina, Bogotá

Teléfono (601) 746 0102

cliente@alpha-editorial.com

www.alpha-editorial.com

Libros digitales

www.alphaeditorialcloud.com

Primera edición: Bogotá, 2024

© Alpha Editorial S. A.

© Juan Pablo Rodríguez Miranda

Derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida total ni parcialmente. Ni puede ser registrada por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea mecánico, fotoquímico, electrónico, magnético, electroóptico, fotocopia o cualquier otro, sin el previo permiso escrito de la editorial.

Edición: Samantha Córdoba Hernández

Corrección de estilo: Cristian Vega

Ilustraciones: Julián Mauricio Calderón Vásquez

Revisión y ajuste de ilustraciones: Alexander De La Hoz

Portada: Ana Paula Santander

ISBN 978-958-778-930-0

ISBN 978-958-778-931-7 DIGITAL

Impreso en Colombia

Printed and made in Colombia

# Contenido

<i>Figuras y tablas</i>	VII
<i>Siglas, unidades de medida y abreviaturas</i>	IX

<i>Introducción</i>	XI
---------------------	----

## CAPÍTULO 1

### Generalidades del tratamiento del agua potable

1.1 Tecnología del agua	3
1.1.1. Tipos de plantas potabilizadoras	5
1.2 Dotaciones o módulos de consumo de agua potable	10
1.3 Métodos de proyección de población	13
1.4 Calidad del agua cruda	20
1.5 Seguridad del abastecimiento del agua	20
1.6 Variabilidad climática en el abastecimiento del agua cruda	25
1.7 Desafío en potabilización	29
1.8 Investigación científica y tecnológica en la potabilización del agua	33
1.9 Ejercicios aplicados	37

## CAPÍTULO 2

### Procesos y operaciones convencionales en el tratamiento de agua potable

2.1 Mezcla rápida y dosificación de coagulantes	59
2.2 Floculación del agua	64
2.2.1. Tipos de floculadores	65
2.3 Sedimentación del agua	67
2.3.1. Tipos de sedimentación	69
2.4 Filtración del agua	72
2.4.1. Pérdida de carga en la filtración	72
2.4.2. Tipos de lavado en la filtración	74
2.5 Desinfección del agua	78
2.6 Ejercicios aplicados	82

## CAPÍTULO 3

### Procesos y operaciones avanzadas en el tratamiento del agua potable

3.1	Procesos y operaciones terciarias para el tratamiento del agua	123
3.1.1.	Subproducto. Manejo de lodos	123
3.1.2.	Precipitación química	125
3.1.3.	Aireación	125
3.1.4.	Ablandamiento	128
3.1.5.	Fluorización	129
3.1.6.	Adsorción	131
3.1.7.	Absorción	132
3.1.8.	Eliminación de olores y sabores	132
3.1.9.	Control de la corrosión	134
3.1.10.	Neutralización	135
3.1.11.	Control de incrustaciones	136
3.1.12.	Membranas	136
3.1.13.	Intercambio iónico	138
3.1.14.	Ósmosis inversa	138
3.1.15.	Electrodiálisis	139
3.1.16.	Destilación instantánea en efecto múltiple	140
3.2	Ecuaciones econométricas para la estimación del costo de inversión en plantas potabilizadoras	140
3.3	Aplicación de la hidráulica en potabilización	143
3.4	Ejercicios aplicados	149

## ANEXOS

Anexo A.	Normas de dimensionamiento de plantas potabilizadoras	165
Anexo B.	Normatividad internacional de agua potable	166
Anexo C.	Inspección a plantas de tratamiento de agua potable	167
Anexo D.	Elementos para un diagnóstico de plantas potabilizadoras	171
Anexo E.	Consideraciones para la evaluación de alternativas	174
Anexo F.	Manual de operación de ETAP o PTAP o plantas de tratamiento de agua potable	178
<i>Bibliografía</i>		194

## Figuras y tablas

<b>Figura 1.1</b>	Marco normativo del recurso hídrico en Colombia	11
<b>Figura 1.2</b>	Esquema de alambique	46
<b>Figura 1.3</b>	Esquema de baño electrónico	47
<b>Figura 2.1</b>	Mezcla rápida hidráulica. Canaleta Parshall	59
<b>Figura 2.2</b>	Mezcla rápida mecánica	60
<b>Figura 2.3</b>	Formación del flóculo	61
<b>Figura 2.4</b>	Floculador hidráulico. Mezcla lenta hidráulica	66
<b>Figura 2.5</b>	Floculador mecánico. Mezcla lenta mecánica	67
<b>Figura 2.6</b>	Sedimentación convencional	71
<b>Figura 2.7</b>	Sedimentación de alta tasa	71
<b>Figura 2.8</b>	Filtro convencional	73
<b>Figura 2.9</b>	Filtro a presión	74
<b>Figura 2.10</b>	Datos experimentales sedimentadores	101
<b>Figura 3.1</b>	Torre para aireación	127
<b>Figura 3.2</b>	Escalones para aireación	127
<b>Figura 3.3</b>	Tanque para ablandamiento	130
<b>Figura 3.4</b>	Torre para absorción	133

\* \* \*

<b>Tabla 1.1</b>	Técnica Pestal para la selección del sistema de potabilización	12
<b>Tabla 1.2</b>	Módulos de consumo o dotación de agua potable	14
<b>Tabla 1.3</b>	Ecuaciones o métodos de cálculos	17
<b>Tabla 1.4</b>	Características del agua cruda	21
<b>Tabla 1.5</b>	Diferencias entre fuentes de abastecimiento de agua cruda	26
<b>Tabla 1.6</b>	Descripción general de los patrones climáticos en función de la variabilidad climática	27
<b>Tabla 1.7</b>	Tecnologías para el tratamiento de agua residual	30
<b>Tabla 1.8</b>	Propiedades físicas del agua	38
<b>Tabla 2.1</b>	Criterios para dosificación de coagulantes	61
<b>Tabla 2.2</b>	Alcalinidad requerida de los coagulantes	62
<b>Tabla 2.3</b>	Criterios de selección de floculadores	68
<b>Tabla 2.4</b>	Criterios para la selección de desinfectantes	79
<b>Tabla 2.5</b>	Criterios para la dosificación de desinfectantes	80
<b>Tabla 2.6</b>	Criterios para dosificación de desinfectantes basados en cloro	82
<b>Tabla 2.7</b>	Experimentación con sedimentador convencional	99
<b>Tabla 2.8</b>	Resultados de ensayo de sedimentación	100



<b>Tabla 2.9</b>	Datos experimentales con suspensión de partículas floculantes	101
<b>Tabla 2.10</b>	Eficiencia de remoción en lecho filtrante	107
<b>Tabla 2.11</b>	Porcentaje de arena retenida	108
<b>Tabla 2.12</b>	Fracción de arena retenida	108
<b>Tabla 2.13</b>	Porcentaje de arena retenida en retrolavado	110
<b>Tabla 2.14</b>	Hidráulica de retrolavado con arena retenida	111
<b>Tabla 2.15</b>	Porcentaje de acumulación de partículas que pasa el tamiz	112
<b>Tabla 2.16</b>	Dosificación en ensayo de demanda de cloro	115
<b>Tabla 3.1</b>	Reacciones en la aireación. Oxidación del hierro	126
<b>Tabla 3.2</b>	Reacciones en la aireación. Oxidación del manganeso	127
<b>Tabla 3.3</b>	Dosificación para hierro y manganeso	128
<b>Tabla 3.4</b>	Uso de membranas en potabilización	139
<b>Tabla 3.5</b>	Consideraciones de las membranas en el tratamiento del agua	139
<b>Tabla 3.6</b>	Ecuaciones de costos	141
<b>Tabla 3.7</b>	Ecuaciones de costos para Colombia	142
<b>Tabla 3.8</b>	Concentraciones de oxígeno	149
<b>Tabla 3.9</b>	Resultados de experimento de aireación	150
<b>Tabla 3.10</b>	Número de ciclos requeridos en la evaporación	158
<b>Tabla 1C</b>	Elementos para la inspección en planta de tratamiento de agua potable	168
<b>Tabla 1F</b>	Elementos de laboratorio para ETAP o PTAP	183
<b>Tabla 2 F</b>	Clasificación en función de la calidad de agua sedimentada	188
<b>Tabla 3F</b>	Dotación mínima de laboratorio de una ETAP o PTAP	192

## Siglas, unidades de medida y abreviaturas

En la siguiente lista se encuentran siglas y unidades de medida del SI (Sistema Internacional de Unidades) que se deben considerar para comprender la terminología y, para solucionar los ejercicios sobre potabilización del agua planteados en este libro.

$A$  = Área ( $m^2$ )  
 $A_d$  = Área del desagüe ( $m^2$ )  
 $A_S$  = Área de sedimentación ( $m^2$ )  
 $B$  = Ancho (m)  
 $C$  = Concentración (mg/L)  
 $C$  = Número de Camp  
 $C_D$  = Coeficiente de arrastre  
 $CE$  = Conductividad eléctrica (Siemens/cm)  
 $COT$  = Carbono orgánico total (mg/L)  
 $D$  = Dosificación (kg/día)  
 $\rho$  = Densidad del agua ( $kg/m^3$ )  
ETAP = Estación de tratamiento de agua potable  
 $f_{CE}$  = Factor de conversión de la conductividad eléctrica  
 $g$  = Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )  
 $H$  = Altura (m)  
in = Pulgada  
kW/h = Kilovatio hora  
 $L$  = Longitud (m)  
m.c.a = Metro(s) de columna de agua  
mW = Longitud de onda para virus  
 $N_R$  = Número de Reynolds  
 $N_f$  = Número de Froude  
 $\eta$  = Coeficiente de rugosidad de Manning  
psi = Libras por pulgada cuadrada  
PTAP = Planta de tratamiento de agua potable  
 $Q$  = Caudal de agua ( $m^3/s$ )  
 $R$  = Radio del tanque (m)  
 $R_o$  = Radio del orificio (m)  
 $S$  = Número S  
 $t$  = Tonelada  
UNT = Unidad nefelométrica de turbiedad  
UPC = Unidades platino cobalto  
 $\mu S$  = Microsiemens  
 $v$  = Velocidad del agua (m/s)  
 $\nu$  = Viscosidad cinemática ( $m^2/s$ )  
 $V$  = Volumen ( $m^3$ )  
 $W$  = Peso (kg)  
 $W$  = Dosificación (kg/día)

# Agradecimientos

A Astrid, Mariana, Isabella y Emily, por el apoyo incondicional en este proceso intelectual.

A mis papás (Santiago y Colombia), por la ayuda y fortaleza en esta nueva meta.

A Gina y Ariana Sofía, por estar ahí apoyando.

## Introducción

Las preocupaciones por la preservación y conservación del recurso hídrico como activo ambiental valioso lo establecen como un elemento ecológico y ambiental esencial para la vida en este planeta. La sensación de la escasez y el estrés hídrico conllevan a un análisis del manejo adecuado del mismo y a mantener la congruencia con este. En términos de oferta y demanda, hoy por hoy, se considera que el agua es un recurso enteramente precioso que, por el temor de la escasez y la contaminación, deberá negociarse en las grandes bolsas internacionales de acciones; por ello, ante la gran demanda de agua en condiciones de continuidad, acceso, equidad y calidad del servicio, se establece que la potabilización del agua gana terreno por la oportunidad de conocer, apropiarse y entender las diversas posibilidades para obtener agua potable apta para el consumo humano.

De otro lado, la reducción de los riesgos epidemiológicos en la población, derivados del agua contaminada, es un desafío que no ha perdido vigencia. Por el contrario, los retos en la reducción de microorganismos patógenos y potencialmente virulentos son y serán una meta universal, la cual tendrá un efecto tangible en la reducción de enfermedades de carácter hídrico tales como el cólera, la fiebre tifoidea, la hepatitis A y E, la disentería bacilar, la amebiasis, la poliomiелitis, gastroenteritis agudas y diarreas, entre otras.

En el contexto de un sistema de abastecimiento de agua para el consumo humano (fuente de abastecimiento, captación, línea de aducción, desarenador, potabilización, línea de conducción, almacenamiento y red de distribución del agua potable), la potabilización, o el tratamiento del agua cruda para convertirla en agua potable o apta para la utilización de las actividades humanas, tiene diversas operaciones y procesos unitarios que, en su conjunto, presentan consideraciones técnicas adecuadas para el dimensionamiento y posterior diseño de una planta potabilizadora. Por ello, este libro establece algunos aspectos en la concepción y el análisis de cada uno de los procesos y las operaciones pertenecientes al tratamiento del agua. Dichos aspectos pueden llevar a una mejor comprensión del fenómeno y de la abstracción de lo que sucede al interior de un reactor de potabilización los cuales, facilitarán la concepción del diseño de una planta de tratamiento de agua potable.

Este libro cuenta con 170 ejercicios prácticos que permiten aplicar todo lo expuesto referente a temas como mezcla rápida, coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección, aireación, costos econométricos de plantas potabilizadoras, aplicaciones de las ecuaciones de hidráulica, entre otros. Esto es un complemento y una ampliación de documentos como tratados, manuales y escritos técnicos del área de potabilización del agua, especialmente para estudiantes de pregrado y posgrado de saneamiento ambiental, ingeniería ambiental, ingeniería sanitaria, ingeniería civil y áreas afines en la tratabilidad del agua potable.

## Material web

Este libro contiene las *normas de dimensionamiento de plantas potabilizadoras y la normatividad internacional de agua potable* como tablas disponibles en la web.

Las referencias directas a estos recursos están señaladas mediante el siguiente ícono:



Para acceder a esta información utilice el vínculo:

<https://www.alpha-editorial.com/Papel/9789587789300/Potabilizacion+Del+Agua>

También puede seguir los siguientes pasos:

1. Acceder a  
<https://www.alpha-editorial.com>
2. Escribir el nombre del libro en el buscador.
3. En la página del libro encontrará el vínculo al material web.

### REVISORES TÉCNICOS

**Jhon Jairo Feria Díaz.** Ingeniero sanitario de la Universidad de Antioquia y magister en Ciencias Ambientales de la Universidad de Córdoba. Docente titular del programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Sucre, Colombia. Cátedra de Acueductos, Alcantarillados, Sistemas de Tratamiento y Redes Hidrosanitarias en Edificaciones.

**Mauricio Andrés Ruiz Ochoa.** Ingeniero ambiental, magister en Ingeniería, en Recursos Hidráulicos y doctor en Ingeniería. Docente asociado de las Unidades Tecnológicas de Santander. Con intereses investigativos en hidrología, evaluación de impactos ambientales y oceanografía física.

## CAPÍTULO 1

---

# Generalidades del tratamiento del agua potable

### 1.1. Tecnología del agua

En tecnología del agua existen procesos y operaciones unitarias del tratamiento del agua (agua, H<sub>2</sub>O: <sup>1</sup>H, <sup>2</sup>H, <sup>3</sup>H para el hidrógeno y, <sup>16</sup>O, <sup>17</sup>O y <sup>18</sup>O para el oxígeno, con peso molecular de 18 g/mol; elevada conductividad térmica, fuerte poder ionizante, elevada constante dieléctrica o aislante y gran poder disolvente).

Se denomina *proceso* a un método de tratamiento, en el cual, la remoción o transformación de contaminantes y constituyentes del agua cruda (agua sin tratamiento) se produce por la adición de insumos químicos que generan reacciones químicas o también de procesos biológicos que conllevan a una transformación biológica de algún contaminante, entre los cuales se puede citar la coagulación, desinfección, precipitación, tratamiento biológico de las aguas residuales, etc. (Ferrer, J., 2008; Droste, R., 1997; Rodríguez, 2010; Arceivala, D. J., 1981).

Mientras que se denomina *operación* a un método de tratamiento en el cual la remoción o transformación de contaminantes y constituyentes del agua cruda, se produce por la acción de fuerzas físicas como la gravedad, fuerza centrífuga, diferencia de tamaño, entre otras. Por ejemplo, la sedimentación, floculación, filtración, tamizado, etc. (Ferrer, J., 2008; Droste, R., 1997; Rodríguez, 2010; Arceivala, D. J., 1981).

En tecnología del agua, el conjunto integrado de procesos y operaciones para la remoción de contaminantes o constituyentes establece el diseño de una planta de tratamiento del agua cruda para convertirla en agua potable o apta para el consumo humano, o en un amplio concepto, un agua apta para la utilización de las actividades humanas o antrópicas. Es por ello que de acuerdo con la fuente de abastecimiento (agua superficial, agua subterránea, agua lluvia e inclusive agua residual tratada), se aplicarán diversos tipos de tratamientos (Romero, J., 2004; Metcalf y Eddy, 2003; Rodríguez, 2010; Cepis, 1992; Arboleda, 2000), entre ellos:

- **Preliminares.** Aplicados para remover constituyentes del agua y sólidos voluminosos que pueden causar problemas en las operaciones y procesos posteriores.
- **Primarios.** Aplicados para remover un parte de los sólidos sedimentables y no sedimentables, así como una fracción de la materia orgánica y algunos microorganismos patógenos.

- **Secundarios.** Aplicados para remover sólidos suspendidos, compuestos orgánicos biodegradables, nutrientes y microorganismos patógenos.
- **Terciarios.** Aplicados para remover materiales tanto físicos como químicos disueltos o en suspensión que permanecen después del tratamiento convencional.

En el contexto de una estación de tratamiento de agua potable (ETAP), una planta de tratamiento de agua potable (PTAP), planta potabilizadora o planta de tratamiento (instalación física) del agua cruda para convertirla en agua potable o apta para el consumo humano, se podrían combinar los tratamientos preliminar, primario y terciario para obtener el producto deseado en condiciones organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas aptas para el consumo humano. Además, se considera una planta de potabilización compacta en donde se realizan los procesos y las operaciones hasta por un caudal de 10 L/s móviles, los cuales pueden ser portátiles o fijas. Típicamente, tienen la facilidad del transporte, montaje, apropiada operación y mantenimiento. La obra civil no es tan compleja: reducción de área, operación automatizada y su construcción puede ser en fibra de vidrio, acero al carbón entre otros materiales. Las plantas potabilizadoras de caudales mayores a 10 L/s, se construyen en mampostería, modulares (según caudal de diseño), y de acuerdo al tipo de agua cruda, se aplican los diversos procesos y operaciones de tratamiento.

En la actualidad (CEPAL, 2015), las ETAP o PTAP, o plantas potabilizadoras de tecnología convencional, emiten entre 2100 t equivalentes de CO<sub>2</sub> por año a 4500 t equivalentes de CO<sub>2</sub> por año (un habitante en su actividad residencial, en promedio emite entre 0.3 t/año a 1.5 t/año) en su operación continua para un Sistema de Tratamiento de Agua Residual (STAR) o Estación Depuradora de Agua Residual (EDAR), entre 4500 t equivalentes de CO<sub>2</sub> por año a 15 250 t equivalentes de CO<sub>2</sub> por año, depende de la tecnología); mientras que para una ETAP o PTAP convencional está entre 0.1 a 0.9 kg equivalentes de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> y una ETAP o PTAP de ósmosis inversa es 0.4 a 6.8 kg equivalentes de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.

Por otro lado, para tecnologías que utilizan tasa de evaporación es de 1.3 kg/m<sup>2</sup> hora a 1.5 kg/m<sup>2</sup> hora. El consumo energético promedio de una ETAP o PTAP o plantas potabilizadoras puede ser de la siguiente forma (Global Water Research Coalition, 2008):



- Abastecimiento de agua mediante río o lagos: 0.3 kWh/m<sup>3</sup> a 1.0 kWh /m<sup>3</sup>
- Abastecimiento de agua mediante agua subterránea: 0.48 kWh/m<sup>3</sup> a 3.0 kWh/m<sup>3</sup>
- Potabilización de aguas residuales: 2.5 kWh/m<sup>3</sup> a 5.5 kWh/m<sup>3</sup>
- Abastecimiento de agua mediante agua de mar: 2.6 kWh/m<sup>3</sup> a 8.5 kWh/m<sup>3</sup>
- Tratamiento de aguas residuales domésticas: 0.5 kWh/m<sup>3</sup> a 1.2 kWh/m<sup>3</sup>
- Reutilización de aguas residuales tratadas: 1.1 kWh/m<sup>3</sup> a 2.9 kWh/m<sup>3</sup>

Por tecnologías de potabilización del agua, el consumo o intensidad energética promedio es (Global Water Research Coalition, 2008):

- Tratamiento convencional: 0.3 kWh/m<sup>3</sup> a 0.95 kWh/m<sup>3</sup>
- Tratamiento convencional con bombeo: 0.7 kWh/m<sup>3</sup> a 2.2 kWh/m<sup>3</sup>
- Osmosis inversa: 1.1 kWh/m<sup>3</sup> a 4.3 kWh/m<sup>3</sup>
- Destilación primaria: 1.8 kWh/m<sup>3</sup> a 2.2 kWh/m<sup>3</sup>
- Destilación híbrida: 0.2 kWh/m<sup>3</sup> a 0.85 kWh/m<sup>3</sup>
- Electrodiálisis: 1.8 kWh/m<sup>3</sup> a 4.5 kWh/m<sup>3</sup>
- Destilación membrana: 3.0 kWh/m<sup>3</sup> a 4.5 kWh/m<sup>3</sup>
- Evaporación híbrida: 1.3 kWh/m<sup>3</sup> a 1.8 kWh/m<sup>3</sup>

### 1.1.1. Tipos de plantas potabilizadoras

Las plantas potabilizadoras pueden ser manuales o automatizadas. Las *manuales* se recomiendan en localidades (municipios) donde exista mano de obra calificada, utilización de herramientas, equipos, maquinaria y productos químicos fácilmente encontrados en la región. Las *automatizadas*, por otro lado, se recomiendan con mano de obra especializada, equipos de potencia apropiados, dosificación de productos químicos en línea y control de los procesos y operaciones en tiempo real, con operadores neumáticos, eléctricos e hidráulicos.

Las plantas potabilizadoras modernas incluyen elementos de automatización en cada elemento de instrumentación específico para las salidas (continua o intermitente), entradas (autorregulación o manual), calidad del agua cruda y tratada, presiones, niveles, caudal o flujo de agua, pérdidas de energía, ensayos en línea, operación de válvulas (operación automática o semiautomática), filtros, lavados, aplicación de productos químicos (control de duración del impulso, de vacío,

neumático, de circuito cerrado, electrónico y precisión del dosificador), en tiempo real, teniendo en cuenta el rango de medición, la precisión, resistencia a la intemperie, la señal de salida, CPU o PLC (controladores), fuente de alimentación, interfaces y costos de operación de mantenimiento; lo anterior, mediante un centro de monitoreo y control (*hardware* y *software*; tablero de control), para el correcto funcionamiento en flujo continuo y análisis de datos resultantes, para corregir y optimizar la marcha de la planta potabilizadora. Los modelamientos orientados a la automatización industrial de las plantas potabilizadoras pueden ser con modelados: sistemas de negocios, IDEF, BMM (*Business Modeling Method*), redes de Petri, GEMMA entre otros.

Según el tipo de agua cruda (parámetros de calidad del agua) en una ETAP o PTAP, se deben realizar análisis y ensayos para la tratabilidad como el ensayo de jarras, ablandamiento, demanda de cloro, remoción de hierro y manganeso, índice de estabilidad, número de Mintz, ensayo de mármol, ensayo de flúor, índice de filtrabilidad, entre otros (Rodríguez JP, 2019; Cepis, 1992).

Una estación de tratamiento de agua potable (ETAP), planta de tratamiento de agua potable (PTAP) o planta potabilizadora, en términos de sus instalaciones físicas pueden tener varios contextos internacionales:

- **Ampliación de una ETAP o PTAP.** En donde se propone un conjunto de acciones y obras requeridas para aumentar la capacidad de producción en una instalación física existente.
- **Rehabilitación de una ETAP o PTAP.** En donde se establecen medidas para la implementación en la recuperación de la infraestructura física existente, cuyo estado actual no permite una operación apropiada, con el propósito de mejorarla operativamente y restablecer las condiciones de capacidad, calidad y continuidad, para la cual fue concebida y construida.
- **Optimización de una ETAP o PTAP.** En donde se establecen un conjunto de acciones para el mejoramiento de la capacidad, eficiencia y eficacia de la infraestructura física existente mediante una intervención parcial o total.
- **Reposición en una ETAP o PTAP.** En donde tiene como propósito reemplazar un activo que en sus condiciones no es apto para cumplir su funcionalidad en la operación, debido a que se le agotó la vida útil o porque

no es eficiente en su operación, y las condiciones tecnológicas evidencian que no es eficiente para la operación dentro de la instalación física existente.

Para la instalación física nueva en una ETAP o PTAP, la selección técnica de los procesos y operaciones tiene gran incidencia en el diseño de la planta potabilizadora y en la obtención del producto esencial denominado agua potable; por ende, también en el cumplimiento con límites admisibles establecidos en las normas de agua para consumo humano de cada país. Las consideraciones técnicas para la elección óptima de los procesos y las operaciones de la línea de aguas pueden variar según los parámetros de calidad del agua y su concentración: turbiedad, color aparente, alcalinidad, dureza total, hierro, manganeso, COT, algas, coliformes fecales, sabor y olor. Algunas pueden ser:

- **Agua cruda superficial (turbiedad  $\geq 20$  UNT y Color  $\geq 5$  UPC). Planta potabilizadora convencional:** mezcla rápida (aplicación de coagulantes y ayudantes de coagulación), mezcla lenta (floculación), sedimentación, filtración, desinfección.
- **Agua cruda subterránea (dureza  $\geq 180$  mg/L; hierro y manganeso  $\geq 2$  mg/L). Planta potabilizadora convencional:** aireación, mezcla lenta (floculación), sedimentación, filtración, desinfección.
- **Agua cruda superficial. Planta potabilizadora FIME:** mezcla rápida (aplicación de coagulantes), filtración (filtros lentos), desinfección.
- **Agua cruda superficial. Planta potabilizadora doble filtración:** mezcla rápida (aplicación de coagulantes), filtración (ascendente y descendente), desinfección.
- **Agua cruda superficial (turbiedad  $\leq 15$  UNT y color  $\leq 5$  UPC). Planta potabilizadora filtración directa:** mezcla rápida (aplicación de coagulantes), filtración (filtros rápidos), desinfección.
- **Agua cruda superficial (turbiedad  $\leq 10$  UNT y color  $\leq 10$  UPC). Planta potabilizadora filtración flotación:** mezcla rápida (aplicación de coagulantes y ayudantes de coagulación), mezcla lenta (floculación), flotación, filtración, desinfección.

- **Agua cruda subterránea. Planta potabilizadora ablandamiento:** aireación, mezcla lenta (floculación), sedimentación, recarbonatación, filtración, desinfección.
- **Agua cruda de mar. Planta de desalinización:** mezcla rápida (aplicación de coagulante), filtración (filtros rápidos y carbón activado), osmosis inversa (membranas), remineralización, desinfección.

Las ETAP o PTAP, como instalación física nueva, deben tener en cuenta aspectos tales como: el predio en condiciones estables en lo relacionado con la geomorfología, orografía, geología e hidrografía (bajo riesgo de inundación); conexión a una fuente de energía eléctrica o no convencional; acceso adecuado; área disponible apropiada, buen drenaje interno y zona de protección ambiental y social; en lo posible una cabeza hidráulica de presión de ingreso superior a 3 m.c.a según resolución 0330 de 2017.

Adicionalmente, se debe establecer la inclusión de la línea de agua lodo (subproducto de la línea de aguas) y de la línea de residuos (aparte de la línea de agua lodos de aluminio, hierro, manganeso o de ablandamiento) (García, 2019). Es significativo realizar una instrumentación para el monitoreo y control del cloro (sensor 0 a 20 mg/L; exactitud del 0.5 %), turbiedad (sensor de 0.5 a 1000 UNT; exactitud del 0.5 %), conductividad (sensor 0 a 2000  $\mu$ S/cm; exactitud del 0.5 %) y monitoreo de color (sensor 0 a 100 UPC; exactitud del 0.5 %). También se debe controlar el bombeo (elevación de la cabeza hidráulica) del agua, sedimentación, filtración, aplicación de productos químicos mediante dosificadores (polvo o líquidos) como coagulantes, ayudantes de coagulación, desinfectantes, neutralizadores, lodos generados, calidad del agua tratada, medición de caudal de entrada y salida, entre otros.

Lo anterior es con el propósito de producir un agua segura (sin patógenos, sin compuestos químicos), aceptable (sin olor y sin sabor), razonablemente blanda, sin características corrosivas, sin depósitos, sin incrustaciones y bajo contenido orgánico.

Adicionalmente, una ETAP o PTAP debe contar con un plan de calidad (metas de calidad del agua potable), plan de continuidad (metas de continuidad del servicio de agua potable), plan de obras complementarias (proyectos para el cumplimiento de las metas de estándares del servicio de agua potable), y un indicador de agua potable (calidad del agua potable mediante índices e indicadores pre establecidos).