



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO:**

**Análisis comparativo de los procesos de desinfección utilizados en la planta de tratamiento John J. Carroll con respecto a la Planta de Tratamiento Tibitoc.**

**PRESENTADO POR:**

**NOMBRE: LAURA VELANDIA MEDINA    CÓDIGO: 505853**

**DOCENTE ASESOR:**

**NOMBRE: JUAN SEBASTIÁN DE PLAZA**

**BOGOTÁ, D. C., 19 DE MAYO DE 2019**



## Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



**Sin Obras Derivadas** — No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

## TABLA DE CONTENIDO

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	8
2. ANTECEDENTES Y LIMITACIONES.....	12
2.1. ANTECEDENTES .....	12
2.1.1. HISTORIA DEL SISTEMA DE AGUA DEL ÁREA METROPOLITANA DE BOSTON ...	12
2.1.2. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA JOHN J. CARROLL .....	16
2.1.3. HISTORIA DEL SISTEMA DE AGUA DE BOGOTÁ .....	19
2.1.4. PLANTA DE TRATAMIENTO TIBITOC .....	22
2.1.5. PLANTA DE TRATAMIENTO FRANCISCO WIESNER.....	26
2.2. LIMITACIONES .....	27
3. JUSTIFICACIÓN.....	29
4. MARCO DE REFERENCIA.....	33
4.1. MARCO TEÓRICO.....	33
4.1.1. ESTERILIZACIÓN.....	33
4.1.2. DESINFECCIÓN.....	33
4.1.3. CLORO.....	33
4.1.4. OZONO .....	34
4.1.5. LUZ UV.....	34
5. ESTADO DEL ARTE.....	35
5.1. Historia de la desinfección .....	35
5.2. Métodos de Desinfección .....	36
5.2.1. Desinfección por Cloración.....	37
5.2.2. Desinfección por Radiación Ultravioleta .....	38
5.2.3. Desinfección por Ozonización .....	39
6. OBJETIVOS.....	40
6.1. General .....	40
6.2. Específicos.....	40
7. METODOLOGÍA.....	41
7.1. FASE I.....	41
7.2. FASE II .....	41
7.3. FASE III.....	41
7.4. FASE IV.....	41
7.5. FASE V .....	42
7.6. FASE VI.....	42
7.7. RESUMEN DE METODOLOGÍA.....	42

8. ÉNFASIS VISITA TÉCNICA INTERNACIONAL .....	43
8.1. VISITA TÉCNICA A PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE TIBITOC.....	43
8.2. VISITAS TÉCNICAS EN MASSACHUSETTS .....	48
8.2.1. REGISTRO FOTOGRÁFICO VISITA TÉCNICA DEER ISLAND TREATMENT PLANT	49
8.2.2. VISITA TÉCNICA A JOHN J. CARROLL WATER TREATMENT PLANT .....	50
8.2.3. REGISTRO FOTOGRÁFICO VISITA TÉCNICA JOHN J. CARROLL WATER TREATMENT PLANT .....	54
8.2.4. ASPECTOS OBJETO DE LA TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA VISITA CWTP .....	56
8.2.5. ASPECTOS OBJETO DE LA TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA VISITA PTAP TIBITOC .....	60
9. RESULTADOS - ANÁLISIS COMPARATIVO.....	63
9.1. CONCLUSIONES .....	75
10. BIBLIOGRAFÍA .....	79
11. ANEXOS.....	82

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Subproductos de la cloración .....	10
Figura 2. Porcentaje de logro de inactivación de patógenos PTAP J. Carroll .....	11
Figura 3. Embalse de Wachusett .....	13
Figura 4. Embalse de Quabbin .....	14
Figura 5. John J. Carroll WTP .....	16
Figura 6. Procedimiento en John J. Carroll WTP .....	17
Figura 7. Generador de Ozono, cuarto generador de ozono .....	18
Figura 8. Embalse de San Rafael .....	22
Figura 9. Dársena Presedimentación PTAP Tibitoc .....	23
Figura 10. Procedimiento PTAP Tibitoc .....	23
Figura 11. Estación de Bombeo PTAP Tibitoc .....	24
Figura 12. Floculación y sedimentación en PTAP Tibitoc .....	24
Figura 13. Filtración en PTAP Tibitoc .....	25
Figura 14. Salida de agua de PTAP Tibitoc para Bogotá. ....	25
Figura 15. Estación de Bombeo- Embalse San Rafael .....	26
Figura 16. Resalto hidráulico y aplicación de coagulante .....	26
Figura 17. Unidades de filtración - PTAP F. Wiesner .....	27
Figura 18. Tratamiento convencional en PTAP's. ....	30
Figura 19. Resumen de Metodología del Proyecto .....	42
Figura 20. Localización PTAP Tibitoc .....	43
Figura 21. Vista general PTAP Tibitoc .....	44
Figura 22. Sistema Tibitoc-Río Bogotá, Embalses Sisga, Tominé, Neusa, PTAP Tibitoc .....	44
Figura 23. Pre sedimentación en dársena PTAP Tibitoc .....	45
Figura 24. Canal de aducción PTAP Tibitoc .....	45
Figura 25. Floculadores PTAP Tibitoc .....	46
Figura 26. Sedimentadores PTAP Tibitoc .....	47
Figura 27. Unidades de Filtración PTAP Tibitoc .....	47
Figura 28. Localización Deer Island WTP .....	48
Figura 29. Visita Deer Island WTP .....	49
Figura 30. John J. Carroll WTP .....	50
Figura 31. Localización John J. Carroll WTP .....	50
Figura 32. Generadores de ozono John J. Carroll WTP .....	51
Figura 33. Cuarto de luz UV John J. Carroll WTP .....	52
Figura 34. Edificio de Post-Tratamiento John J. Carroll WTP .....	52

Figura 35. Tanques de Fluoruro John J. Carroll WTP.....	53
Figura 36. Tanques de CO2 conectados al Edificio de Post tratamiento John J. Carroll WTP .....	53
Figura 37. Sistema fotovoltaico John J. Carroll WTP .....	54
Figura 38-1. Registro fotográfico visita John J. Carroll WTP .....	54
Figura 39-1. Registro fotográfico visita John J. Carroll WTP .....	55
Figura 40. Modelo de la Gestión Integral del Agua para Bogotá.....	62
Figura 41. Tratamiento del agua en Tibitoc .....	64
Figura 42. Cantidad de Nitrato en fuentes de agua. ....	65
Figura 43. Conductividad eléctrica en fuentes de agua .....	66
Figura 44. pH en fuentes de agua.....	66
Figura 45. Oxígeno disuelto en fuentes de agua .....	67
Figura 46. E. Coli en fuentes de agua.....	67
Figura 47. Coliformes totales en fuentes de agua .....	68
Figura 48. Amoniacó en feuntes de agua .....	68
Figura 49. Tratamiento convencional de desinfección .....	75
Figura 50. Tratamiento avanzado en el agua. ....	76

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen del sistema Wachusett.....	13
Tabla 2. Resumen del Sistema Quabbin .....	14
Tabla 3. Conexiones del Sistema de Acueducto .....	15
Tabla 4. Pasos de tratamiento de agua en la planta de tratamiento de agua J. Carroll .....	19
Tabla 5. Coordenadas PTAP Tibitoc .....	22
Tabla 6. Muestras de Calidad embalses Massachusetts.....	56
Tabla 7. Resultados del agua después de tratamiento en CWTP .....	59
Tabla 8. Muestras de Calidad embalses Rio Bogotá .....	60
Tabla 9. Calidad de la Fuente de Agua.....	61
Tabla 10. Calidad del Agua Post-Tratamiento en PTAP .....	63
Tabla 11. Comparación características del agua en embalses.....	65
Tabla 12. Pasos de tratamiento de agua en la planta de tratamiento de agua Carroll.....	71
Tabla 13. Desinfección con Ozono .....	72
Tabla 14. Desinfección con Rayos UV .....	73
Tabla 15. Desinfección con Cloro.....	74

## **ANEXOS**

**Anexo 1.** Solicitud visita técnica en PTAP Francisco Wiesner.

**Anexo 2.** Diagramas de flujo realización de visitas técnicas.

**Anexo 3.** Informe de calidad del agua Embalses Wachusett y Quabbin.

**Anexo 4.** Informe calidad hídrica del Río Bogotá.

**Anexo 5.** Cuadro comparativo de métodos de desinfección.

**PERIODO** 2019-1.

**PROGRAMA ACADÉMICO:** Ingeniería Civil.

**ESTUDIANTE:** Laura Velandia Medina.      **CÓDIGO:** 505853.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO:** Juan Sebastián De Plaza.

**ALTERNATIVA:** Visita Técnica Internacional.

## **VISITA TÉCNICA INTERNACIONAL**

**LUGAR DE LA VISITA:** Planta De Tratamiento De Agua John J. Carroll.

**DURACIÓN Y FECHAS DE LA VISITA:** 05/12/2018 - 05/12/2018.

### **1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.**

El agua pura no existe en la naturaleza, el concepto que se debe usar es el de agua segura y agua potable, siendo la primera aquella cuyo consumo no implica ningún riesgo para la salud del consumidor, mientras que el agua potable es aquella que además de ser segura es satisfactoria desde el punto de vista físico, químico y biológico, es decir, es atractiva para su consumo como bebida[1].

Para conseguir agua segura o potable es necesario realizar un tratamiento al agua que se obtiene de la naturaleza. Este tratamiento se realiza en Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP), las cuales realizan varios procedimientos, uno de éstos es la desinfección. La desinfección es el proceso en el cual se destruyen microorganismos patógenos, pero no sus esporas. En el agua, el propósito principal es impedir la propagación de enfermedades hídricas, pues las posibles consecuencias para la salud por la contaminación microbiana son tales, que su control debe ser siempre un objetivo de importancia fundamental y nunca debe comprometerse [2].

Existen varios métodos para la desinfección del agua en las PTAP, ya sea con agentes químicos o con medios físicos. En Colombia, el método más empleado actualmente es la cloración, con agentes químicos, mientras que en otros países como Estados Unidos, se emplea principalmente la Ozonización y la Luz Ultravioleta (combinación de agentes químicos y medios físicos). Cada uno de estos métodos tiene sus ventajas y sus desventajas y se emplea uno u otro método, de acuerdo a las condiciones específicas del agua problema y teniendo en cuenta todos los factores que influyen en su fiabilidad, continuidad y eficacia.

Es evidente entonces, que el agua segura o potable y el saneamiento son uno de los principales motores de la salud pública, en cuanto se pueda garantizar el acceso al agua salubre y a instalaciones sanitarias adecuadas para todos, independientemente de la diferencia de sus condiciones de vida, se habrá ganado una importante batalla contra todo tipo de enfermedades [3].

Según cifras de la Organización Mundial de la Salud (OMS), 1,8 millones de personas mueren cada año debido a enfermedades diarreicas (incluido el cólera); un 90% de esas personas son niños menores de cinco años, principalmente procedentes de países en desarrollo. Pero la mejora de la calidad del agua de consumo mediante algún tratamiento, por ejemplo con la cloración, puede reducir en un 35% a un 39% los episodios de diarrea [3].

Otra cifra a destacar es la de Esquistosomiasis, se calcula que 160 millones de personas padecen Esquistosomiasis, la enfermedad causa decenas de miles de defunciones cada año, principalmente en el África subsahariana, y está estrechamente relacionada con la falta de higiene en la evacuación de excretas y con la falta de servicios cercanos de abastecimiento de agua potable, si existiera un saneamiento básico se reduciría esta enfermedad hasta en un 77% [3].

El Paludismo es otra enfermedad que requiere de atención, 1,3 millones de personas mueren cada año de paludismo; de éstos, un 90% son niños menores de cinco años. La mayor parte de la carga de morbilidad se registra en el África, al sur del Sahara, pero la intensificación de la irrigación, las presas y otros proyectos relacionados con el agua contribuyen de forma importante a esta carga, y el mejoramiento de la gestión de los recursos hídricos reduce su propagación, junto con el de otras enfermedades de transmisión vectorial [3].

En este mismo orden y dirección, es importante mencionar el tema de saneamiento, pues el saneamiento deficiente y el agua contaminada también están relacionados con la transmisión de enfermedades como el cólera, la disentería, la hepatitis A y la fiebre tifoidea. En todo el mundo, alrededor de 3 de cada 10 personas, o 2100 millones de personas, carecen de acceso a agua potable y disponible en el hogar, y 6 de cada 10, o 4500 millones, carecen de un saneamiento seguro, según un nuevo informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y del UNICEF [4].

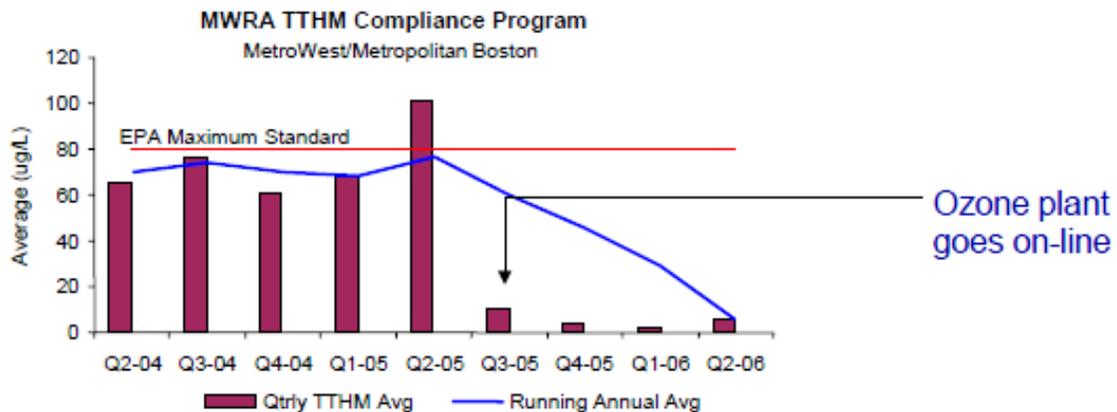
Un informe realizado por el Programa Conjunto de Monitoreo (JMP), *Progresos en materia de agua potable, saneamiento e higiene: informe de actualización de 2017 y evaluación de los ODS*, presenta la primera evaluación mundial de los servicios de agua potable y saneamiento «gestionados de forma segura». La conclusión fundamental es que todavía existen personas que no tienen acceso al agua potable, sobre todo en las zonas rurales [4].

Según la información que se registra, hay miles de millones de personas que han obtenido acceso a servicios básicos de agua potable y saneamiento desde el año 2000, pero estos servicios en muchos de los casos realmente no proporcionan agua potable ni saneamiento seguro, hecho que se respalda con la muerte de 361000 niños menores de 5 años, cada año a causa de la diarrea.[4]

Entonces a este punto se puede cuestionar lo siguiente, 1) ¿qué ventajas y desventajas trae la utilización de un método u otro para la desinfección del agua en las Planta de Tratamiento de Agua, que de allí va a las redes de distribución y que posteriormente es consumida por las personas?; 2) ¿por qué prefieren utilizar el cloro en la ciudad de Bogotá (PTAP Francisco Wiesner, PTAP Tibitoc, PTAP El Dorado ) y no Ozono ni Luz Ultravioleta como en Boston (Planta John J. Carroll)?

De acuerdo a estudios desarrollados en la Planta de tratamiento John J. Carroll al implementar el sistema de desinfección por Ozonización se obtuvieron cambios notables y considerables en las características del agua, su sabor y color, un aumento en la inactivación de patógenos, así como una dramática reducción en los subproductos de la desinfección. Por lo que se convirtió en el desinfectante primario en dicha planta, como se muestra a continuación [5].

Figura 1 Subproductos de la cloración

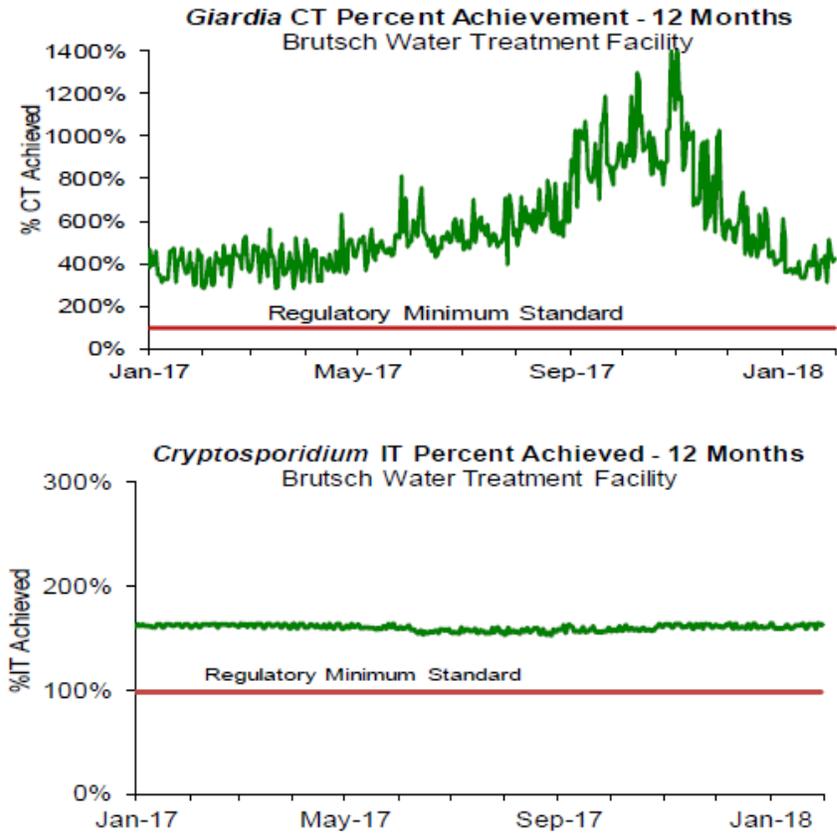


Fuente: MWRA

Como se observa en la gráfica, con tan sólo lograr la implementación de este sistema de desinfección en una Planta de tratamiento se obtienen resultados muy benéficos, en su caso se redujo la producción de Trihalometanos Totales (TTHMs), uno de los subproductos de tratamiento de desinfección con cloro con efectos potenciales adversos para la salud, de 100 ug/l a 10 ug/l aproximadamente.

Seguir utilizando el sistema de desinfección únicamente por cloración en la Planta de Tratamiento Tibitoc o demás PTAP que suministran agua a Bogotá, no reduce la creación de subproductos como los Trihalometanos Totales o los ácidos haloacéticos (HAA5s), ni la inactivación de patógenos como la giardia y el cryptosporidium, los cuales en la Planta de Carroll siempre se mantienen por encima del 100% de inactivación (ver Figura 2),[6][6] de manera que tendría una gran aplicación para la PTAP Tibitoc el cambio a este tipo de tecnología.

Figura 2 Porcentaje de logro de inactivación de patógenos PTAP J. Carroll



Fuente: MWRA

## **2 ANTECEDENTES Y LIMITACIONES.**

### **2.1 ANTECEDENTES**

#### **2.1.1 HISTORIA DEL SISTEMA DE AGUA DEL ÁREA METROPOLITANA DE BOSTON**

Antes de 1795, los bostonianos dependían de pozos locales, barriles de lluvia y un muelle en el Boston Common para su agua. En 1795, los proveedores privados de agua desarrollaron un sistema de entrega, utilizando tuberías de madera hechas de troncos de árboles para transportar agua desde Jamaica Pond hasta Boston Proper. Años después, en la década de 1840, la ciudad de Boston (población de 50,000) se enfrentó a problemas de calidad del agua y capacidad, y hubo varios incendios desastrosos que no pudieron contenerse debido a la falta de capacidad de entrega [7].

##### **Sistema de Cochituate: 1848-1951**

En 1845, la Junta de Agua de Cochituate comenzó la construcción de un sistema de transmisión, se incautó un afluente del río Sudbury, que creó el lago Cochituate, que con sus 17 millas cuadradas de cuenca hidrográfica, 2 mil millones de galones de almacenamiento y rendimiento de 10 mgd, se convirtió en la piedra angular del sistema de agua de Boston. Más adelante en 1870, el sistema de Mystic Lakes en Winchester, Medford y Arlington, que había sido desarrollado por Charlestown, se agregó al sistema de Boston cuando se anexó Charlestown. Este sistema de lagos tuvo un rendimiento de 30 mgd desde su cuenca hidrográfica de 28 millas cuadradas [7].

##### **El acueducto de Sudbury y el embalse Chestnut Hill: 1878**

Después de la Hambruna de la Papa irlandesa de 1843-45, Boston creció rápidamente y en 1870, su población excedió los 200,000 habitantes y consumió 17 mgd. Los planificadores no habían anticipado este rápido crecimiento; pensaban que el sistema de Cochituate sería adecuado durante muchos años, por lo que se repitió el proceso de desviar el agua de una fuente pura de tierras altas.

En 1878, la corriente principal del río Sudbury se desvió a través del acueducto de Sudbury hacia el embalse Chestnut Hill. Entre 1875 y 1898, se construyeron siete grandes embalses en la cuenca alta del río Sudbury. Los acueductos de Sudbury y Cochituate fueron diseñados para operar por gravedad para llenar Chestnut Hill y Brookline Reservoirs, ambos en Elevation 134. Los acueductos de Cochituate y Sudbury estaban interconectados en Chestnut Hill [7].

##### **Embalse de Wachusett: 1897**

El área metropolitana de Boston continuó creciendo rápidamente durante la década de 1890, la plomería interior se hizo común, los planificadores no habían previsto este desarrollo y el suministro se había vuelto inadecuado. En ese momento, se consideraron las siguientes fuentes de agua: el río Nashua, el lago Winnepesaukee, el lago Sebago y el río Merrimac. Bajo la dirección de Frederic Stearns, Ingeniero Jefe de

la Junta Metropolitana del Agua, se decidió que la nueva fuente de agua debería ser operada por gravedad y no requerir filtración.

En 1897, el río Nashua sobre la ciudad de Clinton fue confiscado por la presa Wachusett. Seis y 1/2 millas cuadradas se inundaron en las ciudades de Boylston, West Boylston, Clinton y Sterling, y su agua transportada por el acueducto Wachusett / Weston al embalse Weston y luego por un oleoducto a Chestnut Hill y Spot Pond Reservoirs. El trabajo se completó en 1905 y el depósito se llenó por primera vez en mayo de 1908 [7].

*Figura 3 Embalse de Wachusett*



*Fuente: MWRA*

El sistema Wachusett se construyó para dar servicio a los 29 municipios dentro del radio de 10 millas de la Casa del Estado. En ese momento, el embalse de Wachusett (ver Figura 3), era el embalse de suministro de agua público más grande del mundo. El agua del acueducto Wachusett podría ser liberada en los embalses del sistema del río Sudbury para su transporte a Boston a través del acueducto de Sudbury. El agua del embalse de Wachusett también podría fluir a través del nuevo embalse de Sudbury hacia el acueducto de Weston [7].

### **Resumen del Sistema de Wachusett**

*Tabla 1 Resumen del sistema Wachusett*

<b>Fuente</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Medios de transmisión</b>	<b>Destino de almacenamiento</b>	<b>Cañerías de agua</b>
Embalse de Wachusett	395 <sup>7</sup> /118 mgd* ----- 65 mil millones de galones	Acueducto de Wachusett	Embalse de Wachusett	Weston Aqueduct Supply Mains

*Fuente: MWRA*

## Embalse de Quabbin y consumo de Ware River: 1926 -1946

El embalse de Quabbin (Figura 4), era el cuarto alcance hacia el oeste de Boston en busca de una fuente de agua pura en las tierras altas que podría ser entregada por gravedad y no requerir filtración. La construcción del Quabbin requirió el embalse del río Swift y la toma de las ciudades de Dana, Enfield, Greenwich y Prescott.

Figura 4 Embalse de Quabbin



Fuente: MWRA

En 1926, comenzó la construcción del túnel Wachusett-Coldbrook, que ahora es la sección oriental del túnel Quabbin. El flujo excedente en Ware River se desvió al embalse de Wachusett durante ocho meses de alta mar y aumentó el rendimiento de seguridad en 40 mgd. Durante la década de 1930, el túnel Wachusett-Coldbrook se extendió al río Swift. Es un túnel de dos vías: el agua fluye hacia el oeste desde Ware River hasta Quabbin durante los meses de alta mar y luego hacia el este desde Quabbin a Wachusett en otras épocas del año [7].

La construcción del embalse de Quabbin comenzó en 1936. El llenado comenzó el 14 de agosto de 1939 y se completó en 1946 cuando el agua primero fluyó sobre el aliviadero. El embalse de Quabbin se llenó con agua del río Swift e inundaciones del río Ware durante ocho meses al año. En ese momento, el yacimiento de 412 mil millones de galones era el mayor embalse artificial del mundo dedicado exclusivamente al suministro de agua.

## Resumen del Sistema de Quabbin

Tabla 2 Resumen del Sistema Quabbin

Fuente	Rendimiento	Medios de transmisión	Destino de almacenamiento
Embalse de Quabbin	530'/155 mgd*	Acueducto de Quabbin	Embalse de Wachusett

Fuente: MWRA

### Acueductos de presión: 1950-1978

Después de la Segunda Guerra Mundial, las partes restantes del sistema de acueducto de presión se conectaron de la siguiente manera:

Tabla 3 Conexiones del Sistema de Acueducto

Parte del acueducto de presión	Descripción	Fecha de finalización	Comentarios
Acueducto de Chicopee Valley	Embalse de Quabbin a Chicopee	1950	Proyecto de redundancia de acueducto CVA (completado)
Túnel de la ciudad	Hultman Aqueduct Terminus a Chestnut Hill Reservoir	1951	
Extensión del túnel de la ciudad	El embalse de Chestnut Hill es parte del depósito de Fells	1961	
Túnel de Cosgrove	Embalse Wachusett para el inicio del acueducto Hultman	1965	
Túnel de Dorchester	Túnel de la ciudad en el embalse de Chestnut Hill, parte del embalse de Blue Hills	1978	Acueducto de Subdury y Chestnut Hill Reservoir desconectado.

Fuente: MWRA

A medida que estas secciones del acueducto de presión se han conectado, la necesidad de bombeo se ha reducido, ya que la gravedad puede proporcionar una mayor área de servicio. Las instalaciones antiguas que originalmente proporcionaban un nivel de redundancia a los nuevos túneles fueron retiradas del uso. Se prefirió confiar tanto en el nuevo sistema que estaba parcialmente completo, hasta el punto en que ahora se entrega el 85 por ciento de la demanda metropolitana. Muchas de estas expansiones buscaron utilizar la gravedad para suministrar agua en lugar de costosas operaciones de bombeo [7].

Tiempo después en 1985, el MWRA (Massachusetts Water Resource Authority) asumió la responsabilidad de la entrega y distribución de agua a 46 comunidades, principalmente en el área metropolitana de Boston. A partir de julio de 2013, MWRA es responsable de la entrega y distribución de agua a 51 comunidades, con la reciente incorporación de Bedford, Stoughton, Reading, Wilmington y Dedham-Westwood Water District. El sistema de agua se administra como una asociación con el Departamento de Conservación y Recreación (DCR), que aún mantiene la responsabilidad de administrar las cuencas hidrográficas del embalse.

El MWRA desarrolló el Programa de Suministro / Calidad de Agua Integrada para mejorar la confiabilidad y calidad del suministro de agua, y cumplir con los estrictos requisitos de la Regla de Tratamiento de Agua Superficial promulgada por la EPA federal bajo la Ley de Agua Potable Segura. El programa se basa en el enfoque de barreras múltiples ampliamente aceptado para proteger la calidad y la seguridad del agua potable a través de la protección de cuencas hidrográficas, el tratamiento adecuado del agua y la protección del agua tratada en tanques cubiertos y tuberías limpias.

En la actualidad, el agua de MWRA proviene del depósito Quabbin, a unos 65 kilómetros al oeste de Boston, y del embalse Wachusett, a unos 35 kilómetros al oeste de Boston. Estos dos embalses están llenos

de forma natural, y juntos suministraron diariamente a los consumidores cerca de 200 millones de galones de agua de alta calidad en el año 2017. Sobre las cuencas hidrográficas (tierra protegida alrededor de los embalses) cae la lluvia y la nieve y eventualmente se convierten en arroyos que desembocan en embalses. Este volumen de agua entra en contacto con tierra, rocas, plantas y otros materiales a medida que sigue su camino, si bien este proceso ayuda a limpiarla, también puede disolver y transportar cantidades muy pequeñas de materiales al embalse [8].

Los depósitos de Quabbin y Wachusett están protegidos. Más del 85% de las cuencas hidrográficas que rodean los embalses están cubiertas de bosques y humedales. Alrededor del 75% de la tierra total de la cuenca hidrográfica no se puede construir. Las cuencas naturales no desarrolladas ayudan a mantener el agua MWRA limpia y clara. Además, para garantizar la seguridad, el Departamento de Conservación y Recreación de Massachusetts (DCR, por sus siglas en inglés) prueba y supervisa a diario las corrientes y los depósitos. Debido a que están bien protegidos, el agua en los embalses Quabbin y Wachusett se considera de muy alta calidad [9].

### 2.1.2 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA JOHN J. CARROLL

La Planta de Tratamiento John J. Carroll (ver Figura 5), brinda tratamiento de agua potable de última generación para 41 comunidades en el este de Massachusetts atendidas por el MWRA. Completada en 2005, la planta realiza solamente el proceso de desinfección (ver Figura 6), utiliza la ozonización y, más tarde, la desinfección ultravioleta, el control de la corrosión y la cloraminación para tratar hasta 405 millones de galones de agua al día. Este tratamiento proporciona una mejor calidad de agua potable y fortalece la capacidad de la región para cumplir con la Ley Federal de Agua Potable Segura [10].

*Figura 5 John J. Carroll WTP*



*Fuente: MWRA*

Si bien muchos sistemas de agua deben filtrar el agua para eliminar las impurezas, las fuentes prístinas de MWRA le permiten cumplir con los estándares federales realizando una protección y desinfección agresivas. La planta de tratamiento de agua John J. Carroll proporciona una doble capa de protección contra la desinfección antes de que el agua ingrese en tuberías cerradas y tanques de almacenamiento que abastecen a las comunidades miembro.

Figura 6 Procedimiento en John J. Carroll WTP.



Fuente: Elaboración propia.

El ozono es un gas altamente reactivo que se crea al pasar una descarga de alto voltaje a través del oxígeno, similar a una descarga de un rayo que pasa a través del aire. Sin embargo, en el tratamiento del agua, la descarga eléctrica está confinada a un tubo dieléctrico alojado en un recipiente de acero inoxidable para prevenir cualquier liberación de ozono a la atmósfera. El gas de ozono se inyecta en un tanque de agua, llamado contactor. El gas de ozono se difunde en la parte inferior del contactor. Brota a través del agua entrante cuando pasa a través del tanque, matando patógenos, como virus, bacterias y protozoos, en el agua [10].

Un tiempo de contacto de 20 a 30 minutos garantiza que el ozono tenga tiempo suficiente para reaccionar con todos los contaminantes. La ozonización también mejora el sabor, el olor y la claridad del agua. El gas de ozono residual se recoge de la superficie del agua en el contactor, se conecta a través de los contactores y se trata para destruir el ozono restante (volviéndolo a oxígeno ordinario). El ozono es el primero de dos desinfectantes primarios en la Planta, el segundo es la luz ultravioleta. El agua ozonizada fluye a través de reactores UV que se agregaron a Carroll WTP en 2014 para cumplir con las nuevas regulaciones para tratar el agua potable para *Cryptosporidium* [10].

La luz UV es esencialmente una forma más potente de la desinfección natural de la luz solar. Los rayos UV permiten a MWRA inactivar los patógenos más difíciles de matar, que podrían estar en el agua de origen, sin el uso de productos químicos adicionales y los productos derivados de la desinfección asociados. El proceso UV y la fuente de agua de alta calidad de MWRA le permiten a MWRA cumplir los nuevos requisitos regulatorios de manera rentable.

El siguiente paso es tratar el agua con una mezcla de cloro y amoníaco, un proceso conocido como cloraminación, para proporcionar una desinfección residual. La desinfección residual protege el agua de la

contaminación bacteriana a medida que pasa por el largo sistema de distribución al consumidor. Se usa la cloraminación, como el ozono, porque forma menos subproductos que el uso del cloro en sí mismo y es de larga duración. MWRA agrega gas de dióxido de carbono y carbonato de sodio para controlar la corrosión de las tuberías por las que pasa el agua en su viaje a los usuarios, en particular para evitar que el cobre y el plomo se filtren de las tuberías domésticas. También se agrega flúor para promover la salud dental [10].

La planta de tratamiento de agua John J. Carroll incluye instalaciones y tuberías para transportar, tratar, mantener y controlar la calidad del agua potable. El edificio de ozono incluye cuatro generadores de ozono y cuatro contactores de ozono equipados con difusores de gas para distribuir el gas dentro de los contactores (ver Figura 7). Las unidades de destrucción de ozono convierten el gas residual de ozono en oxígeno antes de su liberación a la atmósfera.

*Figura 7 Generador de Ozono, cuarto generador de ozono*



*Fuente: MWRA*

Los vaporizadores convierten el oxígeno líquido en oxígeno gaseoso y empujan el gas de alimentación a los generadores de ozono. El oxígeno gaseoso que ingresa al generador es de 99% de oxígeno puro. A medida que el oxígeno pasa a través del generador, la electricidad aplicada al tubo dieléctrico crea gas ozono. El gas que sale del generador (típicamente 9% de ozono en peso) se conecta al sistema difusor ubicado en el fondo de los contactores. El gas de ozono burbujea a través del agua y destruye los patógenos.

Después de la desinfección, las tuberías transportan el agua ozonizada al Edificio de Tratamiento Posterior. Este edificio alberga seis grandes silos de almacenamiento de ceniza de sosa y equipos de alimentación /

mezcla relacionados, cuatro unidades de mezcla de dióxido de carbono y varias ubicaciones de inyección de productos químicos. El Edificio de Post Tratamiento está ubicado sobre el Tanque de Almacenamiento Cubierto de 45 millones de galones. El agua tratada fluye desde el tanque de almacenamiento hacia el túnel de suministro de agua MetroWest a través de un pozo ubicado junto al tanque y al acueducto Hultman.

Para cumplir con la regla de la Ley de Agua Potable Segura para plomo y cobre, MWRA agrega carbonato de sodio para ajustar la alcalinidad y el dióxido de carbono para estabilizar el pH del agua potable. Estos procesos proporcionan un agua potable estable y menos corrosiva a través de los sistemas de tuberías domésticos hasta el grifo. El post tratamiento también incluye las etapas de cloración y fluoración descritas previamente. El Generator Building alberga cuatro generadores de emergencia de 2.000kW capaces de alimentar todas las instalaciones de ozono, UV y pos tratamiento en caso de pérdida de potencia.

A continuación, en la Tabla 4 se muestra un breve resumen del tratamiento del agua en la John J. Carroll WTP.

Tabla 4 Pasos de tratamiento de agua en la planta de tratamiento de agua J. Carroll

TRATAMIENTO	DOSIS	PROPÓSITO
Ozono	1,5-4,0 mg/l	Para lograr la inactivación de <i>Cryptosporidium</i> de 2 registros (utilizando criterios específicos del sitio) y la inactivación de <i>Giardia</i> de 3 registros; desinfectante primario.
Bisulfito de Sodio	0,0-3,5 mg/l	Para eliminar el ozono.
Luz Ultravioleta		Desinfectante de agua; desactiva los parásitos químicamente resistentes como <i>Cryptosporidium</i> y <i>Giardia</i> .
Hipoclorito de Sodio	3,0-4,0 mg/l	Para la desinfección residual.
Ácido Hidrofluorosilícico de Sodio	0,9 mg/l	Para la salud dental.
Amoníaco Acuoso	0,6-0,85 mg/l	Combinar con cloro para formar monoclaramina para desinfección residual.
Carbonato de Sodio	35-37 mg/l	Para elevar la alcalinidad del agua para el búfer de pH; para minimizar el plomo y la lixiviación de cobre de las tuberías de la casa.
Dióxido de carbono	4,5-8,5 mg/l	Para ajustar el pH al nivel final.

Fuente: MWRA

### 2.1.3 HISTORIA DEL SISTEMA DE AGUA DE BOGOTÁ

Hacia los años 1600, la Sabana de Bogotá ofrecía un paisaje en el que se destacaban una serie de lagunas y ríos, donde los Muiscas, moradores originarios de la región, celebraban sus ritos más sagrados, y el

precioso líquido se encontraba tan ligado a sus vidas que era considerado una deidad llamada SIE. El Mono de la Pila fue la primera fuente construida en Bogotá en 1584, sus aguas eran conducidas hasta allí desde el río San Agustín. Debido a que la cañería que transportaba el agua atravesaba una arboleda de laureles se llamó el acueducto de los Laureles. Durante los siguientes 100 años se construyeron otras fuentes de agua igualmente rudimentarias [11].

La abundancia de agua encontrada por los conquistadores en la sabana era tal, que se convirtió en un factor determinante para la fundación del caserío de Teusaquillo, antiguo nombre de Santa Fé de Bogotá. La ciudad se localizó entre los ríos San Francisco y San Agustín, de los cuales tomaban líquido sus moradores, transportándola en Múcuras hasta las viviendas [11].

Tiempo después, en mayo de 1757 se inauguró el acueducto de Agua Nueva que se constituyó en la obra más importante de este período y conducía las aguas del río San Francisco a la ciudad. En 1886 el municipio concedió a Ramón B. Jimeno y a Antonio Martínez de la Cuadra la exclusividad para establecer, usar y explotar los acueductos de Bogotá y Chapinero por un período de setenta años. Como parte de este sistema, el 2 de julio de 1888 entró en funcionamiento el primer acueducto con tubería de hierro de la ciudad.

El sistema privado no fue la respuesta a las necesidades del servicio de la ciudad, por lo cual, en 1914 el Acueducto regresó a la Municipalidad y se dio inicio a una serie de obras para solucionar el problema de abastecimiento que venía sufriendo la ciudad. Se construyeron tanques en las zonas altas de la ciudad y se renovaron tuberías. En 1920 se inició la desinfección del agua por medio del Cloro y a finales de esta década se constituyó una nueva empresa con el Tranvía y el Acueducto.

El río Tunjuelo, el más grande de Bogotá, fue el primero en abastecer el primer acueducto moderno de la ciudad. Hoy en día, dos quintas partes de la población de Bogotá habitan en su cuenca, la cual fue urbanizada en los últimos 100 años. Entre 1900 y 1990, fue el período de crecimiento y desarrollo de la ciudad sobre esta hoya,: a comienzos del siglo XX, el río Tunjuelo fue pensado y usado como una solución al problema de abastecimiento de agua de Bogotá, mientras que en 1990 se concluyó la mayor obra de alcantarillado realizada en la ciudad sobre este río.

En 1933 se iniciaron obras importantes para la prestación del servicio, entre ellas, el embalse de la Regadera y la planta de tratamiento Vitelma, junto con los embalses de Chisacá y los Tunjos y la Planta de tratamiento de San Diego.[11] El río Tunjuelo, después de la terminación de las obras del embalse La Regadera en 1938, presentó con gran frecuencia y magnitud sequías. Este inconveniente fue tema recurrente en disertaciones técnicas y en la prensa y generó información valiosa para hacer una historia del Fenómeno de El Niño, ya que algunas de las sequías eran sin duda relacionadas con este fenómeno [12].

En 1938, fueron puestas en servicio las obras del nuevo acueducto, pero ya para el 25 de marzo de 1940 un artículo del periódico El Tiempo denunciaba la sequía total del embalse La Regadera. En abril del mismo año, una entrevista a Francisco Wiesner, administrador del Acueducto, desmentía el potencial peligro de este suceso, poniendo entredicho la importancia de esta obra para resolver los problemas de abastecimiento de agua para la ciudad. Luego en 1944, el ingeniero Arthur Casagrande realizó un informe sobre las reformas que debían hacerse al sistema de acueducto de Bogotá, en el cual propuso la construcción de un nuevo embalse, aguas arriba de La Regadera [12].

En 1949, Wiesner realizó el primer texto crítico sobre “el problema del agua en Bogotá”, entendido como un asunto global, en el cual analizaba las causas políticas, económicas y ambientales de éste. En su calidad de gerente de la Comisión Municipal de Acueducto, Wiesner dirigió el informe a los políticos de la ciudad, frente a los cuales denunciaba la miopía política que había primado a la hora de proyectar la ciudad y afrontar soluciones definitivas al problema de abastecimiento de agua en Bogotá [12].

Los cuestionamientos y dudas sobre el futuro del agua en Bogotá continuaron a la par con el desmedido aumento demográfico y urbano que sacudió a la ciudad en las décadas de 1950 a 1960. La desproporción entre la demanda de agua y la oferta exigieron nuevas fuentes de abastecimiento, desplazando el protagonismo que tuvo el río Tunjuelo a principios del siglo XX, el cual presentó problemas más críticos y recurrentes como la urbanización ilícita y desorganizada, y las inundaciones como efecto de este proceso de desarrollo de la ciudad [12].

En 1955 el acueducto se desvinculó del tranvía y se unió al sistema de alcantarillado, creando la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá -EAAB-, mediante el acuerdo 105 del Concejo Administrativo de la ciudad. Dado esto, se empezó el desarrollo de estudios para traer más agua a Bogotá y comenzó la construcción de la Planta de Tratamiento Tibitoc, que terminó en 1959 con una capacidad inicial de 3.5 metros cúbicos por segundo. Esta planta tuvo 2 ampliaciones posteriores que permiten hoy contar con una capacidad de 10.4 metros cúbicos por segundo, y se constituyó en el primer sistema de gran envergadura de la ciudad, que se surte de las aguas del río Bogotá que llegan por bombeo a la planta [11].

Ante el acelerado crecimiento de la ciudad, la EAAB puso en marcha el proyecto Chingaza. En 1972 se iniciaron las obras. En la primera etapa se construyó el embalse de Chuza, de donde el agua es transportada por túneles hasta la Planta de Tratamiento Francisco Wiesner (antigua Planta El Sapo), localizada en el municipio de La Calera. El sistema Chingaza se complementó con la construcción del Embalse de San Rafael (ver Figura 8), que empezó a funcionar en 1997 con una capacidad máxima de 75 millones de metros cúbicos, y también transporta su agua a la Planta de tratamiento Francisco Wiesner [11].

Figura 8 Embalse de San Rafael



Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá

#### 2.1.4 PLANTA DE TRATAMIENTO TIBITOC

La Planta de Tratamiento de Agua Potable Tibitoc hace parte del denominado Agregado Norte o Sistema del Río Bogotá y en el Distrito Capital abastece algunos sectores del norte de la ciudad, Engativá, Fontibón, Tintal Central y Suba. Dicha planta se localiza a unos 40 Km de Bogotá y presenta las siguientes coordenadas geográficas (referidas al elipsoide GRS 80):

Tabla 5 Coordenadas PTAP Tibitoc

ESTRUCTURA	COORDENADAS		ALTITUD (msnm)
	Longitud	Latitud	
BOCATOMA NORTE	73° 57' 51,100" W	4° 58' 57,500" N	2572
PLANTA DE TRATAMIENTO	73° 58' 12,100" W	4° 58' 41,100" N	2661

Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá

La PTAP Tibitoc trata aguas provenientes de los Ríos Bogotá y Teusacá, haciendo parte de este sistema también, los embalses Sisga, Neusa y Tominé.

Antes de ingresar a la PTAP Tibitoc, el Río Bogotá recibe descargas de aguas residuales tanto domésticas, como industriales y agropecuarias. Sin embargo, en los últimos años, se ha estado restringiendo el volumen y la carga contaminante de dichos vertimientos, gracias a labores de control realizadas por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR y a las gestiones que ante esta entidad ha hecho la Empresa de Acueducto de Bogotá – EAB. De la misma manera, el Río Teusacá se contamina por la presencia de actividades agropecuarias en su cuenca y el desarrollo de procesos suburbanos asociados a la vivienda campestre. El agua que entra a la PTAP Tibitoc es captada del Río Bogotá en el sector conocido como El Espino y del Río Teusacá en el Embalse de Aposentos[13].

Figura 9 Dársena Presedimentación PTAP Tibitoc



Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá

Una vez captada el agua, se conduce hasta la estructura conocida como dársena donde se lleva a cabo el proceso de presedimentación (ver Figura 9). La Planta de Tratamiento de Agua Potable Tibitoc está diseñada para tratar 12 m<sup>3</sup>/s y se trata de una planta tipo convencional, por lo que incluye los procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección (ver Figura 10).

Figura 10 Procedimiento PTAP Tibitoc



Fuente: Elaboración propia

Después de la presedimentación, el agua es bombeada para iniciar el proceso de tratamiento propiamente dicho, para lo cual se cuenta con dos estaciones de bombeo (ver Figura 11), una de ellas consta de 6 unidades y la otra de 4. Para evitar la interrupción de labores, esta planta cuenta con tres subestaciones eléctricas, dos como medidas alternas en caso de algún fallo en el suministro de energía.

A la entrada de las bombas se tiene un punto de control donde se realiza medición de parámetros como pH, turbiedad y alcalinidad. El agua bombeada es conducida hacia el canal de aducción y en el trayecto se cuenta con puntos para aplicación cloruro férrico y PAC o sulfato líquido, como insumos para la coagulación y floculación.

*Figura 11 Estación de Bombeo PTAP Tibitoc.*



*Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá*

Posteriormente el agua pasa a los floculadores de allí a los sedimentadores donde se logran grandes remociones de turbiedad. Desde el cuarto de control de floculadores, se lleva a cabo la operación de estas estructuras y se hace un seguimiento en tiempo real a su funcionamiento. Al final de este cuarto se tiene un punto de control donde se monitorea la calidad del agua en esta etapa del proceso (ver Figura 12).

*Figura 12 Floculación y sedimentación en PTAP Tibitoc.*



*Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá*

Después del proceso de sedimentación el agua pasa a los canales de agua clarificada y de aquí a los filtros. Finalmente el agua es sometida al proceso de desinfección y una vez se ha potabilizado totalmente se traslada hasta las líneas de conducción ya sea para la ciudad de Bogotá o para los otros municipios abastecidos desde esta planta (ver Figura 13).

*Figura 13 Filtración en PTAP Tibitoc.*



*Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá*

El agua tratada sale de la PTAP Tibitoc a través de dos tuberías, una de 60" y otra de 78", siendo esta última la que atraviesa la Sabana de Bogotá desde el municipio de Zipaquirá hasta los Cerros de Ciudad Bolívar en el Distrito Capital. Dicha tubería recorre paralelamente la Autopista Norte hasta la Calle 129 y luego va por la Avenida Boyacá hasta el tanque de Casablanca localizado en el barrio Jerusalén. De acuerdo con el Documento Técnico Soporte del Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, desde la PTAP Tibitoc se distribuye agua en la ciudad a través de una gran cantidad de líneas matrices (ver Figura 14).

*Figura 14 Salida de agua de PTAP Tibitoc para Bogotá.*

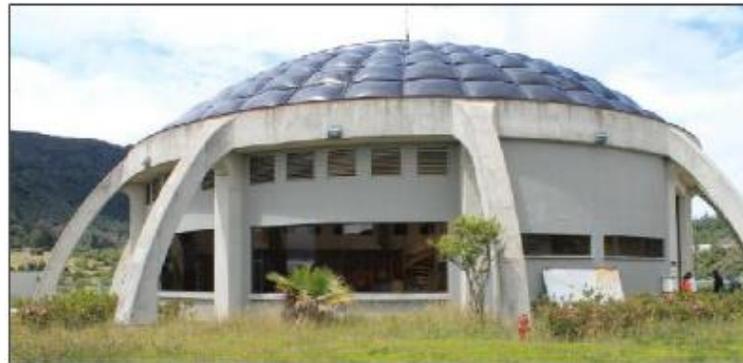


*Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá*

### 2.1.5 PLANTA DE TRATAMIENTO FRANCISCO WIESNER

La PTAP Francisco Wiesner es una planta de filtración directa, que recibe aguas del Sistema Chingaza y del Embalse de San Rafael. El control del flujo de agua cruda desde el sistema de Chingaza se hace a través de la válvula Howel Bunger de 3.30 metros de diámetro, localizada en la transición de presión a flujo libre del túnel Palacio-Río Blanco; por su parte, desde el Embalse de San Rafael el agua se recibe a través de una estación de bombeo conformada por 4 unidades (ver Figura 15), cada una con una capacidad de 5 m<sup>3</sup>/s [14].

*Figura 15 Estación de Bombeo- Embalse San Rafael*



*Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá*

La PTAP Francisco Wiesner cuenta con una estructura de llegada que ingresa el influente a la planta, el cual está constituido por aguas del Sistema Chingaza y del Embalse de San Rafael. En su incorporación al proceso de potabilización, el agua pasa por una estructura de agitación que genera un resalto hidráulico para la aplicación del coagulante (ver Figura 16), y posteriormente, pasa al canal de repartición, que la distribuye hacia las baterías de filtros, conformadas por 16 unidades, donde se lleva a cabo la formación de flocs (ver Figura 17) [14].

*Figura 16 Resalto hidráulico y aplicación de coagulante*



*Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá*

Por último, el agua entra al tanque clorador o cámara de contacto, que tiene un volumen de 50.000 m<sup>3</sup> y una altura de 9,60 metros. Allí se realiza el proceso de desinfección mediante la aplicación de cloro y un compuesto químico denominado “miox”, cuya base es el cloruro de sodio o sal común y del que se separa el Cl para la desinfección del agua.

*Figura 17 Unidades de filtración - PTAP F. Wiesner*



*Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá*

La conducción del agua tratada inicia con dos túneles, uno de ellos antiguo y sin revestir llamado Túnel de Usaquén que empata con un sifón en tubería de acero y regresa luego a su condición de túnel en el tramo denominado Túnel Santa Bárbara y, por otro lado, un túnel nuevo y revestido denominado Túnel Alternativo de Usaquén, construido y puesto en operación por la EAAB en agosto de 2002. La conducción se complementa con un sistema de tuberías y, todo el conjunto que alimentan a los diferentes tanques almacenamiento distribuidos por la ciudad en forma directa desde la PTAP, se denomina líneas expresas [14].

## **2.2 LIMITACIONES**

Como se sabe, Estados Unidos es el país más poderoso del mundo, razón por la cual es un país que puede invertir e implementar cualquier tecnología o innovación para la producción, desarrollo u optimización de sus recursos si así lo desea, sin correr con un mayor riesgo que no se pueda atender. Mientras que Colombia, a pesar de que es una nación rica en biodiversidad y recursos naturales, no cuenta con una economía ni apoyo político que respalde este tipo de riesgos, es una nación que pone mucha resistencia en estas decisiones de experimentación y por lo tanto, se debe reconocer que si el método de desinfección

utilizado en Estados Unidos es mejor que el de Colombia, será difícil cambiar el procedimiento actual de tratamiento del agua en el país.

Con esto, es importante tener en cuenta que hay varios factores que intervienen en la desinfección del agua en las Plantas de Tratamiento (calidad del agua, infraestructura, medio ambiente, seres humanos, clima, entre otras cosas), cualquiera de estos puede ser la razón por la que el método de desinfección del agua por cloración, desarrollado en la Planta de Tratamiento Tibitoc, no ha sido modificado aún, de modo que si no se pueden modificar estas condiciones, así sea un mejor desinfectante el ozono y los rayos ultravioleta, sería más complicado implementar estos métodos.

Es evidente entonces, que Estados Unidos se encuentra en condiciones completamente diferentes a las de Colombia, y que sin antes realizar el análisis comparativo que contemple todos los factores involucrados en el proceso de desinfección del agua en ambas plantas, se debe considerar la posibilidad de que no se pueda implementar en la PTAP Tibitoc, el método utilizado en la Planta de Tratamiento John J. Carroll. de desinfección por Ozonización y Luz Ultravioleta.

Cabe mencionar otra limitante que debe ser considerada para el desarrollo de este proyecto, la obtención de información de ambas plantas de tratamiento de agua potable, pues se requiere la visita a ambas, lo cual implica viajar a Estados Unidos para el caso de *John J. Carroll WTP*, y adicional a esto el suministro de la información por parte de las empresas, lo cual siempre es un proceso tedioso y lento, recordando que en la Planta de John J. Carroll maneja otro idioma, el inglés, lo que dificulta aún más el proceso de adquisición y apropiación de dicha información.

### 3 JUSTIFICACIÓN.

Visitar la Planta de Tratamiento de Agua John J. Carroll es necesario, porque a pesar de poder recolectar información importante que proporciona la Autoridad de Recursos de Agua de Massachusetts al público, sobre el funcionamiento y procesos realizados en la planta, ésta no es suficiente ni resuelve varios cuestionamientos que se han desarrollado durante la investigación, además, es necesario contar con una Tibitoc para realizar un análisis completo, se debe hacer a la Planta John J. Carroll.

Entonces tener contacto con las instalaciones, poder hablar con los trabajadores u operarios con el fin de resolver dudas, y poder apreciar los procesos directamente en ambas plantas, será la manera de apoyar este proyecto en mayor medida, de realizar el análisis comparativo que cumpla con el objetivo establecido y de realizar así una verdadero apropiamiento de la tecnología implementada allí que pueda introducirse en Bogotá, reconociendo que los resultados de las pruebas que se realizan en la Planta de tratamiento John J. Carroll cada año concluyen que la calidad de su agua es excelente, y uno de los propósitos subsecuentes a este estudio es el mejoramiento y optimización de los procesos realizados en las Plantas de tratamiento de Colombia.

Actualmente se cuenta con varias investigaciones que comparan los diferentes métodos que existen para la desinfección del agua, los cuales, sirven de apoyo para esta investigación, pero específicamente no se cuenta con un análisis para el caso de la Planta de John J. Carroll ni para el de la Planta de Tratamiento Tibitoc, por lo que tampoco se han comparado entre sí los procesos de desinfección realizados en cada una, entonces resulta muy oportuno y beneficioso para nosotros la realización de este estudio.

Como se sabe, Estados Unidos es el líder del nuevo orden mundial, gracias a su hegemonía económica, capacidad bélica y control de importantes instituciones supranacionales (como el Consejo de Seguridad de la ONU), debido a que sus recursos naturales son abundantes, cuentan con un amplio mercado interno y realizan grandes ayudas oficiales al proceso de innovación (tecnología).[15] Mientras que Colombia, es un país en vías de desarrollo, es decir, un país que se encuentran en pleno desarrollo económico, que está en transición de costumbres, hábitos y tecnología. Entonces realizar un análisis comparativo de los procesos realizados actualmente en Colombia, respecto a los de Estados Unidos ayuda a ver qué tan grande es esa brecha que enmarca estos dos países pero que se busca reducir.

En ese mismo sentido, este análisis comparativo se pretende realizar debido a los acontecimientos que se han registrado a través de la historia, como a mediados del siglo XIX cuando se determinó a través

de un estudio, que la mayoría de las enfermedades de origen hídrico eran ocasionadas por la presencia de concentraciones de microorganismos patógenos que contaminan el agua, por lo que el tratamiento adecuado y la entrega en condiciones favorables del agua a las personas adquirió mayor importancia.

Normalmente, el proceso de desinfección del agua es el último que se desarrolla en las Plantas de Tratamiento de Agua Potable convencionales (ver Figura 18), pero es uno de los más importantes debido a los grandes efectos positivos o negativos que se generan en el agua, y por ende a las personas. El proceso de desinfección, así como puede generar la reproducción de subproductos que produzcan alteraciones en el cuerpo humano y perjudiquen la salud, también podría ser la única forma de garantizar la eliminación de microorganismos patógenos, los cuales deterioran al ser humano.

Figura 18 Tratamiento convencional en PTAP's.



Fuente: Elaboración propia.

Con base en las consideraciones anteriores, resulta oportuno mencionar que otro de los motivos por los que se pretende realizar este análisis comparativo, es porque se quiere emplear un método de desinfección en la Planta Tibitoc que no genere en el agua efectos perjudiciales que comprometan la salud de los consumidores. La cloración, método utilizado en esta Planta, ha arrojado resultados desfavorables, debido a la generación de sustancias adversas para la salud de las personas, denominados subproductos [16]. Por lo que se debe cuestionar la metodología a implementar para realizar la desinfección del agua, pretendiendo evitar o mitigar esta situación en alguna medida con la investigación.

A pesar del beneficio de la desinfección del agua mediante la cloración, el cloro se caracteriza por ser altamente reactivo y producir subproductos indeseados al reaccionar con la materia orgánica natural del agua. Los subproductos de la cloración tienen propiedades mutágenas y cancerígenas, por lo que han sido extensamente estudiados desde que se detectaron por primera vez, en 1974. La exposición humana a dichos compuestos se ha asociado en estudios epidemiológicos, principalmente a cáncer de diversos tipos y a efectos adversos en neonatos de madres expuestas [16]. Es evidente entonces, que obtener eficacia máxima del desinfectante sobre la variedad de condiciones microbiológicas que se pueden esperar, es de gran importancia.

Entre los subproductos generados por la cloración, los Trihalometanos (THMs) y los Ácidos acéticos halogenados (HAA) son los mayoritarios. Los THMs son los subproductos de la cloración que se forman en mayor concentración. Por ello, se han utilizado tradicionalmente como indicadores de la concentración total de subproductos de la cloración. Sus valores en el agua clorada pueden variar de manera considerable en función del origen del agua. Así mismo, por la misma causa, los cuatro THMs (cloroformo ( $\text{CHCl}_3$ ), bromodiclorometano ( $\text{CHBrCl}_2$ ), dibromo- clorometano ( $\text{CHBr}_2\text{Cl}$ ) y bromoformo ( $\text{CHBr}_3$ )), se forman también en diferente proporción. Las aguas subterráneas, al tener una menor cantidad de precursores orgánicos y requerir una dosis inferior de cloro, darán lugar a concentraciones más reducidas de subproductos que las aguas superficiales [17].

Por otra parte, Los (HAA) forman un conjunto de nueve compuestos con diferente contenido de cloro y de bromo: ácido cloroacético, dicloroacético, tricloroacético, bromoacético, dibromoacético, tribromoacético, bromocloroacético, di- bromocloroacético y bromodicloroacético. La concentración total de HAA en el agua clorada suele ser la mitad que la de THMs y no han sido investigados tan a fondo. Los HAA más abundantes son los que contienen dos átomos de cloro y/o bromo. Los subproductos de la cloración formados en menores concentraciones son los Acetonitrilos halogenados, MX (mutágeno X), Hidrato de cloral, Clorofenoles, halocetonas, cloropicrina, cloruro y bromuro de cianógeno [17].

Hechas las aclaraciones anteriores, los efectos de los subproductos de la cloración han sido identificados en estudios toxicológicos y epidemiológicos, los estudios toxicológicos analizan el efecto sobre los animales de laboratorio expuestos a dosis diferentes de un producto específico y los datos obtenidos son extrapolados para el caso de humanos, lo que permite establecer dosis asociadas a riesgos significantes para la salud humana [18].

Los estudios realizados han confirmado que los THMs pueden inducir tumores en los animales de laboratorio y que todos, a excepción del cloroformo, tienen actividad mutagénica. También hay experiencias de laboratorio con roedores que han demostrado que el bromodiclorometano tiene una actividad esperma tóxica. Aunque el mecanismo de acción sea diferente para cada THM, todos tienen en común la acción genotóxica de los metabolitos. Los THMs se absorben fundamentalmente en el tracto gastrointestinal y el cloroformo también es absorbido por los pulmones [17].

Por otra parte, se ha evidenciado en los estudios que los ácidos dicloroacético, tricloroacético, y los ácidos acéticos bromados son inductores de tumores en roedores de laboratorio. También se observó actividad espermatotóxica en los ácidos dicloroacético, y dibromoacético. El ácido tricloroacético demostró ser teratógeno en experimentos con animales, y el metabolismo para cada HAA demostró ser diferente. Mientras el ácido dicloroacético es absorbido con rapidez en el intestino y se metaboliza rápidamente, el ácido tricloroacético se metaboliza en pequeña proporción y la mayoría del compuesto sin metabolizar se excreta por la orina [17].

## **4 MARCO DE REFERENCIA.**

### **4.1 MARCO TEÓRICO.**

#### **4.1.1 ESTERILIZACIÓN**

Proceso mediante el cual se alcanza la muerte de todas las formas de vida microbianas, incluyendo bacterias y sus formas esporuladas altamente resistentes, hongos y sus esporos, y virus. Se entiende por muerte, la pérdida irreversible de la capacidad reproductiva del microorganismo. Se trata de un término absoluto, donde un objeto está estéril o no lo está, sin rangos intermedios [19].

#### **4.1.2 DESINFECCIÓN**

Proceso en el que se eliminan los agentes patógenos reconocidos, pero no necesariamente todas las formas de vida microbianas. Es un término relativo, donde existen diversos niveles de desinfección, desde una esterilización química, a una mínima reducción del número de microorganismos contaminantes. Estos procedimientos se aplican únicamente a objetos inanimados [19].

Teniendo en cuenta lo anterior, cuando una población bacteriana es expuesta a un agente letal físico o químico, se produce una progresiva reducción del número de sobrevivientes, de modo que la curva que representa el número de sobrevivientes en función del tiempo, tiene forma exponencial decreciente, aunque existen varios factores que afectan la cinética de destrucción de estos microorganismos como 1) concentración del agente, 2) tiempo de exposición, 3) pH del medio, 4) temperatura, 5) presencia de materiales extraños, 6) resistencia propia del microorganismo, 7) número inicial de la población, entre otros [20].

#### **4.1.3 CLORO**

El cloro y sus derivados son los agentes desinfectantes que más se emplean en el mundo. Uno de los desinfectantes más comunes son el Cloro libre, cloraminas y dióxido de cloro. La cloración es la clase más popular (y más antigua) de aditivos químicos. Además de que el cloro es también un oxidante, así que ayuda a eliminar el hierro, el ácido sulfhídrico y otros minerales [21].

Es posible emplear compuestos tales como: el cloro gas, el hipoclorito de sodio, el hipoclorito de calcio o compuestos organoclorados como el ácido tricloroisocianurico (cloro 90). Eventualmente todos ellos producen el ácido hipocloroso HClO y el ión hipoclorito ClO<sup>-</sup> que son los agentes activos, y su efectividad depende de la cantidad de estos componentes que el compuesto clorado forme al estar en solución acuosa [21]

#### **4.1.4 OZONO**

Por otra parte, el ozono, un gas incoloro, trata a los contaminantes orgánicos e inorgánicos casi de la misma manera que la cloración pero es aún más eficaz contra las bacterias y otros gérmenes. Los sistemas de ozono no son comunes en todo el mundo porque requieren mucha infraestructura, y su implementación puede tener un alto costo [22].

#### **4.1.5 LUZ UV**

En este mismo orden y dirección, la luz ultravioleta, es una parte invisible del espectro electromagnético que mata bacterias y virus en el agua expuesta a sus rayos, y se produce típicamente por medio de lámparas de mercurio. El proceso UV es de costo económico y se usa con frecuencia en instalaciones de pequeña escala, pero no es tan eficaz como otros desinfectantes en fuentes de suministro de agua superficial que contienen muchas partículas en suspensión [22].

## **5 ESTADO DEL ARTE.**

Como ya se mencionó, la desinfección es un tratamiento que se desarrolla en las PTAP's, en el cual los organismos patógenos (productores de enfermedades) son destruidos o inactivados gracias a la realización de tratamientos físico químicos, como la aplicación directa de energía; radiación Ultravioleta, gamma, X y microondas; disrupción ultrasónica; y adición de reactivos químicos. Siendo este último, el método que se usa con mayor regularidad para la desinfección de aguas y aguas residuales.

Gran parte de los organismos patógenos son destruidos y/o eliminados durante las distintas operaciones que se desarrollan en las Plantas de Tratamiento de Agua (coagulación, sedimentación, filtración, ablandamiento por cal-sosa y adsorción). Al desarrollar estas operaciones en serie, los organismos patógenos se reducen en número considerable. A pesar de ello, en el tratamiento del agua generalmente se efectúa una desinfección específica para garantizar una protección en contra de las enfermedades transmitidas a través del agua.

El proceso de desinfección en el tratamiento del agua, debe diferenciarse del proceso de esterilización, pues este último implica la total destrucción o inactivación de todos los microorganismos, incluyendo bacterias, quistes de amebas, algas, esporas y virus. La desinfección no destruye todos los microorganismos, ni siquiera los patógenos. Por ejemplo, los virus de la polio y hepatitis no se destruyen totalmente por las técnicas más corrientes de desinfección.

### **5.1 Historia de la desinfección**

Existe evidencia de que la desinfección para el agua potable se ha realizado desde los primeros días que registra la historia. A través de las Escrituras, se encuentra que varias civilizaciones realizaban prácticas similares a la de los persas, la ley persa antigua requería que el agua potable antes de su uso se almacenara en vasijas de cobre brillante o plata. Los Egipcios, por su parte, empleaban la filtración para purificar el agua en el año 100 a.C.; los trabajos de Aristóteles indicaban la utilización de vasijas de porcelana no vitrificada; y por otra parte, hervir el agua ha sido una práctica muy antigua usada para evitar la propagación de enfermedades [23].

La primera observación registrada de una amplia transmisión de enfermedad por un suministro de agua pública es la de Londres en el año 1854, donde apareció la epidemia de cólera asociada con el pozo de la calle Broad. John Snow y John York, del Comité de investigación del cólera de Londres, llevaron a cabo un cuidadoso estudio del foco epidémico, y los resultados obtenidos concluyeron de forma contundente, que la epidemia de cólera asiática de la calle Broad estaba asociada con la contaminación del suministro del agua del pozo del distrito [24].

Treinta y ocho años más tarde, en Hamburgo, Alemania, se demostró de forma definitiva la dependencia de la transmisión del cólera con el agua infectada. Hamburgo, que recibía el agua del Elba, registró durante dos meses de verano del año 1882, 17000 casos de cólera, la mitad de ellos terminaron con muerte. Por otra parte en Arona, una ciudad cercana que también obtenía su agua del Elba, efectuó una filtración lenta con arena antes de mandar el agua al sistema de distribución, lo que permitió valorar la acción desinfectante de dicha filtración, mientras en Hamburgo se veía azotado por la epidemia, Altona registró unos pocos casos de cólera [24].

Años después, en 1872 apareció una epidemia de fiebre tifoidea en Lausana, Suiza, que se extendió más de 25 años y procedía de la contaminación de los suministros de agua pública. En el año 1885, aparecieron varias epidemias severas en Plymouth, Pennsylvania, en 1890-1891 en Lawrence y Lowell, Massachusetts, en 1890-1892 en Chicago, Illinois, en 1893-1893 en Ashland, Wisconsin, en 1908 en Mankato Minnesota, en 1895-1905 en Pittsburg, Pennsylvania y a principios del siglo XX en Lincoln, Inglaterra. Todas asociadas a la contaminación de los suministros de agua [24].

En 1904 después de la epidemia de fiebre tifoidea de Lincoln, Mr. Alexander Houston del Consejo de aguas de la ciudad de Londres, introdujo la cloración continua de un suministro de agua pública usando hipoclorito sódico como desinfectante. Más adelante, en 1908 se introdujo la desinfección química de los suministros públicos en los Estados Unidos implementando hipoclorito cálcico para el suministro de agua en la ciudad de Chicago. Posteriormente, en New Jersey en 1910, el Tribunal Supremo pasó una orden con la cual la ciudad de Jersey tenía derecho a clorar el suministro de agua en interés de la salud pública [24].

Después de la decisión de la ciudad de Jersey, Lincoln y Chicago, de utilizar hipoclorito como desinfectante químico, la práctica de la cloración se extendió rápidamente en los Estados Unidos, pero no tanto como podría haberse esperado debido a la relativa inestabilidad de los hipocloritos usados como desinfectantes. Es importante mencionar que uno de los factores más importantes que aceleró la práctica de la cloración, fue la construcción de instalaciones en las Cataratas del Niágara para la aplicación de cloración líquida, en 1912. A partir de este hecho, la cloración llegó a ser una operación común en el tratamiento de los suministros de agua pública en Estados Unidos [24].

## **5.2 Métodos de Desinfección**

El mecanismo para la destrucción de los organismos en la desinfección del agua depende principalmente de la naturaleza del desinfectante y del tipo de organismo. Aunque los mecanismos de desinfección no están completamente esclarecidos, existe evidencia de que la mayor parte de los desinfectantes destruyen la proteína celular, principalmente por inactivación de los sistemas enzimáticos críticos, los cuales son esenciales para la vida microbiana [24].

La presencia y generación de enzimas dentro de la célula bacteriana, sugiere que el mecanismo de desinfección implica al menos, dos pasos: (1) penetración del desinfectante a través de la pared celular; y, (2) la reacción con las enzimas dentro de la célula. Los agentes químicos tales como ozono, dióxido de cloro y cloro, son capaces de oxidar a los compuestos orgánicos, y pueden actuar como desinfectantes por degradación química directa de la materia celular. Sin embargo, es importante reconocer que el poder de oxidación o energía libre, no es necesariamente una medida de la capacidad desinfectante.

Mientras la aplicación directa de energía calórica, irradiación por onda corta, o disrupción ultrasónica, producen la destrucción física de los microorganismos, un número considerable de compuestos químicos orgánicos e inorgánicos ejercen efectos venenosos sobre los microorganismos, principalmente por interacción con las proteínas enzimáticas o por cambios estructurales bruscos dentro de la célula.

Algunos agentes oxidantes fuertes son el ozono, el permanganato y el agua oxidada, los cuales pueden desinfectar por inactivación enzimática específica, o más drásticamente, por oxidación degradativa del material celular. Mientras otros agentes químicos como el cloro y halógenos, realizan su acción desinfectante basados en la rápida inactivación enzimática.

### **5.2.1 Desinfección por Cloración**

El cloro es una opción de tratamiento de bajo costo que se utiliza para mejorar el sabor y la claridad del agua a la vez que se eliminan muchos microorganismos como bacterias y virus. Sin embargo, el proceso tiene sus limitaciones. Existen ciertos parásitos, como *Giardia* y *Cryptosporidium*, que son resistentes al cloro, a menos de que se utilicen dosis más elevadas para el tratamiento. La presencia de estos parásitos puede requerir el tratamiento previo del agua fuente [22].

La desinfección por cloración se puede lograr con diferentes productos. El cloro se almacena como líquido en recipientes presurizados y se inyecta como gas directamente en el agua fuente. Este proceso debe ser regulado e implementado cuidadosamente, debido a que el gas de cloro es un tóxico peligroso, incluso letal. Otra opción de cloración, de mayor costo, es el tratamiento con solución de hipoclorito de sodio. Esta solución es corrosiva pero mucho menos peligrosa y más fácil de manejar el gas de cloro. El líquido se diluye simplemente y después se mezcla con el agua fuente para realizar la desinfección [22].

La cloración se puede lograr también con un desinfectante sólido, hipoclorito cálcico. Este material es corrosivo y puede reaccionar explosivamente cuando entra en contacto con materiales orgánicos. Sin

embargo, todos estos polvos, gránulos y tabletas se pueden almacenar a granel y usarse con eficacia hasta un máximo de un año. En todas sus formas, el hipoclorito de calcio se disuelve fácilmente en agua [22].

Todos estos métodos de cloración requieren de algún tiempo para funcionar, la desinfección no ocurre instantáneamente. Las dosis necesarias cambian también con las variaciones en la calidad del agua de manera que el monitoreo del agua fuente, particularmente de las aguas superficiales, es una parte importante del proceso de tratamiento.

Cabe mencionar, que el tratamiento con cloro tiene algunos efectos residuales, entre los más notorios se encuentra el sabor desagradable en el agua tratada, pero otros efectos posteriores pueden ser más significativos. En los suministros de agua tratada quedan cantidades residuales de cloro, este contenido químico continúa protegiendo al agua tratada contra la reinfeción, y puede ser beneficioso para el agua sujeta a largos períodos de almacenamiento para la lenta distribución en áreas extensas [22].

Es relativamente sencillo y de bajo costo fabricar cloro, y transportarlo como hipoclorito de sodio o de calcio. Además, se requiere de muy poco entrenamiento para usarlo. Estas características lo han vuelto popular como tratamiento en el punto de uso incluso en zonas empobrecidas a pesar de sus limitaciones para eliminar parásitos. En combinación con prácticas seguras de almacenamiento y de manejo del agua y los alimentos, el uso de la cloración ha producido descensos significativos en enfermedades diarreicas en muchos lugares [22].

### **5.2.2 Desinfección por Radiación Ultravioleta**

En 1955, se pusieron en funcionamiento instalaciones prácticas de desinfección UV para agua potable en Suiza y Austria. Treinta años más tarde, el número de instalaciones en dichos países había aumentado a 500 y 600 respectivamente, y debido al descubrimiento de los subproductos de la cloración, la desinfección UV se hizo popular en Noruega, poniéndose en funcionamiento la primera instalación en 1975. De modo que cinco años más tarde, se puso en funcionamiento la primera instalación en Holanda [25].

Hoy en día existen más de 2.000 instalaciones en Europa que usan luz UV para desinfectar agua potable y más de 1.000 instalaciones en los Estados Unidos (USEPA, 1996). La desinfección UV es popular en Nueva York donde se le usa para desinfectar más de 6,4% de todos los sistemas de aguas subterráneas [25].

El mecanismo de desinfección por este método, consiste en inactivar los microorganismos con la luz UV como resultado del daño fotoquímico a sus ácidos nucleicos. La radiación UV es absorbida por los nucleótidos, los bloques constitutivos del ADN y ARN de la célula, según la longitud de onda, con los valores más altos cerca de 200 y 260 nm [25].

### **5.2.3 Desinfección por Ozonización**

El ozono ( $O_3$ ) es un poderoso agente oxidante y un eficaz desinfectante primario. Esta molécula rica en oxígeno se bombea en sistemas de agua para eliminar contaminantes biológicos como bacterias, virus, Giardia, Criptosporidium y químicos orgánicos. Además, es eficaz para la oxidación y eliminación del hierro, azufre, manganeso y otras sustancias inorgánicas.

El gas de ozono es inestable y se revierte rápidamente a una molécula normal de oxígeno ( $O_2$ ) con dos átomos en vez de tres. Debido a esta condición, no se puede almacenar o transportar con facilidad. Por el contrario, las instalaciones de tratamiento crean ozono en el sitio forzando aire seco a través de una serie de electrodos. Después de crear el ozono, éste se pone en contacto forzoso con el agua fuente y se mezcla durante un tiempo apropiado de contacto. Debido a que el ozono es oxígeno puro no produce sabores ni olores residuales en el agua.[22]

Como ya se mencionó, el ozono, al igual que el dióxido de cloro, es inestable y no puede ser transportado ni almacenado y, por lo tanto, debe ser producido in situ. Las especies oxidantes son el propio  $O_3$  o los radicales hidroxilos. En comparación con  $Cl_2$ ,  $ClO_2$  y las cloraminas, es muy eficiente en bajas concentraciones, y más efectivo en la inactivación de patógenos, incluyendo bacterias, protozoarios y virus. También sólo debe ser utilizado como desinfectante primario, pues no tiene efecto residual en agua. El  $O_3$  no forma subproductos de desinfección (SPD) organoclorados, pero pueden aparecer compuestos bromados si el agua contuviera bromuros, además de otros productos orgánicos tales como aldehídos o cetonas.[19]

## **6 OBJETIVOS.**

### **6.1 General**

Desarrollar un análisis comparativo acerca de los procesos de desinfección del agua utilizados en la Planta de Tratamiento de Agua John J. Carroll y en la Planta Tibitoc con el fin de establecer si es necesaria la implementación de la tecnología empleada en la Planta de Tratamiento de Estados Unidos a la de Colombia.

### **6.2 Específicos**

- Recopilar información sobre los tratamientos de desinfección del agua que se desarrollan en la Planta de Tratamiento de Agua John J. Carroll localizada en Marlborough, EEUU.
- Examinar el procedimiento de desinfección del agua desarrollado en la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tibitoc que abastece la ciudad de Bogotá.
- Comparar los métodos de desinfección del agua que se llevan a cabo en las dos Plantas de Tratamiento de Agua Potable.

## **7 METODOLOGÍA**

A continuación, se hará una descripción de las diferentes fases de la metodología que se deben efectuar para el desarrollo del proyecto y cumplir con los objetivos propuestos. Adicionalmente en la Figura 19, se evidencia el resumen metodológico.

### **7.1 FASE I**

En esta etapa se pretende abordar toda la información relacionada con el comportamiento y las características del agua, al someterse a diversos métodos de desinfección en las Plantas de Tratamiento. El conocimiento que se tiene acerca de estos procesos es escaso, por lo que se debe hacer un mayor acercamiento al tema, realizando una revisión bibliográfica en varias fuentes como libros, artículos, páginas web, entre otras, que ayuden al desarrollo de esta investigación, y sirvan de base para la misma. Además, toda esta información proporcionará los criterios para iniciar el estudio y tener un punto de partida más preciso.

### **7.2 FASE II**

En esta fase se recolectará la información disponible acerca del proceso de desinfección del agua en la Planta de tratamiento John J. Carroll, ubicada en Marlborough, Massachusetts, USA, por lo que se consultarán libros, artículos, webs y toda la información publicada en la página web oficial de la Autoridad de Recursos Hídricos de Massachusetts. Teniendo en cuenta que se deberán realizar las traducciones respectivas dado que la mayoría de información será en inglés, pero será de vital importancia para el desarrollo de la investigación, dado que de allí parte el análisis comparativo.

### **7.3 FASE III**

En esta fase se recopilará de la misma manera, toda la información asequible sobre el proceso de desinfección del agua desarrollado en la Planta de tratamiento Tibitoc, localizada en Tocancipá, Cundinamarca, teniendo en cuenta que la consulta en español facilita el acceso a la información y además de la cercanía de la PTAP al lugar donde se desarrolla la investigación. Para esto se tendrán en cuenta bases de datos, investigaciones preliminares, artículos, libros y páginas web, sobresaliendo la de la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

### **7.4 FASE IV**

Contando ya con la información anterior, se realizará primeramente la visita a la Planta de Tratamiento localizada en Marlborough, Massachusetts, USA, por lo que se realizará el viaje desde la ciudad de Bogotá, y llegado allí, se recopilará la información disponible del proceso de desinfección del agua empleado en la Planta, utilizando el método de Observación Directa, por lo que se evaluarán aspectos

como las instalaciones, equipos, maquinarias y personal de trabajo, y se harán las grabaciones que soporten la información base para el desarrollo del proyecto.

### 7.5 FASE V

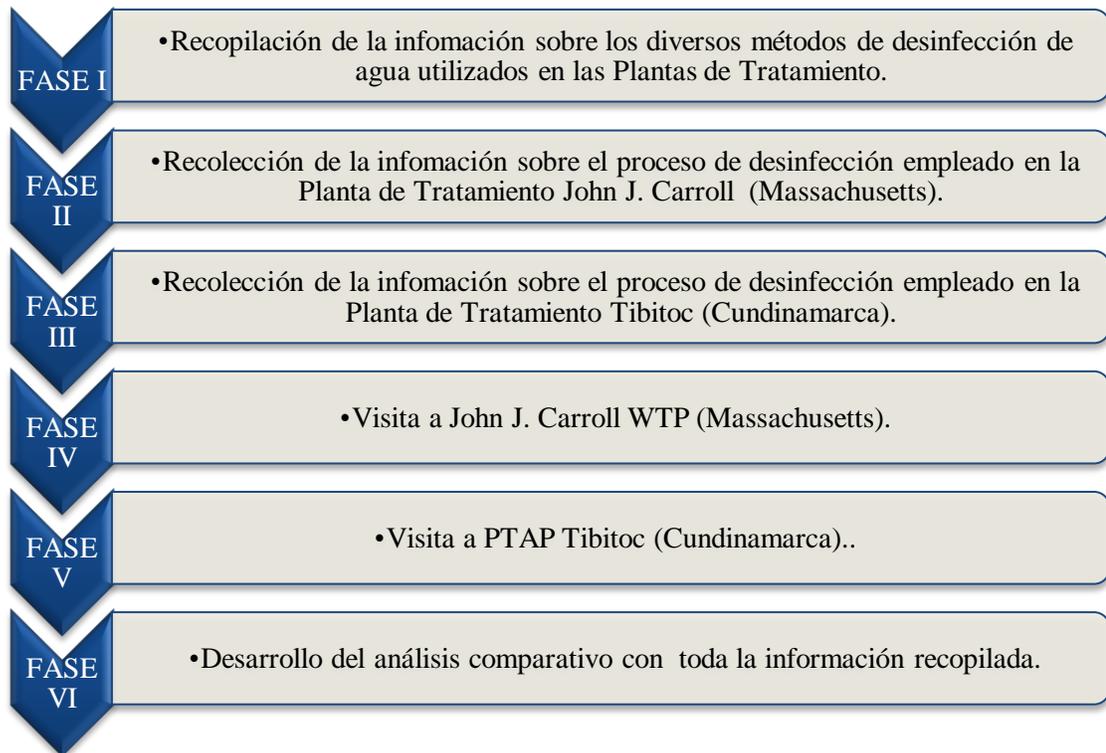
Al regresar a la ciudad de Bogotá, se desarrollará la quinta fase, que consiste en efectuar la visita a la Planta de Tratamiento de La Calera, Cundinamarca, allí se realizará una recolección de información con el Método de Observación Directa igualmente, evaluando aspectos en particular como las instalaciones, equipos, maquinarias y personal de trabajo, efectuando de la misma manera las grabaciones pertinentes durante la visita.

### 7.6 FASE VI

Realizadas las visitas, y habiendo recolectado y hecho una apropiación de la información obtenida, se procederá a realizar el análisis comparativo de los métodos empleados para desinfectar el agua en las Plantas de tratamiento en estudio, se realizarán cuadros comparativos y se establecerá si existe la necesidad de modificar el método empleado actualmente en Colombia, con base al análisis.

### 7.7 RESUMEN DE METODOLOGÍA

Figura 19 Resumen de Metodología del Proyecto



Fuente: Elaboración propia.

## 8 ÉNFASIS VISITA TÉCNICA INTERNACIONAL

Para el desarrollo del presente proyecto, se plantearon 2 visitas técnicas, una en la PTAP Francisco Wiesner, la cual es la principal fuente de abastecimiento de agua potable a la ciudad de Bogotá, aunque ante las obras de ampliación que se efectúan en la Planta, no se realiza la visita y se opta en visitar la PTAP Tibitoc, localizada en Tocancipá, Cundinamarca. La otra visita se desarrolla en la John J. Carroll Water Treatment Plant localizada en Marlborough, Massachusetts. En base a estas dos visitas técnicas se realiza en análisis comparativo. La gestión realizada ante la EAAB para las respectivas visitas en las dos PTAP's colombianas se evidencia en el **Anexo 1**. El diagrama de actividades para la realización de las visitas se encuentra en el **Anexo 2**.

La Planta de Tratamiento de Agua Potable Tibitoc se surte de las aguas del río Bogotá que llegan por bombeo, ésta se terminó de construir en 1959 con una capacidad inicial de 3.5 metros cúbicos por segundo, luego se realizaron dos ampliaciones que permiten hoy contar con una capacidad de 10.4 metros cúbicos por segundo. De este modo, la Planta de Tibitoc se constituyó en el primer sistema de gran envergadura de la ciudad, luego de consolidarse la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) en 1955.

### 8.1 VISITA TÉCNICA A PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE TIBITOC

El día miércoles 30 de enero de 2019 se realizó la visita a la Planta de Tratamiento Tibitoc, localizada en Tocancipá, Cundinamarca (ver Figura 20) a unos 40 km de la ciudad de Bogotá. Para el recorrido en las instalaciones se contó con la guía de una trabajadora de la Planta, la cual fue explicando por cada estructura el procedimiento que se lleva a cabo para potabilizar el agua. Esta Planta realiza el proceso convencional para el tratamiento del agua que incluye pre sedimentación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección (ver Figura 21).

*Figura 20 Localización PTAP Tibitoc*



*Fuente: Google Maps*

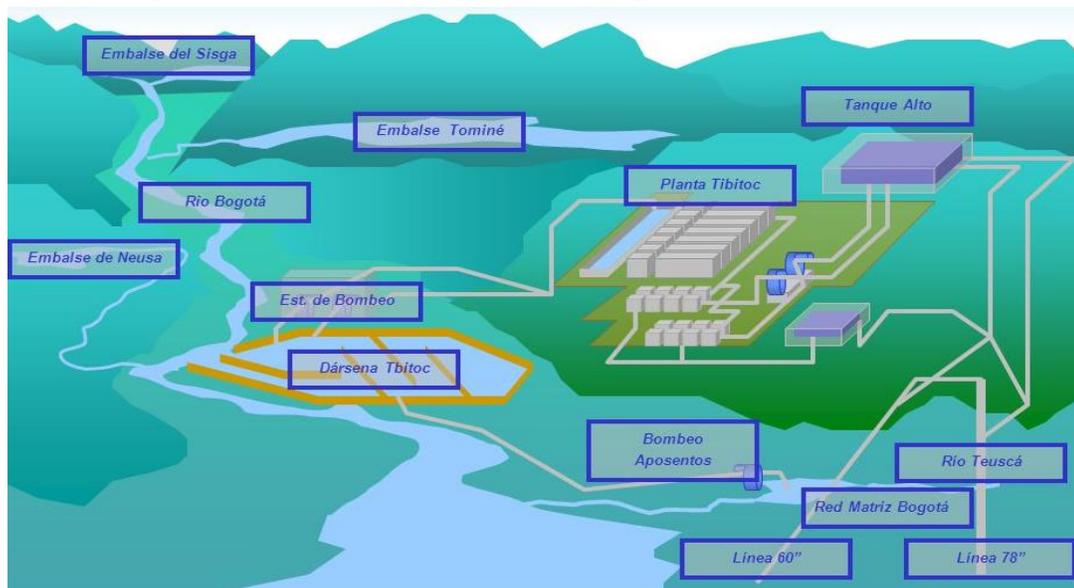
Figura 21 Vista general PTAP Tibitoc



Fuente: Visita técnica.

Como se observa en la Figura 22, el agua que ingresa a la PTAP proviene de los embalses Sisga, Tominé y Neusa, los cuales se conectan al río Bogotá, y desde este río y el de Teusaca se realiza la captación del agua (del río Bogotá en el sector conocido como El Espino y del Río Teusacá en el Embalse de Aposentos). Una vez captada el agua, se conduce hasta la estructura conocida como dársena donde se lleva a cabo el proceso de pre sedimentación (Ver Figura 23).

Figura 22 Sistema Tibitoc-Río Bogotá, Embalses Sisga, Tominé, Neusa, PTAP Tibitoc



Fuente: Alcaldía de Bogotá.

Después de la pre sedimentación, el agua es bombeada al cerro, donde se encuentra la Planta, para iniciar el proceso de tratamiento propiamente dicho, por lo que se cuenta con dos estaciones de bombeo, una consta de seis unidades y la otra de cuatro. A la entrada de las bombas se tiene un punto de control donde se realiza medición de parámetros como pH, turbiedad, oxígeno disuelto, conductividad y alcalinidad en el agua. Por otra parte, para evitar la interrupción de labores, esta planta cuenta con tres subestaciones eléctricas, de las cuales dos son medidas alternas en caso de algún fallo en el suministro de energía.

*Figura 23 Pre sedimentación en dársena PTAP Tibitoc*



*Fuente: Visita técnica.*

Posteriormente, dependiendo de los niveles de oxígeno que se registren en el agua, se realiza el proceso de aireación en el cual se inyecta aire en el agua y de esta manera se aumenta el nivel de oxígeno disuelto, luego el agua aireada es conducida hacia el canal de aducción y en el trayecto se cuenta con 3 puntos para aplicación de coagulantes, cloruro férrico, policloruro de aluminio (PAC) o sulfato líquido. Según la calidad del agua cruda se selecciona el coagulante para bajar el pH, y controlar o reducir los niveles de materia orgánica que se encuentra en ésta (ver Figura 24).

*Figura 24 Canal de aducción PTAP Tibitoc*



*Fuente: Visita técnica.*

Por lo tanto, el agua mezclada fluye hacia una estructura denominada “el pulpo”, donde se realiza un proceso de mezclado rápido y de allí se distribuye el agua hacia los floculadores y sedimentadores. El pulpo cuenta con 7 brazos, correspondientes a 7 floculadores y 7 sedimentadores. Luego se procede a los floculadores, donde se realiza el proceso de mezclado lento en el agua, de manera que se aglutinan o atraen entre sí las sustancias coloidales presentes en el agua o partículas en suspensión, y así se forman los flocs (ver Figura 25).

*Figura 25 Floculadores PTAP Tibitoc*



*Fuente: Visita técnica.*

De allí, se dirige el agua a los sedimentadores de 12000 m<sup>3</sup> de capacidad, con 10 metros de profundidad donde se logran elevadas remociones de turbiedad, pues las partículas más pesadas que se encuentran en suspensión caen al fondo por el efecto de la aceleración de la gravedad. Desde el cuarto de control de floculadores, se lleva a cabo la operación de estas estructuras y se hace un seguimiento en tiempo real a su funcionamiento. Al final de este cuarto, se tiene un punto de control donde se monitorea la calidad del agua en esta etapa del proceso (ver Figura 26).

Después del proceso de sedimentación, el agua pasa a los canales de agua clarificada de 2.5 metros de profundidad, donde en caso de ser necesario, se agregan ciertos químicos al agua como el permanganato de potasio, soda cáustica o cal. La cal se agrega para subir el pH, pero al adicionarla el manganeso aumenta el color del agua, de manera que se agrega el permanganato de potasio para oxidar el manganeso y así reducir este efecto en el agua.

*Figura 26 Sedimentadores PTAP Tibitoc*



*Fuente: Visita técnica.*

De aquí el agua es conducida a 16 filtros con el fin de reducir aún más la turbiedad del agua, estos filtros constan de un falso fondo en la parte baja, luego hay una capa de grava de 20 cm, una capa de arena de 1 m y por último una capa de antracita. Los filtros son lavados cada 60 horas, y aquí mismo se realiza la aplicación del desinfectante, en este caso cloro y se estabiliza el pH con una post aplicación de cal. Una vez el agua es sometida al proceso de desinfección, la concentración de cloro libre y cloro combinado aumenta acorde con la presencia de materia orgánica, manganeso, hierro y agentes patógenos. La concentración del cloro libre está oscila en un rango de 1,7 y 1,8 mg/L y de cloro combinado con yoduro de potasio entre 0,1 y 0,2 mg/L (ver Figura 27).

*Figura 27 Unidades de Filtración PTAP Tibitoc*



*Fuente: Visita técnica.*

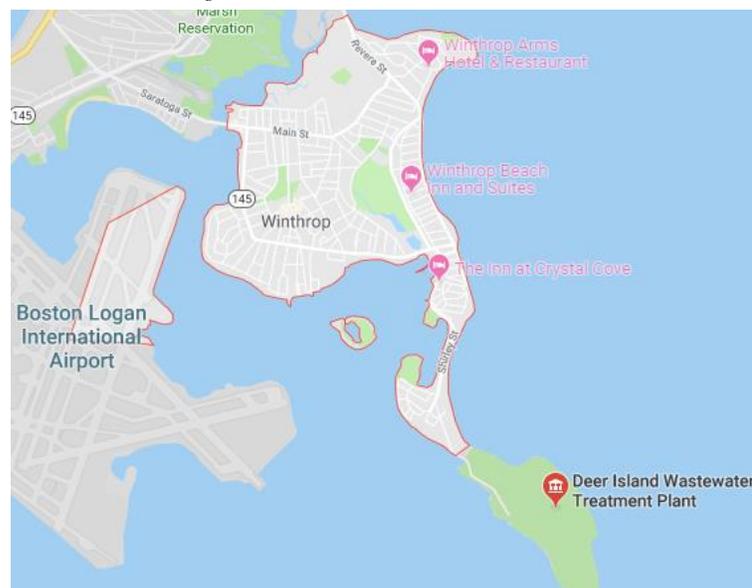
Como resultado, al finalizar el proceso de potabilización del agua, la Planta de Tibitoc está entregando agua potable a sus usuarios con concentraciones de cloro entre 0,3 y 2 mg/L. Una vez se ha potabilizado totalmente el agua, se traslada hasta las líneas de conducción ya sea para la ciudad de Bogotá o para los otros municipios abastecidos por esta planta.

Para la ciudad de Bogotá se cuenta con 2 líneas de conducción, una de 60” y otra de 78”, siendo esta última la que atraviesa la Sabana de Bogotá desde el municipio de Zipaquirá hasta los Cerros de Ciudad Bolívar en el Distrito Capital. Dicha tubería recorre paralelamente la Autopista Norte hasta la Calle 129 y luego va por la Avenida Boyacá hasta el tanque de Casablanca localizado en el barrio Jerusalén. La tercera línea de conducción es de 16” de diámetro, y es en la que se realiza diariamente la toma de muestras de la calidad del agua que se entrega a los usuarios, además de ser la encargada de abastecer a los municipios aledaños a la PTAP, tales como Sopó, Tocancipá, Chía, Cajicá, Funza, Mosquera, Madrid y Soacha.

## 8.2 VISITAS TÉCNICAS EN MASSACHUSETTS

Durante la estadía en la ciudad de Boston, Massachusetts (Estados Unidos), se realiza la visita a dos plantas de tratamiento de agua, primero la Deer Island Sewage Treatment Plant (DITP) en Winthrop, Massachusetts (ver Figura 28), el día 27 de noviembre de 2018, y luego, se visita la John J. Carroll Treatment Plant (CWTP) el día miércoles 05 de diciembre del mismo año. A pesar de que la primera visita técnica no se toma en cuenta para la propuesta de trabajo de grado, a continuación en las Figura 29 se evidencia el soporte de la visita. Por otra parte, con la visita a la CWTP se realiza la sustentación de la propuesta de trabajo de grado, por lo cual se describirán las actividades realizadas allí.

Figura 28 Localización Deer Island WTP



Fuente: Google Maps

## 8.2.1 REGISTRO FOTOGRÁFICO VISITA TÉCNICA DEER ISLAND TREATMENT PLANT

Figura 29 Visita Deer Island WTP



Fuente: Visita técnica.

## 8.2.2 VISITA TÉCNICA A JOHN J. CARROLL WATER TREATMENT PLANT

Figura 30 John J. Carroll WTP



Fuente: MWRA.

Para el recorrido en la Carroll Water Treatment Plant (ver Figura 30), localizada en Marlborough Massachusetts (ver Figura 23), se contó con la presencia del director de operaciones de la Planta y un coordinador de la misma, los cuales fueron explicando el tratamiento que se realiza al agua desde que ingresa a la Planta, al pasar por cada estructura, hasta que ésta obtiene las propiedades que la convierten en agua potable para los habitantes de Boston. La explicación realizada durante el recorrido en la Planta fue en inglés, pero se contó con la ayuda de un traductor de la Boston School of Modern Languages (BSML), el cual es el coordinador académico de dicha institución, por lo que se facilitó la comunicación y comprensión de los procesos que se desarrollan en la Planta.

Figura 31 Localización John J. Carroll WTP



Fuente: Google Maps.

El primer lugar que se visitó en la WTP fue el Edificio de Ozono, en el cual se encuentran cuatro (4) generadores de ozono y cuatro (4) contactores de ozono equipados con difusores de gas para distribuir el gas dentro de los contactores, el gas de ozono se inyecta en estos tanques de agua y se difunde en la parte inferior de los mismos. El ozono se propaga hacia arriba a través del agua entrante, a medida que pasa a través del tanque, eliminando patógenos, como virus, bacterias y protozoos, en el agua. Se considera que un tiempo de contacto de 20 a 30 minutos garantiza que el ozono tenga tiempo suficiente para reaccionar con todos los contaminantes (ver Figura 32).

*Figura 32 Generadores de ozono John J. Carroll WTP*



*Fuente: Google Maps.*

Después de ese tiempo, el gas de ozono residual es recolectado de la superficie del agua en el tanque, sale de los contactores y es tratado, convirtiéndolo nuevamente en oxígeno ordinario, con el fin de destruir todo el ozono restante antes de su liberación a la atmósfera. Posteriormente, el agua fluye al segundo proceso de desinfección primaria en la planta con luz ultravioleta (ver Figura 33), implementado desde el año 2014 dado que, debido a la nueva reglamentación para la protección microbiana emitida en enero de 2006 por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), según la “regla de tratamiento de aguas superficiales mejoradas a largo plazo 2” (LT2ESWTR), como no se realiza proceso de filtración en la WTP, se requiere de un segundo desinfectante primario y una mayor inactivación de *Cryptosporidium*, que el que podría cumplir el sistema de ozono de la planta.

Figura 33 Cuarto de luz UV John J. Carroll WTP



Fuente: MWRA.

Este nuevo sistema de tratamiento fuerte, en el cual la luz UV daña el ADN de bacterias, virus y otros patógenos e inactiva los parásitos resistentes a los químicos, como *Cryptosporidium* y *Giardia*, cuenta con 6 reactores de luz ultravioleta, los cuales constan de tuberías de 48 pulgadas de diámetro. El proceso UV y la fuente de agua de alta calidad de MWRA, le permiten cumplir con los nuevos requisitos regulatorios de manera rentable y disminuir la dosis de ozono, reduciendo así el uso de electricidad y compensando gran parte del uso eléctrico de las nuevas instalaciones de UV.

Después de la desinfección, para continuar con el tratamiento del agua en la WTP, las tuberías transportan el agua ozonizada al Edificio de Post Tratamiento (ver Figura 34), el cual está ubicado sobre el Tanque de Almacenamiento Cubierto de 45 millones de galones (170343.44 m<sup>3</sup>), en éste se albergan seis grandes silos de almacenamiento de ceniza de sosa y equipos de alimentación / mezcla relacionados, cuatro unidades de mezcla de dióxido de carbono y varias ubicaciones de inyección de productos químicos.

Figura 34 Edificio de Post-Tratamiento John J. Carroll WTP



Fuente: MWRA.

Al pasar por este edificio, se realiza el proceso de cloraminación con una mezcla de cloro y amoníaco, para proporcionar una desinfección residual. La desinfección residual protege el agua de la contaminación bacteriana a medida que pasa por el largo sistema de distribución al consumidor. Se usa la cloraminación, como el ozono, porque genera menos subproductos que el uso del cloro en sí mismo y es de larga duración. El post tratamiento también incluye la etapa de fluoración con el fin de promover la salud dental, por lo que se adiciona aproximadamente 0,7 mg/L de flúor al agua (ver Figura 35).

Figura 35 Tanques de Fluoruro John J. Carroll WTP



Fuente: MWRA.

Finalmente, el agua tratada fluye desde el tanque de almacenamiento hacia el túnel de suministro de agua MetroWest a través de un pozo ubicado junto al tanque y al acueducto Hultman. Con el fin de cumplir con la regla de la Ley de Agua Potable Segura para plomo y cobre, para la cual se debe evitar que el cobre y el plomo se filtren en las tuberías domésticas, MWRA agrega carbonato de sodio para ajustar la alcalinidad y el dióxido de carbono para estabilizar el pH del agua potable (ver Figura 36), de esta manera se proporciona agua potable estable y menos corrosiva a través de los sistemas de tuberías domésticas hasta el grifo de los usuarios.

Figura 36 Tanques de CO2 conectados al Edificio de Post tratamiento John J. Carroll WTP



- 203 -

Fuente: MWRA.

Asimismo, es importante agregar que la WTP cuenta con un sistema de energía alternativa (ver Figura 37), un sistema fotovoltaico solar montado en el suelo desde febrero de 2011, de 496kW que genera 616,000 kilovatios-hora por año. Este proyecto de \$ 2.1 millones USD fue financiado completamente a través de la American Recovery and Reinvestment Act (ARRA), y proporciona un ahorro anual en costos de electricidad de \$ 87,000 USD.

*Figura 37 Sistema fotovoltaico John J. Carroll WTP*



*Fuente: MWRA.*

Cabe mencionar que las imágenes relacionadas anteriormente de la John J. Carroll WTP se tomaron de la página oficial de la Autoridad de Recursos Hídricos de Massachusetts (MWRA), ya que durante la visita no se permitió la captura de imágenes dentro de las instalaciones por cuestiones de seguridad, no obstante, el registro fotográfico de la visita realizada en la Planta se muestra a continuación en las Figuras 29-1 y 29-2:

### **8.2.3 REGISTRO FOTOGRÁFICO VISITA TÉCNICA JOHN J. CARROLL WATER TREATMENT PLANT**

*Figura 38-1. Registro fotográfico visita John J. Carroll WTP*



*Fuente: Visita técnica.*

Figura 39-1. Registro fotográfico visita John J. Carroll WTP



Fuente: Visita técnica.

## 8.2.4 ASPECTOS OBJETO DE LA TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA VISITA CWTP

Realizadas las visitas técnicas a las PTAP, los aspectos o ítems específicos objeto de la transferencia propuesta encontrados con la realización de la visita técnica internacional son:

1. En la Planta de Tratamiento John J. Carroll, la cual suministra agua a la ciudad de Boston, se precisó que no realiza el proceso convencional para el tratamiento del agua, es decir, no necesita realizar procesos de aireación, coagulación, floculación, sedimentación ni filtración, porque la calidad del agua antes de ingresar a la planta es elevada, por lo que sólo se realiza el proceso de desinfección.

A continuación, en la Tabla 6 se muestra un resumen de las características del agua en cada uno de los embalses que suministran agua a la Planta de Tratamiento de Agua Potable John J. Carroll, el de Wachusett y el de Quabbin.

Tabla 6 Muestras de Calidad embalses Massachusetts

		MUESTRAS DE CALIDAD														
		Fósforo mg/L	Amoniaco mg/L	Nitrato mg/L	Nitrógeno Kjeldahl mg/L	UV254 mg/L	Sílice mg/L	Alcalinidad mg/L	Turbiedad NTU	Conductividad Eléctrica µS/cm	pH	Oxígeno Disuelto mg/L	Sólidos Suspendidos Totales mg/L	Coliformes Fecales (CFU/100 ml)	E. Coli MPN/100 mL	Coliformes Totales MPN/100 mL
EMBALSE	Wachusett	0,008	0,010	0,049	0,155	0,073	2,489	6,510	[0,12-70,5] 0,35	129-194	[6-7]	[75-194 %Sat] 4,5	[<5,0- 90,4]	[<1-32]	[<1-95] 4	-
	Quabbin	0,006	0,007	0,009	0,294	0,032	1,776	5,72	[0,23-1,13]	40,6-71,2	[4,8- 7,8] 6,1	[13-116 %Sat] 4,91	-	[1-6]	[10-4880]	[10-24200]

Fuente: MWRA.

2. Como se sabe, una cuenca es el área total que drena directamente a través de la tierra e indirectamente a través de las aguas subterráneas, a un arroyo, río, estanque o embalse en particular. Las precipitaciones que caen en cualquier parte de la cuenca de un reservorio o arroyo dado terminarán en ese cuerpo de agua. En Massachusetts, se encargan de proteger las cuencas hidrográficas porque todas las actividades dentro de ellas tienen impactos, algunos pequeños y otros excelentes, en la calidad del agua. La protección de la fuente está guiada por el programa de protección de cuencas hidrográficas DCR's Division of Water Supply Protection (DWSP).

Según la MWRA, la mejor manera de suministrar agua limpia y segura es comenzar con agua de alta calidad. Desde la década de 1870, los planificadores han buscado fuentes de agua relativamente prístinas y protegidas para el área metropolitana de Boston, que requerirían un tratamiento de agua mínimo. Históricamente, se han asegurado reservorios cada vez más grandes y distantes en el centro y el oeste de Massachusetts para suministrar tanto la cantidad como la calidad del agua necesaria. Como resultado, MWRA heredó en 1985 un sistema de agua cuyas fuentes (Wachusett, Quabbin y Ware River) son las menos contaminadas disponibles y requieren un nivel mínimo de tratamiento: desinfección y control de corrosión.[26]

3. Como se evidencia, la Autoridad de Recursos Hídricos de Massachusetts (MWRA) y el

Departamento de Conservación y Recreación (DCR) administran conjuntamente el Sistema de Agua Metropolitano de Boston. La MWRA proporciona tratamiento y distribución de agua potable a 48 comunidades en el área metropolitana, incluida Boston. El DCR administra los terrenos adyacentes a los reservorios de origen y es responsable de mantener los reservorios libres de contaminación de la calidad del agua en la mayor medida posible.

4. Con respecto al proceso de desinfección del agua en la CWTP, allí se determinó utilizar el ozono como desinfectante primario porque proporciona una mejor desinfección que el cloro solo, y también porque reduce la cantidad de subproductos de desinfección potencialmente dañinos. Sin embargo, también se utiliza luz ultravioleta a partir del año 2014, porque en enero de 2006 la “Regla de tratamiento de aguas superficiales mejoradas a largo plazo 2” desarrollada por la EPA (US Environmental Protection Agency), establece que todos los sistemas de agua sin filtrar deben implementar un tratamiento adicional dado que son sistemas de mayor riesgo, y la desinfección UV es una opción.
5. Otro aspecto importante que se determinó gracias a la visita en la CWTP, es que para tener agua de alta calidad antes de ingresar a la planta, se debe garantizar la protección y cuidado del agua desde la fuente, ya sea implementando una normativa de estricto cumplimiento que proteja el agua contra los contaminantes naturales y artificiales, productos químicos desechados de manera inadecuada; desechos animales; pesticidas, amenazas humanas; residuos inyectados bajo tierra; y sustancias naturales que pueden contaminarla, como en Estado Unidos, donde existe una ley denominada The Safe Drinking Water Act (SDWA), la cual se enfoca en garantizar la protección del agua mucho antes de ingresar a la WTP.
6. De allí, para garantizar que el agua potable sea segura, SDWA establece múltiples barreras contra la contaminación, estas barreras incluyen protección del agua de la fuente, tratamiento, integridad del sistema de distribución e información pública. Lo que permite inferir, que en Estados Unidos los componentes esenciales del agua potable segura incluyen protección y prevención, por lo que los estados y los proveedores de agua deben realizar evaluaciones de las fuentes de agua para ver dónde pueden ser vulnerables a la contaminación. De la misma forma, según la SDWA los sistemas de agua también pueden adoptar voluntariamente programas para proteger su cuenca o pozo, y los estados pueden usar las autoridades legales de otras leyes para prevenir la contaminación.[27]

Si bien, La Regla Federal de Tratamiento de Agua de Superficie (SWTR) requiere la filtración de todos los suministros de agua de superficie, a menos que se cumplan numerosos criterios, incluido el

desarrollo y la implementación de un plan detallado de protección de cuencas. La División de Protección de Suministro de Agua y la MWRA tienen una exención conjunta del requisito de filtración y continúan administrando agresivamente la cuenca para mantener esta exención. [28]

7. El muestreo de la calidad del agua y las inspecciones de campo, ayudan a identificar los afluentes con problemas de calidad del agua, a la implementación del plan de protección de cuencas más reciente y a garantizar el cumplimiento de los criterios estatales y federales de calidad del agua para las fuentes públicas de suministro de agua potable. El monitoreo de bacterias y nutrientes del reservorio y afluentes proporciona una indicación de la calidad sanitaria y ayuda a proteger la salud pública. El personal de la División también toma muestras para comprender mejor las respuestas del reservorio y sus afluentes a una variedad de insumos físicos, químicos y biológicos, y para evaluar la salud ecológica del reservorio y la cuenca [28].

En ese sentido, los afluentes y reservorios de cuencas hidrográficas comprenden los dos componentes básicos del sistema de suministro de agua. Cada componente requiere un programa especializado de monitoreo de actividades y equipos adaptados a sus características únicas y entornos ambientales. Por consiguiente, en el **Anexo 3** se hará una descripción sobre los métodos de monitoreo de la calidad del agua de las fuentes de agua de la CWTP, el embalse de Quabbin y el embalse de Wachusett.

8. La cantidad de agua que es tratada en la CWTP es de 9,2 m<sup>3</sup>/s, aunque cuenta con la capacidad de tratar 17,74 m<sup>3</sup>/s, es decir, 405 millones de galones por día.
9. Las características de calidad del agua luego de ser tratada en la CWTP se muestran en la Tabla 7 [29].
10. Otro aspecto importante que se encontró por medio de la visita en CWTP, es que el gobierno de Massachusetts estableció un programa de protección del suministro de agua administrado por un Fideicomiso de Protección del Suministro de Agua. El fideicomiso proporciona un mecanismo más eficiente para que MWRA financie la Oficina de Administración de Cuencas. Los contribuyentes de MWRA financian en su totalidad el presupuesto anual de \$ 30 millones USD de la Oficina de Administración de Cuencas Hidrográficas
11. Debe señalarse que gracias a la visita también se dio a conocer que la Comisión de Agua y Alcantarillado de Boston (BWSC, por sus siglas en inglés) administra el sistema más grande y antiguo de su tipo en Nueva Inglaterra (región de los Estados Unidos localizada en el noreste del país, integrada por seis estados, incluyendo Massachusetts), y brinda servicios de agua potable y

alcantarillado a más de un millón de personas diariamente.

La Autoridad de Recursos Hídricos de Massachusetts (MWRA) es el proveedor mayorista de servicios de agua y alcantarillado para 61 comunidades en el área metropolitana de Boston. Esta entidad le vende los servicios de tratamiento de agua potable y aguas residuales a La Comisión de Agua y Alcantarillado de Boston, siendo el mayor cliente individual de MWRA para servicios de agua y alcantarillado, y los cargos de MWRA representan el componente individual más grande de los gastos operativos de BWSC, los cuales se encargan de cobrar el servicio de agua potable y alcantarillado en la ciudad [30].

Tabla 7 Resultados del agua después de tratamiento en CWTP

COMPUESTOS	UNIDAD	(MCL) NIVEL MÁS ALTO PERMITIDO	(ENCONTRADO) NIVEL PROMEDIO DETECTADO	INTERVALO DE DETECCIÓN	(MCLG) META IDEAL	VIOLACIÓN	CÓMO SE OBTIENE EN EL AGUA
Bario	ppm	2	0.009	0.007-0.01	2	No	Mineral común en la naturaleza
Monocloramina	ppm	4-MRDL	2.14	0-3.85	4-MRDLG	No	Desinfectante de agua
Fluoruro	ppm	4	0.70	0.31-0.78	4	No	Aditivos para salud dental
Nitrato	ppm	10	0.05	0.04-0.05	10	No	Deposición atmosférica
Nitrito	ppm	1	0.006	ND-0.006	1	No	Subproducto de la desinfección del agua
Trihalometanos Totales	ppb	80	15	4.2-25.2	ns	No	Subproducto de la desinfección del agua
Ácidos Haloacéticos-5	ppb	60	12.8	1.5-24	ns	No	Subproducto de la desinfección del agua.
Coliformes Totales	%	5%	0.8% (Aug)	ND-0.8%	0	No	Presentes naturalmente en el ambiente
Radio Combinado*	pCi/L	5	1.76	ND-1.76	0	No	Erosión de depósitos de minerales naturales

Fuente: MWRA.

#### NOTAS:

- **MCL** = Nivel Máximo de Contaminante. El nivel más alto de un contaminante permitido en el agua. Los MCL se establecen lo más cerca posible de los MCLG utilizando la mejor tecnología disponible.
- **MCLG** = Meta de Nivel Máximo de Contaminante. El nivel de contaminante en el agua potable por debajo del cual no hay riesgo conocido o esperado para la salud. Los MCLG permiten un margen de seguridad.
- **MRDL** = Nivel máximo de desinfectante residual. El nivel más alto de un desinfectante permitido en el agua potable. Existe evidencia convincente de que es necesario agregar un desinfectante para controlar los contaminantes microbianos.
- **MRDLG** = Meta de nivel máximo de desinfectante residual. El nivel de un desinfectante de agua potable por debajo del cual no hay riesgo de salud conocido o esperado. Los MRDLG no reflejan los beneficios del uso de desinfectantes para controlar la contaminación microbiana.
- **ppm** = partes por millón (una parte de un millón de partes)
- **ppb** = partes por billón (mil millones)
- **ns** = no estándar

- **ND** = no detectado
- **^** = Según lo requerido por DEP, el resultado máximo se reporta para nitrato y nitrito, no para el promedio.

## 8.2.5 ASPECTOS OBJETO DE LA TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA VISITA PTAP TIBITOC

Ahora bien, los aspectos o ítems específicos objeto de la transferencia propuesta encontrados de acuerdo al contexto local nacional en la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tibitoc son:

1. El caudal a tratar en la Planta Tibitoc para suministrar el agua potable a la ciudad de Bogotá y municipios aledaños a la PTAP es de 10,3 m<sup>3</sup>/s.
2. La Planta de Tratamiento de Agua Potable Tibitoc hace parte del denominado Agregado Norte o Sistema del Río Bogotá y como ya se mencionó, trata aguas provenientes de los Ríos Bogotá y Teusacá, haciendo parte de este sistema también, los embalses Sisga, Neusa y Tominé. De acuerdo al Boletín de Calidad Hídrica de 2017 de la Corporación Autónoma Regional (CAR), el cual informa sobre el cumplimiento de objetivos de calidad en las ocho subzonas hidrográficas y dos niveles subsiguientes en su jurisdicción, se encuentra que, de acuerdo a los parámetros de medición de calidad establecidos, la características del agua antes de ingresar a la Planta son [31]:

Tabla 8 Muestras de Calidad embalses Rio Bogotá

		MUESTRAS DE CALIDAD														
		Fósforo mg/L	Amoníaco mg/L	Nitrato mg/L	Nitrógeno Kjeldahl mg/L	UV254 mg/L	Sílice mg/L	Alcalinidad mg/L	Turbiedad NTU	Conductividad Eléctrica µS/cm	pH	Oxígeno Disuelto mg/L	Sólidos Suspendidos Totales mg/L	Coliformes Fecales (CFU/100 ml)	E. Coli (MPN/100 mL)	Coliformes Totales (MPN/100 mL)
EMBALSE	Sisga	-	-	0,1145	-	-	-	-	-	25,1	7	5,835	5,65	-	-	2100
	Tominé	-	-	1,5995	-	-	-	-	-	53,7	7,01	6	5,25	-	-	2680
	Neusa	-	-	0,305	-	-	-	-	-	64,4	7,19	6,715	6,25	-	-	10950

Fuente: CAR.

3. En referencia a los embalses Sisga, Neusa y Tominé, éstos hacen parte de la Cuenca Alta del Río Bogotá, la cual va desde el punto de monitoreo N°1-Aguas Arriba Villapinzón hasta el punto de monitoreo N°32-Estación LG - Pte Vargas, con una longitud de 165 Km. De acuerdo con lo establecido mediante el Acuerdo 43 del 17 de octubre de 2006, y con los muestreos realizados por el Laboratorio Ambiental de la CAR durante las campañas de 2017, se realiza el análisis del cumplimiento de los objetivos de calidad sobre el río y los afluentes, obteniendo los resultados que se muestran en el **Anexo 4**.
4. Hay que mencionar que el último punto de monitoreo de agua antes de ingresar a la PTAT es el embalse de Neusa, por lo tanto, el agua de ingreso a la planta posee las características reportadas en

éste último punto de monitoreo. En consecuencia, dada la necesidad de identificar el tipo de tratamiento para su potabilización, a continuación se presenta una clasificación de fuentes de abastecimiento en función de los parámetros de caracterización física, química y microbiológica, y el grado de tratamiento mínimo que se recomienda en la Tabla 9 [32].

Como se observa, la fuente agua para la PTAP de Tibitoc es considerada un fuente deficiente o muy deficiente, de ahí que realice proceso de pre sedimentación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Si las características del agua antes de ingresar a la PTAP mejoraran a tal grado que cumplieran los parámetros de fuente aceptable según la Tabla 9, sólo sería necesario realizar el proceso de desinfección y estabilización. Caso de la CWTP.

Tabla 9 Calidad de la Fuente de Agua

Calidad de la fuente						
Parámetros	Análisis según		Nivel de calidad de acuerdo al grado de contaminación			
	Norma Técnica Icontec NTC	Standard Method ASTM	1. Fuente aceptable	2. Fuente regular	3. Fuente deficiente	4. Fuente muy deficiente
<b>DBO 5 días</b>	3650					
Promedio mensual mg/L.			≤ 1.5	1.5 - 2.5	2.5 - 4	>4
Máximo diario mg/L.			1 - 3	3 - 4	4 - 6	>6
<b>Coliformes totales</b> (NMP/100 mL)						
Promedio mensual		D-3870	0 - 50	50 - 500	500 - 5000	> 5000
<b>Oxígeno disuelto mg/L</b>	4705	D-888	≥ 4	≥ 4	≥ 4	< 4
PH promedio	3651	D 1293	6.0 - 8.5	5.0 - 9.0	3.8 - 10.5	
Turbiedad (UNT)	4707	D 1889	< 2	2 - 40	40 - 150	≥ 150
Color verdadero (UPC)			< 10	10 - 20	20 - 40	≥ 40
Sabor y olor		D 1292	Aceptable	Aceptable	Rechazable	Inaceptable
Cloruros (mg/L - Cl)		D 512	< 50	50 - 150	150 - 200	300
Fluoruros (mg/L - F)		D 1179	< 1.2	< 1.2	< 1.2	> 1.7
<b>GRADO DE TRATAMIENTO</b>						
- Necesita un tratamiento convencional			NO	NO	Sí, hay veces (ver requisitos para uso <b>FIME</b> literal C.7.4.3.2.)	SI
- Necesita unos tratamientos específicos			NO	NO	NO	SI
- Procesos de tratamiento utilizados			(1) = Desinfección + Estabilización	(2) = Filtración Lenta o Filtración Directa + (1) FIME	(3) = Pretratamiento + [Coagulación + Floculación + Sedimentación+ Filtración Rápida] o [FIME Filtración en múltiples etapas] + (1)	(4) = (3) + Tratamientos específicos

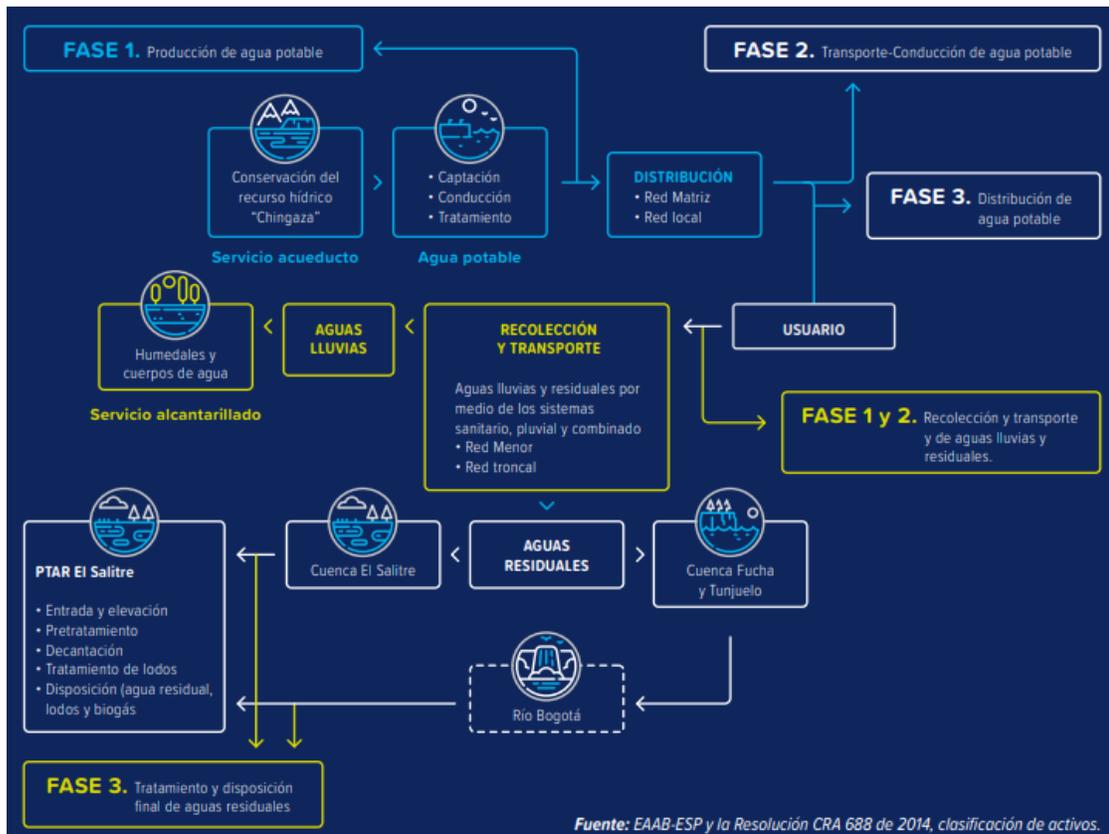
Fuente: RAS 2000.

- Es importante mencionar que la EAAB-ESP., realiza la gestión integral del recurso hídrico para la ciudad de Bogotá (ver Figura 40), que inicia con la conservación del Sistema Hídrico, de allí se realiza la producción de agua potable con la captación en las fuentes de agua superficial, pasando por las plantas de tratamiento PTAP y luego el transporte y la conducción a través del sistema matriz de acueducto para terminar con la distribución a través de las redes menores de acueducto, esto permite asegurar el suministro de agua potable en las viviendas, industrias e instituciones y

comercializadores del servicio de agua en bloque [33].

Luego de ser utilizado, el recurso es recogido y separado donde sea posible. Las aguas lluvias y residuales son recolectadas a través de las redes locales y secundarias de alcantarillado, para luego ser transportadas por el sistema troncal pluvial a los cuerpos de agua y a las aguas residuales de la parte norte de la ciudad, por lo que se llevan a través de la cuenca del río Salitre hasta la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) El Salitre y después de tratadas, se disponen en la fuente receptora el Río Bogotá [33].

Figura 40 Modelo de la Gestión Integral del Agua para Bogotá



Fuente: RAS 2000.

6. De este mismo modo, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá es la encargada de facturar el servicio de forma tal que el consumo sea el elemento principal del precio que se cobre al suscriptor y/o usuario, de acuerdo con los parámetros señalados por la Ley 142 de 1994 o por las autoridades competentes.[34]
7. En Colombia existe la resolución 2115 de 2007, que señala las características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Por lo

tanto, establece el Índice de Riesgo de Calidad del Agua (IRCA), indicador utilizado para evaluar la calidad del agua de consumo, el cual se genera a partir de la información recopilada con las muestras de Vigilancia y control.

Adicionalmente, mediante el Decreto 1575 de 2007 se establece que se debe coordinar la identificación de los factores de riesgo y las características físicas, químicas y microbiológicas de las fuentes de agua aferentes a las captaciones de acueducto que puedan afectar la salud humana, contribuyendo con ello a las acciones de inspección, vigilancia y control por parte de las autoridades competentes.

8. Las características del agua después de ser tratada en la Planta de Tibitoc se muestran en la Tabla 10 [35]:

*Tabla 10 Calidad del Agua Post-Tratamiento en PTAP*

<b>CARACTERÍSTICAS CALIDAD DEL AGUA - SIVICAP</b>			
<b>AÑO</b>	2015	<b>RESULTADO CLORUROS</b>	13,173
<b>DEPARTAMENTO</b>	Bogotá, D.C.	<b>RESULTADO FLORUROS</b>	0,037
<b>TOTAL MUESTRAS</b>	2546,000	<b>RESULTADO COT</b>	175,143
<b>RESULTADO COLOR APARENTE</b>	5,217	<b>RESULTADO COLIFORMES TOTALES</b>	40,754
<b>RESULTADO TURBIEDAD</b>	1,037	<b>RESULTADO E.COLI</b>	2,657
<b>RESULTADO PH</b>	7,290	<b>RESULTADO MERCURIO</b>	0,000
<b>RESULTADO CLORO RESIDUAL LIBRE</b>	1,245	<b>RESULTADO NIQUEL</b>	0,002
<b>RESULTADO ALCALINIDAD TOTAL</b>	17,993	<b>RESULTADO PLOMO</b>	0,001
<b>RESULTADO CALCIO</b>	16,900	<b>RESULTADO ORGANOFOSFORADOS Y CARBAMATOS</b>	0,000
<b>RESULTADO DUREZA TOTAL</b>	23,718	<b>RESULTADO MESÓFILOS</b>	484,600
<b>RESULTADO HIERRO TOTAL</b>	0,057	<b>IRCA PROMEDIO</b>	7,350
<b>IRCA BASE PROMEDIO</b>	7,350	<b>NIVEL DE RIESGO PROMEDIO</b>	BAJO

*Fuente: SIVICAP.*

## 9 RESULTADOS - ANÁLISIS COMPARATIVO

Al comparar las PTAP podemos ver que la John J. Carroll WTP trata aproximadamente un caudal de 9,2 m<sup>3</sup>/s, un poco menos que la PTAP Tibitoc, la cual se encarga de tratar 10,5 m<sup>3</sup>/s. Razón por lo cual, se puede decir que en cuanto a cantidad, la PTAP Tibitoc podría implementar el sistema que se utiliza en la CWTP, haciendo la aclaración de que la CWTP, con su sistema actual tiene la capacidad de tratar hasta 17,74 m<sup>3</sup>/s.

Como se observa en la Figura 41, la PTAP Tibitoc realiza varios tratamiento para purificar el agua, mientras en el la WTP solamente realiza la desinfección.

Figura 41 Tratamiento del agua en Tibitoc



Fuente: Elaboración propia.

Si se comparan las características de calidad del agua antes de ingresar a cada una de las Plantas de Tratamiento, es decir, desde la fuente de captación, se puede observar lo que se evidencia en la Tabla 11:

Tabla 11 Comparación características del agua en embalses

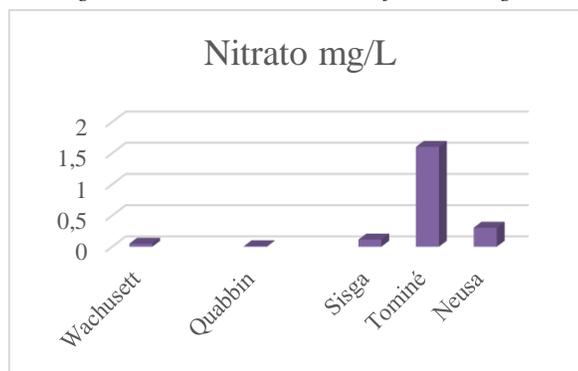
c	MUESTRAS DE CALIDAD															
	Fósforo mg/L	Amoniaco mg/L	Nitrato mg/L	Nitrógeno Kjeldahl mg/L	UV254 mg/L	Sílice mg/L	Alcalinidad mg/L	Turbiedad NTU	Conductividad Eléctrica $\mu$ S/cm	pH	Oxígeno Disuelto mg/L	Sólidos Suspendedos Totales mg/L	Coliformes Fecales (CFU/100 ml)	E. Coli MPN/100 mL	Coliformes Totales MPN/100 mL	
EMBALSE	Wachusett	0,008	0,010	0,049	0,155	0,073	2,489	6,510	[0,12-70,5] 0,35	129-194	[6-7]	[75-194 % Sat] >4.5	-	[<1-32]	[<1-95] 4	-
	Quabbin	0,006	0,007	0,009	0,294	0,032	1,776	5,72	40,6-71,2 48	[4,8-7,8] 6,1	[13-116 % Sat] 6	-	[1-6]	20	[10-24200]	
	Sisga	-	0,70	0,1145	-	-	-	-	-	25,1	7	5,835	5,65	-	100	2100
	Tominé	-	-	1,5995	-	-	-	-	-	53,7	7,01	6	5,25	-	100	2680
	Neusa	-	0,70	0,305	-	-	-	-	-	64,4	7,185	6,715	6,25	-	100	10950

Fuente: Elaboración propia.

Al revisar la normativa que implementa cada una de las ciudades de acuerdo al país, se encuentra que los parámetros que se deben medir y monitorear en las fuentes de captación en su mayoría son los mismos, pero en los informes de calidad que reporta la CAR, entidad competente para los embalses Sisga, Neusa y Tominé, no registra la información de varios parámetros como se muestra en la Tabla 10, por ende sólo se puede realizar la comparación de los parámetros que tienen valores.

Las altas concentraciones de nitratos pueden causar problemas significativos en la calidad del agua, incluyendo aumentos dramáticos en el crecimiento de las plantas acuáticas y cambios en las plantas y animales que viven en ambientes acuáticos. Las altas concentraciones conducen eventualmente a cambios en el oxígeno disuelto y la temperatura [28]. Si se revisa la cantidad de nitrato (ver Figura 42), se puede observar que en los embalses de Quabbin y Wachusett hay menores concentraciones que en los embalses de Colombia, razón por la cual hay un mejor control de dicho parámetro en los embalses de Estados Unidos. Sin embargo, ninguno está por encima de los valores máximos permitidos que para ambos casos es de 10 mg/L [36][37].

Figura 42 Cantidad de Nitrato en fuentes de agua.

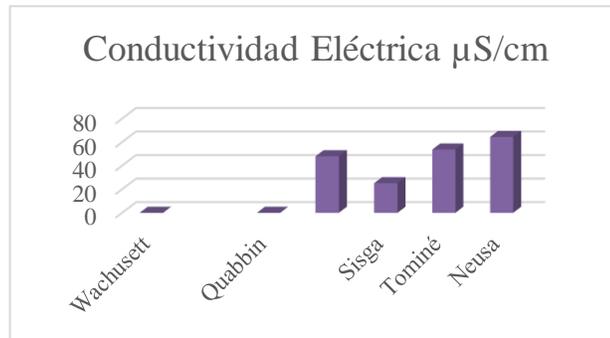


Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, los sistemas de agua dulce contienen pequeñas cantidades de sales minerales en solución. La conductividad eléctrica es una medida de la capacidad del agua para transportar una corriente eléctrica,

dependiendo de la concentración y la disponibilidad de estos iones. Los niveles elevados de conductividad indican contaminación por aguas pluviales o sistemas sépticos defectuosos, o pueden ser el resultado de los tipos de suelo de cuencas hidrográficas. El embalse que presenta mayor conductividad es el de Wachusett con valores entre 129-194  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que el de Sisga es el de menor medida con 25,1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , por lo que se podría decir que el embalse de Wachusett es el que requiere de mayor atención, aunque ninguno de los embalses sobrepasa los valores máximos permitidos que para ambos casos es de 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (ver Figura 43) [38][36][37].

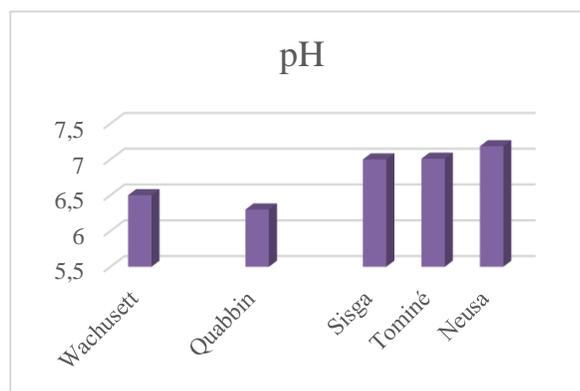
Figura 43 Conductividad eléctrica en fuentes de agua



Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, El pH y la alcalinidad de un cuerpo de agua son factores importantes que controlan la calidad general del agua. El pH de los embalses de agua es una consideración importante porque los niveles por debajo de 6 aumentan la solubilidad de metales pesados persistentes como el mercurio, lo que permite que el metal se incorpore al cuerpo de agua y, por lo tanto, sea más probable que se acumule en el tejido de organismos vivos como el pez. Como se observa en la Tabla 11, el pH en los embalses de Estados Unidos en general está entre 6 y 7, correspondiente a aguas ligeramente ácidas, mientras que en Colombia el valor promedio de pH es de 7, correspondiente a agua neutra. Cabe mencionar que el pH exigido en Massachusetts debe ser entre 6,5 y 8,5; mientras que en Colombia es entre 6,5 y 9 [37][36]. En cuanto a este parámetro se puede decir que el agua de los embalses de Colombia tiene una mejor calidad.

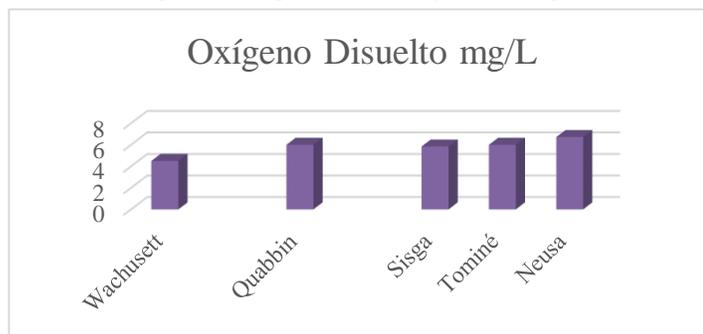
Figura 44 pH en fuentes de agua



Fuente: Elaboración propia.

El oxígeno es esencial para la supervivencia de la vida acuática (por ejemplo, las truchas necesitan un mínimo de 5.0 mg / L, equivalente a un 44 por ciento de saturación a 10 ° C). El oxígeno disuelto, o más específicamente la pérdida de oxígeno del hipolimnion, se usa como un índice para caracterizar el estado trófico de un lago. Debido a que las entradas de aireación, como la turbulencia impulsada por el viento, las corrientes del yacimiento y la difusión atmosférica disminuyen con la profundidad, las concentraciones de oxígeno disuelto generalmente disminuyen con la profundidad [39]

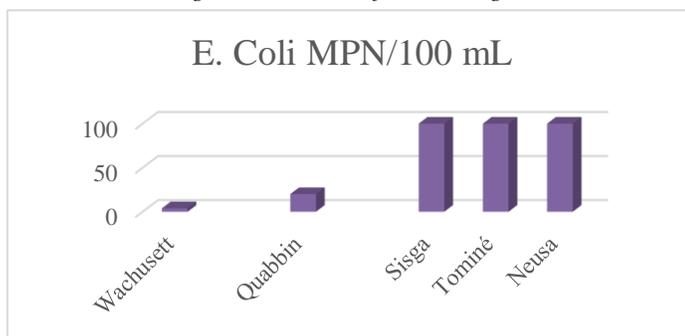
Figura 45 Oxígeno disuelto en fuentes de agua



Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en los embalses de Colombia se obtuvieron mayores concentraciones de oxígeno disuelto entre 5,8 y 6,7, mientras que en USA entre 4,5 y 6, cabe mencionar que en los informes de calidad de los embalses de USA se hace la aclaración de la profundidad a la cual se realiza la medición de oxígeno disuelto, mientras que en el informe de la CAR no se realiza [31][28][39]. A pesar de ello, se puede decir que en los embalses de Colombia se cumplió con el valor mínimo de 4 mg/L (de no ser así, se podrían producir efectos nocivos en especies acuáticas que requieren oxígeno para sobrevivir), a diferencia del embalse de Wachusett, el cual está por debajo del nivel mínimo establecido de 6 mg/L, aunque el embalse de Quabbin sí se encuentra dentro del parámetro (ver Figura 45).

Figura 46 E. Coli en fuentes de agua.

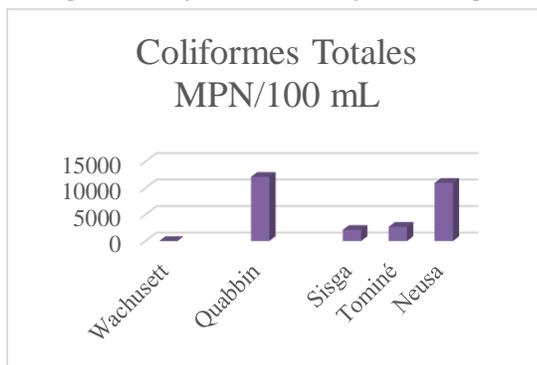


Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a las bacterias E. coli, que son habitantes normales de los tractos intestinales de los humanos y otros animales de sangre caliente, son un mejor indicador de la reciente contaminación fecal en climas templados. Debido a la naturaleza ubicua de las bacterias coliformes totales, los coliformes fecales y E. coli

son los indicadores preferidos de la contaminación fecal reciente. Como se aprecia en los embalses de Quabbin y Wachusett se registran menores concentraciones (20 MPN/100 ml) con respecto a los embalses de Colombia (100 MPN/100 ml), lo que permite inferir que debe haber menor contaminación fecal en los embalses de Estados Unidos. Se aclara que el rango de aceptación en Colombia es de 100-200 MPN/100 ml, mientras que en USA debe ser igual o inferior a 20 MPN /100 ml (ver Figura 46) [38][37].

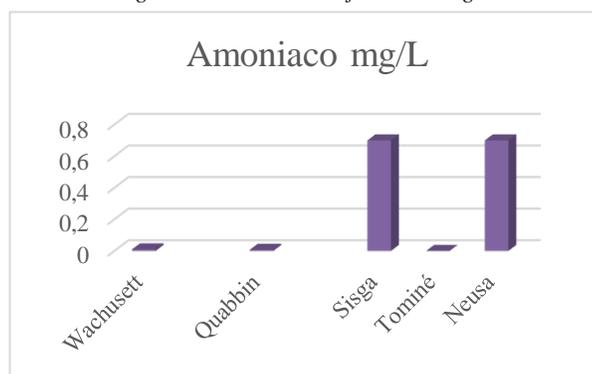
Figura 47 Coliformes totales en fuentes de agua



Fuente: Elaboración propia

Asimismo, la presencia de bacterias Coliformes totales puede indicar contaminación fecal, pero este grupo de bacterias incluye muchas especies que son habitantes naturales del sistema acuático que pueden crecer en un amplio rango de temperaturas. En el embalse de Quabbin se encontró que las bacterias de Coliformes totales son mucho más dinámicas que las coliformes fecales y E. coli, y variaron desde no detectadas (menos de 10) hasta 24,200 MPN / 100 ml. Entre los embalses de Sisga y Tominé se registran concentraciones similares (2100 y 2680 MPN /100 ml respectivamente) mientras que en el embalse de Neusa hay concentraciones elevadas (10950 MPN /100 ml).

Figura 48 Amoniaco en fuentes de agua



Fuente: Elaboración propia

El amoniaco es también uno de los contaminantes más importantes porque es relativamente común pero puede ser tóxico, disminuyendo la reproducción y el crecimiento o causando la muerte. El (NH<sub>3</sub>) sin ionizar es altamente tóxico para los peces y la vida acuática [40]. Al revisar las concentraciones de amoniaco en los embalses, se puede ver que en los embalses de Colombia se registran mayores valores (0,7 mg/L) en

comparación con los embalses de Estados Unidos, lo cuales no superan los 0,01 mg/L, aunque el valor máximo admitido es de 0,005 mg/L, de manera que en ninguno de los dos embalses se cumple el requisito. En contraste, Colombia tiene como valor máximo permitido 1 mg/L, por lo que las concentraciones de este parámetro en los embalses Sisga y Neusa, cumplen el requisito.

Finalizada la comparación de los parámetros de calidad de agua de la Tabla 11, se puede señalar que a pesar de que algunos parámetros (Oxígeno disuelto y Coliformes totales), presentan rangos de valores muy similares o dispersos entre los embalses, en general los embalses de USA presentan mejores condiciones de calidad (Nitrato, Amoniaco y bacterias E. coli), sin pasar por alto que en los depósitos de agua de Colombia ciertas variables demuestran mejores condiciones (pH y conductividad eléctrica).

Es importante mencionar, que como se evidencia en la Tabla 11, Anexo 3 y 4, el informe de calidad del agua de los embalses Wachusett y Quabbin, presenta los resultados de los parámetros de calidad de cada punto de monitoreo con sus respectivos análisis, no sólo de manera descriptiva, además de que las variables para la definición de calidad en cada depósito no son las mismas a las utilizadas en Colombia. En contraste, el informe de calidad hídrica que realiza la CAR, se limita en describir los resultados de cada parámetro medido e indicar el valor del índice de calidad de agua obtenido en cada punto de monitoreo.

Como se mencionó anteriormente, la protección de la fuente en Massachusetts está guiada por el programa de protección de cuencas hidrográficas DWSP (DCR's Division of Water Supply Protection). En Colombia las entidades nacionales ejecutan acciones para mejorar el monitoreo que realiza el IDEAM a las principales cuencas del país y apoyar el monitoreo de las autoridades ambientales regionales como la CAR en su Dirección de Monitoreo, Modelamiento y Laboratorio Ambiental.

En la CWTP se desarrolla el tratamiento del agua directamente con desinfección al ingresar el agua a la Planta, porque se garantiza la protección del agua desde su fuente y por ende su calidad antes de llegar a la WTP. Por el contrario, la PTAP Tibitoc trata el agua iniciando con el proceso de presedimentación, ya que según las características del agua no se puede realizar filtración directa ni mucho menos sólo el proceso de desinfección [32].

En ese sentido, de acuerdo al Decreto 1575 de 2007, se establece como desinfectante predeterminado el cloro, sin embargo, se hace la aclaración de que cuando se utilice un desinfectante diferente al cloro o cualquiera de las formulaciones o sustancias que utilicen compuestos distintos para desinfectar el agua para consumo humano, los valores aceptables para el residual correspondiente u otras consideraciones al respecto, serán los reconocidos por la Organización Mundial de la Salud y adoptados por el Ministerio de la Protección Social, quien tendrá en cuenta el respectivo concepto toxicológico del producto para expedir el concepto técnico.

Como ya se evidenció, la CWTP realiza el procedimiento de desinfección utilizando ozono, ya que se considera que éste genera menos subproductos, y luz UV porque en dosis rentables, inactiva de manera efectiva patógenos comunes como *Cryptosporidium*, *Giardia* y la mayoría de los patógenos bacterianos. En contraste, la PTAP Tibitoc realiza la desinfección con cloro, se aclara que en los resultados de calidad del agua potabilizada de SIVICAP que suministra el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, no se registran datos de concentración de éstos patógenos, *Cryptosporidium* y *Giardia*, los cuales han demostrado ser resistentes al cloro [41].

En este sentido, según la Resolución 2115 de 2007 Art. 11, dentro de las características microbiológicas del agua para consumo humano, se incluye que el valor aceptable para *Giardia* es de cero (0) Quistes y para *Cryptosporidium* debe ser de cero (0) Ooquistes por volumen fijado según la metodología aplicada. Además, de acuerdo al Art.22 se menciona que dentro del mapa de riesgo se debe estudiar la presencia de *Giardia* y *Cryptosporidium*, así como otros microorganismos en la fuente con el fin de determinar si es necesario realizar el control en el agua para consumo humano. Si se determina que es necesario el control, el mapa de riesgo deberá determinar la frecuencia mínima y el número mínimo de muestras a analizar por cada frecuencia. De manera que se debe hacer el monitoreo de estos parásitos desde la fuente de captación hasta el momento de distribuir el agua a los suscriptores del servicio.

Otro aspecto que se debe comparar es el manejo administrativo que se hace al recurso, como ya se mencionó, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, la cual produce y suministra el agua potable a la ciudad de Bogotá, es la misma que realiza el cobro del servicio a los usuarios, mientras que en Boston, la empresa que realiza el tratamiento del agua (MWRA) no es la misma que cobra a los residentes de la ciudad. BWSC compra servicios de tratamiento de agua tratada y aguas residuales de MWRA y los proporciona posteriormente a la comunidad.

Por otra parte como ya se mencionó, el proceso de desinfección en la John J. Carroll WTP incluye los pasos que se muestran en la Tabla 12, desde el recorrido del agua por los generadores de ozono para lograr la inactivación de patógenos, hasta la aplicación de químicos como dióxido de carbono en el edificio de Post-tratamiento para ajustar el pH al final. En contraste, en la PTAP Tibitoc el proceso de desinfección consiste en aplicar cloro libre y combinado acorde con la presencia de materia orgánica, manganeso, hierro y agentes patógenos. La concentración de cloro libre oscila entre 1,7 – 1,8 mg/L, mientras que el cloro combinado con yoduro de potasio entre 0,1 – 0,2 mg/L. De manera que al utilizar estos rangos de concentración de cloro, se pretende no generar la formación de subproductos tales como Trihalometanos y Ácidos acéticos halogenados. En caso de ser así, la PTAP tiene como alternativa de oxidación de estos compuestos, realizar el proceso de aireación.

Tabla 12 Pasos de tratamiento de agua en la planta de tratamiento de agua Carroll

Tratamiento	Dosis	Propósito
<b>Ozono</b>	1.5-4.0 mg/L	Para lograr la inactivación de Crypto de 2 registros (utilizando criterios específicos del sitio) y la inactivación de Giardia de 3 registros; desinfectante primario
<b>Bisulfito de sodio</b>	0.0-3.5 mg/L	Para eliminar el ozono
<b>Luz ultravioleta</b>		Desinfectante de agua desactiva los parásitos químicamente resistentes como <i>Cryptosporidium</i> y <i>Giardia</i> .
<b>Hipoclorito de sodio</b>	3-4 mg/L	Para la desinfección residual.
<b>Ácido hidrofluorosilícico de sodio</b>	0.9 mg/L	Para la salud dental
<b>Amoniaco acuoso</b>	0.6-0.85 mg/L	Combinar con cloro para formar monocloramina para desinfección residual.
<b>Carbonato de sodio</b>	35-37 mg/L	Para elevar la alcalinidad del agua para el búfer de pH; para minimizar el plomo y la lixiviación de cobre de las tuberías de la casa
<b>Dióxido de carbono</b>	4.5-8.5 mg/L	Para ajustar el pH al nivel final

Fuente: MWRA.

Dentro de este orden de ideas, es conveniente realizar un análisis de los beneficios y desventajas que trae cada alternativa de desinfección. Razón por la cual, a continuación se muestran las Tablas 12, 13 y 14 con el análisis para cada desinfectante (Cloro, Luz Ultravioleta y Ozono) considerando varios aspectos. Adicionalmente, en el **Anexo 5** se encuentra un cuadro comparativo de los 3 métodos en cuestión.

Tabla 13 Desinfección con Ozono

<b>OZONO</b>	
<b>Método</b>	A aire seco u oxígeno.
<b>Aplicabilidad</b>	Una gama amplia aunque por sus características intrínsecas (especialidad, costo, requerimientos de operación, etc) es más popular en los medianos y grandes sistemas.
<b>Forma de acción</b>	Oxidación de la materia orgánica.
<b>Equipos</b>	Básicamente de dos clases: alimentados a aire seco o a oxígeno. Los de menor porte se venden en paquete (armados dentro de un esqueleto fijo o container, que se traslada en camiones, barcos o trenes).
<b>Complejidad</b>	Alta.
<b>Ventajas</b>	Excelente desinfectante. En ocasiones mejora la calidad organoléptica del agua tratada.
<b>Desventajas</b>	Sistema complejo para muchas comunidades de países en desarrollo, aún para aquellas de gran porte. Requiere personal capacitado para operación y control. Hay formación de SPD, aunque no tan importantes como los del cloro. No hay residual. Requiere segura provisión de electricidad.
<b>Mantenimiento</b>	Alto y cuidado.
<b>Costo de capital</b>	Alto.
<b>Costo de o&amp;m</b>	Entre los desinfectantes, es uno de los más altos.
<b>Disponibilidad</b>	Muy baja. Los equipos se deben adquirir en países desarrollados.
<b>Controles</b>	La mayoría de los equipos se venden con sus sistemas de control. Pero hay que estar atentos a los avisos de alarma de los mismos.
<b>Control analítico</b>	Aunque complejos, existen métodos para detección en laboratorio. No existen métodos de campo, y además no es factible hacer un análisis del agua de red, ya que la vida media del O <sub>3</sub> es muy baja.
<b>Recomendaciones</b>	Por el momento, solo para países con capacidad para implementar la técnica.

Fuente: Datos comparativos sobre técnicas de desinfección [42]

Tabla 14 Desinfección con Rayos UV

<b>RADIACIÓN ULTRAVIOLETA</b>	
<b>Método</b>	Lámpara dentro o fuera del agua
<b>Aplicabilidad</b>	Toda la gama de poblaciones desde muy pequeñas a muy grandes
<b>Forma de acción</b>	Destrucción del ADN de los microorganismos
<b>Equipos</b>	Variada gama, con tubos fuera del agua o dentro de ella
<b>Complejidad</b>	El equipo básico en sí (la lámpara UV) es de escasa o nula complejidad. Sin embargo los equipos auxiliares que deben acompañar a aquella te confieren un variado rango de complejidad dependiendo del grado de seguridad buscado
<b>Ventajas</b>	Sistema Simple. No requiere del uso de ninguna sustancia química. Corto tiempo de exposición. No hay cambios organolépticos en el agua. No hay formación de SPD
<b>Desventajas</b>	Para asegurar la dosis adecuada hay que contar con varios equipos de control. No hay forma de medir la eficacia de la desinfección en forma simple y rápida. Requiere electricidad. No hay residual
<b>Costo de capital</b>	Bajo en sistemas simples y sin demasiada protección. Elevado en los muy protegidos. Intermedio en aquellos con solo lo imprescindible para una buena operación
<b>Costo de o&amp;m</b>	Bajo a moderado
<b>Disponibilidad</b>	Hay que depender de proveedores externos en las zonas alejadas o rurales.
<b>Mantenimiento</b>	Simple pero cuidado. Hay que asegurar la limpieza de los encamisados cuando los tubos están sumergidos
<b>Controles</b>	Solo se deben “controlar los controles” del proceso (los equipos que monitorean la emisión de la radiación, la vida de las lámparas, etc)
<b>Control analítico</b>	No hay forma de medir la eficacia de la desinfección, salvo realizar un análisis bacteriológico
<b>Recomendaciones</b>	Un método muy interesante por lo simple. No solo tiene aplicación y demanda en las grandes ciudades. También es una buena opción para zonas rurales

Fuente: Datos comparativos sobre técnicas de desinfección [42]

Tabla 15 Desinfección con Cloro

<b>COLORO</b>	
<b>Método</b>	Gas.
<b>Aplicabilidad</b>	Muy amplia. Medianas y grandes poblaciones (5.000 a 10.000 habitantes en más).
<b>Forma de acción</b>	Oxidación de la materia orgánica.
<b>Equipos</b>	Dosificadores montados en cilindros y tanques, trabajando bajo presión o al vacío. Requieren bombas para recircular agua y otros equipos auxiliares. Deben existir recintos especialmente adecuados y equipos de protección personal.
<b>Complejidad</b>	Intermedia.
<b>Ventajas</b>	Simpleza. Es el método más popular en el mundo. En casi todos los países se produce cloro gas. Es más eficiente en términos de costo. Hay residual en el agua tratada y es fácilmente medible.
<b>Desventajas</b>	En algunas comunidades alejadas hay que asegurarse la provisión del gas. Requiere personal con cierto grado de capacitación. Todas las formas de cloro son muy corrosivas y tóxicas por lo que requiere normas exigentes de seguridad industrial. Puede producir cambios en gusto y sabor. Ofrece protección relativamente baja contra el <i>Cryptosporidium</i> . Produce SPD.
<b>Costo de capital</b>	Intermedio
<b>Costo de o&amp;m</b>	Muy bajo (de los métodos más populares, la cloración por gas presenta el costo más bajo)
<b>Disponibilidad</b>	Intermedia. Hay que recurrir a las grandes ciudades para equipos y repuestos
<b>Mantenimiento</b>	Intermedio. El personal debe estar capacitado
<b>Controles</b>	Muy frecuentes o casi constantes. Idealmente deben haber sistemas de alarma automáticos
<b>Control analítico</b>	Muy simple. Existe una gama de comparadores de cloro residual sencillos y baratos
<b>Recomendaciones</b>	A pesar de algunas desventajas sigue siendo el método más popular para las ciudades.

Fuente: Datos comparativos sobre técnicas de desinfección [42]

## 9.1 CONCLUSIONES

Como se observa, por muchas razones se podría preferir la implementación de un método sobre otro. En Estados Unidos, dado que sólo se requiere efectuar el proceso de desinfección, se prefiere primordialmente la técnica que realiza de manera más eficiente la desinfección y es más avanzada aunque no sea la más económica, el Ozono, sin olvidar la Luz Ultravioleta, la cual les garantiza un mayor inactivación de patógenos como *Giardia* y *Cryptosporidium*, e implementan una pequeña dosis de Cloro para mantener un efecto residual duradero al transportar el agua por la red de distribución.

En Colombia, solamente se utiliza Cloro para el proceso de desinfección debido a que es el método más económico y popular en el mundo. Se debe reconocer que antes de llegar a la desinfección en la PTAP, se realizan procesos de pre sedimentación, coagulación, floculación, sedimentación y filtración, los cuales mejoran las características del agua, pero de igual manera requieren de mantenimiento, supervisión, entre otros trabajos, y al momento de la creación de la PTAP al ser tantos procesos que se debían realizar, se debió considerar un método eficiente pero económico.

Adicionalmente, hay que mencionar que la PTAP Tibitoc entró en funcionamiento por primera vez en 1958 con una capacidad inicial de 3.5 metros cúbicos por segundo, mientras que la John J. Carroll WTP, localizada en Massachusetts inicio su funcionamiento en el 2005, medio siglo después. Sumándole a ese hecho, que Estados Unidos en ese entonces ya era reconocida como una potencia mundial, mientras que Colombia como un país tercermundista, con condiciones completamente diferentes.

Figura 49 Tratamiento convencional de desinfección



Fuente: [www.chilecubica.com](http://www.chilecubica.com)

En este orden de ideas, como propuesta de transferencia tecnológica, más que la implementación de desinfección con ozono y luz ultravioleta para inactivar y controlar de manera más eficiente los patógenos *Cryptosporidium* y *Giardia* en la PTAP Tibitoc, se considera que es más significativo transferir los métodos,

leyes y regulaciones implementados en Estados Unidos, porque garantizan alta calidad de agua desde las fuentes, de manera que en las PTAP sólo se requiere realizar el tratamiento de desinfección al agua, es decir, ahorrarse los procesos de pretratamiento, coagulación, floculación, sedimentación y filtración, y de esta manera, también se puede optar por implementar el método más eficiente en desinfección e inclusive avanzado (ver Figura 49 y Figura 50).

Figura 50 Tratamiento avanzado en el agua.



Fuente: [techalive.mtu.edu](http://techalive.mtu.edu)

Con todo, mantener fuentes de agua potable limpias y seguras se está convirtiendo cada vez más en una prioridad debido a la contaminación global. Los medios para alcanzar y mantener fuentes de agua potable limpias requieren políticas efectivas que identifiquen, documenten y reduzcan los riesgos de las cuencas hidrográficas. Estos riesgos están definidos por su impacto potencial en la salud humana. La salud y el riesgo están, por lo tanto, indeleblemente vinculados porque en parte se definen entre sí [43].

Ciertamente, los cambios en la calidad del agua superficial que resultan de los insumos de desechos humanos, nutrientes y químicos están asociados con mayores riesgos de agua potable. El aporte de nutrientes puede aumentar la producción primaria y el aumento resultante de la materia orgánica da como resultado una mayor desinfección en la formación de subproductos o requiere una mayor intensidad de tratamiento. Muchos brotes de enfermedades del agua potable han resultado de violaciones en las instalaciones de tratamiento, por lo tanto, incluso con una mayor intensidad de tratamiento, la mala calidad de la fuente de agua intrínsecamente tiene mayores riesgos para la salud asociados.

En los países desarrollados, los riesgos agudos para la salud de los patógenos microbiológicos se han mitigado en gran medida a través de la desinfección del agua potable. El objetivo de la desinfección del agua es inactivar los patógenos transmitidos por el agua principalmente mediante alguna forma de cloración,

ozonización o, más recientemente, radiación ultravioleta (UV). A pesar de los beneficios de la desinfección, varios patógenos son resistentes a los procesos de cloración tradicionales. Dos de estos patógenos, *Cryptosporidium* y *Giardia*, han sido objeto de una mayor investigación en los últimos diez años, porque sus ooquistes y quistes no se inactivan completamente por cloración ni ozonización, ni se eliminan completamente por filtración [44][45].

Estos parásitos también tienen una dosis infecciosa baja y son comunes en el agua superficial. En Milwaukee, 1993, el brote más grande registrado en el agua en los EE. UU. Ocurrió cuando más de 400 000 personas se enfermaron y más de 100 murieron después de haber sido infectadas con *Cryptosporidium* debido al suministro de agua potable. Reconociendo que los usuarios de agua potable derivada de la superficie tienen un mayor riesgo de infección por *Giardia* y *Cryptosporidium* [46].

En última instancia, la gestión del agua potable debe basarse en una ciencia sólida, una política sólida, una instrumentación de política efectiva y una comprensión clara del riesgo. Lo esencial de la calidad del agua potable actual se centra en el producto final, sin embargo, la calidad del agua es una consecuencia de la fuente, el tratamiento y la distribución del agua. Idealmente, la protección del agua potable debería centrarse en elevar la calidad del agua de origen en lugar de aumentar la sofisticación del tratamiento. El tratamiento solo no es a prueba de fallos, sino que debe utilizarse como parte de un enfoque de barrera múltiple [47][48].

La protección de las aguas de origen superficial puede reducir la cantidad de patógenos y materia orgánica que ingresan a las instalaciones de tratamiento, lo que reduce los riesgos entéricos agudos, reduce los DBP y reduce los sustratos de DOC que promueven el crecimiento de bacterias en los sistemas de distribución. La protección y el manejo también pueden servir para reducir las toxinas cianobacterianas. El enlace entre la calidad del agua de la fuente y la necesidad de tratamiento es reconocido por el SWDA de los Estados Unidos. Las evaluaciones han demostrado que la administración efectiva puede reducir, retrasar o evitar los costos sustanciales asociados con el tratamiento del agua más allá de la desinfección.[49] Es especialmente crítico comprender la ecología de los patógenos humanos y gestionarlos mediante la prevención de la contaminación de las fuentes de agua.

Los mayores costos de los usuarios a corto plazo para desarrollar programas de cuencas hidrográficas integradas pueden reducir tanto los riesgos como los costos de salud humana y ambiental a largo plazo. La disparidad entre las políticas que describen la protección de las cuencas hidrográficas y la capacidad de los servicios públicos de agua para implementar programas de cuencas hidrográficas subraya el papel fundamental del gobierno. La política debe ir más allá de las declaraciones y proporcionar instrumentos para el logro práctico de los objetivos de la política [43].

En conclusión, resulta claro que se debe considerar las implicaciones a corto y largo plazo de la gestión de los recursos hídricos. La prevención de la contaminación del agua parece una directiva de manejo más sabia

y prudente que la limpieza de nuestras fuentes de agua en el futuro. El agua es esencial para la sostenibilidad, por lo que las políticas deben dirigirse necesariamente a gestionar y utilizar el agua de manera sostenible.

Dada la importancia de los hallazgos de esta investigación y los beneficios que traería no solo para la PTAP Tibitoc, sino para todas la Plantas Potabilizadoras que tratan agua en Colombia, la implementación de una política sólida para la protección y buen manejo de las fuentes de agua como se hace en Estados Unidos, se considera pertinente proponer la exposición o presentación de ponencia en congresos de investigación realizados en Universidades.

## 10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. A. Romero, *Calidad del agua*. .
- [2] Organización Mundial de la Salud, “Guías para la calidad del agua potable,” *Organ. Mund. la Salud*, pp. 11–26, 2014.
- [3] World Health Organization, “Water, Sanitation and Hygiene - Links to Health. Facts and Figures updated November 2004,” *World Health*, vol. 10, no. November, pp. 67–67, 2004.
- [4] 2017 Organización Mundial de la Salud y el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF), *Progresos en Materia de agua potable, saneamiento e higiene*, Phoenix De. Suiza., 2017.
- [5] M. Water and R. Authority, “Massachusetts Water Resources Authority MWRA Water Supply and Treatment,” 2012.
- [6] M. Water and R. Authority, “WATER QUALITY UPDATE An Analysis of January 2018 Sampling Data,” no. January, 2018.
- [7] “MWRA - Water System History.” [Online]. Available: <http://www.mwra.com/04water/html/hist1.htm>. [Accessed: 21-Sep-2018].
- [8] M. W. R. A. and Y. L. W. Department, “Beba Agua Potable,” p. 6, 2010.
- [9] A. Recursos, M. Ambiente, E. Unidos, L. Certificados, E. F. Reportes, and A. Conservaci, “Para Recibir Una Copia de Letra Grande , Llame 617-242-5323 .”
- [10] Massachusetts Water Resources Authority, *John J. Carroll Water Treatment Plant*. Charlestown Navy Yard. Building 39. Boston, MA 02129, 2016.
- [11] “Historia Acueducto de Bogotá.” [Online]. Available: [https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB/aempsecsecundaria/empresanuestrahistoria/lut/p/z1/tVNbb8IgGP01fVTorVv3Vp3RmdUlbl7Ky0KRXrYWKqV126\\_f59zL4i2LG4EA33e-wwkcEEErRARtsoTqTAqawz4k3ede79Y3LWxNR-Oejf3FzLrznwYYdy20QASRkmVrFLoOdZmLsWPzThQ51HOPTWMWRWbHYy41d](https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB/aempsecsecundaria/empresanuestrahistoria/lut/p/z1/tVNbb8IgGP01fVTorVv3Vp3RmdUlbl7Ky0KRXrYWKqV126_f59zL4i2LG4EA33e-wwkcEEErRARtsoTqTAqawz4k3ede79Y3LWxNR-Oejf3FzLrznwYYdy20QASRkmVrFLoOdZmLsWPzThQ51HOPTWMWRWbHYy41d). [Accessed: 21-Sep-2018].
- [12] J. A. Osorio, “La historia del agua en Bogotá: una exploración bibliográfica sobre la cuenca del río Tunjuelo,” *Mem. y Soc.*, vol. 12, no. 25, pp. 107–116, 2008.
- [13] S. D. para la P. y C. de la C. del A. para C. Humano, “SISTEMA TIBITOC, EMPRESA DE ACUEDUCTO DE BOGOTÁ,” BOGOTÁ, 2015.
- [14] Secretaría Distrital de Salud de Bogotá, “SISTEMA CHINGAZA - PTAP FRANCISCO WIESNER (EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ),” 2013.
- [15] “Estados Unidos la primera potencia mundial: sociedad, poblacion.” [Online]. Available: [https://historiaybiografias.com/paises\\_menu1/](https://historiaybiografias.com/paises_menu1/). [Accessed: 10-Oct-2018].
- [16] C. M. Villanueva, K. Manolis, and J. O. Grimalt, “Cloración del agua potable y efectos sobre la salud: revisión de estudios epidemiológicos,” *Med. Clin. (Barc.)*, vol. 117, no. 1, pp. 27–35, 2001.
- [17] M. T. Olmedo-Sánchez, “Subproductos de la desinfección del agua por el empleo de

- compuestos de cloro. Efectos sobre la salud,” *Hig. Sanid. Ambient*, vol. 342, pp. 335–342, 2008.
- [18] M. J. Asociación Interciencia., G. Rodríguez, J. Serodes, and R. Sadiq, “SUBPRODUCTOS DE LA DESINFECCIÓN DEL AGUA POTABLE: FORMACIÓN, ASPECTOS SANITARIOS Y REGLAMENTACIÓN,” *Interciencia*, vol. 32, no. 11, pp. 749–756, 2007.
- [19] R. Guimarães, J. R., Ibáñez, J., Litter, M. I., & Pizarro, “Desinfección de agua,” *Elimin. Contam. por fotocatalisis heterogénea.*, pp. 375–388, 2001.
- [20] R. Vignoli, “Esterilización Y Desinfección,” pp. 1–21, 2012.
- [21] E. Rocha, “Desinfección y métodos de desinfección del agua,” *Ing. Trat. y Acond. Aguas*, p. 16, 2011.
- [22] N. Academies, “Safe Drinking Water Is Essential,” *Reports from Natl. Acad.*, Sep. 2007.
- [23] “Breve historia de la desinfección y tratamiento de agua potable.” [Online]. Available: <http://suhissa.com.mx/breve-historia-de-la-desinfeccion-y-tratamiento-de-agua-potable/>. [Accessed: 21-Sep-2018].
- [24] W. J. Weber and Ja. A. Borchardt, *Control de la calidad del agua : procesos fisicoquímicos*. Reverté, 1979.
- [25] H. B. Wright y W. L. Cairns, “DESINFECCION DE AGUA POR MEDIO DE LUZ ULTRAVIOLETA H. B. Wright y W. L. Cairns Trojan Technologies Inc. 3020 Gore Road, London, Ontario, Canada N5V 4T7,” *Trojan Technol. Inc.*, vol. 4, pp. 1–28, 1996.
- [26] OneWaterLA, “Watershed protection program,” 2014.
- [27] U. Epa, “Understanding the Safe Drinking Water Act,” 1974.
- [28] W. Reservoir, “Water Quality Report : 2010 Wachusett Reservoir and Watershed,” no. April, 2011.
- [29] Massachusetts Water Resources Authority, “2017 ANNUAL DRINKING WATER TEST RESULTS,” BOSTON, 2017.
- [30] “About BWSC | Boston Water and Sewer Commission.” [Online]. Available: <https://www.bwsc.org/about>. [Accessed: 26-Apr-2019].
- [31] R. De Todos, “BOLETÍN DE CALIDAD HÍ DRICA 2017,” pp. 1–538, 2017.
- [32] J. Manuel and S. Calderón, “Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y TÍTULO C Sistemas de potabilización.”
- [33] P. D. G. de C. y Procesos, “Productos y servicios de la EAAB 2018,” 2018.
- [34] A. M. Alcocer, *Contrato de Servicios Publicos Domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá*. Colombia, 2015, pp. 1–35.
- [35] SIVICAP, “NIVEL DE RIESGO DEL AGUA EN COLOMBIA | Datos Abiertos Colombia,” 2018. [Online]. Available: <https://www.datos.gov.co/Salud-y-Proteccion-Social/NIVEL-DE-RIESGO-DEL-AGUA-EN-COLOMBIA/23vq-5czi>. [Accessed: 26-Apr-2019].
- [36] M. D. L. P. SOCIAL and V. Y. D. T. MINISTERIO DE AMBIENTE, *RESOLUCIÓN 2115 DE 2007*. 2007.

- [37] Department of Environmental Protection, *310 CMR 22.00 DRINKING WATER*. United States, 2554.
- [38] C. Alta, *Evaluación regional Cuenca Alta río Bogotá Evaluación Regional Cuenca Alta río Bogotá*. .
- [39] P. Quabbin and C. Read, “Water Quality Report : 2005 Quabbin Reservoir Watershed Ware River Watershed,” *Quality*, no. January, 2006.
- [40] D. Nh, “Folleto Informativo Amoniaco.”
- [41] A. F. Topic *et al.*, “© Awwa Research Foundation , 2005 © Awwa Research Foundation , 2005,” 2005.
- [42] D. Electr, “Datos Comparativos,” 2000.
- [43] J. M. Davies and A. Mazumder, “Health and environmental policy issues in Canada: The role of watershed management in sustaining clean drinking water quality at surface sources,” *J. Environ. Manage.*, vol. 68, no. 3, pp. 273–286, 2003.
- [44] M. W. LeChevallier, W. D. Norton, and R. G. Lee, “Occurrence of Giardia and Cryptosporidium spp. in Surface Water Supplies,” *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 57, no. 9, pp. 2617–21, 1991.
- [45] A. R. G. L. MARK W. LECHEVALLIER,\* WILLIAM D. NORTON, “Giardia and Cryptosporidium spp. in Filtered Drinking Water Supplies,” *Drink. Water Handbook, Second Ed.*, vol. 57, no. 9, pp. 59–66, 2012.
- [46] W. R. Mac Kenzie *et al.*, “A Massive Outbreak in Milwaukee of Cryptosporidium Infection Transmitted through the Public Water Supply,” *N. Engl. J. Med.*, vol. 331, no. 3, pp. 161–167, Jul. 1994.
- [47] L. O. Gostin, Z. Lazzarini, V. S. Neslund, and M. T. Osterholm, “Water quality laws and waterborne diseases: Cryptosporidium and other emerging pathogens,” *Am. J. Public Health*, vol. 90, no. 6, pp. 847–853, 2000.
- [48] G. F. Craun, *Surface Water Supplies and Health*, vol. 80. 1988.
- [49] G. Chichilnisky and G. Heal, “Economic returns from the biosphere,” *Nature*, vol. 391, no. 6668, pp. 629–630, 1998.

## 11 ANEXOS

**Anexo 1:** Para consultar el anexo 1 por favor remitirse a los archivos de la subcarpeta “**ANEXO 1**” de la carpeta “**ANEXOS**”.

**Anexo 2:** Para consultar el anexo 2 por favor remitirse a los archivos de la subcarpeta “**ANEXO 2**” de la carpeta “**ANEXOS**”.

**Anexo 3:** Para consultar el anexo 3 por favor remitirse a los archivos de la subcarpeta “**ANEXO 3**” de la carpeta “**ANEXOS**”.

**Anexo 4:** Para consultar el anexo 4 por favor remitirse a los archivos de la subcarpeta “**ANEXO 4**” de la carpeta “**ANEXOS**”.

**Anexo 5.** Para consultar el anexo 5 por favor remitirse a los archivos de la subcarpeta “**ANEXO 5**” de la carpeta “**ANEXOS**”.

---

Firma Estudiante  
Laura Velandia Medina  
Código 505853

---

Firma Asesor del Trabajo de Grado  
Juan Sebastián De Plaza

FECHA            19/Mayo/2019