



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA**  
**CAMPO DISCIPLINARIO INGENIERÍA DE PROCESOS**

**Título:**

Evaluación de la factibilidad técnica y económica de procesos de remoción de nitrógeno amoniacal y materia orgánica en fuentes de agua subterránea para suministro de agua potable en la Ciudad de México

**TESIS**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**

**DE LA TRINIDAD BENÍTEZ KAREN LIZBETH**

Lugar a desarrollar el trabajo: Unidad de proyectos y de investigación en ingeniería ambiental, laboratorios 301 a 303, conjunto E, Facultad de Química, UNAM.

**TUTOR:**

**DR. ALFONSO DURÁN MORENO**  
**FACULTAD DE QUÍMICA**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX MARZO 2024**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Cruz Gómez Modesto Javier

Secretario: Dr. López Aguilar José Esteban

1 er. Vocal: Dr. Durán Moreno Alfonso

2 do. Vocal: Dr. González Barceló Oscar

3 er. Vocal: Sámano Castillo José Sabino

Unidad de proyectos y de investigación en ingeniería ambiental, laboratorios 301 a 303,  
conjunto E, Facultad de Química, UNAM

**TUTOR DE TESIS:**  
Dr. Alfonso Durán Moreno

-----  
**FIRMA**

**A quien toma la incertidumbre con valentía, reconociendo que en cada pregunta reside la oportunidad de un descubrimiento.**

**A quien transforma el dolor y la tristeza en un motor de cambio, canalizando la adversidad hacia la construcción de un mundo más compasivo.**

**A quien tiembla de indignación al ver una injusticia.**

**A quien defiende con pasión la justicia social, siendo una luz en la oscuridad de la inequidad.**

**A quien no le teme ni desprecia el valor del error, la vulnerabilidad, la empatía, la sensibilidad y el amor.**

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi mamá Silvia Benítez López por su amor y cuidado, por ser siempre una mujer tan valiente ante la vida, por creer en mí y darme todo lo bueno de ella, incluso lo que ha construido sin que nadie se lo haya mostrado antes.

A mi hermano Carlos Alberto De la Trinidad Benítez por sus consejos, amor, cuidado, enseñanzas y compañía toda mi vida, por ser un ejemplo mostrándome su camino y alentándome a confiar más en mí y seguir lo que me gusta.

A mi abuelo Ismael Benítez Serrano por su cariño, amor, cuidado y ser un ejemplo de bondad y de siempre hacer las cosas por un camino de bien, aunque a veces parezca al principio que cuesta más.

A mi tía Graciela Benítez López por ser una mujer tan cariñosa, compasiva y comprensiva, por escucharme y ser una mujer tan valiente.

A mi novio Sebastián Espinosa Rangel por su amor, cuidado y contención, por ser mi compañero ideal, por hacerme sentir en un lugar seguro junto a él y ser un ejemplo de resiliencia, compasión, bondad, empatía y comprensión. Por ser conmigo “compañeros de lucha y jamás indiferentes”.

A mis amigos Héctor Pozos, Jonathan Ramírez y Braulio Ramírez por acompañarme con otra de las pocas cosas que más atesoro en la vida; la amistad, por sus consejos, cuidados, risas, pláticas, confianza y días de estudio, por el apoyo y las ideas para crecer y superarnos juntos mientras compartimos nuestros sueños, por ser los tres, personas tan valiosas y brillantes.

A mi asesor, el Dr. Alfonso Durán Moreno por brindarme un espacio en su grupo de trabajo, por apoyarme durante todo este camino, creer en mí, darme aliento, comprensión y abrirme siempre el panorama, por enseñarme tanto siempre con paciencia y ejemplo.

A mi asesor de licenciatura el M. en I. Carlos Álvarez Maciel, por alentarme a realizar mi maestría, las pláticas extra de nuestras sesiones de asesoramiento para hablar de ciencia, ayudarme y estar pendiente de mi proceso.

A los miembros de mi jurado, el Dr. Modesto Javier Cruz Gómez, el Dr. José Esteban López Aguilar, el Dr. Óscar González Barceló y el Dr. José Sabino Sámano Castillo por sus contribuciones a este trabajo mediante comentarios, correcciones, así como su accesibilidad y apoyo para culminar mi maestría de la mejor manera.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de maestría otorgada

## Contenido

Lista de tablas.....	7
Lista de figuras.....	8
Abreviaturas .....	10
Tema de investigación.....	11
Resumen.....	11
Abstract .....	12
CAPITULO I. ANTECEDENTES.....	13
1.1. El agua.....	13
1.2. Historia y distribución del agua en la Ciudad de México .....	17
1.3. Usos del agua en la Ciudad de México .....	22
1.4. Fuentes convencionales de agua .....	25
1.5. Principales problemas del abastecimiento de agua potable en Ciudad de México .....	30
1.6. Tipos de tratamiento y procesos para potabilización .....	35
1.7. Principales contaminantes del agua.....	38
1.8. Materia orgánica.....	43
1.8.1. Ciclo del carbono .....	43
1.8.2. Contaminante .....	44
1.8.3. Norma Oficial Mexicana .....	46
1.8.4. Información de contaminación de materia orgánica en la Ciudad de México .....	49
1.8.5. Procesos de eliminación de materia orgánica.....	50
1.9.    Nitrógeno Amoniacal .....	54
1.9.1. Ciclo del nitrógeno.....	55
1.9.2. Contaminantes.....	56
1.9.3. Norma Oficial Mexicana .....	57
1.9.4. Información de contaminación de materia orgánica en la Ciudad de México .....	58
1.9.5. Procesos de eliminación de nitrógeno amoniacal.....	60
1.10.    Datos de los influentes y efluentes de algunas de las estaciones de tratamiento de agua potable en la Ciudad de México:.....	97
1.11.    Características de importancia para la selección de procesos de tratamiento de agua	102
1.12.    Factibilidad económica .....	104
CAPITULO II. INTRODUCCIÓN .....	105
2.1.    Justificación.....	105

2.2.	Objetivo principal.....	106
2.3.	Objetivos específicos.....	107
2.4.	Hipótesis de trabajo.....	107
2.5.	Metodología .....	107
I.	Estado del arte de la remoción de nitrógeno amoniacal y materia orgánica en plantas potabilizadoras.....	107
II.	Definición del caso de estudio.....	108
III.	Planteamiento de opciones para el tren de tratamiento.....	109
IV.	Diseño de trenes de tratamiento.....	109
V.	Dimensionamiento de las etapas de proceso del tren de tratamiento.....	110
VI.	Evaluación económica.....	110
VII.	Evaluación y análisis técnico y económico de las opciones.....	110
VIII.	Selección de la opción más adecuada con recomendaciones generales de todas las opciones para el caso específico de la Ciudad de México.....	110
2.6.	Resultados esperados.....	111
CAPITULO III. DESARROLLO.....		111
3.1.	Diseño de trenes de tratamiento .....	111
3.2.	Análisis técnico .....	118
3.1.2.	Cloración a punto de quiebre.....	119
3.1.3.	Biofiltros .....	127
3.1.4.	Ósmosis inversa.....	137
3.1.5.	Resultados preliminares .....	144
3.3.	Análisis económico .....	145
3.3.1.	Costo de no tener una cobertura completa y constante de agua potable .....	145
3.3.2.	Costo de rehabilitar una estación de tratamiento de agua potable.....	149
CAPITULO IV. CONCLUSIONES .....		159
CAPITULO V. PERSPECTIVAS.....		160
Referencias.....		161

## Lista de tablas

- Tabla 1. Fuentes de agua de la Ciudad de México [Massiel, C. et. al. 2022].
- Tabla 2. Fuentes convencionales de agua [Degrémont, Rueil-Malmaison, 2007]
- Tabla 3. Etapas de tratamiento para las ETAPs y PTArS.
- Tabla 4. Procesos comúnmente aplicados en las ETAPs. Elaboración propia con información de [Crittenden, C. 2012]
- Tabla 5. Parámetros de contaminación respecto a la materia orgánica para fuentes de agua superficiales. [CONAGUA, 2018] (modificado)
- Tabla 6. Información de DQO en el influente de algunas plantas potabilizadoras de la CDMX [SACMEX, 2019].
- Tabla 7. Límites permisibles de las diferentes formas del nitrógeno en la NOM-127-SSA1-2021
- Tabla 8. Información de las distintas formas en que se encuentra el nitrógeno en el influente de algunas plantas potabilizadoras de la CDMX [SACMEX, 2019].
- Tabla 9. Reacción del ozono con compuestos inorgánicos [Rodríguez, 2003]
- Tabla 10. Ventajas y desventajas de la ozonación [SGAPDS-1-15-Libro23]
- Tabla 11. Eficiencia de intercambio en diferentes zeolitas [López, M. 2008].
- Tabla 12. Eficiencias de remoción por intercambio iónico selectivo [SGAPDS-1-15-Libro24]
- Tabla 13. Ventajas y desventajas del proceso de desorción de amonio con aire [EPA, 2000].
- Tabla 14. Tecnologías para remoción de nitrógeno amoniacal
- Tabla 15. Concentración de algunos contaminantes en el influente de plantas de las ETAPs de la CDMX [SACMEX, 2019]
- Tabla 16. Datos del inventario de plantas potabilizadoras de la Ciudad de México. [CONAGUA, 2021]
- Tabla 17. Distribución del puntaje de eficiencia de remoción.
- Tabla 18. Distribución del puntaje del costo.
- Tabla 19. Distribución del puntaje para la factibilidad de rehabilitación.
- Tabla 20. Distribución del puntaje para el mantenimiento.
- Tabla 21. Distribución del puntaje para la seguridad.
- Tabla 22. Distribución del puntaje para la flexibilidad
- Tabla 23. Distribución del puntaje para el grado de dificultad de la operación.
- Tabla 24. Distribución del puntaje para el conocimiento actual de la tecnología.
- Tabla 25. Balance de materia del tren de tratamiento de cloración a punto de quiebre.
- Tabla 26. Resultados obtenidos del tren de tratamiento de cloración a punto de quiebre [Elaboración propia con datos de la OMS y la NOM-127-SSA1-2021]
- Tabla 27. Datos de la tecnología de cloración a punto de quiebre para ETAPs de la Ciudad de México.
- Tabla 28. Balance de materia del tren de tratamiento de Biofiltros.



- Tabla 31. Balance de materia del sistema de ósmosis inversa.
- Tabla 32. Resultados obtenidos del tren de tratamiento de ósmosis inversa [Elaboración propia con datos de la OMS y la NOM-127-SSA1-2021]
- Tabla 33. Comparación de resultados de concentraciones de los contaminantes de interés obtenidos en el efluente de cada uno de los trenes de tratamiento (TT).
- Tabla 34. Datos del caudal de agua de distintos comercios para el análisis económico. [Elaboración propia con datos de WWE, 2003]
- Tabla 35. Distribución de alternativas de compra de agua por litros comprados y costo.
- Tabla 36. Costo de la salud por falta de agua potable.
- Tabla 37. Cálculo y distribución de caudal requerido por la colonia CE1.
- Tabla 38. Lista de reactivos y materiales necesarios para el tren de tratamiento de cloración a punto de quiebre.
- Tabla 39. Lista de equipos y complementos necesarios para el tren de tratamiento de cloración a punto de quiebre
- Tabla 40. Obra y empleados necesarios para rehabilitar la ETAP con el tren de tratamiento propuesto (cloración a punto de quiebre)
- Tabla 39. Lista de equipos y complementos necesarios para el tren de tratamiento de cloración a punto de quiebre.
- Tabla 40. Obra y empleados necesarios para rehabilitar la ETAP con el tren de tratamiento propuesto (cloración a punto de quiebre).
- Tabla 41. Lista de reactivos y materiales necesarios para el tren de tratamiento de biofiltros.
- Tabla 42. Lista de equipos y complementos necesarios para el tren de tratamiento de biofiltros.
- Tabla 43. Obra y empleados necesarios para rehabilitar la ETAP con el tren de tratamiento de biofiltros.
- Tabla 44. Lista de reactivos y materiales necesarios para el tren de tratamiento de ósmosis inversa.
- Tabla 45. Lista de equipos y complementos necesarios para el tren de tratamiento de ósmosis inversa.
- Tabla 46. Obra y empleados necesarios para rehabilitar la ETAP con el tren de tratamiento de ósmosis inversa.
- Tabla 47. Análisis de costos de las plantas.

#### Lista de figuras

- Figura 1. Mapa de la Ciudad de México y Zona Metropolitana del Valle de México. (CONAGUA, 2005) EDITADO
- Figura 2. Distribución de los recursos hídricos de la Ciudad de México. (L. Cobarrubias, 2019) EDITADO

- Figura 3. Demarcaciones territoriales de la CDMX. (INEGI, 2012)
- Figura 4. Fuentes de abastecimiento de agua de la CDMX (SACMEX, 2020). EDITADO
- Figura 5. Ciclo hidrogeoquímico del agua [ITGE, 1991].
- Figura 6. Ciclo del carbono [Gonzales, S. 2022].
- Figura 7. Gráfica de la concentración de DQO en el influente de distintas ETAPs. Datos obtenidos de SACMEX, 2019. \*Se muestra el valor máximo permitido en la línea amarilla para ilustrar qué tanto sobrepasan este valor los influentes de estas plantas.
- Figura 8. Tabla de los distintos medios filtrantes que conforman los filtros rápidos. Recuperado y editado de [MWH,2012].
- Figura 9. Tabla de características de filtros rápidos. Recuperado y editado de [MWH, 2012].
- Figura 10. Ciclo del nitrógeno [Gonzales, S. 2022].
- Figura 11. Variación de las formas del nitrógeno según su pH [Metcalf, L. Eddy, H. 1991].
- Figura 12. Gráfica de N nitratos en el influente de varias plantas de la CDMX, [SACMEX 2019].
- Figura 13. Gráfica de N nitritos en el influente de varias plantas de la CDMX, [SACMEX 2018].
- Figura 14. Gráfica de N amoniacal en el influente de varias plantas de la CDMX, [SACMEX 2018].
- Figura 15. Reacciones básicas del ozono en agua [López, S. 2008].
- Figura 16. Efecto del pH sobre la cloración a punto de quiebre  $T=15$  a  $18.5^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{NH}_3=1\text{mg/L}$ ,  $[\text{Cl}_2/\text{NH}_3]=10$ . [MWH, 2003 editado]
- Figura 17. Demanda de cloro en agua [MWH, 2003]editado.
- Figura 18. Tamaño de partículas retenidas por filtración con membranas y ósmosis inversa.
- Figura 19. Columnas de desorción (a) empacada, (b) platos. [(a) Treybal, 1998, (b) Bernal, D. et.al. 2011]
- Figura 20. caudales de entradas y salidas en una torre de desorción empacada. [MWH, 2012] editado
- Figura 21. Diagrama McCabe-Thiele. [MWH, 2012] editado\*
- Figura 22. Diagrama McCabe-thiele desarrollado. [MWH, 2012] EDITADO.
- Figura 23. Gráfica de variación de nitrógeno amoniacal en el influente de la ETAP10. Elaboración propia con datos obtenidos de SACMEX, 2019.
- Figura 24. Gráfica de variación de nitritos en el influente de la ETAP10. Elaboración propia con datos obtenidos de SACMEX, 2019.
- Figura 25. Gráfica de variación de nitratos en el influente de la ETAP10. Elaboración propia con datos obtenidos de SACMEX, 2019.

- Figura 26. Gráfica de variación de DQO en el influente de la ETAP10. Elaboración propia con datos obtenidos de SACMEX, 2019.
- Figura 27. Diagrama de flujo de proceso de tren de tratamiento de cloración al punto de quiebre [Elaboración propia por medio de la plataforma Miro].
- Figura 28. Gráfica de caída de presión de toberas. [Fabricante]
- Figura 29. Diagrama de flujo de proceso de tren de tratamiento de Biofiltros [Elaboración propia por medio de la plataforma Miro].
- Figura 30. Diagrama de flujo de proceso de tren de tratamiento con ósmosis inversa [Elaboración propia por medio de la plataforma Miro].

## Abreviaturas

- IMTA: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
- SACMEX: Sistema de aguas de la Ciudad de México
- CDMX: Ciudad de México
- ETAP: Estación de tratamiento de agua potable
- PTAR: Planta de tratamiento de agua residual
- MO: Materia orgánica
- COT: Carbono orgánico total
- DQO: Demanda química de oxígeno
- DBO: Demanda bioquímica de oxígeno
- SST: Sólidos suspendidos totales
- SDT: Sólidos disueltos totales
- CPEUM: Constitución política de los estados unidos mexicanos
- SEMARNAT: secretaria de medio ambiente y recursos naturales
- DGAS: Dirección general de agua y saneamiento
- SINA: Sistema Nacional de Información del agua
- ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México
- OMS: Organización mundial de la salud
- WHO: World health organization
- FPCEA: Fondo para la comunicación y la educación ambiental
- ICA: Índice de calidad del agua
- MDP: Millones de pesos
- GCDMX: Gobierno de la Ciudad de México
- FAO: Food and agricultura organization
- MDAPA: Ministerio de agricultura, pesca y alimentación (gobierno de España)
- IMSS: Instituto Mexicano del Seguro Social

## Tema de investigación

Evaluación de la factibilidad técnica y económica de procesos de remoción de nitrógeno amoniacal y materia orgánica en fuentes de agua subterránea para suministro de agua potable en la Ciudad de México.

## Resumen

Todos los seres humanos tienen derecho al acceso al agua potable, no solo por ser un recurso esencial para la vida, sino porque también está relacionado directamente con la salud y el desarrollo. La escasez de agua potable, conlleva problemas como la hambruna, enfermedades, conflictos sociales e impacto en los ecosistemas. Estos problemas están estrechamente vinculados a crisis sociales e incluso hasta la pérdida de vidas.

La Ciudad de México ha enfrentado una persistente problemática en torno al agua durante siglos. Esta tesis recopila toda la información necesaria para comprender las raíces de la situación actual y, de esta manera abordar uno de los elementos clave para la solución de este problema. En este caso dicho elemento clave es la evaluación y comparación de diferentes tecnologías de remoción enfocadas en la eliminación de nuestros contaminantes de interés (materia orgánica y nitrógeno amoniacal) debido a que estos contaminantes han ido aumentando rápidamente en los últimos años y las concentraciones en los influentes de agua ya no se ajustan o están rebasando las capacidades de las estaciones de tratamiento de agua potable actuales.

Los trenes de tratamiento se diseñaron específicamente para cada tecnología central tomando en cuenta un promedio en las concentraciones más actuales de contaminantes de los influentes de las estaciones de tratamiento de agua potable (ETAPs) en la Ciudad de México y buscando que dicho diseño sea suficiente para remover los contaminantes al menos hasta los límites máximos permisibles que indica la norma correspondiente.

Es importante destacar que no pretende desechar toda la infraestructura actual, por lo que además de evaluar las tecnologías se compararan entre ellas, considerando una rehabilitación teniendo en cuenta las condiciones actuales de las estaciones de tratamiento de agua potable (ETAPs), así como el costo de no tener suficiente agua potable con la calidad requerida según la NOM-127-SSA1-2021. A partir de los resultados obtenidos se emitieron ventajas y desventajas en torno a la utilización de cada una de las tecnologías evaluadas y se concluyó que la opción de tratamiento más adecuada para rehabilitar o construir nuevas ETAPs son los filtros biológicos debido a sus claras ventajas frente a las condiciones.

## Abstract

Everyone has the right to access to clean water, not only because it is an essential resource for life, but also because it is directly related to health and development. The scarcity of clean water leads to issues such as famine, diseases, social conflicts, and impacts on ecosystems. These problems are closely linked to social crises and can even result in loss of lives.

The City of Mexico has faced a persistent water issue for centuries. This thesis compiles all the necessary information to understand the roots of the current situation and thus address a key element for solving this problem. In this case, the crucial element is the evaluation and comparison of different removal technologies focused on eliminating our target pollutants (organic matter and ammonia nitrogen). These pollutants have been rapidly increasing in recent years, and the concentrations in water influents no longer fit within or exceed the capacities of existing drinking water treatment plants.

Treatment trains were specifically designed for each core technology, taking into account an average of the most current concentrations of contaminants in the influents of drinking water treatment plants (ETAPs) in the City of Mexico. The goal was to ensure that the design is sufficient to remove pollutants at least up to the maximum permissible limits indicated by the relevant standards.

It is important to note that the intention is not to discard the entire current infrastructure. In addition to evaluating technologies, they will be compared, considering rehabilitation in light of the current conditions of ETAPs and the cost of not having enough quality drinking water according to NOM-127-SSA1-2021. Based on the results obtained, advantages and disadvantages were identified regarding the use of each evaluated technology, and it was concluded that the most suitable treatment option for rehabilitating or building new ETAPs is biological filters, due to their clear advantages under the given conditions

## CAPITULO I. ANTECEDENTES

### 1.1. El agua

El agua potable es un recurso indispensable para la vida, la salud y el desarrollo de una sociedad. Su característica principal es que su ingestión no causa efectos nocivos para la salud, no debe tener contaminantes de ningún tipo, ha de tener una proporción adecuada de gases y sales disueltas además de que sus características organolépticas deben ser incolora, inodora y con un sabor agradable (OMS/UNICEF, 2022), hay que tener en cuenta que además de que el tener acceso a agua potable nos permite vivir dignamente, complementa otros derechos humanos y representa un factor prioritario en los esquemas de desarrollo [CNDH, 2020], debido a esto su uso es demandante y usualmente escaso, sobre todo en las grandes ciudades como lo es la Ciudad de México.

Después de su ciclo de uso se concentran altas dosis de contaminantes en las descargas de aguas residuales domésticas, industriales, agrícolas, pecuarias, etc. Si a estas aguas no se les da tratamiento adecuado para su descarga provocan la contaminación de los cuerpos de agua receptores disminuyendo la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, poniendo en riesgo la salud de la población y la integridad de los ecosistemas, por lo tanto, es importante darle un tratamiento adecuado para que vuelva a ser potable y apta para su consumo [SEMARNAT, 2021], en México se establecen distintas normas respecto al uso, consumo y descarga del agua, las más importantes y que se mencionaran en la presente tesis son las siguientes:

- NOM-127-SSA1-2021, establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano.
- NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
- NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.
- NOM-179-SSA1-2020, establece el control de calidad del agua distribuida por los sistemas de abastecimiento de agua para uso y consumo humano.
- NOM-230-SSA1-2002, establece los requisitos sanitarios que deben cumplir los sistemas de abastecimientos públicos y privados durante el manejo de agua para conservar la calidad de agua para uso y consumo humano, así como los procedimientos sanitarios para muestreo.

Actualmente en México existen leyes en la CPEUM que establecen la garantía y el derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua potable de forma suficiente, salubre, aceptable y asequible para todas las personas (artículo 4º constitucional) así como la prestación de servicios públicos de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales otorgados en condiciones que aseguren su calidad establecida con lo señalado en las leyes (artículo 115 constitucional), todo ello otorgado por la nación, teniendo el estado mexicano el derecho a regular, en beneficio social, su aprovechamiento, protección y preservación a través de la SEMARNAT, aunque existen diferentes instancias que pueden realizar acciones para cumplir estos objetivos como CONAGUA,

Desde hace cientos de años las civilizaciones más avanzadas de la antigüedad florecieron gracias a este recurso, se dieron cuenta de la importancia que tenía el agua para el desarrollo de sus civilizaciones y de lo determinante que era ya que de no contar con él lo más seguro es que se limitara el desarrollo de la sociedad, cuando comenzaron a asentarse sabían que era importante hacerlo cerca de un río para abastecerse de agua ya que es vital para la supervivencia y con el tiempo poco a poco fueron sumándose necesidades como el abastecimiento en toda su ciudad para consumo, almacenamiento, filtrado e incluso el saneamiento y limpieza de agua residual, además de servir como vías de comunicación para desarrollar el comercio [Mora, C. 2014]

Aunque pareciera que los sistemas hidráulicos son nuevos no es así, las culturas antiguas de Mesopotamia, China, India y Egipto ya almacenaban agua en depósitos y destinaban el agua para todas las necesidades básicas de las personas que habitaban los territorios, bajo las necesidades de llevarla a grandes distancias se comenzaron a desarrollar los sistemas de transporte y distribución del agua, para la agricultura tenían canales de riego y además debido a la importancia de estos ríos muchas culturas los consideraban sagrados y/o desarrollaban historias y deidades en torno a este recurso, estas prácticas y el desarrollo se recorrieron en todo el mundo, además la economía se basaba en la agricultura, ganadería y/o pesca [Claus, E. 2021]. Aunque pudiera parecer que un río garantizaba el crecimiento máximo de una civilización, lo cierto es que dependía mucho de las condiciones de este, el ambiente y geografía de los alrededores, por ejemplo; en el caso de Mesopotamia que contaba con dos ríos a los lados, relativamente cerca para aprovecharlos en ambos extremos pero el río Éufrates se prefería para navegar debido al cauce ancho y poco profundo, además al final del recorrido hacia el golfo Pérsico se unía con el río Tigris por lo que la salida era la misma, la única desventaja es que se recorría mayor longitud pero ante los beneficios era conveniente usarlo, como ventaja de ambos ríos estos contienen sedimentos como los limos, estos funcionaban como fertilizante y nuevamente el Éufrates era preferido, ya que debido a su velocidad más baja que el Tigris daba paso a una mayor sedimentación y elevación de los cauces, respecto a la temperatura superaba los 50°C y las lluvias eran escasas, lo que resultaba muy difícil pero la agricultura se desarrolló debido a que después de las épocas de riada o

crecida del río (cuando el caudal de un río aumenta) el suelo estaba listo para cultivar [Lavola, 2014].

Desafortunadamente las guerras tienen muchas consecuencias, no solo con la muerte en combate de personas sino también la pérdida de recursos, bienes materiales, construcciones únicas y, sobre todo, en épocas antiguas la pérdida de conocimiento, por ejemplo; se cree que la caída del imperio Romano hizo decrecer la importancia que se le daba a la higiene y se perdió información en Europa de cómo se diseñaban construcciones hidráulicas. Fue durante la edad media cuando las consecuencias se hicieron alarmantes ya que los residuos de todo tipo incluyendo el excremento se vertían directamente en las mismas aguas que después se utilizaban para beber, esto trajo consigo enfermedades y una gran pandemia con la peste negra, incluso era después tanto el miedo de la gente a beber agua que preferían sobre ella el vino, éste aunque en el momento no lo sabían gracias a la fermentación por la que pasaba en su proceso de producción ayudaba a quitar contaminantes y con ello a que las personas no enfermaran. [Canseco, A. 2019]. Incluso en la actualidad se estima que un millón de personas fallecen cada año en el mundo debido a la contaminación del agua [OMS, 2023]

En el continente americano, el agua históricamente ha ocupado un lugar central no solamente como un recurso vital para cubrir necesidades básicas como con la agricultura, uso y consumo humano, transporte o generación de energía mecánica, sino también ocupaba el lugar central de su religión con figuras como Tlaloc en Mesoamérica y Chak específicamente en el área maya, esto nos dice mucho del lugar de importancia que tenía el agua en nuestras culturas, esto se puede comprobar con los grandes números de ritos y creencias hechas en las que este recurso tenía una función primordial, además de que se relacionaba con la adivinación, la salud y la enfermedad, esto último daba lugar a que los hábitos de limpieza y el cómo se percibe esta acción fueran diferentes a otros lugares del mundo y eso sabemos con la poca información que tenemos, ya que hasta el día de hoy no se han hecho muchas investigaciones al respecto pero se sabe que el agua era por mucho el mayor de los recursos venerados [Campos, T. 2006]. Las culturas antiguas de México también tenían grandes avances hidráulicos, los mayas al sur de México y norte de Guatemala, por ejemplo, contaban con canales, tanques de almacenamiento, recogida de agua de lluvia y embalses para proporcionar agua de una fuente confiable y sostenible de agua durante sequías estacionales y cíclicas. Si bien se han documentado sistemas de filtración de arena, grava, plantas y telas en Egipto, Grecia y el sur de Asia en el siglo XIX a.C. no se pueden comparar con los sistemas de purificación de los mayas, inexistentes en cualquier otra parte del mundo en esta época ya que la universidad de Cincinnati realizó una investigación con antropólogos, biólogos y geógrafos donde descubrieron cómo funcionaba su sistema y mediante un análisis de refracción de rayos X (DRX) en la zona descubrieron que para potabilizar el agua utilizaban filtros hechos con una mezcla en proporciones similares de zeolita, calcita, esmética y cuarzo en distintos lugares de la ciudad de Tikal, estos materiales trabajaban juntos, pero es la zeolita la que tiene propiedades adsorbentes y de intercambio iónico pudiendo filtrar algunos



microorganismo dañinos, compuestos nitrogenados y toxinas orgánicas e inorgánicas, solubles e insolubles dispersas en el agua, este sistema es alrededor de 2155 años más antiguo que el primer uso de zeolita en los sistemas europeos de potabilización de agua [Barnett, K. et. al. 2020].

Se cree que era tan importante la filtración de esta manera para los mayas debido a que el agua de Tikal era propensa a una gran cantidad de contaminantes como bacterias, mercurio y fosfato los cuales no eran común encontrar en esa época en casi ningún cuerpo de agua y se cree que los depósitos artificiales fueron contaminados por los mismos mayas debido a que el cinabrio, mineral tóxico que contiene sulfuro de mercurio y azufre se encontraba en polvo que utilizaban para decorar construcciones arquitectónicas, tumbas y en rituales debido a su color, un tono rojo muy característico del lugar. Otra fuente potencial de este contaminante está en las erupciones volcánicas, pero de haber sido esta la única fuente, el mercurio habría tenido una distribución más aleatoria. Sin embargo, aunque el mercurio era el contaminante de mayor riesgo biológico no era el único importante, Lentz, D. y su equipo encontraron alta concentración de fosfato y cianobacterias, las cuales se cree que provenían de desperdicios de comida y materia fecal que tiraban cerca del palacio y solo necesitaron de corrientes de agua provocadas por las lluvias para contaminar toda la ciudad [Lentz, D. et. al. 2020].

Al norte de América las culturas antiguas obtenían agua limpia de manantiales filtrados naturalmente, además la hervían en cerámica y barro para eliminar contaminantes y como se vio anteriormente en Mesoamérica predominaba la construcción y el uso de acueductos, los Incas también tenían sistemas de filtración, aunque no tan sofisticados como los mayas, pero ellos no tenían problemas de contaminación tan graves, por otro lado el sistema hidráulico de sus ciudades es reconocido por el uso de piedra a través de un alto grado de corte y pulimento que lograba esta cultura en su arquitectura como en canales, cuencas y drenaje para manejo y transporte de agua, sistemas que siguen funcionando incluso hoy en día, un ejemplo muy famoso es Machu Picchu o el Shincal. [Giovannetti, M. Raffino, R. 2011].

Es importante mencionar los problemas para evidenciar las consecuencias tan catastróficas que deja el no contar con agua potable, además de lo importante que es para la vida y el desarrollo de una sociedad en distintos aspectos. Se estima que en el mundo al menos dos mil millones de personas se abastecen de una fuente de agua contaminada, además la WHO en 2019 estimó que para el año 2025 la mitad de la población mundial vivirá en zonas con condiciones de escasez de agua [WHO, 2019]. El primer suministro de agua potable a una ciudad completa fue construido en 1804 en Escocia y fue este un ejemplo para comenzar a desarrollar nuevas plantas y tecnologías para subsanar las consecuencias de los contaminantes que nosotros mismos estamos agravando y no correr riesgos ni el resto de los seres vivos del planeta. [Buitrón, G. 2015]

En el caso de México se tienen los primeros registros formales de plantas de tratamiento de agua desde 1993 por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), aunque, por su puesto se comenzó desde antes la atención a este problema y es la Secretaría de agua de la Ciudad de México (SACMEX), órgano desconcentrado quien se encarga desde el 1 de enero del 2003 de “proporcionar de manera eficiente los servicios de agua potable en cantidad y calidad, drenaje, tratamiento y reúso, de acuerdo con la normatividad vigente y bajo un enfoque de desarrollo y sustentabilidad hídrica”.

El sistema de agua potable en la Ciudad de México tiene una infraestructura de 13,488km de tubería, 360 tanques de almacenamiento, 268 plantas de bombeo, 976 pozos de extracción y 53 plantas potabilizadoras.

Respecto al plan de desarrollo urbano de la ciudad el gobierno de la Ciudad de México a través de la secretaria de desarrollo urbano y vivienda publicó el “Programa general de desarrollo urbano” en 2016, a principios del último sexenio donde se mencionan las políticas y estrategias que se llevarán a cabo a corto, mediano y largo plazo respecto al desarrollo de la ciudad, hay que mencionar que, en dicho plan se hace hincapié en la protección ambiental, las propuestas que se mencionan son respecto a la basura, servicios públicos, seguridad, programas educativos, espacios deportivos y recreacionales, infraestructura pública, cultura cívica, animales callejeros y por supuesto la mejora en el sistema de aguas, además el congreso de la ciudad de México a través de un dictamen en agosto del 2023 exhortó al actual coordinador general de SACMEX, Rafael Bernardo Carmona para “llevar a cabo medidas que garanticen distribución de agua suficiente y con higiene para beneficio de habitantes de la capital del país”.

## 1.2. Historia y distribución del agua en la Ciudad de México

La Ciudad de México es la capital del país, es una ciudad con 1,485km<sup>2</sup>, un clima mayoritariamente templado subhúmedo la mayor parte del año, aunque el resto puede ser seco, semiseco y templado húmedo, tiene una altitud mínima de 2,223m y máxima de 3,510m [INEGI, 2020], está ubicada en una cuenca cerrada (endorreica) Figura 1, lo cual hace que carezca de salidas naturales, esto ha hecho que desde la construcción de la primera ciudad los retos respecto al agua incluyeran siempre drenaje del agua pluvial, inundaciones y el hundimiento de la ciudad a medida que se explotan los acuíferos, además con el tiempo se acrecentarían los problemas de abastecimiento y distribución de agua [CONAGUA, 2020]. Hay que tomar en cuenta que, aunque se trata de una cuenca sin salidas, la zona geográfica es comúnmente llamada Valle de México, se cree que esto es debido a un error en el uso literario y aunque de manera artificial hoy en día tiene salidas debido a la construcción del túnel de Tequixquiac, el tajo de Nochistongo, el canal del desagüe y el emisor profundo los cuales se han aprovechado para distribución en el Estado de México e Hidalgo [Llerena, A. 1989].

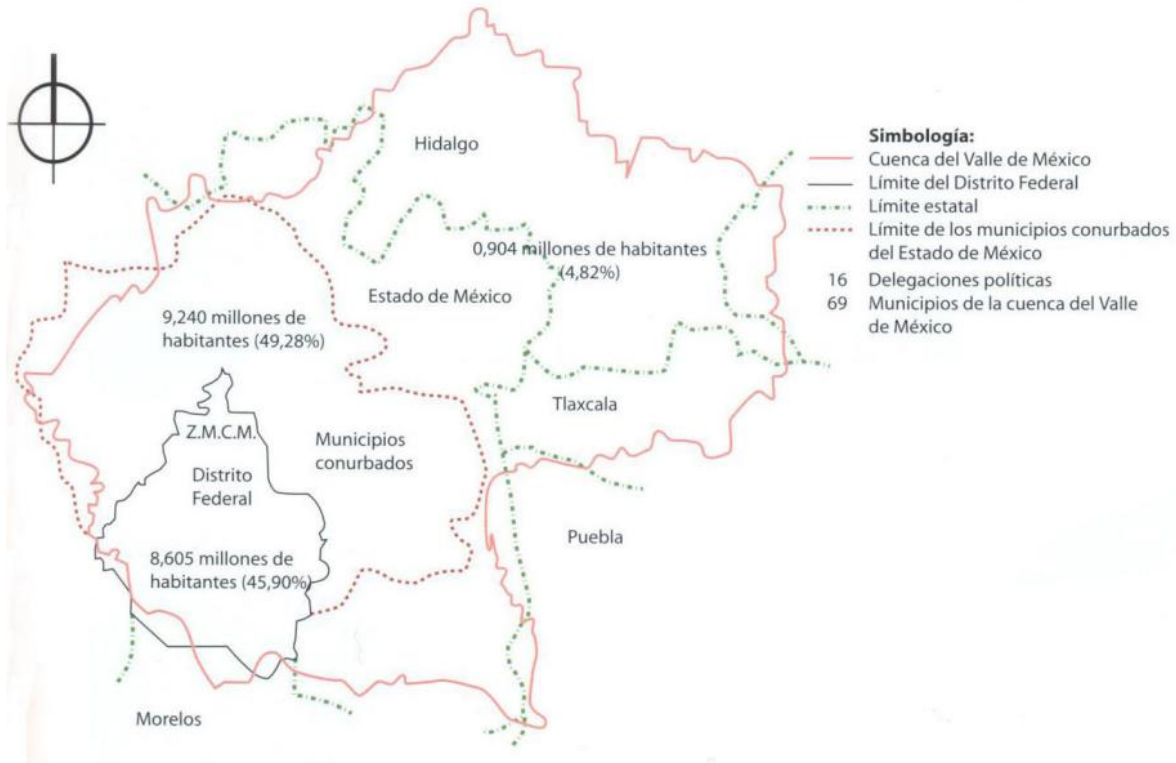


Figura 1. Mapa de la Ciudad de México y Zona Metropolitana del Valle de México. (CONAGUA, 2005) EDITADO

Aunque la administración del agua en esta zona ha pasado por muchas modificaciones, la primera civilización en la actual CDMX fue fundada por el imperio azteca, cuyo lugar fue la capital de su imperio llamada Tenochtitlan, esta era una ciudad en el llamado Valle de Anáhuac rodeada por seis lagos que en épocas de lluvia formaban el lago de Texcoco cuyo cuerpo de agua fue de gran importancia para el abastecimiento de agua incluso hasta nuestros días, a sus alrededores tenían además los lagos de Zumpango, Xeltocán, Xochimilco, México y Chalco (Figura 2) [Korenfeld, D. Naime, A. 2007]. Los aztecas durante muchos años lograron manejar de manera muy exitosa y eficiente estos recursos con sus innovaciones de canales, diques, chinampas, presas, acequias, acueductos, presas, alcantarillados, albarradones y terrazas, creando sistemas funcionales para abastecer su ciudad, el principal problema que se presentó en el lugar en esa época fueron las inundaciones y por consecuencia hambruna por las cuales se hicieron grandes esfuerzos por retenerlas teniendo éxito con la construcción del albarradón de Nezahualcoyotl y el acueducto de Ahuizotl [Becerril, J. Jiménez, B. 2007].



Luis Covarrubias, "La Isla de México en el S. XVI"

Figura 2. Distribución de los recursos hídricos de la Ciudad de México. (L. Cobarrubias, 2019) EDITADO

En la llegada de los españoles estos utilizaron como estrategia los lagos del valle destruyendo los acueductos y el albarradón de Nezahualcoyotl para sus barcos de batalla, con la caída de Tenochtitlan tiempo después en manos de los españoles se dieron cuenta de la importancia que tenían las construcciones hidráulicas que habían destruido para evitar inundaciones y tener disponibilidad de agua todo el tiempo, además la población aumentó, por lo que la demanda de agua también y se ordenó la construcción de un acueducto desde Chapultepec a la capital de la Nueva España, además los canales de agua se convirtieron en drenaje y los lagos en depósitos de basura, lo cual los llevaría a enfrentarse a mayores problemas respecto a las inundaciones e hicieron esfuerzos por restaurar la arquitectura destruida, aunque esto no frenaría la problemática de las inundaciones ya que jamás se pudo reconstruir de la misma manera o alguna que diera fin a los problemas [Pena, P, Levy, E. 1989].

Como se mencionó anteriormente los lagos de alguna manera sirvieron como estrategia a los españoles durante la conquista y de hecho esta no fue la única vez que se utilizó para fines políticos pues durante la intervención estadounidense se tomó la decisión de inundar el oriente de la Ciudad como medida defensiva, sin embargo, esto empeoró la situación, por otro lado, a nivel constitucional se decretó la garantía de los derechos de propiedad del agua en 1857 [SACMEX, 2020].

Durante el Imperio de Maximiliano de Habsburgo se inició la construcción del gran canal de desagüe con una longitud de 27km y 100m de profundidad desde el lago de Texcoco y se conoce como el primer túnel de Tequixciaq el cual concluyó su construcción en 1895 y fue inaugurado por Porfirio Díaz en 1900, esta gran diferencia de años debido a la guerra de reforma [Torres, L. 2017].

En la época porfiriana se decide aprovechar el agua del desierto de los leones para abastecer la capital, además de reiniciar las obras de desagüe con canales, presas, puentes, viaductos y el túnel de Tequixquiatic de 10km para complementar la infraestructura teniendo mucho éxito para el abastecimiento y contra las inundaciones [CONAGUA, 2009].

En 1925 se registró la primera evidencia de hundimiento en la Ciudad de México debido a que los colectores de agua estaban 50cm debajo de su elevación concluyendo que es resultado de las extracciones de agua mediante pozos, aún con esto no cesaron las inundaciones, se construyó la presa de Tecamachalco y tiempo después un nuevo túnel de Tequixquiatic, además de la creación y modificaciones de leyes para enlistar los bienes de aguas nacionales, quién estará a cargo del servicio de aguas y la creación de la DGAS, predecesora de SACMEX [SINA, 2019].

Durante el periodo contemporáneo se siguieron secando canales y rellenándolos para evitar inundaciones, en 1950 se llevó a cabo el entubamiento del río Churubusco además de construir varios cárcamos y estaciones de bombeo además se inauguró el sistema Lerma convirtiéndose en el primer abastecimiento al entonces Distrito Federal (hoy CDMX) desde una cuenca circunvecina, para 1952 iniciaron las obras para la construcción del Viaducto Miguel Alemán y se inaugura el río de la piedad entubado que sería donde actualmente se descargan aguas negras de la Ciudad y en 1956 se construyó la primera planta de tratamiento de aguas residuales en Chapultepec siendo predecesora de muchas otras que en los últimos registros de CONAGUA sabemos que para 2020 en la Ciudad de México existen 30 en operación [SACMEX, 2012]. En 1974 se comenzaron a explotar los acuíferos del Valle de México y Toluca y para 1982 iniciaron las operaciones de uno de los proyectos hídricos más grandes del mundo, el sistema Cutzamala [Soto, N. 2019] seleccionando principalmente la cuenca de Cutzamala debido a que presentaba las mejores condiciones en cuanto a calidad del líquido y caudales excedentes, manteniendo reservas de 3,000L/s para generación eléctrica, en la actualidad este sistema conduce aproximadamente 19,000L/s a una altura de 1,100m y hace un recorrido de 130km/s [CONAGUA, 2005].

En 1992 entró en vigor la Ley de aguas nacionales la cual contempla la distribución, control y preservación de la cantidad y calidad del agua, se comenzaron a instalar medidores y el registro de usuarios intentando volver eficientes los pagos, en 1997, con la finalidad de administrar y preservar las aguas nacionales, a partir de 1997 el país se ha dividido en 13 Regiones Hidrológico-Administrativas. Las Regiones Hidrológico-Administrativas están

formadas por agrupaciones de cuencas, consideradas las unidades básicas de gestión de los recursos hídricos, pero sus límites respetan los municipales, para facilitar la integración de la información socioeconómica, la Ciudad de México entra en la región XIII. Aguas del Valle de México [Torres, L. 2017] y fue en 2003 cuando entra en funcionamiento el sistema de aguas de la Ciudad de México (SACMEX) cuyo sistema se encarga de los servicios hidráulicos en la capital del país, además de que se dividió en sectores la red de agua buscando facilitar la administración de estos [SACMEX, 2020].

Respecto a los proyectos, retos y leyes generadas o cumplidas la Ciudad de México en 2011 a través de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos estableció en el artículo 4° el derecho al acceso, disposición y saneamiento del agua para consumo personal y doméstico para todas las personas, teniendo ahora de manera legal un nuevo reto que cumplir y con ello considerar que las personas que no tengan acceso a este bien y en la manera en que la ley lo dice se estaría incumpliendo un derecho, en 2015 SACMEX invirtió en la construcción de 15 plantas potabilizadoras en distintas delegaciones de la ciudad, además se ha llevado a cabo el saneamiento del canal nacional con el objetivo de recuperar ese espacio, además de preservar el lugar con valor histórico y para beneficio de la sociedad con la construcción de parques, áreas de deporte y evitar que sea un lugar que emita contaminación, también se ha intentado rehabilitar la red de drenaje en distintos sectores y se inauguró el túnel emisor oriente cuyo objetivo es incrementar la capacidad de desagüe en la ZMVM para evitar inundaciones [SACMEX, 2021].

El último boletín que contiene información de la inversión del gobierno capitalino informó que se destinaron 4 mil 700 MDP y SACMEX mencionó que dicho recurso se ha dirigido a la rehabilitación de pozos de agua, obras, mantenimiento, equipamiento y tecnología para buscar el mantenimiento del suministro de agua en toda la ciudad [GCDMX, 2023].

Los últimos datos acerca de los caudales de agua manejados en la ciudad nos indican que en 2019 el agua suministrada en promedio fue de  $32.02\text{m}^3/\text{s}$  y uno de los nuevos y principales problemas que aquejan a la ciudad es la sobreexplotación del acuífero donde salen  $17.79\text{m}^3/\text{s}$ , por lo que la disminución de los niveles del acuífero es de 1 metro por año lo que a su vez provoca hundimientos del subsuelo de hasta 30cm por año, hay que tomar en cuenta que un factor que ha afectado fuertemente a la absorción de agua en el suelo es el cambio de pisos de tierra a asfalto y cemento, ya que el primero permitía la percolación del agua de lluvia y almacenamiento mientras que los segundos segundo no [SACMEX, 2021]. En cuanto al clima, en toda la zona del Valle de México se clasifica como subtropical de altura, templado, semiseco y sin estación de invierno definida, su temperatura promedio es de  $16^\circ\text{C}$  y las lluvias ocurren entre los meses de mayo a octubre (precipitación media anual de 700mm), el resto del año se clasifica como sequía ya que se tienen lluvias aisladas [Llerena, A. 1989].



Durante todo este desarrollo histórico podemos dar cuenta de que el drenaje ha sido pieza clave desde el albarradón de Nezahualcóyotl y cómo ha ido evolucionando ya que es el medio para distribuir el agua potable hacia los puntos necesarios para la población, evita la inundación de la ciudad y además la herramienta que nos permite llevar el agua residual hacia donde más convenga por lo que las líneas de drenaje deben planearse y mantenerse para evitar fugas.

Respecto a las aguas residuales es importante captarlas y tratarlas, se tienen distintos procesos para ello y son diferentes a los que se hacen en las estaciones de tratamiento de agua potable debido a la carga tan alta de contaminantes, pero su tratamiento es forzoso ya que en la ley existen normas que indican las concentraciones máximas permisibles para descargar agua, en México esta ley es la NOM-001-SEMARNAT-2021 ya antes mencionada, debido a que esta agua al salir de la planta no cuenta con los parámetros necesarios en los contaminantes para ser potable, esta agua se usa para riego, reúso o se descarga al medio ambiente pero existen lugares donde se trata el agua residual hasta hacerla potable, esto sucede por la necesidad de agua dulce al haber una falta grande de este recurso, se tiene registro de que actualmente sucede en algunas comunidades de Estados Unidos como Los Ángeles y ciudades texanas, incluso a este proceso se le conoce como “direct potable reuse” (reutilización potable directa), también en la megalópolis de Bangalore en la India y otras comunidades, Australia, Singapur, Alemania y, por supuesto África, de hecho Namibia es pionero y está a la vanguardia en este tratamiento, pues lo hace desde 1968, para dar cuenta de lo avanzada y bien construida de su tecnología basta con decir que actualmente el 30% de las aguas residuales se recicla y potabiliza en menos de diez horas. Pese a las dificultades en aumento de obtener agua dulce cada vez son más las ciudades que recurren a estos procesos o que comienzan a planear el cambio en sus plantas residuales para llegar hasta la potabilización [Mendret, J. 2023].

### 1.3. Usos del agua en la Ciudad de México

Sabemos que el agua es indispensable para la vida y todas las actividades humanas, ya sea subsistir o producir e intercambiar bienes y servicios, la Ciudad de México es una metrópolis que se distribuye en distintas demarcaciones territoriales conocidas como alcaldías (Figura 3), al ser una ciudad tan grande las actividades son muy diversas y dificulta el control del uso y manejo de agua y desechos, para analizar las problemáticas de este recurso es indispensable conocer los usos que se le dan en la ciudad, esto nos da información de que tan contaminada puede estar, qué nivel de tratamiento hay que darle y en qué porcentaje.



Figura 3. Demarcaciones territoriales de la CDMX. (INEGI, 2012)

Existen diferentes clasificaciones del uso de agua, en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), están registrados los volúmenes concesionados (o asignados, en el caso de volúmenes destinados al uso público urbano o doméstico) a los usuarios de aguas nacionales. En este registro están clasificados los usos del agua en 12 rubros, CONAGUA hace una clasificación en dos grupos subdivididos en cinco grupos; en el primero corresponden los usos consuntivos, es decir cuando el agua no se devuelve al medio ambiente una vez usada, como es el caso del uso agrícola, abastecimiento público, la industria autoabastecida y las termoeléctricas, y los no consuntivos donde el agua usada es regresada al medio donde ha sido extraída como es el caso de plantas hidroeléctricas y desde el 2014 el de conservación ecológica, con un volumen concesionado de 9.46 hm<sup>3</sup>/año [CONAGUA, 2015].

Uso consuntivo: El 63% del agua utilizada en el país para uso consuntivo proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos), mientras que el 37% restante proviene de fuentes subterráneas (acuíferos), el agua concesionada superficial creció 14%, en tanto que la subterránea se incrementó en 19%.

El mayor volumen concesionado para usos consuntivos del agua es el que corresponde a actividades agrícolas. Por su parte en la Ciudad de México la mayor parte de extracción de agua la destina principalmente para abastecimiento público, y en una menor cantidad en la



industria. En lo que respecta al uso para abastecimiento público abarca la totalidad del agua entregada a través de las redes de agua potable, las cuales abastecen a los usuarios domésticos (domicilios), así como a las diversas industrias y servicios conectados a dichas redes [CONAGUA, 2019].

Para el abastecimiento público, que agrupa al uso público urbano y al doméstico, el tipo de fuente predominante es la subterránea con el 62% del volumen. Una de las demandas básicas de la población es disponer de agua en cantidad y calidad suficiente para el consumo humano, pues incide directamente en su calidad de vida y bienestar en general. Los principales subsectores que integran a la industria son la extracción del gas y petróleo, industria química y la industria alimentaria [Torres, L. 2017].

Uso no consuntivo: En este uso, se considera la actividad de hidroeléctricas, a nivel nacional, las Regiones Hidrológico-Administrativas XI Frontera Sur y IV Balsas, son las que tienen la concesión de agua más importante en este uso, ya que en esas regiones se encuentran los ríos más caudalosos y las centrales hidroeléctricas más grandes del país. En lo que se refiere a las centrales hidroeléctricas, que representan un uso no consuntivo del recurso, se utilizaron en el país 133,018 millones de metros cúbicos de agua (es decir, 133 km<sup>3</sup>) en el 2014. Debe aclararse que para este uso la misma agua se reutiliza y se contabiliza varias veces en las centrales del país [CONAGUA, 2015].

En el registro público de SACMEX no se cuenta con información acerca del consumo doméstico de hogares por sectores solo se menciona que se consumen 150L/hab/día en promedio en las 16 delegaciones [SACMEX, 2021], tampoco se cuenta con información efectiva de los usos del agua, aunque el último registro que se encontró fue de una investigación de febrero de 2017 donde menciona que los principales usos del agua en la ciudad pertenecen en su mayoría al uso doméstico (67%), seguido por el comercio (16%) y la industria (17%), cuando hablamos del uso doméstico este está dividido en; uso de váter (40%), regadera (30%), ropa (15%), trastes (6%), cocina (5%) y otros (4%) (Torres, L. 2017).

Respecto a las fuentes de abastecimiento de agua potable en la ciudad se sabe que el agua utilizada proviene de dos fuentes; 64.4% de fuentes subterráneas (pozos, manantiales y la batería de pozos del sistema Lerma) y 35.6% de superficiales, distribuyéndose entre el sistema Cutzamala y el Río Magdalena (Figura 4) [SACMEX, 2020] como se puede ver estas fuentes se distribuyen también en propias de la Ciudad de México y algunas otras que se transfieren de los alrededores, como se puede ver en la Tabla 1.

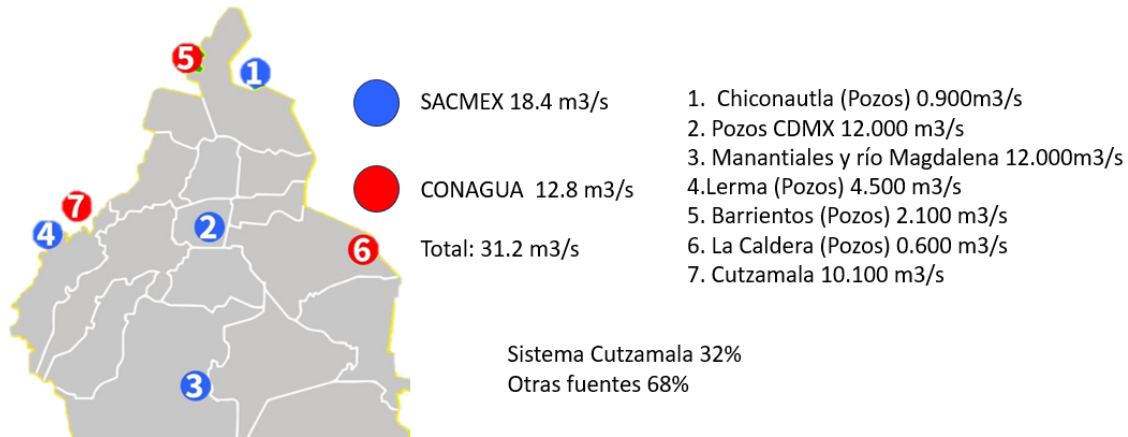


Figura 4. Fuentes de abastecimiento de agua de la CDMX (SACMEX, 2020). EDITADO

Es necesario tomar en cuenta que, del volumen total de agua concesionada, el 97% se destina al uso público urbano, además, según datos del Censo de Población y Vivienda de 2020, la ciudad tiene una cobertura de abastecimiento en hogares del 94%, y aunque pueda verse como una cifra muy favorable, sobre todo si la comparamos con cifras de otros estados de la república mexicana es importante saber que esta cobertura es menor a la registrada en 2015 la cual era de 98% [Massiel, C. et. al. 2022].

Tabla 1. Fuentes de agua de la Ciudad de México [Massiel, C. et. al. 2022].

	Fuentes de suministro de agua	Contribución (hm <sup>3</sup> /año)	% Volumen suministrado
Fuentes propias	Pozos CDMX	378.43	38.5
	Aguas termales y Río Magdalena	31.54	3.2
Transferencia de acuíferos del Valle de México	Pozos Chiconautla (Acuífero Cuautitlán-Pachuca)	28.38	2.9
	Pozos Barrientos (Acuífero Cuautitlán-Pachuca)	66.23	6.7
	Pozos La Caldera	18.92	1.9
Transferencia de cuencas y acuíferos del Estado de México	Sistema Cutzamala	318.51	32.4
	Sistema de pozos Lerma (Acuífero Ixtlahuaca y del Valle de Toluca)	141.91	14.4
Total		983.92	100

#### 1.4. Fuentes convencionales de agua

En el agua se originó la vida y de ella sigue dependiendo, el 71% de la superficie del planeta está cubierta por ella y además millones de toneladas en forma de vapor se encuentran en la atmósfera, aun así esto no es suficiente para que en todas las regiones cuenten con agua

potable, pues el agua se distribuye entre océanos y mares, corteza terrestre, glaciares y nieves perpetuas, humedad del suelo, vapor atmosférico y distintos cuerpos de agua superficiales y subterráneos como lagos, ríos, manantiales, arroyos, cascadas, acuíferos, etc. [Torres, L. 2017]. Todos estos cuerpos de agua están conectados y en continua transformación por el ciclo hidrogueoquímico del agua en el cual ocurren muchos fenómenos físicos además de que es aprovechada por la naturaleza desde plantas, microorganismos, animales, hasta los humanos para vivir, este ciclo es especial y contempla la participación del agua en tres fases; líquida, vapor y sólida en el ambiente, (Figura 5) haciendo un análisis de este proceso una parte del agua que alcanza el suelo queda retenida en las irregularidades del terreno, a esto se le conoce como almacenamiento superficial, otra parte va a la escorrentía superficial que es cuando fluye y se suma a fuentes superficiales como ríos y arroyos terminando en lagos o en el mar, una última parte se infiltra en el terreno y toda el agua que ha quedado expuesta es susceptible a pasar al estado de vapor por acción de la temperatura y pasar a formar parte de las nubes donde nuevamente caen a la tierra en forma de lluvia, estos procesos tienen lugar gracias a la energía del sol para realizar la evotranspiración y a la gravedad que hace que el agua caiga después de precipitarse en las nubes [Blancas, C. Hervás, E. 2001].

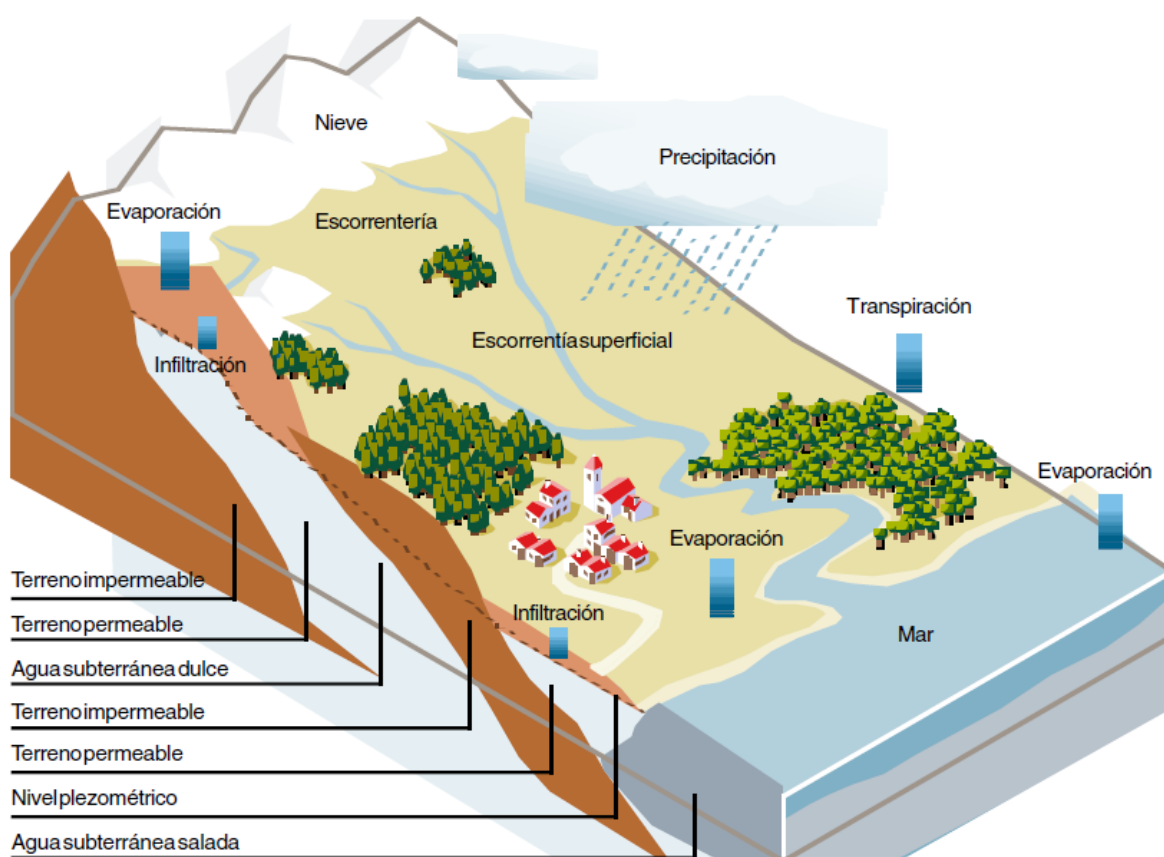


Figura 5. Ciclo hidrogueoquímico del agua [ITGE, 1991].

La cantidad de agua que participa en el ciclo hidrogeoquímico permanece constante, aunque localmente puede cambiar mucho, el factor que predomina en él es el clima y este varía dependiendo el lugar y el tiempo, por otro lado también intervienen la vegetación, fenómenos geológicos y por supuesto la actividad humana con el crecimiento de las ciudades, la contaminación, cambio climático, sobreexplotación de fuentes de agua y hasta las construcciones que intervienen en los caudales naturales del agua tales como las presas. [Torres, L. 2017]. Del total de agua en la tierra solamente el 3% es dulce, es decir aquella que no es tan salobre y apta para consumo humano, esta se divide en agua de polos y zonas heladas de la tierra (80%), agua subterránea (19%), agua en forma de vapor en la atmósfera (0.7%) y en ríos y lagos (0.3%). (Informe de las naciones unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo, 2003). Es verdad que el agua salada puede atravesar tratamientos para eliminar las cantidades tan elevadas de sal, pero eso significaría un gasto de recursos muy importante, lo cual no es común que se haga a menos que no haya otras alternativas.

El agua que es tratada para abastecer a las ciudades se conoce como fuentes convencionales y se prefieren ante las no convencionales (agua de mar y meteóricas las cuales vienen de la atmósfera) debido a la diferencia de complejidad en cuanto al proceso y el costo [Jiménez, J. 2013]. Las fuentes convencionales son las subterráneas y las superficiales, estas tienen diferentes características debido al lugar donde se encuentran y el medio que los rodea, tal como se muestra en la Tabla 2 [Degrémont, Rueil-Malmaison, 2007].

Tabla 2. Fuentes convencionales de agua [Degrémont, Rueil-Malmaison, 2007].

Característica	Agua subterránea	Agua superficial
Descripción	Precipita y percola al suelo por gravedad hasta alcanzar un estrato impermeable y construir un acuífero	Cuerpo de agua abierto a la atmósfera susceptible a fluir o permanecer en reposo (ríos, lagos, lagunas y embalses)
Velocidad (m/s)	$10^{-10}$ a $10^{-3}$	0.1 a 1
Caudal de llenado/rellenado	Patrón de flujo muy bajo y estable	Precipitación directa
Temperatura	Temperatura depende de la profundidad y época del año.	Temperatura entre 20 – 22°C
Turbiedad	Baja o nula	Variable, a veces elevada
Descarga	Acuíferos	Descargas en mantos freáticos y dependen de la precipitación.
Oxígeno disuelto	Normalmente ausencia total	Normalmente saturado
Mineralización	Variable, depende del suelo.	Constante y habitualmente elevada en comparación con el terreno circundante.

Amonio	Presente solo en aguas contaminadas	Presente y parte del lugar sin representar un peligro de contaminación a menos que la concentración sea alta
Nitratos	Poco abundantes.	
Microorganismos	Depende de la concentración de nutrientes, aunque por la baja cantidad de estos suelen ser bajos.	Bacterias, virus y plancton
Sílice	Concentración elevada	Concentración moderada
Ácido sulfhídrico	Comúnmente presente	Ausente
Dióxido de carbono	Presente en gran cantidad	Ausente
Hierro y manganeso disueltos	Presentes	Presentes solo en fondo de cuerpos de agua eutrofizada.

Aunque naturalmente se ha optado por abastecerse de fuentes de agua superficiales debido a su fácil accesibilidad la escasez de este recurso por esa fuente desde mediados de los 90's hizo que se buscaran alternativas y se comenzaron a explotar las subterráneas, además tienen como ventaja una menor concentración y variedad de contaminantes ya que debido a sus características hidrogeológicas el agua fluye a través de "filtros naturales" por el suelo y las rocas. Es importante mencionar que este proceso también proporciona una característica muy importante que es la alta concentración de minerales a causa de la erosión que genera el paso del agua y por ser un disolvente excelente este líquido los retiene [Cerón, L. et. al., 2021], se estima que por estas condiciones puede tener cantidades disueltas alrededor de 0,2-0,4mg/L de cada ión, además de que suelen tener una naturaleza ácida debido a las altas concentraciones de CO<sub>2</sub> que adquieren en los poros del suelo y las rocas [Lina, M. et. al., 2021].

Como podemos ver las características anteriormente mencionadas dotan de una ventaja considerable al agua subterránea aunque los factores determinantes en la calidad del agua por esta fuente tienen distintos orígenes y formas de propagación, durante años se han investigado y se reconocen; la precipitación, el clima, la topografía, la interacción agua-roca-suelo, es decir los componentes que contengan las rocas se van a ir añadiendo al agua durante la erosión, principalmente minerales como calizas y dolomitas, propiedades intrínsecas como la presión y la temperatura en los poros, el tiempo de reacción, la calidad del agua meteórica, cuerpos de agua aledaños, reacciones químicas durante el recorrido del agua, donde predominan condiciones reductoras anóxicas y la presencia de bacterias sulfato reductoras y por supuesto, fenómenos antropogénicos [Lina, M. et. al., 2021], esto es importante al momento de dar cuenta cómo y por qué ha ido aumentando la contaminación en esta fuente, aunque debido a la alta demanda de agua potable desde antes de tanta contaminación se extrae

también agua superficial, por su puesto sin dejar atrás el hecho de que en los últimos años los contaminantes en ambas fuentes de extracción han incrementado, por lo que es importante considerar que se deben hacer estudios físicos, químicos y biológicos previos de la fuente de agua que elijamos para exponerla a una serie de tratamientos que la hagan apta para uso y consumo humano con los parámetros cumplidos [Torres, et. al., 2009], tal como indica la NOM-230-SSA1-2002 ya que tiene cambios importantes el proceso dependiendo de la fuente, por lo tanto, el monitoreo constante para la caracterización de aguas superficiales y subterráneas es, sin duda una de las principales acciones que deben considerarse para la conservación del recurso y las políticas dirigidas hacia su cuidado. Otros aspectos importantes para considerar son; el seguimiento de los contaminantes hasta la recarga de los cuerpos de agua, el cambio climático, el cálculo de la demanda hídrica a través del tiempo y la tendencia que sugiere dadas las condiciones [Lina, M. et, al., 2021].

En resumen, podemos decir que la disponibilidad del agua subterránea para el consumo se limita por tres factores:

1. Renovación de las aguas subterráneas por precipitación.
2. Calidad del agua.
3. Características del suelo y el acuífero.

México tiene definidos 653 acuíferos, el 38.7% del agua utilizada en el país proviene de estas fuentes, y en la Ciudad de México más del 60%. El agua subterránea se divide entre los acuíferos, manantiales y ríos subterráneos, puede extraerse mediante pozos o esperar a que, de manera natural salga a la superficie a través de manantiales, áreas de humedales, cauces fluviales o de forma directa hacia el mar, ríos y/o arroyos [IMTA, 2019]. Esta agua se renueva constantemente de forma natural, debido al proceso de “recarga” la cual procede de la infiltración de la lluvia, pero también puede producirse de la infiltración de otros cuerpos de agua superficial, en general presenta problemas de dureza, cloruros, pH, alcalinidad, sólidos disueltos, coliformes fecales, amoníaco, color y conductividad eléctrica [CONAGUA, SGAPDS #24, 2019].

Actualmente la Ciudad de México es hogar de millones de habitantes, de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda en 2020 se registraron 9.2 millones además de ser el lugar de trabajo y destino turístico de muchos más, sobre todo en los últimos años, pues después de la pandemia por SARS-CoV-2 además del destino normal de turistas, migrantes y trabajadores se han sobrepoblado algunas colonias de extranjeros, sobre todo estadounidenses por la accesibilidad y calidad de vida que pueden tener aquí con salarios de su país [Culver, D. 2022], todo esto en sus 1,486km<sup>2</sup> (Marco Geoestadístico INEGI, 2020) y ocupando así uno de los primeros lugares en las ciudades más pobladas del mundo lo cual la hace tener una gran importancia económica y social pero también enfrenta grandes retos como por ejemplo con el medio ambiente y con respecto al uso y consumo de agua.

## 1.5. Principales problemas del abastecimiento de agua potable en Ciudad de México

Según la OMS y WHO la dotación necesaria de agua potable por cada habitante para garantizar las necesidades básicas (beber, asearse y preparar comida) y la salud es de 100L/d, se considera que el derecho a agua potable incluye agua potable entubada dentro y fuera de la vivienda con delimitación con su terreno, en llave pública o de otros lugares.

Los registros de SACMEX en 2021 mencionan que la ciudad de México provee de este recurso en promedio con 150L/hab/día, pero hay que tomar en cuenta que ese promedio se obtiene considerando que hay zonas en la ciudad donde se tienen dotaciones de hasta 350L/hab/día mientras en otros lugares no hay agua o se tiene de manera intermitente, la cobertura de drenaje es del 94% en toda la ciudad, es decir el 6% ni siquiera tiene drenaje [SACMEX, 2021].

La problemática que existe en la Ciudad de México en cuando al recurso hídrico es más compleja de lo que se puede pensar después de leer el párrafo anterior, abarca desde aspectos técnicos como distribución de infraestructura, elevación del terreno, calidad y cantidad de agua, fuentes de extracción, servicio intermitente y de las tecnologías utilizadas para el tratamiento de potabilización, hasta aspectos sociales como el nivel socioeconómico, densidad de población y de los sistemas fuera de la CDMX que transfieren agua [Massiel, C. et. al. 2022], además nunca se ha podido resolver el problema de perdidas en la red debido a fugas, agua no contabilizada, clandestinaje y se estima que se pierde en esto hasta el 42% de agua que se abastece, es decir 13.5m<sup>3</sup>/s, esta cifra incluye a las tomas clandestinas, agua no contabilizada por falta de micro medición y errores que pueda haber durante la medición, la falta de continuidad del servicio afecta a gran parte de la población de la Ciudad de México, se estima que 26% de los habitantes no reciben cantidad suficiente, 15% no cuentan con servicio diario, es decir, hay aproximadamente 1.8 millones de habitantes con tandeo y en las delegaciones Cuauhtémoc, Benito Juárez, Iztacalco y Venustiano Carranza se registra baja presión [SACMEX, 2019].

No obstante el problema de agua crece también con el rápido incremento de población ya que casi todas las variables tienen que ver con este factor, el acceso a nuevas fuentes de abastecimiento es difícil, extraer más agua no es la mejor opción ya que el suelo se caracteriza por ser altamente compresible (suelo lacustre) y traería como consecuencia mayor hundimiento de la ciudad, actualmente se estima que se hunde alrededor de 30cm por año, incluso el acuífero presenta este problema con la disminución de 1 metro en el nivel, pues se extrae más agua de la que se recarga [SACMEX, 2021]. Una forma en la que se ha sobrellevado la falta de agua es mediante acuerdos con estados aledaños los cuales ceden volúmenes de agua, pero desafortunadamente estos estados también están teniendo problemas de abastecimiento por lo que la renuncia a ceder este recurso es cada vez mayor.

Otro problema es la infraestructura, pues gran parte de ella es obsoleta y/o insuficiente en las plantas, estaciones de bombeo y drenaje para los requerimientos tanto de tecnología como de cantidad y calidad de agua, esto se debe al tiempo que tienen instalados ya que no se le ha dado el mantenimiento adecuado, pero también la vida útil del drenaje es mucho menor de lo normal, pues el hundimiento de la ciudad genera más presión en las tuberías lo que hace que se desvíen o perforen [SACMEX. 2022], por si no fuera poco cada año aumenta la contaminación en el agua, la mala gestión de residuos desde el vertido de desechos industriales sin tratamiento hasta desechos municipales sin tratar, es importante reconocer la falta de información y/o conciencia de la población, las empresas y el gobierno para destinar los desechos a lugares específicos y que reciban un adecuado tratamiento, la basura convencional trae consigo muchos problemas pero estos problemas se agravan más cuando se trata de compuestos persistentes, emergentes, carcinógenos, mutágenos y teratógenos los cuales se encuentran principalmente en medicamentos, pilas, baterías, pesticidas, fertilizantes, residuos biológicos y desechos industriales, estos desechos son muy comunes y sin embargo no existe aún una correcta cultura a cerca de su disposición FPCEA, A.C. 2020]. El aumento de temperatura es otro factor de importancia ya que ocasiona la disminución de oxígeno en su composición interviniendo negativamente en el sistema saprobio el cual se da en ambientes lóticos como arroyos y ríos, desde otro punto de vista el aumento de temperatura también provoca una evaporación más rápida del agua, trayendo consigo el secado de cuerpos de agua abiertos o almacenes además de mayor concentración de contaminantes, ya que muchos de estos no se disuelven en el agua y/o no se evaporan [Zaleski, M. Claps, M. 2000].

Estos problemas en conjunto han provocado que, aunque en la CDMX se obtenga agua principalmente de fuentes subterráneas esta se encuentre cada vez más contaminada y como consecuencia hay que invertir más recursos para su potabilización, por lo que es importante revisar como se aplican las leyes y normas para la industria y la población en general.

En cuanto a los factores socioestructurales como la economía, la cultura, costumbres y tradiciones en el uso, consumo y disponibilidad del agua, en 2022 se realizó un estudio mediante la implementación de un análisis espacial y el uso de sistemas de información geográfica en la Ciudad de México y se determinó que este tipo de problema tiene repercusiones más significativas de lo que aparentan, los más importantes son; el suministro discontinuo de servicio de agua, seguido de una gran dependencia de fuentes de agua externas, altitud de los barrios y su condición socioeconómica, en ese orden de importancia (Medina-Rivas et al., 2022), además estos autores nos dan una visión de los factores que influyen en la heterogeneidad del consumo del agua los cuales son:

- Precio del agua
- Nivel socioeconómico



- Variables climatológicas (temperatura y precipitación)
- Tamaño del hogar
- Características de la vivienda
- Edad de los habitantes
- Altitud del terreno
- Capacidad del suministro

Ante las problemáticas presentadas anteriormente SACMEX ha presentado un informe con alternativas que cubran los siguientes compromisos:

- 1- Garantizar el derecho al agua potable para todos: este punto incluye revisar y asegurar las fuentes de abastecimiento, ampliar la cobertura del servicio, de micro y macromedición, rehabilitar y mantener en un estado óptimo y funcional plantas potabilizadoras y redes de distribución además de construir nuevas.
- 2- Drenaje, tratamiento y reúso: se toma en cuenta la red de drenaje reparando fugas, construyendo infraestructura verde, dando mantenimiento a la ya existente, instalando micromedidores, contemplando el reúso de agua tratada y estableciendo planes para la utilización eficiente de plantas y sistemas de tratamiento de aguas residuales.
- 3- Sustentabilidad y gestión ambiental de recursos hídricos: se busca el aprovechamiento sustentable de los recursos hídricos con acciones que favorezcan la recarga del acuífero y la mitigación de hundimientos incrementando infiltraciones al acuífero.
- 4- Transformación estructural: la reparación de los problemas sin duda incluye al organismo encargado de solucionar los mismos por lo que SACMEX propone la transformación jurídica de su sistema, atención de usuarios y fortalecimiento del sistema comercial, reestructura de la organización, modernización administrativa y el fortalecimiento del sistema financiero.
- 5- Ejes transversales: Otros aspectos que se pueden considerar para resolver esta problemática es promoviendo la cultura del agua en la población, aplicar reingeniería en procesos y soluciones tecnológicas de vanguardia para potabilización y tratamiento de agua residual, por último, abrir la oportunidad a nuevos proyectos metropolitanos y a nivel de la cuenca del Valle de México.

En el tercer informe de gobierno en 2021 se mencionaron las estrategias del gobierno para disminuir la problemática, según los datos a nivel gobierno de México se divide la solución en tres grandes esquemas; el mantenimiento de todos los sistemas que abastecen a la ciudad de México donde se ha ascendido la inversión en 2021 para la modernización de los sistemas de distribución al 80% del total del presupuesto de \$229.5 millones, la intervención de pozos y plantas potabilizadoras y de bombeo enfocándose en la obra civil y equipamiento y la

búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento donde desde 2019 se han colocado más de 25 mil sistemas nuevos financiados por el gobierno de la ciudad y mediante el fondo mixto México-España para intentar ofrecer alternativas a lugares donde aún no hay agua. [Congreso de la Ciudad de México, Tercer informe de gobierno, 2021].

Con este panorama previamente presentado podemos conocer y reconocer las problemáticas globales que tiene la Ciudad de México actualmente respecto al agua, sin embargo, estos son problemas muy puntuales del territorio, a nivel mundial se añaden otros extras, la falta de agua potable va en aumento junto con el aumento de población y el cambio climático, pues están estrechamente ligados haciendo que el agua sea más escasa, impredecible y/o contaminada [UN, 2020], estos factores desencadenan distintas consecuencias que afectan el agua como:

- Alta generación de residuos: de manera general se tiene un alarmante ascenso en el mundo por; generación de basura y vertido de desechos industriales y municipales sin tratamiento, al tener mayor población estos residuos crecen, además, se tienen registros de que después de la revolución industrial el aumento de contaminantes tanto en concentración como tipo y grado de toxicidad y degradabilidad han aumentado exponencialmente [Cerón, L. et. al., 2021].
- Los glaciares, casquetes polares y territorios nevados están desapareciendo debido a las altas temperaturas, y aunque por temporadas algunas comunidades reciben más agua debido a esto vuelve muy inestable la regulación de agua dulce, además contribuye junto con la elevación de temperatura del agua (expansión térmica del agua) a que el nivel del mar suba [IPCC, 2008].
- Las inundaciones y el aumento del nivel del mar contaminan no solo la tierra con residuos antropogénicos, sino también los recursos hídricos con agua salada, materia fecal y otros contaminantes, además de causar daños en la infraestructura y saneamientos [IPCC, 2008].
- El aumento de la temperatura también ocurre en el agua y ocasiona la disminución de oxígeno en su composición haciendo que el sistema saprobio se vea afectado y por lo tanto la vida acuática y la absorción de nutrientes. Los residuos orgánicos también se descomponen con mayor rapidez y muchos de estos, a su vez terminan en cuerpos de agua aumentando su contaminación desde sedimentos hasta patógenos [IPCC, 2008]
- Las sequías y los incendios forestales conllevan destrucción de vegetación provocando una mayor erosión del suelo y esto hace que la recarga de aguas subterráneas se reduzca [UN, 2020].

- Cuando la temperatura aumenta la atmósfera también se ve afectada, es capaz de contener una mayor cantidad de agua en forma de humedad y al haber mucha agua evaporada por la misma razón da como resultado tormentas y lluvias torrenciales, aunque debido a que sucede por periodos de tiempo cuando pasan estos fenómenos se tienen periodos de sequía más intensos, esto hace menos predecibles y más bruscos los patrones climáticos globales [UN, 2020].

Los factores presentados pueden ser desalentadores, sobre todo en conjunto, pero el objetivo de visualizarlos es dar claridad a la problemática y tener claro por donde resolver estos problemas, hablando del cambio climático quizá el problema que México puede considerar primero para atacar el problema del agua es las políticas públicas y el manejo respecto a los residuos sólidos.

La SEDEMA calculó en su último inventario de Residuos Sólidos en 2016 que se generan diariamente en la Ciudad de México 12,920 toneladas de residuos; esto equivale, en promedio a más de 1.5kg por persona al día. La recolección de basura tiene un esquema bien establecido llamado “separación primaria avanzada” establecida por la Norma Ambiental para el Distrito Federal (hoy CDMX) NADF-024-AMBT-2013 donde nos indica que la basura debe separarse en:

- 1- Biodegradables susceptibles de aprovechamiento
- 2- Inorgánicos con potencial de reciclaje
- 3- Inorgánicos de aprovechamiento limitado
- 4- Residuo de manejo especial
- 5- Residuos peligrosos

Los encargados de esta labor son las personas que se dedican a recolectar la basura por medio de barrido manual y mecánico, es decir; los operarios que llevan carros y barren las calles y los que llevan un camión, el sistema actual lleva toda esa basura a estaciones de transferencia (existen 12 en la CDMX) donde se vacía en vehículos de gran tonelaje para hacer un traslado más eficiente, posteriormente llega a una de las dos plantas de selección que hay en las que realiza la separación y clasificación para saber a dónde trasladar cada residuo; algunos van a plantas de compactación y otros a plantas de composta dependiendo de las características [SEDEMA, 2016].

Como podemos dar cuenta es hasta un cuarto contacto donde se separa la basura, y aunque la SEDEMA ha exhortado a la población a separar realmente la cultura de esta acción es muy baja, el INEGI reportó en 2017 que solo el 46% de la población en México separa basura, mucho tiene que ver la falta de depósitos de basura en las calles, espacios públicos, transporte público y, por su puesto de saber cómo debe hacerse, todo esto sin contar lo que las industrias y la delincuencia organizada dejan en la fabricación y desecho de drogas y armas.

## 1.6. Tipos de tratamiento y procesos para potabilización

La forma de asegurar una calidad de agua aceptable para el uso y consumo humano es mediante las normas y guías que nos indican los límites permisibles en las concentraciones de contaminantes, como se mencionó anteriormente en México la norma fundamental a utilizar en este caso es la NOM-127-SSA1-2021, los contaminantes que se consideran son diversos y con una concentración o intervalo de concentración específicos, es importante tomar en cuenta cada uno de ellos y respetar los valores expuestos ya que de eso depende la salud de la población.

Para analizar y desarrollar trenes de tratamiento para remoción de contaminantes es importante tener claro que existen dos tipos;

1. Estaciones de tratamiento de agua potable (ETAP): Son trenes de tratamiento con un conjunto de operaciones y procesos unitarios específicos para remover los contaminantes necesarios para obtener agua potable, generalmente estos procesos tienen como influente agua de fuentes superficiales o subterráneas (cruda), es decir; agua con cierto nivel de contaminantes no tan alto como lo sería una agua residual o negra [Zarza, L. 2021].
2. Plantas de tratamiento de agua residual (PTAR): A diferencia de una ETAP el influente que ingresa es agua residual, es decir; el producto de uso industrial, municipal o agrícola y, por supuesto con ello el tipo y las concentraciones de contaminantes son mayores, las concentraciones que se deben lograr en el efluente también son distintas, únicamente se necesita llegar a concentraciones donde no tenga repercusiones negativas al medio ambiente ya que se descarga en cuerpos de agua y bienes nacionales, en México la norma que aplica en estos casos es la NOM-001-SEMARNAT-2021 y dadas estas condiciones los procesos y operaciones unitarias si tienden a ser distintos, comúnmente más complejos [Farias, B. 2016].

Dentro de estos dos procesos de tratamiento existen etapas básicas ( [Tabla 3](#)), en ellas se basan para diseñar los trenes de tratamiento de las ETAPs y PTARs ya que son generales y dependen de las condiciones del agua y los requerimientos para saber hasta qué tipo de tratamiento elegir, es común que en algunos casos no se realice el tratamiento terciario.

Tabla 3. Etapas de tratamiento para las ETAPs y PTARs.

Etapa	Descripción
-------	-------------

Pretratamiento	Operación donde se retiene la materia suspendida y sólidos más gruesos.
Tratamiento primario	Se remueven sólidos gruesos, sedimentables y flotantes por medio de operaciones físicas (sin transformación de materia).
Tratamiento secundario	Remoción de materia orgánica, soluble y coloidal mediante procesos biológicos y químicos.
Tratamiento terciario	Remoción de nutrientes (nitrógeno y fósforo).
Desinfección:	Se hace al final de cualquiera que resulte ser la última etapa de proceso.

Para este caso de estudio nos resulta importante conocer más acerca del tratamiento en las ETAPs, el agua cruda se caracteriza por ciertas características previamente analizadas por lo que para el diseño del proceso se busca eliminar la materia orgánica particulada, ya que las partículas reducen la claridad del agua causando turbidez y malos olores, también se deben remover los microorganismos infecciosos como virus, bacterias y protozoos, con estas características es común encontrar los siguientes procesos en el tren de tratamiento:

Tabla 4. Procesos comúnmente aplicados en las ETAPs. Elaboración propia con información de [Crittenden, C. 2012].

Proceso	Objetivo	Mecanismo de acción	Partículas resultantes	Tiempo de acción
Coagulación	Materia suspendida, coloidal y disuelta	Adición de sustancias químicas conocidas como coagulantes que neutralizan las cargas eléctricas de las partículas en suspensión (desestabilización), al hacerlo las partículas pierden su repulsión y se agregan o agrupan, como consecuencia de esto se logra la sedimentación, una vez hecho esto es más fácil remover el precipitado formado.	Partículas coaguladas	10 segundos
Coagulantes comunes:		Sulfato de aluminio, cloruro férrico y polímeros coagulantes		
Floculación	Materia suspendida,	La base del proceso de floculación es el mecanismo de agitación para hacer más	Flóculos que pueden eliminarse por	20 a 45 minutos.

	coloidal y disuelta	eficiente la suspensión después de la coagulación ya que al agitar las partículas coaguladas se agrupan formando flóculos.	gravedad, sedimentación y/o filtración.	
Sedimentación o clarificación	Partículas minerales y orgánicas	Es un proceso físico en el que las partículas suspendidas se asientan en el fondo debido a la gravedad. La rapidez y eficiencia con la que sucede depende del tipo de partícula, tamaño, velocidad, densidad y temperatura.	Sedimentos	Depende del proceso, pero puede tomar varios minutos e incluso horas, suele ser un proceso tardado.
Filtración	Partículas minerales, orgánicas e inorgánicas.	Proceso físico que capta y retiene partículas sólidas a través del paso del agua por un medio poroso de diferentes materiales mediante la gravedad y presión.  *Aunque no es común encontrar altas concentraciones de partículas en el agua subterránea algunos procesos de tratamiento como oxidación y ablandamiento generan partículas que deben ser removidas.	Mismas partículas, pero retenidas en el filtro.	Depende del proceso ya que existen filtros rápidos, lentos, membranas y biológicos.
Materiales filtrantes comunes:		Grava, arena, antracita, carbón activado		
Desinfección	Contaminantes microbiológicos	La desinfección es un proceso donde mediante la oxidación o el uso de radiación electromagnética (en el caso del empleo de luz UV) se destruyen o inactivan contaminantes microbiológicos. Además de ser fundamental esta parte del proceso para la salud también controla aspectos físicos como el sabor, olor y color.	Depende de los contaminantes.	Puede tomar varios minutos.
Agentes desinfectantes comunes:		Cloro libre, cloro combinado, hipoclorito de sodio, ozono, luz ultravioleta (UV).		

Además de esto es importante mencionar que muchas veces se añaden varias etapas más como por ejemplo la preoxidación, sirve para eliminar sustancias cuya presencia puedan causar problemas en las siguientes etapas o evitar el crecimiento de microorganismos tóxicos, esta etapa puede conseguir precipitar hierro y manganeso, eliminar amoníaco, nitritos y parte de la materia orgánica debido a la oxidación, también resulta conveniente monitorear y ajustar propiedades como la temperatura, y el pH, si este último se encuentra en valores indeseados (alejados de 7) se ajusta comúnmente con hidróxido de sodio o hidróxido de calcio después de la coagulación-floculación [CEUPE, 2020].

Aunque las investigaciones siguen avanzando y es un camino que debe seguirse explorando actualmente los procesos que se conocen pueden ser suficientes si se realiza un correcto análisis de estudios preliminares; calidad del agua (caracterización) y pruebas de tratabilidad, estudios económicos y análisis sociales para seleccionar esquemas de tratamiento y diseñar sistemas de potabilización que sean adecuados para cada situación [Kerry, J. et. al. 2012].

Existen distintos trenes de tratamiento, procesos y operaciones para lograr un tratamiento de agua de calidad, confiabilidad, flexibilidad y a costos asequibles, pero es importante considerar los objetivos de la potabilización en cuanto a la calidad tal como lo indica CONAGUA basándose en leyes y normas mexicanas, ya que es el parámetro más importante para cuidar la salud de la población [CONAGUA, 2020], los cuales son:

- Agua segura, sin compuestos químicos u organismos patógenos que pongan en riesgo la salud de los consumidores.
- Agua aceptable, que no tenga sabor o color desagradables.
- Agua clara, libre de materia suspendida y turbiedad.
- Agua razonablemente blanda, es decir, que los usuarios no requieran grandes cantidades de detergentes y jabones para la ducha, lavar ropa y trastes.
- Agua sin características corrosivas o incrustantes.
- Agua con bajo contenido orgánico.

## 1.7. Principales contaminantes del agua

La calidad del agua es la medida de las propiedades físicas, químicas y biológicas [Peters, 2009], en México, la dependencia oficial encargada de monitorear la calidad de agua superficial y subterránea es la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), y lo hace a través de la Red Nacional de Monitoreo. En el 2015 CONAGUA reportó que disponía de 4,999 sitios de monitoreo de calidad del agua con base en cinco indicadores para el agua superficial (DBO, DQO, SST, CF y TOX) y uno para el agua subterránea (SDT).

DBO: Demanda bioquímica de oxígeno

DQO: Demanda química de oxígeno

SST: Sólidos suspendidos totales

CF: Coliformes fecales

TOX: Toxicidad

SDT: Sólidos disueltos totales

Estos parámetros son solo algunos de los que nos ayudan a saber en qué condiciones se encuentra el agua en cuanto a calidad, la NOM-127-SSA1-2021 contempla más de 50 pero estos parámetros nos dan un panorama general ya que son los contaminantes más comunes en el agua e importantes para la salud.

México tiene una disponibilidad de 0.1% del total de agua dulce del planeta y muchas zonas del país están catalogadas como zona semidesértica, pues la distribución es desigual y a nivel mundial se clasifica como un país de baja disponibilidad de este recurso, el agua además se destina en diferentes sectores, para la agricultura es del 76%, el abastecimiento público 14%, termoeléctricas 5% y otro 5% en la industria [INEGI, 2018], cifras muy similares al nivel mundial que según datos de la ONU en 2018 reportaron que la industria utiliza 22%, consumo personal 8% y 70% la agricultura y se sabe que la calidad del agua está influenciada por muchos factores, tales como el clima, suelo, precipitaciones, flora y fauna, geología, condiciones del flujo y caudal, pero sobre todo de las actividades humanas, la mayor amenaza son la industria y los municipios, en el caso de la agricultura y la ganadería son los sectores que más desperdicia agua, solo el 57% del total es utilizado, el desperdicio prácticamente viene por el riego ineficiente, en mal estado o con fugas además de las pérdidas por evaporación e infiltración en el suelo [Maguey, H. 2018].

Respecto a la agricultura es alarmante el uso de agua, se estima que para el año 2050 la población mundial pasará de 6,900 millones de personas (2011) a 9,100 millones (el último registro fue en 2021 con 7,888 millones) y como consecuencia 20% menos superficie cultivable por persona, además la producción alimentaria podría aumentar un 70% en el mundo y hasta un 100% en los países en desarrollo [FAO, 2011] si hoy en día la falta de comida es un problema se estima que si no cambian los procesos de producción, distribución y almacenamiento de alimentos de manera inmediata se derivará el problema en una crisis mundial, es de vital importancia estudiar todos los aspectos desde el diseño de producción de cultivos hasta la recepción de alimentos por persona, ya que además de desperdiciarse mucha agua también se desperdicia mucha comida, la ONU estimó que para 2021 se desperdiciaba aproximadamente el 17% de comida, en 2023 la cifra se registró en masa reportándose un



desperdicio de 570 millones de toneladas de alimentos mientras 735 millones de personas padecen de hambre o malnutrición [ONU, 2021,2023].

Una solución planteada desde hace tiempo para la reducción de agua de riego en las plantaciones agrícolas es el riego por goteo o riego localizado, este método se diseñó con el objetivo de aumentar la eficiencia en el riego a los cultivos, este sistema eficientiza los recursos no solo del agua sino también de fertilizantes, energía e incluso agroquímicos, se logra a través de un sistema de tuberías (líneas de goteo) que contienen dentro “goteros” los cuales emiten caudales controlados directamente en la zona radicular del cultivo por gotas de agua con fertilizante para lograr una aplicación uniforme y óptima en cada planta, pues así como los seres humanos las plantas no pueden aprovechar el alimento si se les da de manera incontrolada [NETAFIM, 2023], este proceso tiene una eficiencia del 90 al 95%, aprovecha entre el 40 y 50% de agua y además la aplicación de esta manera reduce la maleza invasora, mano de obra, evita contaminación de mantos freáticos, funciona en zonas áridas con escasez de agua y puede instalarse en cultivos abiertos, como inconvenientes tiene un alto coste de instalación, mantenimiento, dificultad de lavados, posible salinización del suelo, necesidad de más preparación técnica y solo se pueden usar fertilizantes solubles en agua [MDAPA,2020], sin embargo hay que considerar las ventajas y la situación tan alarmante del agua, lo cual puede convertirla en la mejor opción, actualmente este proceso se está buscando emplear en más lugares, en México se usa para cultivar productos como maíz, aguacate, cítricos, hortalizas, tabaco, tomate, moras y uva, sobre todo en zonas como Guanajuato, Sinaloa, Baja California, Durango, Coahuila, Chihuahua y Querétaro [ASGROW, 2020].

Dentro de los contaminantes existen clasificaciones tales como aquellos que causan daño a corto (biodegradables) y largo plazo (no biodegradables), o dependiendo de su origen; contaminantes naturales (provocado por el equilibrio dinámico de la tierra, actividad geofísica y fases del ciclo hidrogeoquímico del agua) y contaminantes antropogénicos (resultado de actividades humanas generando sustancias ajenas que alteran de manera negativa la composición o concentraciones físicas, químicas y biológicas ya existentes en el agua) [Blancas, C. Hervás, E. 2001]. En México la CONAGUA clasifica en tres sectores a los consumidores de agua: agrícola, municipal e industrial, todos ellos generan contaminantes biodegradables y no biodegradables pero estos últimos han tenido un aumento exponencial con el desarrollo de tecnologías y procesos químicos, además del crecimiento urbano y el aumento de natalidad ya que esto genera mayores residuos municipales, por ejemplo, en México el promedio de agua por persona **pasó de 18mil metros cúbicos en 1950 a 3mil 692 en 2015** [Maguey, H. 2018]. A nivel mundial se estima que entre el 85 y 95% del agua residual no pasa previamente por un proceso de tratamiento, sino que se descarga directamente a los ríos, lagos y océanos [CONAGUA, 2015], en México las descargas se clasifican en municipales y no municipales y se sabe que aproximadamente solamente el

52.7% de las aguas municipales que se generan y el 32% de las no municipales pasan por un proceso de tratamiento, aunque se desconoce si siempre cumple con la norma correspondiente para descargas [CONAGUA, 2018]. El tipo de contaminantes generados y su concentración dependen directamente del tipo de agua descargada y esta a su vez de los usos que se les ha dado, además de la falta de concientización y responsabilidad a cerca de donde, cómo y cuándo descargar el agua, las averías en las redes de saneamiento también se suman a este problema, así como los usos clandestinos ya que utilizan pozos ciegos para extraer y eliminar sus aguas residuales [Blancas, C. Hervás, E. 2001].

Los principales contaminantes según el tipo de uso que se le da al agua, aunque no se descartan ningunos otros son los siguientes:

-Agua municipal: Predominan el nitrógeno, fósforo, compuestos orgánicos, bacterias coliformes fecales y materia orgánica por el uso de papeles, detergentes, aceites, restos plásticos, materia fecal, medicamentos, entre otros [Blancas, C. Hervás, E. 2001].

-Agrícolas: Contienen compuestos altamente tóxicos y persistentes provenientes del uso excesivo de fertilizantes y biocidas, predominan los compuestos nitrogenados, fosfatados, metales pesados como el cadmio y plomo además de residuos farmacéuticos y hormonas que provienen de estiércoles animales usados como fertilizantes los cuales además suelen contener patógenos [Sagasta, J. (IWMI) Marjani, S. (FAO) Turrall, H. 2018].

-Industria: La situación del agua por actividades industriales es compleja ya que se producen productos de todo tipo y los residuos o subproductos también son muy variados. Es importante analizar cada industria para determinar qué tipo de contaminantes contiene el agua, pero comúnmente son tóxicos, emergentes y persistentes, podemos decir que se puede encontrar materia orgánica disuelta o en suspensión, un pH ácido, temperaturas altas, aceites, grasas, solventes, compuestos nitrogenados, y fosfatados, metales pesados (comúnmente plomo, mercurio, cadmio, cromo y zinc), contaminantes tóxicos no metálicos (cloruros, fluoruros y sulfuros), microorganismos patógenos, residuos farmacéuticos, hormonas, microplásticos entre otros [Chowdhary, P. et. al., 2020].

Los productos contaminantes de estas fuentes tienen cierta semejanza entre sí, es la presencia de contaminantes nitrogenados y fosfatados, aunque estos últimos se tienen en menores concentraciones, y de hecho los contaminantes químicos más comunes en los acuíferos subterráneos son los nitrogenados [Sagasta, J. (IWMI) Marjani, S. (FAO) Turrall, H. 2018], podría parecer extraño que sean contaminantes cuando son usados por las plantas como nutrientes pero al rebasar la capacidad de absorción por sus altas concentraciones se convierten en contaminantes que llegan al agua por escorrentía superficial y filtración del agua [Izzuddin, M. et. al., 2021]. Las industrias son fuentes de contaminación, extrema,

aunque no utilizan tanta agua como el sector agrícola se estima que contaminan el equivalente a lo generado por 100 millones de habitantes [CNA, 2018], las industrias con mayor impacto en el agua son: la industria azucarera, textil, farmacéutica, petroquímica y minera [Maguey, H. 2018], pese a esto la agricultura es el mayor contaminante de agua por los volúmenes que requieren, como vimos en México y en el mundo es más del 70% del agua la que se destina para este sector, además el ganado genera muchas más excreciones que los humanos, lo que agrava las concentraciones de estos contaminantes, los más preocupantes para la salud humana son; los patógenos del ganado, biocidas, nitratos, oligoelementos metálicos y contaminantes emergentes como antibióticos [FAO, 2020].

A nivel mundial la agricultura ocupa cerca de 115 millones de toneladas de fertilizantes nitrogenados, cerca del 20% de estos se acumulan en el suelo y el 35% termina en los océanos, los compuestos que predominan son el metano, óxido nitroso y la materia orgánica, además es importante no dejar de lado las muertes humanas que el uso de estos químicos causan debido al desconocimiento de cómo se deben usar y bajo qué equipo de protección personal, otros problemas son las técnicas de riego inadecuadas, el deterioro de la infraestructura y la falta de leyes y su aplicación, pues en México aún se usan plaguicidas que en otros países se han prohibido por su alta toxicidad, tampoco se tiene un sistema eficiente para revisar que las pocas leyes que existen para uso y desecho del agua en la agricultura se cumplan. Además de la contaminación en el agua también existe en el suelo y en el aire que al final hace que también terminen en cuerpos de agua por las lluvias, la escorrentía, filtración, deposición atmosférica y lixiviación [Pérez, R. Aguilar, A. 2012].

Es importante resaltar que los cuerpos de agua (ríos, acuíferos, lagos, mar) tienen la capacidad de absorber y neutralizar cargas contaminantes gracias al sistema saprobio y al ciclo hidrogenoquímico (según aplique para cada fuente), por un lado los cambios por acción química y bacteriana oxidan y reducen gran parte de los contaminantes pero las condiciones ambientales también influyen en crear ambientes propicios para estas reacciones, el recorrido del agua en el ciclo hidrogenoquímico provoca filtraciones naturales en los suelos y al evaporarse también se desprende de ciertos contaminantes, el problema es que la fuente de contaminación no se suspende, por lo que es imposible que se lleven a cabo estos procesos de manera óptima, es necesario un tiempo importante para ello.

Con lo anterior podemos reconocer los principales contaminantes alarmantes en las fuentes de agua subterránea, es por eso por lo que se hará un análisis enfocado en la eliminación de nitrógeno amoniacal y materia orgánica, además de que este último contaminante interfiere en la eliminación del primero de distintas formas, por un lado la descomposición de materia orgánica (compuestos orgánicos nitrogenados) liberan nitrógeno amoniacal aumentando su concentración, a este proceso se le conoce como amonificación, y por otro lado afecta la

eficiencia de remoción ya que la MO consume oxígeno disuelto, mismo que necesitan las bacterias nitrificantes para convertir el amonio en nitritos y luego en nitratos por lo que se ve reducida su actividad [Crittenden, C. 2012] aunque esto último puede verse como una afección bidireccional en la eliminación del otro contaminante.

## 1.8. Materia orgánica

Los compuestos sólidos que más se encuentran en aguas residuales como contaminante son de naturaleza orgánica, los cuales provienen de diferentes fuentes como deshechos animales, vegetales o provenientes de actividades humanas donde se sintetizan compuestos orgánicos [Corona, R. 2018].

Las macromoléculas presentes en el agua residual como materia orgánica son las proteínas (40-60%), los carbohidratos (25-50%) y lípidos (8-12%), estos compuestos están formados en su mayoría por combinaciones de carbono, hidrógeno y oxígeno, aunque también puede estar presente el nitrógeno, azufre, fósforo o hierro [Ayala, C. 2008].

Todos estos compuestos pueden ser degradados por bacterias, hongos, protozoarios, nematodos, virus y algas ya que todos ellos los necesitan para iniciar su catabolismo.

La descomposición de materia orgánica y la liberación del carbono son procesos aeróbicos, lo que indica que es fundamental el oxígeno para que los microorganismos lleven a cabo este proceso, los residuos generados son la liberación de dióxido de carbono a la atmósfera y, por lo tanto, una reducción de la materia orgánica formando parte del ciclo del carbono [López, P. 2020].

### 1.8.1. Ciclo del carbono

El ciclo del carbono es el conjunto de transformaciones que presenta el carbono respecto al tiempo, es uno de los tres ciclos de macronutrientes más importantes, se considera un ciclo gaseoso, ya que la mayor parte del carbono se encuentra en forma de gas, es fundamental ya que todos los seres vivos formamos parte de éste y también es parte de la regulación del clima en la tierra [Iroz, N. et, al.,2018].

Como se muestra en la [Figura 6] el carbono que se encuentra en plantas y animales proviene principalmente de bicarbonatos en las rocas disueltas por el agua y es llevado a la atmósfera por decaimiento y combustión, lo cual se genera por el catabolismo de los seres vivos y quema de material orgánico por medio de estos mismos o de fenómenos naturales dando lugar al dióxido de carbono en la atmósfera, las transformaciones de este suceden mediante la respiración y la fotosíntesis.

El carbono como  $\text{CO}_2$  es la forma del carbono más oxidada en la que puede encontrarse y gracias a la fotosíntesis y en contacto con agua es que puede volver a la primera fuente de carbono, es decir como carbono orgánico y oxígeno mediante la energía solar.

Aquellos organismos que realizan respiración oxidan el oxígeno para obtener energía y desechan como productos  $\text{CO}_2$  y agua cerrando así el ciclo de carbono [Martines, J. et. al., 2004].

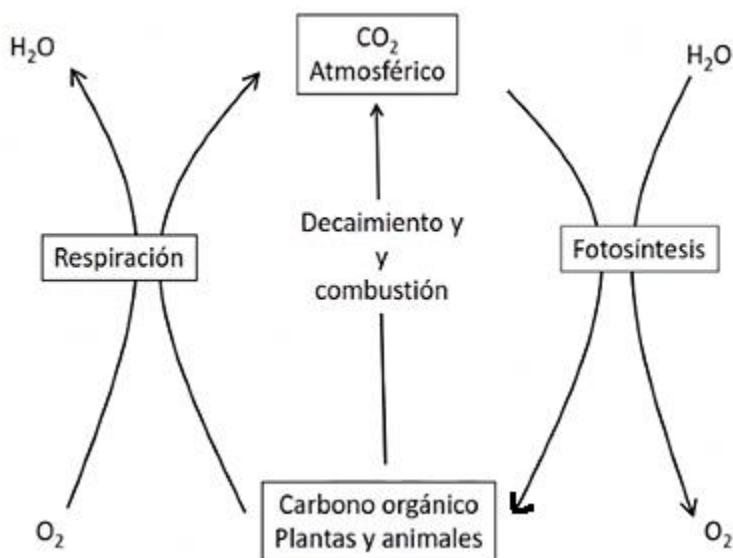


Figura 6. Ciclo del carbono [Gonzales, S. 2022].

### 1.8.2. Contaminante

Para evaluar el grado de contaminación presente en el agua se emplean varias técnicas, aprovechando las transformaciones del carbono durante el ciclo, con una composición regularmente constante se mide directamente el carbono orgánico total (COT o TOC) que es un parámetro que mide la cantidad de carbono orgánico presente en una muestra de agua de forma disuelta como en forma suspendida. Representa la cantidad total de materia orgánica presente, independientemente de su biodegradabilidad

El COT se expresa generalmente en miligramos de carbono por litro (mgC/L) o en porcentaje de carbono (%C). [Crittenden, J. 2012]. Se determina mediante técnicas de oxidación en las cuales se convierte todo el carbono orgánico presente en dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), luego, se mide la cantidad generada de  $\text{CO}_2$  para calcular el contenido de carbono orgánico [NMX-AA-187-SCFI-2021].

También se puede medir este contaminante de manera indirecta; midiendo la capacidad reductora del carbono con la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO).

- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): Se refiere a la cantidad de oxígeno que los microorganismos, especialmente bacterias, hongos y plancton consumen durante sus procesos metabólicos para la degradación de sustancias orgánicas, este proceso requiere condiciones específicas para estandarizar el cálculo de este parámetro, se realiza a 20°C durante 5 días por lo cual se denomina DBO<sub>5</sub> y se expresa en miligramos de oxígeno por litro (mg/L) [López, S. 2018]. Su incremento conlleva la disminución de oxígeno disuelto en el agua, lo que resulta desfavorable para las comunidades biológicas que habitan ese cuerpo de agua ya que provoca condiciones de anoxia [SEMARNAT, 2014].

La norma recomendada en México para medir este parámetro es la: NMX-AA-028-SCFI-2021.

- Demanda química de oxígeno (DQO): Es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica e inorgánica presente en el agua convirtiéndola, por las transformaciones químicas antes vistas en CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O con un agente oxidante fuerte, comúnmente el dicromato de potasio, la DQO a comparación de la DBO toma menos tiempo, normalmente tres horas y se expresa también en miligramos por litro (mg/L) [SEMARNAT, 2016].

La norma recomendada en México para medir este parámetro es la: NMX-AA-030/1-SCFI-2012.

Como conclusión a mayor DBO y DQO más contaminada está el agua, y aunque podrían parecer conceptos muy similares la DQO engloba a la DBO e incluye más información, pues nos muestra la oxidación de la materia biodegradable y no biodegradable de la muestra, mientras que la DBO solamente la materia biodegradable.

Otro indicador importante para medir la materia orgánica son los **sólidos** suspendidos totales (SST) los cuales se refieren a materia sólida en suspensión que pueden contener partículas orgánicas e inorgánicas insolubles, provienen principalmente de aguas residuales y de la erosión del suelo. Los SST pueden incluir arcilla, limo, materia orgánica y otros sedimentos. Una alta concentración de este contaminante provoca turbidez y reduce el alcance de la luz solar a la vida acuática impidiendo su desarrollo y afectando la biodiversidad [SEMARNAT, 2014].

La medición de los SST se expresa en mg/L o ppm y se realiza comúnmente por filtración de una muestra de agua para capturar las partículas suspendidas, posteriormente se seca y pesa

el residuo resultante, la norma correspondiente que sugiere el procedimiento para evaluar este parámetro es la NOM-AA-34-1976.

La NOM-127-SSA1-2021 contempla los sólidos disueltos totales (SDT), así se les consideran a los residuos menores a  $1.2\mu\text{m}$ , en ellos se incluyen sales inorgánicas (carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, fosfatos, nitratos de sodio, potasio, magnesio, calcio y hierro) y la materia orgánica. La conductividad depende de este parámetro, principalmente cuando se concentran sales minerales y pueden tener efectos muy significativos en el sabor, en concentraciones muy bajas el agua se percibe insípida, cerca de  $600\text{mg/L}$  no se percibe ningún cambio y arriba de  $1,200\text{mg/L}$  el sabor es muy desagradable, aunque es recomendable no exceder los  $1000\text{mg/L}$  porque aunque no se perciba un olor desagradable arriba de esta concentración se promueve la corrosión, lo que puede afectar las instalaciones y equipos [SGAPDS-1-15-Libro24].

La norma correspondiente que sugiere el procedimiento para evaluar este parámetro es la NMX-AA-034-SCFI-2015.

La turbidez es otro parámetro que considera este contaminante, es un parámetro físico ya que se incrementa el color aparente del agua respecto a la presencia de materia suspendida, orgánica e inorgánica, se mide en unidades nefelométricas de turbidez (UNT). La forma de medirla es con la pérdida de luz transmitida a través del agua por difracción de la luz al chocar con las partículas, esto provoca que no solo sea importante la cantidad de partículas sino su tamaño también. Los peligros de una turbidez alta son que adsorben compuestos tóxicos como plaguicidas, metales y microorganismos, fomenta el desarrollo de estos últimos y los protege de desinfectantes por lo que es de suma importancia bajar las UNT al principio del proceso, aunque en aguas subterráneas es común encontrar concentraciones muy bajas, del orden de  $<5$  UNT [SGAPDS-1-15-Libro24].

La norma correspondiente que sugiere el procedimiento para evaluar este parámetro es la NMX-AA-038-SCFI-2001.

Es importante llevar a concentraciones mínimas la materia orgánica ya que es fundamental la desinfección en los procesos y en contacto con diversos desinfectantes químicos como el cloro la materia orgánica reacciona generando subproductos de la desinfección tóxicos como trihalometanos o los ácidos haloacéticos [Correa, V. 2011].

### 1.8.3. Norma Oficial Mexicana

Actualmente en la última modificación de la norma correspondiente a las características del agua potable del 2021 no se contemplan directamente los parámetros de la DQO, DBO, COT ni SST, solamente podemos encontrar los SDT, turbiedad y los coliformes fecales con límites en  $1000\text{mg/L}$ ,  $4\text{UNT}$  y  $<1\text{UFC}/100\text{mL}$  respectivamente, esto se debe a la complejidad y el

costo económico que conlleva realizar los análisis de otros parámetros aunque según guías de CONAGUA la DQO debe tener un valor máximo de 4mg/L para ser entregada a la población como agua potable.

Además, se tienen las siguientes tablas con información acerca de la calidad del agua respecto a la DQO, DBO, SDT, coliformes y SST que, aunque son para agua superficial estos parámetros nos dan información respecto a lo que se espera para agua subterránea, se maneja así ya que directamente no existen esos datos para esta fuente debido a que había sido difícil encontrar concentraciones altas de materia orgánica [CONAGUA, 2020].

Tabla 5. Parámetros de contaminación respecto a la materia orgánica para fuentes de agua superficiales. [CONAGUA, 2018] (modificado)

Critero	Clasificación	Descripción
<b>DBO [mg/L]</b>		
$DBO_5 \leq 3$	Excelente	No contaminada
$3 < DBO_5 \leq 6$	Buena calidad	Agua superficial con bajo contenido de MO biodegradable
$6 < DBO_5 \leq 30$	Aceptable	Con indicio de contaminación, pero con capacidad de autodepuración o agua con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente.
$30 < DBO_5 \leq 120$	Contaminada	Agua superficial con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal.
$DBO_5 > 120$	Fuertemente contaminada	Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales
<b>DQO [mg/L]</b>		
$DQO \leq 10$	Excelente	No contaminada
$10 < DQO \leq 20$	Buena calidad	Agua superficial con bajo contenido de MO biodegradable
$20 < DQO \leq 40$	Aceptable	Con indicio de contaminación, pero con capacidad de autodepuración o agua con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente.
$40 < DQO \leq 200$	Contaminada	Agua superficial con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal.
$DBO_5 > 200$	Fuertemente contaminada	Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales
<b>SST [mg/L]</b>		



$SST \leq 25$	Excelente	Clase de excepción, muy buena calidad
$25 < SST \leq 75$	Buena calidad	Aguas superficiales con bajo contenido de sólidos suspendidos, generalmente condiciones naturales. Favorece la conservación de comunidades acuáticas y el riego agrícola.
$75 < SST \leq 150$	Aceptable	Aguas superficiales con indicio de contaminación. Con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente. Condición regular para peces. Riego agrícola restringido.
$150 < SST \leq 400$	Contaminada	Aguas superficiales de mala calidad con descargas de aguas residuales crudas. Aguas con alto contenido de material suspendido.
$SST > 400$	Fuertemente contaminada	Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales con alta carga de contaminante. Mala condición para peces.
<b>CF [NMP/100mL]</b>		
$CF \leq 100mL$	Excelente	No contaminada
$100 < CF \leq 200$	Buena calidad	Aguas superficiales con calidad satisfactoria como fuente de abastecimiento de agua potable y para riego agrícola.
$200 < CF \leq 1,000$	Aceptable	Aguas superficiales con calidad satisfactoria como fuente de abastecimiento de agua potable y para riego agrícola.
$1,000 < CF \leq 10,000$	Contaminada	Aguas superficiales con contaminación bacteriológica.
$CF > 10,000$	Fuertemente contaminada	Aguas superficiales con fuerte contaminación bacteriológica.
<b>SDT [mg/L]</b>		
$SDT \leq 1,000$	Dulce	
$1,000 < SDT < 2,000$	Ligeramente salobre	
$2,000 < SDT < 10,000$	Salobre	
$SDT > 10,000$	Salino	

### 1.8.4. Información de contaminación de materia orgánica en la Ciudad de México

Se lograron conseguir datos de influentes en plantas potabilizadoras de la Ciudad de México del año 2019 (Tabla 6), esta información se obtuvo de SACMEX y es confidencial, por lo que se omitirán los nombres de las plantas y se les asignara un código para referirnos a ellas.

Tabla 6. Información de DQO en el influente de algunas plantas potabilizadoras de la CDMX [SACMEX, 2019].

Planta potabilizadora	DQO (mg/L)
Parámetro	4
ETAP-001	10.6
ETAP-002	9
ETAP-003	10
ETAP-004	8
ETAP-005	13
ETAP-006	11
ETAP-007	7
ETAP-008	10
ETAP-009	20
ETAP-010	62

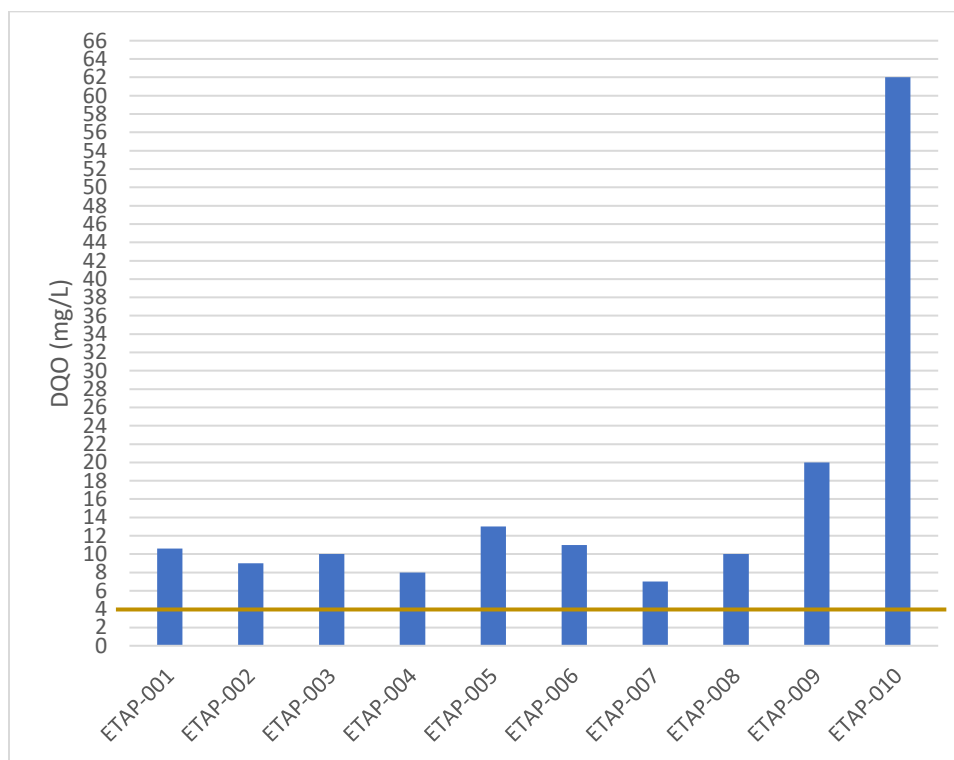


Figura 7. Gráfica de la concentración de DQO en el influente de distintas ETAPs. Datos obtenidos de SACMEX, 2019.  
\*Se muestra el valor máximo permitido en la línea amarilla para ilustrar qué tanto sobrepasan este valor los influentes de estas plantas.

Gracias a la información de las tablas podemos ver que, para 2019 el agua obtenida de los pozos para las plantas potabilizadoras de la Ciudad de México contiene concentraciones más altas de las permitidas de DQO.

### 1.8.5. Procesos de eliminación de materia orgánica

Existen distintos tipos de procesos de eliminación de materia orgánica y aunque varios procesos de tratamiento terciarios eliminan estos compuestos se mencionarán a continuación aquellos que lo hacen directamente y por tratamientos físicos, incluso estos los que más se utilizan específicamente para este fin:

#### 1.8.5.1. Coagulación/Floculación:

Aunque el objetivo principal de esta etapa es remover partículas suspendidas también resulta efectivo para la materia orgánica natural e incluso algunos constituyentes inorgánicos disueltos [Crittenden, J. et. al., 2012].

Se mencionó anteriormente la base de la coagulación y floculación y como ambos procesos trabajan en conjunto, aunque son distintos, existen distintos mecanismos de coagulación ya que el objetivo es deshacer la estabilidad de que provoca que las partículas se encuentren en suspensión como, por ejemplo:

- Coagulación por neutralización de carga: La desestabilización es fundamental para la coagulación, se debe reducir la carga superficial neta de las partículas suspendidas y se logra añadiendo compuestos con carga opuesta que tienden a ser adsorbidos en la superficie del coloide.
- Coagulación por compresión de la doble capa: Se agrega un electrolito a la suspensión (comúnmente NaCl), los iones con carga opuesta a la superficial neta de los coloides entran a la capa difusa comprimiéndola y reduciendo su energía requerida para permanecer estables, haciendo que se junten por fuerzas de Van der Waals.
- Coagulación por adsorción y puente interparticular: Se agrega un polímero de alto peso molecular con el objetivo de adsorber una o más partículas coloidales formando un puente interparticular que desestabiliza los coloides.
- Coagulación por coprecipitación con hidróxidos metálicos o barrido: cuando los hidróxidos **metálicos** de aluminio y hierro exceden la solubilidad se produce una precipitación rápida además de que pueden atrapar partículas coloidales.

Junto con el proceso de coagulación se debe ajustar la alcalinidad y el pH ya que esto ayudará a esta y las siguientes etapas. El uso de cada coagulante genera productos diferentes y para determinar la cantidad a usar de cada uno de ellos es importante apoyarse de una prueba de jarras.

La floculación proporciona el contacto de las partículas mediante dos etapas; la pericinética (partículas colisionan y permanecen juntas por movimiento browniano) y la ortocinética (partículas se mueven juntas por el movimiento del agua). La resistencia de los flóculos formados tiene una dependencia a los siguientes factores [Crittenden, J. et. al., 2012]:

- Tamaño, forma y compactación
- Tamaño, forma y origen de las micropartículas.
- Número y forma de los ligamentos de las partículas.

Existen dos clasificaciones de los floculadores; hidráulicos (flujo horizontal y vertical), estos aprovechan la gravedad y la energía del agua para generar movimiento y mecánicos los cuales requieren una fuerza externa dada por la energía que mueve el agitador.

Los floculadores hidráulicos son muy convenientes ya que no usan energía eléctrica, lo cual hace que se ahorren costos de servicios y mantenimiento, pero su diseño es un poco más complejo, son necesarios baffles diseñados de manera que se propicie un recorrido favorable para aprovechar la velocidad. En cuanto a este tipo de floculadores los de flujo horizontal se recomiendan para plantas con caudales menores a 50L/s y los de flujo vertical para caudales mayores a 50L/s por su profundidad (2 a 3m).

#### *1.8.5.2. Sedimentación.*

La sedimentación se usa para eliminar la fracción de sólidos sedimentables de los sólidos en suspensión (aproximadamente conforman el 60% de los sólidos perceptibles a simple vista). El sedimentador es una estructura que reduce la velocidad del agua para dar tiempo a que los flóculos se desplacen al fondo, estos sólidos son de distintos tamaños y formas ya que provienen de distintos compuestos, entre ellos viene materia orgánica y existen parámetros a evitar ya que causan disturbios tales como el viento, perturbaciones hidráulicas, corrientes inducidas por densidad o temperatura. La profundidad es un parámetro con el que se puede experimentar para evitar esto ya que, a mayor profundidad del sedimentador, mayor es la oportunidad de contacto [SGAPDS-1-15-Libro24].

Existen dos tipos de sedimentadores, esta clasificación depende de la dirección en la que entra el caudal, están los horizontales y los de caudal o “flujo” ascendente, en estos últimos el agua entra por la parte inferior del tanque y sube hasta los drenes del efluente, como consecuencia la sedimentación se da contraflujo y debe ser removida continuamente por presión hidrostática o por un mecanismo de rastras.

Los parámetros básicos para el diseño de un sedimentador son:

- Caudal de diseño: considerar el caudal máximo.

- Calidad fisicoquímica del agua: calidad del agua cruda.
- Características del clima: temperatura y lluvias.

Parámetros determinantes del tamaño [Crittenden, J. et. al., 2012]:

- Tiempo de retención

$$t = \frac{V}{Q} \text{ Ec. 1}$$

Donde:

t= tiempo de retención (h)

V= volumen del tanque (m<sup>3</sup>)

Q= gasto promedio diario (m<sup>3</sup>/h)

- Carga hidráulica

$$CH = \frac{Q}{A} \text{ Ec. 2}$$

Donde:

CH= carga hidráulica (m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>h))

Q= gasto promedio diario (m<sup>3</sup>/h)

A= superficie total de sedimentación (m<sup>2</sup>)

La carga hidráulica es un parámetro muy importante ya que esto va a definir las partículas que sedimenten, aquellas con velocidad de sedimentación superior a la carga hidráulica serán retenidas, mientras que las de velocidad inferior quedaran inmersas en el caudal.

- Carga en vertedores

$$C_V = \frac{Q}{L_V} \text{ Ec. 3}$$

Donde:

Cv= carga en vertedores (m<sup>2</sup>/d)

Q= gasto promedio diario (m<sup>3</sup>/h)

A= longitud total de los vertedores (m)

- Velocidad \*En sedimentadores horizontales

#### 1.8.5.3. Filtración

La filtración es un proceso físico para remover partículas suspendidas, entre ellas se encuentra la materia orgánica y existen diferentes métodos que conllevan filtración y distintos medios en los que sucede, a continuación, se explican algunos que favorecen la remoción de MO:

- **Filtración rápida:** Su principal característica es su operación a elevadas tasas de filtración (5 a 20 m/h), aunque retiene contaminantes no tan pequeños, elimina material mayor a 0.45mm, y tiene dos etapas, en la primera se realiza directamente la filtración dejando pasar el caudal de agua a través del material filtrante (comúnmente se conforma de diferentes medios Figura 8) y la segunda etapa es la de retrolavado, se conforma de sistemas hidráulicos o mecánicos para remover los **sólidos** que se queden en el filtro y puede ayudarse además de aire introducido para remover los **sólidos** del medio, el retrolavado puede durar de 10 a 20 minutos.

Propiedad	Unidad	Granate	Ilmenita	Arena	Antracita	Carbón activado granular
Tamaño efectivo	mm	0.2 - 0.4	0.2 - 0.4	0.4-0.8	0.8 - 1.2	0.8 - 2
Coefficiente de uniformidad	UC	1.3 - 1.7	1.3 - 1.7	1.3-1.7	1.3 - 1.7	1.3 - 2.4
Densidad	g/mL	3.6 - 4.2	4.5-5	2.65	1.4 - 1.8	1.3 - 1.7
Porosidad	%	45 - 58	No disponible	40-43	47 - 52	No disponible
Dureza	Moh	6.5 - 7.5	5-6	7	2 - 3	baja

Figura 8. Tabla de los distintos medios filtrantes que conforman los filtros rápidos. Recuperado y editado de [MWH,2012].

- **Filtración lenta:** Este tipo de filtración es muy similar a la filtración rápida, la única diferencia es el medio (filtro), el cual suele ser de arena y este medio diferente genera condiciones diferentes como la pérdida de carga, esta va aumentando poco a poco debido a que opera a baja tasa ( $< 0.5\text{m/h}$ ), son filtros muy fáciles de operar y no requieren de supervisión constante pero solo se recomienda su uso cuando el agua cumple con las siguientes características; turbiedad menor a 10NTU, color menor a 15UC y con ausencia de arcilla coloidal presente.

Característica	Valor
Tasa de filtración	$< 0.5 \text{ m/h}$
Distribución del medio	No estratificado
Duración de la carrera	20-60 días
Pérdida de carga	Inicial: 0.6 m, final: 2.4-3 m
Agua de lavado	No usa
Profundidad de grava	0.3 m
Drenaje	Tubería perforada

Figura 9. Tabla de características de filtros rápidos. Recuperado y editado de [MWH, 2012].

Para establecer un diseño se deben considerar los siguientes parámetros:

- Calidad del agua del influente y efluente requerido
- Tiempo de filtración
- Tipo de filtro

- Nivel de recuperación de agua
- Tipo de filtro
- Tamaño del filtro
- Numero de filtros
- Pérdida total de carga
- Control de velocidad de flujo
- Medio filtrante

Tasa de filtración

#### 1.8.5.4. Oxidación química

Este proceso se lleva a cabo comúnmente para potabilización, pero una condición importante que debe encontrarse en los contaminantes para proceder a esta etapa es que estos se encuentren en un estado reducido, recordemos que la oxidación involucra la pérdida de uno o más electrones.

Los agentes oxidantes que se emplean más comúnmente son:

- Cloro
- Dióxido de cloro
- Ozono
- Permanganato de potasio

## 1.9. Nitrógeno Amoniacal

El nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ ) es una molécula que pertenece a una parte del ciclo del nitrógeno, es una de las transformaciones que dan lugar a la vida y se encuentra en todo tipo de aguas residuales.

Esta molécula es producto de la fijación del nitrógeno orgánico al suelo por los seres vivos, aunque también se puede transformar mediante reacciones químicas, del ciclo del nitrógeno es la única reacción que no corresponde al tipo de óxido-reducción. Sabiendo que el nitrógeno es indispensable para la vida en distintos grados de concentración las aguas residuales domésticas se componen de 60 a 70% de nitrógeno amoniacal y de 30 a 40% de nitrógeno orgánico, en aguas municipales varía de 20 a 100mg/L de nitrógeno amoniacal, los diferentes sectores industriales pueden traer consigo mayores concentraciones y el exceso de esta puede traer las siguientes consecuencias negativas:

[Zangeneh, A. et al. 2021].

- Muerte por toxicidad en organismos acuáticos cuando se tienen concentraciones mayores a 1.5mg/L, sobre todo los peces son sensibles a este compuesto.
- Aceleración de la eutroficación hasta llegar a formación de estanques o pantanos.
- Desarrollo de la metahemoglobinemia; en menores de seis meses se desarrolla este padecimiento debido a que los nitritos oxidan el hierro de la sangre transformando al

transportador de oxígeno (hemoglobina) en metahemoglobina haciéndola incapaz de transportar el oxígeno, esto ocurre en menores de edad debido a que el desarrollo del sistema NADH<sup>+</sup> metahemoglobina reductora está incompleto.

- Interferencia en la desinfección del agua, ya que el nitrógeno reacciona con el cloro formando cloraminas en la primera etapa de la curva de cloración.
- Provoca la corrosión de ciertos metales y materiales de construcción.
- Problemas de olor y sabor.
- Demanda de O<sub>2</sub>

### 1.9.1. Ciclo del nitrógeno

El ciclo del nitrógeno consiste en cuatro fases; fijación, amonificación, nitrificación y desnitrificación, las cuales en conjunto crean el ciclo del nitrógeno el cual es indispensable para la vida como la conocemos [Encyclopaedia Britannica, 2023].

1. Fijación: comienza con el nitrógeno atmosférico (N<sub>2</sub>) el cual es el compuesto principal del aire con un 78%, sin embargo, a pesar de esto los seres vivos no podemos captar el nitrógeno sin antes cumplir su ciclo, por lo que el primer paso es la fijación del nitrógeno al suelo por acción de bacterias como Frankya, Clostridium, Azotobacter, Anabaena, Nostoc y bacterias purpuras en forma de amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)
2. Amonificación: consiste en la transformación de nitrógeno a amonio, este proceso ocurre en el suelo, aguas superficiales o sistemas acuáticos por medio de bacterias a partir de la materia orgánica
3. Nitrificación: Se divide en dos etapas:
  - Nitrificación: El amonio por acción de bacterias se convierte en nitrito por medio de Nitrosomonas y Nitrococcus (bacterias aerobias obligadas).
  - Nitratación: Los nitritos por acción de Nitrosobacter se convierten en nitratos, los cuales son necesarios para que las plantas asimilen el nitrógeno y creen proteínas ya que lo hacen solamente cuando se encuentra en esta molécula. Los animales herbívoros comen estas plantas, y los animales carnívoros comen a los animales herbívoros, cuando mueren sus restos orgánicos pasan por el proceso de putrefacción o amonificación y sigue el proceso antes mencionado.
4. Desnitrificación: Si los nitratos no son aprovechados se convierten en nitritos los cuales pasan por un proceso llamado desnitrificación por acción de pseudomonas y otras bacterias, esos nitritos son descompuestos liberando nitrógeno al ambiente mientras esas bacterias aprovechan su energía.

De esta manera circula el nitrógeno, obteniendo así un diagrama como el que se muestra en la Figura 10.



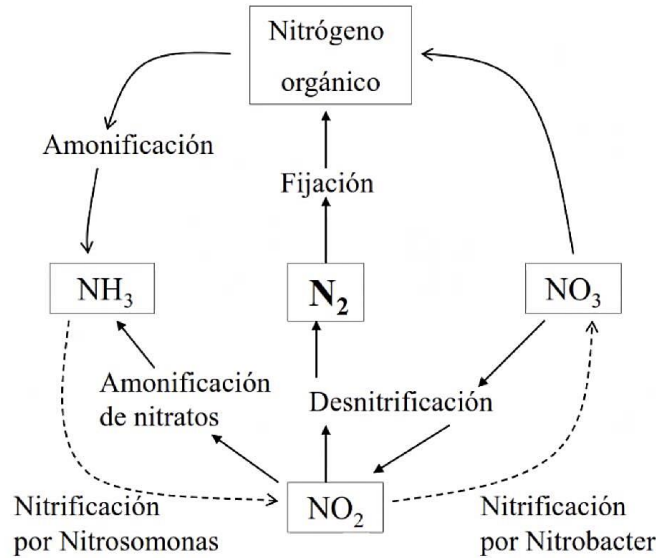


Figura 10. Ciclo del nitrógeno [Gonzales, S. 2022].

### 1.9.2. Contaminantes

El nitrógeno es común encontrarlo en exceso en aguas residuales agrícolas, dado que estas son las que más se descargan en volumen por su uso tan requerido en fertilizantes y biocidas [FAOU ,2018], en los vertidos municipales se encuentra principalmente en la orina y en los industriales existen varias fuentes pero las más comunes son las industrias agrícolas, alimentarias y químicas, al tener presencia en tantos sectores de tantas formas la contaminación del nitrógeno amoniacal ha ido en aumento con el paso del tiempo hasta que hoy en día lo vemos como un contaminante muy presente y de alto riesgo [Xiang, S. et.al., 2020]. En química el nitrógeno es un compuesto muy complejo debido a sus estados de oxidación los cuales le permiten al nitrógeno tener diferentes formas en las moléculas, además de que depende si se encuentra en un ambiente aerobio o anaerobio para tomar otras formas [MWH, 2012]

La forma más común de encontrar al nitrógeno en aguas contaminadas es de manera oxidada, en forma de amonio, amoniaco, gas nitrógeno, ion nitrito y ion nitrato. Algo muy importante de destacar es que dependiendo del pH podemos encontrar al nitrógeno en forma de amoniaco o amonio, tal como se muestra en la Figura 11.

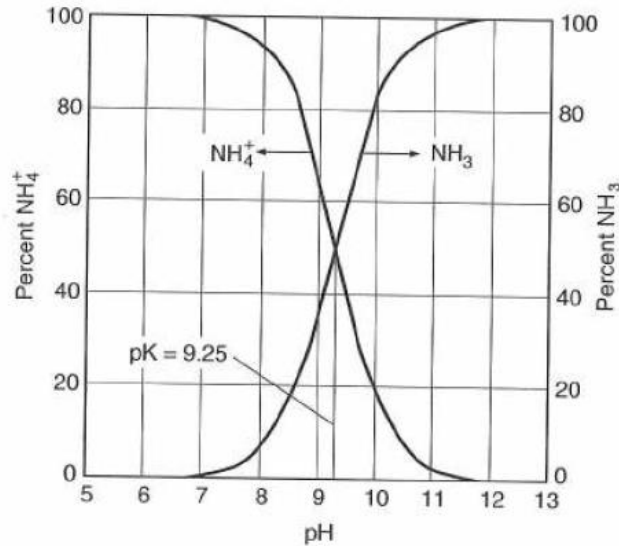


Figura 11. Variación de las formas del nitrógeno según su pH [Metcalf, L. Eddy, H. 1991].

Esta figura es muy importante para tener en cuenta durante el proceso de tratamiento de agua, ya que como vimos, en el ciclo del nitrógeno el tener una u otra molécula nos conduce a una vía diferente del proceso además de que el amoníaco es más tóxico a pH elevado por lo que hay que cuidar que se encuentre lo más cercano a 7.

Debido a sus propiedades físicas el nitrógeno a veces, dependiendo de su estado de oxidación y en que molécula se encuentre no puede olerse ni sentirse y puede ser potencialmente peligroso y existen dos maneras en las que el nitrógeno puede llegar al agua subterránea [Metcalf, L. Eddy, H. 1991]:

1. Por procesos naturales; incluyen la precipitación, la meteorización de minerales y la descomposición de la materia orgánica.
2. Actividades humanas, tales como; la escorrentía de terrenos cultivados, efluentes de lagunas y tanques sépticos, fertilización excesiva con nitrógeno, deforestación y rotación de cultivos. [Heaton, 1985].

El principal problema de estos compuestos es que son móviles en fuentes subterráneas y no se absorben por los minerales que componen los acuíferos y no precipitan como mineral por lo que grandes cantidades de nitrato disuelto aparecen en el agua subterránea [FAOUN, 2018].

### 1.9.3. Norma Oficial Mexicana

La NOM-127-SSA1-1994 con modificación en el 2000 establece que los límites permisibles para el nitrógeno en sus diferentes formas son:

Tabla 7. Límites permisibles de las diferentes formas del nitrógeno en la NOM-127-SSA1-2021

Parámetro	Unidad	NOM-127-SSA1-1994 (2000)
N nitratos	(mg/L)	10
N nitritos	(mg/L)	1
N amoniacal	(mg/L)	0.5

#### 1.9.4. Información de contaminación de materia orgánica en la Ciudad de México

Datos de influente en plantas potabilizadoras de la ciudad de México del año 2019:

Tabla 8. Información de las distintas formas en que se encuentra el nitrógeno en el influente de algunas plantas potabilizadoras de la CDMX [SACMEX, 2019].

Planta potabilizadora	N nitratos (mg/L)	N nitritos (mg/L)	N amoniacal (mg/L)
NOM-127-SSA-1994 (2021)	10	1	0.5
ETAP 1	0.43	0.01	0.10
ETAP 2	0.43	0.01	0.10
ETAP 3	0.40	0.01	0.80
ETAP 4	0.40	0.01	0.29
ETAP 5	0.43	0.01	1.57
ETAP 6	1.12	0.02	0.46
ETAP 7	0.38	0.01	1.50
ETAP 8	2.45	-	2.03
ETAP 9	2.10	0.01	4.10
ETAP 10	5.66	0.02	5.84

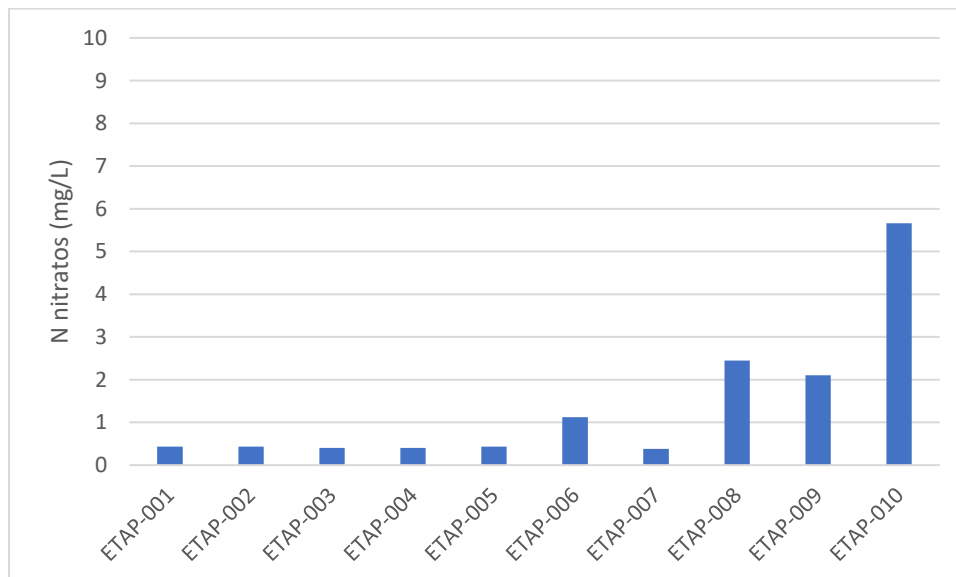


Figura 12. Gráfica de N nitros en el influente de varias plantas de la CDMX, [SACMEX 2019].

En la Tabla 8 podemos ver que, para 2019 el influente que llega a las plantas en ningún caso contiene más concentración de nitrógeno en forma de nitros que la permitida según la NOM-127-SSA1-2021.

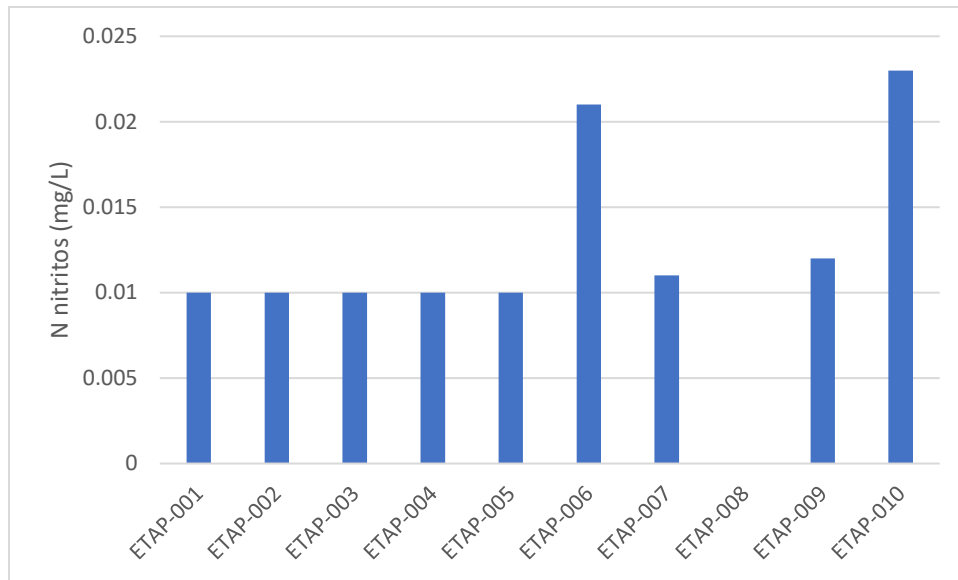


Figura 13. Gráfica de N nitros en el influente de varias plantas de la CDMX, [SACMEX 2018].

En la Tabla 8 podemos ver que, para 2019 el influente que llega a las plantas en ningún caso contiene más concentración de nitrógeno en forma de nitros que la permitida según la NOM-127-SSA1-2021.

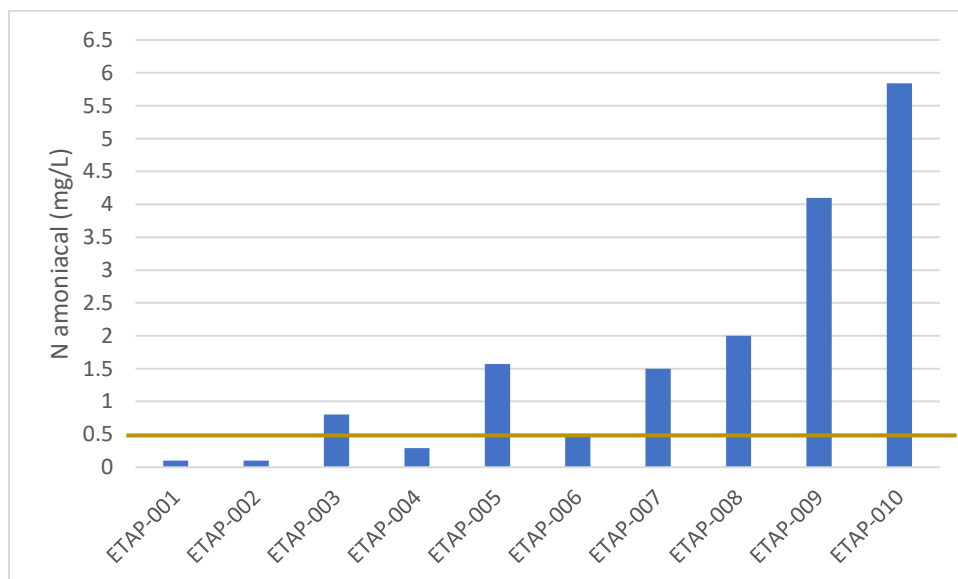


Figura 14. Gráfica de N amoniacal en el influente de varias plantas de la CDMX, [SACMEX 2018].

En la Tabla 8 podemos ver que, para 2019 el influente que llega a seis ETAP's (más del 50% de las plantas) contienen mayor concentración de nitrógeno amoniacal que la permitida según la NOM-127-SSA1-2021.

### 1.9.5. Procesos de eliminación de nitrógeno amoniacal

Los procesos conocidos y estudiados actualmente para la eliminación de nitrógeno amoniacal para conseguir agua potable de una fuente subterránea que cumpla con la norma correspondiente incluyen tratamientos físicoquímicos y biológicos, para seleccionar la tecnología más adecuada a usar se deben considerar los factores previamente mencionados por lo que se mencionan a continuación dichas tecnologías para posteriormente evaluar y elegir:

#### 1. Ozono:

Además de ser un excelente desinfectante, el ozono es desodorante, decolorante y ayuda a disminuir otros compuestos como carbono orgánico disuelto, contaminantes orgánicos (fenoles, detergentes, pesticidas) y algunos compuestos inorgánicos como hierro y manganeso, precursores de los THM, cianuros, sulfuros y nitrógeno amoniacal, la inclinación hacia eliminar alguno de estos contaminantes depende de la concentración de ozono, la exposición y la etapa del proceso donde se aplique [MWH, 2012].

Otras aplicaciones son como pretratamiento ya que mejora la coagulación actuando sobre la superficie de los coloides en suspensión cambiando la carga superficial reduciendo hasta un 25% el uso de coagulante también aumenta la biodegradabilidad y esto es lo que favorece la eliminación de nitrógeno amoniacal entre otros compuestos inorgánicos (Tabla 9).

Tabla 9. Reacción del ozono con compuestos inorgánicos [Rodríguez, 2003]

Compuesto	Reacción	Demanda de O <sub>3</sub>
Fe(II)	$2\text{Fe}^{2+} + \text{O}_3 + 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_3 \downarrow + \text{O}_2 + 4\text{H}^+$	0.44 g O <sub>3</sub> /g Fe
Mn(II)	$\text{Mn}^{2+} + \text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MnO}_2 \downarrow + \text{O}_2 + 2\text{H}^+$	0.88 g O <sub>3</sub> /g Mg
	$2\text{Mn}^{2+} + 5\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{MnO}_4^- \downarrow + \text{O}_2 + 6\text{H}^+$	2.22 g O <sub>3</sub> /g Mg
NH <sub>3</sub>	$\text{NH}_3 + 4\text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_3^- + 4\text{O}_2 + \text{H}_3\text{O}^+$	Según el pH
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	$\text{NO}_2^- + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{O}_2$	1.04 g O <sub>3</sub> /g NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
S <sub>2</sub> <sup>-</sup>	$\text{S}^{2-} + 4\text{O}_3 \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 4\text{O}_2$	6.00 g O <sub>3</sub> /g NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
CN <sup>-</sup>	$\text{CN}^- + \text{O}_3 \rightarrow \text{CNO}^- + \text{O}_2$	1-1.8 g O <sub>3</sub> /g CN <sup>-</sup>
	$2\text{CCN}^- + 2\text{H}^+ + 3\text{O}_3 \rightarrow 2\text{CO}_3 + \text{N}_2 + 3\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	

Hablando de nuestro contaminante de interés el nitrógeno amoniacal (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NH<sub>3</sub>) es completamente diferente en cuanto a propiedades químicas, el amoníaco está compuesto por una cadena de tres átomos de hidrogeno neutros mientras que los

hidrógenos del amonio tienen una carga positiva, sin embargo en condiciones adecuadas y estables de pH en el agua tienden a estabilizarse y en contacto con una dosis de ozono cuando este pH es básico convierten estos compuestos nitrogenados en nitritos y nitratos lo cual es una ventaja ya que además de no tener en exceso esos compuestos en los influentes de nuestros pozos en la CDMX son más fáciles de eliminar con una oxigenación intensa, a este proceso se le conoce como ozonización [SGAPDS-1-15-Libro23].

El ozono requiere técnicas de mezclado complejas para poder descomponerse, formar el radical hidroxilo y así oxidar, ya que no se disuelve en el agua de la misma manera que otros agentes lo que hace su uso un poco más complicado, pero debido a su acción oxidante tan fuerte es que es frecuentemente empleado, el ozono reacciona de dos maneras con contaminantes y microorganismos; por oxidación directa y a través de la acción de los radicales hidroxilos formados durante su descomposición (estas dos reacciones se ilustran en la Figura 15), después del proceso de ozonización permanece en el sistema una cantidad de ozono, a este se le conoce como ozono residual y es importante que permanezca ya que garantiza la eficacia de la desinfección y eliminación de contaminantes [SGAPDS-1-15-Libro24].

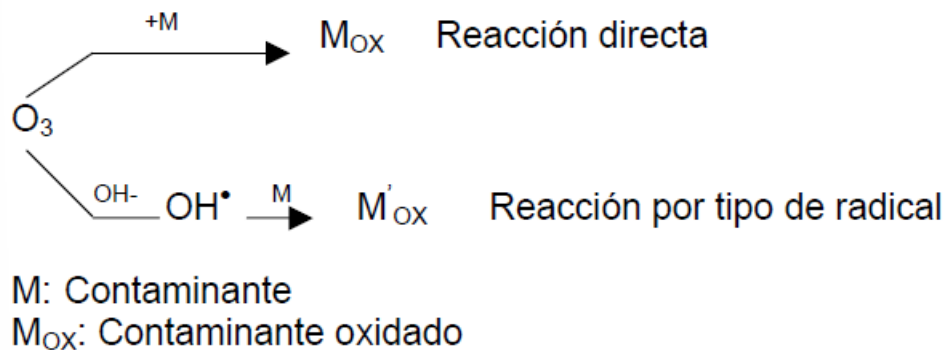
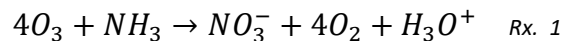


Figura 15. Reacciones básicas del ozono en agua [López, S. 2008].

Debido a que la intervención de radicales hidroxilos son fundamentales para generar la reacción y con ella llevar a cabo el proceso se debe medir la dosis de ozono antes de que aparezca cualquier residuo de este en el agua, a esto se le conoce como demanda de ozono, su tasa de descomposición en el agua generalmente se representa con una cinética de primer orden y se puede usar un modelo de desintegración ya que representa muy bien el fenómeno, aunque la realidad es que la desintegración de ozono es una serie de reacciones de enésimo orden [SGAPDS-1-15-Libro24].

El ozono oxida al amoniaco de acuerdo con la siguiente reacción:



Los parámetros que favorecen esta reacción de descomposición son: pH alto, alta concentración de ozono, algunos materiales orgánicos y la eliminación de cierta cantidad de ozono residual, aunque los materiales que se usan para eliminación (iones carbonato y bicarbonato) pueden interferir en el proceso como puede suponerse su buen funcionamiento depende del equilibrio de estos factores [López, S. 2008] y se encuentra dependiendo de:

- Concentración y tipo de contaminantes presentes en el agua.
- Control de tiempo de contacto del agua con el ozono.
- Oxidación de materia orgánica; aunque es un objetivo puede generar subproductos no deseados.

Los factores que aumentan la estabilidad del ozono residual son; pH bajo, alcalinidad alta, baja concentración de carbono orgánico total y temperaturas bajas.

Otras medidas que deben tomarse en cuenta son respecto a la seguridad, el ozono a concentraciones >23% es inestable y tiende a generar explosiones y en condiciones ambientales se descompone de manera acelerada por lo tanto no debe almacenarse ni transportarse esto significa que debe generarse in situ y para ello existen diversos métodos como fotoquímicos, electrolíticos y corona de descarga, siendo esta última la más utilizada en potabilización de agua.

Los generadores de corona operan con aire que pasa por un compresor, filtros y secadores

Además de la remoción de nitrógeno amoniacal debe tenerse en cuenta que el ozono es un agente para otras funciones como [López, S. 2008]:

- Desinfección bacteriana
- Inactivación de virus
- Oxidación de sustancias orgánicas, hierro y manganeso
- Decoloración
- Remoción de olor y sabor
- Eliminación de algas
- Microfloculación de sustancias orgánicas disueltas
- Reducción de turbiedad
- Pretratamiento para procesos biológicos

Criterios de diseño:

Debido a que el ozono se puede utilizar como eliminador de varios contaminantes primero debe especificarse la función para la cual vamos a utilizar este sistema (desinfección, oxidación y/o pretratamiento), para la desinfección el factor limitante es la velocidad de inactivación de microorganismos y para la oxidación la transferencia de masa.

Para el caso de la desinfección se supondrá un reactor tipo pistón para eficientar el tiempo de contacto y el espacio de la cámara de contacto, esto implica para una mayor eficiencia que debe haber cuatro etapas en la cámara, dos de disolución de ozono y otras dos para la reacción.

En condiciones normales de temperatura y presión es recomendable mantener una relación de 0.15 a 0.20 el gasto de alimentación de ozono respecto al del agua, los pasos de diseño entonces se harán por cada etapa [SGAPDS-1-15-Libro23]:

- Primera etapa: Demanda inicial de ozono
  1. Fijar el residual a partir de literatura o experimental mediante pruebas de tratabilidad.
  2. Calcular el TRH

$$TRH = \frac{ct}{c_{O_3}} \quad Ec. 4$$

Donde:

C: concentración residual del desinfectante (mg/L)

t: tiempo de contacto (min)

C<sub>O<sub>3</sub></sub>: concentración de ozono (mg/L)

3. Multiplicar TRH por 0.5 para disminuir cortos circuitos hidráulicos o realizar estudios de trazado.
4. Calcular volumen del primer cámara de contacto con el TRH corregido.

$$V = Q(TRH_c) \quad Ec. 5$$

Donde:

V: volumen de la cámara de contacto (m<sup>3</sup>)

Q: Caudal del influente (m<sup>3</sup>/h)

TRH<sub>c</sub>: TRH corregido (min)



5. El volumen nos ayudará a obtener otros datos a partir de la siguiente ecuación:

$$V = ALH = SH \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

V: volumen de la cámara de contacto (m<sup>3</sup>)

A: ancho de la cámara de contacto (m)

L: largo de la cámara de contacto (m)

H: altura de la cámara de contacto (m) – generalmente entre 4 y 7m

S: área de la cámara de contacto que resulta de AxL

\*El largo debe ser 1.5 veces el ancho

$$S = 1.5A * A \quad \text{Ec. 7}$$

$$A = \sqrt{\frac{S}{1.5}} \quad \text{Ec. 8}$$

$$L = \frac{V}{AH} \quad \text{Ec. 9}$$

- Segunda etapa: Inactivación de microorganismos con el residual fijado a la salida de la primera etapa.
  1. Obtener valor de la tasa de consumo de ozono (k') por medio de pruebas de tratabilidad o literatura.
  2. A partir de esta etapa hasta la cuarta el TRH se obtiene iterando hasta la opción más conveniente:

$$Ct = TRH_t \frac{C_0}{k't} (1 - e^{-k't}) \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

TRH<sub>t</sub>: Es el TRH obtenido en etapa uno, pero multiplicado por 0.4 para evitar formación de cortos circuitos (min)

C<sub>0</sub>: concentración inicial de ozono (mg/L)

t: tiempo de contacto (min)

\*El valor de Ct será entonces la diferencia entre Ct en etapa uno y el obtenido en esta etapa

3. Calcular concentración de ozono que abandona la etapa dos.

$$[C] = C_n e^{-kt} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

Cn: concentración de ozono anterior (mg/L)

4. Obtener dimensiones de la segunda etapa fijando la altura de 4 m.

- Tercera etapa: Adición de ozono con mezclado

1. A los 10 minutos comienza esta etapa, por lo que hay que calcular el TRH a ese tiempo multiplicando por 0.5

2. Se fija un residual de 0.3 y se calcula Ct:

$$Ct = TRH(F)(C_0) \quad Ec. 12$$

Donde:

F: factor de correlación para evitar cortos circuitos = 0.5

C0: concentración inicial de ozono para tercera etapa y residual de la segunda.

\*El valor de Ct requerido es la diferencia entre Ct obtenido en las etapas dos y tres

3. Se dimensiona la tercera etapa igual que las anteriores fijando una altura de 4m.

- Cuarta etapa:

1. En esta etapa se debe mantener un valor de Ct de 0.344 min y el residual de ozono debe ser de 0.3, con ello se calcula TRH con la ec. 10.

$$t = -\frac{1}{k'} \ln \left( 1 - \frac{k' Ct}{FC C_0} \right) \quad Ec. 13$$

Donde:

k': es el obtenido para el consumo de ozono

F: 0.4 \*sin mezclado

2. Verificar el valor de TRH con Ct= 0.344 de la siguiente ecuación:

$$Ct = TRH(FC) \left( \frac{C_0(1-e^{-k't})}{k't} \right) \quad Ec. 14$$

3. Se obtienen las dimensiones de esta etapa igual que las anteriores.

\*Si la desinfección se aplica al final, la cuarta etapa cambia debido que las dimensiones deben ser considerablemente menores para mantener un residual de ozono de 0.4 o lo que se fije durante 4 minutos.

\*\*Si el ozono se aplica para desinfectar al inicio y se busca un beneficio para los procesos siguientes el tiempo de retención debe ser tal que el ozono sea aprovechado eficazmente antes que el agua abandone la cámara de contacto.

Para un residual a la salida menor a 0.1 el tiempo de retención se calcula de la siguiente manera:

$$t = -\frac{1}{k'} \ln \frac{C}{C_0} \quad \text{Ec. 15}$$

Ventajas y desventajas de este proceso:

Tabla 10. Ventajas y desventajas de la ozonación [SGAPDS-1-15-Libro23]

Ventajas	Desventajas
Oxidante fuerte	Altamente corrosivo y tóxico
No da sabor ni olor al agua	Costo inicial muy elevado (equipo y energía)
Reduce TOC, color, olor, turbidez, compuestos orgánicos, inorgánicos y desinfecta.	Generación in situ.
Poder desinfectante muy alto	Vida media de 25 minutos
	Calidad de los métodos de inyección del gas
	Para la eliminación de algunos contaminantes son necesarios equipos y procesos extra.

## 2. Cloración a punto de quiebre

La cloración es un método comúnmente usado para la desinfección, también como control de propiedades organolépticas como el sabor y olor, además previene la formación de algas y precipita sustancias fácilmente oxidables como Fe(II), Mn (II) y H<sub>2</sub>S, es importante eliminar o mantener al mínimo estas últimas sustancias para comenzar con la eliminación de nitrógeno amoniacal ya que es más difícil que el cloro reaccione con este habiendo sustancias más propensas, también es importante mantener un pH mayor a 6 para tener amoniaco ya que es la forma en que reacciona con cloro, (en la figura se puede ver el efecto de remoción de nitrógeno amoniacal por punto de quiebre respecto al pH), el cloro interviene directamente como oxidante, en la fase inicial de este proceso se oxida el amoniaco y al hacerlo se forman

unas sustancias llamadas cloraminas; monoclорamina, dicloramina y tricloramina (Rx. 2, Rx.3 y Rx.4 respectivamente), dependiendo de la cantidad de cloro que se agregue y el tiempo, comúnmente va de segundos a minutos [Xiang, S. 2020] la suma de estos tres productos de reacción se llama cloro combinado, pero es común que queden residuos de cloro libre, por lo que al cloro libre junto con el cloro combinado se les llama cloro total\*, conforme se sigue añadiendo cloro y dependiendo de la concentración de amoníaco llega un punto donde la relación molar  $Cl_2/NH_3=1$ , se sabe que después de esto si se sigue añadiendo cloro el pH baja y el cloro combinado se vuelve inestable debido a que se oxidan las cloraminas hasta el máximo, cuando esto sucede en todas se le llama punto de quiebre o “break point” (BP), representado como relación molar es  $Cl_2/NH_3 = 1.5$ , se podría decir que aquí es donde termina este proceso pero es importante seguir añadiendo cantidades de cloro para tener cloro residual libre y así garantizar una desinfección continua y cumplir las normas de calidad del agua [MWH, 2003].

El proceso de todas estas etapas se puede visualizar en la Figura 17. Demanda de cloro en agua [MWH, 2003]editado.

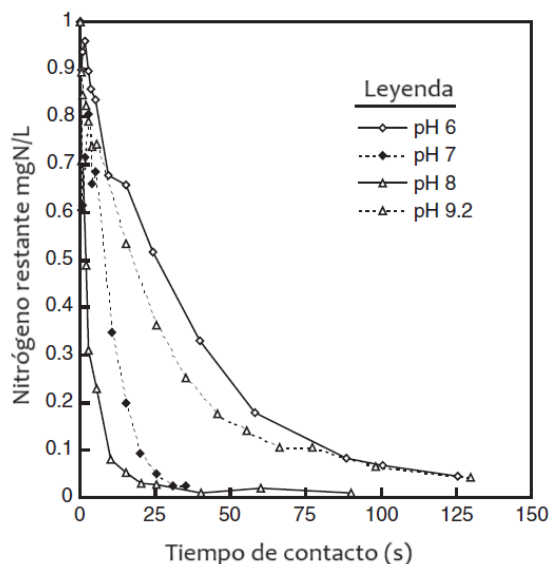


Figura 16. Efecto del pH sobre la cloración a punto de quiebre  $T=15$  a  $18.5^{\circ}C$ ,  $NH_3=1mg/L$ ,  $[Cl_2/NH_3]-10$ . [MWH, 2003 editado]

\*Cloro libre:  $HOCl + OCl^-$

\*Cloro combinado:  $NH_2Cl + NHCl_2 + NCl_3$

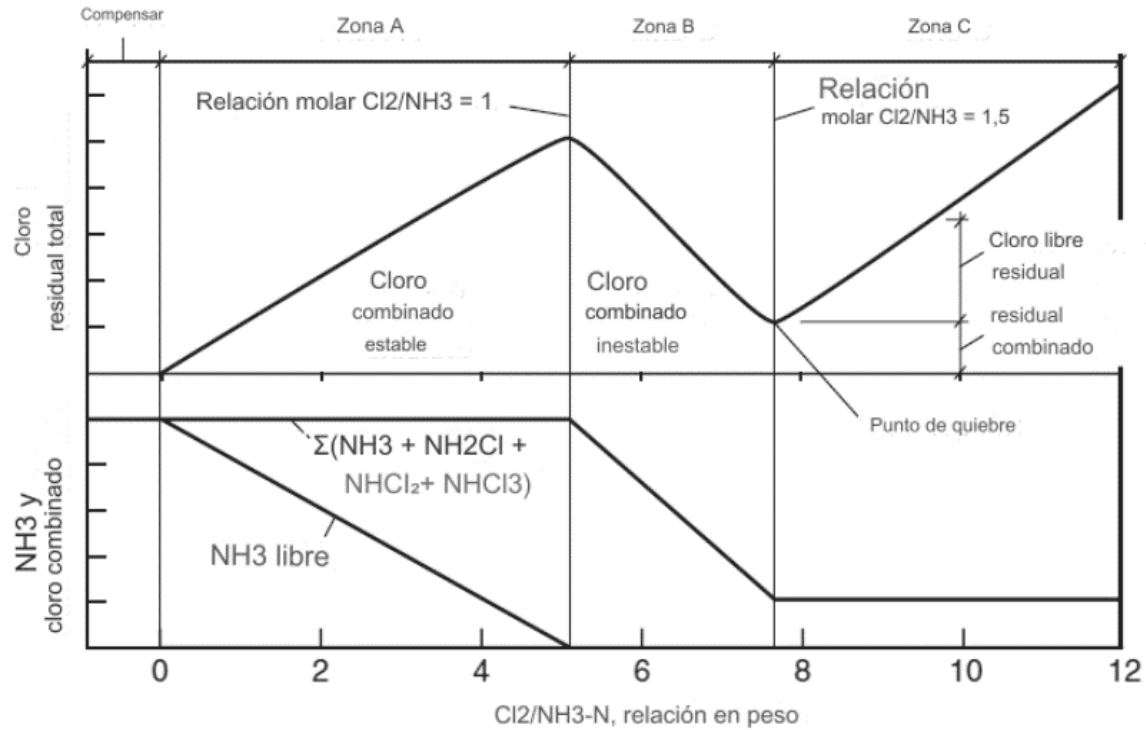
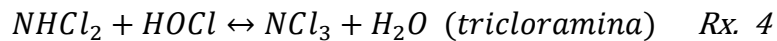
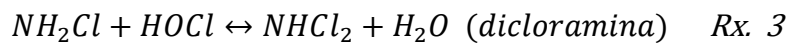
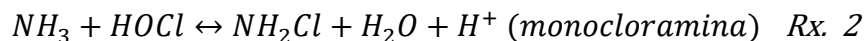


Figura 17. Demanda de cloro en agua [MWH, 2003]editado.

El proceso no suele ser utilizado más que en plantas potabilizadoras debido a la cantidad de cloro usado para la eliminación de nitrógeno amoniacal, además de que las cloraminas son subproductos tóxicos y dañinos, pero es un proceso flexible, económico y estable en cuanto a temperatura y pH, además las cloraminas también funcionan como desinfectantes, a este proceso se le conoce como cloraminación y producen menos sabores y olores relativos al cloro [Zhang, Y. Love, N. Edwards, M. 2009].



Criterios de diseño:

Los principales factores que afectan este proceso son; tiempo de contacto, temperatura y pH por lo que se emitirán recomendaciones a cerca de los valores de cada parámetro para el diseño.

- Tiempo de contacto: segundos hasta 10 minutos llegar a una relación molar de  $Cl_2/NH_3=1$ , de 10 a 60 minutos llegar a  $Cl_2/NH_3=1.5$  y de 10 a 60 minutos el último tratamiento para desinfección continúa.

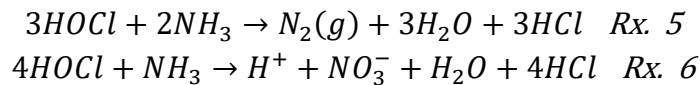
- A mayor temperatura se acelera la eliminación de microorganismos, pero el cloro es más estable en agua fría lo que hace que se opte por temperaturas bajas ya que el objetivo es la remoción de nitrógeno amoniacal, aunque la concentración de cloro residual sea mayor.
- pH: Se debe comenzar con un pH de 6 o mayor y se puede determinar tomando en cuenta la Figura 16, aunque a mayor alcalinidad, mayores dosis de cloro requerido para una misma temperatura y tiempo de contacto.

Para obtener la dosis de cloro necesaria para este proceso es indispensable fijar el objetivo de concentración al que deseas el efluente y guiarte de las reacciones Rx.1, Rx.2 y Rx. 3 y su estequiometría para calcular el reactivo, no obstante, se organizará este cálculo en una serie de pasos para facilitar su entendimiento:

- Primera etapa:

Se calculará la cantidad de cloro necesaria para llegar al punto de quiebre a partir de las siguientes reacciones:

La formación de cloraminas está determinada por las reacciones Rx.4, Rx. 3 y Rx. 4, pero la formación de amoniaco a nitrógeno e ión nitrato se describen en las Rx. 5 y Rx. 6:



- Segunda etapa:

Para la desinfección es importante tomar en cuenta la dosis de cloro libre requerida determinada por la NOM-127-SSA1-2021 que es de 0.2 a 1.5mg/L

\*La eficiencia de formación de cloramina varía dependiendo las condiciones físicas, químicas y ambientales por lo que se deben realizar pruebas para determinar el valor o consultar literatura.

\*\*La tasa de aplicación de cloro depende de las necesidades y limitaciones del sistema.

### 3. Intercambio iónico

El intercambio iónico puede ser considerado un caso especial de la adsorción, pues en eso se basa el proceso que se lleva a cabo, las operaciones de intercambio iónico son básicamente

reacciones químicas de sustitución entre un electrolito en solución y otro en estado insoluble, esto se lleva a cabo gracias a que cada solución tiene distintas cargas electrostáticas que favorecen el desplazamiento de los iones, tomando en cuenta lo anterior es necesario un tratamiento previo para evitar la presencia de compuestos que puedan complicar la remoción del contaminante de interés [Xiang, S. 2020].

Para que este proceso se lleve a cabo es necesario un material de intercambio iónico el cual puede ser natural o sintético, el más usado es la zeolita natural y se sabe que existen más de 40 de ellas aunque solo siete de ellas se han encontrado en cantidades considerables para su uso industrial, su funcionamiento depende de que cada átomo de aluminio es remplazado por uno de silicio generando una carga negativa en el esqueleto de la estructura química del compuesto, con ello cationes como el nitrógeno amoniacal equilibran la carga negativa en los poros, por lo que se unen a este. La eficiencia de intercambio de las zeolitas es diversa pero las principales utilizadas tienen registros específicos de estos datos, tal como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Eficiencia de intercambio en diferentes zeolitas [López, M. 2008].

TIPO DE ZEOLITA	RELACIÓN Si/Al	DENSIDAD (g/cc)	meq CATIÓN/g ZEOLITA
Philipsita	3.6	0.67	0.91-1.64
Chabazita	3.2-3.8	0.59-0.63	0.55-1.29
Heroinita	3.7-4.3	0.48-0.93	0.54-1.54
Clinoptilolita	4.5-5.7	0.60-0.63	0.27-0.58
Mordenita	5.5-6.0	0.46-0.90	0.27-0.58

Para que un intercambiador iónico sea eficiente debe tener las siguientes características [López, M. 2008]:

- Contener sus propios iones
- Ser insoluble en agua
- Proporcionar suficientes espacios en su estructura porosa para intercambio del contaminante de acuerdo con su concentración

Es uno de los métodos más viables en la remoción de nitrógeno amoniacal, el proceso se puede ajustar a la remoción de este contaminante en específico a esto se le denomina selectivo ya que la resina actúa eligiendo específicamente a los iones  $\text{NH}_4^+$  para intercambiarlos antes que a iones de sodio, calcio y magnesio. El proceso es estable, de bajo costo, eficiente y poco sensible (resiste temperaturas desde  $0^\circ\text{C}$  hasta  $35^\circ\text{C}$ ), además puede ser utilizado como preproducción de amonio en plantas de tratamiento de agua residual antes de un proceso biológico, lo que lo hace ideal para un proceso de potabilización, ya que no es necesario remover concentraciones tan altas como en las PTAR. [SGAPDS-1-15-Libro24].

En sus desventajas entra el costo de los productos químicos empleados para la regeneración, ya que conforme van intercambiado sus iones se quedan sin posibilidad de seguirlo haciendo y es necesario hacer un tratamiento para regenerar y devolver la capacidad de intercambio original, esto se ve directamente afectado en la eficiencia, además estos productos químicos regenerantes son corrosivos y peligrosos, comúnmente se utiliza cloruro de sodio al 2%, las plantas que operen estos sistemas deberán contar con personal capacitado para su mantenimiento, de no ser así las resinas de intercambio iónico pueden ser fácilmente destruidas, además monitorear constantemente el efluente para determinar el momento de regeneración de la resina si la concentración de amoníaco no es constante [Chávez, A. 2020].

Aunque la regeneración de las resinas exista para reutilizar estas mismas existe un **límite** ya que también se deterioran y van perdiendo la estabilidad, este proceso es completamente normal y es de naturaleza química manifestándose en su capacidad de intercambio por lo que también es importante tomar en cuenta este factor ya que a determinado tiempo será indispensable comprar nueva resina [Nevárez, 2009], el deterioro se debe a:

- Ruptura de la resina
- Despolimerización e hinchamiento
- Daño de grupos funcionales
- Ensuciamiento por precipitación de elementos ajenos

Es indispensable que al amoníaco obtenido de la regeneración se le dé un tratamiento para removerlo por lo que se debe conducir a torres de separación, separación por vapor, electrólisis, o algún otro método, el sulfato de amonio obtenido de la regeneración se puede utilizar como fertilizante. Esta es una tecnología muy conocida y se tiene información acerca de los porcentajes de remoción que se consiguen con ella para diferentes contaminantes Tabla 12.

Tabla 12. Eficiencias de remoción por intercambio iónico selectivo [SGAPDS-1-15-Libro24]

Parámetro	Promedio*	Percentiles (promedios)		
		10%	50%	90%
DBO	40	-	38	-
DQO	28	53	24	2
SST	62	86	70	36
N-NH <sub>3</sub>	84	91	87	72
COT	0	0	0	0

El intercambio iónico es considerado un proceso no convencional debido a su poca capacidad de remoción comparado con el tamaño que ocupan las torres [SGAPDS-1-15-libro24].



A continuación, se muestra por etapas el dimensionamiento de un sistema como este para remoción de nitrógeno amoniacal:

- Primera etapa: Cálculo del volumen de la resina

Aunque la Zeolita (clinoptilonita) es la resina más utilizada para este proceso por sus propiedades e interacción con nitrógeno amoniacal no hay que dejar de lado que lo primero que debe establecerse es la elección del material intercambiador y se elige con base a:

- Capacidad de intercambio iónico (CII) expresada en eq/L o meq/g
- Propiedades de la resina (cantidad de regenerante y agua para enjuague)
- Volumen de resina necesario

Para el diseño de las columnas se toman en cuenta las siguientes características:

- Velocidad necesaria de flujo (determina el diámetro mínimo y máximo permisible en la columna)
- Tamaño del lote a tratar entre regeneraciones (para determinar las dimensiones de la columna tomando en cuenta profundidad del lecho de resina)
- Capacidad de la resina en condiciones operacionales

Gracias a la utilización de columnas para diferentes fines se tienen datos de dimensionamiento generales que garantizan una buena distribución del líquido y asegura el intercambio por cada ciclo: “la relación altura – diámetro igual a H/D = 3/1, 1.5/1 y la altura de esta H2-8 pies; 50-100% de expansión”

Para comenzar el desarrollo del dimensionamiento primero se debe tener claro el concepto de peso equivalente que se refiere a:

$$PE = \frac{PM}{VA} \text{ Ec. 16}$$

Donde:

PE: Peso equivalente (eq/L)

PM: peso molecular (g/mol)

VA: valencia química

Se determina el volumen de resina necesario:

$$VR = \frac{C_{NH_4^+} * Q * CR}{CI} \text{ Ec. 17}$$

Donde:

VR: volumen de resina (m<sup>3</sup>)  
Q: caudal de agua a tratar (m<sup>3</sup>/d)  
CR: ciclo de regeneración (d)  
CI: ciclo de intercambio (eq/m<sup>3</sup>)

Aquí es donde debe seleccionarse una resina en específico y se hace de acuerdo con la selectividad de los iones de interés.

- Segunda etapa: Diseño de columnas

$$V = \frac{\pi D^2 H}{4} \quad \text{Ec. 18}$$

Donde:

V: volumen de la columna cilíndrica (m<sup>3</sup>)

H: altura (m)

D: diámetro (m)

$$H = \frac{4V}{\pi D^2} \quad \text{Ec. 19}$$

$$HD = H + H_e \quad \text{Ec. 20}$$

Donde:

He: Altura con porcentaje de expansión (recomendable entre el 70-80%)

\*Suposición de diámetro (cálculo de altura)

\*\*Verificación de recomendaciones prácticas:

DH/DI=3/1 ; 1.5/1

\*\*\*Ciclo de generación comúnmente es de 1 día.

#### 4. Proceso biológico

Entre los procesos de remoción de contaminantes los “procesos de biopelícula” son muy utilizados para remover contaminantes inorgánicos, en estos procesos se hace uso de microorganismos biológicamente activos y se retienen en un reactor con un material filtrante que dota de condiciones necesarias a los microorganismos para su reproducción y crecimiento, en este sistema ocurre una combinación de biodegradación aeróbica y retención física de partículas en suspensión por filtración a través del lecho filtrante, la acumulación de estos microorganismos que trabajan constantemente crean una biopelícula al quedarse unidas como acción natural de los microorganismos para sobrevivir.

El rendimiento de este proceso depende de; la capacidad del medio sólido para acumular biomasa y de la tasa de consumo de sustrato por los microorganismos, esta última depende a la vez del porcentaje de oxígeno disuelto en el agua y de la tasa de difusión del sustrato a través del lecho [Athanasia, G. et al. 2012].

Este tipo de tratamiento ofrece muchas ventajas sobre los procesos fisicoquímicos, por ejemplo, la eficiencia del filtro, una mayor tasa de remoción de contaminantes, un volumen de lodo sensiblemente menor, además la actividad biológica reduce la cantidad de materia orgánica biodegradable al ser consumida por ellos y con esto también se reduce la demanda de cloro o cualquier desinfectante ya que al reducir la disponibilidad de sustrato se minimiza el rebrote de microorganismos patógenos [Blacio, D. Palacios, J. 2011].

La eliminación de contaminantes por medio de un proceso de biofiltro es de interés cuando se necesita eliminar magnesio, hierro y amonio ya que las ventajas frente a otros procesos son muchas y es comúnmente preferido pero la eliminación simultánea de estos contaminantes no es fácil y el mecanismo no se encuentra claro ya que depende de muchas variables de proceso tales como; concentración de contaminantes en el influente, tasas de filtración, volumen del biofiltro, composición del medio filtrante, temperatura, estrategia de retrolavado, arranque y oxígeno disuelto [Stenstrom. Song. 1991].

Dependiendo de la pureza del cultivo, el tiempo de residencia celular y las condiciones de resistencia a la transferencia de masa los sistemas de distribución de agua potable tendrán una buena oxigenación lo cual es necesario para el crecimiento de bacterias nitrificantes, el ajuste muchas veces se encuentra en la biopelícula, la corrosión y el sustrato, la escasez de estos factores puede crear condiciones microanaerobios donde el oxígeno podría ser un limitante [Zhang, Y. Love, N. Edwards, M. 2009]. Este proceso es comúnmente usado en aguas residuales municipales debido a las condiciones de los sistemas, sobre todo las concentraciones de los contaminantes, pero las bacterias encargadas de oxidar al amoniaco toleran ambientes anóxicos o con poco oxígeno por lo que aun así es posible llevar a cabo el proceso de biofiltros en agua potable [Metcalf & Eddy, 2003]

El dimensionamiento de este proceso se dividirá en etapas para su mejor comprensión:

- Primera etapa: Dimensionamiento de los filtros biológicos.

En los filtros biológicos, así como en distintos procesos es preferible dividir los equipos en varios para asegurar su operación cuando uno está en mantenimiento, descompuesto o ahorrar espacio, por lo que puede haber varios biofiltros en conjunto a lo cual se le llama módulo y también pueden existir varios módulos ya que cada módulo contempla que los biofiltros estén conectados en serie.

Es importante definir también el soporte que tendrá cada biofiltro, es indispensable considerar que las características de este tienen que ser lo más favorables posibles para el crecimiento y mantenimiento de los microorganismos.

- Cálculo de la carga de contaminantes en el medio proponiendo una altura del medio ( $h_m$  – comúnmente de 3m).

$$CargaC = Q * C_c \quad Ec. 21$$

Donde:

CargaC: carga del contaminante (kg/d)

Q: caudal a tratar (m<sup>3</sup>/d)

Cc: concentración del contaminante (kg/m<sup>3</sup>)

- Cálculo de volumen del medio requerido por contaminante:

\*Debe tomarse en cuenta que la carga volumétrica para DBO<sub>5t</sub> va de <1.0 – 2.0 kg/m<sup>3</sup>d, para SST va de <1.0 – 1.6 kg/m<sup>3</sup>d y para N-NH<sub>3</sub> va de <0.5 – 1.6 kg/m<sup>3</sup>d a 10°C y de <1.0 – 1.6 kg/m<sup>3</sup>d a 20°C para una carga hidráulica de 3 a 20 m/h (WEF, 2010).

$$VMR_c = \frac{CargaC}{c_c} \quad Ec. 22$$

Donde:

VMRc: volumen del medio requerido por contaminante (m<sup>3</sup>)

- Cálculo del área

\*Se debe determinar definiendo un valor para la carga hidráulica según los requerimientos del proceso antes mencionados.

$$A = \frac{Q*PF}{CH} \quad Ec. 23$$

Donde:

A: área de filtración requerida (m<sup>2</sup>)

Q\*PF: caudal considerando factor para flujo máximo (puede ser 1.0) (m<sup>3</sup>/h)

CH: carga hidráulica (m/h)

- Determinación del número de filtros mínimos.

\*Se debe asumir una capacidad de retención de sólidos ( $C_R$ ) por ciclo, puede obtenerse el dato por experiencia, cálculos o literatura.

$$n = \frac{A}{A_c} \quad \text{Ec. 24}$$

Donde:

n: número de filtros mínimos

A: área de filtración requerida (m<sup>2</sup>)

A<sub>c</sub>: Tamaño de celda (m<sup>2</sup>)

- Cálculo de la capacidad de retención del medio:

$$C_{RM} = C_R N A_c h_m \quad \text{Ec. 25}$$

Donde:

$C_{RM}$ : Capacidad de retención del medio (kg/ciclo)

- Cálculo de producción de sólidos:

\*La biomasa (Y) es un parámetro que debe ir de 0.5 a 0.8  $kg_{SST}/kg_{DBO}$  removida para que el proceso se lleve a cabo adecuadamente.

$$PS = Y(C_c) \quad \text{Ec. 26}$$

Donde:

PS: producción de sólidos (kg/h)

- Cálculo de carga hidráulica durante el retrolavado:

$$CHR = \frac{Q * PF}{(N - N_R) A_c} \quad \text{Ec. 27}$$

Donde:

CHR: carga hidráulica de retrolavado (m/h)

N<sub>r</sub>: filtros en retrolavado y/o fuera de servicio

\*La frecuencia del retrolavado debe ser de 48h máximo

- Cálculo del volumen de agua:

\*Se asume el agua de retrolavado

$$V_A = V_{AR} A_C h_m \quad \text{Ec. 28}$$

Donde:

$V_A$ : volumen de agua (m<sup>3</sup>)

$V_{AR}$ : volumen de agua de retrolavado (m<sup>3</sup>)

- Cálculo de concentración de sólidos:

$$C_S = \frac{Y C_C}{N V_A} \quad \text{Ec. 29}$$

Donde:

$C_S$ : concentración de sólidos (mg/L)

- Cálculo de caudal y carga hidráulica de retrolavado:

$$Q_R = \frac{V_A}{T_R} \quad \text{Ec. 30}$$

$$CH_R = \frac{Q_R}{A_m} \quad \text{Ec. 31}$$

Donde:

$Q_R$ : caudal de retrolavado (L/s)

$T_R$ : tiempo de retrolavado (s)

$CH_R$ : carga hidráulica de retrolavado (m/h)

$A_m$ : área del medio (m<sup>2</sup>)

- Segunda etapa: Determinación del flujo de aire para el reactor biológico

Este proceso se basa en el oxígeno que requieren los microorganismos para remover el contaminante de interés.

- Determinación de la concentración de amoníaco:

\*Se determina a partir de la concentración de nitrógeno amoniacal.

$$C_{NH_3} = C_{NH_4^+} * (MM_{NH_3}) * \left(\frac{1}{MM_{O_2}}\right) \quad Ec. 32$$

Donde:

$MM$ : masa molar (g/L)

- Determinación de caudal másico de nitrógeno amoniacal:

$$W_{NH_4^+} = C_{NH_4^+} * Q \quad Ec. 33$$

Donde:

$W_{NH_4^+}$ : caudal másico de nitrógeno amoniacal (kg/d)

- Cálculo de caudal másico de oxígeno para nitrificación:

\*Considerando la dosificación de O<sub>2</sub> para nitrificación ( $D1_{O_2}$ ) de 4.60 mg O<sub>2</sub>/ mg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (EPA, 2014) y el flujo de nitrógeno amoniacal se obtiene el caudal de oxígeno.

$$W1_{O_2} = W_{NH_4^+} * D1_{O_2} \quad Ec. 34$$

Donde:

$W1_{O_2}$ : caudal másico requerido de oxígeno para nitrificación (kg/d)

- Cálculo de caudal másico de DBO:

$$W_{DBO} = C_{DBO} * Q \quad Ec. 35$$

Considerando que la dosificación de O<sub>2</sub> para la remoción de materia orgánica ( $D2_{O_2}$ ) va de 0.9 - 1.3 kg O<sub>2</sub>/ kg DBO (Metcalf & Eddy, 2004), se escoge un valor de 1.3 kg O<sub>2</sub>/ kg DBO y se obtiene el flujo de oxígeno

- Cálculo de caudal másico de oxígeno para remoción de materia orgánica:

$$W2_{O_2} = W_{DBO} * D2_{O_2} \quad Ec. 36$$

Donde:

$W_{2O_2}$ :caudal másico requerido de oxígeno para DBO (kg/d)

Por lo tanto, el caudal total de oxígeno es la suma del oxígeno para nitrificación y para DBO.

\* El intervalo del rendimiento de transferencia de oxígeno ( $\epsilon$ ) es de ( $0.05 < \epsilon < 0.15$ ), por lo que se considera un rendimiento de transferencia de oxígeno de 0.065.

- Finalmente, el flujo volumétrico de aire se obtiene considerando gas ideal:

$P= 0.78 \text{ bar}$ ,  $T= 298.15 \text{ K}$ ,  $R= 83.145 \text{ L*bar/K*mol}$

$$Q_{aire} = (F_{TO_2} * R * T)/P \quad \text{Ec. 37}$$

Donde:

$F_{TO_2}$ :caudal másico requerido de oxígeno total (kmol/d)

## 5. Ósmosis inversa

Es un proceso que hace uso de membranas semipermeables para remover contaminantes desde una zona de baja concentración hacia una más concentrada hasta alcanzar un equilibrio de fuerzas. Las membranas son materiales inorgánicos, de alto peso molecular con una función selectiva, es decir; por medio del tipo de material y el tamaño de poro del que esta hecha la membrana deja pasar o no ciertos compuestos [SGAPDS-1-15-Libro42].

La osmosis se basa en un fenómeno natural de transporte de masa, el cual ocurre cuando, a través de una membrana semipermeable el agua fluye por gradientes de concentración, de mayor a menor concentración debido a la presión osmótica que presentan los fluidos, en cambio la osmosis inversa se lleva a cabo añadiendo una presión extra para que el fluido pase de menor a mayor concentración, facilitando el proceso, en este caso, para el nitrógeno amoniacal se haría considerando detener el nitrógeno amoniacal y que el efluente salga con la menor cantidad de este contaminante respetando la norma correspondiente.

El uso de membranas requiere temperaturas no extremas, estabilidad química, condiciones de uso suaves y un ambiente donde pueda llevarse a cabo la reacción, además resulta ser un proceso caro, con alta resistencia mecánica además es muy común que las membranas se obstruyan, pero se pueden tratar altos caudales, retener partículas menores o iguales a  $0.001\mu\text{m}$  y es muy eficiente, hay que tomar en cuenta, además que, a mayor caudal tratado, menor será el costo [Xiang, S. 2020].



Este proceso se puede ver como una filtración con la capacidad de retener partículas muy pequeñas en comparación de otros procesos de filtración, es llamada así por el mecanismo que hace que esto sea posible [Figura 18].

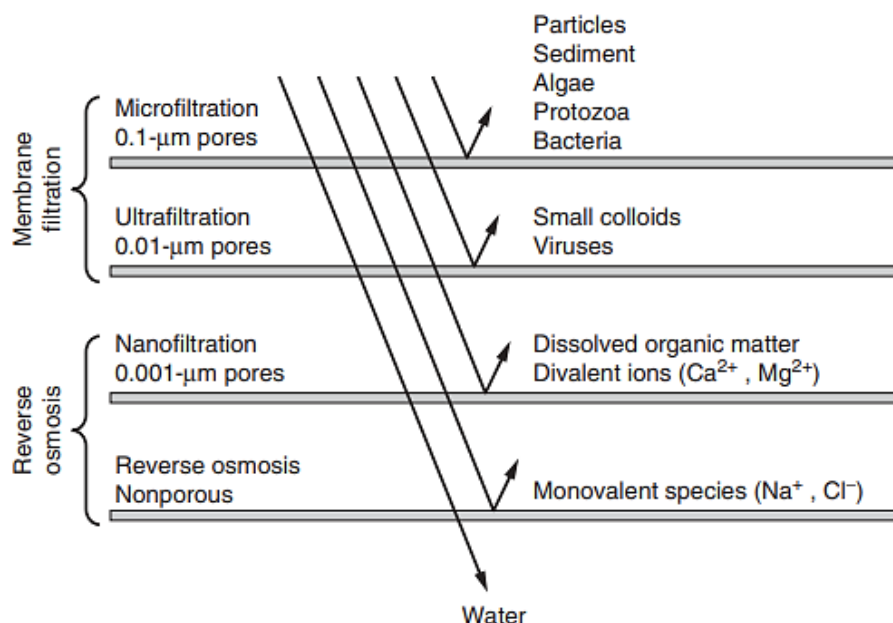


Figura 18. Tamaño de partículas retenidas por filtración con membranas y ósmosis inversa.

Los equipos fundamentales para este proceso incluyen [SGAPDS-1-15-Libro45]:

- Fuente de presión
- **Pretatamiento** y acondicionamiento
- Contenedor y membranas de ósmosis inversa
- Medidores de flujo permeado, concentrado y reciclado
- Control mediante un microprocesador

También se debe tener en cuenta que la membrana tenga cuidados extras como tratamiento antiincrustante, este permite recuperar la permeabilidad de la membrana a través de retrolavados que limpien y verifiquen su integridad, se realiza con soluciones químicas, típicamente se usa hipoclorito de sodio para el control microbiano y ácido para depósitos químicos [AWWA, 2012].

El dimensionamiento de las membranas se detallará a continuación, pero se divide en dos etapas, la primera contiene el dimensionamiento para el antiincrustante y la segunda el de las membranas para llevar a cabo el proceso de ósmosis inversa.

- Primera etapa: Antiincrustante.
- Cálculo del tanque de almacenamiento:

\*Se debe elegir un antiincrustante y usar una dosis de este en el intervalo de 2 – 5mg/L, además se debe pedir la densidad ya que se ocupará para el dimensionamiento.

\*\* Se debe proponer un tiempo del tanque de almacenamiento, comúnmente son 30 días.

$$W_A = Q * D_A \quad \text{Ec. 38}$$

$$Q_A = \frac{W_A}{\rho_A} \quad \text{Ec. 39}$$

$$V_{TA} = \frac{Q_A}{t} \quad \text{Ec. 40}$$

$$V_C = |V_{TA}| \quad \text{Ec. 41}$$

Donde:

Q: caudal de alimentación de agua a tratar (L/s)

$D_A$ : dosis de antiincrustante (mg/L)

$\rho_A$ : densidad del antiincrustante (g/cm<sup>3</sup>)

$W_A$ : caudal másico de antiincrustante (kg/h)

$Q_A$ : caudal másico del antiincrustante (kg/h)

$V_{TA}$ : volumen del tanque requerido (L)

$V_C$ : volumen del tanque comercialmente viable

- Segunda etapa: dimensionamiento de las membranas para ósmosis inversa.

\*Es necesario elegir las membranas a utilizar debido a que se requieren datos específicos de estas, tales como; diámetro nominal de la membrana, flujo de permeado, rechazo de sales mínimo, área activa, caída de presión máxima y material de la película.

- Determinación de las “fracciones a derivar”, las cuales son números que se pueden representar en porcentajes los cuales indican el exceso de contaminantes, esto nos va a decir cuánto de un contaminante se debe eliminar:

$$f_D = \frac{f_N}{f_C} \quad \text{Ec. 42}$$

$$f_T = 1 - f_D \quad \text{Ec. 43}$$

Donde:

$f_D$ : fracción a derivar

$f_N$ : límite de concentración permitida de contaminante según la norma (mg/L)

$f_c$ : concentración del contaminante en el influente de la planta (mg/L)

- Cálculo de caudales de alimentación, permeado y concentrado:

\*Estos caudales son específicos del equipo de membranas y son importantes ya que de la alimentación que llega una parte permea y continúa por el tren de tratamiento y la otra se concentra con los contaminantes y es indispensable conocer cada caudal para el dimensionamiento.

$$Q_F = Q \left(1 - \frac{f_D}{100}\right) \quad \text{Ec. 44}$$

$Q_P = \text{Dato dado por el fabricante de membrana}$

$$r = \frac{Q_P}{Q_F} \quad \text{Ec. 45}$$

$$Q_F = Q_P + Q_C \quad \text{Ec. 46}$$

$$Q_C = Q_F - Q_P \quad \text{Ec. 47}$$

Donde:

$Q$ : caudal de alimentación al sistema de membranas (m<sup>3</sup>/h)

$Q_F$ : caudal de alimentación (comúnmente existen distintas etapas, por lo que aquí sería la etapa 1) (m<sup>3</sup>/h)

$Q_P$ : caudal de permeado (m<sup>3</sup>/h)

$Q_C$ : caudal de concentrado (m<sup>3</sup>/h)

- Cálculo del número de membranas y número de tubos

Para este cálculo es necesaria más información acerca de las membranas otorgadas por el fabricante como; rechazo del contaminante, área activa, caudal máximo de alimentación por tubo, caudal mínimo de rechazo por tubo, número de membranas por tubo y además se debe especificar el número de membranas de acuerdo con el flux, que para agua de pozo es de 27-34 lmh= 16-20 gfd [DuPont, 2020].

$$N_E = \frac{Q_P}{f \cdot S_E} \quad \text{Ec. 48}$$

Donde:

$N_E$ : número de membranas (membranas)

$f$ : flux para agua de pozo (lmh)

$S_E$ : área activa (m<sup>2</sup>)

$$N_V = \frac{N_E}{N_{EpV}} \quad \text{Ec. 49}$$

Donde:

$N_V$ : número de tubos (tubos)

$N_{EpV}$ : membranas por tubo (membranas/tubo)

\*El resultado del número de tubos se redondea al número superior entero.

- Cálculo de etapas:

\*Se calculan las etapas con los datos de las anteriores.

$$r = \frac{Q_P}{Q_F}$$

$$Q_P = Q_F * r$$

$$Q_C = Q_F - Q_P$$

$$N_E = \frac{Q_P}{f * S_E}$$

$$N_V = \frac{N_E}{N_{EpV}}$$

$$Q_T = \frac{Q_{F1}}{N_V} \quad \text{Ec. 50}$$

$$Q_{RT} = \frac{Q_C}{N_V} \quad \text{Ec. 51}$$

Donde:

$Q_T$ : caudal alimentado por tubo (m<sup>3</sup>/h)

$Q_{RT}$ : caudal de rechazo por tubo (m<sup>3</sup>/h)

## 6. Desorción de amonio con aire

La extracción de amoniaco por arrastre de aire o también llamada Stripping es un proceso de desorción donde resulta más favorable remover el nitrógeno del agua residual en forma de amoniaco que el convertirlo a nitratos antes de su remoción. Esta tecnología utiliza principios de transferencia de masa para transferir sustancias volátiles del agua (sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles, nitrógeno amoniacal y otras sustancias inorgánicas) al aire por medio de un contacto, este proceso tal cual es la desorción, aunque también puede darse al revés, es decir del aire al agua o de un fluido gaseoso a uno líquido y se le llama absorción [MWH, 2012].

El principio de funcionamiento en un proceso consiste en el arrastre de los compuestos más volátiles que contiene el agua por el paso del aire llevándolos en fase gaseosa hasta la salida de una torre por un conducto, comúnmente se pasa después a un filtro de carbón activado para adsorber los contaminantes y sacar el aire limpio a la atmósfera [Solano, J. Castañeda, A. 2022].

La manera en que dicho proceso suele llevarse a cabo es mediante un equipo que haga que estos fluidos se pongan en contacto efectivo de la manera más eficiente y con mayor área para llevar a cabo la transferencia de masa, existen dos tipos de contactores; las torres y los aireadores, el uso de cada uno depende del grado de eliminación deseado del contaminante y de la constante de la ley de Henry del compuesto, por un lado los aireadores se usan para concentraciones de contaminantes bajas (eficiencia menor al 90%) o cuando se tiene una constante de la ley de Henry alta, es decir el gas es muy volátil y las torres de extracción son para concentraciones altas (eficiencias mayores al 90%) o volatilidad baja [MWH, 2012].

Dentro de la clasificación de torres las más usadas son las empacadas o de platos, es decir; tienen un material dentro de la torre que otorga propiedades que favorecen al proceso tales como soporte mecánico, distribución de flujo, minimización de canales preferenciales y sobre todo mayor contacto entre el contaminante y el adsorbente, dichas torres también se clasifican por el flujo de su caudal, ya sea transversal o a contra corriente; es decir, en el primer caso el gas de disolución (aire) entra a través del empaque o el primer plato fluyendo por este a medida que el agua alcalina cae al fondo de la torre, cuando se trata del proceso con flujo contra corriente el aire entra a través de orificios en el fondo de la misma, mientras el agua residual se bombea a la parte superior de la torre para ser distribuida por el empaque o los platos, a medida que las gotas van cayendo, estas variaciones son con el proceso de aumentar el contacto entre ambos fluidos e intensificar la eficiencia del transporte de masa [EPA, 2000].

Los materiales de empaque más utilizados (en orden de uso) son:

- Anillos Rasching
- Sillas Intalox
- Anillos Pal
- Sillas Berl
- Tri-Pack

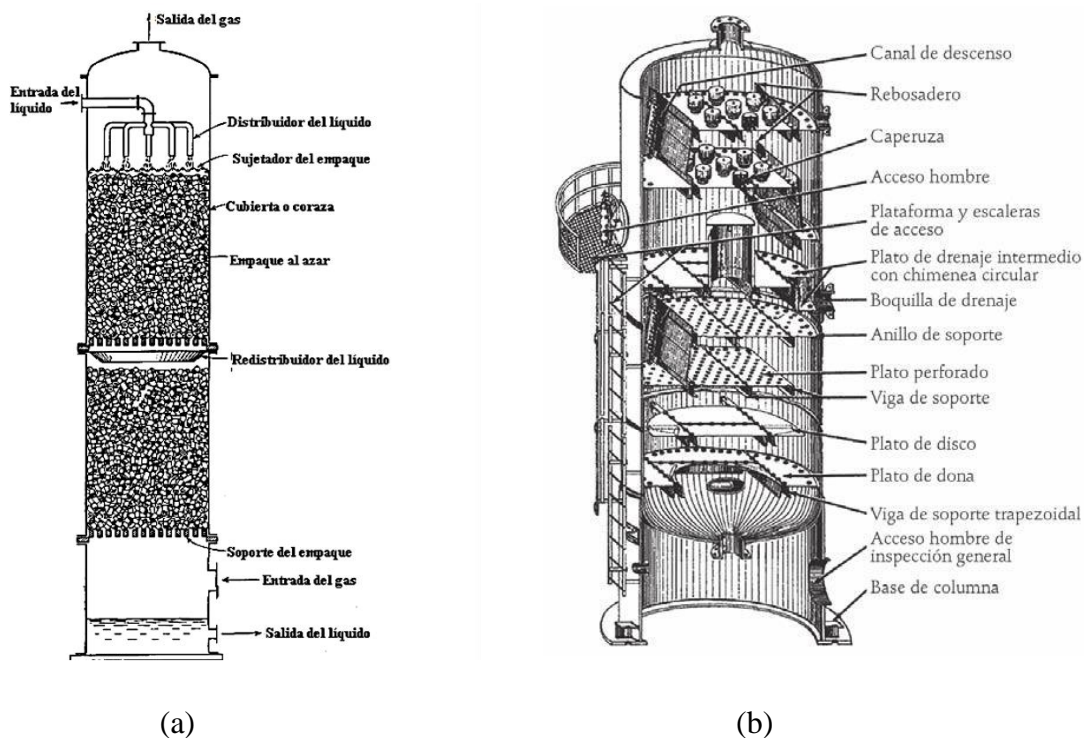


Figura 19. Columnas de desorción (a) empacada, (b) platos. [(a) Treybal, 1998, (b) Bernal, D. et.al. 2011]

El proceso de desorción de amoníaco es efectivo para aguas con concentraciones de 10 a 100mg/L de amoníaco, cuando se trata de un contenido mayor es preferible optar por técnicas como la extracción con vapor o métodos biológicos. Este proceso se ve favorecido cuando el pH de entrada es alto debido a que el ión amonio se convierte en gas amoníaco favoreciendo el arrastre y/o si la temperatura es superior a 60° debido a que la presencia de gas amoníaco aumenta a altas temperaturas y la solubilidad del gas también, además se requiere que el agua de absorción lleve un ácido para fomentar la desorción [ARC, 2004].

Los parámetros que intervienen en este proceso son; temperatura, pH, tensoactivos y fuerza iónica, por su puesto estos parámetros tienen que ver con la volatilidad, es decir que tan fácil las moléculas, en especial los contaminantes van a “escapar” del agua [MWH, 2012].

\*Para favorecer pH alto se suele agregar NaOH o Ca(OH)<sub>2</sub>.

Tabla 13. Ventajas y desventajas del proceso de desorción de amonio con aire [EPA, 2000].

Ventajas	Desventajas
La operación del proceso es controlada y sencilla, se mantiene estable mientras el pH del agua residual y la temperatura del aire estén estables.	Se requiere de rebombeo para llevar el agua a la torre de extracción, lo cual genera costos importantes en electricidad.
	Se pueden formar incrustaciones que no puedan removerse, por lo cual es necesario

	realizar los estudios suficientes antes del diseño para que esto no ocurra.
	No se debe hacer a temperaturas bajas, la niebla y la disposición de hielo dan como resultado una baja eficiencia en la remoción de amoniacó.
No produce retrolavados o materiales regenerados.	Al liberar el amoniacó a la atmósfera es perjudicial ya que favorece la contaminación del medio ambiente, aunque sean bajas las concentraciones.
	No remueve nitratos ni nitrógeno orgánico.
No se ve afectada por compuestos tóxicos que puedan alterar el desempeño de un sistema biológico.	Esta operación a menudo requiere de cal viva para control de pH, pero puede traer consigo problemas en los equipos.
	El ruido puede ser problemático

El proceso de desorción ha sido utilizado con éxito para el tratamiento de diferentes fuentes de agua tales como; vertederos industriales, residuos urbanos, lixiviados de vertederos, industria petroquímica, estiércol porcino, fertilizantes minerales y en digestión anaerobia. Los parámetros por tomar en cuenta en el proceso son; pH, la relación de aire/agua (G/L), caudal de agua, temperatura, relación contacto/tiempo de arrastre, altura de la columna, concentración de  $\text{NH}_4^+$  en el influente, carga hidráulica y empaque [Zangeneh, A. et al. 2021].

Para el dimensionamiento de este equipo es muy importante elegir el tipo de torre que se va a utilizar, en este caso veremos los cálculos para una torre de platos, se debe considerar la solubilidad de los contaminantes en el agua, es decir; la ley de Henry, además del balance de masa ya que este proceso, como se mencionó anteriormente no requiere la transformación del nitrógeno amoniacal, sino que se extrae tal cual se encuentra en el agua, por lo tanto el diseño se basará en esto para definir las dimensiones de la torre, el empaque y los caudales de alimentación y salidas por lo que se dividirá en etapas para su mejor entendimiento:

- Primera etapa: Balance de masa, los términos que participan en el balance de masa se ilustran en la Figura 20.

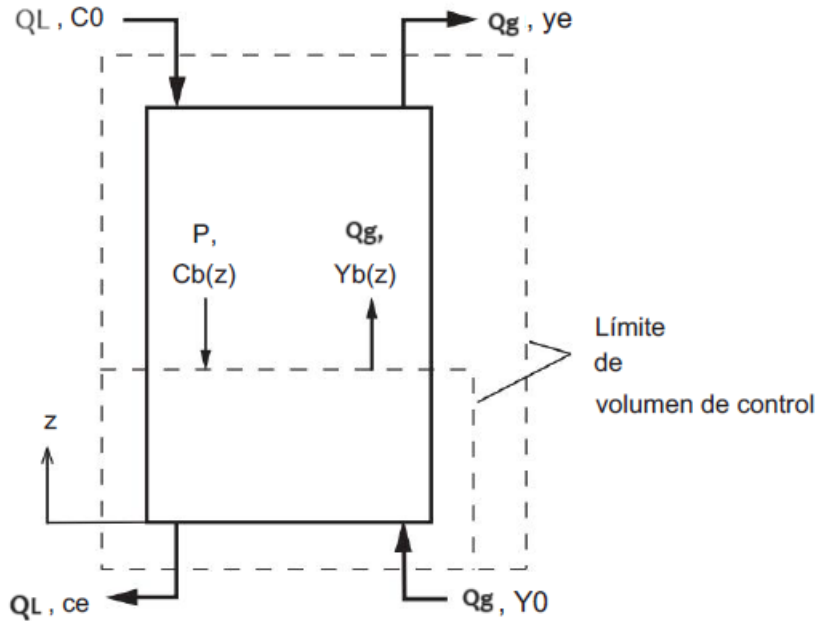


Figura 20. caudales de entradas y salidas en una torre de desorción empacada. [MWH, 2012] editado

$$Q_L C_0 + Q_g Y_0 = Q_L C_e + Q_g Y_e \quad \text{Ec. 52}$$

Despejando la Ec. 58:

$$(Y_e - Y_0) = \frac{Q_L}{Q_g} [C_0 - C_e] \quad \text{Ec. 53}$$

$$Y_e = \frac{Q_L}{Q_g} [C_0 - C_e] \quad \text{Ec. 54}$$

Donde:

$Q_L$ : caudal del líquido (m<sup>3</sup>/s)

$C_0$ : concentración del contaminante de la fase líquida del efluente de la torre (mg/L)

$Q_g$ : caudal de gas (m<sup>3</sup>/s)

$C_e$ : concentración del contaminante en la fase líquida del efluente (mg/L)

$Y_0$ : concentración del contaminante en la fase gaseosa que ingresa a la torre (mg/L)

$Y_e$ : concentración del contaminante en la fase gaseosa del efluente de la torre (mg/L)

\*El termino de  $Y_0$  es = 0 debido a que entra aire limpio.

La Ec. 60 representa la línea operativa para la aireación de la torre, esta se debe representar junto con la línea de equilibrio en un diagrama de McCabe-Thiele, este diagrama es una herramienta gráfica para el diseño y análisis ya que representa visualmente como se distribuyen los componentes de la mezcla entre las fases líquida y vapor.



La línea de equilibrio se obtiene con la ley de Henry:

$$Y = H_{YC}C \quad \text{Ec. 55}$$

Donde:

$Y$ : concentración en fase gaseosa (mg/L)

$H_{YC}$ : constante de Henry \*este dato depende de la mezcla

$C$ : concentración de equilibrio entre la fase líquida y gaseosa (mg/L)

- Segunda etapa: Realización de diagrama McCabe-Thiele:

Para realizar el diagrama McCabe-Thiele se acomodan las gráficas y datos de esta manera:

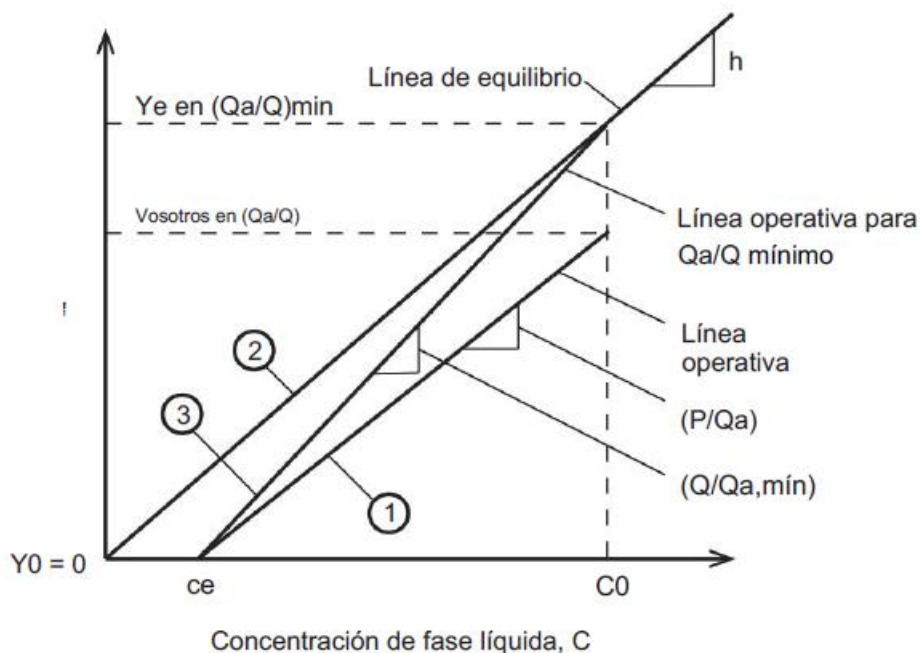


Figura 21. Diagrama McCabe-Thiele. [MWH, 2012] editado\*

Mediante este diagrama se determina la cantidad mínima de fases de extracción en términos de masa o volumen requerido para eliminar el componente hasta una eficiencia dada.

- Factor de desmontaje ( $S$ ): Este factor se usa para la evaluación de la torre ya que nos proporciona la relación entre la pendiente de la línea de equilibrio y la operativa.

Cuando:

- $S=1$ : las líneas son paralelas y el objetivo de tratamiento es posible solo si la longitud de la torre es muy larga o infinita.

- II.  $S < 1$ : la pendiente de operación es mayor a la de equilibrio y la eliminación deseada está limitada por el equilibrio, por lo que el objetivo de remoción no se puede obtener.
- III. Si  $> 1$ : la pendiente de operación es menor a la de equilibrio, por lo que la eliminación deseada si se puede cumplir mediante este proceso.

$$S = \frac{m_{\text{equilibrio}}}{m_{\text{operación}}} = \frac{H_{YC}}{Q_L/Q_g} = \left(\frac{Q_g}{Q_L}\right) H_{YC} \quad \text{Ec. 56}$$

Donde:

S: factor de desmontaje

$\frac{Q_g}{Q_L}$ : relación operativa aire-agua de la torre

- Cálculo de relación mínima aire – agua.

\*Este valor representa la relación mínima de aire - agua que se debe aplicar a una torre para cumplir con el objetivo de tratamiento, con experiencia se ha demostrado que el volumen mínimo de la torre y los requisitos de energía se han logrado utilizando aproximadamente 3.5 veces la relación mínima, por lo que es un parámetro importante para eficientar tiempos de cálculo o rectificar.

$$\left(\frac{Q_g}{Q_L}\right)_{\min} = \frac{C_0 - C_e}{H_{YC} C_0} \quad \text{Ec. 57}$$

La relación entre el factor de desmontaje (S) y la relación mínima es importante también ya que cuando la eficiencia del tratamiento es muy alta,  $C_e \gg C_0$  y las ecuaciones se pueden representar de la siguiente manera:

$$\left(\frac{Q_g}{Q_L}\right)_{\min} = \frac{C_0 - C_e}{H_{YC} C_0} \approx \frac{1}{H_{YC} C_0} \quad \text{Ec. 58}$$

$$S = \frac{\frac{Q_g}{Q}}{\left(\frac{Q_g}{Q}\right)_{\min}} \quad \text{Ec. 59}$$

- Cálculo de número de etapas de equilibrio:

Estas etapas se encuentran desarrollando el diagrama de McCabe-Thiele de la siguiente manera; el punto (C0, Ye) representa la concentración del contaminante en la fase de agua del influente y la de la fase de aire del efluente, se traza una línea horizontal desde este punto hasta el (C1, Ye) ya que este punto representa el equilibrio de la fase acuosa con el aire

saliente, posteriormente se traza una línea vertical desde el punto  $(C1, Y_e)$  hasta el  $(C1, Y_2)$  en la línea de operación, después nuevamente una horizontal tomando en cuenta los puntos anteriores hasta obtener una gráfica como en la Figura 22.

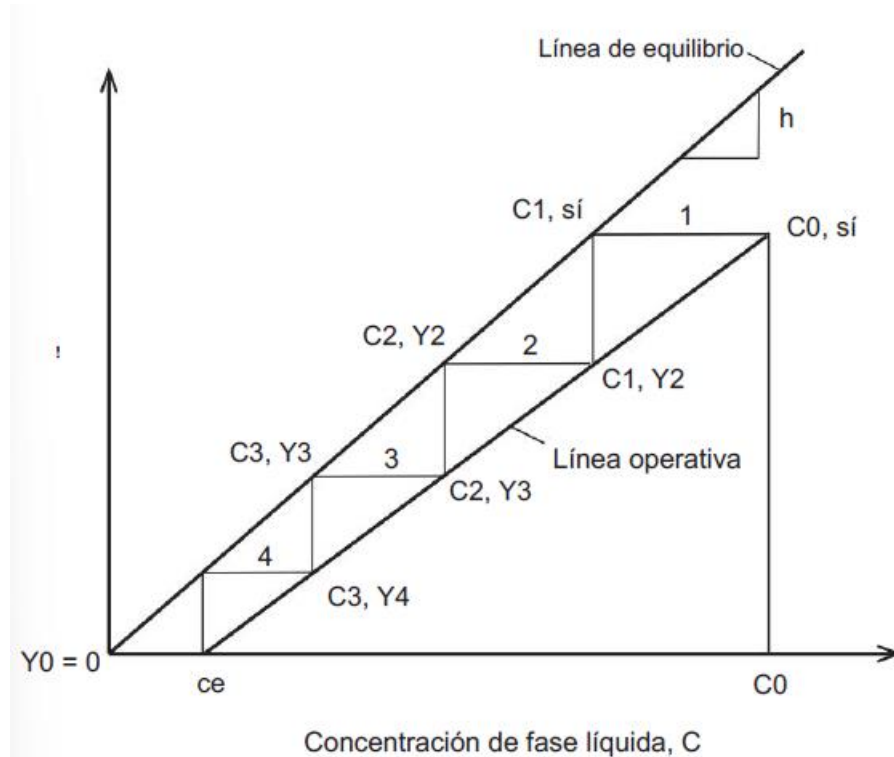


Figura 22. Diagrama McCabe-thiele desarrollado. [MWH, 2012] EDITADO.

Con este procedimiento podemos estimar el número mínimo de etapas o unidades de transferencia y con ello el número mínimo de bandejas requeridas en la extracción.

## 7. Precipitación química

La precipitación química es un proceso de remoción de SST y DBO aunque como mejorador de rendimiento de remoción se usa para eliminar metales y nutrientes como fósforo y nitrógeno para lo cual se añaden compuestos que reaccionan con los contaminantes propiciando reacciones químicas que den como productos compuestos que precipiten, el proceso se lleva a cabo considerando la selección, dosis, mezcla y condiciones de reacción de compuestos químicos requeridos ya que el grado de remoción depende de estos. Con la precipitación química es posible eliminar de un 80 a 90% de SST (incluyendo coloides, nitrógeno y fósforo), 50 – 80% de DBO y 80 al 90% de bacterias [WET, 2003].

En el caso del nitrógeno amoniacal al ser un no metal tienen una eficiencia de remoción baja ya que los compuestos que se pueden usar para precipitar deben estar en grandes cantidades

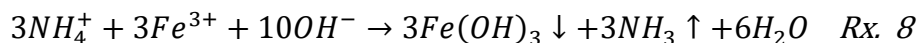
y no reaccionan solo con este compuesto, existen dos alternativas, la primera es que se formen precipitados metálicos y atrapen al nitrógeno amoniacal, la segunda alternativa es que al reaccionar se forme un amoniaco no ionizado que precipitará, en ambos casos es importante tener un pH alto que convierta al nitrógeno amoniacal en amoniaco [Puerres, J. 2015]

Los compuestos que pueden eliminar el nitrógeno amoniacal son:

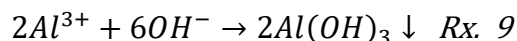
- Hidróxido de calcio  $Ca(OH)_2$ :



- Sulfato de hierro (II)  $FeSO_4$ :



- Sulfato de aluminio  $Al_2(SO_4)_3$ :



Esta tecnología depende directamente de factores como el pH inicial y final, la concentración de nitrógeno amoniacal y la presencia de otros iones en el agua, es importante además destacar que es un proceso donde al precipitar tantos compuestos se generan muchos residuos sólidos, los reactivos son caros, necesitan de manipulación cuidadosa y numerosos problemas operativos [MWH, 2012].

El dimensionamiento de este proceso es como la cloración a punto de quiebre ya que depende del reactivo que se agregue y las reacciones químicas que formen, además es común que después de este sea conveniente ajustar el pH y agregar la filtración como operación complementaria para eliminar cualquier flóculo residual y después columnas de carbón para eliminar compuestos orgánicos disueltos [WET, 2003].

## 8. Electrooxidación

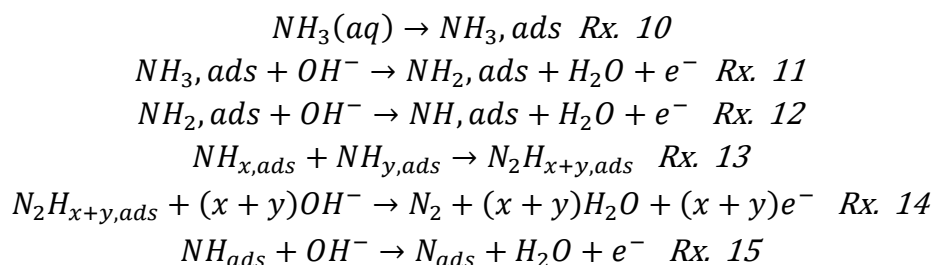
El sistema de electrooxidación se clasifica dentro de los procesos de oxidación avanzada y su funcionamiento se basa en generar una diferencia de potencial entre dos electrodos insertados en el agua permitiendo la generación de radicales hidroxilos que, como sabemos son oxidantes fuertes, estos propician una oxidación completa de varios compuestos como recalcitrantes, amonio y agentes patógenos. En este proceso también se tienen reacciones de reducción debido a los electrodos y al generarse tantos tipos de reacciones se vuelven no

deseadas ya que compiten con el nitrógeno consumiendo gran parte de la energía eléctrica suministrada [Cid, A. 2020].

El proceso de oxidación electroquímica depende fuertemente de las características del agua ya que estas definen la conductividad eléctrica, además otras características de importancia son:

- pH: Se puede considerar que no es un parámetro que repercute mucho en el proceso a menos que se tengan pH's muy alcalinos y la presencia de cloruros al mismo tiempo ya que se pueden generar cloratos, la oxidación para llegar a este compuesto compite fuertemente con la eliminación de amonio [Delgado, B. 2020]
- Materia orgánica: Al igual que en otros procesos la materia orgánica interfiere en la eliminación de nitrógeno amoniacal, en este caso también compite con la oxidación de nitrógeno amoniacal al igual que los cloruros [Diaz, et. al., 2011].
- Cloruros: Cuando el pH no es muy alcalino la presencia de cloruros resulta muy favorable debido a que estos, junto con la densidad de corriente aceleran la eliminación de nitrógeno amoniacal ya que además de oxidarse por medio directo de los radicales hidroxilos que genera la corriente eléctrica lo hacen por el método de cloración a punto de quiebre [Liu, et. al. 2009].
- Densidad de corriente: La densidad de corriente se define como la intensidad eléctrica entre la superficie de los electrodos, este parámetro interviene directamente en la eliminación de nitrógeno amoniacal debido a que, a mayor densidad de corriente, mayor velocidad de oxidación [Delgado, B. 2020].

Para poder dimensionar un proceso como este es importante comprender el mecanismo de electrooxidación del amoniacal, el más aceptado fue propuesto por Gerischer y Mauerer, se hace sobre un electrodo y pasa por un proceso de etapas múltiples “donde se involucran la deshidrogenación progresiva de especies del nitrógeno y la producción de muchas reacciones intermedias adsorbidas en la superficie del electrodo” [Delgado, B. 2020], los mecanismos son los siguientes:



A pesar de ser una tecnología bastante efectiva y con grandes beneficios, es decir; además de la eliminación de este compuesto también remueve contaminantes convencionales o persistentes y emergentes, la principal desventaja es el costo de la energía eléctrica lo cual repercute en costos operacionales, con esto es difícil llevar el proceso a gran escala además de que la velocidad de la cinética de la electrooxidación de amoníaco y otros compuestos es muy lenta lo cual hace que se necesite un potencial muy alto. Otra manera de subsanar la poca velocidad de reacción es mediante electrocatalizadores, el más estudiado debido a su coste, actividad catalítica, estabilidad a largo plazo y mínima pérdida óhmica es el platino, pero se requieren grandes cantidades de este para lograr una reacción que pueda considerarse aceptable, no obstante, no es el único tipo de electrocatalizador, existen tres tipos; de metal puro, con base de platino y sin platino [Kim, K. et. al., 2005].

Como puede suponerse es una tecnología que merece ser estudiada e implementada, sin embargo, para dimensionarla se requieren estudios con mayor detalle para elegir las condiciones, los parámetros y el tipo de electrodos y catalizador que optimicen costos y pueda ser implementada en un futuro, pues los contaminantes de todo tipo se han ido viendo incrementados exponencialmente en los últimos años.

Tabla 14. Tecnologías para remoción de nitrógeno amoniacal

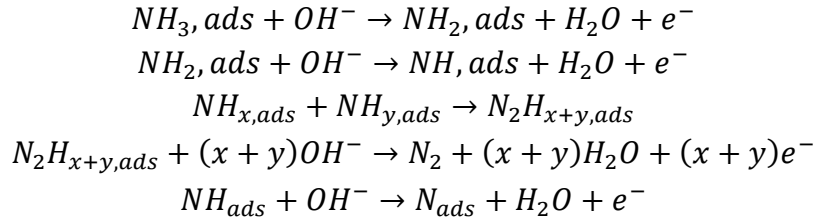
Tecnologías para remoción de NITROGENO AMONIACAL				
Tecnología	Descripción	Condiciones	Subproductos	Desventajas
Ozono	El caudal de agua entra en contacto con una dosis alta de ozono y pH lo que provoca una reacción de oxidación de las cadenas de compuestos nitrogenados convirtiéndolos en nitritos y finalmente en nitratos, los cuales son mucho más fáciles de eliminar.	<ul style="list-style-type: none"> <li>pH mayor a 9</li> <li>Control cuidadoso de concentración de O<sub>3</sub></li> <li>Tiempo de contacto</li> </ul>	Depende de las características del agua de entrada y las condiciones de operación, algunos compuestos pueden ser; NO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> -y NO <sub>3</sub> -	La generación de ozono es costosa debido a que se necesita electricidad.
Reacción	$NH_3 + O_3 \rightarrow N_2 + H_2O$			
Cloración a punto de quiebre	En el proceso se suministra cloro (generalmente en forma de gas o como hipoclorito	<ul style="list-style-type: none"> <li>pH alcalino (entre 7.5 y 8.5)</li> </ul>	Cloraminas	Los subproductos son altamente tóxicos, aunque se puede prevenir la

	<p>de sodio al 13%) con el propósito de oxidar el amoníaco convirtiéndolo en cloraminas, las cuales son menos tóxicas y actúan como desinfectante y oxidar a la materia orgánica.</p> <p>Para asegurarse de alcanzar el punto de quiebre y con ello que se garantice la eliminación completa del nitrógeno amoniacal se debe alcanzar la cloración en exceso.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control de suministro de cloro.</li> </ul>		<p>generación de estos y/o utilizar equipo de protección</p>
Reacción	$NH_4^+ + HOCl \leftrightarrow NH_2Cl + H_2O + H^+$ $NH_2Cl + HOCl \leftrightarrow NHCl_2 + H_2O$ $NHCl_2 + HOCl \leftrightarrow NCl_3 + H_2O$			
Intercambio catiónico	<p>Este proceso se basa en la capacidad de ciertos materiales de intercambio como resinas para capturar y retener los iones amonio cuando el agua fluye en un lecho de este material intercambiándolos por otros iones en su lugar, esto depende de la capacidad de los grupos funcionales de la resina para capturar los iones de amonio.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Material de intercambio adecuado</li> <li>• Solución regeneradora</li> <li>• pH de 7.5 a 8.5</li> <li>• Carga de la columna adecuada</li> <li>• Tiempo de contacto</li> </ul>	<p>Puede generar cloraminas cuando se utiliza cloruro de sodio en la regeneración.</p>	<p>Los materiales de intercambio deben regenerarse y eventualmente cambiarse, elevado costo inicial y operativo, además de que las columnas requieren un espacio significativo para su instalación.</p>
Biofiltros	<p>Los biofiltros deben contener un medio filtrante cuidadosamente seleccionado para</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH de 7.5 a 8.5</li> <li>• Concentración de O<sub>2</sub></li> <li>• Carga hidráulica</li> </ul>	<p>Pueden generarse óxidos de nitrógeno a condiciones de alto</p>	<p>Mayor cuidado del proceso.</p>

	fomentar la vida, crecimiento y reproducción de las bacterias nitrificantes para convertir el amoníaco en nitratos (nitrificación), se puede llegar hasta la desnitrificación para convertir en nitrógeno gaseoso.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura de 20 a 30°C</li> <li>• Medio filtrante adecuado</li> </ul>	pH o concentraciones de oxígeno.	
Reacción	<p>Nitrificación</p> $NH_3 + O_2 \rightarrow NO_2^-$ $NO_2^- + O_2 \rightarrow NO_3^-$ <p>Desnitrificación</p> $2NO_3^- \rightarrow N_2 + 2H_2O$			
Ósmosis inversa	Las membranas pueden retener el amoníaco junto con otras impurezas al forzar el agua a través de una membrana semipermeable.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión alta (generalmente 50 y 120 psi)</li> <li>• Pretratamiento</li> <li>• Concentración del contaminante constante o variar pretratamiento y/o presión.</li> <li>• Relación agua de rechazo-agua purificada</li> </ul>	No existen subproductos, pero debe considerarse el manejo y disposición del agua de rechazo, ya que contiene altas concentraciones de contaminantes.	Pretratamiento estricto y alto coste.
Arrastre con aire	Se introduce una corriente de aire ascendente en una torre de stripping mientras el caudal de agua contaminada entra por la parte superior para permitir que el nitrógeno amoniacal se volatilice y escape al aire.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura entre 25 y 45°C</li> <li>• Relación agua-aire</li> <li>• Contacto efectivo</li> <li>• Concentración de nitrógeno amoniacal (generalmente 1-10 mg/L)</li> </ul>	No existen subproductos, pero se debe tratar el aire de purga, además de prevenir la formación de aerosoles (liberación de partículas finas de la corriente de aire de purga al aire ambiental).	Menor eficiencia y rendimiento, además de ser más costoso y se debe tratar el aire de purga (que contiene amoníaco).



		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corriente de aire de purga</li> </ul>		
Precipitación química	Se añaden reactivos químicos para precipitar el amoniaco en forma de sólidos insolubles (sales de amonio o hidróxidos metálicos) y posteriormente separar del agua por medio de filtración o sedimentación, estos reactivos comúnmente son sulfato de hierro o cloruro férrico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH entre 7 y 9</li> <li>• Selección de reactivos</li> <li>• Velocidad de mezcla</li> <li>• Tiempo de contacto</li> <li>• Eficiencia de filtración o sedimentación.</li> <li>• Concentración de amoniaco</li> <li>•</li> </ul>	Además de que se generan lodos al ser una reacción de precipitación pueden quedar reactivos químicos no utilizados o dependiendo de los reactivos algunos subproductos extras.	Mayores costes por reactivos y gran generación de residuos además de poca eficiencia de remoción.
Reacciones	$NH_4^+ + OH^- \rightarrow NH_3 \uparrow + H_2O$ $3NH_4^+ + 3Fe^{3+} + 10OH^- \rightarrow 3Fe(OH)_3 \downarrow + 3NH_3 \uparrow + 6H_2O$ $2Al^{3+} + 6OH^- \rightarrow 2Al(OH)_3 \downarrow$			
Electro-oxidación	Este proceso aplica corriente eléctrica a través de un electrodo para oxidar el amoniaco y convertirlo en nitrógeno gaseoso y agua	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo y diseño del electrodo</li> <li>• Corriente eléctrica</li> <li>• Tiempo de contacto</li> <li>• pH (es favorable para la oxidación un pH ácido, pero para evitar problemas de corrosión se recomienda mantener un pH neutro)</li> </ul>	Depende de la composición del agua, pero generalmente NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , sulfatos, cloruros, u otros iones.	Gran costo energético, equipos especiales y costosos.
Reacción	$NH_3(aq) \rightarrow NH_3, ads$			



### 1.10. Datos de los influentes y efluentes de algunas de las estaciones de tratamiento de agua potable en la Ciudad de México:

Los datos visualizados en las siguientes tablas muestran información sensible a cerca del estado de las ETAPs en 2019, además se hizo un promedio del caudal de las plantas existentes para proponer uno ya que estos datos servirán para diseñar los trenes de tratamiento. Las concentraciones de contaminantes se eligieron según la máxima encontrada en las plantas.

Tabla 15. Concentración de algunos contaminantes en el influente de plantas de las ETAPs de la CDMX [SACMEX, 2019]

Parámetros	Unidad	Valor
Caudal	L/s	85.00
pH	(U pH)	8.43
Turbiedad	(UNT)	44.95
Color	(U Pt/Co)	116.67
SST	(mg/L)	21.08
DQO Total	(mg/L)	62.00
DBO5t	(mg/L)	40.30
Nitrógeno de Nitratos	(mg/L)	5.66
Nitrógeno de Nitritos	(mg/L)	0.02
Nitrógeno Amoniacal	(mg/L)	5.84

Las siguientes gráficas muestran cómo ha variado la concentración de los contaminantes de interés en la ETAP10, se colocaron los datos de esta planta en especial debido a que además de ser una de las que más valores reportados tiene a través de los años también es la de mayor contaminación:

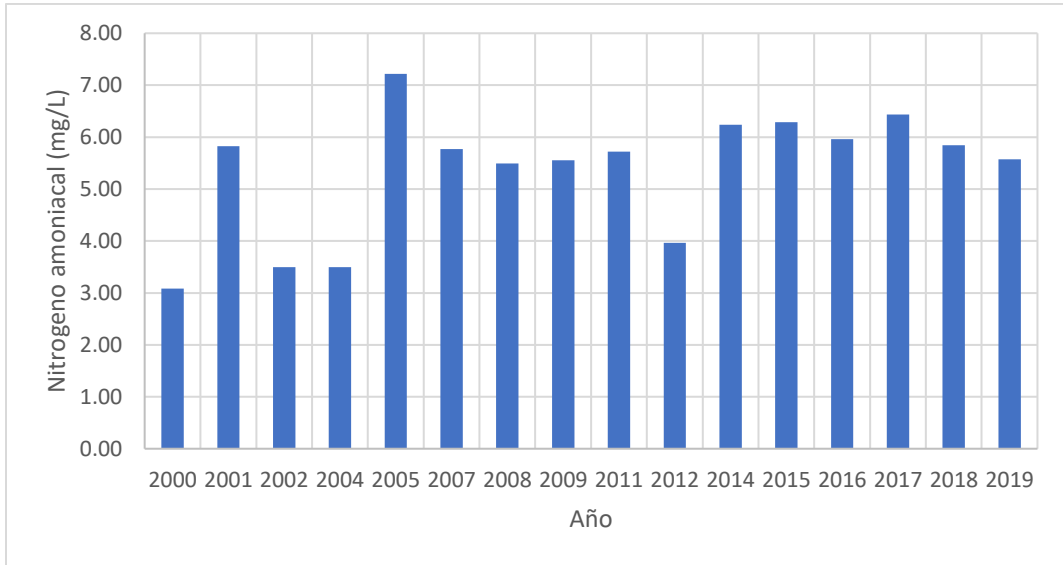


Figura 23. Gráfica de variación de nitrógeno amoniacoal en el influente de la ETAP10. Elaboración propia con datos obtenidos de SACMEX, 2019.

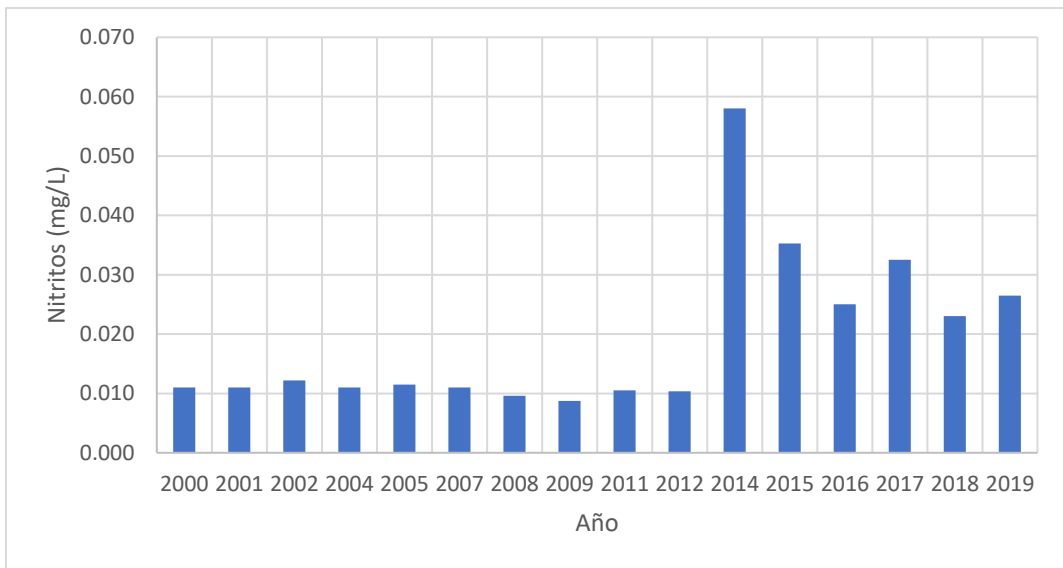


Figura 24. Gráfica de variación de nitritos en el influente de la ETAP10. Elaboración propia con datos obtenidos de SACMEX, 2019.

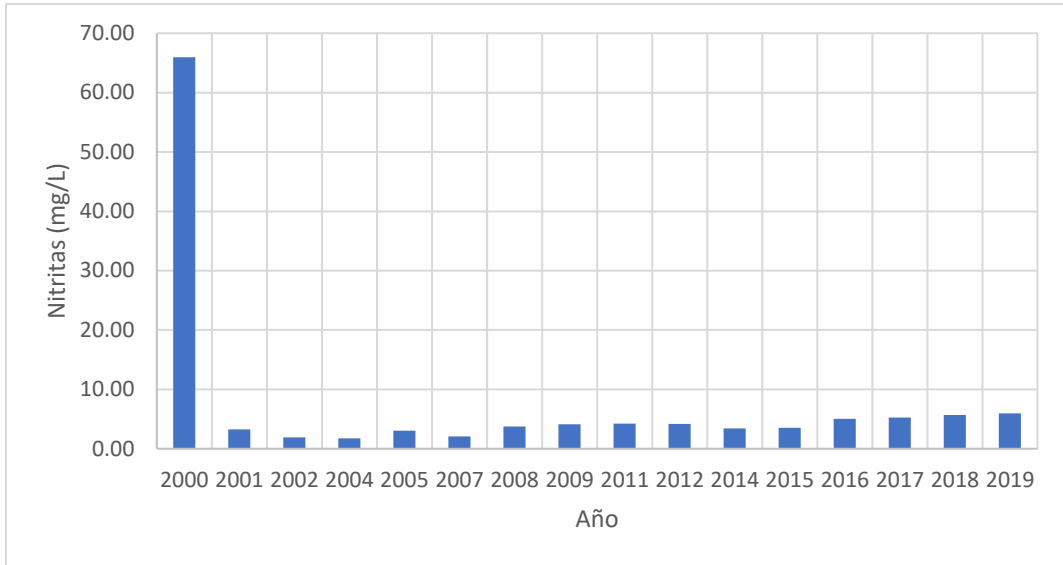


Figura 25. Gráfica de variación de nitratos en el influente de la ETAP10. Elaboración propia con datos obtenidos de SACMEX, 2019.

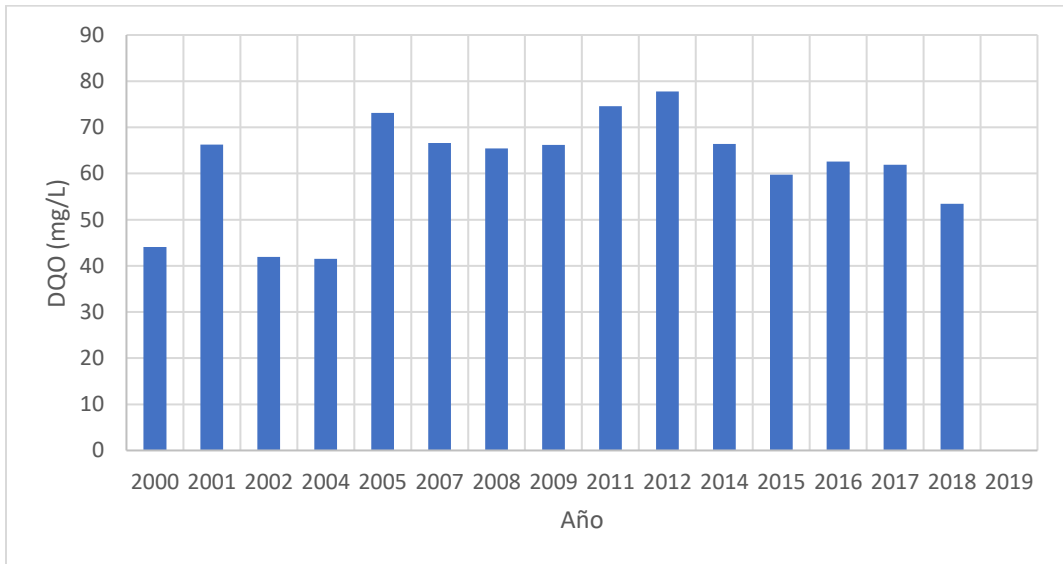


Figura 26. Gráfica de variación de DQO en el influente de la ETAP10. Elaboración propia con datos obtenidos de SACMEX, 2019.

En el inventario de plantas potabilizadoras de México del 2021 se muestra la siguiente información acerca de las plantas en la Ciudad de México; el nombre, tipo de proceso utilizado, capacidad instalada, caudal potabilizado y el responsable de la operación de la planta:

Tabla 16. Datos del inventario de plantas potabilizadoras de la Ciudad de México. [CONAGUA, 2021]

Municipio	Localidad	Proceso	Capacidad Instalada (l/s)	Caudal Potabilizado (l/s)
Azacapotzalco	Azacapotzalco	Filtración Directa	50.0	50.0
Azacapotzalco	Azacapotzalco	Filtración Directa	50.0	50.0
Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	Filtración Directa	80.0	80.0
Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	Filtración Directa	50.0	50.0
Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	Filtración Directa	40.0	40.0
Iztacalco	Iztacalco	Ósmosis Inversa	60.0	50.0
Iztacalco	Iztacalco	Filtración Directa	60.0	40.0
Iztacalco	Iztacalco	Filtración Directa	100.0	40.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Ósmosis Inversa	240.0	150.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Filtración Directa	38.0	38.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Filtración Directa	60.0	60.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Filtración Directa	60.0	38.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Ósmosis Inversa	40.0	40.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Ósmosis Inversa	60.0	60.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Filtración Directa	60.0	40.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Filtración Directa	700.0	600.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Filtración Directa	60.0	50.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Ósmosis Inversa	135.0	120.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Ósmosis Inversa	60.0	60.0

Municipio	Localidad	Proceso	Capacidad Instalada (l/s)	Caudal Potabilizado (l/s)
Iztapalapa	Iztapalapa	Filtración Directa	40.0	40.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Ósmosis Inversa	120.0	65.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Filtración Directa	40.0	40.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Filtración Directa	180.0	90.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Filtración Directa	500.0	458.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Filtración Directa	250.0	248.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Ósmosis Inversa	60.0	60.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Ósmosis Inversa	60.0	60.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Ósmosis Inversa	6.0	6.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Ósmosis Inversa	100.0	85.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Ósmosis Inversa	50.0	50.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Ósmosis Inversa	60.0	60.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Filtración Directa	40.0	40.0
Iztapalapa	Iztapalapa	Filtración Directa	30.0	30.0
La Magdalena Contreras	La Magdalena Contreras	Filtración Directa	210.0	210.0
La Magdalena Contreras	La Magdalena Contreras	Filtración Directa	200.0	200.0
Tláhuac	Tláhuac	Ósmosis Inversa	500.0	40.0
Tláhuac	Tláhuac	Ósmosis Inversa	40.0	40.0
Tláhuac	Tláhuac	Ósmosis Inversa	50.0	23.0

Municipio	Localidad	Proceso	Capacidad Instalada (l/s)	Caudal Potabilizado (l/s)
Venustiano Carranza	Venustiano Carranza	Filtración Directa	40.0	40.0
Venustiano Carranza	Venustiano Carranza	Ósmosis Inversa	40.0	40.0
Venustiano Carranza	Venustiano Carranza	Ósmosis Inversa	50.0	50.0
Xochimilco	Xochimilco	Filtración Directa	40.0	40.0
Xochimilco	Xochimilco	Adsorción	40.0	40.0
Xochimilco	Xochimilco	Filtración Directa	40.0	40.0
Xochimilco	Xochimilco	Filtración Directa	40.0	40.0
Xochimilco	Xochimilco	Filtración Directa	60.0	60.0
Xochimilco	Xochimilco	Filtración Directa	40.0	40.0
<b>Total de Plantas:</b>		<b>47</b>	<b>4 929.0</b>	<b>3 891.0</b>

Con la información de la Tabla 16. Podemos obtener un promedio del caudal de agua que se potabiliza en toda la Ciudad, el cual es de 82.79L/s aunque se tiene, en promedio también una capacidad instalada de 104.87L/s, esto puede deberse a que no hay suficiente agua para tener las plantas a la capacidad instalada o que no se tienen los recursos en estas mismas.

### 1.11. Características de importancia para la selección de procesos de tratamiento de agua

Para el diseño de plantas potabilizadoras de agua es indispensable analizar distintos factores técnicos, económicos, ambientales y sociales, en este trabajo nos enfocaremos en los dos primeros, aunque de todos ellos depende la calidad del agua disponible y requerida además del cumplimiento de políticas públicas y recursos para hacer posible la operación de los procesos. Dependiendo del análisis de las características antes mencionadas podremos obtener un tren de tratamiento adecuado y debe enfocarse en la optimización del capital disponible [IMTA, 2004].

A continuación, se mencionan los criterios generales para el diseño del tren de tratamiento de las plantas:

[SGAPDS-1-15-Libro45,2019].

- Calidad del influente: Aunque existen datos acerca de las condiciones generales del agua subterránea todos los pozos tienen condiciones específicas, por lo que es importante evaluar la calidad de cada uno para saber en qué condiciones está el agua y poder llevarla a las condiciones requeridas.

- Calidad requerida en el efluente: Este parámetro es la meta que hay que alcanzar con todos los recursos disponibles cumpliendo con la NOM-127-SSA1-2021.
- Tipo y concentración de contaminantes en el influente: Comparando la calidad del agua disponible en el pozo con la necesaria para uso y consumo humano se hace una lista de los contaminantes y su concentración que deben tratarse.
- Gasto de agua requerida para tratar: El caudal de agua a tratar depende de la disponible para extraer del pozo según la que el gobierno destine y el volumen de agua que se recargue en el acuífero. Este es un parámetro crucial para elegir un tratamiento debido a que este valor es la base para dimensionar equipos y procesos y lo más deseable es que fuera constante, aunque muchas veces no lo es.
- Opciones de tratamiento que remuevan los contaminantes de interés: Es importante tener conocimiento y claridad a cerca del tipo de procesos disponibles, que contaminantes remueven, como se diseñan, operan, ventajas, desventajas y costos para obtener un buen diseño.
- Equipos, tubería y accesorios: Se puede decir que existen equipos “secundarios” en el proceso ya que no son como tal los que remueven contaminantes o hacen las operaciones necesarias específicas, pero sí ayudan a que esto suceda por lo que son igualmente de suma importancia junto con la tubería y accesorios. Es importante determinar bien estos complementos junto con sus especificaciones y dar cuenta que pueden representar un gasto importante.
- Seguridad, operación y flexibilidad de las operaciones y procesos unitarios: Un problema muy común en muchas plantas de tratamiento e industriales, en general es la operación debido a que muchas veces no se hace de manera adecuada lo cual genera costos extra en reparaciones, mantenimiento prematuro, tiempo, reactivos y producto desperdiciado, etc. Por lo que se ha vuelto importante tener procesos fáciles de operar y que sean seguros, además un extra es la flexibilidad, es decir que fácilmente los procesos puedan redimensionarse o adaptarse a un proceso o volumen de producto diferente.
- Condiciones del sitio para la planta: Las estaciones de tratamiento de agua potable suelen ocupar terrenos muy amplios debido a los equipos utilizados, además no debe ser así, pero algunas desprenden olores muy malos por una mala operación y/o diseño lo que conlleva a una afección en el entorno social por lo que es indispensable elegir un buen lugar para la planta, además las condiciones geológicas como tipo de suelo,



profundidad, distancia del pozo, elevación del terreno, etc. Son indispensables para el diseño y buscar costos menores.

- Capital disponible y costo total: Sin duda este es el parámetro que más limita ya que el recurso económico es finito y se deben hacer muchas evaluaciones para reducir este.
- Disposición de residuos: Aunque se puede tener una concepción de algo sucio para las ETAPs y PTARs, la realidad es que deben ser limpias tanto a la vista como con sus desechos y diseñar un proceso de disposición de lodos que no contamine y se apegue a las normas correspondientes.
- Condiciones sociales: El objetivo de una ETAP es cubrir la necesidad y el derecho del agua de cierto número de personas, de tal manera que el caudal depende de ello para satisfacer la demanda además del sitio donde se instale la planta y con la menor afección ambiental

Estos son los parámetros para tomar en cuenta idealmente, aunque para fines prácticos de este trabajo no todos se tomarán en cuenta o no se hará directamente debido a la complejidad, el tiempo, los recursos ya existentes en las plantas actuales y el costo.

Es importante reconocer que el diseño de una ETAP requiere de un alto nivel de planificación de distintas áreas y exige administración, contaduría, ingeniería, construcción, mano de obra, capital, arquitectura además de permisos federales y estatales, etc. [Román, D. 2020].

## 1.12. Factibilidad económica

El cálculo de la factibilidad económica de una estación de tratamiento de agua o planta de tratamiento de agua residual implica evaluar los costos asociados con la construcción, operación y mantenimiento de la planta, así como los beneficios derivados de la misma ya que no se obtienen ganancias de este proyecto industrial como lo es en otros. Dentro de las diferencias de estos proyectos están los cálculos como ingresos, flujo de efectivo, costo de oportunidad, valor presente neto, tasa interna de retorno, análisis de sensibilidad y periodo de recuperación los cuales no se pueden contemplar para estos proyectos, sin embargo, lo que se hace para cumplir los objetivos es evaluar los beneficios sociales y ambientales de acuerdo con la comunidad, el entorno social y las leyes [Reyes, M. 2019].

Los siguientes son los pasos generales por seguir para realizar esta evaluación:

- Costos de inversión: Una vez obtenido la información técnica con el diagrama de flujo de procesos y el dimensionamiento se deben estimar costos iniciales de

construcción e instalación de la planta, incluyendo equipos, infraestructura, mano de obra, permisos y cualquier otro gasto relacionado.

- **Costos operativos:** Determina los costos recurrentes de operación y mantenimiento de la planta, como los gastos de energía, productos químicos, mano de obra, mantenimiento y reemplazo de equipos. Por supuesto aquí entran a cuenta los costos de los empleados, los contratos de suministro de energía y los precios de los productos químicos necesarios.
- **Beneficios:** Se deben considerar los beneficios asociados con la planta de tratamiento de agua. Esto puede incluir el ahorro en costos de agua potable comprada por garrafones o pipas, si son otorgadas por el gobierno el costo que tiene trasladar las pipas y el ahorro en costos de salud pública por enfermedades y/o complicaciones que genere esta condición de falta de agua potable.
- **Análisis de flujo de efectivo:** Se tomará en cuenta un análisis de flujo de efectivo teniendo en cuenta los costos y beneficios identificados proyectando los flujos de efectivo a lo largo de un horizonte de tiempo determinado, normalmente de varios años o un tiempo representativo significativo.

## CAPITULO II. INTRODUCCIÓN

### 2.1. Justificación

La Ciudad de México actualmente enfrenta desafíos críticos relacionados con la disponibilidad y calidad del agua potable, una cuestión que tiene implicaciones directas en la salud pública y el bienestar de la población. La creciente urbanización, gentrificación, industrialización, y otros factores antropogénicos han contribuido al aumento de la presencia de contaminantes en los acuíferos locales y alledaños que proporcionan agua a la ciudad afectando la disponibilidad de agua potable que cumpla con la norma establecida.

La realización de este trabajo se justifica por varias razones fundamentales:

- **Impacto en la salud pública:**

El acceso a agua potable es un derecho humano y el disponer de ella bajo los límites máximos permisibles, la contaminación del agua subterránea con compuestos físicos, químicos y contaminantes biológicos, representan un riesgo directo para la salud y este derecho. La

identificación y eliminación eficiente de estos contaminantes son esenciales para garantizar el suministro de agua potable seguro.

- **Impacto ambiental:**

La degradación de la calidad del agua subterránea tiene efectos negativos en los ecosistemas acuáticos y en la biodiversidad. Un enfoque sostenible para la gestión del agua subterránea es vital para preservar los recursos naturales y mantener el equilibrio ecológico.

- **Compromiso con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):**

Este trabajo está alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por las Naciones Unidas, específicamente con el ODS 6 (Agua Limpia y Saneamiento), contribuyendo directamente a la mejora de la calidad del agua y al acceso universal a servicios de saneamiento.

- **Desarrollo de soluciones tecnológicas innovadoras:**

La investigación y evaluación de tecnologías específicamente en la Ciudad de México para la remoción de materia orgánica y nitrógeno amoniacal, los cuales son contaminantes en aumento y de alto interés de remoción en la ciudad y en el mundo en agua subterránea, tomando en cuenta las condiciones existentes y actuales así como los problemas que tiene el sistema de aguas de la ciudad (SACMEX) permitirán el desarrollo de soluciones innovadoras, eficientes y posibles para contribuir al cambio y la mejora dotando de herramientas que promuevan que se alcance este servicio constante a toda la población.

- **Optimización de recursos:**

La realización de un análisis económico detallado contribuirá a la optimización de recursos financieros, asegurando que las inversiones en tecnologías de remoción de contaminantes sean eficaces y sostenibles a largo plazo.

- **Relevancia para políticas públicas y decisiones gubernamentales:**

Los resultados de este trabajo podrían proporcionar información valiosa para los responsables de la toma de decisiones y formuladores de políticas, contribuyendo a la implementación de estrategias efectivas para abordar la calidad del agua subterránea en la Ciudad de México.

En resumen, este trabajo tiene como objetivo abordar una problemática crítica que afecta a la Ciudad de México, proponiendo soluciones técnicas y económicas viables para la remoción de contaminantes en agua subterránea, con impactos significativos en la salud, el medio ambiente y el desarrollo sostenible a nivel local y global.

## 2.2. Objetivo principal

Evaluar y comparar opciones tecnológicas de trenes de tratamiento enfocándonos en la remoción de nitrógeno amoniacal y de materia orgánica presente en pozos que abastecen de agua a la Ciudad de México, a través de análisis técnico y económico, para determinar la opción más adecuada ante distintas situaciones.

### 2.3. Objetivos específicos

- Conocer las diferentes tecnologías de remoción de nitrógeno amoniacal y materia orgánica para proporcionar un panorama de opciones a elegir con sus características.
- Proponer trenes de tratamiento de acuerdo con los recursos y condiciones disponibles en las estaciones de tratamiento de agua potable actuales de la Ciudad de México para lograr la remoción de nitrógeno amoniacal y materia orgánica respetando la NOM-127-SSA-2021 con especificaciones (costo, mantenimiento, seguridad, operación y flexibilidad) optimizadas para asegurar la posibilidad de estas tecnologías.
- Desarrollar una matriz comparativa de las tecnologías propuestas donde se mencionen los criterios principales para elegir cada una de ellas, así como sus ventajas y desventajas tomando en cuenta aspectos técnicos y económicos que justifiquen una posible implementación en las estaciones de tratamiento de agua.

### 2.4. Hipótesis de trabajo

Mediante el estudio de tecnologías y el diseño de trenes de tratamiento se hallarán procesos adecuados para rehabilitar las estaciones de tratamiento de agua de la Ciudad de México tal que el costo/beneficio sea lo suficientemente atractivo para llevar a cabo estas implementaciones y contribuir en la resolución del problema actual de abastecimiento de agua.

Actualmente se deben seguir explorando e innovando alternativas tecnológicas que remuevan más concentración de contaminantes de todo tipo en el agua ya que van en aumento y no se espera que esto cese, pero actualmente para las concentraciones de los pozos de la Ciudad de México sí existen tecnologías suficientes que nos ayuden a entregar agua a la población con las condiciones de la norma respectiva, el problema es el costo, espacio y que las ETAPs actuales no funcionan de manera correcta, es decir, es conveniente primero rehabilitar lo que ya se tiene para reducir recursos antes de generar nuevos espacios por lo que esto en conjunto será el factor más difícil de optimizar.

Al definir cualitativa y cuantitativamente la problemática en la Ciudad de México asociada a los contaminantes de interés y estudiar varias tecnologías que se adecuen con los recursos ya existentes se espera obtener información que se pueda emplear en otras estaciones de tratamiento de agua con condiciones similares en México o en el mundo.

### 2.5. Metodología

- I. Estado del arte de la remoción de nitrógeno amoniacal y materia orgánica en plantas potabilizadoras.

Primero se debe hacer una revisión bibliográfica a cerca del estado actual de la Ciudad de México en cuanto al recurso hídrico; tanto la disponibilidad, condiciones, asequibilidad, distribución, factores que influyen en este y la demanda que tiene, posteriormente se hará una búsqueda de todos los métodos disponibles para la remoción de los contaminantes de interés, es importante que dichas fuentes sean investigaciones recientes de los últimos cinco años y procesos bien conocidos, estos últimos pueden venir de bibliografía más antigua.

Para empatar con los objetivos de esta investigación es importante hacer énfasis en la búsqueda de procesos que se estén aplicando en condiciones similares a las de la Ciudad de México o se hayan diseñado de esta forma, ya sea un entorno social, ambiental, económico y/o con condiciones de los pozos que concuerden en la medida de lo posible con lo que trabajaremos.

Es importante tomar en cuenta también información como las normas y guías aplicables en México al agua potable y, en cuanto a los procesos que se utilizan el diseño de estos y las condiciones en las que se pueden llevar a cabo para confirmar que estos empaten con las necesidades que se tienen en los pozos de la Ciudad de México.

## II. Definición del caso de estudio

Se definirá y delimitará el caso de estudio de acuerdo con los datos acerca del estado actual de las estaciones de tratamiento, la calidad del agua de los pozos y los recursos del gobierno o, en este caso del encargado del sistema de aguas (SACMEX) para cumplir con las condiciones que establece la NOM-127-SSA1-2021 poniendo en contraste esta información encontrada en el estado del arte y con ello analizar soluciones.

Además, al tener esta información cuantitativa y cualitativa de los problemas se buscará reportarla de manera clara con el objetivo de dar un panorama más desarrollado y así facilitar el seguimiento de la investigación por todas las personas que deseen contribuir a la solución de este problema.

Para delimitar el análisis se establecerán objetivos específicos de la evaluación técnica y económica de acuerdo con la problemática y los límites temporales que se relacionan directamente con la duración de la maestría lo cual sería una restricción además de la información que pudiéramos adquirir en cuanto al estado de las ETAPs y las condiciones de los pozos ya que es información sensible, pues se puede hacer mal uso de ella.

No se descarta hacer ajustes o redefinir algunos aspectos para complementar el estudio, siempre manteniendo el objetivo principal.

### III. Planteamiento de opciones para el tren de tratamiento.

Para definir cuáles serán las tecnologías usadas en los trenes de tratamiento propuestos se estudiarán a profundidad todos los procesos existentes actualmente, la teoría detrás de ellos, sus ventajas, desventajas, parámetros de diseño, condiciones de aplicación, en qué lugares se están aplicando y cuál ha sido su impacto, esto en conjunto con el estado actual de las estaciones de tratamiento y las tecnologías usadas en la Ciudad de México permitirán contar con información suficiente para realizar una tabla de análisis.

La tabla de análisis es una herramienta que, con base a características de intereses específicos y propuestos de acuerdo con los requerimientos de la investigación asigna valores a cada uno de estos y los pondera para elegir la o las mejores opciones.

### IV. Diseño de trenes de tratamiento.

El diseño de un tren de tratamiento requiere de mucho conocimiento técnico, económico, ambiental y basado en ingeniería ya que se toman en cuenta datos de la calidad del agua cruda, conocer normativas y estándares, conocer no solo las tecnologías que van a variar sino los procesos y equipos complementarios también, el diseño hidráulico, la seguridad, eficiencia, energía utilizada, disposición de residuos y subproductos, mantenimiento, costos y presupuestos, incluso puede llegar hasta un diseño de control automatizado, monitoreo, evaluación y entrega de planos como lo son el general, hidráulico y los diagramas de flujo de proceso, eléctricos y de tubería e instrumentación, como parte de la delimitación del proyecto se enfocará el diseño en la parte técnica y económica, sin embargo no quiere decir que lo demás no se puede realizar, si se quisiera continuar con el proyecto se pueden hacer los puntos faltantes.

Tomando en cuenta los aspectos para desarrollar la parte técnica y económica se considerará la experiencia y el ejemplo de otros trenes de tratamiento con condiciones similares como que sea agua de pozos, que las concentraciones de contaminantes sean similares, que se hayan desarrollado con bajos costos de diseño y mantenimiento y que utilicen las mismas tecnologías, posteriormente se diseñarán los procesos y equipos propuestos y si es necesario se podrá cambiar, quitar o redimensionar los que no contribuyan de manera satisfactoria al objetivo principal, posteriormente se construirán los diagramas de flujo de proceso finales con todas sus corrientes, equipos y una muestra de cómo se debe entregar formalmente con los datos necesarios de cada uno.

Por último, se entregará y considerará entonces; diagrama de flujo de proceso, tabla de equipos, descripción general del proceso, el dimensionamiento, disposición de residuos y una comparativa del gasto que hace el gobierno y la sociedad por no recibir agua o no de manera constante con el costo de rehabilitar una estación de tratamiento como análisis económico.

## V. Dimensionamiento de las etapas de proceso del tren de tratamiento.

Para dimensionar las etapas del proceso del tren de tratamiento es importante investigar en qué consiste cada proceso, las ecuaciones que gobiernan el sistema, los parámetros y/o valores de referencia para nuestro caso, y se puede ayudar de ejemplos de otros diseños con las mismas tecnologías o procesos, es necesario también conocer a qué se refiere cada contaminante, cómo se mide, en qué afecta, si interviene con el proceso, con otros contaminantes y como lo hace.

## VI. Evaluación económica.

La evaluación económica de un proyecto como este implica analizar y reducir costos asociados con el capital destinado, la operación y el mantenimiento en contraste con los beneficios sociales ya que además se trata de otorgar un derecho, por supuesto también se debe concientizar a la población, industrias y todo quien reciba este recurso a cerca de su uso pero se debe garantizar ya que junto con este problema crecen otros como enfermedades, descontento, disturbios sociales, quejas, demandas, descenso en la esperanza de vida, delincuencia, etc.

Para realizar esta evaluación será necesaria información de la población residente y flotante, los lugares donde llega este recurso y cómo lo hace, cómo se subsana este problema, que costo tiene y contrastar con el costo de rehabilitación de las estaciones de tratamiento, los equipos, la obra, el espacio, reactivos químicos, ingeniería, accesorios, instrumentación y por supuesto tomar en cuenta en base a cifras del caudal, es decir; sabemos que se debe entregar un caudal de agua de 100 litros por habitante por día así que se debe considerar cuánta población existe y cuánto entrega la estación de tratamiento.

## VII. Evaluación y análisis técnico y económico de las opciones.

Al final de cada una de las opciones se concluirá su impacto, ventajas y desventajas para seguir profundizando en estas con un mejor análisis en caso de resultar favorable, es importante mencionar que no existe la mejor opción en general sino para cada situación en particular, **por lo tanto, lo más importante** de este análisis es la investigación preliminar.

## VIII. Selección de la opción más adecuada con recomendaciones generales de todas las opciones para el caso específico de la Ciudad de México.

Mientras más se conozca y especifique la situación mejor se puede evaluar y hacer un tratamiento adecuado, por lo que se intentará llegar a la opción adecuada para el caso de la

Ciudad de México además de un análisis de esta con datos acerca de cómo llevar a cabo la rehabilitación con un ejemplo y costos para entregar una opción o la base de otros diseños que pudieran hacerse para cada estación en específico.

## 2.6. Resultados esperados

Después de analizar las tecnologías más convenientes para las condiciones que se tienen en las estaciones de tratamiento de agua de la Ciudad de México y el análisis económico de estas se espera obtener tecnologías que realmente puedan implementarse y contribuir lo más pronto posible a la problemática actual respecto al agua potable que se tiene en la ciudad cumpliendo la norma correspondiente.

# CAPITULO III. DESARROLLO

## 3.1. Diseño de trenes de tratamiento

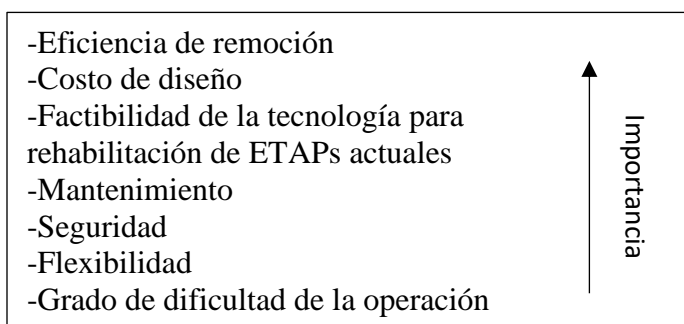
Después de la investigación acerca de la situación actual del agua, las estaciones de tratamiento y las tecnologías usadas por SACMEX y todas las existentes actualmente se han elegido tres para diseñar trenes de tratamiento y así poder hacer un estudio más detallado y de acuerdo a los recursos disponibles y las necesidades en la ciudad, por supuesto se tendrán algunas operaciones y procesos unitarios similares ya que son indispensables para completar cada uno de los procesos pero la tecnología principal y la que se varía se hará para la remoción de nitrógeno amoniacal debido a que es el contaminante de mayor interés, pues la materia orgánica es más fácil de remover, el problema como se mencionó anteriormente es que la presencia de este afecta en la remoción del nitrógeno amoniacal.

Para determinar cuáles serán esas tecnologías principales se tomaron en cuenta de manera general los siguientes parámetros: costo, eficiencia de remoción, flexibilidad, seguridad, mantenimiento, grado de dificultad de la operación y conocimiento actual de la tecnología, tomando en cuenta esas variables se construyó una tabla de análisis de acuerdo con el nivel de impacto que tienen en nuestro objetivo; “remoción de nitrógeno amoniacal y materia orgánica en fuentes de agua subterránea en la Ciudad de México”.

Podría parecer contradictorio tomar en cuenta el costo y la eficiencia de remoción cuando eso es el análisis que se busca realizar en la tesis, pero no hay que olvidar que los datos acerca de estos parámetros en la literatura están determinados de manera general y todas las plantas de tratamiento de agua son diferentes debido a las condiciones en el influente, geográficas, ambientales, físicas, químicas, sociales, del entorno y de los parámetros que se quieren alcanzar en el efluente, como se ha estudiado en la introducción, el estudio realizado



en la presente tesis nos garantiza la mejor opción para las plantas de tratamiento de agua específicamente en la Ciudad de México incluyendo la posibilidad de que solo exista un cambio o mejora en las tecnologías actuales, es decir una rehabilitación de las plantas ya que como se mencionó anteriormente muchas de las plantas no operan o lo hacen parcialmente debido a un mal diseño, falta de mantenimiento, mala operación o falta de recursos económicos.



Otorgada la jerarquía de aspectos a contrastar, se procede a asignar valor a cada uno de ellos asignando una calificación, regularmente de 0 a 10, y posteriormente se aplica alguna de las siguientes opciones:

1. Factores de ponderación: Se asigna arbitrariamente un factor de peso a cada uno de los aspectos a evaluar; este factor puede estar en forma de fracción o porcentaje respecto al total de aspectos. Al final de la evaluación de un aspecto en algún renglón de la tabla, su factor correspondiente es multiplicado por la calificación asignada a cada tecnología horizontalmente de acuerdo con la escala de 0 – 10.
2. Ajuste de escalas: Se modifica el valor máximo de la escala 0 – 10 para cada aspecto; primero se fija esta escala para alguno de los aspectos técnicos a evaluar en algún renglón de la tabla, y luego se ajustan las escalas de los demás aspectos de acuerdo con su prioridad.

Para nuestro estudio se utilizará el ajuste de escalas por su fácil visualización y manejo. En el ajuste de escala se van otorgando puntos de manera horizontal y se suman al final de manera vertical para obtener el puntaje total de cada tecnología, por lo que las tres tecnologías con mayor puntaje serán seleccionadas para su estudio y análisis.

Los parámetros seleccionados anteriormente se fijaron de la siguiente manera:

- a. Eficiencia de remoción: Es el parámetro más importante debido a que nos puede ahorrar varios recursos tales como el tiempo, el costo, tamaño de planta y holgura en las condiciones del efluente. La escala seleccionada es de 0-10.

Tabla 17. Distribución del puntaje de eficiencia de remoción.

Eficiencia de remoción	Puntaje
Mayor a 80%	10
Entre 50 y 80%	5
Menor a 50%	0

- b. Costo: Es el segundo parámetro más importante debido a que es fundamental para tener una planta operando de manera adecuada, desde que el diseño se haga bien, cumpliendo al momento de la construcción y el proceso hasta el mantenimiento. La escala es de 0-8.

Tabla 18. Distribución del puntaje del costo.

Costo del proceso	Puntaje
Alto	2
Medio	5
Bajo	8

- c. Factibilidad de la tecnología para rehabilitación de ETAPs actuales: Este parámetro es muy importante ya que ahorra muchos recursos como costo, tiempo, espacio, ingeniería y obra, de hecho, lo ideal antes de construir más estaciones de tratamiento es que funcionen correctamente las que ya existe. La escala asignada es de 0-6.

Tabla 19. Distribución del puntaje para la factibilidad de rehabilitación.

Factibilidad de rehabilitación	Puntaje
Tecnología adaptable o existente en la mayoría de las ETAPs actuales.	6
Recursos adaptables o existente en la mayoría de las ETAPs actuales	5
Tecnología adaptable o existente en algunas ETAPs actuales.	3
Recursos adaptables o existentes en algunas ETAPs actuales	2
Tecnología o recursos adaptables no existente en ninguna de las ETAPs actuales.	0

- d. Mantenimiento: Viene fuertemente relacionado con el costo ya que un buen diseño, con un costo inicial económico y un proceso fácil de manejar puede verse

fuertemente afectado si el mantenimiento es costoso y el dinero es limitado. La escala asignada es de 0-6.

Tabla 20. Distribución del puntaje para el mantenimiento.

Mantenimiento	Puntaje
Mantenimiento esporádico	6
Mantenimiento frecuente	3
Mantenimiento muy frecuente	0

- e. Seguridad: Es importante que la operación se aleje lo máximo posible a un proceso que pueda poner en riesgo de cualquier manera a los operadores, aunque sean expertos y se tenga todo el equipo necesario para que el riesgo disminuya. La escala asignada es de 0 a 5.

Tabla 21. Distribución del puntaje para la seguridad.

Seguridad	Puntaje
Sin ningún tipo de exposición a reactivos/productos tóxicos ni trabajos de alto riesgo/esfuerzo.	5
Exposición a trabajos de mediano riesgo/esfuerzo.	4
Exposición a reactivos/productos tóxicos	3
Exposición a trabajos de alto riesgo/esfuerzo.	2
Exposición a reactivos/productos muy tóxicos	1
Exposición a reactivos/productos muy tóxicos, así como trabajos de alto riesgo/esfuerzo.	0

- f. Flexibilidad: Las tecnologías, así como las necesidades de tratar mayores o menores caudales de agua con distintas concentraciones de contaminantes varían con el tiempo, incluso en el año se llegan a tener distintos caudales en el influente por las lluvias u otras condiciones ambientales, al menos en la Ciudad de México se ha tenido una mayor demanda de tratar agua a lo largo del tiempo, por lo que es importante que los sistemas a considerar sean flexibles para el futuro. La escala asignada es de 0-4.

Tabla 22. Distribución del puntaje para la flexibilidad.

Flexibilidad	Puntaje
Alta facilidad de ajuste de caudal y concentración de contaminantes	4
Alta facilidad de ajuste de caudal	3
Alta facilidad de ajuste de concentraciones	3
Media facilidad de ajuste de caudal y concentración de contaminantes	2

Media facilidad de ajuste de caudal	1
Media facilidad de ajuste de concentración de contaminantes	1
Poca o nula facilidad de ajuste de caudal y concentración	0

- g. Grado de dificultad de la operación: Existen diferentes áreas para operar una planta de tratamiento de agua y mientras la operación sea más sencilla los costos, problemas y mantenimiento serán más económicos. La escala asignada es de 0-2.

Tabla 23. Distribución del puntaje para el grado de dificultad de la operación.

Grado de dificultad	Puntaje
Tecnología poco conocida y difícil de manejar	0
Tecnología conocida y difícil de manejar	1
Tecnología conocida y fácil de manejar	2

- h. Conocimiento actual de la tecnología: Aunque los cálculos de diseño del proceso se harán específicamente para los requerimientos del efluente y en base a las condiciones del influente es importante conocer hasta cierto punto las tecnologías ya que serán la base del diseño y cálculos, por lo que se le asigna una escala también de 0 a 2.

Tabla 24. Distribución del puntaje para el conocimiento actual de la tecnología.

Conocimiento actual de la tecnología	Puntaje
Abundante	2
Regular	1
Poca	0

Ya establecidos los parámetros y puntajes para analizar las tecnologías se construyó la siguiente tabla:

Ozono	
Parámetro por analizar	Puntaje obtenido
Eficiencia de remoción	10
Costo	2
Factibilidad de rehabilitación	0
Mantenimiento	3
Seguridad	3
Flexibilidad	4
Dificultad de la operación	2
Conocimiento actual de la tecnología	2

Puntaje total	26
<b>Cloración a punto de quiebre</b>	
Parámetro por analizar	Puntaje obtenido
Eficiencia de remoción	10
Costo	8
Factibilidad de rehabilitación	6
Mantenimiento	6
Seguridad	3
Flexibilidad	4
Dificultad de la operación	2
Conocimiento actual de la tecnología	2
Puntaje total	41
<b>Intercambio catiónico</b>	
Parámetro por analizar	Puntaje obtenido
Eficiencia de remoción	5
Costo	5
Factibilidad de rehabilitación	0
Mantenimiento	3
Seguridad	5
Flexibilidad	2
Dificultad de la operación	2
Conocimiento actual de la tecnología	2
Puntaje total	24
<b>Biofiltros</b>	
Parámetro por analizar	Puntaje obtenido
Eficiencia de remoción	10
Costo	5
Factibilidad de rehabilitación	3
Mantenimiento	3
Seguridad	5
Flexibilidad	4
Dificultad de la operación	2
Conocimiento actual de la tecnología	2
Puntaje total	34
<b>Ósmosis inversa</b>	
Parámetro por analizar	Puntaje obtenido

Eficiencia de remoción	10
Costo	2
Factibilidad de rehabilitación	3
Mantenimiento	3
Seguridad	5
Flexibilidad	3
Dificultad de la operación	1
Conocimiento actual de la tecnología	2
<b>Puntaje total</b>	<b>29</b>
<b>Arrastre con aire</b>	
<b>Parámetro por analizar</b>	<b>Puntaje obtenido</b>
Eficiencia de remoción	5
Costo	5
Factibilidad de rehabilitación	0
Mantenimiento	3
Seguridad	5
Flexibilidad	3
Dificultad de la operación	1
Conocimiento actual de la tecnología	2
<b>Puntaje total</b>	<b>24</b>
<b>Precipitación química</b>	
<b>Parámetro por analizar</b>	<b>Puntaje obtenido</b>
Eficiencia de remoción	5
Costo	2
Factibilidad de rehabilitación	5
Mantenimiento	6
Seguridad	3
Flexibilidad	4
Dificultad de la operación	2
Conocimiento actual de la tecnología	2
<b>Puntaje total</b>	<b>29</b>
<b>Electrooxidación</b>	
<b>Parámetro por analizar</b>	<b>Puntaje obtenido</b>
Eficiencia de remoción	10
Costo	2
Factibilidad de rehabilitación	0

Mantenimiento	3
Seguridad	3
Flexibilidad	3
Dificultad de la operación	0
Conocimiento actual de la tecnología	1
Puntaje total	22

Como se puede observar las tecnologías con mayores puntajes dados nuestros criterios establecidos son; cloración a punto de quiebre, biofiltros, ósmosis inversa y precipitación química, estas dos últimas con el mismo puntaje de 29, se desearía analizar ambas pero por límites de tiempo se elegirá osmosis inversa debido a que ya se tiene una tecnología parecida en operación (cloración a punto de quiebre) y en algunas estaciones de tratamiento de la Ciudad de México se tiene esta tecnología lo cual resulta importante para no seguirla abandonando y descartar por completo ese recurso que ya existe.

### 3.2. Análisis técnico

Una vez elegidas las tecnologías principales que se compararán en distintos trenes de tratamiento es necesario evaluar y comprender las diferentes operaciones y procesos unitarios para desarrollar cada uno de dichos trenes. Con ayuda de los datos de caracterización de agua que nos proporciona SACMEX obtenidos de los influentes provenientes de pozos que llegan a distintas plantas de tratamiento se pueden ver las condiciones de entrada de todos los parámetros que toman en cuenta (Tabla 15), además de como al paso del tiempo dichos contaminantes han ido en aumento (Figura 23, Figura 24, Figura 25 y Figura 26) y la tendencia que sugieren.

Para nuestro análisis se tomarán en cuenta los datos de caracterización de la Tabla 15 para asegurar el alcance en esta ETAP y las demás ya que supera la concentración de contaminantes de todas considerablemente, esto dejará además más holgura para la capacidad de remoción de las plantas, por supuesto y como se ha sugerido a lo largo de la tesis es necesario un estudio específico para cada caso pero dado que estamos hablando de una misma región el comportamiento puede ser muy similar y ayudar a la construcción y/o modificación de plantas en la ciudad.

Para desarrollar el tren de tratamiento de cada una de las tecnologías se ha tomado en cuenta lo siguiente:

- Estudio, análisis y evaluación de distintos procesos y operaciones unitarias de manera individual, además de cómo se conforman otras plantas de tratamiento de agua con dichas tecnologías.

- Revisión de parámetros operativos y de diseño de cada uno de los procesos y operaciones como dosificación de reactivos, tiempo de retención hidráulico, tasas de filtración, etc.
- Análisis de la flexibilidad de cada uno de los trenes.
- Estudio general de la operación y el mantenimiento tomando en cuenta la facilidad de operación, requisitos de mano de obra, los intervalos de mantenimiento, la disponibilidad de repuestos, etc.
- Cumplimiento de la normatividad mexicana en cuanto a los estándares de calidad de agua para uso y consumo humano (NOM-127-SSA-2021).

### 3.1.2. Cloración a punto de quiebre

La cloración a punto de quiebre tiene una ventaja como tratamiento integral de nuestros contaminantes de interés y de la desinfección ya que el cloro interviene como agente oxidante para la remoción del nitrógeno amoniacal y materia orgánica, aunque de este último muy poco y en cuanto a la desinfección es bastante común su uso debido a su alto poder oxidante.

También se tiene al final del tratamiento cloro residual que ayuda a prevenir el crecimiento de microorganismos en el agua almacenada y en las tuberías brindando una protección extra contra la contaminación microbiológica, aunque el hecho de que el cloro cumpla tantas funciones y tan fundamentales en el proceso también es una desventaja si en un momento no se tuviera este reactivo, por lo cual se optó por implementar un sistema de desinfección diferente el cual puede ser alternativo en caso de no haber cloro.

El hipoclorito de sodio es el reactivo que se usa para la cloración, es económico y muy fácil de adquirir, aunque es necesario tener extremo cuidado en su almacenamiento y dosificación, por lo que requiere un monitoreo adecuado sobre todo en los tiempos de contacto para garantizar la eficiencia de remoción de contaminantes sin generar niveles excesivos de subproductos de cloro que resultan tóxicos como se estudió en la introducción a cerca de las cloraminas.

El costo de implementación y mantenimiento es bajo en comparación de otras tecnologías tanto de tratamiento como de desinfección, este punto se desarrollará más a fondo en el análisis económico.

Por último, su aplicación es muy simple y fácil, es un sistema bastante flexible ya que ante un aumento de concentración de contaminantes o caudal basta con agregar más dosis de cloro, sin omitir los cálculos previos para garantizar la eficiencia deseada.

#### 3.1.2.1. Diagrama de flujo de proceso

El diagrama de flujo de proceso propuesto para este sistema se muestra en la Figura 27.



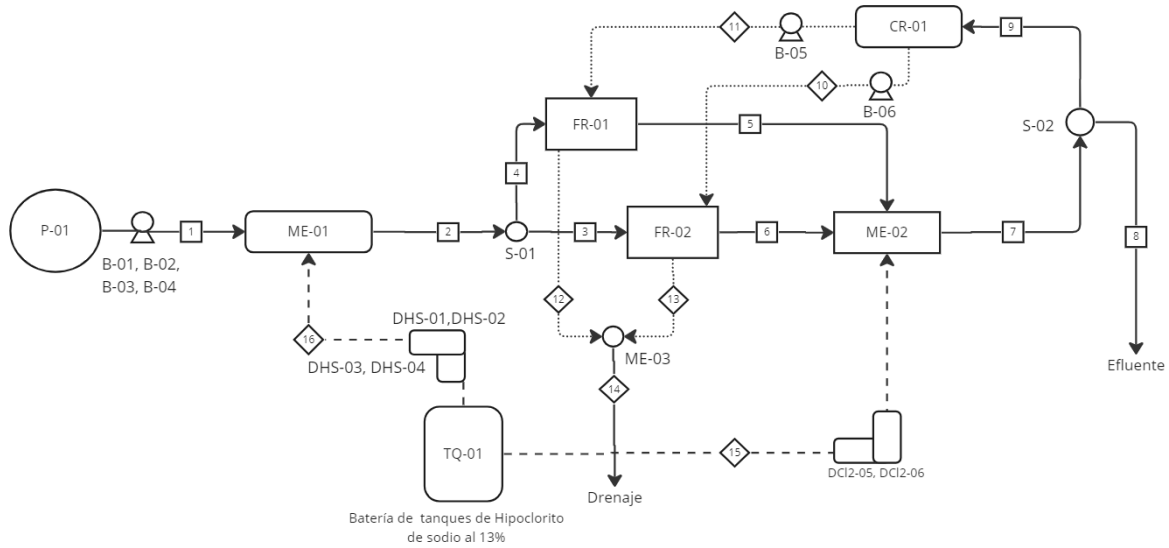


Figura 27. Diagrama de flujo de proceso de tren de tratamiento de cloración al punto de quiebre [Elaboración propia por medio de la plataforma Miro].

El proceso comienza con el bombeo de agua del pozo mediante una batería de cuatro bombas sumergibles (B-01) de 25L/s cada una para ingresar el agua a un mezclador estático (ME-01) donde llega también la corriente hipoclorito de sodio al 13% (HS13%) de la batería (TQ-01) de tanques por medio de tres bombas dosificadoras (DHS-01, DHS-02 y DHS-03/04) para realizar las reacciones correspondientes a la oxidación y el punto de quiebre, la corriente dos pasa a un separador que divide la corriente en partes iguales para ingresar a un filtro rápido cada uno (FR-01 y FR-02), estos filtros se diseñaron con carbón activado y gravilla como medio de soporte, al salir las corrientes se vuelven a juntar y a mezclar en el mezclador estático (ME-02) donde se llevará a cabo otro suministro de cloro para el control de desinfección y mantenimiento de cloro residual para garantizar la desinfección continua por medio de la bomba dosificadora (DHS-05/06), finalmente un 27% del agua tratada regresa por el cárcamo de rebombeo al limpiar los filtros rápidos y la otra se puede llevar a un tanque de almacenamiento o directo al efluente.

Como medio de tratamiento de residuos se encuentra un cárcamo de rebombeo (CR-01) donde con ayuda de una batería de dos bombas sumergibles se limpiarán los filtros (FR-01 y FR-02), a la salida esta agua irá a drenaje.

### 3.1.2.2. Dimensionamiento del proceso:

Para dimensionar el proceso se hará el diseño por equipos y procesos que conforman el tren completo buscando obtener un balance de materia con datos de cada corriente y apegándonos a la NOM-127-SSA1-2021 en la corriente del efluente, estos datos también nos servirán para hacer el análisis económico.

- Cloración a punto de quiebre y desinfección:

Se hace uso de los datos de la Tabla 15 para comenzar el dimensionamiento, los datos usados son:

$$Q = \frac{85L}{s} = \frac{7344m^3}{d}$$

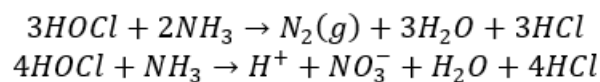
$$C_{NH_4^+} = 5.84mg/L$$

Datos de la NOM-127-SSA1-2021:

$$C_{NH_4^+} = 0.5mg/L$$

Cloro residual libre = 0.2 a 1.50mg/L

A continuación, se muestran los datos generales a usar, además la dosis de HOCl requerida se calculó mediante las reacciones que gobiernan el sistema; Rx. 4 y Rx. 5:



Datos generales:

Dosis cloro libre	1.5 mg/L
MM-HOCl	52.45 g/mol
MM-NaOCl	74.41 g/mol
Pureza NaOCl	0.13
MMNa+	22.98 g/mol
MMCl <sub>2</sub>	71 g/mol
MMN	14 g/mol
Relación HOCl/NH <sub>3</sub>	1.5

Conversión de NH<sub>3</sub> a N<sub>2</sub>:

Relación	7.61 mgCl <sub>2</sub> /mgN
Drequerida	44.43 mgCl <sub>2</sub> /L
DNaOCl	46.56 mgNaOCl/L
DNaOCl	3,957.55 mgNaOCl/s
DNaOCl	341.93 kgNaOCl/d
DNaOCl13%	2,630.25 L/d
DNaOCl13%	0.030 L/s

#### Desinfección:

DNaOCl	2.1280 mg/L
DNa+	0.6572 mg/L
DNaOCl	15.63 g/d
DNaOCl13%	120.22 L/d
DNaOCl13%	0.0014 L/s

NaOCl<sub>13%</sub> total: 2750.47 L/d

NaOCl<sub>13%</sub> al mes: 82,513.95 litros

La cantidad de hipoclorito de sodio al 13% se almacenará en tres tanques especializados para ello se contemplan tanques de polietileno reforzado al 40% de 35,000 litros.

- Mezclador estático (ME-01 y ME-02)

Los mezcladores se seleccionaron con el fabricante, lo importante aquí es el material ya que se mezclará hipoclorito de sodio al 13%, un reactivo corrosivo, por lo que contiene tubos de CS o SS revestidos de PTFE con elementos mezcladores sólidos en espiral de PTFE de 8in de diámetro, caída de presión menor a 0.5 bar, velocidad menor a 1 m/s, coeficiente de variación del 5% y puertos de inyección para corrientes menores.

- Filtración:

Se proponen dos filtros rápidos para eliminar materia orgánica, color, turbiedad y sedimentos oxidados de la etapa anterior con un medio filtrante de carbón activado y gravilla 6/10 como soporte, cada filtro se diseñó para 42.5L/s y ambos son exactamente iguales, por lo que se hará el diseño de uno y el otro será el duplicado:

- FR-01 y FR-02:

#### Condiciones:

Q	42.5 L/s
Q	153 m <sup>3</sup> /h
Módulos	2
Medio filtrante:	Carbón activado (CA)
Columnas de adsorción	6 CAgranular

#### Datos generales:

PURE AQUA, INC.

Tamaño <i>partícula</i>	0.7 mm
CH	4.8 a 12 m/h
Vretrolavado	10 a 12 gpm/ft <sup>2</sup> 25 a 30 m/h
Bordo libre	50 %
hmin cama	26 in
hoptima cama	30 in
Porcentaje expansión	30 a 40 %
Dcolumna ads de CAG	2.13 m
Dtobera	1 in
Qtobera máx	6 gal/min
Qtobera min	4 gal/min
Qretrolavado max	18 gal/min

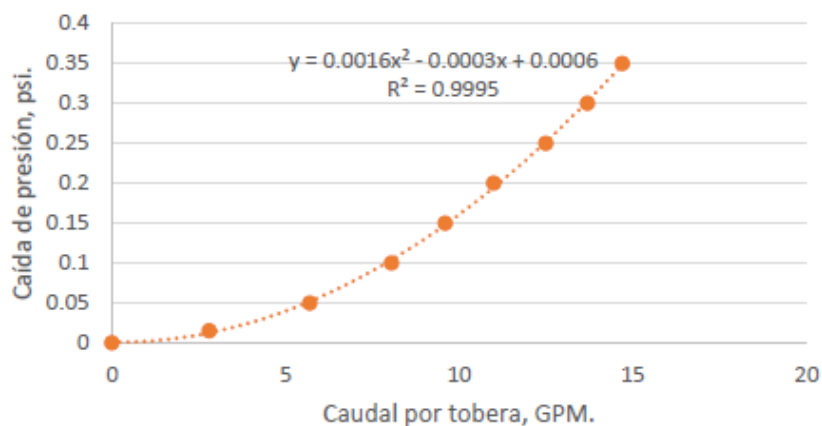


Figura 28. Gráfica de caída de presión de toberas. [Fabricante]

Diseño de columna:

CH	8 m/h
A lecho filtrante (Af)	19.13 m <sup>2</sup>
Af por columna	3.19 m <sup>2</sup>
Q por columna	7.08 L/s
Q por columna	25.5 m <sup>3</sup> /h
Q por columna	112.27 gpm

Retrolavado (RL):

VfiltraciónRL	9.6 m/h
VRL	25 m/h

QRL	79.69 m <sup>3</sup> /h
QRL	22.14 L/s

Columna de adsorción de CAG:

htot	4.28 m
htot tapas	0.65 m
hrecta del tanque	2.98 m
ht por columna	1.49 m
V por columna	4.7494 m <sup>3</sup>
Primer medio (CA)	80 %
h1	0.762 m
Segundo medio (gravilla)	20 %
h2	0.1905 m
htotmedio	0.9525
Vmedio	3.0361 m <sup>3</sup>

Expansión	40 %
Hexp	1.3335 m <sup>3</sup>
tr medio	0.1191 h
tr medio	7.1438 min

nmáx tobera	28.07
nmín tobera	18.71
NT	29

De la Figura 28:

y=	caída de presión
x=	caudal por tobera

Qfiltración tobera	0.2443 L/s
	3.8719 gpm

Caída de presión por columna de adsorción de CA:

HCA	0.0234 psi
QRT	0.7633 L/s
	12.0997 gpm
HRT	0.2337 psi

Tanque de retrolavado:

Tr 15 min  
 Vr 19921.88 L  
 19.92 m<sup>3</sup>

htot 4.5 m  
 Atot 4.43 m<sup>2</sup>

L 3 m  
 W 1.48 m  
 VTT 19.92 m<sup>3</sup>

- Separadores:

- S-01: Divide el caudal de agua en dos partes iguales para entrar a los filtros rápidos.
- S-02: Divide el caudal de agua tratada en dos, un 10% va hacia el cárcamo de rebombeo para cumplir con los requerimientos de lavado de los filtros rápidos, el resto se puede almacenar o ir hacia la distribución de agua para población.

- Cárcamo de rebombeo (CR-01):

El cárcamo de rebombeo considera dos bombas centrífugas para enviar agua de retrolavado a los flujos rápidos, se consideran dos bombas, una para cada filtro y circulan un caudal de 23.31L/s no se divide ya que el retrolavado no se hace simultáneamente sino uno a la vez para aprovechar el agua desviada.

### 3.1.2.3. Balance de materia

El balance de materia del sistema considerando todos los procesos y equipos utilizados se muestra a continuación:

Tabla 25. Balance de materia del tren de tratamiento de cloración a punto de quiebre.

Parámetros	Unidad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Caudal	L/s	85.00	85.03	42.52	42.52	42.52	42.52	87.52	<b>63.89</b>	23.63	23.63	23.63	23.63	23.63	47.26	0.0014	0.030
Turbiedad	(UNT)	44.95	58.79	58.79	58.79	2.94	2.94	2.94	<b>2.94</b>	2.94	2.94	2.94	61.73	61.73	61.73	-	-
DQO Total	(mg/L)	62.00	70.05	70.05	70.05	3.50	3.50	3.50	<b>3.50</b>	3.50	3.50	3.50	73.55	73.55	73.55	-	-
DBO5t	(mg/L)	40.30	45.53	45.53	45.53	2.28	2.28	2.28	<b>2.28</b>	2.28	2.28	2.28	47.81	47.81	47.81	-	-
Nitrógeno de Nitratos	(mg/L)	5.66	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	<b>0.28</b>	0.28	0.28	0.28	0.57	0.57	0.57	-	-

Nitrógeno de Nitritos	(mg/L)	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
Nitrógeno Amoniacal	(mg/L)	5.84	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	<b>0.29</b>	0.29	0.29	0.29	0.58	0.58	0.58	-	-

### 3.1.2.4. Resultados

La forma de concluir los resultados es mediante una comparación con las normas y guías que dan los límites de concentración de contaminantes máximos permisibles, en la Tabla 26 se muestra esta información y como puede verse todos los contaminantes están dentro de las normas y guías, el problema en este caso son los altos volúmenes de hipoclorito de sodio requeridos, aunque no sea un reactivo tan caro como otros si es peligroso, incluso el almacenamiento de este pero se puede observar el porcentaje de remoción y desinfección con una dosificación aplicada de 22,721.4 litros de hipoclorito de sodio al 13% por mes.

Tabla 26. Resultados obtenidos del tren de tratamiento de cloración a punto de quiebre [Elaboración propia con datos de la OMS y la NOM-127-SSA1-2021].

Parámetros	Unidades	NOM-127-SSA1-2021	Efluente
Caudal	L/s		63.89
DQO Total	(mg/L)	4.00*	3.50
DBO5t	(mg/L)		2.28
Nitrógeno de Nitratos	(mg/L)	11.00	0.28
Nitrógeno de Nitritos	(mg/L)	0.90	0.00
nitrógeno Amoniacal	(mg/L)	0.50	0.29

\*OMS

Tabla 27. Datos de la tecnología de cloración a punto de quiebre para ETAPs de la Ciudad de México.

Ventajas	Desventajas	Rehabilitación	Posibles equipos/acciones extra

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo muy bajo</li> <li>• Fácil integración a cualquier planta</li> <li>• Alta flexibilidad</li> <li>• No requiere operadores con alto grado de especialización</li> <li>• Poco mantenimiento</li> <li>• Pocos reactivos</li> <li>• Pocos operadores</li> <li>• Remoción cumple con la norma</li> <li>• Casi todas las ETAPs de la CDMX son aptas para este proceso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reactivo tóxico y de manejo cuidadoso, pero no difícil</li> <li>• Reactivo y mantenimiento económico</li> <li>• Requiere varios tanques de almacenamiento</li> <li>• Posiblemente no se usen varios equipos ya instalados</li> <li>• Se requiere un sistema de filtros rápidos</li> </ul>	<p>Posible y fácil</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtros rápidos</li> <li>• Retrolavado</li> <li>• Tanques de almacenamiento</li> <li>• Reajuste de tuberías</li> <li>• Reactivo indispensable</li> </ul>
--	--	------------------------	---

Se recomienda usar esta tecnología en estaciones de tratamiento con equipos similares o pocos, dando prioridad a no dejar en desuso alguno que todavía sea funcional y sea parte fundamental del proceso actual, con contaminantes como materia orgánica, nitrógeno amoniacal, bacterias, virus y protozoarios, baja concentración de bromuro ya que aumenta la concentración másica de subproductos, la remoción de subproductos del punto de quiebre se puede hacer con filtros rápidos o si resultan productos más volátiles usar aireación y remoción por arrastre de aire [Crittenden, et. al., 1986],

### 3.1.3. Biofiltros

La principal ventaja de los biofiltros es quizá que son capaces de remover una amplia gama de contaminantes presentes en el agua como materia orgánica, compuestos nitrogenados, metales pesados y algunos compuestos químicos, esto gracias a que su principio de funcionamiento se basa en los microorganismos como se explicó en la introducción, recordemos que los microorganismos metabolizan muchos tipos de contaminantes, lo que conduce a que sea un proceso natural y sostenible, no requiere de reactivos químicos tóxicos y tiene una baja generación de residuos lo que implica también un bajo costo operativo.

Las desventajas que podemos ver en este sistema son que necesitan más tiempo y espacio a comparación de otros métodos como el de punto de quiebre, son también sistemas sensibles a los cambios en las condiciones físicas como la temperatura, concentración de contaminantes en el influente, pH o presión, aunque esta última no es común que se dé.

#### 3.1.3.1. Diagrama de flujo de proceso

El diagrama de flujo de proceso propuesto se muestra en la Figura 29:



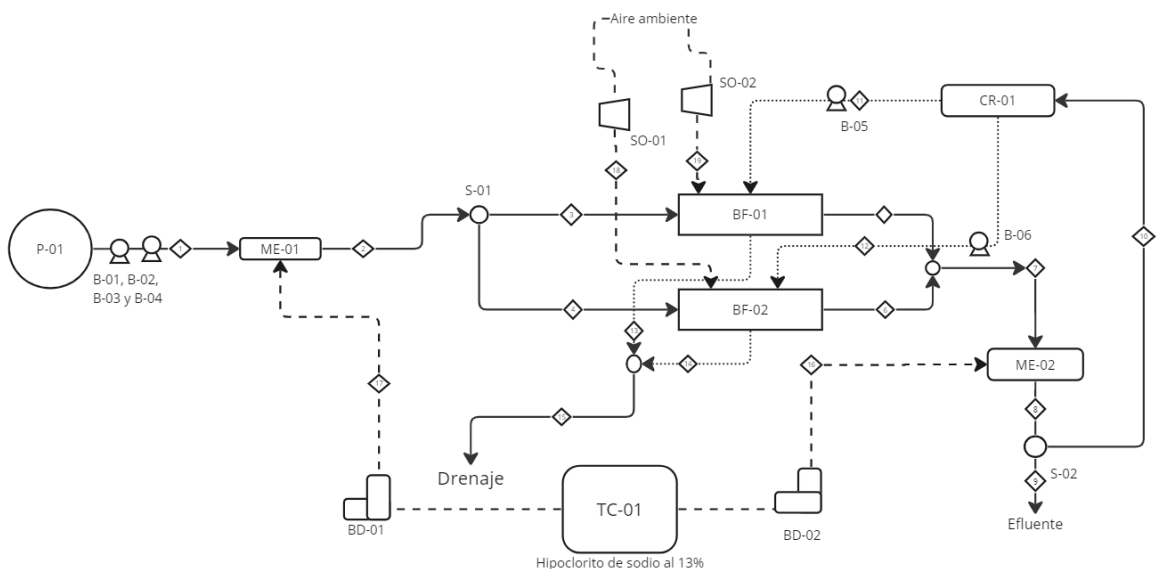


Figura 29. Diagrama de flujo de proceso de tren de tratamiento de Biofiltros [Elaboración propia por medio de la plataforma Miro].

Este proceso comienza también con la extracción del influente del pozo mediante cuatro bombas sumergibles de 25L/s (B-01, B-02, B-03/04), pasan por un mezclador estático al que también llega una corriente de hipoclorito de sodio al 13% para oxidar algunos compuestos, al salir, la corriente dos se separa en dos para entrar a los biofiltros (BF-01 y BF-02), se ha decidido diseñar dos para que el tamaño de cada uno no resulte tan grande y por medidas de seguridad, estos biofiltros llevan como soporte Filtralite HC 2, 5-5 y compresores (SO-01 y SO-02) que suministran aire al proceso para que pueda llevarse a cabo, hay que recordar que el proceso es anóxico y aerobio. A la salida las dos corrientes se juntan para pasar por el segundo mezclador estático (ME-02) en el cual se terminará el proceso con la dosificación de hipoclorito de sodio al 13% para desinfectar, una parte del efluente ya desinfectado va hacia un tanque de almacenamiento o hacia la población y la otra se recircula por medio de un cárcamo de rebombeo (CR-01) para la limpieza de los biofiltros.

Los residuos generados en este proceso provienen de los biofiltros, los cuales son limpiados con agua de recirculación del efluente llevada por medio de bombas centrífugas, los residuos de esta limpieza se llevan al drenaje.

Para este proceso es necesaria una oxidación previa para asegurar que la corriente entre a los biofiltros asegurando una mejor eficiencia debido a:

1. Eliminación de sustancias y compuestos orgánicos recalcitrantes, algunos pesticidas, productos farmacéuticos o químicos persistentes que pueden interferir con el proceso biológico.
2. Mejora la biodegradabilidad; al oxidar el agua antes de ingresar a los biofiltros los compuestos oxidantes pueden reaccionar con sustancias orgánicas complejas y obtener como producto formas más fácilmente biodegradables.
3. Una desinfección previa de contaminantes patógenos es buena para el resultado final.
4. También mejora la calidad del agua a la entrada a los biofiltros reduciendo los parámetros físicos como el color, turbidez e incluso sabor que es un parámetro muy importante para el efluente.
5. Garantiza una disminución de sustancias que puedan provocar problemas de incrustaciones o corrosión en todo el sistema de tratamiento.

### 3.1.3.2. Dimensionamiento del proceso

- Oxidación con hipoclorito de sodio 13%:

Condiciones:

Q	85 L/s
Q	7344 m <sup>3</sup> /d
CFe	0.50 mg/L
CMn	0.06 mg/L
CNH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	5.84 mg/L

Datos generales:

NOM-127-SSA1-2021	
CFe	0.30 mg/L
CMn	0.15 mg/L
CNH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.50 mg/L
Dosis cloro libre	1.5 mg/L
MM-HOCl	52.45 g/mol
MM-NaOCl	74.41 g/mol
Pureza NaOCl	0.13

Dosificación para oxidar:

HOCl-Fe	0.06 mg/L
HOCl-Mn	0.06 mg/L
HOCINH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1.54 mg/L

\*Como únicamente se quiere oxidar compuestos diferentes al amoníaco este no se considerará.

Demanda de cloro para oxidación:

Dox	0.12 mg/L
Dmin cloro	1.62 mg/L
DNaOCl	1.14 mg/L
FNaOCl	8.39 kg/d
QNaOCl13%	64.5087339 L/d
QNaOCl13%	0.0007 L/s

- Desinfección con hipoclorito de sodio 13%:

Condiciones:

Q	85.0007 L/s
Q	7344.06 m <sup>3</sup> /d

Datos generales:

NOM-127-SSA1-2021	
CNH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.50 mg/L
Dosis cloro libre	1.5 mg/L
MM-HOCl	52.45 g/mol
MM-NaOCl	74.41 g/mol
Pureza NaOCl	0.13

Desinfección:

DNaOCl	2.13 mg/L
DNa <sup>+</sup>	0.66 mg/L
DNaOCl	15.63 g/d
DNaOCl13%	120.22 L/d
DNaOCl13%	0.0014 L/s

Dosis de NaOCl13% total=

184.7274 L/d
0.0021 L/s

- Filtro biológico

Condiciones:

DQO	62.00 mg/L
SST	21.08 mg/L
N-NH <sub>3</sub>	5.84 mg/L
Materia biodegradable	0.65
DBO <sub>5t</sub>	40.3 mg/L
Altura del medio	3 m

Datos generales:

Filtros	2
Caudal (Q)	42.5 L/s
Q	153 m <sup>3</sup> /h
Caudal	21.25 L/s
Módulos	3
Filtros PM	2
Filtros totales	6
Soporte:	Filtralite HC 2, 5-5
T	25 °C
P.F (factor de flujo máximo)	1

Carga de contaminantes en el medio:

Carga DBO <sub>5t</sub>	227.66 kg/d
Carga SST	77.41 kg/d
Carga N-NH <sub>3</sub>	21.44 kg/d

Carga volumétrica [WEF,2010]:

Carga DBO <sub>5t</sub>	<	1.0-2.0	kg/m <sup>3</sup> d	
Carga SST	<	1.0-1.6	kg/m <sup>3</sup> d	
Carga N-NH <sub>3</sub>	<	0.5-1.6	kg/m <sup>3</sup> d	10°C
Carga N-NH <sub>4</sub>	<	1.0-1.6	kg/m <sup>3</sup> d	20°C
CH	3-20	m/h		

Carga volumétrica calculada:

DBO5t	2 kg/m3d
SST	1.6 kg/m3d
N-NH3	1.6 kg/m3d

Volumen del medio requerido:

V1 DBO	113.83 m3
V2 SST	48.38 m3
V3 N-NH3	13.40 m3

Volumen del medio \*seleccionando volumen máximo

Vm	113.83 m3
A	37.94 m2

Cálculo de carga hidráulica (CH) y área de filtración requerida (AF):

CH	3.21 m/h
AF	47.67 m2

Tamaño de celda (Ac):

Ac	36 m2
----	-------

Tiempo entre retrolavado (Ter):

Ter	24 h
-----	------

Número de filtros:

nrequeridos	1.054
ntotales	2

Capacidad de retención de sólidos:

Cr	2.5 kg/m3 ciclo
----	-----------------

Capacidad de retención del medio:

Cm	540 kg/ciclo
----	--------------

Biomasa removida (Byield):

Byield	0.5-0.8	kgsst/kgdbo
Byield	0.8	kgsst/kgdbo

Producción de sólidos:

Ps	182.13 kg/d
Ps	7.59 kg/h

Frecuencia de retrolavado:

	48 h	máximo
Nr		1 (Filtros en retrolavado)
CHr		4.25 m/h

Volumen de agua de retrolavado:

V	9.20 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> medio	(CH durante retrolavado)
Vagua	331.20 m <sup>3</sup>	

Concentración de sólidos:

Cs	0.2750 kg/m <sup>3</sup>
Cs	274.96 mg/L

Caudal de retrolavado:

Tr	150 min
Qr	36.80 L/s
CHre	3.68 m/h

Caudal de aire para el reactor biológico:

Amoniaco	7.51 mg/L
----------	-----------

Caudal masico nitrógeno amoniacal

QN-amoniacal	21.44 kg/d
--------------	------------

\*Considerando dosificación de O<sub>2</sub> para nitrificación [EPA,2014]

DO <sub>2n</sub>	4.60 mg O <sub>2</sub> /mg N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
------------------	---

Caudal de oxígeno:

Q-O <sub>2</sub>	98.64 kg/d
Qm-O <sub>2</sub>	3.08 kmol/d

Caudal másico DBO:

Q-DBO	227.66 kg/d
-------	-------------

\*Considerando dosificación de O<sub>2</sub> para remoción de materia orgánica [Metcalf&Eddy,2004]

DO <sub>2rmo</sub>	0.9-1.3	kgO <sub>2</sub> /kgDBO
DO <sub>2rmo</sub>	1.3	kgO <sub>2</sub> /kgDBO

Caudal de oxígeno:

Q-O2                    295.96 kg/d  
Qm-O2                    9.25 kmol/d

Flujo total de oxígeno:

FtO2                    394.61 kgO2/d  
FtmO2                    12.33 kmolO2/d

Intervalo de rendimiento de transferencia de oxígeno

$$0.05 < \varepsilon < 0.15$$

Caudal de O2 corregido

$\varepsilon$                     0.07  
Q-O2c                    189.72 kmolO2/d  
Q-N2                    713.69 kmolN2/d

Caudal volumétrico de aire:

P                    0.78 bar  
T                    298.15 K  
R                    83.15 L bar/K mol  
Qaire                    28711.73 m3/d  
Qaire                    **1196.32 m3/h**  
Qaire                    332.31 L/s

- Sopladores:

Datos del equipo:

Motor:

Potencia                    73.38 Kw  
Potencia                    98.36 HP  
Q                    1,925.30 ft3/min

Pbe                    101.325 kPa  
Tw                    25 °C  
yw                    9.819 kN/m2

$\rho_{aire}$                     1.293 kg/m3

d                    3 m  
R                    287 J/kgK

Profundidad del difusor:

\*Burbuja gruesa                    (Mueller et. al, 2002)

df 0.4 (poros finos y chorros)  
df 0.3 (burbuja gruesa)  
df 0.9 m

### 3.1.3.3. Balance de materia

Tabla 28. Balance de materia del tren de tratamiento de Biofiltros.

Parámetros	Unidad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Caudal	L/s	85.00	85.00	42.50	42.50	42.50	42.50	85.00	85.00	<b>47.60</b>	37.40	37.40	37.40	37.40	37.40	37.40	0.0014	0.0007
DQO Total	(mg/L)	62.00	52.70	52.70	52.70	5.27	5.27	5.27	3.69	<b>3.69</b>	3.69	3.69	3.69	48.48	48.48	48.48	-	-
DBO5t	(mg/L)	40.30	34.26	34.26	34.26	3.43	3.43	3.43	2.40	<b>2.39</b>	2.40	2.40	2.40	33.91	33.91	33.91	-	-
SST	(mg/L)	21.08	27.28	27.28	27.28	4.09	4.09	4.09	5.15	<b>5.14</b>	5.15	5.15	5.15	28.33	28.33	28.33	-	-
Nitrógeno de Nitratos	(mg/L)	5.66	5.66	5.66	5.66	0.57	0.57	0.57	0.57	<b>0.56</b>	0.57	0.57	0.57	5.66	5.66	5.66	-	-
Nitrógeno de Nitritos	(mg/L)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.09	<b>0.09</b>	0.09	0.09	0.09	0.12	0.12	0.12	-	-
Nitrógeno Amoniacal	(mg/L)	5.84	5.84	5.84	5.84	0.58	0.58	0.58	0.50	<b>0.49</b>	0.50	0.50	0.50	5.75	5.75	5.75	-	-

### 3.1.3.4. Resultados

En la Tabla 28 se muestra el balance de materia y podemos ver en la Tabla 29 que todos los contaminantes están dentro de las normas y guías, el problema en este caso son los altos volúmenes de hipoclorito de sodio requeridos, aunque no sea un reactivo tan caro como otros si es peligroso, incluso el almacenamiento de este pero se puede observar el porcentaje de remoción y desinfección con una dosificación aplicada de 22,721.4 litros de hipoclorito de sodio al 13% por mes.

Tabla 29. Resultados obtenidos del tren de tratamiento de biofiltros [Elaboración propia con datos de la OMS y la NOM-127-SSA1-2021].

Parámetros	Unidades	NOM-127-SSA1-2021	Efluente
Caudal	L/s		<b>47.60</b>
DQO Total	(mg/L)	4*	<b>3.69</b>
DBO5t	(mg/L)		<b>2.39</b>
Nitrógeno de Nitratos	(mg/L)	11	<b>5.14</b>
Nitrógeno de Nitritos	(mg/L)	0.9	<b>0.56</b>
Nitrógeno Amoniacal	(mg/L)	0.5	<b>0.09</b>

\*OMS



Tabla 30. Datos de la tecnología de biofiltros para ETAPs de la Ciudad de México.

Ventajas	Desventajas	Rehabilitación	Posibles equipos/acciones extra
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo accesible</li> <li>• Alta flexibilidad</li> <li>• No requiere operadores con alto grado de especialización</li> <li>• Poco mantenimiento</li> <li>• Pocos reactivos</li> <li>• Pocos operadores</li> <li>• Remoción cumple con la norma</li> <li>• Casi todas las ETAPs de la CDMX son aptas para este proceso.</li> <li>• Cantidades muy bajas de reactivo tóxico y de manejo cuidadoso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seguramente se necesite comprar equipo de biofiltros con empaque.</li> <li>• Reactivo y mantenimiento económico.</li> <li>• Posiblemente no se usen varios equipos ya instalados.</li> <li>• Solo se requiere un equipo principal, los demás equipos seguramente se tienen en las plantas.</li> <li>• Uso de aireadores.</li> <li>• Limpieza de los biofiltros.</li> </ul>	<p>Posible</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biofiltros</li> <li>• Aereadores</li> <li>• Retrolavado</li> <li>• Tanques de almacenamiento</li> <li>• Reajuste de tuberías</li> <li>• Reactivo indispensable para desinfección.</li> </ul>

Se recomienda usar esta tecnología en estaciones de tratamiento con equipos similares o pocos, dando prioridad a no dejar en desuso alguno que todavía sea funcional y sea parte fundamental del proceso actual, es preferible para contaminantes como materia orgánica, compuestos nitrogenados, fluoruros, aluminio particulado, algunos microorganismos, para que esta tecnología tenga una alta eficiencia es necesaria una alta carga de materia orgánica dentro de los valores comunes de agua de pozo, un buen empaque también es importante para promover el crecimiento de microorganismos, de no tenerse una carga alta de materia orgánica el caudal tendría que aumentar o disminuir la carga hidráulica, es ideal para un pH entre 6.5 a 8.5, y se deben cuidar factores como el oxígeno disuelto, tiempo de retención hidráulica, medio de soporte, distribución uniforme de agua y control de olores, este último no debe tener ningún problema si el funcionamiento es correcto.

En el último registro de Conagua en 2021 (Tabla 16) no se muestra ninguna planta con esta tecnología a menos que sea registrada como “Filtración rápida” sin embargo considerando los problemas actuales de la Ciudad de México esta tecnología es idónea para eliminar los componentes que se está presentando en aumento junto con los caudales altos de agua necesarios para abastecer la ciudad.

### 3.1.4. Ósmosis inversa

La ósmosis inversa es un proceso con alta eficiencia de remoción de contaminantes de una amplia gama, pues depende de su tamaño, entre estos se incluyen sales, minerales, metales pesados, compuestos orgánicos e incluso de microorganismos, debido a su principio de funcionamiento (la ósmosis) no requiere de uso de reactivos químicos adicionales convirtiéndolo así en un proceso muy seguro.

Es flexible y adaptativo ya que tiene holgura en recibir influentes de agua no solo de pozo sino de mar, salobre o subterránea; la cual es de nuestro interés, pero podría variar esto.

Las desventajas que presenta esta tecnología es un alto consumo energético para operar bombas y generar la presión necesaria para forzar el paso del agua a través de las membranas además de que es indispensable que antes de que el agua entre a las membranas se eliminen algunos contaminantes que puedan dañarlas como solidos suspendidos o algunas sustancias químicas, las membranas son muy sensibles y requieren limpieza y mantenimiento constante, por último tiene una baja recuperación de agua debido a que gran parte del caudal de entrada se descarga como rechazo concentrado.

#### 5.1.4.1. Diagrama de flujo de proceso

El diagrama de flujo de proceso propuesto para la osmosis inversa se puede observar en la Figura 30

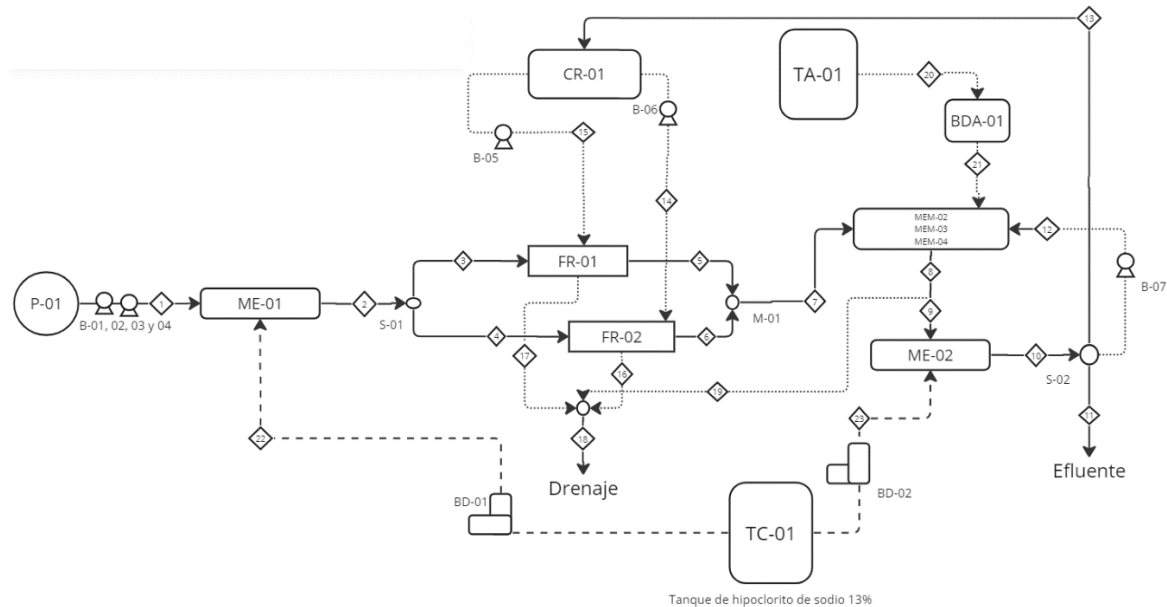


Figura 30. Diagrama de flujo de proceso de tren de tratamiento con ósmosis inversa [Elaboración propia por medio de la plataforma Miro].

El proceso comienza con la extracción de agua del pozo con una batería de cuatro bombas sumergibles (B-01, B-02, B-03/04) de 25L/s, se junta esta corriente con otra con hipoclorito de sodio al 13% (HNa13%) en un mezclador estático (ME-01) donde ocurrirá una preoxidación, al salir de ese sistema la corriente se divide en dos iguales por medio de un separador (SE-01) hacia filtros rápidos (FR-01 y FR-02) y ahí quitar las impurezas que puedan dañar a las membranas, las corrientes se juntan y pasan al sistema de membranas (MEM-01, MEM-02, MEM-03) las cuales cuentan con módulos de varias etapas y tubos determinados por membrana, al salir llegan al segundo mezclador estático (ME-02) donde se juntan con otra dosis de HNa13% pero esta vez para desinfección, un separador (S-02) divide la corriente en tres, una parte sale como corriente lista para almacenar o para la población, otra para limpiar los filtros rápidos y una última para limpiar las membranas.

\*Las membranas tienen una dosificación constante de antiincrustante proveniente de las bombas (BDA-01/02) para evitar que las membranas se dañen.

\*\*Los desechos del sistema se producen en el lavado de los filtros rápidos y las membranas, estos lodos se vierten al drenaje.

#### 5.1.4.2. Dimensionamiento del proceso

- Oxidación con hipoclorito de sodio 13%:

Condiciones:

Q	85 L/s
Q	7344 m <sup>3</sup> /d
CFe	0.50 mg/L
CMn	0.06 mg/L
CNH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	5.84 mg/L

Datos generales:

NOM-127-SSA1-2021	
CFe	0.30 mg/L
CMn	0.15 mg/L
CNH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.50 mg/L
Dosis cloro libre	1.5 mg/L
MM-HOCl	52.45 g/mol
MM-NaOCl	74.41 g/mol
Pureza NaOCl	0.13

Dosificación para oxidar:

HOCl-Fe	0.06 mg/L
HOCl-Mn	0.06 mg/L
HOCINH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1.54 mg/L

\*Como únicamente se quiere oxidar compuestos diferentes al amoníaco este no se considerará.

Demanda de cloro para oxidación:

Dox	0.12 mg/L
Dmin cloro	1.62 mg/L
DNaOCl	1.14 mg/L
FNaOCl	8.39 kg/d
QNaOCl13%	64.5087339 L/d
QNaOCl13%	0.0007 L/s

- Desinfección con hipoclorito de sodio 13%:

Condiciones:

Q	85.0007 L/s
Q	7344.06 m <sup>3</sup> /d

Datos generales:

NOM-127-SSA1-2021

CNH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.50 mg/L
Dosis cloro libre	1.5 mg/L
MM-HOCl	52.45 g/mol
MM-NaOCl	74.41 g/mol
Pureza NaOCl	0.13

Desinfección:

DNaOCl	2.13 mg/L
DNa <sup>+</sup>	0.66 mg/L
DNaOCl	15.63 g/d
DNaOCl13%	120.22 L/d
DNaOCl13%	0.0014 L/s

Dosis de NaOCl13% total=

184.7274 L/d

0.0021 L/s

- Filtros rápidos:
- Dosificación de antiincrustante:

Q	85 L/s
	0.085 m <sup>3</sup> /s
DRA*	2 a 5 mg/L
D	1.05 a 1.15 g/cm <sup>3</sup>
D	1.05 g/cm <sup>3</sup>
Dosis	3.50 mg/L
FA	297.50 mg/s
MA	1.07 kg/h
Q	283.33 L/s

\*Dosificación recomendada de antiincrustante

- Ósmosis inversa:

Datos:

Caudal	85 L/s
Caudal	306 m <sup>3</sup> /h
C-Na	363.21 mg/L
C-SDT	1441.00 mg/L
Dureza	mg de
total	460.00 CaCO <sub>3</sub> /L
CFe	0.02 mg/L
CMn	0.04 mg/L
CNH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	5.68 mg/L

Para llevar a cabo el cálculo se considera la siguiente membrana: BW30HR-220

\*Es necesario elegir una membrana y después ajustar para obtener datos del fabricante útiles para el diseño.

Rechazo nominal de sales: 99.4%

Área activa: 41m<sup>2</sup>

También se consideran los siguientes criterios:

Flux para agua de pozo = 27 – 34 lmh= 16 – 20 gfd [DuPont, 2020]

Caudal máximo de alimentación por tubo= 17m<sup>3</sup>/h

Número de membranas por tubo: 6

Cálculo de fracción a derivar:

QB 200 mg/L

QP 363.21 mg/L

FB 0.55064563

FB 55%

Fracción para tratar

FF 0.44935437

\*Se consideran dos etapas

- Etapa 1:

QF 304.32 m<sup>3</sup>/h

r (estimación) 0.79

QP 240.41 m<sup>3</sup>/h

QC 63.91 m<sup>3</sup>/h

D 8 m<sup>3</sup>/h

Flux de diseño 16-20 gal/ft<sup>2</sup> día (DuPont,2020)

Flux de diseño 16 gal/ft<sup>2</sup> día

Flux de diseño 27.16 L/m<sup>2</sup> h

Área activa 41 m<sup>2</sup>

QP permeado 1113.73 L/h

QP permeado 1.11 m<sup>3</sup>/h

Rechazo de sales mínimo

(Rej) 0.994

Flujo máximo de alimentación por tubo 17 m<sup>3</sup>/h

Flujo mínimo de rechazo por tubo 2.7 m<sup>3</sup>/h

Número de membranas por tubo 6

Numero de membranas por flux 57.38

Número de membranas 215.86

Número de membranas 154

Número de tubos 25.67

Número de tubos 26.00

Flujo alimentado por tubo (FAT) 11.70 m<sup>3</sup>/h

Flujo de rechazo por tubo (FRT) 2.46 m<sup>3</sup>/h

- Etapa 2:

r		
(estimación)	0.62	
QF2	63.91	m3/h
QP2	39.62	m3/h
QC2	24.28	m3/h
D	8	in
Flux de diseño	10.5	gal/ft2 día (DuPont,2020)
Flux de diseño	17.83	L/m2 h
Área activa	41	m2
QP		
permeado	730.88	L/h
QP		
permeado	0.7309	m3/h
Rechazo de sales mínimo		
(Rej)	0.994	
Flujo máximo de alimentación por tubo	17	m3/h
Flujo mínimo de rechazo por tubo	2.7	m3/h
Número de membranas por tubo	6	
Número de membranas	54.21	
Número de membranas	89	
Número de tubos	14.83	
Número de tubos	15.00	
Flujo alimentado por tubo (FAT)	4.26	m3/h
Flujo de rechazo por tubo (FRT)	1.62	m3/h

Etapa 3:

r		
(estimación)	0.58	
QF3	24.28	m3/h
QP2	14.08	m3/h
QC2	10.20	m3/h
D	8	in
Flux de diseño	10.5	gal/ft2 día (DuPont,2020)
Flux de diseño	17.83	L/m2 h





0.37	0.37	0.37	0.37	0.65	0.65	5.76	5.11	-	-
------	------	------	------	------	------	------	------	---	---

#### 5.1.4.4. Resultados

La forma de concluir los resultados es mediante una comparación con las normas y guías que dan los límites de concentración de contaminantes máximos permisibles, en la Tabla 32 se muestra esta información y se puede observar que todos los contaminantes lograron cumplir con la norma o guía correspondiente, un problema de este proceso es el efluente, debido a la retención de agua de las membranas con la concentración de contaminantes nos deja con solo 64.51L/s, también debe considerarse que es un proceso además de muy eficiente más difícil de operar que los otros dos analizados.

Tabla 32. Resultados obtenidos del tren de tratamiento de ósmosis inversa [Elaboración propia con datos de la OMS y la NOM-127-SSA1-2021].

PARÁMETROS	UNIDAD	NOM-127-SSA1-2021	Efluente
Caudal	L/s		<b>25.16</b>
Turbiedad	(UNT)	4	<b>3.24</b>
DQO Total	(mg/L)	4*	<b>2.64</b>
DBO5t	(mg/L)		<b>1.71</b>
Nitrógeno de Nitratos	(mg/L)	11	<b>0.66</b>
Nitrógeno de Nitritos	(mg/L)	0.9	<b>0.00</b>
Nitrógeno Amoniacal	(mg/L)	0.5	<b>0.37</b>

\*OMS

#### 3.1.5. Resultados preliminares

Después de diseñar tres trenes de tratamiento y dimensionar sus equipos para obtener una remoción de contaminantes satisfactoria con las normas y guías correspondientes en la Tabla 33 y con las conclusiones de cada una podemos compararlas ya que además partimos de las mismas condiciones para cada uno.

Aunque el proceso de osmosis inversa fue el que obtuvo mejores resultados respecto a la remoción de contaminantes la realidad es que no varía tanto respecto al tren de tratamiento de cloración y este último resulta mucho más barato y fácil de operar además de más flexible por lo que se considera que es la opción ideal para la rehabilitación de estaciones de tratamiento.

Tabla 33. Comparación de resultados de concentraciones de los contaminantes de interés obtenidos en el efluente de cada uno de los trenes de tratamiento (TT).

Parámetros	unidades	NOM-127-SSA1-2021	TT1	TT2	TT3
Caudal	L/s	-	63.89	47.6	25.16
DQO Total	(mg/L)	<b>4*</b>	3.5	3.69	2.64
DBO5t	(mg/L)		2.28	2.39	1.71
Nitrógeno de Nitratos	(mg/L)	<b>11.00</b>	0.28	5.14	0.66
Nitrógeno de Nitritos	(mg/L)	<b>0.90</b>	0	0.56	0
Nitrógeno Amoniacal	(mg/L)	<b>0.50</b>	0.29	0.09	0.37

### 3.3. Análisis económico

Para realizar este estudio es importante dividir el análisis en el costo que la sociedad y el gobierno destinan al no tener agua potable o tenerla de manera intermitente y el costo de rehabilitar o construir una nueva estación de tratamiento de agua potable para comparar ambas y ver más claro el nivel de costo beneficio en caso de existir.

#### 3.3.1. Costo de no tener una cobertura completa y constante de agua potable

En este análisis hay que delimitar un área ya que la Ciudad de México además de ser muy grande tiene varias estaciones de tratamiento para dotar a la población de agua potable, para lo cual se tomó en cuenta una colonia de la alcaldía Iztapalapa, ya que es una de las más grandes y pobladas, además de acuerdo con los datos reportados en el inventario de plantas y los estudiados en la introducción es la delegación con mayores problemas tanto de abastecimiento como de niveles de concentración de contaminantes.

Según datos del gobierno de México 2020 y MarketDataMéxico, 2020:

Población total de Iztapalapa: 1,835,483 habitantes (51.6% mujeres, 48.4% hombres)

Los rangos de edad son:

- 25 a 29 años: 151,590 habitantes
- 20 a 24 años: 150,740 habitantes
- 30 a 40 años: 144,870 habitantes

Todos estos habitantes representan el 24.4%, lo que significa que la mayoría son niños y/o adultos mayores.

Colonias totales: 554

Colonia de interés: Cerro de la estrella I (CEI).

Habitantes de la colonia de interés: 1,100 personas

Unidades habitacionales: 305

Habitantes por unidad habitacional: 3.6 personas

Comercios: 120

Población flotante: 220 personas

Para el caudal de agua se va a suponer que del total que debe haber por familia según la OMS (100L/hab/día), es decir; 361L/d por cada hogar tomando en cuenta el número promedio de personas que habitan en la colonia CEI.

En el caso de la población flotante al no ser una alcaldía ni una colonia industrial o tan concurrida se estimó el 20% de la población total, dando como resultado: 220 personas. La población flotante es aquella que llega a laborar o de visita, por lo que se considera en los comercios y viviendas.

Para los comercios se consideraron 120 por la zona y se sugirieron varios tipos. El caudal se especifica mejor en la tabla con datos que sugieren Methcalf & Eddy en WWE, 2003.

Tabla 34. Datos del caudal de agua de distintos comercios para el análisis económico. [Elaboración propia con datos de WWE, 2003]

Comercio	Comercios totales	Caudal		Personas	Caudal total
Barbería	3	189	L/silla	10	5,678
Estética + spa	5	473	L/silla	8	18,927
Oficina general	20	95	L/empleador	2	3,785
Bar	8	76	L/silla	30	18,170
Restaurante	45	151	L/silla	40	272,549
Servicio médico	15	946	L/empleador	10	141,953
Tienda	20	303	L/tienda	2	12,113
Tienda departamental	4	492	L/persona	2	3,937
<b>TOTAL</b>	<b>120</b>				<b>477,112</b>

El hecho de que en la Ciudad de México desde hace años no se cuente con agua potable regularmente ha hecho que la población no confíe en la calidad de este recurso cada vez que se usa, la población recurre a la compra de garrafones y botellas para beber, preparar sus alimentos y algunas actividades no recurrentes como fines sanitarios aunque debería usarse también para bañarse, lavarse los dientes, lavar trastes y manos, por lo que del total de agua requerida por habitantes y comercios se considerará que se compra un 40% y 30% respectivamente.

Por lo tanto; en total se compran 187,134L/d y 5,614,006L/mes

Las formas de compra de esta agua se dividen en pipas, garrafones de 20L, 10L y 10L o botellas de agua de 1L, 2L o 3L.

Los precios de las pipas son los siguientes de acuerdo con el gobierno en 2023:

- 2,500L en 1,300\$
- 5,000L en 1,500\$
- 10,000 en 1800\$

\*En la página del estado dice que pueden solicitar pipas gratis pero realmente el costo lo lleva la alcaldía por lo que aun así se considerará.

En cuanto a los precios de los garrafones y botellas se investigaron en internet en 2023 los precios más competitivos de marcas más usadas y se obtuvieron los siguientes:

- Garrafón:  
20L en 45\$  
10L 30\$
- Botellas de agua de 1.5L (la más comprada) en 12\$

Para distribuir el volumen de agua necesitada al mes comprada por diferentes vías y obtener un costo de lo que se gasta en esto se desarrolló la Tabla 35.

Tabla 35. Distribución de alternativas de compra de agua por litros comprados y costo.

	Litros	Precio	# Unidades ocupadas	L/d	L/mes	Costo
Pipas	2,500	1,300	5	12,500	375,000	195,000
	5,000	1,500	4	20,000	600,000	180,000
	10,000	1,800	2	20,000	600,000	108,000
Garrafón	20	45	5,500	110,000	3,300,000	7,425,000
	10	30	2,300	23,000	690,000	2,070,000
Botella	1.5	12	1,100	1,650	49,500	396,000
TOTAL				187,150	5,614,500	\$10,374,000.00

Otro aspecto a tener en cuenta es el impacto en la salud. Como se mencionó previamente, la escasez de agua potable puede dar lugar a diversas deficiencias que abarcan desde problemas leves como diarrea e infecciones cutáneas hasta enfermedades más graves como tracoma, esquistosomiasis, hepatitis, fiebre tifoidea, disentería, cólera y diarrea severa. Actualmente, no disponemos de estudios específicos que nos proporcionen datos sobre la presencia de estas enfermedades en la Ciudad de México o en la alcaldía a la que pertenece esta colonia. Sin embargo, consideraremos las enfermedades leves y los costos asociados a consultas en farmacias particulares y clínicas u hospitales gubernamentales.

Supondremos que un 10% de la población se ve afectada por enfermedades relacionadas con la falta de agua potable cada mes, lo que equivale a 110 personas. De estas, el 80% busca atención médica, lo que se traduce en 88 personas.

Existen dos opciones para las consultas médicas: recurrir a un médico particular o acudir a un centro de salud o entidad gubernamental. Al analizar los salarios de los médicos en el sector de la salud, así como el número de pacientes por consulta en el IMSS, y considerando el costo promedio de una consulta privada estimado en \$60, se determina un costo de consulta tanto para el gobierno como para los habitantes. Además, se estima un gasto promedio de \$250 en farmacias y electrolitos, aplicable a ambas opciones. Los detalles específicos de estos costos se encuentran desglosados en la Tabla 36.

Tabla 36. Costo de la salud por falta de agua potable.

		Costo	Costo por días	Costo por mes
Consultas particulares	62	60	3,696	110,880
Consultas salud pública	26	60	1,584	47,520
Medicamentos	84	250	27,500	825,000
			<b>TOTAL</b>	<b>\$983,400</b>

El costo estimado de no contar con agua potable en una colonia de la Ciudad de México da como resultado al mes **\$11,357,400.00**, este es un resultado muy aproximado ya que se podrían añadir otros parámetros como la basura extra generada, enfermedades más graves junto con sus tratamientos que se vuelven crónicos, la resistencia bacteriana ocasionada por el consumo de agua no apta para consumo humano o un análisis más desarrollado de lo sí considerado.

El caudal de agua requerido sería:

Tabla 37. Cálculo y distribución de caudal requerido por la colonia CE1.

Población	Caudal	Unidades
Habitantes	44,000	L/d
Población flotante	143,133.545	L/d
<b>TOTAL</b>	<b>187,134.54</b>	<b>L/d</b>
	<b>2.16</b>	<b>L/s</b>

### 3.3.2. Costo de rehabilitar una estación de tratamiento de agua potable

La rehabilitación de una ETAP se puede dividir en varias etapas; primero se requieren estudios sociales, ambientales, topográficos, hidráulicos, de geotecnia, mecánica de suelos, red sanitaria y pluvial, descripción general del proceso a cambiar, planos de la planta anterior como diagrama general (ley out), diagrama de tubería e instrumentación, diagrama de flujo de proceso, planos eléctricos y hojas de datos de equipos, posteriormente se hace un análisis para desarrollar el nuevo tren de tratamiento tomando los datos previos, la entrega en esta etapa considera la descripción general del proceso, dimensionamiento de equipos con todos los planos de la primera etapa pero redimensionado para ajustarlo a cada uno de los nuevos trenes de tratamiento, con esto se calculan costos donde se considera desmontaje e instalación de equipamiento nuevo (equipos principales, secundarios y reactivos químicos) para tener el proceso en funcionamiento con estos nuevos ajustes [SGAPDS-1-15-Libro4, 2019].

Para determinar los costos de rehabilitación considerando cada uno de los sistemas propuestos se hará una selección y búsqueda de equipos, reactivos y materiales necesarios para cada uno, basándonos en los datos otorgados por SACMEX de las condiciones de las PTAR actuales y ejemplos de rehabilitaciones con sistemas similares.

#### 3.3.2.1. Cloración a punto de quiebre:

En las siguientes tablas se muestran los costos de la rehabilitación:

*Tabla 38. Lista de reactivos y materiales necesarios para el tren de tratamiento de cloración a punto de quiebre.*

Reactivo	Especificación	Proveedor	Precio
Hipoclorito de sodio 13%	82,520L/mes + transporte	Materias y Mezclas Químicas, S.A. de C.V. MMQ	\$ 812,500
Carbón activado	Torre completa con relleno de CA granular, toberas tipo Johnson, cuerpo de acero al carbón A-285 con recubrimiento primario epóxico de altos sólidos y acabado alquidálico, con 2 boquillas de entrada en bridas 6" ansi 150 o din 150,	PURE AQUA, INC.	\$ 23, 017, 399.34

	2 boquillas de salida en brida 6" ansi 150 o din-150, 3 paso hombre: 2 laterales y un superior, de 500mm, con tapas ciegas atornilladas, cada cámara posee conexión de 2" npt para conexión de válvula liberadora de aire, diámetro de 90" (228mm) altura de 5,5m.		
Total			<b>\$ 23,829,899.34</b>

Tabla 39. Lista de equipos y complementos necesarios para el tren de tratamiento de cloración a punto de quiebre.

Equipo	Especificaciones	Proveedor	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Bomba de extracción	Bomba sumergible 1560 LPM, 13 etapas, eficiencia 85%, 125HP, 3450RPM, impulsor cerrado, acero inoxidable, 8in	Evans	5	\$ 152,689.00	\$763,445
Tanques de almacenamiento de hipoclorito al 13%	Polietileno reforzado al 40%	TecnoTanques	3	\$ 252,100.00	\$756,300
Bombas dosificadoras para hipoclorito de sodio 13% (BP)	Bomba dosificadora (diafragma) P_161316 45L/h, 35/30W, 25 a 2 bar, IP66, manguera de polietileno	Carbotecnia	4	\$ 15,280.00	\$61,120
Bombas dosificadoras	Bomba dosificadora (diafragma) BL7-2	Hanna instruments	2	\$ 2,800.00	\$5,600

as de hipoclorito de sodio (Desinfección)	de polipropileno reforzado con fibra 7.4L/h 220, 3 bar manguera de polietileno, IP65				
Mezclador estático (ME-01 y ME-02)	Mezclador estático en línea con tubos CS o SS revestidos de PTFE con elementos mezcladores sólidos en espiral de PTFE 8in de diámetro, caída de presión menor a 0.5bar	PRIMIX	2	\$ 30,600.00	\$61,200
Bombas (B- 05 y B-06)	Bomba centrífuga de 25LPS, eficiencia 75%, 50HP, acero inoxidable, 8in	EVANS	2	\$ 123,883.52	\$247,767
Total					<b>\$1,895,432</b>

Tabla 40. Obra y empleados necesarios para rehabilitar la ETAP con el tren de tratamiento propuesto (cloración a punto de quiebre).

Descripción	Especificaciones	#	Precio	Precio total
Obra civil y arquitectura	Lote	1	\$410,800	\$410,800
albañilería	Lote	1	\$396,920	\$396,920
Instalación mecánica e hidráulica	Lote	1	\$153,480	\$153,480
Suministro y montaje de instrumentos de medición	Lote	1	\$371,340	\$371,340
Sistema de tierras	Conjunto	1	\$65,261	\$65,261
Ingeniería de proceso	Lote	1	\$202,800	\$202,800
Ingeniería de instrumentación y control	Lote	1	\$182,000	\$182,000
Ingeniería eléctrica	Lote	1	\$187,200	\$187,200
Pruebas de funcionamiento de la planta	Lote	1	\$524,128	\$524,128
Instalación de mezclador estático embreado 8in	Pieza	2	\$80,438	\$160,876
Instalación de filtros rápidos	Pieza	2	\$120,800	\$241,600
Instalación de bombas sumergibles	Pieza	4	\$17,821	\$71,286
Instalación de bombas dosificadoras	Pieza	4	\$2,118	\$8,471



Instalación de bombas centrífugas	Pieza	2	\$15,857	\$31,714
Total				<b>\$3,007,876</b>

\*Se considera que SACMEX tiene estudios de; topografía, mecánica de suelos, presiones en la red y red sanitaria y pluvial.

Los datos se obtuvieron con ayuda de otro estudio de rehabilitación de una planta en Ciudad de México con un proceso similar y de cotizar con algunos evaluadores de proyectos por lo que son datos aproximados pero confiables, pero aún se requieren de mayores estudios como se mencionó anteriormente.

Costo total de la rehabilitación: obteniendo un caudal de 63.89 L/s.

Para comparar debemos tomar en cuenta los **\$11,357,400.00** que gasta el gobierno y la población con los **\$28,733,208.00** que se requerirían para rehabilitar la planta, es importante seguir teniendo en cuenta que son datos aproximados pero el caudal nos da una diferencia aún mayor, pues el caudal requerido por la población de la colonia CEI es de **2.16 L/s** (Tabla 37), y hay que tomar en cuenta que la estación de tratamiento daría un caudal de **63.89 L/s** (Tabla 25) y no solo para una colonia sino otras. Es decir, estamos comparando que si se invierten \$28,733,208.00 obtenemos un caudal de 63.89L/s, mientras que compensar 2.16L/s nos cuestan \$11,357,400.00 cada mes.

### 3.3.2.2. Biofiltros:

En las siguientes tablas se muestran los costos de la rehabilitación:

Tabla 41. Lista de reactivos y materiales necesarios para el tren de tratamiento de biofiltros.

Reactivo	Especificación	Proveedor	Precio unitario	Precio total
Medio filtrante	Filtralite HC 2,5-5, 114 m3	Filtralite	\$13,800	\$1,573,200
Hipoclorito de sodio al 13%	5,450L/mes + transporte	Materias y mezclas químicas, S.A. de C.V. MMQ		\$53,600
Total				<b>\$1,626,800</b>

Tabla 42. Lista de equipos y complementos necesarios para el tren de tratamiento de biofiltros.

Equipo	Especificaciones	Proveedor	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Bomba de extracción	Bomba sumergible 1560 LPM, 13 etapas, eficiencia 85%, 125HP, 3450RPM, impulsor	Evans	4	\$152,689.00	\$610,756.00

	cerrado, acero inoxidable, 8in				
Mezclador estático	Mezclador estático en línea con tubos CS o SS revestidos de PTFE con elementos mezcladores sólidos en espiral de PTFE 8in de diámetro, caída de presión menor a 0.5bar		2	\$30,600.00	\$61,200.00
Torres de filtración	Suministro de torre de filtración de doble cámara, toberas tipo johnson para drenaje de agua, cuerpo construido en acero al carbón a-285, con recubrimiento primario epóxico de altos sólidos y acabado alquidalico, con 2 boquillas de entrada en bridas 6" ansi 150 o din 150, 2 boquillas de salida en brida 6" ansi 150 o din-150, 3 paso hombre: 2 laterales y un superior, de 500mm, con tapas ciegas atornilladas, cada cámara posee conexión de 2" npt para conexión de válvula liberadora de aire, diámetro de 90" (228mm) altura de 3.5m		2	\$1,890,077.76	\$3,780,155.52
Soplador	Aire al proceso, 20m3/min, 73kW, motor y cabina acústica de alimentación de 44V 3 fases	WEG	2	\$409,694.00	\$819,388.00
Tanque de almacenamiento de hipoclorito de sodio al 13%	Polietileno reforzado al 40%, 3000L	TecnoTanques	2	\$156,047.00	\$312,094.00
Bomba rebombeo	Bomba centrífuga (MT4AME4000), 40HP, 1 etapa, acero	Evans	2	\$123,894.96	\$247,789.92

	inoxidable, eficiencia 85%, 3450 RPM				
Bomba dosificadora de hipoclorito de sodio al 13%	Bomba dosificadora BlackStone (BL10-1), 10.8 lph, 115V	Hanna instruments	2	\$2,900.00	\$5,800.00
Total					<b>\$5,837,183.44</b>

Tabla 43. Obra y empleados necesarios para rehabilitar la ETAP con el tren de tratamiento de biofiltros.

Descripción	Especificaciones	#	Precio	Precio total
Desmontajes	Lote	1	\$1,105,950	\$1,105,950
Obra arquitectónica	Lote	1	\$194,904.47	\$194,904
Albañilería	Lote	1	\$443,893.52	\$443,894
Sistema de tierras	Conjunto	1	\$6,312.50	\$6,313
Ingeniería de proceso	Lote	1	\$268,103	\$268,103
Ingeniería de instrumentación y control	Lote	1	\$587,038	\$587,038
Ingeniería eléctrica	Lote	1	\$259,141	\$259,141
Pruebas de funcionamiento de la planta	Lote	1	\$524,128	\$524,128
Instalación de mezclador estático embridado 8in	Pieza	2	\$7,357.14	\$14,714
Colocación de material filtrante	Conjunto	1	\$13,800.00	\$13,800
Instalación de torres de filtración	Pieza	2	\$39,557.41	\$79,115
Instalación de sopladores	Pieza	2	\$32,775.52	\$65,551
Montaje de bombas centrífugas	Pieza	2	\$15,857.14	\$31,714
Montaje de bomba dosificadora	Pieza	2	\$2,117.74	\$4,235
Montaje de bomba sumergible	Pieza	4	\$17,821.43	\$71,286
Total				<b>\$3,669,886</b>

\*Se considera que SACMEX tiene estudios de; topografía, mecánica de suelos, presiones en la red y red sanitaria y pluvial.

Los datos se obtuvieron con ayuda de otro estudio de rehabilitación de una planta en Ciudad de México con un proceso similar y de cotizar con algunos evaluadores de proyectos por lo que son datos aproximados pero confiables, pero aún se requieren de mayores estudios como se mencionó anteriormente.

Costo total de la rehabilitación: obteniendo un caudal de 47.60L/s.

Para comparar debemos comprar los **\$11,357,400.00** que gasta el gobierno y la población con los **\$11,133,869.55** que se requerirían para rehabilitar la planta, es importante seguir teniendo en cuenta la comparación de caudales obtenido/compensado mencionado en el primer análisis del tren de tratamiento de cloración.

### 3.3.2.3. Ósmosis inversa:

Tabla 44. Lista de reactivos y materiales necesarios para el tren de tratamiento de ósmosis inversa.

Reactivo	Especificación	Proveedor	Precio total
Hipoclorito de sodio al 13%	5450L/mes + transporte	Materias y mezclas químicas, S.A. de C.V. MMQ	\$55,400
<b>Total</b>			<b>\$55,400</b>

Tabla 45. Lista de equipos y complementos necesarios para el tren de tratamiento de ósmosis inversa.

Equipo	Especificaciones	Proveedor	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Bomba de extracción	Bomba sumergible 1560 LPM, 13 etapas, eficiencia 85%, 125HP, 3450RPM, impulsor cerrado, acero inoxidable, 8in	Evans	4	\$152,689.00	\$610,756.00
Mezclador estático	Mezclador estático en línea con tubos CS o SS revestidos de PTFE con elementos mezcladores sólidos en espiral de PTFE 8in de diámetro, caída de presión menor a 0.5bar	PRIMIX	2	\$30,600.00	\$61,200.00
Sistema de ósmosis inversa	Membrana hydronautics modelo bw30hr-440 o similar en especificaciones y característica, en vasija con 6 membranas. incluye reposición de cartuchos de filtros cartucho y lo necesario para la operación del sistema	DUPONT	1	\$12,465,855.00	\$12,465,855.00

Tanque de almacenamiento de hipoclorito de sodio al 13%	Polietileno reforzado al 40%, 3000L	TecnoTanques	1	\$156,047.00	\$156,047.00
Bomba rebombeo	Bomba centrífuga (MT4AME4000), 40HP, 1 etapa, acero inoxidable, eficiencia 85%, 3450 RPM	Evans	3	\$123,894.96	\$371,684.88
Bomba dosificadora de antiincrustante	Bomba (LMH5TA-VTC3-550) 60L/s, eficiencia 80%, 125HP	PULSATrom	4	\$16,730.00	\$66,920.00
Bombas dosificadoras de hipoclorito de sodio al 13%	Bomba dosificadora BlackStone (BL10-1), 10.8 lph, 115V	Hanna instruments	2	\$2,900.00	\$5,800.00
<b>Total</b>					<b>\$13,738,262.88</b>

Tabla 46. Obra y empleados necesarios para rehabilitar la ETAP con el tren de tratamiento de ósmosis inversa.

Descripción	Especificaciones	#	Precio	Precio total
Desmontajes	Lote	1	\$1,105,950	\$1,105,950
Obra arquitectónica	Lote	1	\$194,904.47	\$194,904
Albañilería	Lote	1	\$443,893.52	\$443,894
Sistema de tierras	Conjunto	1	\$6,312.50	\$6,313
Ingeniería de proceso	Lote	1	\$268,103	\$268,103
Ingeniería de instrumentación y control	Lote	1	\$587,038	\$587,038
Ingeniería eléctrica	Lote	1	\$259,141	\$259,141
Pruebas de funcionamiento de la planta	Lote	1	\$524,128	\$524,128
Instalación de filtros rápidos	Pieza	2	\$120,800	\$241,600
Instalación de sistema de ósmosis inversa	Conjunto	1	\$294,095	\$294,095
Instalación de mezclador estático embridado 8in	Pieza	2	\$7,357.14	\$14,714
Montaje de bombas centrífugas	Pieza	3	\$15,857.14	\$47,571
Montaje de bomba dosificadora	Pieza	2	\$2,117.74	\$4,235
Montaje de bomba sumergible	Pieza	4	\$17,821.43	\$71,286
<b>Total</b>				<b>\$4,062,972</b>

\*Se considera que SACMEX tiene estudios de; topografía, mecánica de suelos, presiones en la red y red sanitaria y pluvial.

Los datos se obtuvieron con ayuda de otro estudio de rehabilitación de una planta en Ciudad de México con un proceso similar y de cotizar con algunos evaluadores de proyectos por lo que son datos aproximados pero confiables, pero aún se requieren de mayores estudios como se mencionó anteriormente.

Costo total de la rehabilitación: obteniendo un caudal de 25.16L/s.

Para comparar debemos comprar los **\$11,357,400.00** que gasta el gobierno y la población con los **\$17,856,634.81** que se requerirían para rehabilitar la planta.

Lo que consideró el otro estudio de rehabilitación en cuanto a algunos estudios fueron lo siguiente:

- IV. Obra arquitectónica: Cancelería en puertas, cancelería en ventanas, cerrajería, acabados pisos, acabados en muros, acabados en plafón, impermeabilización, según lo requieran las áreas. Remodelación de casetas existentes u obra nueva, para usarse como Centro de Control de Motores (CCM), oficina y dosificación de reactivo.
- V. Obra civil: desmontaje, desinstalación, demolición y acarreo para disposición adecuada y bajo normatividad correspondiente, de estructuras, equipos y dispositivos no reutilizables existentes en el terreno. Bases de cimentación, estructuras y apoyos para tuberías, tanque(s), bomba(s), válvulas de control de flujo, pozos de visita y obras complementarias por mencionar algunos. Así como, elaboración de tanques, estructuras, accesos y barda perimetral.
- VI. Obra eléctrica: Sistema de fuerza y distribución, alumbrado interior y exterior, tableros de control, arrancadores, protecciones, pararrayos, cableados, ductos, conexiones eléctricas, contactos.
- VII. Obra hidráulica: Líneas de interconexión, alimentación, bombeo a red; líneas de interconexión entre filtros y tanque de sedimentación; trenes de descarga de agua potabilizada y de agua para retrolavado; líneas de interconexión para retrolavado y de tanque sedimentador a recirculación; líneas de desagüe de lodos y de filtros; tuberías de filtros y tanque sedimentador. Todas las tuberías de proceso y auxiliares deberán ser visibles, en mochetas o trincheras.
- VIII. Equipamiento mecánico fisicoquímico y de automatización y control: bombas dosificadoras de reactivos, medidores de flujo en la entrada y la salida; sensor de cloro libre residual en línea para control de dosificación; sensores de nivel de agua en tanques para paros y/o arranques de equipos; sensores de presión en tuberías y filtros para paros de equipo; telemetría para medición de gastos y presiones de entrada y salida a la planta, cloro residual a la salida de filtros; equipo portátil

para análisis de calidad de agua (como mínimo obtener los parámetros requeridos para el control y seguimiento del proceso).

A continuación, se muestra un resumen de los costos de cada planta:

*Tabla 47. Análisis de costos de las plantas.*

	Caudal en el efluente (L/s)	Costo
Cloración a punto de quiebre	63.89	<b>\$28,733,208.00</b>
Biofiltros	47.60	<b>\$11,133,869.55</b>
Ósmosis inversa	25.16	<b>\$17,856,634.81</b>

Analizando cada una de las opciones principales de tecnologías para las estaciones de tratamiento de agua en la Ciudad de México podemos decir con datos específicos para este caso que para gran parte de las estaciones conviene considerar fuertemente la tecnología de biofiltros, aunque no resultó ser la más sencilla de operar, rehabilitar ni entrega la mayor cantidad de caudal en el efluente es una tecnología que no requiere tanta cantidad de reactivo tóxico como la cloración, no es tan difícil de operar como la ósmosis inversa ni un sistema tan delicado, además resultó un menor costo la rehabilitación de una estación así, pero sin duda una ventaja aún con más peso es que quizá no es tan sencillo redimensionar como la cloración pero es bastante flexible en cuanto a un aumento de contaminantes, de hecho más carga orgánica ayudaría a un mejor funcionamiento.

Es de suma importancia seguir en el análisis de opciones tecnológicas y sobre todo su aplicación ya que el costo que deja no contar con agua potable repercute en la salud de las personas, de la fauna, mayores costos y contaminación.

## CAPITULO IV. CONCLUSIONES

El resultado obtenido en todos los procesos fue una buena eficiencia de remoción de los contaminantes de interés y un caudal superior al requerido, el tren de tratamiento que otorga mayor caudal de efluente es el de punto de quiebre (TT1), seguido por biofiltros (TT2) y por último ósmosis inversa (TT3), estos valores son coherentes debido a que es necesario recircular agua del efluente para limpiar filtros biológicos y membranas en el tratamiento de ósmosis inversa y es en este último tren (TT3) en el cual se ocupa más volumen de agua para la limpieza, lo cual concuerda totalmente con la Tabla 37, sin embargo hay que tomar en cuenta que a mayor caudal de recirculación para limpieza además de menor caudal para la población también tenemos un mayor volumen de residuos, por lo que, en este aspecto es más conveniente el proceso de punto de quiebre.

Hablando de la remoción de contaminantes tenemos una excelente eficiencia en todos y son difícilmente comparables por la cercanía en resultados y que todos cumplen con la norma, aquí lo más importante es destacar que a mayor carga de contaminantes en el influente, el proceso que no solo sería más flexible sin requerir casi recursos extra, sino que además sería más eficiente es el de biofiltros.

Recordando los costos de rehabilitación de los tres trenes de tratamiento el de cloración a punto de quiebre resultó mayor debido a la cantidad tan grande de hipoclorito de sodio para cumplir con el objetivo, de hecho, después de este análisis podemos decir que un proceso basado en esta tecnología no resulta viable para una ETAP en la Ciudad de México, además contener volúmenes tan grandes de este reactivo resulta altamente peligroso.

En cuanto a este parámetro seguido del TT1 está la ósmosis inversa la cual es más costosa que los biofiltros pero se tiene registro que algunas ETAPs se diseñaron con esta tecnología pero fue abandonada por desconocimiento del uso correcto, sin duda no conviene desechar este equipo sino rehabilitar dichas estaciones, pues como podemos ver la ósmosis nos da como resultado una eficiencia muy alta y con una operación y mantenimiento adecuados es muy conveniente incluso para influentes con concentraciones de contaminantes mayores.

Después de este análisis es así como los biofiltros demostraron tener notables ventajas en comparación con la cloración a punto de quiebre y la ósmosis inversa, pues ofrecen una eficiencia suficiente en la remoción de contaminantes, adaptable incluso a posibles incrementos futuros en la concentración de estos.

Además, se destaca esta tecnología por su flexibilidad tecnológica, bajos costos de operación y mantenimiento, generación reducida de residuos sólidos, resistencia a fluctuaciones de carga, requerimientos de espacio más reducidos (apoyando esta parte a la rehabilitación), y la ausencia de la necesidad de reactivos tóxicos o de difícil manejo. La rehabilitación de



plantas mediante esta tecnología se presenta como una opción viable sin requerir tantos recursos como el resto.

En resumen, la investigación respalda la consideración prioritaria de los biofiltros al tomar decisiones sobre la rehabilitación o construcción de estaciones de tratamiento de agua, destacando su eficacia, adaptabilidad y beneficios económicos y medioambientales significativos.

Es importante no olvidar que el análisis nos dice que si se invierten \$11,133,869.55 obtenemos un caudal de 47.60L/s, mientras que compensar 2.16L/s nos cuestan \$11,357,400.00 cada mes, además evitamos daños a la salud, disminuimos la generación de basura, emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la posibilidad de aumentar la resistencia bacteriana, las implicaciones físicas del uso de pipas, garrafones y botellas y hasta corrupción y/o extracción y venta ilegal de este recurso así como daños intencionales a tuberías o robo de pipas.

## CAPITULO V. PERSPECTIVAS

Es esencial destacar que buscar soluciones de remoción de contaminantes para cada situación, actualizar y dar un correcto mantenimiento a las plantas no es suficiente. Si bien es crucial, también es necesario emprender un esfuerzo conjunto por parte del gobierno, la sociedad y las empresas para reducir tanto los contaminantes como la escasez de agua.

La conciencia en torno al cuidado y mantenimiento de este recurso necesita ser más enfática, entre los problemas a resolver podemos mencionar que se requieren mejores técnicas de riego que se divulguen y apliquen, así como iniciativas para evitar el desperdicio del agua, también es fundamental mejorar el manejo y control de desechos, garantizar el cumplimiento de las normas de tratamiento de aguas residuales y gestionar de manera más eficiente los alimentos.

En cuanto al área de investigación científica de tecnologías, es crucial enfocarse en la búsqueda de alternativas para la remoción de contaminantes recalcitrantes, emergentes y persistentes. Estos contaminantes, aunque apenas se están empezando a reconocer en los últimos años, ya están generando una problemática significativa, y las perspectivas indican que su impacto irá en aumento. La conciencia y acción proactiva en estas áreas son esenciales para abordar los desafíos relacionados con la calidad del agua y la gestión sostenible de recursos hídricos.

## Referencias

- Villalpando, A. *Aspectos Generales de la Cuenca del Valle de México*", en *Aguas residuales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*, MBxico, DDFFundación Fnedrich Ebert, 1989
- Korenfeld, D. Naime, A. *Agua: ciclo de un destino*. (2007). Primera edición.
- Brown, J. et al. *Biological Nutrient Removal (BNR) Operation in Wastewater treatment Plants*. (2005).
- Bratby, J. *Coagulation and Flocculation in wáter and wastewater Treatment*. (2016).
- Chul, Y. et al. *Removal of nitrogen from municipal wastewater by denitrification using a sulfur-based Carrier: A pilot-scale study*. (2022).
- Zhiyuan, K. et al. *Mechanism of stable power generation and nitrogen removal in the ANAMMOX-MFC treating low C/N wastewater*. (2022).
- Concepción, A. *Determinación de la capacidad de remoción de nitrógeno amoniacal con zeolita natural tipo Clinoptilolita*. México. (1997).
- Conagua, SEMARNART. *Estadísticas del Agua en México*. México. (2014).
- Sanabria, J. *Proceso ANAMMOX una aplicación en ingeniería: Revisión general de los aspectos microbianos*. México. 2009.
- Canseco, E. *Sistema de captación de Agua Pluvial para casa habitación en la zona de Iztapalapa, Ciudad de México*. (2019). Instituto Politécnico Nacional.
- SEMARNAT. *El medio ambiente en México, agua – calidad*. Recuperado de: [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe\\_resumen14/06\\_agua/6\\_2\\_3.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_2_3.html). (2021)
- Ortíz, J. *Tratamientos avanzados de agua potable para eliminación de materia orgánica disuelta: Aplicación del BAC*. (2015). Universidad Politécnica de Madrid.
- Bratby, J. *Coagulation and flocculation in wáter and wastewater treatment*. (2016). Tercera edición. Alliance House.
- Kerry, J. et al. *Principios de tratamiento de agua*. (2017). CENGAGE Learning.
- SACMEX. *Sistema de aguas de la Ciudad de México SACMEX*. (2019). *Cumbre de fondos de agua* Recuperado de: <https://www.fondosdeagua.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/latin-america/aguas.pdf>
- Torres, L. *La gestión del agua potable en la Ciudad de México – Los retos hídricos de la CDMX: gobernanza y sustentabilidad*. (2017). Primera edición.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. *Aguas subterráneas*. (2019). <https://www.gob.mx/imta/articulos/aguas-subterranas>

- Lartigua, C. *Sobreexplotación de mantos acuíferos en la CDMX – causa de fracturas de tuberías y fugas de agua.* (2017). [https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2017\\_212.html](https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2017_212.html)
- <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua> \* (Actualmente los links de información no están disponibles).
- USEPA. (2019). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Desinfección con luz ultravioleta.* Epa, 64, 9.
- Patterson, W.J. (1985). *Industrial wastewater and treatment technology*, Second edition.
- IMTA. (2019). *Aguas subterráneas.* <https://www.gob.mx/imta/articulos/aguas-subterranas>
- López, E. Murillo, D. Martínez, J. Chávez, P. *Alternativas viables para la provisión de servicios básicos en áreas periurbanas.* (2015).
- INEGI. (2020). *Población total (Número de habitantes).* [https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/habitantes.aspx?tema=P#:~:text=Ciudad%20de%20M%C3%A9xico%20\(9%2C209%2C944\)%20y](https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/habitantes.aspx?tema=P#:~:text=Ciudad%20de%20M%C3%A9xico%20(9%2C209%2C944)%20y)
- C. Hong, H. Chang, *Uncovering the influence of household sociodemographic and behavioral characteristics on summer water consumption in the Portland Metropolitan Area, International Journal of Geospatial I* (2014). <https://dc.uwm.edu/ijger/vol11/iss2/2/>. (Accessed 2 November 2021).
- Y.T. Damtew, A. Geremew, *Households with unimproved water sources in Ethiopia: spatial variation and point-of-use treatment based on 2016 Demographic and Health Survey, Environ. Health Prev. Med.* 25 (2020) 11, <https://doi.org/10.1186/S12199-020-00921-1>.
- Gobierno de la Ciudad de México, *Distribución del agua.* 2021. Recuperado de: <http://www.cuidarelagua.cdmx.gob.mx/volumen.html#:~:text=La%20dotación%20promedio%20de%20agua,320%20lt%20Fhab%20Fda>.
- Peña, P. Levy, E. (1989). *Historia de la hidráulica en México. Abastecimiento de agua desde la época prehispánica hasta el porfiriato.* México: CONAGUA.
- CONAGUA. (2009). *Semblanza histórica del agua en México.* México: CONAGUA.
- Sistema de información del agua potable y saneamiento. (2019). *Evolución de la legislación de aguas en México.* COLMEX.
- Sistema de Aguas de la Ciudad de México. (2012). *El gran reto del agua en la Ciudad de México, pasado, presente y perspectivas de solución para una de las ciudades más complejas del mundo.*
- Soto, N. (2019). *La Ciudad que secó sus lagos y hoy enfrenta escasez de agua.* Recuperado de: <https://ciencia.unam.mx/leer/848/la-ciudad-que-seco-sus-lagos-y-hoy-enfrenta-la-escasez-de-agua->
- Claus, E. (2021). *El agua, origen de las primeras civilizaciones.* Recuperado de: <https://www.lavanguardia.com/vida/junior-report/20190322/461157795476/agua-origen-primeras-civilizaciones.html>

- Mora, C. (2014). La regulación del agua en la historia de los pueblos y su identidad cultural. Recuperado de: <https://www.iagua.es/blogs/consuelo-mora/la-regulacion-del-agua-en-la-historia-de-los-pueblos-y-su-identidad-cultural>
- Zaleski, M. Claps, M. (2000). *Ciliados indicadores de calidad de agua en la laguna San Miguel del Monte*. Recuperado de: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/99217#:~:text=El%20sistema%20del%20saprobios%20fue,para%20degradar%20la%20materia%20orgánica>.
- Fondo para la comunicación y la educación ambiental. (2020). *Contaminación en México*. Recuperado de: <https://agua.org.mx/agua-contaminacion-en-mexico/#:~:text=Hay%20varios%20factores%20que%20provocan,de%20oxígeno%20en%20su%20composición>.
- SEDEMA. (2016). Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México. Recuperado de: <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/IRS-2016.pdf>
- INEGI. (2018). Usos del agua. Recuperado de: <https://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/usos.aspx?tema=T#:~:text=Cuéntame%20de%20México&text=En%20México%2C%2076%20%25%20del%20agua,5%20%25%2C%20en%20la%20industria>.
- Fondo para la comunicación y educación ambiental. (2018). *Contaminación en México*. Recuperado de: <https://agua.org.mx/agua-contaminacion-en-mexico/#:~:text=Hay%20varios%20factores%20que%20provocan,de%20oxígeno%20en%20su%20composición>
- Maguey, H. (2018). Crisis del agua. Recuperado de: <https://www.gaceta.unam.mx/crisis-agua-industria/>
- United Nations. (2020). Water and climate change. Recuperado de: <https://www.unwater.org/water-facts/water-and-climate-change>
- Naciones Unidas. (2021). El agua: en el centro de la crisis climática. Recuperado de: [https://www.un.org/es/climatechange/science/climate-issues/water#:~:text=La%20calidad%20del%20agua%20también,patógenos%20y%20pesticidas%20\(IPCC\)](https://www.un.org/es/climatechange/science/climate-issues/water#:~:text=La%20calidad%20del%20agua%20también,patógenos%20y%20pesticidas%20(IPCC)).
- Sánchez, J. A., et al. (2016). *Calidad del Agua Subterránea: Acuífero Sur de Quintana Roo, México*, ISSN: 2007-2422, Tecnología y Ciencias del Agua.
- Chowdhary, P., Bharagava, R. N., Mishra, S., & Khan, N. (2020). Role of industries in water scarcity and its adverse effects on environment and human health. *Environmental Concerns and Sustainable Development: Volume 1: Air, Water and Energy Resources*, 235-256.
- Zarza, L. (2021). *¿Qué es una ETAP?*. Recuperado de: <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-etap>
- Farias, B. (2016). *Conocimientos básicos sobre Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (Módulo I)*. Recuperado de: <https://www.iagua.es/blogs/bettys-farias-marquez/conocimientos-basicos-plantas-tratamiento-aguas-residuales-ptar-modulo-i>

- Iroz, N. (2008). *El ciclo biológico del carbono*. Recuperado de: <https://www.frlp.utn.edu.ar/materias/qcasis/com64cbiol.pdf>
- López, P. (2020). *Indagan la composición de la materia orgánica del suelo*. Recuperado de: <https://www.gaceta.unam.mx/indagan-la-composicion-de-la-materia-organica-del-suelo/#:~:text=La%20materia%20orgánica%20está%20compuesta,micronutrientes%20esenciales%20para%20las%20plantas>.
- SEMARNAT. (2016). Compendio de estadísticas ambientales. Edición 2021. Recuperado de: [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio\\_2021/01\\_ambiental/agua.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2021/01_ambiental/agua.html)
- Metcalf, L., Eddy, H. P., & Tchobanoglous, G. (1991). *Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse* (Vol. 4). New York: McGraw-Hill.
- *The electrolytic decomposition mechanism of ammonia to nitrogen at an IrO<sub>2</sub> anode*. K. W. Kim, Y. J. Kim, I. T. Kim, G. I. Park, E. H. Lee. 22, Daejeon, South Korea: Electrochimica Acta, 2005, Vol. 50. 4356-4364.
- Gobierno de México. (2022). *Recursos de Salud*. Recuperado de: <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/iztapalapa#health>
- Smith, J., Petrovic, P., Rose, M., De Souza, C., Muller, L., Nowak, B., & Martinez, J. (2021). Placeholder Text: A Study. *The Journal of Citation Styles*, 3. <https://doi.org/10.10/X>
- Mendret, J. (2023). *Countries that recycle wastewater into drinking water*. Recuperado de: <https://www.umontpellier.fr/en/articles/ces-pays-qui-recyclent-les-eaux-usees-en-eau-potable>
- ASGROW. (2020). *Riego por goteo en México*. Recuperado de: <https://www.asgrow.com.mx/es-mx/tendencias/gestionagricola/riego-por-goteo-en-mexico.html>
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2020). *Riego localizado*. Recuperado de: <https://www.mapa.gob.es/gl/ministerio/servicios/informacion/plataforma-de-conocimiento-para-el-medio-rural-y-pesquero/observatorio-de-tecnologias-probadas/material-de-riego/riego-localizado.aspx>
- FAO. (2011). *La situación de los sistemas en situación de riesgo*. Recuperado de: <https://www.fao.org/3/i1688s/i1688s.pdf>
- ONU. (2023). *Mientras crece la hambruna, se desperdician 570 millones de toneladas de alimentos al año*. Recuperado de: <https://news.un.org/es/story/2023/08/1523342>
- NETAFIM. (2020). *Riego por goteo revoluciona la agricultura*. Recuperado de: <https://www.netafim.com.mx/riego-por-goteo/>