

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA



**Potabilización de agua con
exceso de microalgas. Caso
de estudio: Laguna de Xico**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

García Caballero Juan Carlos

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Ana Elisa Silva Martínez

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023





Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Agradecimientos

*A la **Universidad Nacional Autónoma de México** y la **Facultad de Ingeniería** por brindarme los conocimientos necesarios para desenvolverme en el campo laboral.*

*A mi directora de tesis la **Dra. Ana Elisa Silva Martínez** por el compromiso y dedicación en la asesoría de este trabajo de investigación, por compartir sus conocimientos desde el servicio social, los cuales fueron claves en la realización de esta tesis.*

*Al equipo de **Allenca** quien me apoyó y asesoró en todo momento a lo largo del proyecto.*

*Al **Dr. Luis Antonio García Villanueva** por la asesoría brindada en el proceso.*

*A la **Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación** por el valioso apoyo brindado a lo largo del desarrollo de esta tesis.*

*A mi padre **Juan José** y mi hermano **Javier**, por su apoyo incondicional durante mi formación académica.*

*A mi **familia y amigos** por acompañarme en el proceso*

*A **Dios** por permitirme terminar mi carrera a pesar de las adversidades.*

Tabla de contenido

I. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 Justificación.....	8
1.2 Objetivos.....	9
1.2.1 Objetivo general.....	9
1.2.2 Objetivos específicos.....	9
1.3 Alcances y limitaciones.....	9
1.4 Estructura general del trabajo.....	10
II. PROBLEMÁTICA DEL AGUA POTABLE EN MÉXICO.....	12
2.1 Fuentes de agua potable actuales.....	14
2.2 Población abastecida y su distribución espacial.....	17
III. SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA.....	20
3.1 Potabilización convencional de aguas superficiales.....	27
3.2 Potabilización de agua subterránea.....	31
3.3 Operaciones adicionales para potabilizar el agua.....	34
IV. PROBLEMÁTICA DE ALGAS Y MICROALGAS EN FUENTES DE ABASTECIMIENTO.....	36
4.1 Origen y tipo de algas y microalgas.....	37
4.2 Problemas en sistemas de potabilización por microalgas.....	40
V. METODOLOGÍA.....	42
5.1 Localización y entorno.....	42
5.2 Sitios de Muestreo.....	50
5.3 Calidad del Agua de la Laguna de Xico.....	50
5.4 Pruebas de tratabilidad.....	51
VI. RESULTADOS.....	52
6.1 Localización y entorno.....	52
6.2 Sitios de Muestreo.....	54
6.3 Calidad del Agua de la Laguna de Xico.....	57
6.4 Pruebas de tratabilidad.....	58
6.5 Propuesta de tren de tratamiento.....	65
VII. CONCLUSIONES.....	68
VIII. RECOMENDACIONES.....	69
Referencias.....	70
Anexos.....	72

Figuras.

Figura 1. Regiones hidrológico-administrativas y entidades federativas. (CONAGUA 2019).	
Figura 2. Acuíferos con intrusión marina y/o salinización de suelos y aguas subterráneas salobres (CONAGUA 2019).	
Figura 3. Fuentes de abastecimiento de agua en la Ciudad de México. Fuente CONAGUA.	15
Figura 4. Contraste regional entre agua renovable y desarrollo. (CONAGUA 2019).	18
Figura 5. Distribución de tamaños de las partículas en el agua (de Vargas 2004).	20
Figura 6. Dependencia del pH de las especies químicas del sistema carbonato (Cortijo, 2013).	35
Figura 7. Crecimiento celular en discontinuo (Bustamante 2018).	39
Figura 8. Polígono base. Google Earth.	42
Figura 9. Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas.	43
Figura 10. Región hidrológica 26Dp L. Texcoco y Zumpango. QGIS 3.26.3. Elaboración propia.....	43
Figura 11. Red de drenaje RH26Dp. QGIS 3.26.3. Elaboración propia	44
Figura 12. Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). INEGI.	44
Figura 13. Elevaciones del área de estudio Fuente CEM.	45
Figura 14. Stream Segments and Drainage directions. Fuente Elaboración propia.....	45
Figura 15. R.water.outlet. Fuente elaboración propia.	46
Figura 16. Alcaldías y municipios que comprenden la microcuenca de estudio. Fuente elaboración propia.	46
Figura 17. Estaciones climatológicas en CDMX y Estado de México.....	47
Figura 18. Estaciones climatológicas microcuenca Chalco – Amecameca. Fuente elaboración propia.....	48
Figura 19. Precipitación media de las estaciones climatológicas de interés. Fuente elaboración propia.....	48
Figura 20. Microcuenca Chalco – Amecameca. Fuente elaboración propia.	52
Figura 21. Perfil de elevaciones del cauce principal. Fuente elaboración propia.....	53
Figura 22. Uso de suelo Microcuenca Chalco – Amecameca. (Morales 2018).	53
Figura 23. Localización de los puntos de muestreo en la Laguna de Xico. Google Earth.	54
Figura 24. Fauna establecida a orillas de la laguna de Xico.	54
Figura 25. Laguna de Xico.	55
Figura 26. Fuentes de contaminación de la laguna de Xico.	55
Figura 27. Tonalidad del agua de la laguna de Xico.	56
Figura 28. Pruebas de tratabilidad A, B y C.....	59
Figura 29. Pruebas de tratabilidad D, E y F.	60
Figura 30. Filtración y muestra final primer experimentación.....	61
Figura 31. Pruebas de tratabilidad 1, 2 y 3.	63
Figura 32. Pruebas de tratabilidad 4, 5 y 6.	64
Figura 33. Filtración segunda experimentación.....	65
Figura 34. Diagrama de flujo del tren de tratamiento de Laguna de Xico.....	66

Tablas

<i>Tabla 1. Usos consuntivos del agua. CONAGUA 2019.</i>	17
<i>Tabla 2. Usos no consuntivos del agua. CONAGUA 2019.</i>	17
<i>Tabla 3. Volúmenes concesionados para usos consuntivos en CDMX.</i>	19
<i>Tabla 4. Límites de percepción de algunas sales y compuestos en el agua (mg/L) (de Vargas 2004).</i>	22
<i>Tabla 5. Límites de calidad del agua para plantas de filtración directa (de Vargas 2004).</i>	25
<i>Tabla 6. Parámetros de calidad importantes para la filtración directa (de Vargas 2004).</i>	25
<i>Tabla 7. Límites de calidad del agua para tratamiento mediante filtración lenta (de Vargas 2004).</i>	27
<i>Tabla 8. Agentes patógenos y organismos productores de toxinas en aguas superficiales (Aurazo 2004).</i>	27
<i>Tabla 9. Tratamientos recomendados según el nivel de contaminación fecal.</i>	28
<i>Tabla 10. Normas Mexicanas referentes a calidad del agua.</i>	51
<i>Tabla 11. Propiedades microcuenca Chalco - Amecameca.</i>	52
<i>Tabla 12. Calidad de agua de Laguna de Xico y NOM-127-SSA1-1994.</i>	57
<i>Tabla 13. Características iniciales del agua, primera experimentación.</i>	58
<i>Tabla 14. Propiedades del agua después del ablandamiento, primera experimentación.</i>	58
<i>Tabla 15. Propiedades del agua clarificada, primera experimentación.</i>	60
<i>Tabla 16. Muestra con menor turbiedad, primera experimentación.</i>	61
<i>Tabla 17. Características iniciales del agua, segunda experimentación.</i>	62
<i>Tabla 18. Propiedades del agua después del ablandamiento, segunda experimentación.</i>	62
<i>Tabla 19. Propiedades del agua clarificada, segunda experimentación.</i>	64
<i>Tabla 20. Muestra con menor turbiedad, segunda experimentación.</i>	65
<i>Tabla 21. Balance de masa con el tren de tratamiento propuesto.</i>	67
<i>Tabla 22. Recomendaciones de valor del gradiente de velocidad en función del tiempo de retención. Elaboración propia.</i>	73

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso renovable de forma limitada, ya que su explotación desmedida para generación de energía eléctrica (termoeléctricas), para uso agrícola y personal e industrial, ocasionan un desequilibrio al medio ambiente al demandar en mayor cantidad de la que se puede regenerar de manera natural. Con base en estudios hídricos realizados, tan solo el 0.007% del agua dulce existente en el planeta está disponible para usos directos de la población (Toledo 2002).

En la Ciudad de México (CDMX) la situación no es diferente, cada día el agua escasea en la medida en que la población crece y se desarrollan las actividades económicas; los pozos están siendo sobreexplotados y el sistema de suministro tiene una eficiencia extremadamente baja. Cerca de la mitad del agua por abastecer, se pierde en el trayecto debido a fugas, o que ocasiona que sectores de la población sean afectados con una discontinuidad en el abastecimiento, ya sea no recibiendo la cantidad necesaria de agua o mediante tandeos (SACMEX 2019).

La CDMX cuenta con cuerpos de agua como la Laguna de Xico, con una extensión de 341 hectáreas, la cual recibe aportaciones del Iztaccíhuatl mediante tres corrientes: Río Ameca, Río de la Compañía y Río Acapol, mismos que transportan aguas de lluvia y residuales. En temporada de lluvia se debe recurrir al bombeo de agua por medio de canales de salida que previenen inundaciones en la zona. (Herrera 2017).

La laguna de Xico colinda con la alcaldía de Tláhuac de la Ciudad de México al Poniente y al oriente con el Valle de Chalco, el cual cuenta con 35 comunidades. En el 59% del territorio se tiene un uso de suelo urbano, mientras que el 31% es de uso agrícola y pecuario, el 7% son cuerpos de agua (Lagunas de Xico) y el 3% a pastizales. (Herrera 2017).

Se realizó un muestreo en la laguna de Xico y en función de los contaminantes presentes en el agua, se determinó la factibilidad y el tren de tratamiento necesario para su remoción en valores que no excedan la NOM-127-SSA1-2021 que establece los límites máximos permisibles con referencia a la calidad que debe cumplir el agua para consumo humano.

Esta investigación opta por el aprovechamiento de fuentes alternas de abastecimiento de agua, permitiendo al acuífero de la Ciudad de México recuperarse de manera natural y potabilizando un cuerpo de agua que hasta la fecha no ha sido considerado.

Por medio de Sistemas de Información Geográfica se delimitó la cuenca a la que pertenece la laguna, el orden de ésta y la longitud del cauce principal. Con datos de estaciones climatológicas se obtuvo el gasto promedio anual, este dato es clave para el dimensionamiento de la planta de tratamiento.

Con base en las propiedades fisicoquímicas del agua en estudio, se propuso una alternativa técnicamente viable para la potabilización de ésta, obteniendo concentraciones de contaminantes por debajo de lo permitido por la normatividad aplicable en los parámetros analizados.

En el laboratorio se llevaron a cabo las pruebas experimentales en las muestras previamente recolectadas de la laguna en estudio, y en función de los resultados obtenidos en cada una, se realizaron los ajustes necesarios para lograr el objetivo de remover contaminantes y obtener un agua con calidad potable.

1.1 Justificación.

La Ciudad de México sufre una crisis por escasez de agua, debido a que su principal fuente de abastecimiento está siendo sobreexplotada, extrayendo un volumen de agua desmedido, procurando abastecer a una población que demanda cada vez más y que se conforma de poco más de veinte millones de habitantes. (López 2021).

De acuerdo con el periódico Excelsior, el municipio de Chalco cuenta con colonias que carecen de suministro de agua potable, por lo cual se pronunciaron los vecinos que conforman la organización Antorcha Campesina, exigiendo el suministro del recurso. (Velasco 2022).

En la alcaldía Tláhuac, los habitantes protestaron aún más debido al desabasto de agua potable, ante la situación de pandemia por COVID-19. Esto ocasionó una riña entre los manifestantes y los elementos de la seguridad pública. La nota destaca que actualmente no se tiene una línea de distribución de agua potable, ni una planta de tratamiento, por lo que el deficiente abasto se realiza por medio de pipas. (La Jornada, 2020).

Los cuerpos de agua existentes en la CDMX actualmente son utilizados como vertederos de residuos sólidos urbanos y residuos de manejo especial entre otros. Estos propician la proliferación de plagas y enfermedades, por lo cual deben ser sometidos a un proceso de tratamiento donde se les retiren los contaminantes presentes y el agua contenida en el vaso regulador pueda ser utilizada para uso y consumo humano.

El potabilizar el agua permite aumentar la oferta del recurso ante habitantes que carecen de un suministro adecuado y con la calidad necesaria para su consumo, recordando que el agua es indispensable en el desarrollo de una comunidad.

Con base en información proporcionada por SACMEX en cuanto a la caracterización del agua, se propone un tren de tratamiento que tenga la capacidad de remover contaminantes de la manera más eficaz y óptima posible.

En esta investigación se desarrolló una propuesta de tratamiento factible para su implementación en aspectos técnicos y económicos, en la búsqueda de explotar otras fuentes de abastecimiento y permitir al acuífero su recuperación natural. Abasteciendo de agua potable a zonas aledañas a la laguna como Chalco y Tláhuac que actualmente tienen severos problemas de suministro a sus habitantes.

1.2 Objetivos.

Dentro de los objetivos del proyecto de tesis se encuentran los siguientes:

1.2.1 Objetivo general.

Determinar el tren de tratamiento para los escurrimientos pluviales alojados en la Laguna de Xico, considerando la gran cantidad de microalgas presentes, para la reincorporación de un volumen de agua apta para consumo humano a la red de distribución de la Ciudad de México, a nivel laboratorio.

1.2.2 Objetivos específicos.

1. Calcular el área de captación y volumen de escurrimiento por medio de Sistemas de Información Geográfica y con información del Sistema Meteorológico Nacional para la obtención de variables hidrológicas de interés.
2. Determinar las operaciones y procesos unitarios necesarios para la remoción las microalgas y garanticen la calidad de agua potable a partir de muestras de la laguna de Xico, a través de pruebas de tratabilidad en laboratorio.
3. Diseñar el tren de tratamiento en diagrama de flujo y balance de masa para la potabilización de agua de la laguna de Xico.

1.3 Alcances y limitaciones.

1. No se realizó exploración física del área, únicamente se usaron Sistemas de Información Geográfica.
2. No se tomaron muestras en las estaciones meteorológicas, solo se tomó información del Sistema Meteorológico Nacional.
3. Debido a limitaciones por la pandemia sólo se tomaron muestras en el periodo de estiaje del mes de marzo de 2020 y en periodo de lluvias en el mes de agosto de 2021 en la Laguna de Xico.

4. Debido a limitaciones por la pandemia no fue posible utilizar equipos para detección de metales como absorción atómica, ni compuestos orgánicos por cromatografía. Sólo se utilizó equipo de campo en el laboratorio.
5. No se incluyeron pruebas de tratabilidad para el manejo de lodos.

1.4 Estructura general del trabajo.

La tesis está integrada por siete capítulos:

- Capítulo 1. Se justifica el trabajo de investigación, mencionando los alcances y las limitaciones que se tienen, junto con los objetivos generales y particulares.
- Capítulo 2. Por medio de registros históricos y actuales se plantea la problemática de la escasez de agua en México, además, se detallan las fuentes de extracción de agua de la CDMX y su distribución espacial con base en estadísticas anuales de CONAGUA.
- Capítulo 3. Marco teórico de sistemas convencionales de potabilización de agua subterránea y cuerpos de agua superficiales.
- Capítulo 4. Con base en artículos científicos se realiza un marco teórico que incluya el origen de las algas y los retos que implica el diseñar una planta de tratamiento de agua que las contenga.
- Capítulo 5. Se detalla la metodología utilizada para el desarrollo de la investigación, comenzando por una investigación teórica que fundamente la experimentación realizada.

- Capítulo 6. Se recabarán todos los resultados obtenidos directamente relacionados a los pasos de la metodología, los cuales deberán coincidir con las hipótesis iniciales. Las características fisicoquímicas del agua deberán cumplir con lo establecido en la NOM.127-SSA1-2021.
- Capítulo 7. Se concluye la factibilidad de la propuesta con base en el desarrollo y resultados obtenidos a lo largo del informe. Se detalla el tren de tratamiento final.

II. PROBLEMÁTICA DEL AGUA POTABLE EN MÉXICO

La Comisión Nacional del Agua se encarga de la gestión del agua en el país mediante 13 organismos denominados Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA), cuyos límites se muestran en la figura 1 y su descripción en la tabla 1 (CONAGUA 2019).

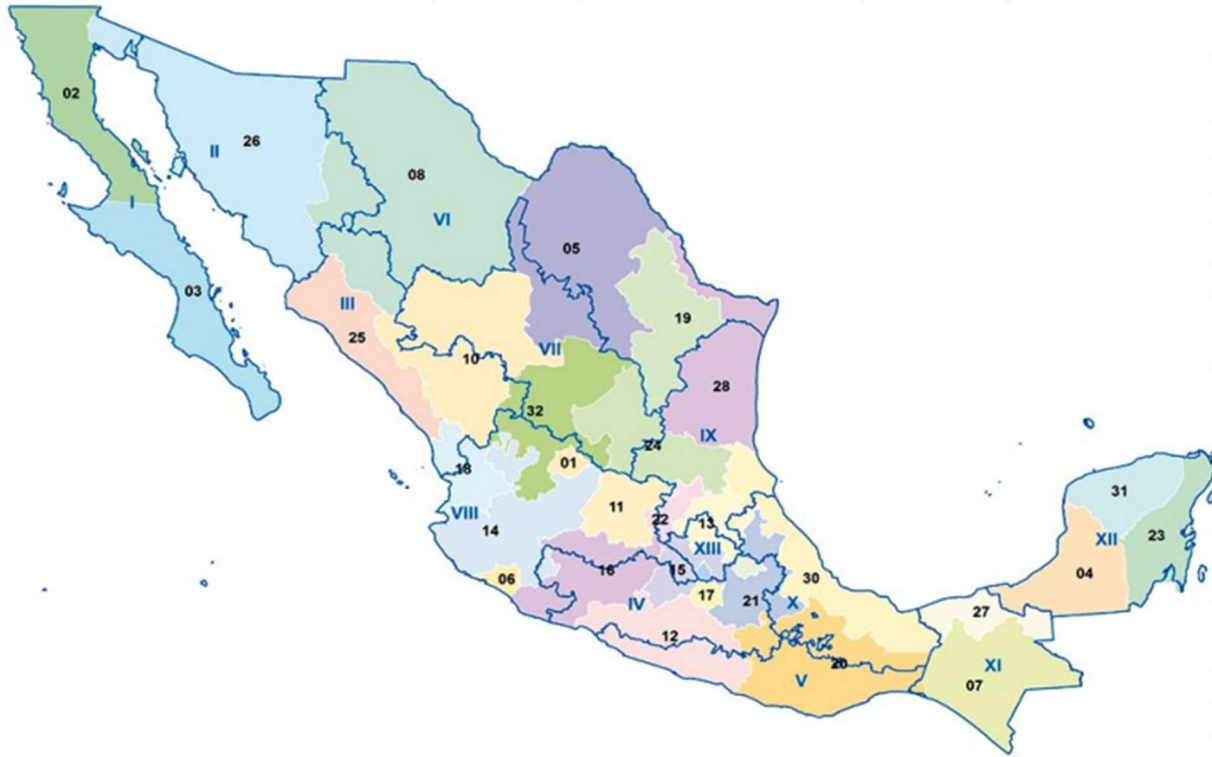


Figura 1. Regiones hidrológico-administrativas y entidades federativas. (CONAGUA 2019).

Clave	Región hidrológico-administrativa (RHA)	Clave	Entidad federativa (EF)	Clave	Entidad federativa (EF)
I	Península de Baja California	01	Aguascalientes	17	Morelos
II	Noroeste	02	Baja California	18	Nayarit
III	Pacífico Norte	03	Baja California Sur	19	Nuevo León
IV	Balsas	04	Campeche	20	Oaxaca
V	Pacífico Sur	05	Coahuila de Zaragoza	21	Puebla
VI	Río Bravo	06	Colima	22	Querétaro
VII	Cuencas Centrales del Norte	07	Chiapas	23	Quintana Roo
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	08	Chihuahua	24	San Luis Potosí
IX	Golfo Norte	09	Ciudad de México	25	Sinaloa
X	Golfo Centro	10	Durango	26	Sonora
XI	Frontera Sur	11	Guanajuato	27	Tabasco
XII	Península de Yucatán	12	Guerrero	28	Tamaulipas
XIII	Aguas del Valle de México	13	Hidalgo	29	Tlaxcala
		14	Jalisco	30	Veracruz de Ignacio de la Llave
		15	México	31	Yucatán
		16	Michoacán de Ocampo	32	Zacatecas

Tabla 1. Regiones hidrológico-administrativas y entidades federativas. (CONAGUA 2019).

La situación actual del agua en el país es crítica por aspectos como la escasez, contaminación, afectación en el ciclo hidrológico a consecuencia del cambio climático, entre otros. La oferta se encuentra muy por debajo de la demanda, lo que genera un desequilibrio (Arreguín et al. 2008).

Al explotar fuentes subterráneas que durante miles de años han almacenado agua en unas cuantas décadas ha ocasionado un estrés hídrico no solo la CDMX, sino en la mitad del territorio del país (López 2021).

Por otro lado, la topografía accidentada del terreno y la ubicación en una cuenca endorreica ha evita el correcto desalojo del agua pluvial, por lo que la obra de drenaje se complica. (López 2021; SACMEX 2019).

La explotación de agua subterránea ha tenido una crisis desde la década de 1930 en busca de abastecer a la población, a la industria y a la agricultura en zonas áridas del norte del país, pues el volumen extraído era insuficiente para el suministro demandado. La falta de estudios al respecto ocasionó que no se conociera el potencial de los acuíferos, lo que se tradujo en consecuencias como el abatimiento de los niveles y la contaminación por intrusión salina de los pozos. (Moreno et al. 2010). De acuerdo con (CONAGUA 2018) y en la figura 2, el país cuenta con 653 acuíferos para la administración de aguas subterráneas, de los cuales 105 se encuentran en sobreexplotación, 32 con presencia de suelos salinos y 18 con intrusión marina.

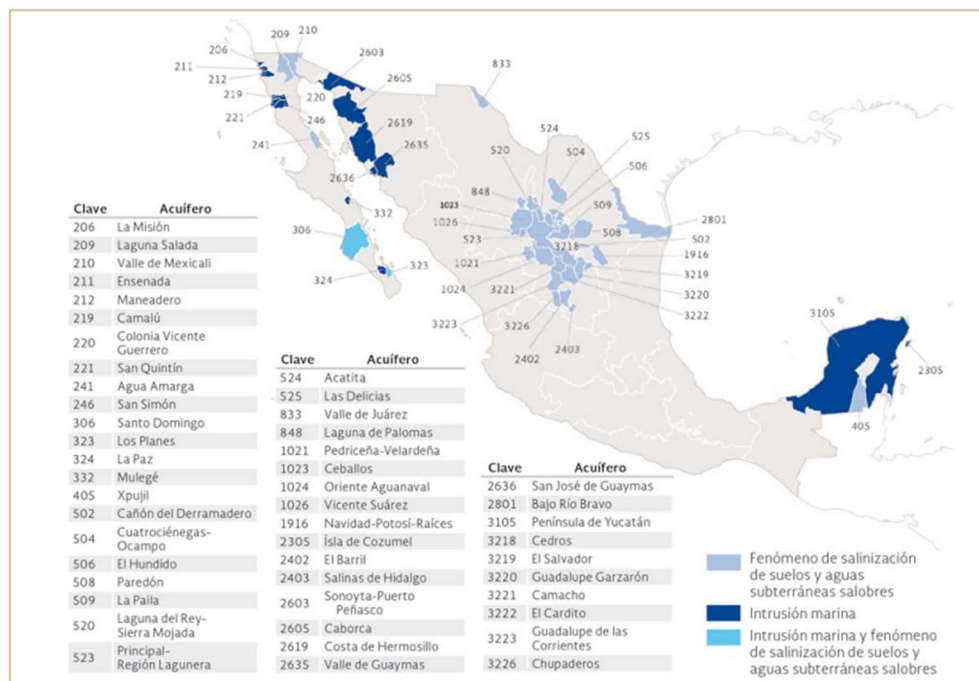


Figura 2. Acuíferos con intrusión marina y/o salinización de suelos y aguas subterráneas salobres (CONAGUA 2019).

Una propuesta para mitigar el daño fue cambiar la capital de lugar, sin embargo, no trascendió por motivos financieros y de operación (López 2021).

Para solucionar los problemas de contaminación de agua se debe poner énfasis en el tratamiento de aguas residuales principalmente en la industria, garantizando que las concentraciones de contaminantes aun presentes se encuentren por debajo de los niveles máximos permisibles de la norma. La basura arrojada en el sistema de alcantarillado o cuerpos de agua es de los principales contaminantes. (Arreguín et al. 2008).

El cambio climático impacta de manera directa en las temperaturas máximas y mínimas promedio anuales, y éstas a su vez intervienen en el régimen de lluvias, por lo que la infiltración al subsuelo se ve afectada. Por esta razón, el país debe invertir en investigación acerca del cambio climático y su influencia en los problemas del agua en México. (Arreguín et al. 2008).

La aportación de agua pluvial es de gran interés, ya que México recibe aproximadamente 1,449,471 de metros cúbicos de agua por este medio, donde el 72.1% retorna a la atmósfera en forma de vapor, el 21.4% escurre a cuerpos de agua, y tan solo el 6.4% se infiltra en el subsuelo (CONAGUA 2018). Por lo cual se está explotando al sector con menor ponderación, dejando a un lado a los cuerpos de agua.

2.1 Fuentes de agua potable actuales.

La principal fuente de abastecimiento de agua es el acuífero de la Ciudad de México, ubicado en la zona metropolitana, formado por la infiltración de agua en el suelo por efecto de la gravedad hasta un estrato impermeable donde se almacena. Está sujeto a contaminarse debido al nulo tratamiento de aguas residuales que se descargan o mediante los desechos a los que se expone. El no contar con la capacidad de suministrar agua a toda la población con limitadas fuentes de abastecimiento, da origen a proyectos de gran dimensión como el sistema Cutzamala, que tiene como principal función el bombeo de agua a la CDMX desde la cuenca del Cutzamala (SACMEX 2019).

El sistema Cutzamala inicia sus operaciones en 1982 como primera etapa, extrayendo agua de la presa de Villa Victoria y transportarla a la planta de tratamiento Los Berros, donde a partir del punto más alto ubicado a 2701.75 metros sobre el nivel del mar se conduce por gravedad a la CDMX (CONAGUA 2005).

La segunda etapa comienza en 1985, donde la fuente de abastecimiento fue la presa Valle de Bravo, instalando mayor número de plantas de bombeo abastecían un gasto de 6,000 L/s (CONAGUA 2005).

La tercera etapa abarca los sistemas Chilesdo y Colorines, que en conjunto con las etapas anteriores suministran un caudal de 19,000 L/s. Se capta agua del río Melacatepec, y mediante la estación de bombeo 6 se transporta el agua a la planta de tratamiento de Los Berros (CONAGUA 2005).

De la misma forma en que el sistema aumentó su capacidad de conducción, la planta potabilizadora debía adecuarse para tratar tal volumen de agua, por lo que se construyeron el cuarto y quinto módulos de potabilización, cada uno con una capacidad de 4,000 L/s mediante un proceso de clarificación, filtración y desinfección. (CONAGUA 2005).

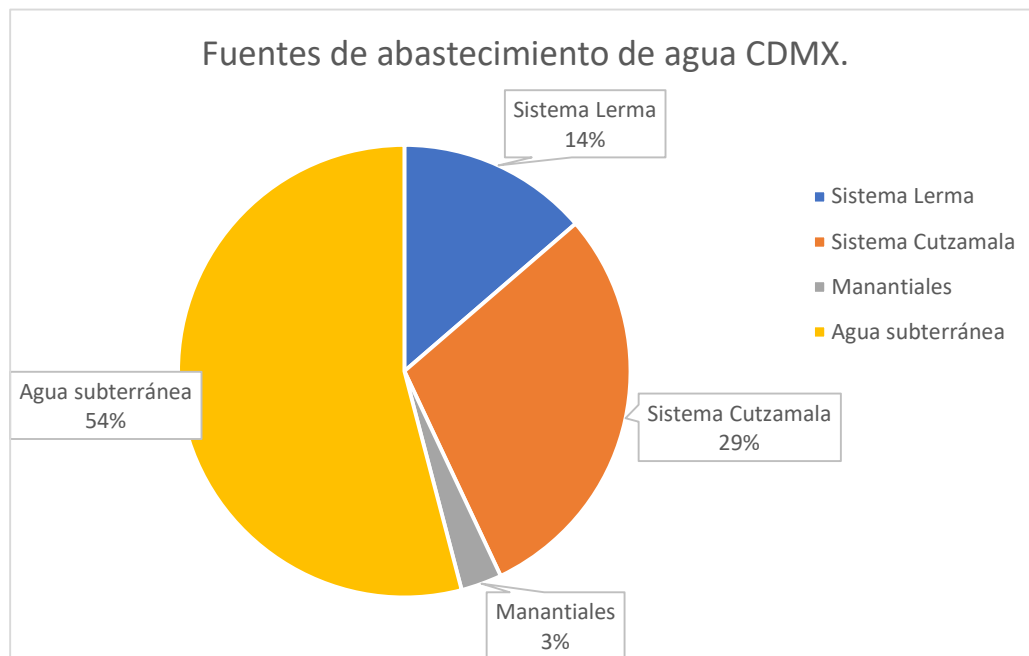


Figura 3. Fuentes de abastecimiento de agua en la Ciudad de México. Fuente CONAGUA.

La Ciudad de México demanda 61,000 L/s en promedio, de los cuales 39,700 L/s son extraídos de acuíferos, 14,700 L/s son aportados por el Sistema Cutzamala, 5,100 L/s por parte del sistema Lerma y 1,100 de cuerpos de agua superficiales. En la figura 3 se muestra un gráfico con los volúmenes antes descritos. (CONAGUA 2005).

La extracción desmedida de agua del acuífero tiene como consecuencia un hundimiento considerable que favorece la alteración de pendientes en el sistema de drenaje de la ciudad y la aparición de inundaciones que afectan de manera directa e indirectamente a la población. Para reducir dichos hundimientos se puso en operación el sistema Lerma, que suministraba cerca de 13,700 L/s a la CDMX (SACMEX 2019; CONAGUA 2005).

En los años treinta se observó por primera vez que los manantiales decrecieron en su nivel de agua debido a la sobreexplotación del acuífero principal, por lo que a partir de 1983 se han medido los hundimientos que aumentan año con año, ocasionando daños a la infraestructura instalada, principalmente en la cimentación (Charles, Herrera, 1995).

El sistema Lerma tiene por objetivo el suministrar agua a la Ciudad de México, la vida del proyecto está por encima de los 80 años, y su funcionamiento data del año 1951. Éste fue un elemento clave en el crecimiento y desarrollo de la ciudad, que en proceso demanda agua a la misma velocidad. La conducción del agua se realiza mediante bombeo ya que la pendiente del terreno es negativa y no es posible utilizar la gravedad a favor pues la Ciudad de México se encuentra a 2,440 msnm (Torres 2014).

Además, forma parte de un sistema que interconecta la cuenca del Valle de México, Tula, Lerma y Cutzamala. Inicia en Almoloya del Río y cruza diversos municipios del Estado de México como Ocoyoacac, Lerma, entre otros. El agua desciende a la presa Antonio Alzate y en su recorrido se alimenta de dos fuentes de abastecimiento: Toluca e Ixtlahuaca (Torres 2014).

En cuanto a los ríos, se tiene una red hidrográfica de 633,000 kilómetros de longitud y cuyas cuencas se extienden en una cobertura del 65% del territorio nacional. Por dicha red fluye el 87% de los escurrimientos totales (CONAGUA 2019).

2.2 Población abastecida y su distribución espacial

CONAGUA, afirma que, de acuerdo con el Registro Público de Derechos de agua, la clasificación para la asignación de aguas nacionales es de uso consuntivo y no consuntivo. El volumen concesionado a cada rubro de enlista a continuación en la tabla 1 y 2 (2019):

Usos consuntivos

Clave	Uso consuntivo	Volumen (hm ³)
A	Agrícola	59,950
B	Agroindustrial	4.16
C	Doméstico	38
D	Acuacultura	1,160
E	Servicios	1,637
F1	Industrial	2,694
F2	Termoeléctricas	4,147
G	Pecuario	226
H	Público urbano	13,056
I	Múltiples	5,927
K	Comercio	0.08
L	Otros	1

Tabla 2. Usos consuntivos del agua. CONAGUA 2019.

Usos no consuntivos

Clave	Uso no consuntivo	Volumen (hm ³)
J	Hidroeléctricas	182,504
N	Conservación ecológica	0.46

Tabla 3. Usos no consuntivos del agua. CONAGUA 2019.

El uso consuntivo es aquel donde el agua es extraída de la fuente, y en su totalidad o parcialmente se pierde en el proceso, se clasifica en productivo y no productivo, un ejemplo del primero es la evapotranspiración y producción de biomasa (agricultura), y del segundo se tiene la evaporación desde embalses o canales (Cruz; Bielsa 2001).

El uso no consuntivo tiene la particularidad de utilizar el agua para algún propósito y devolverla a la fuente sin pérdida alguna (Cruz; Bielsa 2001).

Con el fin de administrar las aguas nacionales y preservarlas el país se divide en trece regiones delimitadas en la figura 4. Existe un contraste entre las regiones hidrológico-administrativas V, X, XI y XII cuando se relacionan variables como la población, el agua renovable y el Producto Interno Bruto (PIB). Del agua total del país, las regiones del sureste cuentan con un 66.66% mientras que las regiones del norte, centro y noroeste con el restante, 33.33% (CONAGUA 2019).

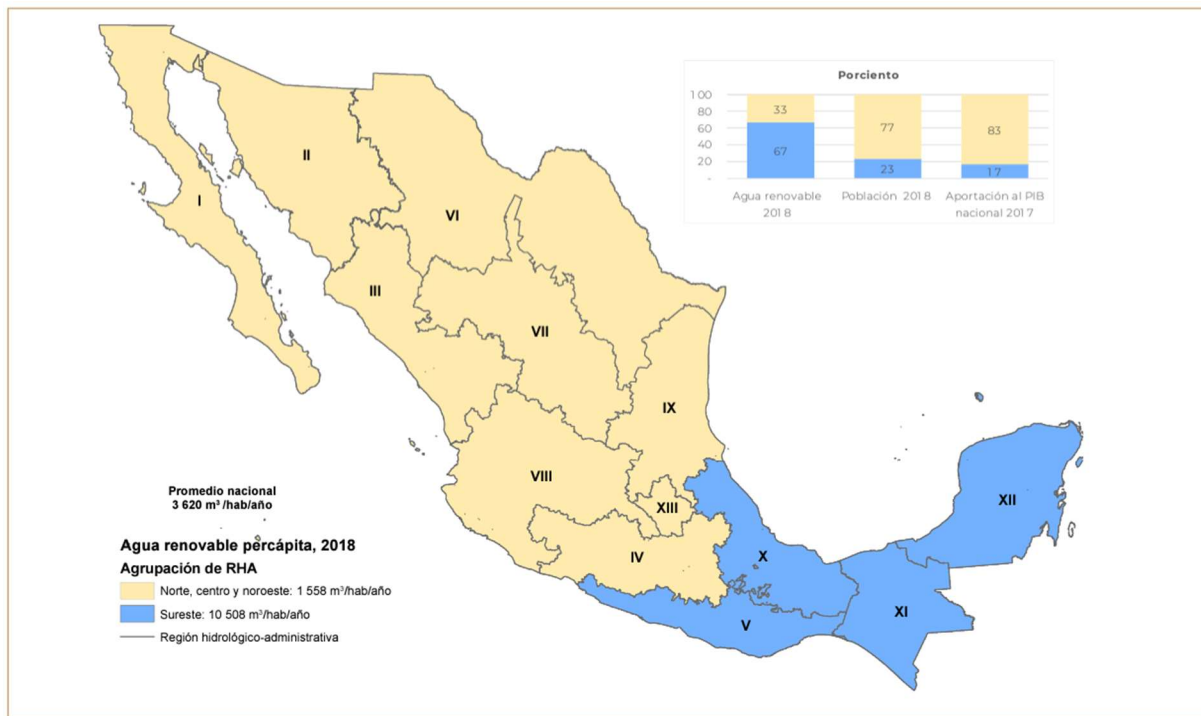


Figura 4. Contraste regional entre agua renovable y desarrollo. (CONAGUA 2019).

La administración del servicio de abastecimiento y drenaje de la Zona Metropolitana del Valle de México le compete en parte a la CDMX y al Estado de México.

La Ciudad de México alberga una población de 8.92 millones de habitantes y la Zona Metropolitana del Valle de México de 20.4 millones de habitantes. A esto se le debe agregar aquel sector de la población flotante que asciende a los 4.2 millones de habitantes (2019). La capital del país alberga el 7.5% de la población total en tan solo el 0.08% del territorio que comprende el país. La Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento (CEAS) determina que

la zona metropolitana comprende 17 municipios del Estado de México, por lo que de manera conjunta se tiene una cobertura de 1,287 km² (Charles, Herrera, 1995).

Se tiene una cobertura de abastecimiento de agua potable del 98% y de drenaje del 94% ofreciendo a cada persona una dotación de 177 Litros/habitante/día (Charles, Herrera, 1995).

La zona sur de la CDMX no está considerada en su totalidad para el abastecimiento y desalojo de agua, por lo que un sector de la población en el área depende de pipas para el suministro, o por medio de pozos y manantiales naturales. El área es considerada como una zona de recarga natural del acuífero. (Charles, Herrera, 1995).

Las líneas de distribución de la Ciudad de México tienen una longitud de 11,000 kilómetros de extensión y 243 tanques de almacenamiento, que en conjunto tienen una capacidad de 1,500,000 m³. Por otro lado, las líneas de distribución del Estado de México miden 800 kilómetros y mediante 32 tanques de almacenamiento tienen una capacidad total de 440,000 m³. (Charles, Herrera, 1995).

Los volúmenes concesionados para usos consuntivos en la Ciudad de México en 2018 son:

Uso consuntivo	Volumen (hm³)
Agrícola	1.2
Abastecimiento público	566.3
Industria autoabastecida	32.1
Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad	0.0

Tabla 4. Volúmenes concesionados para usos consuntivos en CDMX.

En total la CDMX recibe un volumen concesionado de agua de 599.6 hm³.

III. SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA

Los procesos y operaciones unitarias incluidos en un tren de tratamiento están directamente relacionados con la calidad del agua, por lo que en cada proyecto se tendrán variaciones en función de los contaminantes presentes. El tren básico comprende coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. La calidad del agua se relaciona con el uso destino, por lo que, si no cumple con los requisitos, se dice que está contaminada. (CONAGUA 2007).

Las características fisicoquímicas del agua son:

- **Turbiedad:** Reducción de la transparencia del agua ocasionada por partículas en suspensión o coloides; se mide con un turbidímetro en unidades (UNT) o mediante un nefelómetro en unidades nefelométricas. Se requiere el uso de coagulantes, acondicionadores de pH (potencial de hidrógeno), ayudas a la coagulación, etc. Lo que impacta directamente en los costos. Estudios realizados por Tracy y Sanderson y Kelly demuestran que las partículas que ocasionan turbiedad en el agua afectan el proceso de desinfección disminuyendo la efectividad y protegiendo a los organismos patógenos. En la siguiente figura se muestra la distribución de las partículas en función de su tamaño. (de Vargas 2004).

La NOM-127-SSA1-2021 establece un límite permisible de 4 UNT. (A partir del segundo año posterior a la entrada en vigor de la norma el límite permisible será de 3 UNT). Dicho parámetro de calidad del agua es provocado por la presencia de algunas partículas mostradas en la figura 5.

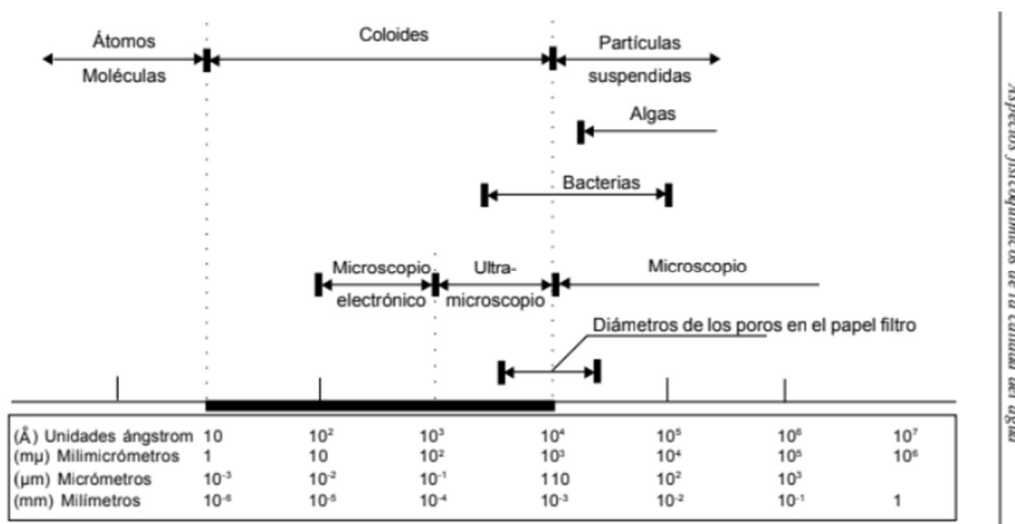


Figura 5. Distribución de tamaños de las partículas en el agua (de Vargas 2004).

- Sólidos y residuos: De acuerdo con el tamaño de cada una se clasifican como: Disueltas (hasta 1 mili micrómetro) las cuales intervienen en la coloración y olor del agua, coloides (1 a 1,000 mili micrómetros) que provocan turbiedad en el agua y las partículas suspendidas (mayores a 1,000 mili micrómetros) con incapacidad de sedimentar al fondo con el reposo de la muestra (de Vargas 2004).

Se le considera sólidos totales a los residuos que permanecen después de evaporar una muestra de agua (de Vargas 2004).

$$\text{Sólidos totales} = \text{sólidos suspendidos} + \text{sólidos disueltos}$$

$$\text{Sólidos totales} = \text{sólidos fijos} + \text{sólidos volátiles}$$

Donde:

- Sólidos suspendidos: Partículas retenidas en la filtración, todos aquellos sólidos presentes con excepción de solubles y sólidos en fino estado coloidal.
- Sólidos disueltos: No se retienen en la filtración y se conforman por sólidos en solución verdadera y partículas coloidales.
- Sólidos fijos: Sometidos a una calcinación a 550 °C, corresponden al material que permanece después del proceso. (de Vargas 2004).

La normatividad mexicana establece un límite permisible de Sólidos disueltos totales de 1,000 mg/L

- Color: Depende de la presencia de taninos, lignina, ácidos húmicos, ácidos grasos, entre otros. Su origen se enlaza con la descomposición de materia, presencia de iones metálicos como hierro o manganeso, o por la materia orgánica del suelo, pH, temperatura, entre otros. Se clasifica como color aparente al que tiene el agua cruda o color verdadero al obtenido después de un proceso de filtración (de Vargas 2004).

El proceso unitario asociado a la remoción de color es la coagulación-floculación-sedimentación por medio de compuestos químicos como el sulfato de aluminio. Se recomienda que este proceso se lleve a cabo antes de la desinfección por cloro ya que debido a la presencia de materia orgánica se pueden formar

trihalometanos. Para el caso del color verdadero se utilizan sistemas complejos como adsorción en carbón activado, oxidación y filtración en zeolitas, etc. (de Vargas 2004; CONAGUA 2007).

La NOM-127-SSA1-2021 tiene un límite máximo permisible de 15 UC.

- Sabor y Olor: Características que son determinadas por los sentidos de los consumidores, se originan por compuestos orgánicos e inorgánicos y en función de su concentración pueden o no, ser percibidos. La importancia de esta propiedad radica en conocer su origen y su variación con el tiempo (CONAGUA 2007).

En función del compuesto que da olor y sabor al agua, se proponen procesos u operaciones unitarias para eliminarlos. Algunos ejemplos son (CONAGUA 2007):

- Sulfuro de hidrógeno | Aireación
- Materia orgánica | Ozonación y filtración con carbón activado
- Hierro | oxidación y sedimentación-filtración

Existen cuatro sabores básicos para identificar el agua: Ácido, salado, dulce y amargo (de Vargas 2004).

En la tabla 4 se muestra una lista de sustancias comúnmente presentes en muestras de agua y los valores de concentración para su percepción.

Sustancia	Netamente reconocible	Debidamente perceptible	No apreciable
CaCl ₂ ; NaCl	600	300	150
MgCl ₂	100	60	-
FeSO ₄	-	3.5	1.75
CuSO ₄	7	3.5	1.75
H ₂ S	1.15	0.55	0.3
H ₂ SO ₄	4	2	1
Cl ₂	0.1	0.05	0.05
Ca(OCl) ₂	0.5	0.2	0.2

Tabla 5. Límites de percepción de algunas sales y compuestos en el agua (mg/L) (de Vargas 2004).

En resumen, se debe tener un agua con sabor y olor agradable al gusto, sin compuestos químicos ni agentes patógenos que comprometan la salud de la población, libre de turbiedad y partículas suspendidas, con un pH neutro o cercano, con baja carga orgánica que impedirá el crecimiento biológico (CONAGUA 2007).

La normatividad mexicana no tiene un valor cuantitativo para medir el sabor y olor, por lo que se basa en la percepción del consumidor. (CONAGUA 2007).

- Potencial de hidrógeno (pH): No tiene afectaciones directas a la salud, pero si a los procesos del tren de tratamiento, tales como la coagulación o la desinfección. Aumenta o disminuye la corrosión e incrustaciones en las líneas de conducción de acuerdo con su valor. Cuando se tiene un caso de un agua ácida se adiciona un álcali para optimizar la coagulación, requiriéndose un ajuste de pH posterior. (de Vargas 2004).

La NOM-127-SSA1-2021 tiene un límite máximo permisible de entre 6.5 a 8.5 unidades de pH.

- Temperatura: Intervienen diversos factores en especial ambientales en su variación y de ella depende el retardo o aceleración de actividad biológica, absorción de oxígeno, desinfección, sedimentación, filtración, entre otros (de Vargas 2004).

Para la selección de una fuente de agua cruda se deben identificar los contaminantes presentes en ella, los cuales se clasifican en (de Vargas 2004):

- Contaminantes inorgánicos: Presentan graves problemas en el tren de tratamiento ya que de presentarse en concentraciones altas se dificulta su remoción. Factores como la forma química y el pH de la muestra pueden alterar el proceso. Por ello, se recomienda en algunos casos la búsqueda de otra fuente (de Vargas 2004).
- Contaminantes orgánicos: Se clasifican en biodegradables y no biodegradables (plaguicidas, hidrocarburos, etcétera) estos primeros son de fácil remoción en caso de no presentarse en alta concentración, de ser así, se debe recurrir a un proceso de precloración, sin embargo, la presencia de ácidos

húmicos debidos a la descomposición de materia vegetal forma trihalometanos al contacto con el cloro, por lo que, en este caso en específico, no podrá aplicarse dicha solución. Para el caso de los contaminantes no biodegradables, resulta ser complejo el proceso de su remoción para un tren de tratamiento convencional, por lo que en ciertas ocasiones se debe agregar carbón activado pulverizado o filtrar con carbón activado granular (de Vargas 2004).

- Contaminantes radiológicos: Se clasifican en naturales, como aquellos que se presentan en aguas subterráneas, su eliminación se efectúa en el ablandamiento con cal y la ósmosis inversa. Los radionúcleos artificiales son aquellos provenientes de plantas atómicas y su remoción requiere de un estudio particular del caso (de Vargas 2004).

Las condiciones fisicoquímicas que deben tenerse en cuenta para la selección de la fuente son el origen de ésta y sus aportes de contaminación, la calidad del agua, la eficiencia del tratamiento en la remoción de contaminantes y su comparativa con la norma mexicana (de Vargas 2004).

Las plantas de tratamiento se clasifican en función de los procesos que las conforman:

- Plantas de filtración rápida. Los filtros que las componen operan a altas velocidades, a causa de ello requieren de un mantenimiento entre cada 40-50 horas. Se clasifican en plantas de filtración rápida completa o plantas de filtración directa (de Vargas 2004).

Las plantas de filtración rápida completa reúnen procesos como coagulación, sedimentación, filtración, y desinfección. La coagulación comienza con una mezcla rápida que favorece la mezcla y posteriormente se promueve la formación de flóculos mediante una mezcla lenta; una vez formado el flóculo y que su tamaño le permite descender de manera propia, por acción de la gravedad se deposita al fondo. La desinfección tiene la función de eliminar organismos patógenos que no quedaron atrapados en la filtración y debe garantizar su calidad a lo largo de la línea de distribución, hasta el consumidor final (de Vargas 2004).

- Filtración directa. Ideal para aguas claras, principalmente de cuerpos de agua que funcionan como un presedimentador, consiste en una mezcla rápida y filtración. En función de las propiedades del agua se tendrán 3 tipos de filtración directa y se detallan en la tabla 5.

Alternativa	Parámetros	90% del tiempo	80% del tiempo	Esporádicamente
Filtración directa descendente	Turbiedad (UNT)	25 – 30	< 20	< 50
	Color verdadero (UC)	< 25		
	NMP de coliformes totales/100 mL	<2.500		
	Concentración de algas (unidades/mL)	< 200		
Filtración directa ascendente	Turbiedad (UNT)	< 100	< 50	< 200
	Color (UC)	< 60		< 100
Filtración directa ascendente - descendente	Turbiedad (UNT)	< 250	< 150	< 400
	Color (UC)	< 60		< 100

Tabla 6. Límites de calidad del agua para plantas de filtración directa (de Vargas 2004).

Se deben tomar en cuenta otros parámetros de calidad del agua para determinar si es factible utilizar una filtración directa, enlistados en la tabla 6.

Parámetros	Valores recomendables
Sólidos suspendidos (mg/L)	< 50
Carbono orgánico total (mg/L)	< 5
pH	5.5 – 6.5
Fósforo total (mg/L)	< 0.05
Nitrógeno total (mg/L)	< 5
Clorofila (µg/L)	< 10
Coliformes totales (colif./100)	< 2500
Hierro (mg/L)	10
Manganeso (mg/L)	2

Tabla 7. Parámetros de calidad importantes para la filtración directa (de Vargas 2004).

- Plantas de filtración lenta. Se pretende simular el proceso de filtración natural del agua a través de los distintos estratos existentes en el suelo, haciendo pasar el flujo de agua por diversos materiales porosos. De acuerdo con las propiedades del agua a tratar se elegirán los procesos adecuados, mostrados en la tabla 7 (de Vargas 2004).

Procesos	Parámetros	90% del tiempo	80% del tiempo	Esporádicamente
Filtro lento	Turbiedad (UNT)	< 20	< 10	< 50
	Color verdadero (UC)	< 15	< 5	
	Concentración de algas (UPA/mL)	250		
	DBO5 (mg/L)	5		
	NMP de coliformes totales/100 mL	1.000		
	NMP de coliformes fecales/100 mL	500		
Filtro lento + prefiltros de grava	Turbiedad (UNT)	25		
	Color (UC)	15	< 5	< 25
	NMP de coliformes totales/100 mL	5.000		
	NMP de coliformes fecales/100 mL	1.000		
	Concentración de algas (UPA/mL)	1.000		
Filtro lento + prefiltros de grava + sedimentador	Turbiedad (UNT)	100	< 50	< 500
	Color (UC)	< 15	< 5	< 25
	NMP de coliformes totales/100 mL	10.000		
	NMP de coliformes fecales/100 mL	3.000		

	Concentración de algas (UPA/mL)	1.000		
Filtro lento de grava sedimentador presedimentador	Turbiedad (UNT)	100	< 50	< 1000
	Color (UC)	< 15	< 5	< 25
	NMP de coliformes totales/100 mL	10.000		
	NMP de coliformes fecales/100 mL	3.000		
	Concentración de algas (UPA/mL)	1.000		

Tabla 8. Límites de calidad del agua para tratamiento mediante filtración lenta (de Vargas 2004).

3.1 Potabilización convencional de aguas superficiales

Como todo cuerpo de agua con exposición a la atmósfera se considera que puede permanecer en reposo o con un flujo variable. Es importante destacar que el reposo favorece la actividad microbiana que degrada la materia orgánica presente en el agua, por lo que el agua suele ser más clara en esta condición (CONAGUA 2007).

El intemperismo al que están expuestas las aguas superficiales es factor para su contaminación, afectando su calidad biológica. En algunos casos los cuerpos de agua están sujetos a descargas sanitarias sin previo tratamiento o están en contacto con aguas residuales y escorrentía pluvial, lo que dificulta su tratamiento. El conjunto de factores implica un riesgo a la salud de los consumidores. En la tabla 8 se clasifican los grupos de agentes patógenos y organismos productores de toxinas. (Aurazo 2004).

Bacterias	<i>Escherichia coli, Salmonella, Shigella, Vibrio cholerae, Yersinia enterocolitica, Campylobacter jejuni.</i>
Virus	<i>Enterovirus, Rotavirus, Adenovirus.</i>
Protozoos	<i>Giardia, Cryptosporidium, Entamoeba histolytica, Balantidium coli.</i>
Helmintos	<i>Ascaris, Trichuris, Taenia.</i>
Cyanobacterias	<i>Anabaena, Microcystis.</i>

Tabla 9. Agentes patógenos y organismos productores de toxinas en aguas superficiales (Aurazo 2004).

Existen organismos presentes en aguas superficiales que favorecen el desarrollo de ciclos biológicos y químicos y que no representan un riesgo para la salud de las personas. Dependen de características como la temperatura, exposición a luz solar, nutrientes, minerales, etc. En el caso de las algas, acumulan energía que utilizan para sostenerse, crecer y reproducirse y son considerados como productores primarios. Su energía se transmite a animales herbívoros que se alimentan éstas, los cuales son considerados consumidores de primer orden, que a su vez sirven de alimento para otros, creando así una red alimenticia (Aurazo 2004).

La biodegradación de materia orgánica es realizada por un conjunto de bacterias y hongos, transformándola en compuestos inorgánicos simples. De forma general los organismos presentes en aguas superficiales son: Algas, bacterias, Protozoarios, Rotíferos, Copépodos, insectos, entre otros. (Aurazo 2004).

Existen organismos que tras el proceso de tratamiento siguen presentes en el agua, principalmente por fallas en la filtración. Generan alteración en los consumidores, no son patógenos, pero tienen la capacidad de transportar agentes microbianos (Aurazo 2004).

En la tabla 9 se muestran los procesos y operaciones unitarias empleadas de acuerdo con la concentración de contaminantes (Aurazo 2004).

Tipo de fuente de agua	<i>Escherichia coli</i> /100 mL	Tratamiento recomendado
Cuencas protegidas y libres de contaminación fecal	< 20	Desinfección
Cuencas no protegidas y con contaminación fecal	> 20 – 2.000	Filtración y desinfección
Alta contaminación fecal	> 2.000 – 20.000	Filtración, desinfección más la adición de un tercer proceso
Muy alta contaminación fecal	> 20.000	No recomendada como fuente de agua

Tabla 10. Tratamientos recomendados según el nivel de contaminación fecal.

Procesos de transferencia empleados en el tratamiento de agua:

- Transferencia de sólidos.

- Cribado. Tiene como finalidad retener sólidos de gran tamaño por medio de rejas o tamices o la trituración de algas para su posterior sedimentación (microcernido) (de Vargas 2004).
 - Sedimentación. Por acción gravitacional, las partículas suspendidas más densas descienden al fondo, una operación unitaria que ayuda es la coagulación. Se realiza en desarenadores, presedimentadores, sedimentadores o decantadores (de Vargas 2004).
 - Flotación. Utilizado principalmente para retirar grasas, aceites, turbiedad y color, se utilizan sustancias espumantes y microburbujas de aire que favorece a que sólidos con densidad menor a la del agua suban y sean retirados por desnatado (de Vargas 2004).
 - Filtración. Se utilizan medios porosos como arena, antracita, granate, magnetita, carbón activado, etcétera. Se hace pasar el líquido por el material de elección para la remoción de contaminantes específicos. (de Vargas 2004).
- Transferencia de iones.
 - Coagulación química. Generalmente son utilizadas sales trivalentes de aluminio y fierro que tienen la función de transferir sus iones a la sustancia, neutralizando la carga eléctrica de las partículas y dando origen a la formación de flóculos para su posterior sedimentación propia. Su eficiencia depende del pH y alcalinidad del agua y es utilizada en la remoción de turbiedad y color.
 - Precipitación química. Se presenta al agregar una sustancia química en la que sus iones reaccionan con los del agua a tratar formando un precipitado. En algunos casos se utiliza cal.
 - Intercambio iónico. Consiste en hacer pasar el fluido por un medio sólido poroso donde se presenta un intercambio de iones. Generalmente es utilizado para el ablandamiento o desmineralización del agua.
 - Absorción. Utilizado para remover olor y sabor del agua, por medio de un medio adsorbente se remueven iones y moléculas. Se puede utilizar carbón activado en polvo.

- Transferencia de gases.
 - Aireación. Mediante escaleras, cascadas u otra estructura se promueve una caída de agua, por otro lado, se puede aplicar gas por aspersión o burbujeo.
 - Desinfección. Los desinfectantes usualmente utilizados son cloro y ozono.
 - Recarbonatación. Sirve para estabilizar el pH, bajándolo en la escala de medición. Aplicando anhídrido carbónico.

- Transferencia molecular. Se considera al proceso de purificación ordinario del agua, la transferencia se lleva a cabo en la filtración.

De manera general se utilizan procesos como clarificación química mediante el uso de sustancias químicas (coagulación – floculación), sedimentación, filtración y desinfección (CONAGUA 2007). Sin embargo, se agregarán los métodos que cada tipo de agua demande, ya que la exposición a la que se encuentra y la poca regulación de calidad necesaria para verter el recurso en cuerpos de agua, agregan contaminantes que hacen que el tren necesario se vuelva más complejo.

3.2 Potabilización de agua subterránea.

La calidad del agua subterránea suele ser constante, para comprobarlo se recomienda realizar dos muestreos en días diferentes procurando tener una desviación en un intervalo del 5 al 10% (CONAGUA 2007).

Los parámetros por analizar se clasifican en:

- Eventuales. Aquellos relacionados con el tipo de suelo, la historia de la localidad o la calidad de agua de los pozos aledaños. Un especialista determinará si deben o no considerarse.
- No indispensables. No son considerados en la selección del tren de tratamiento y generalmente se determinan durante las pruebas experimentales.
- Indispensables. Son determinantes para la selección del tren de tratamiento y la factibilidad de potabilizar dicha muestra. (CONAGUA 2007).

Los muestreos indispensables para agua subterránea son:

- Nitrógeno total
- Benceno
- pH
- Dureza total
- Nitratos
- Nitritos
- Potencial para la formación de trihalometanos
- Sulfatos
- Color
- Turbiedad
- Coliformes fecales
- Hierro
- Manganeseo
- Carbono orgánico total (COT)
- Sólidos disueltos totales
- Etilbenceno

Los muestreos no indispensables para agua subterránea son:

- Coliformes totales
- Sodio

Los muestreos eventuales para agua subterránea son:

- Cobre
- Mercurio
- Cadmio
- Aluminio
- Cloruros
- Cromo total
- Fluoruros
- Radioactividad alfa global
- Radioactividad beta global
- Arsénico
- Plomo
- Cianuros
- Bario
- Olor
- Sabor
- Zinc
- Yodo residual libre (CONAGUA 2007).

De forma general, conociendo los contaminantes presentes en cada muestra se aplican los procesos u operaciones unitarias necesarias para su remoción. Si se busca eliminar coliformes fecales y totales se deberá aplicar desinfección al agua por procesos como elevación de temperatura o luz ultravioleta, o por operaciones unitarias

como la aplicación de cloro, ozono o iones metálicos. Se debe garantizar la eliminación de agentes patógenos utilizando una dosis que no sea tóxica para el consumo humano. No debe provocar un sabor desagradable, ni implicar altos costos en el tren de tratamiento. Debe tener propiedades residuales que ofrezcan desinfección del agua durante su estadía en las líneas de conducción o en los almacenamientos y se debe tener cuidado que el desinfectante suministrado no tenga reacciones con compuestos presentes que produzcan sustancias tóxicas. Los factores de mayor influencia en la desinfección por medios químicos son el tiempo de contacto, temperatura, tipo y naturaleza, y por medios físicos son la intensidad, tiempo y naturaleza (CONAGUA 2007).

Para remoción de color, olor y sabor se utilizan procesos de aireación, oxidación y adsorción por medio de carbón activado en polvo o grano. Además, se puede utilizar la coagulación, floculación, sedimentación y filtración (CONAGUA 2007).

En caso de tener sólidos suspendidos y por ende turbiedad, se aplicará filtración. Debido a las concentraciones de sólidos muy finos se deberá aplicar coagulación – floculación previa a la filtración. Generalmente se aplican en tratamiento de aguas superficiales (CONAGUA 2007).

En la remoción de dureza se aplica un ablandamiento por medio de cal o sosa que tiene por objetivo el precipitar el calcio y magnesio proveniente de formaciones geológicas (CONAGUA 2007).

En aguas subterráneas es común encontrar minerales como hierro y magnesio, su eliminación se realiza por oxidación con aire o mediante sustancias químicas como cloro y permanganato de potasio, otro método es la estabilización, ablandamiento y ósmosis inversa (CONAGUA 2007).

El ajuste de pH deberá realizarse cuando la eficiencia de un proceso se vea afectada, reduce el costo total del tren de tratamiento (CONAGUA 2007).

La eliminación de sales se efectúa por medio de destilación solar u ósmosis inversa, generalmente en agua de mar, o por medio de electrodiálisis para acuíferos salados que tiene la propiedad de eliminar sustancias tóxicas (CONAGUA 2007).

Los compuestos orgánicos no solubles se remueven por coagulación – floculación, mientras que en el caso de compuestos solubles se vuelve un poco más compleja su eliminación, mediante adsorción en carbón activado, oxidación con ozono y membrana (CONAGUA 2007).

Para la remoción de metales solubles es indispensable verificar si el proceso coagulación – floculación es eficaz, de lo contrario se debe precipitar con reactivos químicos, lo que genera un aumento en costos (CONAGUA 2007).

Una vez que se realizan las pruebas de laboratorio, se analizan los resultados obtenidos y se eligen los procesos que se utilizarán y que en combinación efectuarán el proceso de potabilización (CONAGUA 2007).

Generalmente los trenes de tratamiento para agua subterránea están compuestos por desinfección por medio de cloración, oxidación para remover hierro y manganeso y ablandamiento por precipitación. En el caso más simple, la calidad es tal que sólo requiere de desinfección (CONAGUA 2007).

3.3 Operaciones adicionales para potabilizar el agua

Desmineralización mediante ablandamiento químico.

Es una operación unitaria que consiste en la adición de productos químicos para eliminar la dureza del agua, obligando a precipitar el calcio y magnesio presentes en una muestra. Dichas operaciones pueden realizarse en tanques de sedimentación abiertos o en clarificadores de flujo vertical (Martínez. Idrobo, 2012).

El Hidróxido de Calcio funciona además como coagulante en el proceso de coagulación – floculación para la eliminación de sólidos suspendidos en el agua. Asimismo favorece a la desestabilización de los coloides y neutraliza aquellas fuerzas que los mantienen separados para favorecer la formación de flóculos, que por peso propio, puedan depositarse en el fondo del tanque por acción de la gravedad. Es importante poner atención al mezclado del agua para garantizar la formación y no la separación de los flóculos, ya que una agitación excesiva puede ocasionar problemas en el proceso. La cal hidratada tiene la propiedad de ser un coagulante económico y tiene la capacidad de reaccionar con materia orgánica y microorganismos (Calidra, 2000).

Carbón activado.

Utilizado principalmente para la adsorción de compuestos presentes en el agua y conformado por 75-80% carbono y 5-10% de cenizas, tiene la particularidad de poder ser producido a partir de casi cualquier materia orgánica con altas cantidades de carbono, biomasa por ejemplo. El activarlo le ofrece a este material la porosidad necesaria para aumentar la superficie de adsorción. Una característica importante del carbón activado es la ligera unión que crea con el adsorbente, lo que permite retirarlo y reutilizarlo en el mismo proceso (Requena, 2018).

Intercambio iónico.

El tener dureza en el agua puede ocasionar incrustaciones calcáreas en las tuberías o un agua corrosiva. En la figura 6 se muestran las especies químicas del sistema carbonato presentes en el agua, en función de pH (Cortijo, 2013).

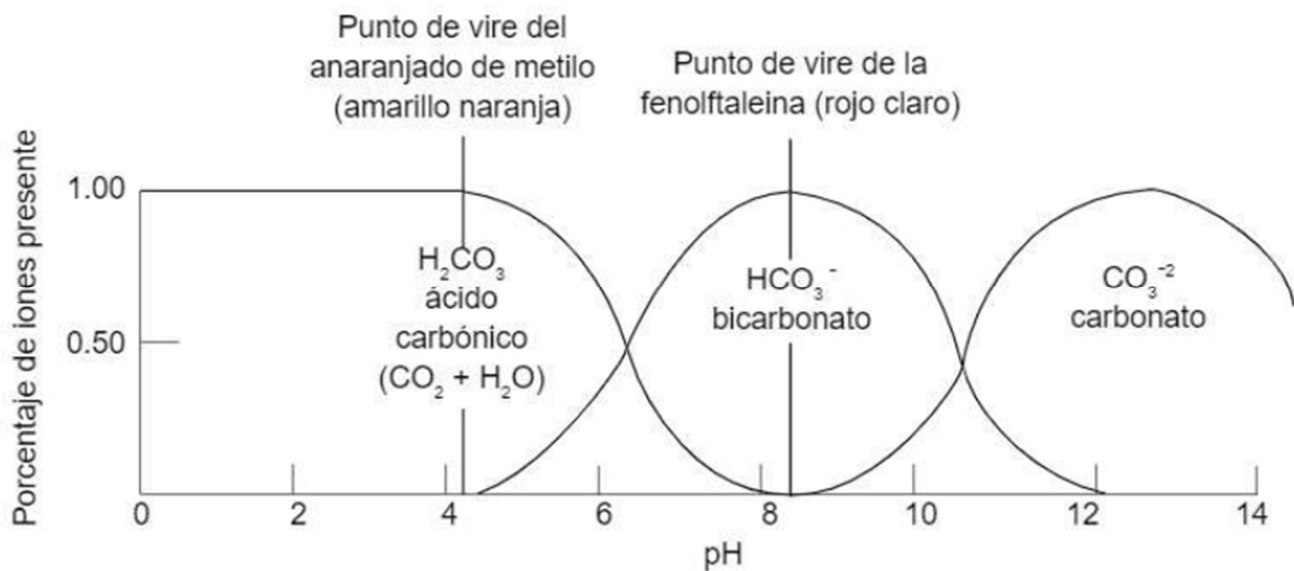


Figura 6. Dependencia del pH de las especies químicas del sistema carbonato (Cortijo, 2013).

Para un pH con valores de entre 8.3 y 8.4 desaparece prácticamente todo el dióxido de carbono, siendo el bicarbonato (HCO_3^-) predominante, mientras que a un pH mayor que 8.4 comienza a aparecer el ion carbonato, ocasionando incrustaciones. El agua con pH menor a 6.3 debe evitarse ya que es corrosiva ante la presencia de H_2CO_3 (Cortijo, 2013).

Ante la presencia de agua incrustante se puede utilizar la Ósmosis inversa para adicionar posteriormente las sales necesarias para obtener el equilibrio. Otro método utilizado, es la electrodiálisis mediante el uso de membranas, sin embargo, una opción más económica puede ser mediante el uso de intercambiadores iónicos que cambian un ion del agua por otro, manteniéndolo temporalmente en la superficie y cediéndolo a una solución regenerante, reemplazándolos por otros iones menos perjudiciales (Cortijo, 2013).

Todo lo anterior se realiza con el fin de regular la alcalinidad del agua hasta el punto de equilibrio, tal que ya no sea corrosiva ni incrustante (Cortijo, 2013).

IV. PROBLEMÁTICA DE ALGAS Y MICROALGAS EN FUENTES DE ABASTECIMIENTO

La presencia de algas en un cuerpo de agua con potencial de potabilización infiere obstrucción en las líneas de distribución, así como su saturación (Rojo 2006). Uno de los principales problemas que se presentan en cuerpos de agua mediante la disposición de sedimentos es la eutrofización, donde estos se enriquecen de minerales como nitrógeno o fósforo, sustentando un crecimiento descontrolado de algas y microalgas, lo que agota la cantidad de oxígeno presente (Kellali, Ghernaout 2019). El grado eutrófico de un cuerpo de agua se mide de manera cuantitativa como la concentración media anual de clorofila. La presencia de algas en altas concentraciones repercute directamente en la calidad del agua desde su color y su desagradable olor, hasta la formación de trihalometanos por el contacto con agentes desinfectantes (Barrado, 2016).

Los nutrientes son transportados a la corriente mediante la descarga de aguas residuales, riego de cultivos, escurrimientos pluviales, incendios, entre otros (Barrado, 2016).

Las algas tienen la capacidad de colonizar prácticamente cualquier ecosistema y en periodos extremadamente cortos (3-4 horas), por lo que su presencia pone en riesgo la supervivencia de organismos acuáticos (Barrado 2016 ; Rojo 2006).

4.1 Origen y tipo de algas y microalgas

Las microalgas han existido desde hace millones de años, son las productoras del petróleo que actualmente se extrae en el mundo. Se tienen registros de que, en época de hambruna, China suplía la dieta alimenticia con algas hace dos mil años. En México sucedió algo similar, pues los aztecas recolectaban algas para elaborar una especie de pastel o tortilla. De ellas se pueden obtener espesantes y agar, además de colorantes a partir de taxantina (rojo), betacaroteno (amarillo / naranja), clorofila (verde) y ficocianinas (azul); también se obtienen ácidos grasos (Bustamante 2018). Contienen clorofila y tienen la capacidad de realizar fotosíntesis oxigénica sin la necesidad de contar con raíz, tallo y hojas. Se incluyen aquellos organismos de estructura celular procariota y eucariota con orgánulos del tipo cloroplasto y núcleo. Su desarrollo se basa en la captación de luz solar, dióxido de carbono, agua y nutrientes. (Barrado, 2016; Ghernaout et al. 2020).

Es común encontrar diferencias en la composición química de algas de la misma especie, ya que tienen la propiedad de adaptarse a variaciones del entorno tales como estacionalidad, nutrientes, temperatura, salinidad, etc. (Bustamante 2018).

Las características para clasificar a las microalgas son:

- **Pigmentación.** La clorofila corresponde a organismos fotosintetizadores y se encuentra en todas las algas, excepto en las bacterias fotosintéticas, es un biomarcador de fitoplancton en presencia de bacterias, zooplancton y detritos. La clorofila b funciona como un acumulador de luz para su transferencia a la clorofila tipo a para llevar a cabo la quimiofotosíntesis primaria. La clorofila c está conformada por dos componentes espectrales y la d es poco común y es poco conocida (Rojo 2006).
- La existencia de flagelos y sus propiedades, los cuales pueden ser de tres tipos: de látigo, relumbrante y en listón o cinta (Rojo, 2006).
- **Reproducción,** existen algas que se reproducen de manera sexual y asexual, así como pueden limitarse a un modo, existen variantes que emplean los dos tipos de reproducción (Rojo, 2006).

En aguas con alto contenido de calcio se encuentran algas del tipo *Coccomonas* e *Hydrurus*, mientras que las Desmidiáceas sobreviven en agua con pH bajo. En un cuerpo de agua rico en nutrientes viven Volvocales, Chlorococcales y Euglenoficeas. En manantiales con presencia de carbonatos, fosfatos y nitratos se alojan *Fragilaria*, *Amphora*, *Cocconeis*, *Spirogyra*, *Tribonema*, entre otras. La presencia de Cianofitas y Diatomeas destaca en agua con carga mineral. En condiciones de acidez en el agua se presentan *Chlamydomonas acidophila*, *Euglena mutabilis*, *Stichococcus*, etcétera (Gómez, 2007).

El aumento de toxinas de alga en la red de suministro ocasiona enfermedades en los consumidores, e incluso hasta la muerte (Abdel 2015).

La clasificación de microalgas es la siguiente:

- Euglenoideas, las cuales presentan flagelos y habitan en agua dulce, un ejemplo es la *Euglena*.
- Clorofitas, también conocidas como algas verdes, mismas que cuentan con abundante clorofila y se presentan en organismos unicelulares y pluricelulares, por ejemplo: *Chlorella*, *Oocystis* y *Scenedesmus*.
- Cianobacterias, también conocidas como algas verde – azuladas, son organismos procariotas de reproducción sexual que no cuentan con membranas internas, por ejemplo: *Microcystis*, *Anabaena* y *Spirulina*.
- Estramenopilas fotosintéticas, las cuales se presentan en una amplia variedad morfológica y un ejemplo de ellas es la *Vancheria*.
- Rhodophytes, también conocidas como algas rojas, tal como su nombre lo menciona tienen pigmentos rojos, habitan en aguas marinas y son organismos unicelulares filamentosas, un ejemplo es *Laurencia*.
- Dinoflageladas, son células flageladas móviles con una ranura transversal, por ejemplo, *Gymnodirium*.
- Cryptophytes, son organismos unicelulares, flageladas con células aplanadas, por ejemplo: *Cryptomonas* y *Chroomonas*.
- Haptofitas, son organismos unicelulares y existen flageladas y no flageladas, por ejemplo, *Coccolithophore*.
- Cloraracniofitas, son organismos unicelulares que habitan en aguas marinas, como por ejemplo: *Lotharella amoebiformis* y *Bigelowiella longifila*.
- Glaucofitas, son organismos unicelulares de reproducción sexual que habitan en agua dulce, por ejemplo *Cyanophora paradoxa* (Barrado, 2016).

El crecimiento de las algas obedece a una curva de cinco fases en el tiempo cuya duración depende directamente de factores como la temperatura, fuente de luz, características de las microalgas, entre otras. Las fases se enlistan a continuación (Barrado, 2016):

- Fase de inducción o latencia, con una duración que oscila entre 1 y 3 días, las células recién inoculan un nuevo medio por lo que no existe replicación de ADN (Bustamante 2018).
- Fase exponencial, se registra cuando las células se adaptan al medio y se produce un aumento en la velocidad de crecimiento exponencial (Bustamante 2018).
- Fase de declinamiento del crecimiento, se caracteriza por el cambio de velocidad de crecimiento de las células y en ella se muestra el valor de crecimiento máximo (Bustamante 2018).
- Fase estacionaria, es un fenómeno que en ciertas ocasiones es apenas perceptible y corresponde a un equilibrio en la cantidad de microalgas al agotar los nutrientes de la fuente (Bustamante 2018).
- Fase de muerte, factores como bacterias, hongos y espumas ocasionan un declive en la curva tras la muerte de células (Bustamante 2018).

En la figura 7 se representa de manera gráfica el comportamiento antes descrito.

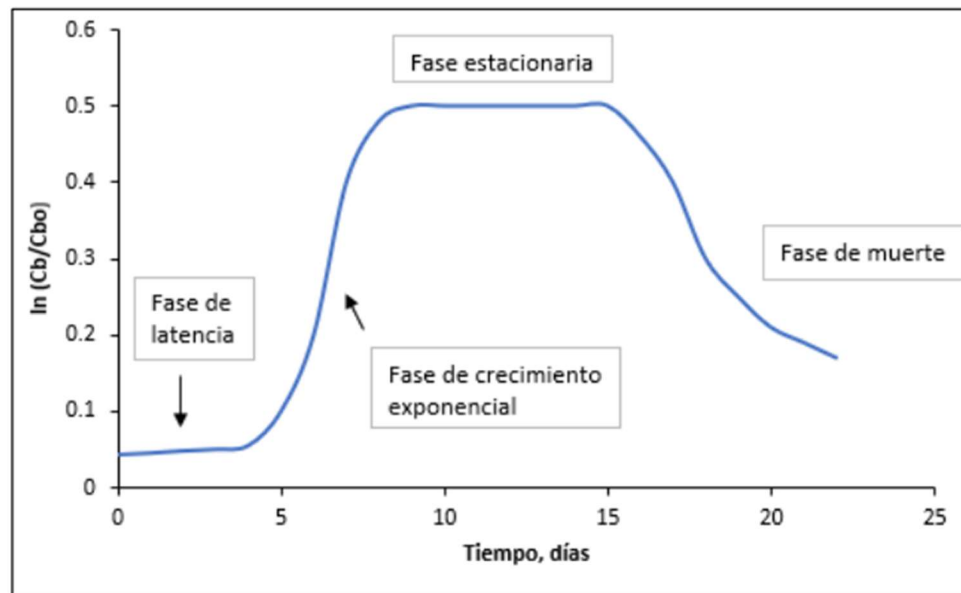
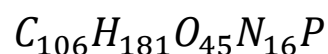


Figura 7. Crecimiento celular en discontinuo (Bustamante 2018).

Grobbelaar 2004, nos dice que la fórmula general de la composición de microalgas es la siguiente:



Lo que quiere decir que por cada kilogramo de microalga se tendrán 523.9 g de Carbono, 74.5 g de Oxígeno, 92.2 g de Nitrógeno y 12.76 g de fósforo (Bustamante 2018).

4.2 Problemas en sistemas de potabilización por microalgas

La presencia de algas perturba los procesos de tratamiento de agua, alterando la calidad de ésta. En los procesos de potabilización se saturan las mallas y filtros de arena, sin embargo, debido a su tamaño, cierto volumen tiene la capacidad de pasar los filtros sin ser retenido. La eliminación de algas se prefiere que se realice desde etapas tempranas del tratamiento ya que producen materia orgánica extracelular que demanda una mayor cantidad de coagulantes e intervienen de manera negativa en la desinfección final (Abdel 2015; Ghernaout et al. 2020).

Otro problema observado con el grupo de algas de las cianobacterias es la producción de toxinas, mismas que representan un riesgo para salud del consumidor (Rojo, 2006).

La presencia de materia orgánica natural, producto de las algas y que está constituida por sustancias húmicas tienen una reacción ante oxidantes y desinfectantes utilizados en la potabilización, en especial con el Cloro. (Ghernaout 2014). Los subproductos obtenidos de estas reacciones son trihalometanos alifáticos halogenados, ácidos halo acéticos, haloacetoneitrilos, halocetonas y el tricloronitrometano. Los cuales resultan tóxicos (Sillanpa et al. 2017).

El proceso más recurrido en la eliminación de algas es la coagulación – floculación que, mediante la desestabilización de partículas, remueve los sólidos en suspensión que varían de 0.001 μm a 10 μm de tamaño, reduciendo las toxinas solubles asociadas. El proceso se complementa con sedimentación o flotación según sea el caso, y con filtración. En el caso de que la remoción no sea eficaz por coagulación química, se mejora con la adición de ozono, dióxido de cloro, cloro o permanganato en un proceso de pre – oxidación, que tiene consecuencias como la liberación de toxinas de alga o materia orgánica debido a la destrucción de su membrana y cianobacterias. (Abdel 2015).

Más del 95% de las algas se remueven por coagulación – floculación, el restante corresponde a la materia orgánica de las algas y su remoción demanda procesos y operaciones unitarias adicionales (Ghernaout et al. 2020).

Los parámetros que influyen en la coagulación – floculación son el tipo de coagulante seleccionado, el cual puede ser una sal metálica o polímeros y la dosis que se suministre, la cual deberá de ser la óptima, donde se tenga un rendimiento máximo, ya que en el caso de sobre dosificar el coagulante, los coloides se reestabilizan y la coagulación se reduce en eficiencia. Por parte del agua intervienen características físico – químicas como pH (el valor óptimo para la coagulación con alumbre y bases férricas es de 5-6 y 4.5-6 respectivamente), alcalinidad, turbidez, temperatura, materia orgánica, entre otras. Durante el proceso se deben realizar dos tipos de mezcla (rápida y lenta) mismas que garantizan la formación de flóculos (Gheraout et al. 2020; Lou et al. 2012).

La composición variable de la materia orgánica ocasiona que la fracción hidrofóbica tenga una densidad de carga más alta que la hidrofílica y el proceso convencional no logre removerla en su totalidad, por lo que se recurre a un proceso de coagulación mejorado, donde se aplican mayores cantidades de coagulantes en un pH ácido (Sillanpa 2017).

El uso excesivo de coagulantes, además de repercutir en altos costos del reactivo y la permanencia de metales y polímeros residuales, se produce un gran volumen de lodos, por lo que debe considerarse la disposición de estos (Sillanpa 2017).

De acuerdo con Rojo 2006, la pre ozonación en conjunto con la flotación utilizando el cloruro de hierro, logra una remoción que asciende al 90% de las algas presentes teniendo como principales ventajas la reducción en la dosificación de coagulantes en procesos siguientes, elimina turbiedad del agua en niveles no mayores a 1.5 UNT, remueve por completo los minerales presentes al igual que el carbón orgánico, y por medio de absorción y biodegradación se eliminan los microcontaminantes orgánicos.

V. METODOLOGÍA

5.1 Localización y entorno.

Con ayuda de la herramienta de cómputo Google Earth se define un polígono que potencialmente abarca la laguna de Xico y la microcuenca a la que pertenece, representado en la figura 8.

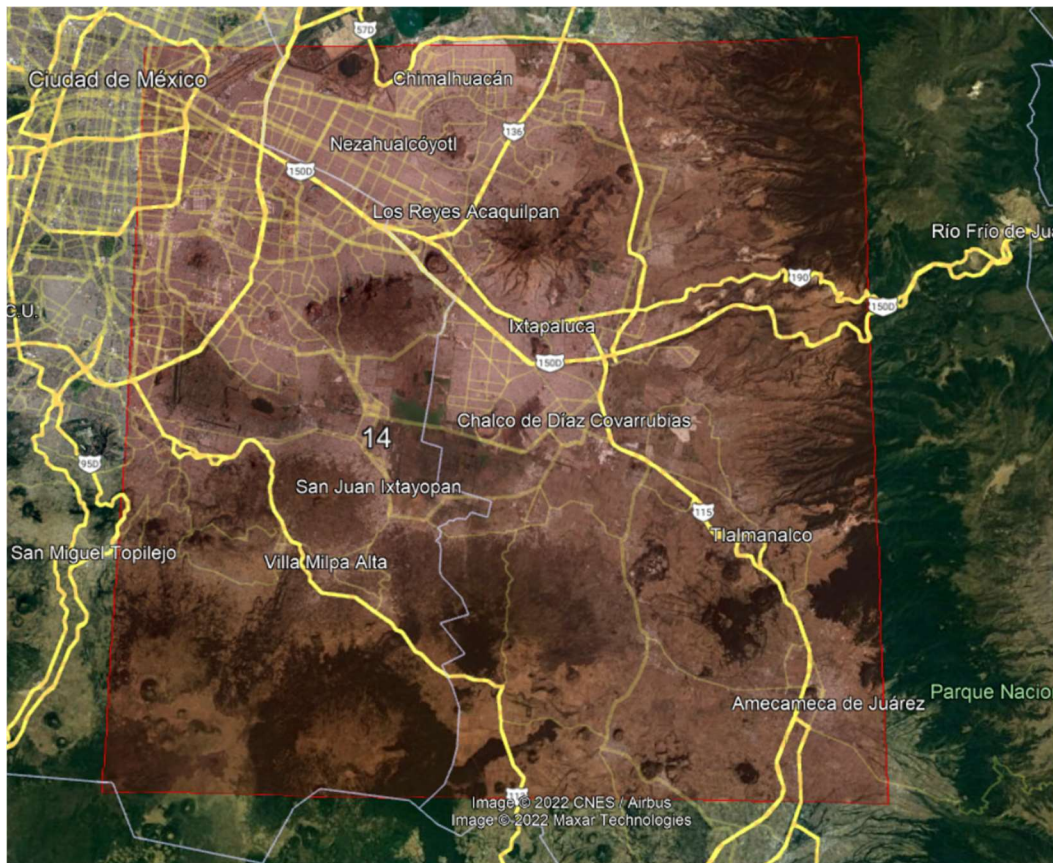


Figura 8. Polígono base. Google Earth.

EN la figura 9 se representa un análisis mediante el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL), Sistema de Información Geográfica donde se obtienen los datos correspondientes a la subcuenca L Texcoco y Zumpango (RH26Dp), la cual tiene contenida el área de interés.



Figura 9. Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas.

En la figura 10 se muestra la región hidrológica a la que pertenece la Laguna de Xico.



Figura 10. Región hidrológica 26Dp L. Texcoco y Zumpango. QGIS 3.26.3. Elaboración propia

Se obtiene la red de drenaje a partir de la información previamente obtenida del SIATL y se presenta en la figura 11.

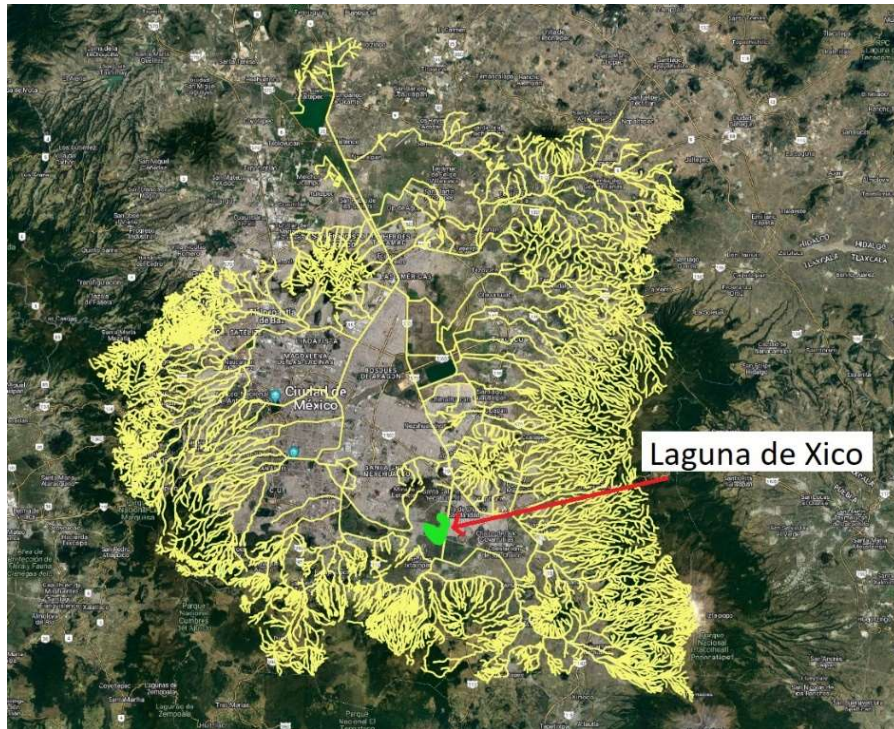


Figura 11. Red de drenaje RH26Dp. QGIS 3.26.3. Elaboración propia

Del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) se obtuvo información relevante para la realización del modelo digital de elevaciones. Se delimitó un polígono que contiene el área de interés como lo muestra la figura 12.

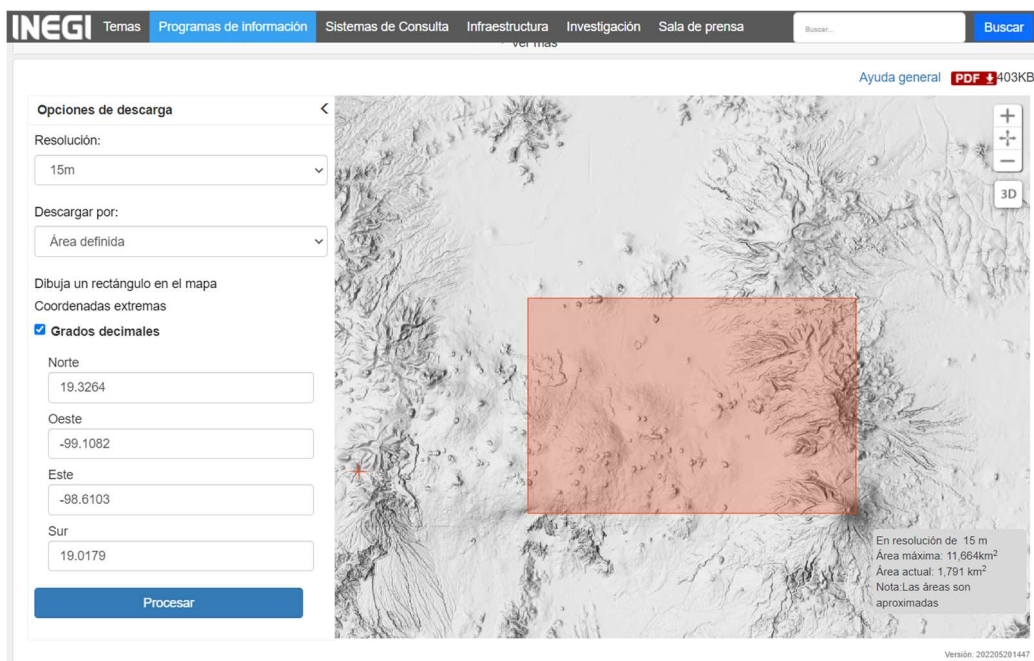


Figura 12. Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). INEGI.

Se importa la capa correspondiente a las elevaciones al Sistema de Información Geográfica correspondiente obteniendo como resultado lo mostrado en la figura 13.

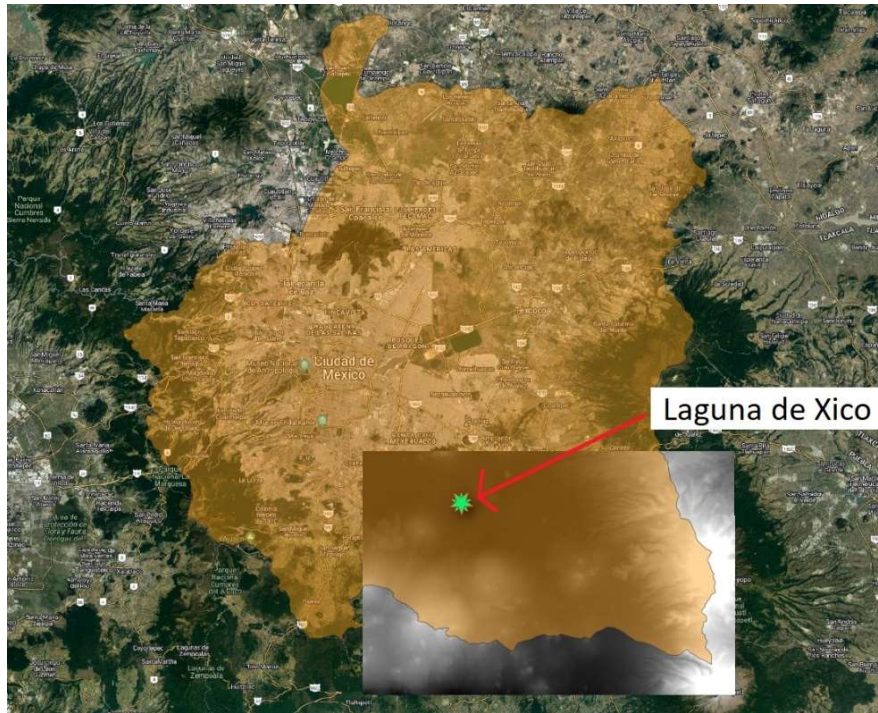


Figura 13. Elevaciones del área de estudio Fuente CEM.

Antes de delimitar la subcuenca es importante corregir el modelo digital de elevaciones por medio de la herramienta Fill Sinks XXL de QGIS 3.26.3. La figura 14 muestra la capa corregida. Posteriormente se obtendrá una capa de segmento de transmisión y dirección de drenaje.

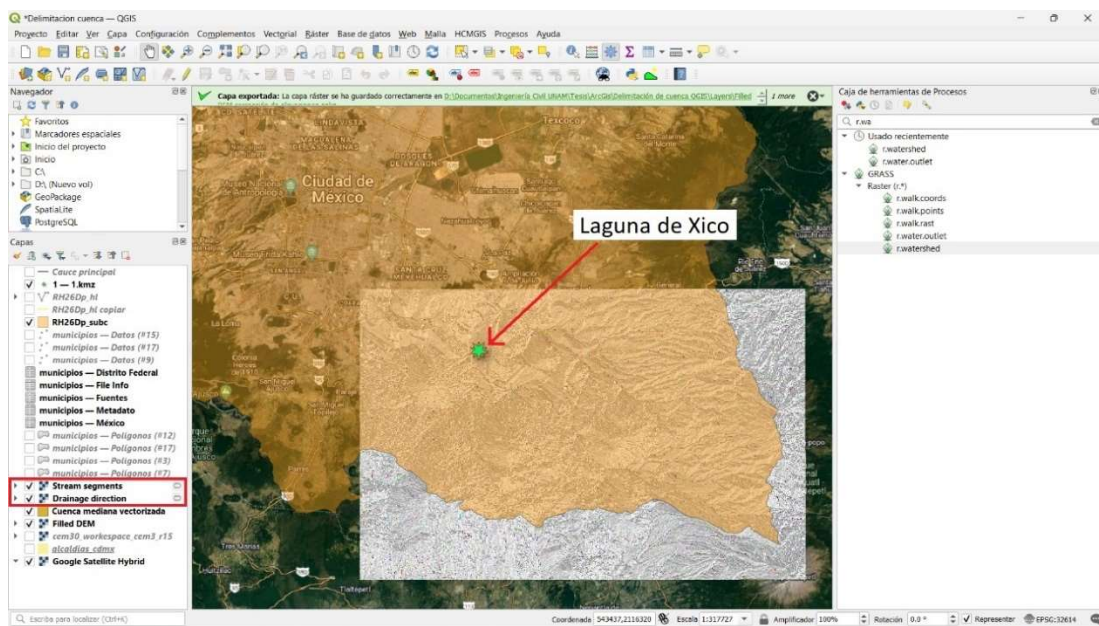


Figura 14. Stream Segments and Drainage directions. Fuente Elaboración propia

Con la función r.water.outlet se obtiene la microcuenca a la que pertenece la laguna de Xico, figura 15.



Figura 15. R.water.outlet. Fuente elaboración propia.

Resulta de gran importancia el conocer las alcaldías que se concentran en el área de estudio y realizar un análisis de datos estadísticos proporcionados por INEGI, el cual dará un panorama de la situación actual de la zona, los resultados se muestran en la figura 16.

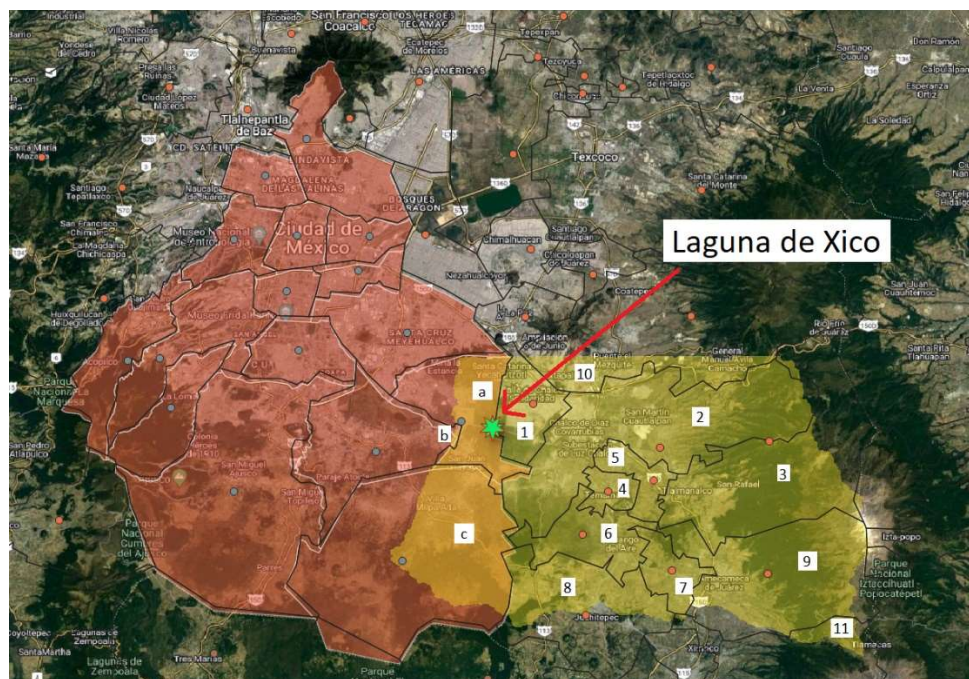


Figura 16. Alcaldías y municipios que comprenden la microcuenca de estudio. Fuente elaboración propia.

Municipios del estado de México:

- 1- Valle de Chalco
- 2- Chalco
- 3- Tlalmanalco
- 4- Temamatla
- 5- Cocotitlán
- 6- Tenango del aire
- 7- Ayapango
- 8- Juchitepec

9- Amecameca

10- Ixtapaluca

11- Atlautla

Alcaldías de la CDMX:

a- Tláhuac

b- Xochimilco

c- Milpa Alta

Una vez delimitada la zona, se ubican las estaciones que intervienen por medio de la Base de Datos Climatológica Nacional (CLICOM) y con información proporcionada por ésta, y haciendo uso del método de polígonos de Thiessen, se define el área de influencia de cada estación y su ponderación respectivamente. Lo anterior se presenta en la figura 17.

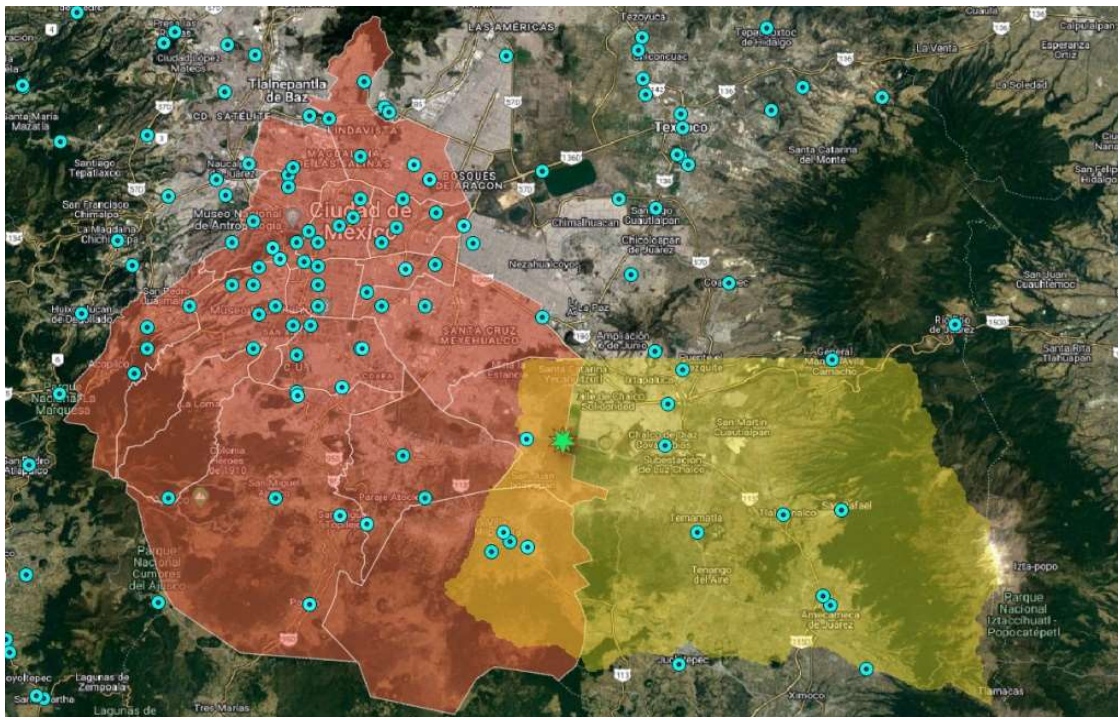


Figura 17. Estaciones climatológicas en CDMX y Estado de México.

Se clasifican aquellas estaciones que influyen en el área de estudio. La figura 18 muestra cada una de ellas, indicando si se encuentran actualmente operando o se mantienen suspendidas.

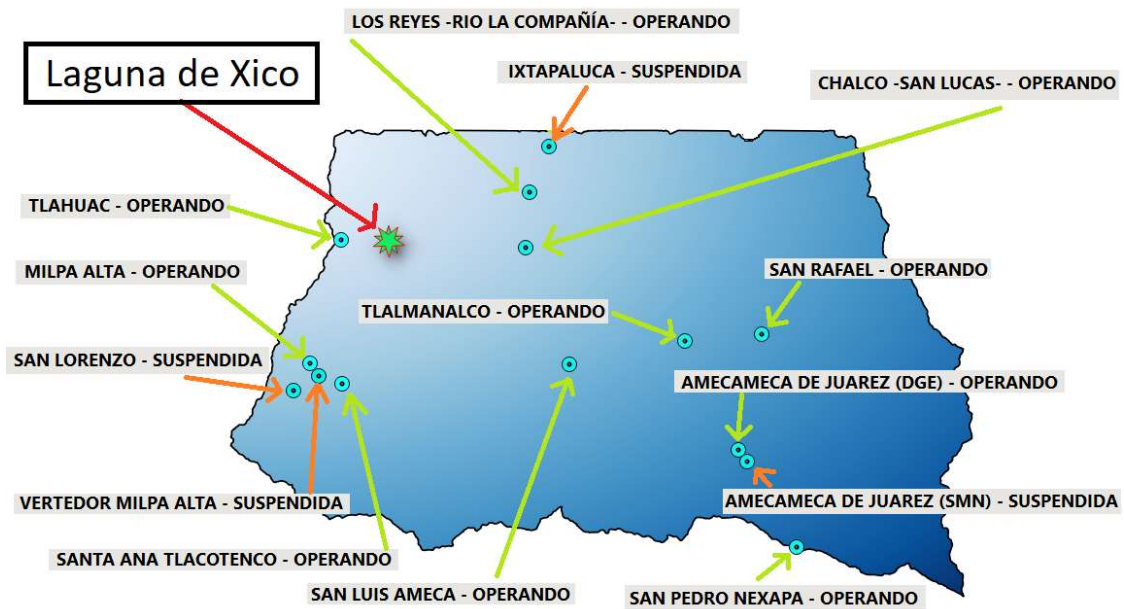


Figura 18. Estaciones climatológicas microcuenca Chalco – Amecameca. Fuente elaboración propia.

Se descarga la información de climatología diaria de cada una de las estaciones y se obtiene la precipitación media. La figura 19 muestra la precipitación media de cada estación. El desarrollo de cada cálculo se adjunta en los anexos.

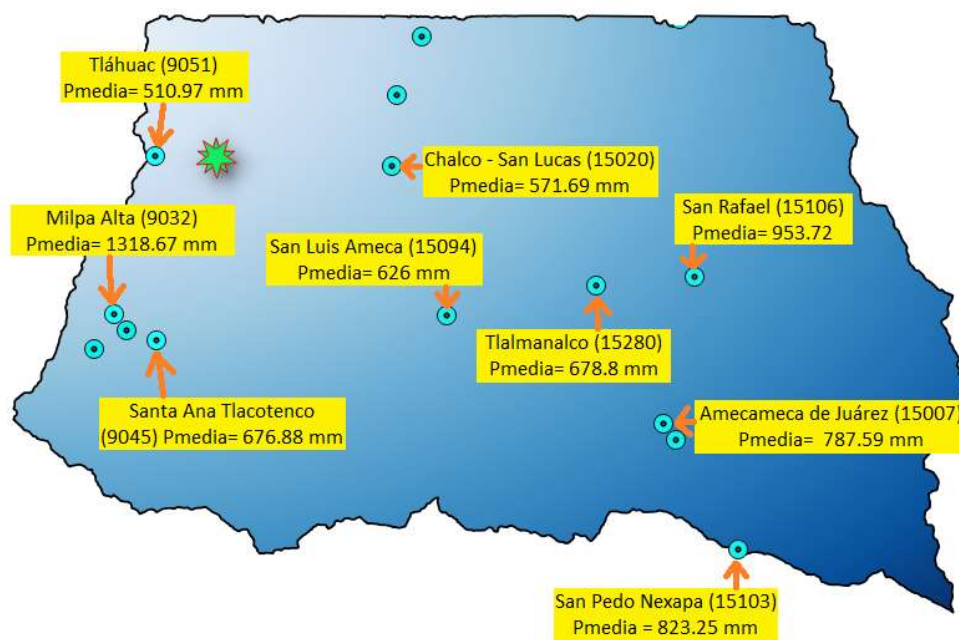


Figura 19. Precipitación media de las estaciones climatológicas de interés. Fuente elaboración propia.

Se clasificarán las zonas de acuerdo con el uso de suelo que la normatividad establece con el propósito de conocer el nivel de consumo, en especial la dotación de agua potable que se demanda en los alrededores y proyectar la población beneficiada.

Para la obtención del coeficiente de escurrimiento se considera de 0.15 de acuerdo con (Aparicio, 1992):

Con esto se determina la precipitación media, y finalmente, es posible obtener un gasto promedio anual para la cuenca de interés, siendo de 289 L/s. Este dato es de suma importancia ya que es la base para el diseño y dimensionamiento del tren de tratamiento.

TIPO DEL ÁREA DRENADA	COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO	
	MÍNIMO	MÁXIMO
ZONAS COMERCIALES:		
Zona comercial	0.70	0.95
Vecindarios	0.50	0.70
ZONAS RESIDENCIALES:		
Unifamiliares	0.30	0.50
Multifamiliares, espaciados	0.40	0.60
Multifamiliares, compactos	0.60	0.75
Semiurbanas	0.25	0.40
Casas habitación	0.50	0.70
ZONAS INDUSTRIALES:		
Espaciado	0.50	0.80
Compacto	0.60	0.90
CEMENTERIOS, PARQUES	0.10	0.25
CAMPOS DE JUEGO	0.20	0.35
PATIOS DE FERROCARRIL	0.20	0.40
ZONAS SUBURBANAS	0.10	0.30
CALLES:		
Asfaltadas	0.70	0.95
De concreto hidráulico	0.70	0.95
Adoquinadas	0.70	0.85
ESTACIONAMIENTOS	0.75	0.85
TECHADOS	0.75	0.95
PRADERAS:		
Suelos arenosos planos (pendientes 0.02 o menos)	0.05	0.10
Suelos arenosos con pendientes medias (0.02-0.07)	0.10	0.15
Suelos arenosos escarpados (0.07 o más)	0.15	0.20
Suelos arcillosos planos (0.02 o menos)	0.13	0.17
Suelos arcillosos con pendientes medias (0.02-0.07)	0.18	0.22
Suelos arcillosos escarpados (0.07 o más)	0.25	0.35

Tabla 11. Valores de coeficiente de escurrimiento. (Aparicio, 1992).

5.2 Sitios de Muestreo

Se realizaron dos muestreos simples, el primero en temporada de estiaje (12/02/2020 - 14/03/2020) y el segundo en temporada de lluvias, en el mes de agosto de 2021, haciendo uso de contenedores de 10 litros en 4 puntos estratégicos del lago de Xico a una profundidad de 50 cm, procurando evitar sedimentos o polvo y registrando de inmediato la temperatura de la muestra.

5.3 Calidad del Agua de la Laguna de Xico

SACMEX proporciona la caracterización de una muestra de agua tomada del 8 de agosto al 30 de septiembre de 2019 en la laguna de Xico a nivel superficial, 50 cm y 150 cm de profundidad. Con base en ella se compara contra la normatividad aplicable en calidad de agua para consumo humano y de acuerdo con los contaminantes cuya concentración exceda los límites máximos permisibles, se hará la propuesta de tren, mismo que debe ser evaluado en pruebas experimentales de laboratorio (prueba de jarras). En la tabla 12 se enlista la normatividad aplicable (mediciones y determinaciones para cada parámetro).

Normatividad	Descripción
NMX-AA-014-1980	Cuerpos receptores.- muestreo
NOM-127-SSA1-2021	Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.
NMX-AA-004-SCFI-2013	Análisis de agua – medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba.
NMX-AA-007-SCFI-2013	Análisis de agua – medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba.
NMX-AA-008-SCFI-2016	Análisis de agua.- medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.- método de prueba.
NMX-AA-017-1980	Aguas. - determinación de color
NMX-AA-038-SCFI-2001	Análisis de agua - determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba

NMX-AA-093-SCFI-2000	Análisis de agua - determinación de la conductividad electrolítica - método de prueba
NMX-AA-122-SCFI-2006	Potabilización del agua para uso y consumo humano – sulfato de aluminio – especificaciones y métodos de prueba
NMX-AA-123-SCFI-2006	Potabilización del agua para uso y consumo humano – óxido e hidróxido de calcio – especificaciones y métodos de prueba
NMX-AA-129-SCFI-2006	Potabilización del agua para uso y consumo humano – cloruro férrico – especificaciones y métodos de prueba

Tabla 12. Normas Mexicanas referentes a calidad del agua.

5.4 Pruebas de tratabilidad

En función de los contaminantes presentes en el agua se proponen procesos y operaciones unitarias adecuados para la remoción de estos. Para clarificar el agua se propone ablandamiento adicionando Hidróxido de Calcio y se realizan pruebas de precipitación química.

Para la turbiedad y sólidos suspendidos se realiza coagulación – floculación con sales metálicas a diferentes dosis, con la intención de determinar aquella donde la remoción es óptima. Se realizaron pruebas con y sin ajuste de pH.

De acuerdo con la teoría, una fracción de la materia orgánica prevalece después de los procesos anteriores, por lo que se filtrará la muestra con carbón activado.

VI. RESULTADOS.

6.1 Localización y entorno

La microcuenca a la que pertenece la laguna de Xico se muestra en la figura 20.

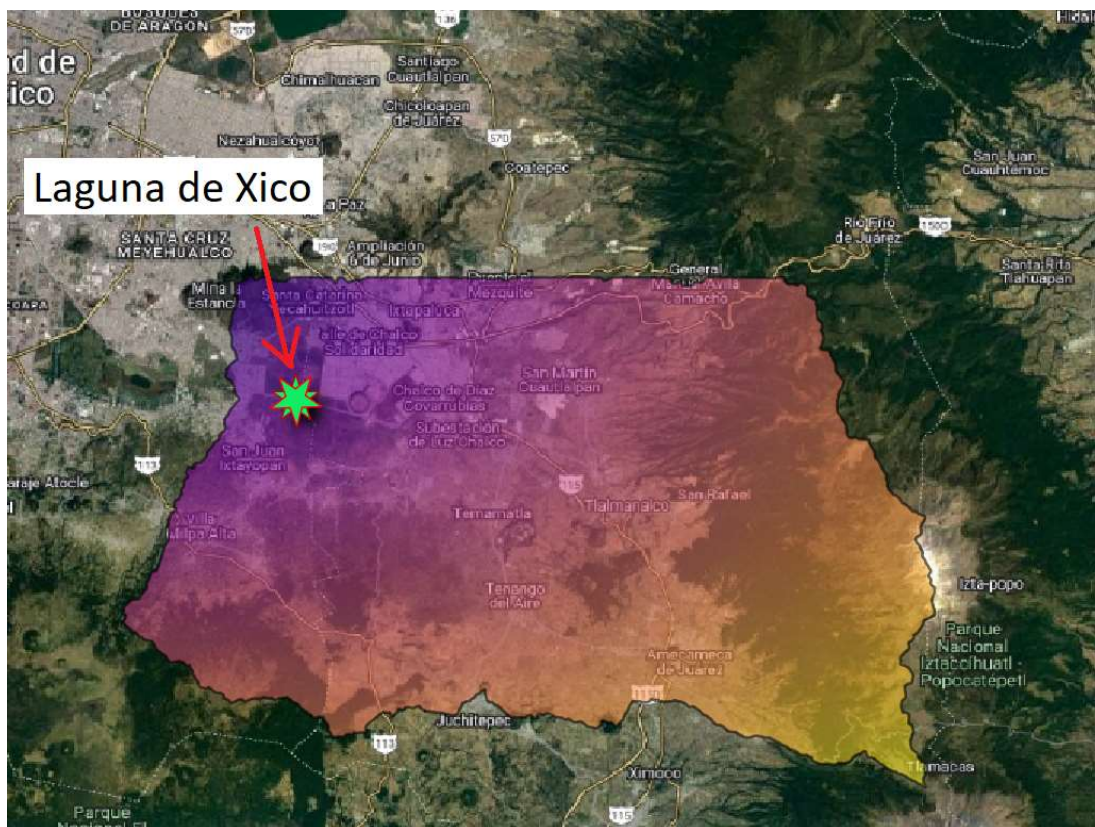


Figura 20. Microcuenca Chalco – Amecameca. Fuente elaboración propia.

Sus propiedades se resumen en la tabla 13.

Propiedad	Valor	Unidad
Área	100,608.64	Hectáreas
Longitud parteaguas	170.529	kilómetros
Longitud cauce principal	51.84	kilómetros
Orden de la microcuenca	5	

Tabla 13. Propiedades microcuenca Chalco - Amecameca

El perfil de elevaciones del cauce principal se presenta en el gráfico de la figura 21, tomando como punto de inicio la descarga en la laguna de Xico.

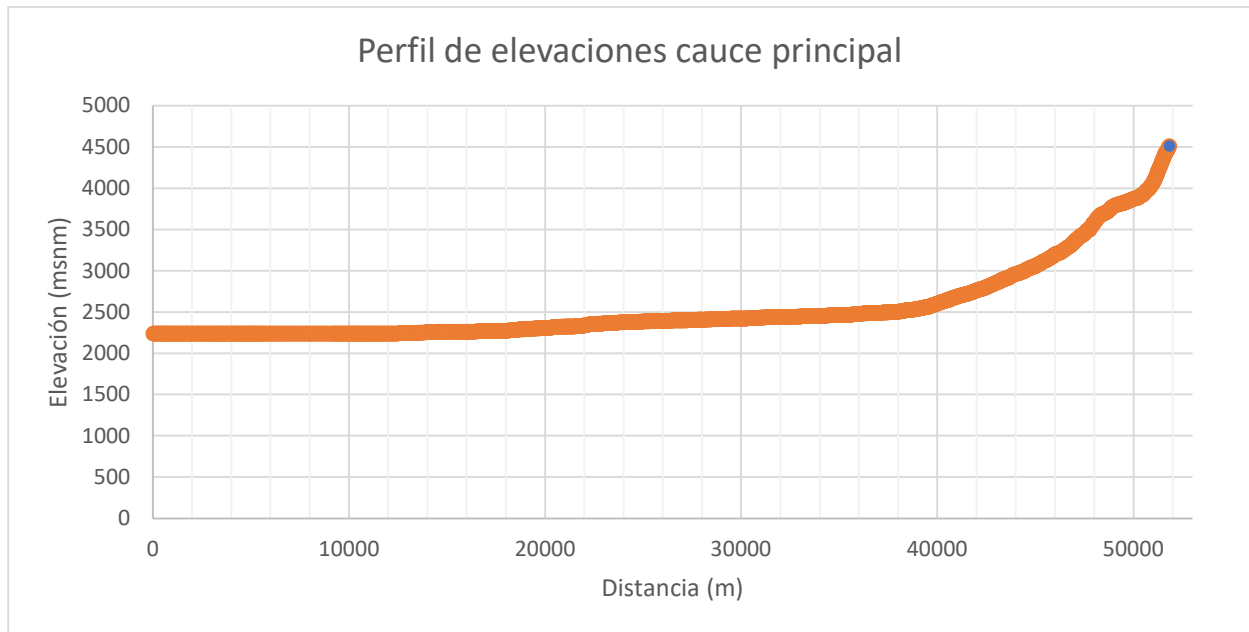


Figura 21. Perfil de elevaciones del cauce principal. Fuente elaboración propia

El uso de suelo y vegetación de la microcuenca se resume en la figura 22, de acuerdo con Morales (2018).

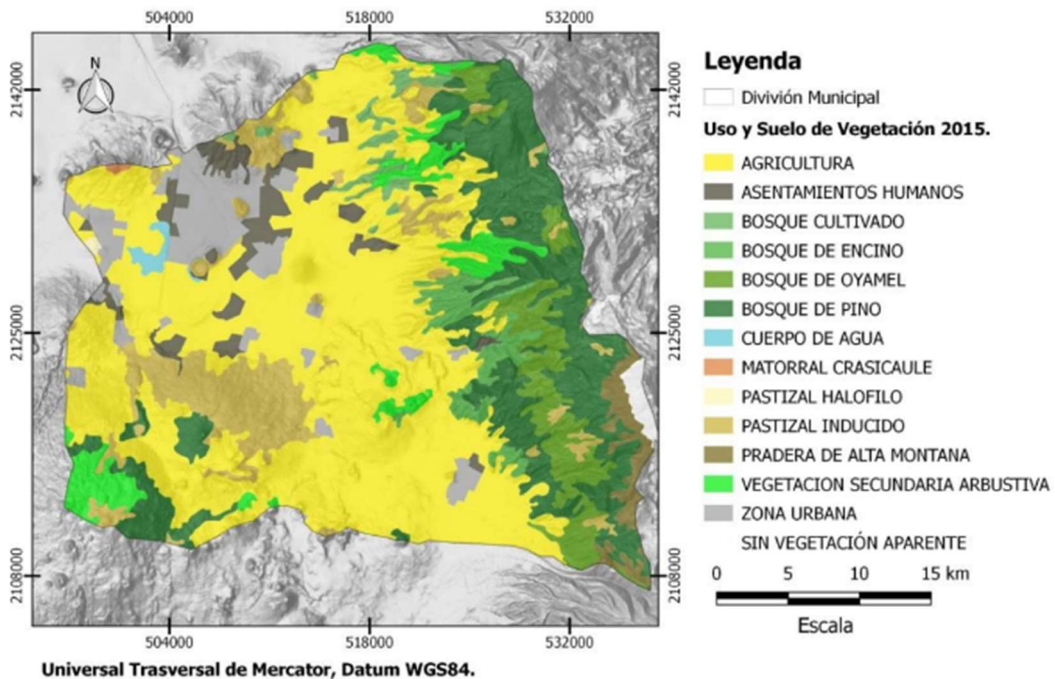


Figura 22. Uso de suelo Microcuenca Chalco – Amecameca. (Morales 2018).

6.2 Sitios de Muestreo

La figura 23 muestra los sitios de muestreo.



Figura 23. Localización de los puntos de muestreo en la Laguna de Xico. Google Earth.

Se obtuvieron muestras representativas que servirán para realizar las pruebas de potabilización en el laboratorio.

Durante el recorrido a pie, se observaron especies animales como patos canadienses o vacas, además de vegetación hidrófita de flotación libre y halófitas emergentes presentes en la orilla de la laguna de acuerdo con el nivel de agua variable en función de la temporada climática, figura 24 y 25 (Facultad de ingeniería. 2020).



Figura 24. Fauna establecida a orillas de la laguna de Xico.



Figura 25. Laguna de Xico.

Existen descargas de aguas residuales y presencia de residuos sólidos urbanos provenientes de construcciones ribereñas, capturados en fotografía en la figura 26.



Figura 26. Fuentes de contaminación de la laguna de Xico.

Se aprecia un agua con tonalidad verde ocasionada principalmente por la presencia de microalgas en concentraciones altas, figura 27.



Figura 27. Tonalidad del agua de la laguna de Xico.

6.3 Calidad del Agua de la Laguna de Xico

De acuerdo con SACMEX y la calidad del agua presentada en un muestreo realizado del 8 de agosto al 30 de septiembre de 2019 se tienen las propiedades físico – químicas del agua y contaminantes presentes, mostrados en la tabla 14.

Parámetros	NOM 127-SSA1-1994	Promedio	Unidad
Dureza total	500	442.3	mg/L CaCO ₃
Cloruros	250	431.25	mg/L
Fluoruros	1.5	0.55	mg/L
Sulfatos	400	512.39	mg/L
Sólidos disueltos totales	1000	2404.47	mg/L
Nitrógeno total	-	48.63	mg/L
Nitrógeno orgánico	-	48.4	mg/L
Nitrógeno amoniacal	0.5	2.8	mg/L
Nitrógeno de nitratos	10	1.33	mg/L
Nitrógeno de nitritos	1	0.01	mg/L
Sodio total	200	476	mg/L
Fierro total	0.3	4.9	mg/L
Manganeso total	0.15	0.28	mg/L
Plomo total	0.01	0.22	mg/L
Cadmio total	0.005	0.05	mg/L
Cromo total	0.05	0.2	mg/L
Zinc total	5	0.25	mg/L
Cobre total	2	0.17	mg/L
Aluminio total	0.2	11.43	mg/L
Plata total	0.1	0.1	mg/L
Coliformes totales	0	1358.95	UFC/100mL
Coliformes fecales	0	1014.9	UFC/100mL
SAAM	0.5	1.51	mg/L
pH	8.5	9.69	UpH
Color	20	201.01	Upt/Co
Turbidez	5	316.57	UTN

Tabla 14. Calidad de agua de Laguna de Xico y NOM-127-SSA1-1994.

Aquellos parámetros que exceden los límites máximos permisibles establecidos por la normatividad aplicable se resaltaron en color naranja (sodio, cloruros, sólidos disueltos, metales pesados, etc.) Con base en ellos se propone el tren de tratamiento que ofrezca su remoción de la manera más eficaz y eficiente posible.

6.4 Pruebas de tratabilidad

Al inicio de las pruebas el agua presenta las características de la tabla 15:

Propiedad	Valor	Unidad
pH	9.43	UpH
Conductividad	2.66	mS/cm
Temperatura	22	°C
Turbiedad	379	NTU

Tabla 15. Características iniciales del agua, primera experimentación.

Tras llevar a cabo el proceso de ablandamiento y precipitación química mediante Hidróxido de Calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a una concentración de 2 g/L en vasos de precipitado con 750 ml de agua cruda, se logra una reducción considerable en la turbiedad (figura 28).

La mezcla se llevó en el siguiente orden:

- 100 rpm → 1 minuto
- 30 rpm → 5 minutos
- 10 rpm → 10 minutos
- Sedimentación → 15 minutos

Se obtienen los parámetros después del ablandamiento (tabla 16):

Prueba	pH	Turbiedad (NTU)	Conductividad (mS/cm)	Volumen de lodos (ml)	Cal (ml)
A	12.32	36.1	5.44	100	150
B	11.39	291	2136	80	150
C	11.8	54.6	2.31	100	150

Tabla 16. Propiedades del agua después del ablandamiento, primera experimentación.

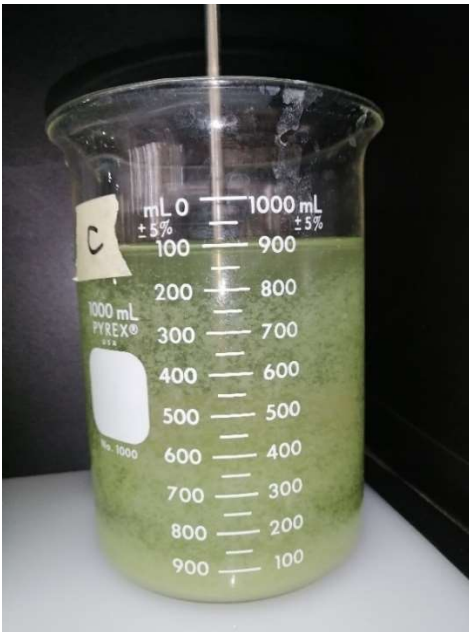
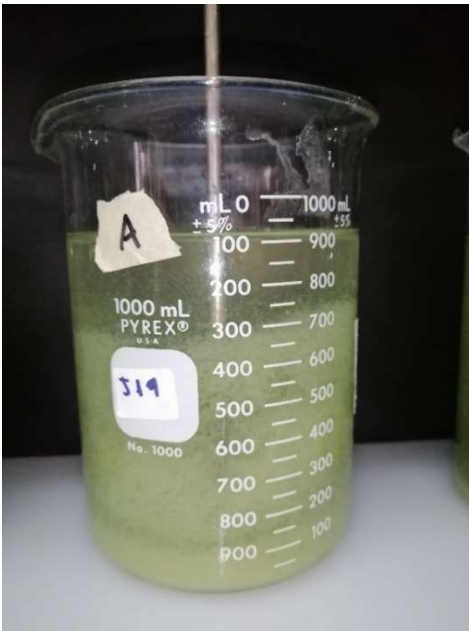


Figura 28. Pruebas de tratabilidad A, B y C

El agua clarificada se transvasa a vasos de precipitado etiquetados con las letras D, E y F los cuales contienen 500 ml de ésta. Se les dosifica una dosis distinta de Sulfato de Aluminio a cada uno y se obtienen los siguientes resultados (tabla 17 y figura 29).

Prueba	Dosis de $Al_2(SO_4)_3$	ml de $Al_2(SO_4)_3$	Conductividad (mS/cm)	Turbiedad (NTU)	pH	Volumen de lodos (ml)
D	20	2,0	5,34	36	12,16	0
E	30	3,0	2041	113	10,95	0
F	40	4,0	2,21	43	11,57	0

Tabla 17. Propiedades del agua clarificada, primera experimentación.



Figura 29. Pruebas de tratabilidad D, E y F.

La muestra D da un valor de turbiedad menor, por lo que se eligió para el siguiente paso de filtración por papel filtro. Finalmente se obtiene el resultado de tabla 18.

Prueba	Turbiedad (NTU)
D	4.19

Tabla 18. Muestra con menor turbiedad, primera experimentación.

En la figura 30 se muestra el proceso de filtrado y la muestra final obtenida tras esta operación unitaria.



Figura 30. Filtración y muestra final primer experimentación

Segunda experimentación (tabla 19).

Propiedad	Valor	Unidad
pH	9.29	UpH
Conductividad	2.64	mS/cm
Temperatura	21	°C
Turbiedad	700	NTU

Tabla 19. Características iniciales del agua, segunda experimentación

Tras llevar a cabo el proceso de ablandamiento y precipitación química mediante Hidróxido de Calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a una concentración de 2 g/L en vasos de precipitado con 750 ml de agua cruda, se logra una reducción considerable en la turbiedad, figura 31.

La mezcla se llevó en el siguiente orden:

- 100 rpm → 1 minuto
- 30 rpm → 5 minutos
- 10 rpm → 10 minutos
- Sedimentación → 15 minutos

Se obtienen los siguientes parámetros después del ablandamiento (tabla 20):

Prueba	pH	Turbiedad (NTU)	Conductividad (mS/cm)	Volumen de lodos (ml)	Cal (ml)
1	12.32	58.7	5.06	120	150
2	12.38	47.8	6.02	150	150
3	12.31	64.9	5.33	150	150

Tabla 20. Propiedades del agua después del ablandamiento, segunda experimentación.

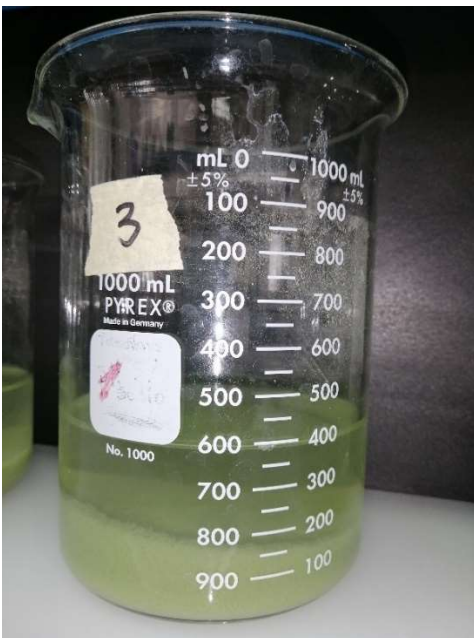
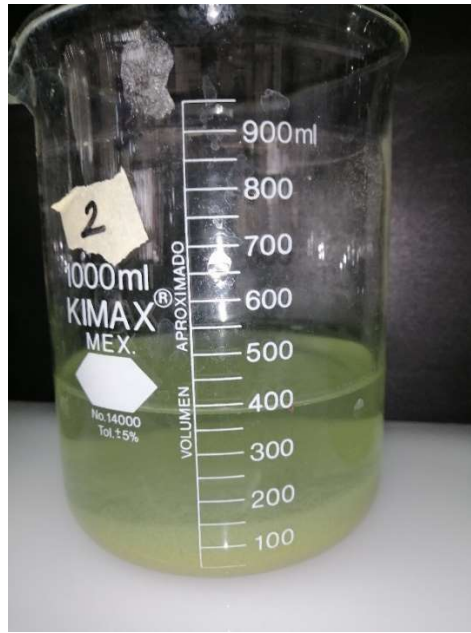


Figura 31. Pruebas de tratabilidad 1, 2 y 3.

El agua clarificada se transvasa a vasos de precipitado etiquetados con los números 4, 5 y 6 los cuales contienen 500 ml de ésta. Se les dosifica una dosis distinta de Sulfato de Aluminio a cada uno y se obtienen los resultados de la tabla 21 y figura 32.

Prueba	Dosis de $Al_2(SO_4)_3$	ml de $Al_2(SO_4)_3$	Conductividad (mS/cm)	Turbiedad (NTU)	pH	Volumen de lodos (ml)
4	20	2,0	4.89	53	12,09	0
5	30	3,0	5.71	43.5	12.15	0
6	40	4,0	5.09	46.3	12.08	0

Tabla 21 . Propiedades del agua clarificada, segunda experimentación.



Figura 32. Pruebas de tratabilidad 4, 5 y 6.

La muestra 5 da un valor de turbiedad menor, por lo que se eligió para el siguiente paso de filtración por papel filtro. Finalmente se obtiene el resultado mostrado en la tabla 22.

Prueba	Turbiedad (NTU)
5	5.75

Tabla 22. Muestra con menor turbiedad, segunda experimentación.

En la figura 33 se muestra el proceso de filtración de la muestra.



Figura 33. Filtración segunda experimentación.

6.5 Propuesta de tren de tratamiento

Con el fin de satisfacer el caudal de 289 L/s, se proponen tres trenes de potabilización de 120 L/s para satisfacer la oferta de agua durante la época de lluvias, teniendo la opción de clonarse e incrementar la capacidad del sistema.

El tren de tratamiento consta de un tanque mezclador como unidad de ablandamiento donde se adicione el Hidróxido de Calcio, un sedimentador primario para la precipitación química del agua, un coagulador-floculador

donde se agregue el sulfato de aluminio, un sedimentador secundario, un filtro para los flocúlos formados y una unidad para el ajuste de pH. Se incorporan intercambiadores catiónico y aniónico para los sólidos disueltos que no precipiten y la adición de cloro para que tenga un efecto residual. La figura 34 muestra los procesos antes mencionados en un diagrama que facilita su comprensión. La memoria de cálculo de las dosificaciones mostradas en la figura se adjunta en anexos.

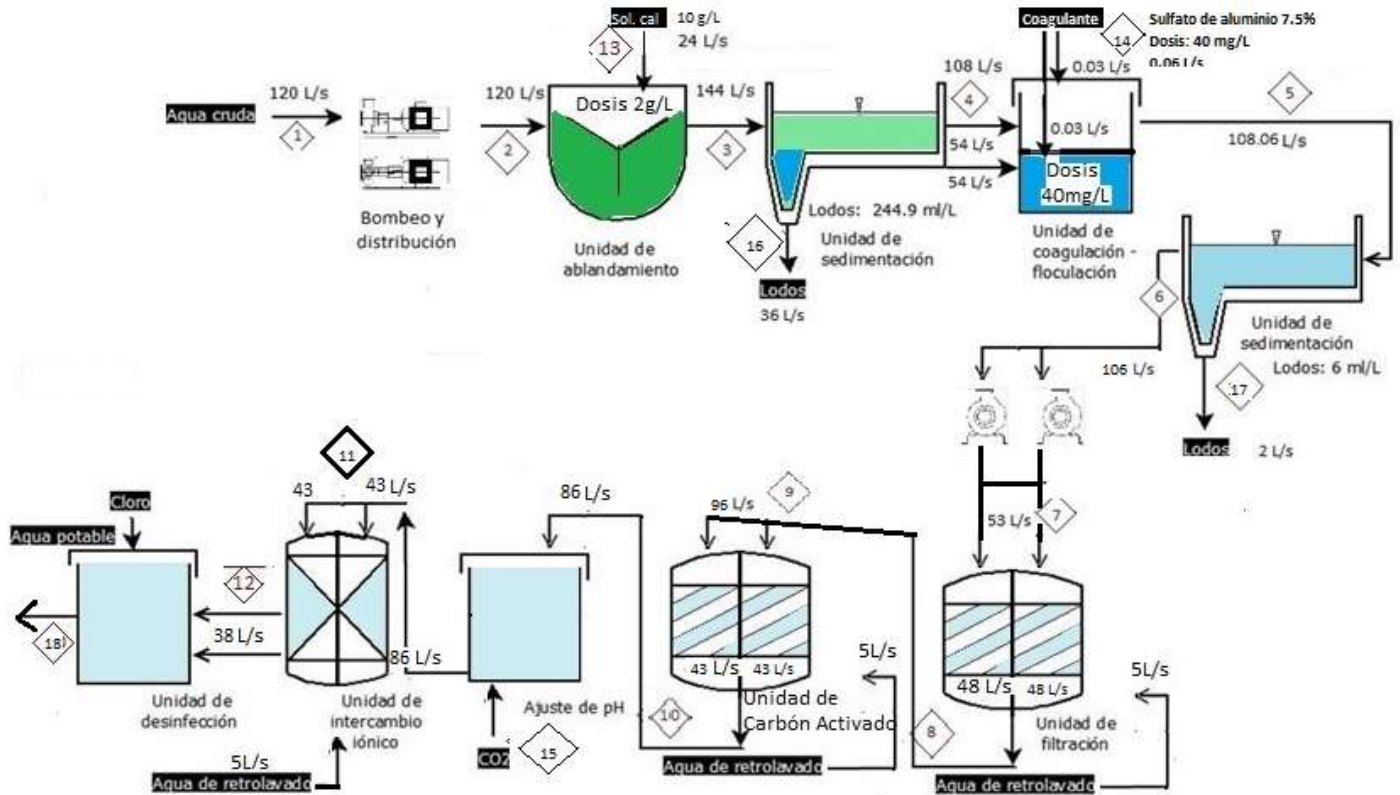


Figura 34. Diagrama de flujo del tren de tratamiento de Laguna de Xico.

En la tabla 21 se muestra la evolución de la calidad del agua a través de los procesos y operaciones unitarias que conforman al tren de tratamiento, comparándolos con la NOM-127-SSA1-2021.

Parámetros	Unidad	Valor inicial	NOM -127-SSA1-2021	Ablandamiento	Coagulación - Flocculación / sedimentación	Filtración	Ajuste pH	Intercambio iónico	Desinfección
pH	UpH	9.69	8.5	12	12	12	8	8	8
Color	Upt/Co	201.01	15	45.4	15.9	8	8	8	4
Turbidez	UTN	316.57	4*	24.69	8.64	1.73	1.73	1.73	1.73
Alcalinidad total	mg/L (CaCO ₃)	862.37	NA	344.95	344.95	344.95	207	72.44	72.44
Dureza total	mg/L (CaCO ₃)	442.3	500	88.46	88.46	88.46	88.5	17.69	17.69
Sulfatos	mg/L	512.39	400	512.39	461.15	461.15	461.2	184.46	184.46
Sólidos suspendidos	mg/L	920.74	NA	460.37	161.13	32.23	32.2	32.23	32.23
Nitrógeno amoniacal	mg/L	2.8	0.5	0.84	0.84	0.84	0.8	0.28	0.28
Sodio total	mg/L	523.89	200	523.89	523.89	523.89	523.9	183.4	183.4
Fierro total	mg/L	4.9	0.3	4.9	0.98	0.49	0.49	0.1	0.1
Manganeso total	mg/L	0.28	0.15	0.08	0.08	0.05	0.05	0.02	0.02
Plomo total	mg/L	0.22	0.01	0.22	0.09	0.018	0.02	0.004	0.004
Cadmio total	mg/L	0.05	0.005	0.05	0.02	0.008	0.02	0.002	0.002
Cromo total	mg/L	0.2	0.05	0.2	0.1	0.1	0.1	0.04	0.04
Coliformes totales	UFC/100mL	1358.95	0	-	-	-	-	-	0.01
Coliformes fecales	UFC/100mL	1014.9	1	-	-	-	-	-	0.01
SAAM	mg/L	1.51	0.5	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
Cloro residual	mg/L	0	0.2 a 1.5						0.5-1.5

Tabla 23. Balance de masa con el tren de tratamiento propuesto.

* El límite permisible para Turbiedad será de 3.0 UNT a partir del segundo año posterior a la entrada en vigor de la presente Norma.

VII. CONCLUSIONES

De acuerdo con el desarrollo del proyecto se concluye lo siguiente:

1. Se determinó el tren de tratamiento para la remoción de microalgas utilizando un proceso unitario de ablandamiento con Hidróxido de Calcio en dosificaciones muy altas (2 g/L) y sedimentación, con lo que se logró la remoción de gran parte de la materia orgánica de la muestra de agua. El resto de las operaciones y procesos unitarios propuestos corresponden a un tren de tratamiento convencional, el cual garantiza la calidad de agua potable para uso y consumo humano que la NOM-127-SSA1-2021 establece con carácter obligatoria. Los análisis físico – químicos realizados en las muestras de agua son favorables al ser sometidos al tren de tratamiento propuesto.
2. Se calculó el área de captación y el volumen de escurrimiento por medio del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas, información proporcionada por el Continuo de Elevaciones Mexicano, datos de la Base de Datos Climatológica Nacional (CLICOM) y el software QGIS, registrando un área de captación de 100,608.64 hectáreas y un escurrimiento de 289 L/s. Por otro lado se obtuvieron variables de interés de la microcuenca tales como el perfil de elevaciones del cauce principal, longitud del parteaguas de 170.529 km, longitud del cauce principal de 51.84 km y el orden de la red de drenaje, siendo de orden 5. Esta última información se calculó mediante funciones del software QGIS.
3. Se determinó las operaciones y procesos unitarios para remover las microalgas, incluido el ablandamiento, utilizando Hidróxido de Calcio como reactivo para la precipitación química y la sedimentación. Resultado de ello se obtuvo una generación de lodos de 36 L/s.

Para la remoción de los demás contaminantes en el agua se propuso la coagulación – floculación con Sulfato de Aluminio, en un proceso unitario encargado en la desestabilización de la carga de partículas coloidales que no pueden sedimentar por gravedad, y que al tener carga superficial neta negativa se repelen. El coagulante neutraliza dicha carga superficial y fomenta la creación de flóculos de mayor tamaño que puedan depositarse por peso propio al fondo del tanque. Otra operación unitaria propuesta es la filtración simple y con carbón activado, material que cuenta con la porosidad necesaria para la adsorción de compuestos presentes en la muestra de agua. Para restituir el pH se propuso una torre de ajuste ya que tras el tratamiento previo el agua tiene un pH alcalino, por lo que se busca acidificarla. Para eliminar metales pesados se propuso una torre de intercambio iónico, y para eliminar agentes patógenos se propuso desinfección con Cloro que además tendrá un efecto residual en el transporte del agua a lo largo de la red de distribución hasta el consumidor final.

4. Se diseñó el tren de tratamiento que garantiza la calidad de agua para uso y consumo humano de acuerdo con la NOM-127-SSA1-2021, el cual consta de 5 procesos unitarios (unidad de ablandamiento, coagulación – floculación, ajuste de pH, intercambio iónico y desinfección), así como de 4 operaciones unitarias (sedimentador primario, secundario, filtro simple, y con carbón activado). Este tren de tratamiento permite tratar un caudal de 120 L/s y del que se tienen propuestas 3 unidades iguales. La generación de lodos, producto del tratamiento es de 250.9 ml/L.

VIII. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar una exploración física del área para confirmar que el drenaje corresponde al obtenido por medio de Sistemas de Información Geográfica, y que no existan desviaciones por infraestructura nueva como asentamientos urbanos, avenidas, entre otros. Se deben realizar ensayos en las estaciones meteorológicas para verificar que los registros proporcionen datos verídicos de precipitación.

Se sugiere repetir el muestreo en un intervalo entre la temporada de estiaje y de lluvias para garantizar que la propuesta de tratamiento es efectiva y funciona correctamente ante las posibles alteraciones en la calidad del agua. En la experimentación con estas muestras se recomienda realizar la detección de metales y compuestos orgánicos presentes.

Debido a la alta cantidad de lodos, producto de ciertos procesos unitarios, se recomienda añadir aquellos que se consideren necesarios para su manejo eficaz y eficiente. Es conveniente realizar un estudio de ellos para un correcto manejo y disposición.

Referencias

- Abdel et al. (2015). Control de algas y eliminación mejorada en aguas potables en El Cairo, Egipto. Facultad de Ciencias, Universidad Helwan.
- Aboites Aguilar, Luis. (2009^a). La decadencia del agua de la nación. Estudio sobre desigualdad social y cambio político en México. Segunda mitad del siglo XX, México, El Colegio de México.
- Aparicio, Francisco. (1992). Fundamentos de Hidrología de superficie. México D.F.: Editorial Limusa.
- Arreguín, F., Chávez, R. y Rosengaus, M. (2008). Impacto del cambio climático sobre los acuíferos mexicanos, 6° Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, Asociación Geohidrológica Mexicana, A. C., octubre
- Aurazo, M. (2004). Manual para análisis básicos de calidad del agua de bebida. Publicación 2. Lima, Perú.
- Barrado, M. (2016). Eliminación de microalgas de las aguas mediante métodos físicos y químicos. [Tesis doctoral]. Universidad de Extremadura.
- Bustamante, J. (2018). Diseño de una planta piloto para el crecimiento de microalgas heterótrofas. [Tesis de licenciatura]. Universidad de Valladolid.
- Charles, T., Herrera, I. (1995). El suministro de agua de la Ciudad de México. Washington, D.C
- CONAGUA. (2005). Sistema Cutzamala, agua para millones de mexicanos / Gerencia regional de aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala. México. <https://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/sistema-cutzamala.pdf>
- CONAGUA. (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, Diseño de plantas potabilizadoras tipo de tecnología simplificada. México DF. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro24.pdf>
- CONAGUA. (2018). Estadísticas del agua en México. https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- CONAGUA. (2019). Estadísticas del agua en México. https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM_2019.pdf
- Cortijo-Herrera, D. (2013). Desalcalinización del agua mediante intercambio iónico. Ingeniería Industrial, (031), 221-238. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2013.n031.24>
- Cruz León, José Manuel; Bielsa Callau, Jorge Sobre la eficiencia, el uso sostenible del recurso del agua y la gestión del territorio Ager. Revista de Estudios sobre Despoblación y Desarrollo Rural, núm. 1. (2001). pp. 85-112 Centro de Estudios sobre la Despoblación y Desarrollo de Áreas Rurales Zaragoza, España
- De Vargas, L. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Tomo I. Lima, Perú.
- Ghernaout, D., Elboughdiri, N., Ghareba, S. y Salih, A. (2020) Proceso de coagulación para eliminar algas y materia orgánica de algas: descripción general. Diario de la biblioteca de acceso abierto,7: e6272. <https://doi.org/10.4236/oalib.1106272>
- Gómez Luna, L. M., (2007). MICROALGAS: ASPECTOS ECOLÓGICOS Y BIOTECNOLÓGICOS. Revista Cubana de Química, XIX(2),3-20.[fecha de Consulta 12 de junio de 2023]. ISSN: 0258-5995. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543707001>
- Grobbelaar, J. U. (2004). Algal nutrition: mineral nutrition. Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology.

- Grupo CALIDRA. (2000). Manual de usos ecológicos de la cal. México.
- Herrera, L. (2017). Estudio ambiental para la bio restauración del lago de Xico, en valle de Chalco, a través de microorganismos in situ. [Tesis doctorado]. Universidad Autónoma del Estado de México.
- López, R. (2021). México experimenta escasez de agua y falta de equidad en su distribución. Gaceta UNAM.
- Lou et al. (2012). Optimización de la coagulación utilizando sales férricas y de aluminio para tratar fuentes de agua con alto contenido de algas y alta alcalinidad en una planta típica del norte de China.
- Martínez, J. Idrobo, M. (2012). Diseño y construcción de un sistema de ablandamiento para el tratamiento del agua de las cisternas de la facultad de ciencias – epoch. [Tesis de licenciatura]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Morales, L. (2018). Estudio hidrogeológico de la subcuenca Chalco – Amecameca. [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- MORENO, J., MARAÑÓN, B. Y LÓPEZ, D. (2010): Los acuíferos sobreexplotados: origen, crisis y gestión social. En: JIMÉNEZ, B., TORREGROSA Y ARMENTIA, M. y ABOITES, L. (editores): El agua en México, Cauces y Encauces (702pp.). México: Academia Mexicana de Ciencias, 1era edición, pp.79-115. URL [Visita: 26.05.2018] PDF
- Quintero, J. (18 de marzo de 2020). Protestan por el desabasto de agua potable en Tláhuac. *La Jornada*. <https://agua.org.mx/cdmx-protestan-por-el-desabasto-de-agua-potable-en-tlahuac-la-jornada/>.
- Requena Molina, M. (2018). Diseño de un sistema combinado de Carbón Activo y Reactor Biológico Secuencial para eliminación de compuestos farmacéuticos presentes en aguas residuales urbanas. <http://hdl.handle.net/10251/108813>
- Rojo, M. (2006). Remoción de algas presentes en aguas naturales mediante el proceso de flotación. [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- SACMEX. (Julio 18-19, 2019). Sistemas de Aguas de la Ciudad de México [Sesión de conferencia]. Cumbre de fondos de agua. CDMX, México. <https://www.fondosdeagua.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/latin-america/aguas.pdf>
- Sillanpa et al. (2017). Eliminación de materia orgánica natural en el tratamiento de agua potable por coagulación: una revisión exhaustiva.
- Toledo, Alejandro (2002). El agua en México y el mundo. *Gaceta Ecológica*, (64),9-18.[fecha de Consulta 20 de septiembre de 2022]. ISSN: 1405-2849. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53906402>.
- Torres, L. (2014). Una visión política a la gestión pública del agua ¿solución Estatal o Federal? Primera edición. Toluca, Estado de México.
- Facultad de Ingeniería. (2020). Plan de identificación y definición de los requerimientos técnicos para el aprovechamiento del agua de lluvia en sus cauces naturales y presas artificiales para suministro de agua potable a la red de la CDMX.
- Velasco M. (15 de abril de 2022). Vecinos de Chalco se manifiestan por falta de agua. *Excelsior*. <https://www.excelsior.com.mx/comunidad/vecinos-de-chalco-se-manifiestan-por-falta-de-agua/1510017>.

Anexos

Memoria de cálculo.

Dosificación de Hidróxido de Calcio.

De acuerdo con las pruebas de tratabilidad realizadas en laboratorio se realiza el cálculo de la dosificación diaria de Hidróxido de Calcio logrando una reducción de sólidos suspendidos de 920 mg/L a 460 mg/L con una dosis de 2 g/L

$$Dosificación := 2 \frac{gm}{L} = 2 \frac{kg}{m^3}$$

Para el caudal a tratar de cada unidad se tiene que:

$$Q := 120 \frac{L}{s} = 10368 \frac{m^3}{day}$$

Dosificación diaria para una solución de 10 g/L.

$$Carga_{diaria} := \frac{Dosificación \cdot Q}{10 \frac{gm}{L}} = 2073.6 \frac{m^3}{day}$$

Por lo que se disolverán 10 g de Hidróxido de Calcio en un afluente de 24 L/s que aportará los 240 g/s y dividido en las dos unidades se tendrán los 120 L/s a una concentración de 2 g/L.

$$Q + Carga_{diaria} = 12441.6 \frac{m^3}{day}$$

Por cada unidad de 120 L/s, a la cual se le agregan 24 L/s, obteniendo así 144 L/s a la salida. $\diamond 3$

Mezclador rápido

Para una mezcla rápida se tienen tiempos de retención hidráulica en un lapso de 10 a 90 segundos. Para fines del proyecto se elige un valor de 30 segundos.

$$V := TRH \cdot Q = 3.6 \text{ m}^3$$

Donde:

- V- Volumen del tanque (m³)
- TRH- Tiempo de Retención Hidráulica (30 s)
- Q- Gasto de diseño (m³/s)

Nota. Se recomienda la implementación de dos unidades de mezcla por cada módulo.

Cálculo de la potencia del motor

En la tabla 24 se muestran valores de gradiente de velocidad.

To (s)	G (s ⁻¹)
0.5 (mezclado en línea)	3500
10-20	1000
20-30	900
30-40	800
Mayor duración	700

Tabla 24. Recomendaciones de valor del gradiente de velocidad en función del tiempo de retención. Elaboración propia.

Considerando un valor de gradiente de velocidad igual a:

$$G := 900 \text{ s}^{-1}$$

$$\mu_{20} := 0.001003 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

Viscosidad dinámica del agua a 20 °C

Potencia de mezclado

$$P := G^2 \cdot V \cdot \mu_{20} = 2924.748 \text{ W}$$

Sedimentador de precipitados por ablandamiento.

Al primer sedimentador ingresan 120 L/s inicialmente $\diamond 2$, además de 24 L/s agregados $\diamond 13$ suman 144 L/s. La producción de lodos en las pruebas de tratabilidad es del orden de 250 ml/L por lo que se tiene un gasto de lodos de 36 L/s $\diamond 16$, lo que representa un gasto menor al tanque de coagulación de 108 L/s, seccionado en 2 efluentes iguales de 54 L/s $\diamond 4$, y una concentración de sólidos suspendidos de 460 mg/L.

Coagulador-Floculador

La dosis óptima del sulfato de aluminio es de 40 mg/L $\diamond 4$, para los 108 L/s suministrados, en esta etapa del tren de tratamiento se requieren 0.04 kg/m³, se tendrá un influente de 9331 m³/d y requerirá de 373 kg/d. Para atender al gasto se requieren de 4.32 g/s. ofrece 0.06 L/s puesto que se tienen 75 gramos por cada litro del coagulante que al dividirse le corresponden 0.03 L/s a cada corriente al 7.5%.

Sedimentador secundario y filtración

La corriente ingresa a un sedimentador secundario, ofreciendo para los lodos 20,00 mg/L y un gasto de 2 (L/s), $\diamond 17$ el efluente reducirá su concentración de sólidos suspendidos de 460 mg/L a 161 mg/L. Se divide en dos corrientes de 53 L/s cada una $\diamond 7$ para ingresar a la unidad de filtración, misma que requiere de un retro lavado de 5 L/s, por lo que el efluente es de 48 L/s y una concentración de sólidos suspendidos de 32 mg/L.

La corriente es dirigida a una unidad de carbón activado seccionadas de 48 L/s $\diamond 9$ cada una, misma que requiere un gasto de 5 L/s para el retro lavado.

Intercambio iónico.



Por medio de la transferencia de CO₂ en una torre de intercambio iónico, se ajustará el pH de 12 a 8. Además reducirá considerablemente la concentración de sólidos disueltos como sodio, nitrógeno amoniacal, cadmio, plomo, entre otros. $\diamond 5$

Desinfección.

Para la unidad de desinfección se propone la adición de cloro gas en una concentración de 8 mg/L en una unidad de 500 m³ con un tiempo de retención de 30 minutos. Ante una demanda de 199 kg/día de cloro, se recomiendan 7 cilindros de 900 kg cada uno para el ciclo de un mes.

Lodos

Con referencia a la gran cantidad de lodos, producto de los procesos y operaciones unitarias que conforman el tren de tratamiento, se tiene que:

- 36 L/s. Sedimentador de precipitación química.  16
- 2 L/s. Sedimentador secundario.  17

Al tener un pH de 12 son considerados como biosólidos tipo “B” cuyo aprovechamiento es benéfico para la zona agrícola de los alrededores de la laguna de Xico como abono. Por otro lado existe la posibilidad de calcinar estos lodos para la recuperación de cal, misma que es reutilizada en el proceso de ablandamiento por precipitación química. El desagüe se realizará mediante un filtro prensa.

Cálculo de precipitación media.

Estación 9032 – Milpa Alta.

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total general
1 1929										15.2	0	4	19.2
2 1930						146	212.4	129	131.5	93.8	1	0	713.7
2 1931	16.5	0	2	0	138	154.5	220.6	241.7	189.5	14.9	0	14.1	991.8
3 1932	0	5	5.5	10									20.5
3 1941								73.5	159.8	53.2	9.5	52.4	348.4
4 1942	16	0	0	65	0	54	113.4	95.6	153.1	19.5	51.5	6.5	574.6
4 1943	0	3.5	20	12	0	245.5	139	161	166.5	54	6.5	21	829
5 1944	0	0	35	0	0	114.5	138.5	176		120	20	0	604
5 1945	0	0	55	0	21.5	97	121	174.5	144.8				613.8
6 1955	1.5	0	15	0	121.5	73	303	416.5	366.5	95	47.5	14.5	1454
6 1956	0	24	0	36	85.5	117	158.5	178	114.5	31.5	37.5	0	782.5
7 1957	0	17.5	1.5	32	44	82.5	196.5	176	87	48.5	10	6	701.5
7 1958	158	19.5	0	52.5	113.5	120.5	267.5	135.5	105	77.5	88	59.5	1196.5
8 1959	42.5	0	1	85	58.5	197.5	198.5	136	46	98	0	0	863
8 1960	4.5	0	1.5	11	31	40.5	105	171.5	114.5	73	0	5	557.5
9 1961	12	1	1	6	32	210	263.5	144.5	104	10.5	6.5	3	794
9 1962	0	0	2	75	24	81.5	80	100	164.5	62.5	0	8.5	598
10 1963	0	0	25.6	23.5	64.5	103.3	243.9	97	143.7		2	0	703.5
10 1964	25.8	0	1.5	28.5	230.2	140.6	98.5	48.6	86.5	26.4	35.4	2.6	724.6
11 1965	17.5	25.5	0		21.9	100.1	79.3	184.6	85.2	58.8	1.5	9.1	583.5
11 1966	15.5	2.8	59.2	49.4	32.7	53.9	179.6	131.6	67.1	40.3	0	2.8	634.9
12 1967	97	0	20.9	21	126.2	95.8	142	125.3	184	69.5	20	0.2	901.9
12 1968	3.3	12.6	2.3	95.7	72.9	182.1	122.9	97.4	48.8	50.5	3.1	26	717.6
13 1969	14.6	2.5	25.4	9.6	16.7	100.1	182.2	229.8	83.3	9.1		0.5	673.8
13 1970	1.1	5.1	0	9.8	78.1	206.5	151.1	194.9	116	14	0	0	776.6
14 1971	0	0.4	16	10.5	37	130.3	156.2	157.9	87.4	106.1	2.3	21.2	725.3
14 1972	13	2	9.4	20.3	159.7	111.3	162.6	147.3	114.3	27.4	12.1	2.7	782.1
15 1973	0	6	0.5	34.5	65.7	121.7	134.3	128.1	96.7	52.6	9.2	0.3	649.6
15 1974	0.2	7.8	21	16.2	62.5	190.3	160.8	105	70.7	19	6	0	659.5
16 1975	29.2	4.3	0	21.2	101.6	118.2	99.1	117.7	66.6	29.5	0.2	0	587.6
16 1976	2.1	3.8	19.9	31.9	95	81.9	117.5	190.7	114	176.8	19.8	13.2	866.6
17 1977	2.4	8	0	16.2	82.9	101	156.3	78	90.9	38.1	15.3	7.9	597
17 1978	4.4	11.1	40.2	3	60.6	160	150.1	104.6	82.3	107	20.4	0	743.7
18 1979	0	31.6	0	39.6	90.5	55.2	165.8	163	148.1	1.1	0	33.6	728.5
18 1980	74.5	0.3	1.9	47.7	31.4	90.3	128.5	152.1	108.8	28	26.2	0	689.7
19 1981	31.8	19.7	5.5	58.9	51.8	146.1	96.4	143.4	91.2	32.4	6.3	5.2	688.7
19 1982	0	14.5	19.1	49.4	82.5	86.6	124.6	85.5	19.8	13.2	0	0.4	495.6
20 1983	13.4	19.5	15	0	9.5	79	216.5	111.4	96.5	35.2	22.7	3.1	621.8
20 1984	12.2	7.2	2.2	0.9	41.4	118.9	171.4	162.5	183.7	21.2	0.3	3.8	725.7
21 1985	0	11.4	18.6	47.2	34.8	165.5	115.6	72.7	125.4	9.2	5.4	2.5	608.3
21 1986	0	0	0	25	60.4	146.8	91.9	152.1	65		15.7	0	556.9
22 1987	0	1.5	13.1	35.8	67.1	151.2	123.9	103.7	45.7	0	13.5	0	555.5
22 1988	0.9	1.4	46.3	4.1	55	213.3	137.7						458.7
23 1989	10	0.2	3.3	16.6	15.8	157	124.7	130.1	97.1	24.4	0.6	16.6	596.4
23 1990	8.8	6.8	14.8	51.6	96.9	83.5	166.7	152.1	130.7	63.9	0	0	775.8
24 1992									69.2	94.5	62.8	3	229.5
24 1993	1.1	13.5	27	10	116.6	136.2	0	111	136.2	38.1	11.8	0	601.5
25 1994	1.7	0	0	30.3	119.6	132.2	115.7	131.2	107	53.1	0.4	33.2	724.4
25 1995	22.8	13.9	10.6	13.2	60.7	230.7	68.4	243.1	142.8	45.8	38.6	76	966.6
26 1996	0	0	2.5	29.6	31.1	81.4	106.5	66.5	69.8	0	0	0	387.4
26 1997	0.6	0	49.6	97.6	63.7	105.8	223.3	130.6	121.7	65.2	12	11.8	881.9
27 1998	18.9	0.3	0	0	5	114.3	92.1	254.2	269.3	143.2	24.2	24	945.5
27 2002	20	11.5	4.7	24.2	4	100	106.6	64.6	174.5	106.4	20.8	0	637.3
28 2003	0	0	35	16.9	35.4	176.6	101.6	156.5	187.1	96.9	4.7	0	810.7
28 2004	60	0.2	28.4	41.7	85	146.4	157.7	129	170.8	81.7	1.3	0	902.2
29 2005	8.5	0	56.3	13.9	15.1	105.1	141.1	279.2	66	73.7	7.2	0	766.1
29 2006	0	0	24.5	48	144.9	188.7	148.1	170.8	293.1	0			1018.1
30 2007	3.8	43.5	39.8	64.1	72.4	39	111.6	201.4	225.2	38.1	0	5.2	844.1
30 2008	0	0.4	0	23.7	36.9				165.7	37			263.7
31 2010	46.6	60.8	0										107.4
31 2011	3.2	11	0	56.1	17	91.5	161.6	137.2	179.5	37.2	37.5	0	731.8
32 2012	7.3	29.4	19.5	16.5	27.6	137.8	213.9	141.1	100.7	12.3	26.2	0	732.3
32 2013				51.6	88.6	152.3	109.1	176.6	156		35	5	774.2
33 2014	10.4	29.6	8	32.2	123	105.9	126.5	0	0	0	0	49	484.6
33 2015	0	0	0	0	1	69	88	112	75	47	2	0	394
34 2016	0	0	74	26	62	157	0	140	93	47	85	11	695
34 2017	0	0	31	23	63	0	162	166					445
Total general	833	490.6	932.1	1771.2	3787.4	7494.4	8751.3	8887.4	7499.3	2938	885.5	564.4	44834.7
													Altura de precipitación media anual = 1318.67 mm

Estación 9045 – Santa Ana Tlacotenco.

	Etiquetas de fila	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total general	
1	1969	23.1	0.5	9	14.2	24.2	104.9	121.7	232.8	151.6	18.6	0.5	1	702.1	
2	1970	1	3.3	0	10.8	85.9	164.8	168.1	194.5	123.7	24.4	0	0	776.5	
3	1971	0		16.9	13.7	32.1	125.3	211	114.8	85.8	81.3	3.5	26.8	711.2	
4	1972	3	2.5	15.2	33.9	139	124.4	144	153.8	150.3	26.5	24.9	7.3	824.8	
5	1973	0	6.4	1.5	76.7	99.8	128.9	148.6	128.2	105.6	51.6	21.7	0	769	
6	1974	0		20.5	26.7	56.5	127.7	158.6	127.2	103.1	11.5	2.8	0	634.6	
7	1975	23	2.2	0	36.6	112.3	114.5	137.5	160.6	85.7	33.8	2.9	0	709.1	
8	1976	2.3	4.5	27.6	39.6	104.1	98.8	122.6	212	97.7	222.7	28.6	12.6	973.1	
9	1977	6.9	4.7	0	19.3	83	107.3	136.8	92.7	75.8	42.9	6.3	11.3	587	
10	1978	5.8	20	60.5	0.7	53.4	154.7	113.8	90.3	109.8	122.5	9		740.5	
11	1979	0	31.6	0	21.2	67.7	68.1	156.7	169.2	174.1	2	0	5	695.6	
12	1980	84.1	0.8	0	54.5	24.1	101.7	126.2	147	79.7	31.9	34.2	0	684.2	
13	1981	35.5	24	10	57.1	58.3	165.5	108.5	124.2	109.4	66.1	2.4	5.8	766.8	
14	1982	0	26	22.1	27.3	86	82	138.8	65.3	41.4	13.2	0.3	0	502.4	
15	1983	10.7	23.7	16.9	0	13.1	124.6	217.1	118.7	125.6	29.9	17.8	2.6	700.7	
16	1984	11.3	7	5.4	2.2	83.3	143	212.4	127.2	221.8	16	0.3	2.5	832.4	
17	1985	0	14.4	34.1	43.2	49.3	171.1	109	62.2	103.3	14.8	7.6	1.3	610.3	
18	1986	0	0	0	44.6	53.2	187.5	96.5	183.4	51.1	51.3	19.9	0.5	688	
19	1987	0	2.3	19.8	41.1	73.4	155.9	125	187.2	68.4	0	17	0	690.1	
20	1988	1	2.5	49.2	5.1	56.7	137.6	172.7	150.2	162.4	26	0.7	0	764.1	
21	1989	2.7	1	4.3	39.2	30.4	179.7	146.6	152.1	99.9	23.8	0	18.4	698.1	
22	1990	14	8.3	21.3	69.1	90.1	87.2	173.1	205.5	0	56	0	0	724.6	
23	1991	3	0	0	13	40.9	168.7	120.6	75.1	120.1	143.6	5.5	7.4	697.9	
24	1992	78.3	37.3	9.5	22.1	129.6	54.8	96.3	198.9	238.5	118.6	88.3	0	1072.2	
25	1993	1.5	4.5	6.5	14	25.9	107.6	100.3	96.3	133.2	31.2	13.2	0	534.2	
26	1994	0		0						74.5	17.1	0.5	9	101.1	
27	1995	0	10.5	12.3	2	43.7	237.8	85	214.2	110.9	51	41.5	54	862.9	
28	1996	0	0	0	39	24.1	96.5	114.5	90	47.1	46.5	0	23.7	481.4	
29	1997	0	0	38.5	78.4	53.5	93	164	82	57.5	40	18.2	9.5	634.6	
30	1998	16	0	0	0	2					149	36	0	203	
31	2005	7	4	19	11	22	95	124.5	119	79.5	82	1	0	564	
32	2006	8	0				139	165.8	145.6	271.5	132.8	28	2	892.7	
33	2007	0	43	24	54	57.5	55.5	82	222.9	176.9	35	0	1	751.8	
34	2008	0	7.5	0	38	24.2	153.5	93.4	124.9	164.5	35	0	0.6	641.6	
35	2010								133.5	150.4	1			284.9	
36	2011	1	0	0	27.5	6.7	147.4	159.8	157.9	128.2	32	31	0	691.5	
37	2012	10.6	27.2	7.5	22.6	37.7	139.6	189.8	130	81.3	11.8	27.7	0	685.8	
38	2014	0.7	0.1	31.1	28.2	130.9	128.6	114.1	83.7	209.5	74.1	6.3	42.2	849.5	
39	2015	0	11.7	83.5	26.5	142.1	62.7	82.9	141	80.1				630.5	
40	2016	12.2	1.7	110.3		38.6	75.4	140.4	146.8	96.7	24.4	99.6	9.7	755.8	
41	2017	0	0	19.9	17.1	45.5	74.4	188.5	126.9	138.6	20.6			631.5	
	Total general	362.7	333.2	696.4	1070.2	2300.8	4684.7	5267.2	5487.8	4685.2	2012.5	597.2	254.2	27752.1	
															Altura de precipitación media anual = 676.88 mm

Estación 9051 – Tláhuac.

	Suma de p(mm)	Etiquetas de columna													
	Etiquetas de fila	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total general	
1	1961	6.6	1.5	8.6	6.4	6.7	146.1	183.7	97.1	94.8	3	18.9	5.6	579	
2	1962	0	0	0.3	62	31.9	76.5	64.4	75.9	124.6	71.4	6.5	9	522.5	
3	1963	0	0	41.8	7.2	38.4	91.1	213.3	186.3	143.9	100.8	2	0	824.8	
4	1964	26.9	14.9	7	13	120.1	61.7	28.5	28.5	145.2	5	0	0	450.8	
5	1965	0	20.2	9.5	26.5	23	97.5	139.5	178	53	59	1.5	7.5	615.2	
6	1966	14.5	1.5	42	34	33.3	53	166	85.5	57.5	31	0	3.5	521.8	
7	1967	73	0	7	18	77	85.5	106	102.5	137.5	50	19	0	675.5	
8	1968	3	12.5	0	50	72	166.5	111.8	130	91.5	52	0	27	716.3	
9	1969	11.5	0	4	12	21.5	62.5	129.5	154.5	108	12	0	0	515.5	
10	1970	0	4	0	0	88	169	208	108	154	13	0	0	744	
11	1971	0	0	11	5	18	127	89	95	131.5	121	5	7	609.5	
12	1972	0	2	10	71.5	128	82	118	94	121.9	85.5	13.5	0	726.4	
13	1973	0	3	3	17	61	80	102.7	133.5	111.5	60.5	10	0	582.2	
14	1974	1	9	15.5		49.5	102.8	139	130.3	85.2	2.5	0	0	534.8	
15	1975	26.5		0	13.5	119	131.5	84	86.5	73.5	49.5	0	0	584	
16	1976	0	7	18	31.8	56.5	79	102.5	181.5	115.5	142.5	2.8	36.5	773.6	
17	1977	3	6.5	0	32.3	51.5	85.5	100	105.2	78.9	45	16	0	523.9	
18	1978	0	8	67.5	1.4	27.4	153.2	109.3	60.8	92	111	7	0	637.6	
19	1979	0	16	0	23	70.2	90.1	125.3	167.5	164.6	0	0	24.1	680.8	
20	1980	103.5		0	37.5	50.2	71.5	148	122	104.4	79	2	0	718.1	
21	1981	45	0	0	0	72	109.3	128.8	123.7	43.7	42.5	9.5	0	574.5	
22	1982	0	10.6	0.5	17	60.5	74	100.8	42.3	22.5	25.5	0	1	354.7	
23	1983	14	6	6	0	13	166	218.5	103.8	98.3	35	12	2	674.6	
24	1984	8	8.5	1.5	0	59.5	82.5	164.7	118.4	145.5	51.2	0	0	639.8	
25	1985	0	2	11	31	51.5	130.5	84	52.5	67.5	23.5	0.6	0	454.1	
26	1986	0	0	0	30	48.5	81	153.1	135.9	47.6	34.1	14.3	0	544.5	
27	1987	0	0	9.5	11.5	42.5	89.4	90.9	113	47	0	6.5	0	410.3	
28	1988	0	0	38	0	75.7	114.6	125.8	86.5	70.6	30.5	0	0	541.7	
29	1996		0	0	26									26	
30	1997	0	33.5	41	0	117	36.5	41	93.5	85.5	27	0	0	475	
31	1998	0	0	0	0	0	0	70	91	97	16	0	0	274	
32	1999	0	0	0	0	0	13	12.5	62	60	5	0	0	152.5	
33	2000	0	0	0	0	0	51	36	98	103.5				288.5	
34	2001			0	0	48	45	80	47	0	0	0	0	220	
35	2002	12	41	0	0	41.5	0	36	73	72	7	0	0	282.5	
36	2003	0	0	26	0	64	120	67	55	85	46	13	0	476	
37	2004	0	0											0	
38	2005	2	7.2	1.4	23	18	66	81	130.5	40	67	2	0	438.1	
39	2006	0	0	15	27.5	62	132.5	159	159	116	107	12.5	0	790.5	
40	2007	5	31	18	28.2	44	56.5	115.4	165.5	128.7	10.5	0	0	602.8	
41	2008	0	4.5	4	41.5	14	95.4	76	93	77.4				405.8	
42	2010				11.5	24.5	75	96.5	149.8	76.5	0			433.8	
43	2011	0	0	0	55.5	21	151.4	150.5	158.5	79.6	42.5	10.5	0	669.5	
44	2012	0	50.5	0	12.5	21	114.4	125.8	113.5	46	2			485.7	
45	2013	0	2	2.9	25	81.5	84.5	77.8	136.2	150.4	66.7	43	4	674	
46	2014	1.3	6	27.7	10.5	89.5	106.1	173.4	75.4	107.6	93.1	10.3	35	735.9	
47	2015	0	15.4	61.3	17	115.1								208.8	
48	2016	4	1	8	37.1	30.8	188.3	121.2	100.9	91.7	23.6	72.2	3.5	682.3	
49	2017	0	0	39.3	5.5	49.1	65.4	107.9	107.8	93.7	27.6			496.3	
50	(en blanco)														
	Total general	360.8	325.3	556.3	872.4	2407.4	4260.3	5162.1	5008.3	4242.3	1877	310.6	165.7	25548.5	
									Altura de precipitación media anual =					510.97 mm	

Estación 15007 – Amecameca de Juárez

	Suma de p(mm)	Etiquetas de columna														
	Etiquetas de fila	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	0	Total general	
1	1969			11.3	7	29.5	107.9	127.8	338.3	248.1	102.5	0	4.5		976.9	
2	1970	1	15.3	0	0	100.1	321.4	221	194.7	244.5	70.5	0	0		1168.5	
3	1971	0	3.2	26.8	43.8	43.5	126.9	175.3	201.1	224.2	101.2	7.1	13.1		966.2	
4	1972	2.1	1.1	58.2	84.6	175	198.6	229.2	142.3	231.2	57.5	15.6	6.1		1201.5	
5	1973	3.1	4.2	0	62.8	183.3	127.1	183.6	176.2	278.1	193.3	48.6	4.1		1264.4	
6	1974	5.4	13.4	54.9	29.5	81.6	139	137	122.1	252.2	15	0	0		850.1	
7	1975	32.1	28.1	0	2	161.7	166.9	185.1	128.4	132.8	64	2	0		903.1	
8	1976	0	2.5	25	66.8	88.5	118.2	253.9	177	238.5	159	61.3	40.3		1231	
9	1977	4.2	13.8	2.4	34.8	111.2	138.2	129.9	223.4	221.5	24.5	1.9	9.1		914.9	
10	1978	4	12.5	39.7	7.2	66.8	209.4	181.4	182.5	229	81.3	8			1021.8	
11	1979	0	21.5	0	35	57.2	90.5	136.8	156.6	166	17.3	1.5			682.4	
12	1980	126.4	0	0	28.7	73.1	91.2	161.5	207.9	151.7	101.9	32.4	0		974.8	
13	1981	33.2	40	24.5	44.2	64.3	223.9	238	150.2	235.5	52.8	2.5	12.5		1121.6	
14	1982	0	35.9	10.5	41	126.2	108.6	182.9	120.5	103.4	44.9	0	0		773.9	
15	1983	23.8	23	13.2	0	23.1	193.9	198.4	182.5	164.5	57.2	9.8	0.5		889.9	
16	1984	24.5	16.3	10.6	4.9	63.1	172	264.9	166.8	187.9	59.4	0	0		970.4	
17	1985	0	5.5		51.5	60.6	210.2	173.2	96.8	158.1	59.6	15.9	6		837.4	
18	1986	0	0	0	45.8	122.9	199.7	104	169.2	97.1	45.5	25.5	7.6		817.3	
19	1987	0	1	14.9	38.7	46	219.1	173.3	238.6	76.9	0	5	0		813.5	
20	1988	0	0	53	15.9	35.3	173.7	152.6	186.4	204.4	23.8	0			845.1	
21	1989	1.5	0	0	3.8	67.7	117.1	107.2	184	100.9	25.9	11	17.5		636.6	
22	1990	6.5	12	20											38.5	
23	1997	10.2	0	31.4	100.7	89.5	166.6	175.6	135.2	156	112.1	68.3	61.8		1107.4	
24	1998	23.9	0	0	0	6	98	81.5	217	252.5	51.3	26.6	0		756.8	
25	2000	0	0	0	22.5	119.6	198.5	49.8	155.7	101.1					647.2	
26	2001	3.7	0	20	32.6	49.1	114	152.3	100.5	134.4	56.1	0	16.3		679	
27	2002	44.9	5.9	0	21.1	21.5	142.3	93.9	98.5	78.7	83.2	17.9	0		607.9	
28	2003	0	0	10.7	19.2	89.3	206.1	48.2	202.4	166.4	47.2	0	0		789.5	
29	2004	55.5	0	10	20.1	101	182	140.4	183.4	204.3	45.9	9	0		951.6	
30	2005	0	0	29.4	35.1	27.3	79.2	118.7	170.9	57.4	50.1	6	0		574.1	
31	2006	0	0	15.7	46.5	114.2	159.3	203.9	198.5	170.1	77.4	13.3	0		998.9	
32	2007	0	53.9	0	26.5	49.3	130.9	105.8	163.5	82.2	54.2	4.7	9.7		680.7	
33	2008	0	0	0	44.6	52.7	95.4	105.4	71.1	110.9	50.3	0	0		530.4	
34	2009	0	0	0											0	
35	2015		3.1		48.2	106.1	39.5	82.9	63.4	106		28.3	0		477.5	
36	2016	24.5	0	125.5	59.1	45.1	162.6	118.3	143.5	163.3	33.3	75.5	4		954.7	
37	2017	0	0	0	0	5	140.6	127.4	0	0	0				273	
38	(en blanco)													0	0	
	Total general	430.5	312.2	607.7	1124.2	2656.4	5368.5	5321.1	5649.1	5729.8	2018.2	497.7	213.1	0	29928.5	
										Altura de precipitación media anual =					787.59	mm

Estación 15020 – Chalco – San Lucas

	Etiquetas de fila	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	(en blanco)	Total general	
1	1961	9	3	16.5	1.6	32.1	203.1	182.7	78.7	84.9	7.7	11.3	4		634.6	
2	1962	0	0	4	73.2	46.5	107.9	86.1	134.2	120.2	87.7	6.5	18.5		684.8	
3	1963	0	0	24	12.3	61.3	104.3	146.7	113	83	72.5	6.2	0		623.3	
4	1964	18.1	0	9.6	3.5	95.9	123.9	124.3	67.8	62.9	17.4	8.8	3.3		535.5	
5	1965	6	22.7	0	51.3	51.5	120.4	165.6	177.2	47	66.7	0	13		721.4	
6	1966	12.5	1.3	47.6	30.9	31.7	129.6	196.4	156.5	76.5	41.8	0	3.5		728.3	
7	1967	91	0	3.4	52.3	37.4	97.4	161	190.2	151	50.2	9.3	4.2		847.4	
8	1968	16.3	17.5	0	59.1	44.6	203.2	129.8	77.6	73.4	74.9	1.2	15.9		713.5	
9	1969	12.6	1.6	7.5	7.3	12.1	67.2	133.1	161.4	179.1	6.3	0	0		588.2	
10	1970	3.2	4.8	0	10.5	24.3	96.4	188.7	165.2	110.3	79.4	0	0		682.8	
11	1971	0	1.7	14.3	31.6	25.1	111.5	79.6	113	105.5	26.3	11.4	16.7		536.7	
12	1972	0	1.4	19.3	45.2	164	85.3	198	111.5	104.8	60.8	18.7	7	0	809	
13	1973	0	4.8	0.6	23.2	87.2	109.1	142.8	125.2	97.8	74.8	14.7	7	0	680.2	
14	1974	0	0	28.9	38.2	40.1	118.4	84.5	115.9	55.8	25.5	6.5	0		513.8	
15	1975	35.5	0.9	1.8	2.9	124.6	102.9	88.8	187	68.6	19.8	0	0		632.8	
16	1976	0.5	7.5	23.8	43.1	87.8	61.6	163.4	174.6	180.9	118.6	5.8	21		888.6	
17	1977	1	9.4	0	3.8	77.5	79.7	88.8	55.3	115.4	34.4	18.8	2	4.5	488	
18	1978	3.8	15.8	60.7	1	23.9	154	206.4	91.5	89.9	65.9	8.5	0.5		721.9	
19	1979	0	21.9	0.6	15.9	56.5	82	134.3	149.6	122.6	1.4	0	32.7		617.5	
20	1980	56.4	1.8	3.3	55.2	24.9	42.3	51.6	126.6	73.1	71.7	20.9	9	0	527.8	
21	1981	26.4	25.6	9.1	26.1	52.7	115.2	102.3	113.8	75.5	53.4	3.7	2.6		606.4	
22	1982	0	17.3	0.5	15.4	75.9	62.7	139.2	58.8	26.9	35.7	0.3	1.2		433.9	
23	1983	10.3	15.6	12	0	7.6	53.4	163.5	95.3	77.9	35.7	5.4	2.5		479.2	
24	1984	11.7	5.8	2	3.5	72	85.8	144.7	97.6	76.4	42.5	0	2.6		544.6	
25	1985	0	16.6	15	26.6	30.3	161.8	122.8	69.6	130.2	15.9	10.1	11.4		610.3	
26	1986	0	0	0	37.4	94.8	134.7	185.1	165.5	54.9	52.4	8.4	2		735.2	
27	1987	0	0.3	13.2	12.3	27.7	116.6	114.2	230.6	90.1	0	9.2	0		614.2	
28	1988	0	0.2	51.2	19.4	50.4	95.1	133.1	97.1	97.2	10.7	0	0		554.4	
29	1989	2	1.5	3.1	6.7	15.6	125.7	73.2	143.2	87.6	24.6	11.1	8	9.4	504.4	
30	1990	0	0.9	9.9	38	45.8	92.2	132.3	148.6	63.1	32.8	0	0		563.6	
31	1991	0	0.9	0		64.9	144.3	112.1	65.6	43.2	60.1	2.8	0		493.9	
32	1992	39.2	18.1	10.8	9.6	30.7	26.8	94.4	221.8	105.8	70.4		1.5		629.1	
33	1993	0	1.9	3.3		18.4	183.5	112.4	58.8			0.8	0		379.1	
34	1994	0	0	1.1	38.5	63	111.9	78.5	116.2	81.9	31.6	0	3.6		526.3	
35	1995	20.8	3.3	3.4	1.6	53.4	150.6	67.6	130.5	33.3	0	0	30.1		494.6	
36	1996	0	0	2.1	6.7	20.1	49.9	64.4	51	86.3	30.4	0	0		310.9	
37	1997	0	0	29.2	55.8	39.1	59.6	95.7	65.8	155.7	44.1	10	11.4		566.4	
38	1998	6.8	0	0	0	0	44.6	126.9	136.9	180.4	42.4	17	0		555	
39	1999	0	0	2	16.2	7	62.4	128.1	176.1	77.4	52.9	0	0		522.1	
40	2000	0	0				151.8	203.6	120.7	67.6	86.3	11.9	9	0	641.9	
41	2001	4.5	2	20.8	36.3	36.4	65.1	120.3	66.6	110.6	27.2	2.9	0		492.7	
42	2002	5.8	1.2	6.7	47.8	39.5	65.1	145.6	136	101	95.5	5.7	0		649.9	
43	2003	0	0	14.4	5.2	9.3	143	112.2	105.8	94.6	51.3	3	0		538.8	
44	2004	26.5	0.3	18	21.4	42	168.7	83.2	115.9	133.4	27.8	2	0.7		639.9	
45	2005	0	1.3	13.6	22.6	29	42.3	107.7	136.2	36.6	83	7	0		490	
46	2006	1.5	0	0	18.6	47.6	128.6	146.7	112.5	144.3	55.6	38.5	5	1.4	695.3	
47	2007	0	33.4	10.5	21.1	51.7	92.2	120.7	124.8	86.2	7.2	0	2.7		550.5	
48	2008							101.5	71.3	12.1			0		184.9	
49	2009	6.2	0	4	3.8	45.7	67.9	118.2	119.8	140.9	37.8	0			544.3	
50	2010	31.8	72	4.2	9.4	23.1	27.5	130.2	131	45.3	0	0.9	0		475.4	
51	2011	0	0	3.2	15	13.8	123.5	97	48.6	27.7	32.4	29	0		390.2	
52	2012	6.2	19.5	5.1	12.2	32.7	118	116.2							309.9	
53	2014	0	1.5	3.8	42.2	105.5	154.3	112.5	91.4		57.4	7.8	26.8		603.2	
54	2015		11	56.8	41	126.9	107.9	99.5	125.5	99.9		2.8	1		672.3	
55	2016	10.9	2.9	69.8	40.4	62.3	132	140.1	112.9	70.1	10.8	34.3	3	3.1	689.6	
56	2017	0	0	31.4	25.8	61.8	100.6	207.5	171.6	68.7	47.5	0	3.1		718	
57	(en blanco)														0	
	Total general	476.5	369.2	696.1	1238.7	2645.7	5765.5	7004.3	6635.6	4844.7	2271.3	384	254.9	0	32586.5	
										Altura de precipitación media anual =					571.69	mm

Estación 15094 – San Luis Ameca.

	Etiquetas de fila	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	(en blanco)	Total general	
1	1961	11	4	1.5	21.5	43.3	155.5	188.3	152.8	115.5	15.5	11.5	3.5		723.9	
2	1962	0	0	2.5	65	40	75.5	53	94.3	144.5	55.3	0	5.5		535.6	
3	1963	0	0	37.9	17.9	52.2	78.8	83.1	172.4	158.4	87	0.8	0		688.5	
4	1964	27.8	0	8.7	3.9	170.5	135.3	188	98.9	63.1	31.7	9.6	9.7		747.2	
5	1965	19.7	29.4	0	44.1	34.5	102.7	173.3	197.1	122.3	83	24.2	15.5		845.8	
6	1966	12.5	12.1	54.2	77.2	33.7	102.4	127.9	124.7	81.4	44.4	1	3.7		675.2	
7	1967	103	0	10.8	7.4	61.6	119.5	137.7	127.7	188.1	88.2	13.6	0		857.6	
8	1968	4.7	16.4	7.4	77.3	58.2	156.1	127.9	137.5	80.5	57.1	6.9	23.8		753.8	
9	1969	12.2	1.2	11.6	5.9	29.1	43.4	118.9	307.6	156.9	24.4	0	3.1		714.3	
10	1970	0	14	0	4.2	43.6	212	237.4	174.8	119.5	53	0			858.5	
11	1971	0	0	12.5	18.3	27.8	99.2	143.3	89.9	95.5	48.6	21.6	12		568.7	
12	1972	0.5	0.5	16.2	47.2	131.8	125	135.8	101.7	175.2	70.3	11	0		815.2	
13	1973	0	9.8	0.2	43.8	76.1	107.8	125	164.9	107.7	47.8	8.8	0		691.9	
14	1974	0	3.3	12.7	35.2	46.4	112.7	89.5	140.4		2	2.8	0		445	
15	1975	29.3	3.6	0.2	16.3	162.6	153.8	87.4	128.2	58.6	21.7	0.7	0		662.4	
16	1976	1.1	1.3	23.2	27.7	104.4	61.5	159.4	170	121.3	167.2	13.5	33.4		884	
17	1977	2	4.2	3.2	13.7	122.6	94.3		92.6	82.6	19.7	20.1	3.9		458.9	
18	1978	4.5	11.9	52.1	10.4	46.7	191.3	149.3	88.6	109.6	59.5	3.7	3		730.6	
19	1979	0	22.5	0	5.9	61.7	74.5	107.3	147.2	152	5.5	0	25.7		602.3	
20	1980	98.9	0	0	34.5	52.9	65.4	97.8	131.1	69.5	43.1	26.1	0		619.3	
21	1981	38.4	28.8	6.9	41.4	64.4	125.4	99.9	71.1	101.3	26	3	2		608.6	
22	1982	0	14.8	4	16.6	64.7	87.8	100.2	95.8	39.3	34	0	0		457.2	
23	1983	15.9	7.3	14.1	0.1	8.5	55.2	215.8	54.1	139.2	37.6	14.7	0		562.5	
24	1984	17.8	9.2	5.6	1.2	60.7	110.1	144.3	130.6	119.5	9.7	0	0		608.7	
25	1986	0	0	0	30.5	74.5	112.9	122.9	133.6	37.7	53.3	7.9	0		573.3	
26	1987	0	3	19	16	26.7	125.3	141	137.5	28.2	0	7	0		503.7	
27	1988	0	1.7	52.9	17.5	32	170.5	166.7							441.3	
28	1995		6	12.5	8.5	57.3									84.3	
29	1996	0	0	2	41.4	25	85.1	116.8	83.4	107.8	97.9	0			559.4	
30	1997	0	0	32.9	90.5	73.2	71.5	135.1	104.3	79.4	36.6	34.9	10.4		668.8	
31	1998	11	0	0	0	1.3	115.5	62.9	180.5	296.8	75.8	20.3	0		764.1	
32	1999	0	0	8.8	26	27.4	57.6	168.3	174.3	121	83	0	0		666.4	
33	2000	0	0	1.2	22	74	158.7	109.3	96.6	109.6	31.7	4.2	1		608.3	
34	2001	0	0	20.2	52	51.5	168.7	196.2	52.6	82.3	20	0	4.5		648	
35	2002	35.5	2.9	6	246	25.3	54.9	101.5	83	149.4	102.5	14.3	0		821.3	
36	2003	0	0	18.5	32	11.6	188.9	114.5	174.8	104.7	30.8	15	0		690.8	
37	2004	47.1	1	22	14.4	75	172	106.4	108.3	128.9	31.6	0	0		706.7	
38	2005	0	0	16.8	10	15.9	82.6	102.3	125.4	54.9	53.7	5.3	0		466.9	
39	2006	0	0	0	38.8	116.4	119.5	185.1	119.3	113.9	81.7	22.8	0		797.5	
40	2007	5	30.8	1.8	45.6	24	86.8	116.2	108.9	127.9	20.5	0	0		567.5	
41	2008	0	5.1	0	28.3	34.8	124.4	84.6	77.2	101.4	10.5	0	0		466.3	
42	2009	14.4	0	2.7	0	78.3	75.7	133.1	127.9	111.6	109.1	12.2			665	
43	2010	44.7	178.1	6	7.4	43.5	127.6	166.2	169.4	82.4	0	1	0		826.3	
44	2011	0	0	0	32.8	28.6	181.1	140.4	114.3	46.1	55.2	40	0		638.5	
45	2012	0.3	18.9	6.3	7.8	42.8	129.7	0	298.2	134.4	26.3	14.3			679	
46	2013	0.9	0	6.8	0	82.7	104.4		139.3	89.6		15.7			439.4	
47	2014	0	0	15.3	17	130.8	85	119.2	86.7		49.3	0	45.1		548.4	
48	2015		16.6	43	46.5	100.2	143.1	78.9	126.6	64		6.2	2		627.1	
49	2016	9	2.3	121	46.1	27.3	149.9	141	131.8	91.9	38.7	38	0.7		797.7	
50	2017	0	0	43.8	14	51.1	70.2	129.8	150.7	83.7	10.3	0	0.7		554.3	
51	(en blanco)													0	0	
	Total general	567.2	460.7	745	1527.8	2929.2	5606.8	6028.9	6298.6	4949.1	2150.8	452.7	209.2	0	31926	
																Altura de precipitación media anual = 626.00 mm

Estación 15103 – San Pedro Nexapa.

	Etiqueta ▾	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total general
1	1961		1	1	1	109	193	235.1	134	169	20	14	1	878.1
2	1962	0	0	6	114	55	187	50.4	184.2	204.4	47.8	8.6	20.9	878.3
3	1963	0	0	25.5	10.7	158.5	113	217.1	149.8	144.5	82.1	0.1	0	901.3
4	1964	37.2	0	18	8.9	155.4	148.7	147.4	150.2	106	45.8	33.6	23.8	875
5	1965	55.2	31.8	1	60.9	47.9	117.3	179.3	210.8	119.9	121	32.3	14.1	991.5
6	1966	7.2	10.9	56.3	126.2	36.7	170.8	205.2	185.9	110.2	85	8.4	11.1	1013.9
7	1967	92.2	2.3	12.2	53.1	62.9	254.2	89.8	183.5	232.6	119.2	33.4	1.8	1137.2
8	1968	7.8	32.3	13	84.3	113.2	274.2	137.1	119.7	222	83.9	15.6	25.1	1128.2
9	1969	14		33.8	5.4	21.1	97.9	188.6	238.3	114.9	41.5	0.1	4.9	760.5
10	1970	0.1	4.1	0	0	81.1	255.4	138.8	75.7	221.6	73.1	1.6	0	851.5
11	1971	0.3	3.2	12.9	29.6	35.8	139.9	99.5	148.7	163.8	151.9	8.1	0.8	794.5
12	1972	0	0	33.5	108.7	180.5	243	224.1	138.2	230.1	68.6	29.1	8.5	1264.3
13	1973	0.4	3.6	0	78.3	115.9	179.4	110.8	201.6	97.4	79	10.3	13	889.7
14	1974	6.1	6.7	32.3	10.1	127.6	212.4	175.7	95.4	142.8	14.4	3.8	1.9	829.2
15	1975	26.7	3.6	0	0	167.7	198	177.2	95.1	119.5	71.2	5.5	3.5	868
16	1976	0	0	23.9	105.5	88.5	100.1	199	162.8	126.1	116.5	51.9	14.1	988.4
17	1977	7.3	4.7	3.1	22.1	114.6	186.5	145.6	136.3	155.4	46.5	3.5	2.8	828.4
18	1978	4.2	9.8	33.4	22.8	50.1	147.7	92.3	108.5	244	76.5	21.3	11	821.6
19	1979	0	19.7	1.7	50.2	72.2	107.8	161.2	154	117.7	49.3	0.9	29.4	764.1
20	1980	146.9	2.1	0	24.5	112.6	124.4	165.2	171.3	84.3	57.4	55.2	0	943.9
21	1981	50.9	53.8	44.8	62.1	75.4	185.3	287.6	128.8	116.2	65.1	1.9	12.1	1084
22	1982	0	22	4.3	27.7	131.3	112.9	52.4	128.3	90.5	76.6	0	0.5	646.5
23	1983	31	32.4	19.8	0	30.7	144.4	231.2	149.4	198.5	39.3	23.5	0	900.2
24	1984	27.6	13.2	6.8	1.9	97.1	164.3	163.7	177.1	239.1	30.9	0	4	925.7
25	1985	2	2.5	23.7	52.7	47.1	262.6	137.8	101.1	139.3	45.5	26.1	2.8	843.2
26	1986	0	5.1	0	58.5	167.3	229.5	82	120.7	72.8	53.4	27.7	4	821
27	1987	0	3.7	18.3	46.6	38.4	237.4	199.2	97.5	112.2	0	7.8	0	761.1
28	1988	0	0	56.3	8.3	40.3	230.6	130.1	198.1	143.7	51	0	0	858.4
29	1989	0	0	0	15.6	45.1	144.3	70.5	261.7	57.6	57	20.1	20	691.9
30	1990	7	16.3	43.7	22.8	85.6	90.1	181.2	109.1	145.9	194	2.5	2	900.2
31	1991	0	2	0	2.5	108	243.5	118.9	81.5	121.5	99.5	13.5	5.5	796.4
32	1992	159.9	43.6	16.5	17	129.5		137.1	142.3	102.2	105.6	86.1	8.4	948.2
33	1993	3.9	9	9.5	19.1	34.1		102.7	93	206.9	48.9		0	527.1
34	1994	7.8	0	0	15.3	132.6	127.2	98.5	190.5	115	93.3	10.2	7.2	797.6
35	1995	45.2	0	13.5	20.5	111.9	122.4	115.6	213.8	78.9	34.7	73.6	76.4	906.5
36	1996	0	2.4	4.3	8.5	82.1	179	147.3	175.5	86.1	54.5	0	28.3	768
37	1997	2.6	0	47.8	140.2	110.2	133.3	116.7	178.5	189.9	74.9	71.5	8.1	1073.7
38	1998	4.2	2	0	0	2.5	93.8	85.2	141.4	143.7	38.4	17.5	0	528.7
39	2001	4	0	32	35.7	97.5	141.7	139.2	118.6	126.8	68.5	0.5	19	783.5
40	2003	0	0	12.5	1.5	70.2	229.4	72.9	140.9	135.4	79.5	4.5	0	746.8
41	2004	55.1	0	41.8	40	125.3	160.9	114.9	91.9	194.5	58.4	24.8	0	907.6
42	2005	0	1.8	22.4	24.7	23.5	132.8	165.5	163.8	84	41	9.5	3.5	672.5
43	2006	0	0	18.3	34	160.3	171.9	207.9	181		134	28.1	0	935.5
44	2007	18.3	32.7	0.9	30.3	56.3	118.1	132.4	203.3	87.9	52.8	24.6	4.5	762.1
45	2008									107.5	37.2	0	0	144.7
46	2009	8.5	3.5	7.8	5.4	71.7	143.7	129	187	157.4	102.9	0		816.9
47	2010	64.5	186.9	8	12	39	133.5	203	173	131	0			950.9
48	2011	0	0	0	0	0	0	0	135	78	80	18.9	0	311.9
49	2012	0	41.2	28	40	27.8	99.6	126.1	166	115.5	23.5	14	0	681.7
50	2013				11.5	124	77.5	153.5	108	48	39.7	23	15.5	600.7
51	2014	4	6	49	22.5	70.8	96.3	95.5	196.5		185.5	2.5	66	794.6
52	2015		4.5	58	17									79.5
53	2016	12.1	5	105.6	39.6	144	104	150	170.5	207.7	23	68.5	0	1030
54	2017	0	0	36	37.2	159.5	216.8	195.7	197.5	141	67			1050.7
	Total gener	914.2	625.4	1037.2	1787	4545.4	7977.5	7482.7	7965.3	7100.9	3606.3	938.2	475.5	44455.6
														Altura de precipitación media anual = 823.25 mm

Estación 15106 – San Rafael.

	Etique ▾	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12 (en blanco)	Total general	
1	1961	3.9	3.9	12.5	9.8	62	240.9	267.8	195.2	129.1	46	22	1.8	994.9	
2	1962	0	0	1.5	97.9	59.6	110.9	137.5	192.3	143	67	9	16.3	835	
3	1963	0	0	18.5	21.5	125.1	109.8	200.4	255	168	143.7	4.1	0.1	1046.2	
4	1964	36	0	21.3	13.1	128.9	270.9	267.7	124.6	134.9	23.5	25.9	7.9	1054.7	
5	1965	43.3	46.8	0.5	34.8	64.7	170.8	288.1	330.8	137.9	64.1	14.5	17.3	1213.6	
6	1966	11.3	17.2	65.1	101.8	20.6	273.1	281.6	267.3	173.8	78.1	0.2	6.6	1296.7	
7	1967	110.2	0.1	54.1	41.3	63.7	201.4	160.6	169.5	228.2	226.9	3.6	2.8	1262.4	
8	1968	5.5	25.2	2.9	110.7	106.8	285.1	137.5	159.8	152.8	78.4	9.2	29.3	1103.2	
9	1969	18.1		17.5	11.8	19.9	107.6	212.6	390.2	215.3	73.2	0	2.5	1068.7	
10	1970	0.4	14.1	0.1	5.8	40.8	202.4	223.1	276.7	188.9	53.4	14	0	1019.7	
11	1971	0.6	0	22.5	40.2	33.2	165.9	247.4	230.9	170.7	80.7	7.8	18.4	1018.3	
12	1972	0.2	1.6	19.6	78.8	132.1	202.4	300.6	161.3	159.1	83.8	18.7	1.7	1159.9	
13	1973	0.5	7	2.5	47.6	76.9	127.1	257.1	226.4	142.6	106.7	23.6	2.6	1020.6	
14	1974	2.5	3.4	29.7	14.1	45.6	271	154.5	162.9	192.1	45.5	22.4	0	943.7	
15	1975	40	17.2	0	19.8	162.2	149.3	249.8	205.3	175.8	50.1	2	0	1071.5	
16	1976	0	3	27.5	50.3	114.8	72.8	187.8	402.3	238.1	203.4	38.2	28.4	1366.6	
17	1977	8.2	6.5	2.1	20.7	116.9	236	201.7	157.9	129.6	47.7	0.2	12	939.5	
18	1978	5.6	21.5	77.5	23.3		318.6	192.7	132.8	180.2	158.1	7.2	10.3	1127.8	
19	1979	0	28	1.5	13.9	90.3	82.3	225.5	235.6			1	34.7	712.8	
20	1980	147	0	0.8	60.8	55.7	139.2	133.2	169.1	175.9	91.7	38.3	0	1011.7	
21	1981	52.8	36.7	14.5	39.9	63.8	233	190.1	211.1	165.3	104.4	12	3.9	1127.5	
22	1982	0	22.7	6.7	64.4	164.7	169.8	217.6	105.8	87.8	87	0	1	927.5	
23	1983	20	22.3	14.9	0	34	127	278.7	191.5	215.5	10.8	7.4	2.4	924.5	
24	1984	26.4	13.6	11.1	0.5	54.8	212.6	291.3	228.3	198.5	88.8	0	0	1125.9	
25	1985	0	3	4.1	47.6	77.8	220.9							353.4	
26	1986				51.5	119.7	250.1	193.3	191.1	49.4	35.3	10.2	6.1	906.7	
27	1987	0	3.1	22.6	32.4									58.1	
28	1996		0	7	0	9.5	145.6	140.9	177	124.2	49.4	0	31.6	685.2	
29	1997	8.7	0	55.7	131.3	92	125	226.4	205	162.8	42.7	43.9	0.5	1094	
30	1998						107	144.9	224.3	296.4	107.6	32.8	6	919	
31	2001	4.2	0	27.2	57.9	78.6	165.9	270.5	139.1	130.4	31.8	0.3	9.5	915.4	
32	2002	31.4	3.3	18.5	48.3	55.1	107.2	231.8	191	199.3	149.2	25.6	0	1060.7	
33	2003	1	0	13.9	27.5	22	254.8	146.2	247.1	225.8	92.7	25	0	1056	
34	2004	41	0	47.8	39.8	100.9	255.1	182.3	254.2	164.2	54.2	11.3	0.6	1151.4	
35	2005	0	0	19.1	30.1	78	108	157.1	209	85.3	89.2	11.2	0	787	
36	2006	0.5	0	22.6	65.6	182.9	246.4	312.6	276.6	273.6	207.1	21	3.2	1612.1	
37	2007	13.2	34.7											47.9	
38	2009	22	0	3.5	0	83.2	126.1	116	171.5		100	6		628.3	
39	2010	62.5	119.4	3.3	32.2	60.2	210.1	220.3	328.2	174.1	0			1210.3	
40	2011	0	0	5.7	23.7	27.9	289.4	251	224.5	94.5	117.7	47.1	0.3	1081.8	
41	2012	2.6	34.5	6.5	28	50	242.5	252.9	236.4	140.5	26.1	13.8	0	1033.8	
42	2013				25.3	91.3	158.5	211.1	205.4	171.1	90.2		7.1	960	
43	2014	2.5	0	5.9	31.3	192.2	260	147.8	178.7		138	0	46.9	1003.3	
44	2015		13.3	74.4	47	111.5	215.6	136.8	164.1	136.3				899	
45	2016	14.6	3.4	73	57.8	81.9	134.2	184.4	196.2	134.7	71.2	58.7	0	1010.1	
46	2017	0	0	28.3	14.1	76.4	118.5	266.6	235.8	178.3	60.6			978.6	
47	(en blanco)													0	0
	Total ger	736.7	505.5	864	1714.2	3428.2	8220.8	9097.8	9237.8	6644	3476	588.2	311.8	0	44825
															Altura de precipitación media anual = 953.72 mm

Estación 15280 – Tlalmanalco.

	Suma de Etiquetas	Precipitaciones de columna													
	Etiquetas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12 (en blanco)	Total general	
1	1981					65.2	180.3	111.8	110.3	165.5				633.1	
2	1982	0	27	3	21.5	66.4	99	117.3	50.9	45.6	23.5	0	0	454.2	
3	1983	0	7.5	7.5	0					177.3	46	23.5	2.5	264.3	
4	1985	0	0	0	11	38	229	137	200	214	65	12	15	921	
5	1986	0	0	0	176	39	232	90	174.3	116	10	12	6	855.3	
6	1987	0	1	6	27	40	148.2	191	182	40			0	635.2	
7	1988	0	0	48.4	11.5	19	165.2	270.2	105.3	50				669.6	
8	1991	4.5	0.5	0	0.5	68.1	223.8	131.5	111.9	120.2	83.9	10.3	0	755.2	
9	1995	35	25	4	2	25.8	151.6	148.3	243.6	150.7	71.5	65	64.5	987	
10	1996	0	0	2	23.5	45.6	106.8	133.6	141.4	96.8				549.7	
11	1997	0	0	8.4	130.5	52.1	145.1	164.2	96.4	84.8	52.4	35	10	778.9	
12	1998	0	0	0	0	13	124.3				82.6	19.8	24	263.7	
13	2000	0	0	4	15	80	154.5	58	178	127	34	7	0	657.5	
14	2002	18	4	9.1	24	65	73.8	133.8	83	146	81.5	54	0	692.2	
15	2003	0	0	12	7	20	205.5	99	167.5	104.5	58.8	4	0	678.3	
16	2004	34	0	15	20.5	55.5	219.1	124.7	218.1	120.7				807.6	
17	2005	0	0	20.5	9	43.1	64.5	120.6	177	64	65	0	0	563.7	
18	2006	0	0	0	82.1	131.5	221.2	238.8	173.2	120	113.5	14.5	2	1096.8	
19	2007										25	0	0	25	
20	2008	0	0	0	18.5	39.6	92.9	132.2	182.5	146	0	0	0	611.7	
21	2009	17	6.9	6.1	5.2	43.6	50.9	67.9	83.8	265.6	107		28	682	
22	2010	52	152.5	8.5	17	47.5	290	168.5	231.5	188.9	0			1156.4	
23	2011	0	0	0	14.5	11.5	215.5	154	143.5	78.5	96	54	0	767.5	
24	2012	0	35.5	0	12.7	56	165.3	210.6	132.3	90.5	19			721.9	
25	2013	2	0	3	17	86.5	137.1	146.5	165.9	171.9	102	49.7	6	887.6	
26	2014	0	0	5	32	140.2	140.9	132.6	186		114.5	0	47.5	798.7	
27	2015		11.5	57.5	39	136.9	96	49.5	84.5	97		42.5	0	614.4	
28	2016	7.5	3	115.4	54.9	53.5	161.7	207.1	145	122.8	29	79.4	0	979.3	
29	2017	7.5	0	29.3	6.5	80.5	77.8	309.2	200.7	122.8	22			856.3	
30	(en blanco)													0	0
	Total general	177.5	274.4	364.7	778.4	1563.1	4172	3847.9	3968.6	3227.1	1302.2	482.7	205.5	0	20364.1
															Altura de precipitación media anual = 678.80 mm

De las tablas anteriores se tiene que la columna de etiquetas corresponde a los años que se tienen en registros, las columnas enumeradas del 1 al 12 corresponden a cada mes del año, comenzando por enero, y cada uno de los valores ha sido previamente filtrado de entre una enorme cantidad de datos como la altura máxima de precipitación en dicho mes.