

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS



Influencia del tiempo de retención hidráulica en los parámetros microbiológicos del tratamiento de agua residual municipal mediante un biofiltro aerobio empacado con fieltro de grafito.

Por:

**MARIANA DENISE VALENCIA MÉNDEZ**

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Influencia del tiempo de retención hidráulica en los parámetros microbiológicos del tratamiento de agua residual municipal mediante un biofiltro aerobio empacado con fieltro de grafito

Por:

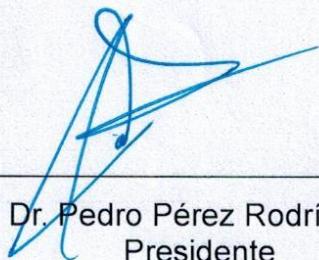
**MARIANA DENISE VALENCIA MÉNDEZ**

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

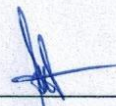
**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

Aprobado por el Jurado Examinador.



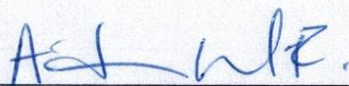
---

Dr. Pedro Pérez Rodríguez  
Presidente



---

Dra. Silvia Yudith Martínez Amador  
Vocal



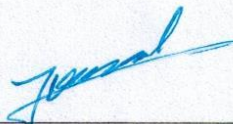
---

Dra. Aida Isabel Leal Robles  
Vocal



---

Dr. José Antonio Rodríguez de la Garza  
Vocal



---

M.C. Sergio Sánchez Martínez  
Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Influencia del tiempo de retención hidráulica en los parámetros microbiológicos del tratamiento de agua residual municipal mediante un biofiltro aerobio empacado con fieltro de grafito

Por:

**MARIANA DENISE VALENCIA MÉNDEZ**

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

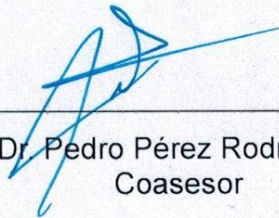
Aprobado por el Comité de Asesoría.



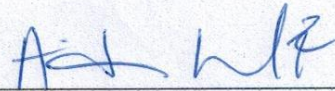
\_\_\_\_\_  
Dra. Silvia Yudith Martínez Amador  
Asesor Principal Interno



\_\_\_\_\_  
Dr. José Antonio Rodríguez de la Garza  
Asesor Principal Externo



\_\_\_\_\_  
Dr. Pedro Pérez Rodríguez  
Coasesor



\_\_\_\_\_  
Dra. Aida Isabel Leal Robles  
Coasesor

### Derechos de Autor y Declaración de no plagio.

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos: Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente.

Así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor. Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

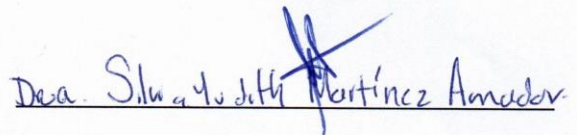
Autor principal



Mariana Denise Valencia Méndez

Nombre y firma

Asesor principal



Nombre y firma

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios

Por permitirme vivir esta etapa con salud y rodeada de amor, bendecida en un hogar y en compañía de mi familia. Por darme fortaleza, responsabilidad, paciencia, sabiduría y cada una de las herramientas para seguir adelante. Por todo lo que has permitido y por aquello que no, por darme serenidad para aceptar que todo tiene un porqué. Gracias por llenarme de bendiciones todos los días, porque has sido extraordinariamente generoso conmigo.

A mi familia

Por ser lo mejor que tengo, porque me han acompañado en cada momento, por amarme y demostrarme su cariño todos los días y por todo lo que han hecho por mí, por su confianza depositada en mis capacidades, les agradezco por todo su apoyo durante estos años, por todo su amor.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Por ser una institución tan noble y permitirme formarme como profesional, por la oportunidad de conocer docentes que me guiaron y ayudaron a terminar mi carrera profesional, por ser mi Alma Mater.

A la Dra. Silvia Yudith Martínez Amador

Por recibirme y asesorarme, por todo el apoyo, tiempo y el conocimiento que me brindó durante este tiempo, por ser un gran ejemplo, una gran maestra, por permitirme trabajar en este proyecto y por la confianza depositada en mí.

A la Q.F.B. Brenda Verónica Borrego Limón

Por ser un gran ejemplo de perseverancia, inteligencia y dedicación, por enseñarme con tanta paciencia, por su comprensión y apoyo durante mi servicio social y trabajo de tesis. Por brindarme su confianza y su amistad.

A mi amiga Mariana Nohemí

Por todos los años de amistad, por ser una amiga tan presente, por tus consejos, tu paciencia, por las risas y la compañía durante la carrera y sobre todo en el laboratorio, en donde compartimos mucho. Por todo lo que hemos pasado juntas dentro y fuera de la universidad y por todo tu cariño. Te quiero mucho.

A mi amiga Alba Marcela

Por ser una gran amiga, porque en muy poco tiempo te convertiste en una amiga muy importante para mí, por toda la ayuda que me diste durante la carrera, por estar siempre ayudando a los demás. Te quiero mucho.

## DEDICATORIA

A mis padres, Rosa María Méndez Valero y Salvador Valencia Manzo

Por todo el amor con el que me han criado, porque siempre han estado presentes, por todo lo que nos han dado a mí y a mi hermanos, por todo el apoyo, cariño y amor que me dan cada día. Nunca podré agradecerles suficiente por todo lo que han dado y hecho por nosotros, todos los días vivo agradecida con Dios por que ustedes son mis papás. Los amo tanto.

A mi hermano Pablo

Por ser mi mejor amigo toda la vida, porque siempre me has escuchado y aconsejado, eres la mejor persona que conozco, te admiro tanto y espero algún día ser como tú, una persona tan amable, inteligente, paciente, empática y generosa.

A mi hermano Samuel

Por escucharme todos los días y distraerme cuando lo necesito, por ayudarme a ver que no todo es tan complicado, que todo tiene solución y que no todo es tan en serio.

Gracias a los dos por acompañarme, porque están siempre y por ser mi mejores amigos, los quiero mucho.

A mi novio José Alejandro Ruiz Espinoza

Por ser un novio maravilloso, por estar presente siempre sin importar nada, por hacerme sentir acompañada, amada, escuchada y por hacerme sentir que soy capaz de todo. Gracias por todo tu amor, por tus abrazos, por tus palabras de aliento, por ayudarme en todo lo que he necesitado, por que pasan los años y cada día a tu lado es mucho mejor, porque todos los días me demuestras tu amor incondicional, jamás podré agradecerte suficiente por todo mi vida. Te amo con toda mi alma.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ABREVIATURAS.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	iv
ÍNDICE DE TABLAS .....	v
RESUMEN .....	vi
INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVOS .....	3
HIPÓTESIS .....	3
CAPÍTULO I. REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
1.1 POBLACIÓN Y AGUA EN EL MUNDO .....	4
1.2 SITUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN MÉXICO.....	4
1.3 TIPOS DE AGUAS RESIDUALES.....	6
1.4 TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL.....	8
1.4.1 Tratamientos físicos.....	9
1.4.2 Tratamientos químicos.....	9
1.4.3 Tratamientos biológicos.....	10
1.4.3.1 Procesos aerobios.....	10
1.4.3.2 Procesos anaerobios.....	11
1.4.3.3 Procesos anóxicos .....	11
1.5 FILTROS BIOLÓGICOS .....	12
1.5.1 SOPORTES .....	12
1.5.2 BIOPELÍCULAS.....	13
1.6 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRAÚLICA .....	15
1.7 TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL MEDIANTE FILTROS BIOLÓGICOS ....	16
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS .....	19
2.1 LOCALIZACIÓN.....	19
2.2 METODOLOGÍA.....	19



2.2.1 Descripción y operación del biofiltro .....	19
2.2.2 Agua residual municipal .....	20
2.2.3 Parámetros evaluados.....	21
2.2.3.1 Demanda química de oxígeno.....	21
2.2.3.2 Demanda bioquímica de oxígeno.....	23
2.2.3.3 Huevos de helmintos .....	25
2.2.3.4 Coliformes totales y fecales .....	28
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	35
CONCLUSIONES.....	40
BIBLIOGRAFÍA .....	41

## **ABREVIATURAS**

ARM: Agua residual municipal

DQO: Demanda química de oxígeno

DBO: Demanda bioquímica de oxígeno

HH: Huevos de helmintos

CF: Coliformes fecales

TRH: Tiempo de retención hidráulica

SAE: Sistema aerobio

%ERDQO: Porcentaje de remoción demanda química de oxígeno

%ERDBO: Porcentaje de remoción demanda bioquímica de oxígeno

%ERCF: Porcentaje de remoción coliformes fecales

%ERHH: Porcentaje de remoción de huevos de helmintos

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Biofiltro aerobio .....	19
Figura 2. Digestor.....	22
Figura 3. Titulación con tiosulfato.....	24
Figura 4. Tubo cónico donde se observan las tres fases (grasa, acuosa, sedimento) ...	27
Figura 5. Fotografías tomadas con un objetivo de 40x donde se alcanzan a observar los huevos de helmintos .....	28
Figura 6. Tubos de las diluciones seriadas después de la incubación .....	30
Figura 7. Tubo positivo de coliformes.....	32
Figura 8. Remoción de la DQO contenida en agua residual municipal a diferentes TRH en un biofiltro aerobio.....	36
Figura 9. Operación matemática llevada a cabo para calcular el porcentaje de la remoción en las coliformes .....	38

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Extracción de tabla 12.1 de la NMX-AA-042-SCFI-2015, para la estimación de la densidad bacteriana de organismos coliformes, coliformes termolerantes y <i>E.coli.</i> ..	33
Tabla 2. Valores de la DBO (mg DBO/L) del agua residual municipal y del SAE (efluente) .....	37
Tabla 3. Porcentaje de eficiencia de remoción de coliformes fecales a los distintos TRH .....	38
Tabla 4. Porcentaje de eficiencia de remoción de huevos de helmintos a distintos .....	39

## RESUMEN

Los biofiltros aerobios son empleados como una forma de tratamiento biológico de aguas residuales, estos cumplen una doble función como proceso físico-biológico, donde la biopelícula permite la degradación de la materia orgánica disuelta en el agua residual. En esta investigación se determinó la influencia de TRH de 48, 36, 24 y 12 h en la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), huevos de helmintos (HH), coliformes totales (CT) y fecales (CF) en el tratamiento de agua residual municipal mediante un biofiltro aerobio empacado con fieltro de grafito. Se midieron los parámetros mencionados con base en las Normas Oficiales Mexicanas. La operación del reactor a los 4 diferentes TRH dio como resultado que en los TRH de 48 y 12 h se detectaran porcentajes de remoción similares. De forma que se concluye que el TRH de 12 h es la opción más adecuada debido a que proporciona resultados eficientes de remoción de DQO, DBO<sub>5</sub>, HH y CF del 89%, 89.5%, 84.46% y 99.9%, respectivamente, es decir que ofrece una alta eficiencia de remoción en un menor tiempo de operación.

Palabras clave: demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, huevos de helmintos, coliformes fecales.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe una escasez del agua como recurso vital, ya que en los últimos años han incrementado varios factores que afectan la disponibilidad del agua, entre ellos está el cambio climático que a su vez no solo afecta la disponibilidad, si no la calidad del agua (UNESCO, 2020), otros factores son la mala gestión del recurso, la contaminación y el aumento en la población mundial. Se estima que para el año 2050 la población mundial llegará a 10 mil millones, y en la situación de México, al ser el décimo país más poblado del mundo con 130.1 millones de habitantes (OCDE, 2021) y siendo una región vulnerable al cambio climático, la disponibilidad del agua representará una problemática crítica (United Nations, 2022). A su vez, el aumento en la población genera un mayor volumen de descarga de aguas residuales, las cuales se clasifican según su origen y su composición. Las aguas residuales municipales son aquellas que resultan de las casas, departamentos, establecimientos públicos y de la escorrentía que se recolecta en el drenaje. Sus principales características son que contienen una carga elevada de materia orgánica, proveniente de residuos animales, vegetales, grasas, etc., una carga microbiológica diversa en bacterias, como coliformes fecales, hongos y protozoarios, además de un exceso de elementos como el nitrógeno y el fósforo (Eco-Intellutions, 2019).

En los últimos años, se han desarrollado y mejorado métodos para el tratamiento de aguas residuales, ya que el mayor porcentaje de las aguas residuales generadas no reciben un tratamiento antes de ser descargadas a cuerpos receptores de agua, lo cual genera una gran contaminación en aguas superficiales, que es de donde se obtiene el mayor porcentaje de agua destinada para uso consuntivo, además de las aguas subterráneas. Aunado a lo anterior, la creciente escasez del recurso ha generado la necesidad de establecer y escalar nuevos métodos de tratamiento para que el agua pueda volver a usarse en ciertas actividades o descargarse en cuerpos receptores de agua (CONAGUA, 2019).

Existen diversos tipos de tratamientos, que se clasifican como físicos, químicos o biológicos, estos últimos se basan en la capacidad metabólica que tienen algunos seres vivos (bacterias, algas, plantas, etc.) para eliminar o disminuir los

contaminantes, degradar la materia orgánica y disminuir la carga microbiológica patógena presente. En los tratamientos biológicos el oxígeno tiene un papel importante, ya que dependiendo de si se trata de un proceso aerobio o anaerobio, este determina el tipo de microorganismos que se van a encargar de depurar el agua residual (Botello-Suárez *et al.*, 2016). Algunos de los tratamientos aerobios comúnmente más utilizados para el tratamiento de aguas residuales municipales son los lodos activados, lagunas aireadas, los filtros percoladores o los contactores biológicos rotarios. Además, por varios años se han realizado trabajos de investigación de biorreactores ya que presentan un desempeño más estable en comparación con los sistemas convencionales, lo cual se ha logrado gracias a la implementación de biofiltros, los cuales consisten en un material de soporte que permite la formación de una biopelícula, la cual, al tener una alta actividad microbiana, permite mayor efectividad en el tratamiento (Kourkoutas *et al.*, 2004). El principio básico de los biofiltros es que al utilizar soportes con una gran área superficial que, además de retener sólidos, dé como resultado la biodegradación y es importante mencionar que “la selección de un material de soporte idóneo garantiza la generación, mantenimiento y viabilidad de una biopelícula metabólicamente activa” (Botello-Suárez *et al.*, 2016), y es por ello, que se han realizado investigaciones enfocadas a probar nuevos materiales como soporte en biofiltros, al mismo tiempo evaluando otros factores que influyen en la eficiencia del tratamiento biológico como el tiempo de retención hidráulica, el cual puede incidir directamente en la remoción de materia orgánica y en los parámetros microbiológicos (López-Vázquez *et al.*, 2017).

## **OBJETIVO GENERAL**

Determinar la influencia del tiempo de retención hidráulica en la remoción de la demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, huevos de helmintos, coliformes totales y fecales en el tratamiento de agua residual municipal mediante un biofiltro aerobio.

## **HIPÓTESIS**

El biofiltro aerobio tendrá una alta eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, huevos de helmintos, coliformes totales y fecales directamente proporcional al tiempo de retención hidráulica en el tratamiento de agua residual municipal.



# **CAPÍTULO I**

## **REVISIÓN DE LITERATURA**

### **1.1 POBLACIÓN Y AGUA EN EL MUNDO**

El agua es un recurso natural indispensable para el funcionamiento de los ecosistemas y conservación de su biodiversidad, y así como es imprescindible para la flora y fauna de cada ecosistema, lo es para el ser humano, ya que además de que dependemos de ella para satisfacer las funciones vitales, se ha vuelto un recurso necesario para el desarrollo y funcionamiento de las actividades agrícolas, industriales y domésticas. Del 97 % de agua que existe en el planeta Tierra, solo el 2.5% es agua dulce, sin embargo, solo el 0.5% está disponible para satisfacer las necesidades de la humanidad y de los ecosistemas de agua dulce (Blanco y de la Torre, 2017).

Sin embargo, su disponibilidad se ha visto afectada debido a que, durante las últimas décadas, ha habido un aumento en la población que a su vez ha generado un aumento exponencial en la urbanización, y por lo tanto el consumo y demanda del recurso hídrico es cada vez mayor. Actualmente la población mundial es de 8200 millones de personas y se estima que para el año 2050 la población mundial llegará a 9700 millones (ONU, 2024). El Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, ha estimado que, para ese mismo año, el 68% de la población vivirá en zonas urbanas (United Nations, 2018).

Por otra parte, el cambio climático y la contaminación desmedida a este recurso ha provocado una crisis hídrica de la cual el 36% de la población mundial se ve mayormente afectada y se estima que para el año 2050, sea un 52% de la población la que experimente una escasez severa de agua (ONU-Habitat, 2021).

### **1.2 SITUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN MÉXICO**

Actualmente México enfrenta una problemática crítica para satisfacer la demanda de agua debido a la escasez de este valioso recurso, la cual se debe a distintos factores como lo son el cambio climático, la contaminación y el aumento

demográfico. México es el décimo país más poblado del mundo, con 130.1 millones de habitantes (OCDE, 2021) y está estimado que para el año 2050 la población llegue a 150 millones de habitantes, a su vez, este aumento demográfico genera un mayor volumen de descarga de aguas residuales, las cuales causan contaminación en los cuerpos superficiales de agua, sin mencionar el riesgo a la salud que esto puede provocar. Por otro lado, al ser una región vulnerable al cambio climático y a las consecuencias que este ocasiona, se ve obligado a mejorar la administración del agua, así como la inversión en la investigación y desarrollo de tratamientos de agua residual.

Actualmente, 40% del agua en México proviene de agua subterránea y el otro 60% proviene de cuerpos agua superficiales, es decir, ríos, lagos y presas (CONAGUA, 2023). Sin embargo, el 71% del agua superficial se encuentra en el centro y sur del país, mientras que sólo el 29% se encuentra en la zona norte, por lo que esta región depende en gran manera de las aguas subterráneas. Aunado a lo anterior, el país ha experimentado sequías severas en los últimos, además de un incremento en la temperatura anual como consecuencias del cambio climático, lo cual incide directamente en la disponibilidad, cantidad y calidad del agua (IMCO, 2023).

Durante los últimos años, el recurso hídrico en el país ha sufrido un deterioro debido a la contaminación de los cuerpos de agua superficiales. Las descargas de aguas residuales sin tratamiento previo son uno de los principales factores que están deteriorando la calidad del agua y reduciendo la disponibilidad del recurso para satisfacer las necesidades de la población mexicana. De acuerdo con la Agenda Ambiental 2018 del Seminario Universitario de Sociedad, Medio Ambiente e Instituciones de la Universidad Nacional Autónoma de México, se reporta que de los 212 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales colectadas, solo el 57% reciben tratamiento antes de ser descargadas en cuerpos de agua (Merino-Pérez *et al.*, 2018).

De manera que, el tratamiento de las aguas residuales busca reducir el impacto de estas al entorno ecológico y evitar daños a la salud e higiene pública por contaminación a las aguas destinadas para satisfacer las necesidades de la población, ya sea para recreación o esparcimiento, para dar abastecimiento a

viviendas, locales comerciales, instituciones, necesidades de consumo, o para actividades económicas como la agricultura y la piscicultura.

### 1.3 TIPOS DE AGUAS RESIDUALES

Por aguas residuales, se entiende a aquellas aguas que han sido utilizadas en diferentes actividades productivas por el ser humano y presentan una alteración negativa que perjudica la calidad del recurso debido a la presencia de agentes contaminantes.

Los principales contaminantes en aguas residuales son los siguientes (López-Vázquez *et al.*, 2017):

- **Materia orgánica:** corresponde a los residuos vegetales o animales, por lo que está compuesta principalmente por proteína, carbohidratos y grasas. Esta es medida en función de la DQO (demanda química de oxígeno) y la DBO (demanda bioquímica de oxígeno).
- **Sólidos suspendidos y disueltos:** estos promueven las condiciones anaerobias en el entorno acuático donde sean vertidas las aguas residuales sin un tratamiento previo.
- **Patógenos:** principalmente bacterias del género *Escherichia*, *Salmonella*, *Streptococos*, entre otras. A su vez también persisten hongos, virus, protozoos y nematodos como los helmintos (Rojas, 2002).
- **Nutrientes:** los más persistentes en las aguas residuales son el nitrógeno, el fósforo y el carbono, este exceso de nutrientes favorece el proceso de eutrofización.
- **Compuestos inorgánicos:** entre estos compuestos los más comunes son los metales pesados, o ácidos como sulfuro de hidrógeno, bases, etc. Estos incrementan el potencial tóxico de las aguas residuales y dificultan el tratamiento de estas.

La composición de las aguas residuales depende del uso que se le haya dado al recurso hídrico, de modo que, estas se clasifican según su origen.

El agua residual industrial se refiere a aquellas que fueron generadas en procesos industriales, tales como fábricas, laboratorios, minería, plantas de producción de acero, fabricación de textiles, industria cementera, producción de pinturas, colorantes, etc., por lo que estas aguas generalmente contienen sustancias químicas, detergentes y metales pesados tales como el plomo, cadmio, níquel, cadmio y mercurio, los cuales son sustancias tóxicas que además de que persisten en el medio ambiente y comprometen el equilibrio ecológico de los ecosistemas, dificultan el tratamiento de las aguas residuales.

Por otro lado, el agua residual agrícola es aquella que se generó a partir de actividades agrícolas, por lo tanto, está contaminada con residuos provenientes de fertilizantes y pesticidas que se utilizan en cultivos. Puede provenir del riego, drenaje de campos, lavado de equipos y herramientas agrícolas. Estas aguas tienen un alto contenido de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo provenientes de los fertilizantes, además de materia orgánica, sedimentos y patógenos.

Las aguas residuales domésticas son solo aquellas que se recolectan del uso de las viviendas , mientras que las aguas residuales municipales son aquellas que resultan de las casas, departamentos, establecimientos públicos y de la escorrentía pluvial que se recolecta en el drenaje. Sus principales características son que contienen una carga elevada de materia orgánica, proveniente de residuos animales, vegetales, grasas, etc., una carga microbiológica diversa de bacterias, como coliformes fecales, hongos y protozoarios, además de un exceso de elementos como el nitrógeno y el fósforo (Eco-Intellutions, 2019). Sin embargo, la composición de las aguas residuales municipales varía de una ciudad a otra, incluso, en una misma ubicación puede variar con el tiempo, esto no solo se debe a las cantidades de las sustancias vertidas, sino también al contenido de agua pluvial que ésta tenga, ya que estas diluyen las aguas residuales provenientes de los hogares y establecimientos (López-Vázquez *et al.*, 2017).

#### **1.4 TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL**

El tratamiento de las aguas residuales hace referencia a un conjunto de procesos en los cuales se pretende disminuir la carga de contaminantes que éstas tienen, y aunque no es posible deshacerse completamente de la contaminación, se busca desviarla a un contexto más aceptable antes de ser reutilizada o descargada en cuerpos receptores de agua. En un inicio el tratamiento se desarrolló como consecuencia de la relación entre la contaminación de los cuerpos de agua y el riesgo a la salud pública, sin embargo, hoy en día el tratamiento de aguas residuales ha hecho posible la obtención de subproductos de utilidad como abono, combustibles, bioplásticos, y el reúso del agua para ciertas actividades, además de la preservación y protección de cuerpos de agua (CONAGUA, 2019).

Para alcanzar una calidad requerida y lograr una remoción considerable de contaminantes en el tratamiento de aguas residuales es necesaria la combinación de una variedad de procesos físicos, químicos y biológicos, los cuales se realizan en distintas etapas del tratamiento, como el tratamiento preliminar o pretratamiento, tratamiento primario, secundario, terciario y desinfección, donde para tratamientos de efluentes líquidos se suelen categorizar en el tratamiento primario operaciones de tipo físico o fisicoquímico, en el secundario procesos biológicos y el tratamiento terciario incluye normalmente reacciones químicas o de desinfección.

El origen del agua residual determina el contenido de contaminantes presentes en ella, lo cual es importante considerar al momento de seleccionar los procesos de tratamiento, además del reúso al que éste destinado el efluente tratado, ya que de esto depende la calidad mínima requerida del agua posterior a su tratamiento (Rojas, 2002).

Es importante mencionar que las aguas residuales tratadas deben cumplir con ciertos valores máximos permisibles de contaminantes según normas y estándares nacionales e internacionales. En México, existen las Normas Oficiales Mexicanas relacionadas con el tratamiento de aguas residuales, donde se especifican los límites máximos permisibles según el uso que se le vaya a dar al agua tratada o el

cuerpo receptor de agua donde vaya a ser descargada (López-Vázquez *et al.*, 2017).

#### 1.4.1 Tratamientos físicos

El objetivo de este tipo de proceso es la remoción de una parte importante de material sedimentable o flotante, por lo que estos métodos dependen de las propiedades físicas de los contaminantes como el tamaño de partícula, la viscosidad, etc. Entre los métodos más utilizados se encuentra la filtración de sólidos por medio de tamices y filtros gruesos, trituración, desarenadores, sedimentación, flotación y floculación. Estos métodos suelen realizarse en el tratamiento preliminar o pretratamiento, el cual tiene el propósito de acondicionar las aguas residuales para incrementar la eficiencia de los procesos subsecuentes del tratamiento (Rojas, 2002).

Algunos de los métodos van de la mano de métodos o procesos que requieren una reacción química, por lo que se pueden clasificar como tratamientos fisicoquímicos, como es el caso de la floculación y coagulación.

#### 1.4.2 Tratamientos químicos

Los tratamientos químicos tienen la finalidad de remover nutrientes, metales pesados y compuestos orgánicos y la desinfección del efluente antes de ser reusado o descargado en cuerpos receptores. Constan de reacciones químicas y suelen ser procesos aditivos, es decir que para la remoción de algún contaminante en el agua es necesario la adición de otra sustancia. Los principales procesos son la coagulación, la oxidación avanzada, intercambio iónico, desinfección oxidativa y la neutralización química (Marín-Galvín, 2012).

### 1.4.3 Tratamiento biológico

El tratamiento biológico se basa en la capacidad que tienen los microorganismos para metabolizar y convertir la materia orgánica biodegradable, ya sea en sólidos sedimentables que puedan ser separados por sedimentación, en tejido celular nuevo o en distintos gases. Son los métodos preferidos para el tratamiento de aguas residuales ya que además de que destruyen los contaminantes transformándolos en sustancias inofensivas, tienen mayor rendimiento y menor costo económico. En función de lo anterior, los procesos biológicos más utilizados son los lodos activados, filtros percoladores, lagunas airadas, biodigestión anaerobia.

El tipo de microorganismos que llevaran a cabo la depuración de la materia orgánica presente en el agua residual depende de la ausencia o presencia del oxígeno, ya que esto condiciona el ambiente aerobio, anóxico o anaerobio que va a permitir el desarrollo óptimo de la biocenosis o comunidad de microorganismos, donde el sustrato de la misma sería la contaminación presente en el agua residual (Arnáiz *et al.*, 2000; Mejía-López *et al.*, 2017).

#### 1.4.3.1 Procesos aerobios

En los procesos aerobios, el oxígeno debe estar disponible como oxígeno libre disuelto, ya que esto es fundamental durante el proceso. Lo anterior se debe a que los microorganismos que van a depurar los contaminantes presentes en el agua consumen la materia orgánica (amoníaco y fosfato) y utilizan el oxígeno disuelto, el cual si no se repone detiene el crecimiento microbiano y provoca la muerte de los microorganismos por falta de oxígeno. Es por esto que el oxígeno disuelto disponible es el principal factor que limita la eficiencia de los procesos biológicos aerobios. Los subproductos generados suelen ser simples como el dióxido de carbono y el agua, sin embargo, se genera nueva materia microbiana o nuevas células que es necesario remover periódicamente para que el proceso de tratamiento sea terminado (Arenas-López, 2005).

Los procesos aerobios biológicos más utilizados en el tratamiento de agua residual son los lodos activados, lagunas aireadas (nitrificación de cultivos en suspensión), filtros percoladores, biofiltros activados y la desnitrificación de película fija (Núñez-García *et al.*, 2023).

#### 1.4.3.2 Procesos anaerobios

Estos procesos solo tienen lugar en ausencia de oxígeno, por lo que al no tener que suministrar oxígeno suelen ser más económicos y tienen menor requerimiento energético. Además de que se genera menor fango biológico en comparación con el tratamiento aerobio. Sin embargo, en estos sistemas el influente requiere un mayor tiempo de retención hidráulica, lo que impide el tratamiento de grandes volúmenes de aguas residuales. Aunado a lo anterior, otra desventaja de estos procesos es que el efluente generado contiene grandes concentraciones de compuestos tóxicos que causan problemas al ambiente, por lo que requiere de un postratamiento antes de ser descargado en cuerpos receptores o para su reúso.

Los microorganismos anaerobios que van a trabajar en la depuración de la materia orgánica no requieren de oxígeno por que utilizan otro elemento como aceptor final en la cadena de electrones, y los productos generados después de su metabolismo son el dióxido de carbono y el metano, además de las nuevas células generadas o biomasa (Arnáiz *et al.*, 2000; Arenas-López, 2005).

Los procesos anaerobios utilizados en el tratamiento de aguas residuales son la digestión anaerobia, el proceso anaerobio de contacto, manto de fango anaerobio de flujo ascendente y el filtro anaerobio (Núñez-García *et al.*, 2023).

#### 1.4.3.3. Procesos anóxicos

Los procesos anóxicos son aquellos que se realizan en ausencia de oxígeno, y se diferencian de los procesos anaerobios por que el aceptor final de electrones es son los nitritos, nitratos, sulfatos y el hidrógeno.



En los procesos anóxicos donde los nitritos y nitratos son los receptores de electrones, el nitrógeno del nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) es convertido a nitrógeno gas, en la ausencia de oxígeno, lo cual permite la eliminación biológica del nitrógeno del agua residual, a este proceso se le conoce como desnitrificación biológica (Arnáiz *et al.*, 2000; Arenas-López, 2005).

## **1.5 FILTROS BIOLÓGICOS**

Son empleados como una forma de tratamiento biológico de aguas residuales y consisten en un lecho filtrante o una fase sólida que sirve como medio de soporte para la formación de una biopelícula, donde, los microorganismos en ella se encargaran de la depuración del agua residual o bien de la degradación de la materia orgánica disuelta.

Estos cumplen una doble función como proceso físico-biológico, en donde los sólidos suspendidos son retenidos por el lecho filtrante y la biopelícula permite la degradación de la materia orgánica disuelta en el agua residual. La formación de esta dependerá de las condiciones bajo las cuales se mantendrá el tratamiento, se trate de un ambiente aerobio o anaerobio, la comunidad microbiana crecerá será diferente.

El modo de funcionamiento de los filtros biológicos aireados consta en hacer pasar el agua residual a través del filtro empacado, sobre el cual se formará una biopelícula microbiana específica para el agua residual a tratar, y proveer un flujo constante de aire que proporcionará oxígeno al sistema (González-Gutiérrez de Lara, 2017).

### **1.5.1 Soportes**

La finalidad de un medio de soporte es permitir la acumulación de microorganismos que formen una biopelícula y fungir como una barrera física para sólidos suspendidos, es por ello que la selección del material incide directamente en la efectividad del tratamiento biológico.

De acuerdo con varios autores, la selección de un material de soporte se basa en el cumplimiento de ciertas características, entre ellas, un área superficial específica para la adherencia celular, estabilidad química y biológica, facilidad de operación, baja resistencia al flujo de agua, buena resistencia mecánica a la presión y abrasión, y alta capacidad de atrapar sólidos suspendidos (Botello-Suárez *et al.*, 2016; González-Gutiérrez de Lara, 2017). Además de considerar la rugosidad y porosidad del material, los cuales son factores importantes en la adhesión de microorganismos, ya que aquellos materiales que presenten mayor rugosidad disponen de más espacio para la adhesión de la biopelícula y la porosidad incide en el tiempo de retención celular y en la concentración de la biomasa (Mendoza-Espinoza & Stephenson, 1999).

La utilización de nuevos materiales de soporte, ya sean naturales o sintéticos, representa una alternativa para optimizar sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales, ya que su implementación ha permitido alcanzar diferentes grados de eficiencia en procesos de tratamiento y el éxito de estos depende de la selección de un material de soporte idóneo, el cual garantice la formación y viabilidad de una biopelícula metabólicamente activa, a su vez la selección de dicho material debe estar relacionada con los objetivos que quieran alcanzar con el tratamiento (Botello-Suárez *et al.*, 2016).

### 1.5.2 Biopelículas

Una biopelícula se puede definir como una estructura compleja formada una comunidad de microorganismos adheridos a una superficie o material que puede ser de origen natural o sintético. Esta estructura está formada por una matriz extracelular compuesta por polisacáridos, proteínas, lípidos, entre otros biopolímeros extracelulares producidos por la misma comunidad microbiana (González-Brambila *et al.*, 2008; Lapo *et al.*, 2014).

La variedad de las diferentes especies de microorganismos que formen la biopelícula depende de las características del líquido residual a tratar, la carga orgánica, la disponibilidad de oxígeno, lo que determina si se trata de una

comunidad que crece en condiciones aerobias o anaerobias y del medio de soporte sobre el que se desarrolle, ya que este debe poseer ciertas propiedades que permitan la adherencia de los microorganismos y que estos formen una biopelícula metabólicamente activa, entre esas propiedades están la rugosidad y la porosidad. Las superficies rugosas además de que tienen una mejor retención de sólidos producen biopelículas más estables ya que proveen de más sitios para la colonización de la película biológica, lo que va de la mano con el grado de porosidad de un material, puesto que es un factor importante en la fijación de microorganismos a dicho material de soporte (González-Gutiérrez de Lara, 2017).

El crecimiento de la biopelícula se lleva a cabo en etapas después de que se cumple con la afinidad “microorganismo – superficie del material”, de acuerdo con varios autores, las etapas son las siguientes (Farinati, 2016; González-Gutiérrez de Lara, 2017; Ortega-Peña & Hernández-Zamora, 2018):

- Adherencia: en esta etapa ocurren dos procesos en orden, los cuales son la atracción, que ocurre cuando los microorganismos son atraídos mediante fuerzas fisicoquímicas a una superficie, y la adhesión, la cual es irreversible y ocurre después de que las células microbianas se han depositado en esa superficie, esto se debe a que las moléculas constitutivas de la pared microbiana son las responsables de esa adhesión.
- Colonización o agregación: hace referencia a cuando se adicionan más microorganismos a la biopelícula ya formada, los cuales pueden aprovecharla como soporte para su crecimiento.
- Estabilización: también conocida como la etapa de maduración ya que es cuando en la biocenosis se estabilizan las relaciones entre los microorganismos que la forman y estos comienzan a multiplicarse. Además de que en esta etapa ocurren cambios morfológicos y metabólicos de los microorganismos en el interior de las biopelículas.
- Desprendimiento o dispersión: en esta etapa la biopelícula tiene una alta actividad metabólica y tiene lugar la dispersión de células, las cuales pueden iniciar la formación de una nueva biopelícula en otra superficie.

En los últimos años, se han realizado investigaciones relacionadas con la eficiencia de las biopelículas en el tratamiento de aguas residuales, donde el efluente actúa como el sustrato de la biocenosis mantenida en reactores biológicos, los cuales deben mantener ciertas condiciones ambientales para el desarrollo óptimo de la comunidad de microorganismos. Se ha comprobado que las biopelículas poseen ventajas sobre microorganismos suspendidos, lo cual se debe a que tienen mayor tasa de crecimiento, mayor incremento en la actividad metabólica y mayor persistencia dentro del sistema, además de que, al implementar un biofiltro de lecho fijo, la cantidad de biomasa que es necesario remover es menor que reactores con células suspendidas (Arnáiz *et al.*, 2000; González-Brambila *et al.*, 2008; Muñoz *et al.*, 2016).

## 1.6 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRAÚLICA

Es un factor que influye directamente en la eficiencia de un tratamiento de aguas residuales, se refiere al tiempo que permanece el agua en el reactor, tiempo de residencia o retención en los procesos biológicos. Está definido entre el volumen ocupado por el agua y el caudal o flujo volumétrico de ingreso, como se representa en la siguiente ecuación:

$$TRH = \frac{V_{agua} (m^3)}{Q(m^3 / h)}$$

Donde:

$V_{agua}$  = volumen ocupado por el agua ( $m^3$ )

$Q$  = Caudal de entrada o flujo volumétrico ( $m^3/h$ )

Es importante considerar que el valor del caudal de metros cúbicos sobre hora puede cambiar según convenga.

Su importancia se debe a que, el agua residual al permanecer por un tiempo prolongado en el reactor tiene una mayor exposición a los procesos de tratamiento

y degradación de materia realizados por la biocenosis (González-Gutiérrez de Lara, 2017; Cedeño-Benavides & Lascano-Zambrano, 2023).

Por otro lado, existen otros factores que pueden incidir directamente en la eficacia de los procesos biológicos, como la temperatura, la oxigenación y la carga orgánica (González-Gutiérrez de Lara, 2017).

## **1.7 TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL MUNICIPAL MEDIANTE FILTROS BIOLÓGICOS**

Durante las últimas dos décadas en América Latina se han realizado proyectos de investigación relacionados al tratamiento de agua residual municipal mediante filtros biológicos, donde se evalúan la eficiencia de distintos medios filtrantes, cargas orgánicas, caudales, tiempos de retención hidráulica, entre otros.

En el año 2005, en un estudio realizado por Valdivia *et al.* se instaló una planta piloto para la remoción de materia orgánica de aguas residuales domésticas con un filtro combinado con lecho de tezontle, en donde se alcanzaron remociones del 69 y 80% con una carga orgánica de 8 y 5 g DQO/m<sup>2</sup>·d, respectivamente. Posteriormente en el año 2007, Chávez-Rivero *et al.* trabajaron con un biodigestor para tratar aguas residuales de la planta de pollo Tyson S.A de C.V. mediante un biofiltro, donde el medio de soporte fue un material orgánico, el cardenche (*Opuntia imbricata*) fue seleccionado por su porosidad y disponibilidad. Para la formación de la biopelícula, el material se mantuvo en contacto con el agua residual por dos meses, en el biodigestor se introdujo el influente por la parte inferior para tener un flujo ascendente y se mantuvo una corriente de aire comprimido para oxigenar y mantener un ambiente aerobio, durante el experimento se evaluaron diferentes caudales para probar distintas cargas orgánicas (Chávez-Rivero *et al.*, 2007).

Por otro lado, González-Martínez *et al.* (2010), realizaron un estudio para demostrar que las partículas de piedra volcánica, mejor conocidas en México como tezontle, pueden ser utilizadas para el tratamiento de aguas residuales municipales mediante un método conocido como filtración combinada, donde el tezontle

cumplirá una doble función, como tratamiento biológico, ya que en él se formará una biopelícula encargada de la degradación de materia orgánica y contaminantes, mientras que a la vez funcionará como un método de filtración. En esta investigación, la remoción de DQO más alta que obtuvieron fue del 81% con una carga orgánica de 0.8 kg DQO/m<sup>3</sup>·d., y demostraron que el tiempo de retención celular depende de la frecuencia de retrolavado y no tanto de factores biológicos o químicos. El tiempo de retención hidráulica lo mantuvieron entre 0.94 y 1.3 horas, sin embargo, no lo manejaron como uno de los factores importantes a evaluar en comparación la carga orgánica, la cual si consideraron de mayor importancia para discutir sus resultados (González-Martínez *et al.*, 2010).

En el 2012, Cáceres publicó un trabajo de investigación “Implementación de material de desecho PET como elemento filtrante en filtros biológicos”, en el cual se concluyó que dicho material puede ser utilizado como elemento filtrante de manera exitosa, alcanzando eficiencias de remoción de DBO<sub>5</sub> y DQO superiores al 90%. Antes de este trabajo de investigación no se había trabajado con el PET como un material de soporte para una biopelícula y elemento filtrante, por lo que fue una aportación importante para darle un segundo uso al plástico contaminante, y de esta forma conocer la posible aplicación del material para el tratamiento de aguas residuales y las ventajas que este ofrece en lo técnico y económico (Cáceres, 2012).

García-Santana y González-Martínez (2015), publicaron un trabajo donde se evaluó el desempeño de un filtro biológico combinado, en tal investigación se trataron las aguas residuales de una ciudad universitaria y de una colonia aledaña, se trabajó con tezontle como medio filtrante y protozoarios ciliados como indicadores biológicos, ya que se comprobó que existe una relación entre los contaminantes orgánicos y la presencia de estos. Además, se concluyó que el filtro tuvo mayor eficiencia con una carga orgánica de 7 g DQO/m<sup>2</sup>·d (González-Martínez & García-Santana, 2015).

En uno de los trabajos más recientes denominado “Nivel de calidad de la demanda bioquímica de oxígeno del proceso de filtros biológicos” publicado en abril del 2023, se implementó un filtro biológico empacado con carbón vegetal con el

objetivo de mejorar el proceso de una planta de tratamiento de agua residual municipal en Perú, la cual presentaba deficiencia en los resultados de la DBO del efluente, los cuales excedían el límite máximo permisible llegando a 185 mg/L. Se logró mejorar el nivel de calidad bioquímica de oxígeno, ya que se obtuvieron valores por debajo de 100 mg/L de calidad de DBO, lo cual cumple con los límites permisibles para aguas residuales y con ello se comprueba que el filtro biológico vegetal cumple con disminuir la carga orgánica del agua residual municipal en el proceso de tratamiento (Chavarría-Márquez *et al.*, 2023).

## CAPÍTULO II

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 2.1 LOCALIZACIÓN

El experimento se realizó en el laboratorio de Biología perteneciente al Departamento de Botánica de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México en las coordenadas geográficas indicadas a 25°21'12" N 101°01'50" W y a 1785 metros sobre el nivel del mar.

#### 2.2 METODOLOGÍA

##### 2.2.1 Descripción y operación del biofiltro

Sistema de tratamiento que consta de una sola cámara en la cual el tratamiento de agua residual realizado por microorganismos aerobios, con un volumen de trabajo total de 3.7 L. Se utilizaron tubos de PVC y piezas impresas en 3D de PLA (ácido poliláctico) para su construcción.



**Figura 1.** Biofiltro aerobio.



Se colocaron 12 piezas de fieltro de grafito de 8.5 cm de diámetro, los cuales a su vez contenían 10 perforaciones de 0.5 cm de diámetro a lo largo del área, las cuales funcionaban como filtro y proporcionaban soporte a los microorganismos durante el proceso, estos discos de fieltro de grafito se colocaron en la parte media del compartimento y se colocó encima de ellos un disco de malla de acero inoxidable para evitar su flotación en el medio.

El flujo de agua se realizó mediante el uso de una bomba peristáltica Watson-Marlow Limited 101U/R y la administración del flujo de aire para la parte catódica se realizó utilizando una bomba de pecera que administraba un flujo de aire de 2 L/min el cual entraba al sistema mediante una manguera de silicón acoplada a un difusor el cual fue impreso en 3D con PLA.

El tratamiento de agua residual municipal se realizó a distintos TRH (tiempos de retención hidráulica) los cuales se establecieron a 48 h, 36 h, 24 h y 12 h, evaluando cada uno de ellos por un período de 168 h durante los meses de enero a abril del 2024.

Para evaluar la eficiencia de remoción del biofiltro aerobio, se llevaron a cabo diversos parámetros, los cuales son: demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, huevos de helmintos, coliformes totales y fecales. Cada uno de los parámetros se midieron tanto de la muestra del influente (agua residual sin tratamiento) y como del efluente (agua tratada). La demanda química de oxígeno fue medida diariamente mientras que los parámetros restantes solo fueron medidos al inicio y final.

### 2.2.2 Agua residual municipal

El agua residual municipal utilizada para el tratamiento se obtuvo de la Planta Tratadora del Bosque Urbano de Saltillo, en períodos de recolección que abarcaron desde octubre del 2023 a abril del 2024.

### 2.2.3 Parámetros evaluados

Se evaluó la influencia del tiempo de retención hidráulica (TRH) en la remoción de la demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, huevos de helmintos, coliformes totales y fecales.

#### 2.2.3.1 Demanda química de oxígeno

La demanda química de oxígeno (DQO), es un indicador que permite determinar la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua residual, por lo tanto, los ensayos de DQO miden la materia orgánica presente en una muestra mediante una reacción de oxidación (Secretaría General de la Comunidad Andina *et al.*, 2008; CONAGUA, 2019).

De acuerdo con la norma mexicana NMX-AA-030-2-SCFI-2011, el principio químico para determinar la DQO consiste en que “las muestras se oxidan mediante digestión con ácido sulfúrico y dicromato de potasio en presencia de sulfato de plata y sulfato de mercurio”, donde la plata actúa como el catalizador que va a oxidar la materia orgánica, mientras que el mercurio reduce la interferencia que causan los iones cloruro (NMX-AA-030-2-SCFI-2011).

Siguiendo los siguientes pasos se llevó a cabo el método:

1. Añadir 1.5 mL de la solución de dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) y 3.4 mL de la solución ácido de plata ( $H_2SO_4-AgSO_4$ ) en un tubo HACH. Tapar bien y mezclar.
2. Agregar 2.5 mL de la muestra al tubo HACH y para el blanco agregar 2.5 mL de agua destilada.
3. Realizar dilución 1:10 para agua cruda o muestras muy contaminadas, agregando 250  $\mu$ L de muestra y 2.25 mL de agua destilada.
4. Cerrar bien y agitar lentamente para mezclar. Limpiar los tubos por fuera con papel húmedo.
5. Colocar los tubos en un digestor durante dos horas (120 min) a 150°C.
6. Dejar que los tubos se enfríen a temperatura ambiente y si no se leen al momento, guardarlos en un lugar oscuro.

7. Limpiar los tubos con un papel húmedo.
8. Leer la absorbancia en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 620 nm y calcular la concentración de la DQO con la curva estándar.



**Figura 2.** Digestor.

Los reactivos utilizados para realizar esta técnica son los siguientes: dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ), ácido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ ), Disolución de sulfato de mercurio (II) ( $HgSO_4$ ), sulfato de plata ( $Ag_2SO_4$ ).

Mientras que los materiales y equipos utilizados fueron: placas de calentamiento CIMAREC, gradilla, digestor HACH DRB/ 200, tubos con tapón de rosca (HACH), espectrofotómetro HACH DR/5000 y micropipeta ecopipette by CAPP 1-5 mL.

El método descrito oxida casi todos los tipos de compuestos orgánicos y la mayoría de los agentes reductores inorgánicos, por lo que el valor de la DQO obtenido proporciona una idea del contenido orgánico total de una muestra de agua sea o no biodegradable, es por tal motivo que la DQO puede separarse en total y en soluble, donde esta última representa solo la fracción biodegradable (CONAGUA, 2019).

### 2.2.3.2. Demanda bioquímica de oxígeno

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) determina la cantidad de oxígeno consumido por los microorganismos para descomponer (oxidar) la materia orgánica presente en una muestra de agua (CONAGUA, 2019).

De acuerdo con la norma mexicana NMX-AA-012-SCFI (NMX-AA-028-SCFI-2021), el principio del método empleado se basa en “en medir la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para efectuar la oxidación de la materia orgánica presente en aguas naturales y residuales y se determina por la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el oxígeno disuelto al cabo de cinco días de incubación a 20°C.”

En el proceso de oxidación bioquímica, los microorganismos utilizan las sustancias contaminantes presentes en el agua como una fuente de carbono, mientras consumen el oxígeno disuelto en el agua para su respiración. Este oxígeno disuelto se define como la cantidad efectiva de oxígeno gaseoso (O<sub>2</sub>) en el agua, expresado como mg/ L.

El procedimiento que se llevó a cabo para determinar la DBO fue el siguiente:

1. Por muestra usar un frasco Winkler para OD<sub>i</sub> y otro para OD<sub>5</sub>. Realizar duplicado de las muestras y del blanco.
2. Preparar el agua de disolución (AD) necesaria (320 mL/frasco).
3. Determinar la dilución a utilizar: agua cruda 1% (3 mL), 0.1% (300 mL) de muestra y para agua tratada 10% (30 mL) y 1% (3 mL) de muestra.
4. Con ayuda de una pipeta, vaciar la muestra en el frasco Winkler correspondiente.
5. Llenar el frasco Winkler con AD hasta el esmerilado. Colocar el tapón, sostener bien y mezclar lentamente varias veces hasta eliminar el excedente.
6. Incubar los frascos para OD<sub>5</sub> a 20°C durante cinco días.
7. Tanto para OD<sub>i</sub> como para OD<sub>5</sub> (después de incubar) añadir a cada frasco Winkler 2 mL de MnSO<sub>4</sub>, inmediatamente agregar 2 mL de yoduro azida de sodio.

8. Colocar el tapón del frasco Winkler, sostener bien y mezclar varias veces, eliminar el excedente.
9. Agregar 2 mL de  $H_2SO_4$ . Colocar el tapón del frasco Winkler, sostener bien y mezclar varias veces, eliminar excedente.
10. En una bureta, colocar el tiosulfato de sodio para realizar la titulación.
11. Medir 100 mL de la muestra y colocarla en un matraz Erlenmeyer.
12. La titulación se lleva a cabo mezclando con agitación magnética.
13. Dejar caer un poco de tiosulfato de sodio para aclarar el tono amarillo de la muestra.
14. Agregar de 5-10 gotas de indicador de almidón hasta que la solución tome un color azul.
15. Agregar nuevamente tiosulfato de sodio lentamente hasta la desaparición de color.
16. Detener el flujo al primer cambio de coloración y medir el tiosulfato de sodio gastado en la titulación.



**Figura 3.** Titulación con tiosulfato.

Los reactivos utilizados para realizar esta técnica son los siguientes: fosfato monobásico de potasio ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), fosfato dibásico de potasio ( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ), fosfato dibásico de sodio heptahidratado ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), sulfato de magnesio heptahidratado ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), cloruro de calcio anhidro ( $\text{CaCl}_2$ ), cloruro férrico hexahidratado ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), ácido sulfúrico concentrado ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ), sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ), 2-cloro-6 (tricolorometil) piridina, glucosa grado patrón primario ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ), ácido glutámico grado patrón primario ( $\text{C}_5\text{H}_9\text{NO}_4$ ), ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) y ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ).

Mientras que los materiales y equipos utilizados fueron: balanza analítica con precisión de 0.1 mg, incubador HACH 205 a  $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , bureta, parilla de agitación ANPOOZ SH-2 y agitadores magnéticos, probeta 100 mL, matraz Erlenmeyer, frascos Winkler y micropipeta ecopipette by CAPP 1-5 mL.

### 2.2.3.3 Huevos de helmintos

Los helmintos son gusanos parásitos, invertebrados de cuerpo alargado que se reproducen sexualmente formando huevos que dan lugar a larvas. Son indicadores de contaminación por heces fecales, debido a que usualmente los huevos son consumidos por humanos y animales, se alojan en el intestino hasta alcanzar su estadio adulto y son expulsados en las heces. Un gran número de investigaciones se han enfocado en la detección de huevos de helmintos no solo porque constituyen una etapa contagiosa, sino porque las capas de su estructura morfológica funcionan como un mecanismo de protección y resistencia a cambios de temperatura, pH e incluso a bajas concentraciones de cloro (Simón-Andréu *et al.*, 2007; Chandillo-Becoche & Sánchez-Herrera, 2020).

El método de análisis según la norma mexicana NMX-AA-113-SCFI-2012, se basa en la diferencia de densidades entre los huevos de helmintos, las demás sustancias presentes en las aguas residuales, y las que se agregan para permitir la separación. El método comprende los procesos de sedimentación, flotación, decantación y la técnica bifásica para recuperar los huevos de helminto y efectuar el conteo.

Se utilizó el método Bailenger modificado por Ayres & Mara, 1996:

Procedimiento:

1. Recolectar la muestra, 1 litro para agua residual cruda o parcialmente tratada en un recipiente de abertura ancha y paredes rectas.
2. Dejar sedimentar la muestra durante 1-2 h (agua residual cruda) o 18-24 h (agua tratada).
3. Eliminar el 90% de sobrenadante por decantación o con ayuda de una jeringa.
4. Vaciar el sedimento en uno o más tubos cónicos de centrifuga, dependiendo del volumen. Enjuagar el contenedor muy bien con la solución detergente y agregar el agua de enjuagado al sedimento.
5. Centrifugar 15 min a 250 rpm (1000 g).
6. Decantar sobrenadante. Si se ha empleado más de un tubo cónico en el paso 4, transferir todos los sedimentos a un tubo (enjuagar muy bien con la solución de detergente que no se quede sedimento alguno) y centrifugar nuevamente por 15 min a 250 rpm (1000 g).
7. Decantar sobrenadante.
8. Suspender el pellet en un volumen igual de buffer acetoacético (ej., si el volumen del pellet es de 2 mL, agregar 2 mL de buffer). Si el pellet es menor a 2 mL, agregar buffer hasta un volumen final de 4 mL.
9. Agregar dos volúmenes de éter etílico y mezclar la solución en un vórtex.
10. Centrifugar por 15 min a 250 rpm (1000 g). Se deben observar tres fases (grasa, acuosa, sedimento) (Figura 4). Toda la muestra "pesada", no grasosa, incluyendo los huevos de helminto, larvas y protozoos, estarán en la capa inferior. Encima de esto, estará el buffer, que deberá ser claro. Las grasas y otro material se mueven en el éter etílico y se forma un tapón oscuro y espeso en el fondo del vial.
11. Anotar el volumen del pellet que contiene los huevos de helmintos y vacíe el resto del sobrenadante en un solo movimiento.
12. Resuspender el pellet en 5 volúmenes de solución de sulfato de zinc. Anotar el volumen final del producto ( X mL), mezclar en el vórtex.

13. Tomar muestra con ayuda de una pipeta Pasteur y llenar una cámara McMaster.
14. Dejar la cámara en reposo en una superficie plana alrededor de 5 a 10 minutos. Esto permite que los huevos de helmintos floten.
15. Colocar la cámara en el microscopio y realizar observación y conteo de los huevecillos bajo 10x y 40x.
16. Calcular el número de huevos de helmintos por litro de la siguiente forma:

$$N = \frac{AX}{PV}$$

Donde:

N= número de huevos de helminto

A= número de huevos de helminto contabilizados en la cámara o el promedio de estos

X= volumen del producto final (mL)

P= volumen original de la muestra (litros)

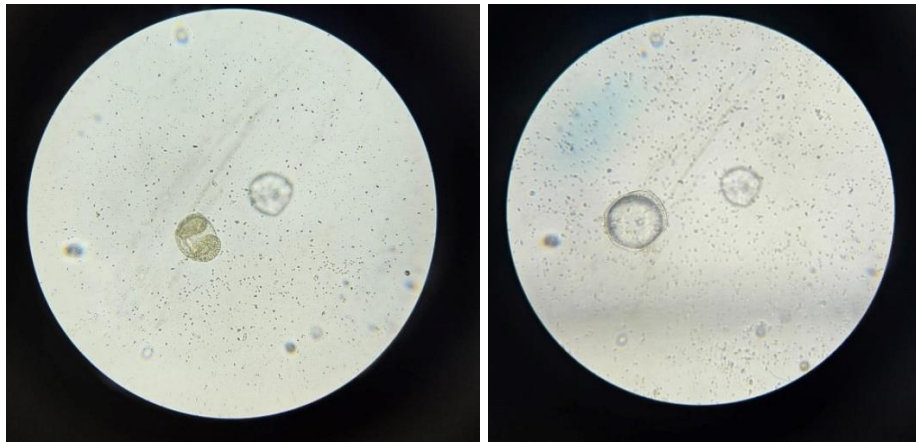


**Figura 4.** Tubo cónico donde se observan las tres fases (grasa, acuosa, sedimento).



Los reactivos utilizados para realizar esta técnica son los siguientes: solución de sulfato de zinc al 33%, éter etílico, buffer acetoacético pH 4.5 (15 g de acetato de sodio trihidratado; 3,6 mL de ácido acético glacial; aforar a 1 litro con agua destilada), solución detergente (1 mL Tritón X-100 o Tween 80, aforado a 1 litro con agua de la llave).

Mientras que los materiales y equipos utilizados fueron: centrífuga DAMON/IEC DIVISION capaz de generar 1000 g, tubos cónicos para centrifuga de 15 y 50 mL, pipetas Pasteur, cámara McMaster, vórtex SCILOGEX MX-S, probetas graduadas de 10 y 50 mL.



**Figura 5.** Fotografías tomadas a 40x donde se alcanzan a observar los huevos de helmintos.

#### 2.2.3.4 Coliformes totales y fecales

La presencia o concentración de organismos coliformes totales y fecales en una muestra de agua, es un indicador directo de contaminación por materia fecal de humanos y/o animales, lo cual se debe a que estos se encuentran en el tracto intestinal, son bacterias gramnegativas que fermentan la lactosa con producción de ácido y gas (Secretaría General de la Comunidad Andina *et al.*, 2008).

Tanto los organismos coliformes totales como los coliformes fecales son organismos aerobios o anaerobios facultativos capaces de crecer en un medio líquido de lactosa produciendo ácido y gas, la diferencia entre estos es que las coliformes totales crecen a 35°C en un período de 48 h, mientras que las coliformes

fecales (termotolerantes) en un período de 24 h a  $44.5^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$  (NMX-AA-042-SCFI-2015).

La norma mexicana NMX-AA-042-SCFI-2015, describe el método enumeración en agua de estos organismos “mediante cultivo en un medio líquido contenido en tubos múltiples y cálculo de su número más probable (NMP) en la muestra, en aguas naturales, residuales y residuales tratadas”.

El principio consiste en la “inoculación de alícuotas de muestra, diluida o no diluida, en una serie de tubos en medio líquido selectivo conteniendo lactosa.

Examen de los tubos después de 24 y 48 h incubados a  $35^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Subcultivo de cada tubo que muestre turbidez y producción de gas en un medio confirmativo más selectivo.

Incubación de estos medios confirmativos por un periodo de 24 h a 48 h  $\pm 3$  h ya sea a  $35^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  para la enumeración de organismos coliformes y de  $44,5^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$  por 22 h a 26 h para organismos coliformes termotolerantes.

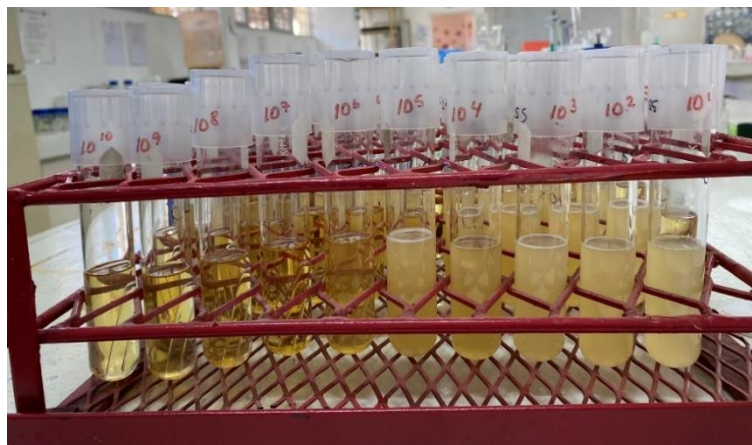
Mediante tablas estadísticas, cálculo del número más probable (NMP) de organismos coliformes y organismos coliformes termotolerantes expresadas como contenidas en 100 mL de la muestra a partir del número de tubos positivos en los resultados confirmativos.“

El procedimiento que se siguió es el descrito a continuación:

a) Prueba presuntiva

1. Realizar diluciones seriadas de  $10^1$  hasta  $10^{24}$  para agua sin tratar y  $10^1$  hasta  $10^{10}$  para agua tratada, cada una de las diluciones se realizan por triplicado (3x).
2. Marcar los tubos con la dilución y la muestra correspondiente.
3. Agregar 22.5 mL de caldo lauril lauril sulfato de sodio (CLSS) a cada tubo de ensaye (22 mL directo con un pipeta, y 0.5 mL en la campana de Durham).
4. Llenar la campana de Durham e introducirla al tubo de ensaye rápidamente por inversión, cuidando que no queden burbujas en el proceso.

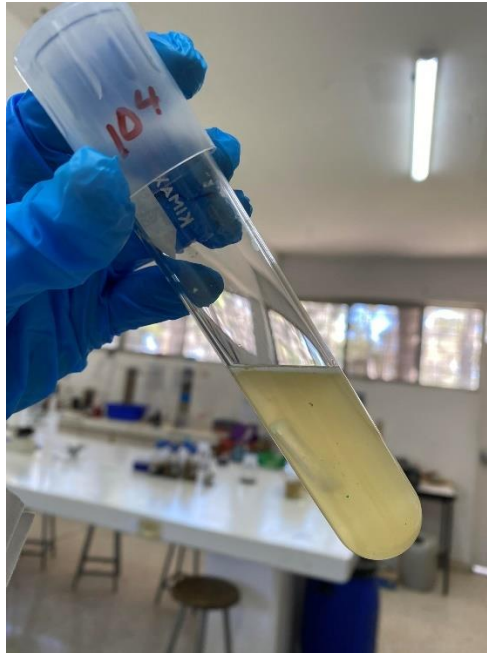
5. Colocar correctamente los tapones de plástico en la boca de los tubos de ensaye.
6. Esterilizar los tubos de ensaye con el medio de cultivo por 15 min a  $121^{\circ}\text{C}/15$  lbp.
7. Esterilizar el área a trabajar y agregar a cada tubo de ensaye correspondiente la dilución  $10^1$ , 2.5 mL de la muestra (3x). Tapar nuevamente los tubos al finalizar este paso.
8. Mezclar cada tubo en el vórtex para homogenizar la muestra con el caldo de cultivo.
9. Tomar 2.5 mL de los tubos de la dilución  $10^1$  y vaciarlo en el tubo correspondiente a la dilución  $10^2$ .
10. Mezclar cada tubo en el vórtex para homogenizar la muestra con el caldo cultivo.
11. Realizar los pasos 9 y 10 a fin de que se realicen las diluciones seriadas hasta  $10^{24}$  o  $10^{10}$  según sea el caso.
12. Incubar los tubos de ensaye a  $35^{\circ}\text{C}$  durante 24 a 48 h.
13. Observar los resultados, para considerar un tubo positivo, el medio debe presentar turbidez y debe observarse producción de gas en la campá de Durham (desplazamiento de líquido-vacío).
14. Guardar los tubos positivos y desechar los tubos negativos.



**Figura 6.** Tubos de las diluciones seriadas después de la incubación.

b) Prueba confirmativa

1. Solo se trabajará en este punto con los tubos que resultaron positivos en la prueba confirmativa.
2. Marcar los tubos con la dilución y la muestra correspondiente.
3. Agregar 24.75 mL de caldo bilis verde brillante (CBVB) a cada tubo de ensayo (24.25 mL directo con una pipeta, y 0.5 mL en la campana de Durham).
4. Llenar la campana de Durham e introducirla al tubo de ensayo rápidamente por inversión cuidando que no queden burbujas en el proceso.
5. Colocar correctamente los tapones de plástico en la boca de los tubos de ensayo.
6. Esterilizar los tubos de ensayo con el medio de cultivo por 15 min a 121°C/15 lbp.
7. Esterilizar el área a trabajar y agregar a cada tubo de ensayo con la dilución correspondiente 0.25 mL (250µL) de muestra. Tapar nuevamente los tubos al finalizar este paso.
8. Mezclar cada tubo en el vórtex para homogeneizar la muestra con el caldo de cultivo.
9. Incubar los tubos de ensayo a 35°C ±1 por 24-48 h ±3.
10. Observar los resultados, para considerar un tubo positivo, el medio debe presentar turbidez y debe observarse producción de gas en la campana de Durham (desplazamiento de líquido-vacío).
11. Analizar los resultados y compararlos con el índice del NMP y límite confiable del 95% para varias combinaciones de resultados positivos y negativos cuando se usan 3 tubos.



**Figura 7.** Tubo positivo de coliformes.

c) Prueba confirmatoria coliformes fecales

1. Solo se trabajará en este punto con los tubos que resultaron positivos en la prueba presuntiva.
2. Marcar los tubos con la dilución y la muestra correspondiente.
3. Agregar 24.75 mL de caldo EC (CEC) a cada tubo de ensaye (24.25 mL directo con una pipeta, y 0.5 mL en la campana de Durham).
4. Llenar la campana de Durham e introducirla al tubo de ensayo rápidamente por inversión cuidando que no queden burbujas en el proceso.
12. Colocar correctamente los tapones de plástico en la boca de los tubos de ensaye.
13. Esterilizar los tubos de ensaye con el medio de cultivo por 15 min a  $121^{\circ}\text{C}/15$  lbp.
14. Esterilizar el área a trabajar y agregar a cada tubo de ensaye con la dilución correspondiente 0.25 mL (250 $\mu\text{L}$ ) de muestra. Tapar nuevamente los tubos al finalizar este paso.
15. Mezclar cada tubo en el vórtex para homogeneizar la muestra con el caldo de cultivo.
5. Incubar los tubos de ensayo a  $35^{\circ}\text{C} \pm 1$  por 24-48 h  $\pm 3.4$ .

6. Observar los resultados, para considerar un tubo positivo, el medio debe presentar turbidez y debe observarse producción de gas en la campa de Durham (desplazamiento de líquido-vacío).
7. Analizar los resultados y compararlos con la tabla que se presenta a continuación, de valores de NMP por cada 100 mL de muestra (para diversas combinaciones de resultados positivos cuando se utilizan tres alícuotas de muestra de 10 mL, tres de 1 mL y tres de 0.1 mL).

**Tabla 1.** Extracción de tabla 12.1 de la NMX-AA-042-SCFI-2015, para la estimación de la densidad bacteriana de organismos coliformes, coliformes termotolerantes y *E.coli*. (NMX-AA-042-SCFI-2015).

Diseño de tubos que dieron reacción positiva			NMP por 100 mL
3 de 10 mL	3 de 1 mL	3 de 0.1 mL	
0	0	0	<3
0	0	1	3
0	1	0	3
1	0	0	4
1	0	1	7
1	1	0	7
1	1	1	11
1	2	0	11
2	0	0	9
2	0	1	14
2	1	0	15
2	1	1	20
2	2	0	21
2	2	1	28
3	0	0	23
3	0	1	39
3	0	2	64
3	1	0	43
3	1	1	75
3	1	2	120
3	2	0	93
3	2	1	150
3	2	2	210
3	3	0	240
3	3	1	460
3	3	2	1100
3	3	3	≥ 2400

Cuando la combinación de resultados obtenidos no se encuentre en tablas se aplicará la siguiente fórmula:

$$NMP/100mL = \frac{\text{No. de tubos positivos} \times 100}{\sqrt{\text{mL de muestra en tubos negativos} \times \text{mL de muestra en todos los tubos}}}$$

Los reactivos utilizados para realizar esta técnica son los siguientes: caldo lauril sulfato de sodio (CLSS), caldo lactosa verde brillante bilis, caldo EC.

Mientras que los materiales y equipos utilizados fueron: incubadora Terlab a 35 o 37°C, autoclave para esterilizar, balanza analítica, micropipeta GLASSCO 100-1000 µL y ecopipette by CAPP 1-5 mL, puntillas para pipeta (estériles), tubos de ensaye, campanas Durham (0.5 mL capacidad), tapones para los tubos.

## CAPÍTULO III

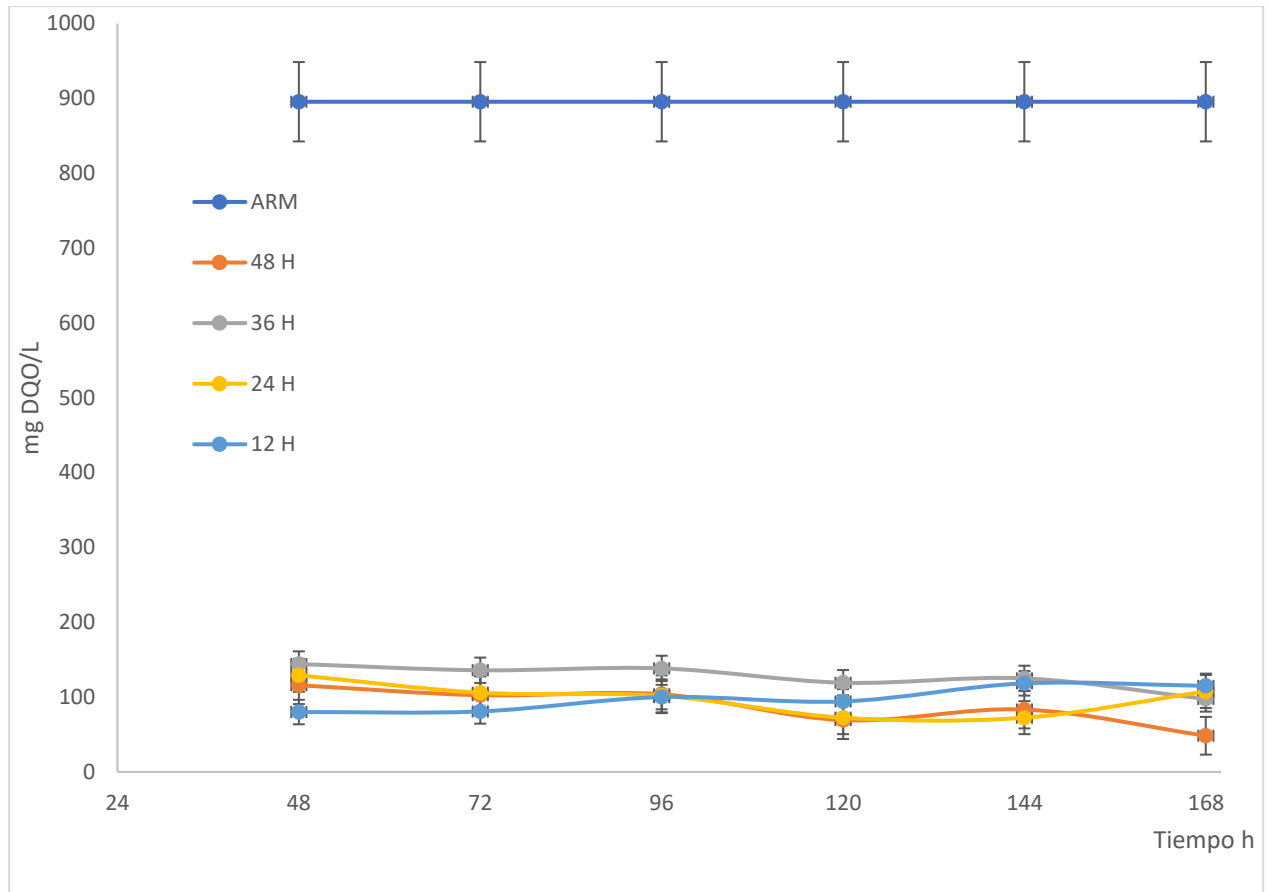
### DISCUSIÓN Y RESULTADOS

#### Demanda química de oxígeno

El tratamiento con el biofiltro aerobio se llevó a cabo durante los meses de enero a abril del 2024. El agua residual municipal recolectada durante este periodo contenía un promedio de 895.52 mg DQO/L.

El reactor fue operado a diferentes TRH (48, 36, 24 y 12 h) mantenidos por un período de tiempo de 168 h, durante dicho período se monitorearon seis ciclos (cada 24 horas) a partir de las 48 h (figura 8). Se obtuvo el porcentaje de eficiencia de remoción de la DQO (%ERDQO) de cada TRH utilizando, el valor promedio de la DQO del efluente (mg DQO/L) después de los seis ciclos de operación y comparándolos con el valor de la DQO del agua residual municipal antes de ser sometida al tratamiento. De manera que, la eficiencia de remoción promedio de la DQO fue de 89.26%, 87.51%, 90.3% y 86.59% a TRH de 48, 36, 24 y 12 h, respectivamente. Villanueva-Hernández *et al.*, (2012) obtuvieron resultados similares al trabajar con un biofiltro empacado con fibra de coco en el tratamiento de agua residual de origen doméstico a 2 diferentes TRH 48 y 24 h donde detectaron una remoción de la DQO del 80% y 75%, respectivamente. Mientras que Pérez-Rodríguez *et al.*, (2018) en su trabajo “Diseño y evaluación de un sistema secuencial bioelectroquímico para el tratamiento de agua residual municipal y generación de voltaje” evaluaron 3 diferentes TRH de 34, 38 y 72 h y reportaron una eficiencia de remoción del 58.34%, 76.88% y 91.76%.





**Figura 8.** Remoción de la DQO contenida en agua residual municipal a diferentes TRH en un biofiltro aerobio.

### Demanda bioquímica de oxígeno

Para obtener el porcentaje de eficiencia de remoción de la DBO, se tomó en cuenta los mg DBO/L del agua residual municipal (influyente) y el valor de la DBO<sub>5</sub> del efluente, obteniendo así una remoción del 90.45% para el TRH de 48 h, 87.5% para 36 h, 87.36% para 24 h y 89.5% para 12 h (tabla 2). Cáceres (2012), obtuvo datos similares en su trabajo “Implementación de material de desecho PET como elemento filtrante en filtros biológicos” donde lograron eficiencias de remoción superiores al 90% tanto para DQO como para DBO<sub>5</sub>. Por otro lado, Pérez-Rodríguez *et al.*, (2018) reportaron una remoción de DBO<sub>5</sub> del 90.6%, 64.91% y 75.27% para TRH de 24, 48 y 72 h al trabajar con un SBE de doble compartimento en el tratamiento de agua residual municipal.

**Tabla 2.** Valores de la DBO (mg DBO/L) del agua residual municipal y del SAE (efluente).

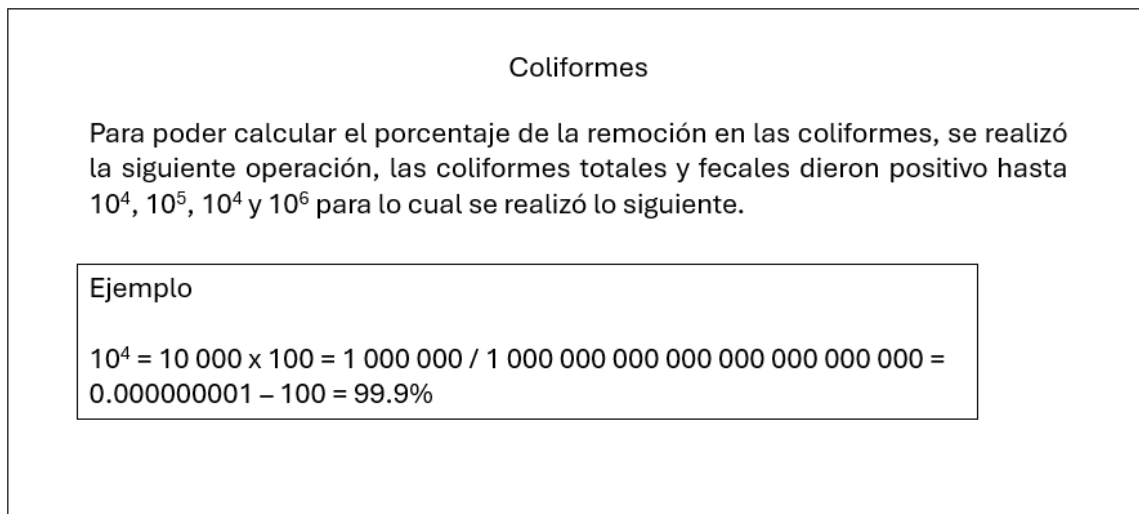
<b>TRH</b>	<b>ARM</b> (mg DBO/L)	<b>SAE</b> (mg DBO/L)	<b>%ERDBO</b>
48 h	445.795	42.553	90.455
36 h	405.268	50.659	87.500
24 h	385.005	48.632	87.368
12 h	405.268	42.553	89.500

### Coliformes totales y fecales

Los resultados de la concentración de coliformes totales y fecales del influente y efluente fueron mayor a 2400 NMP/100 mL (dilución hasta  $10^3$ ), por ello se decidió realizar diluciones hasta  $10^{24}$  para el influente y  $10^{10}$  para el efluente, de manera que se pudiera apreciar si hubiese una remoción de coliformes a pesar de no cumplir con los límites mismos permisibles de la NMX-AA-042-SCFI-2015. En la tabla 3 se reflejan los resultados de porcentaje de eficiencia de remoción de coliformes fecales en cada TRH evaluado, donde en la columna de ARM se refleja que la concentración de coliformes totales dio positivo hasta  $10^{24}$ , mientras que en el efluente del sistema aerobio (SAE) se proyecta la diferencia que tuvieron cada uno de los TRH en los resultados de la concentración de las coliformes. Siendo así que, para los TRH de 48, 26, 24 y 12 h, la concentración en el efluente dio positivo hasta  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^4$  y  $10^6$ , respectivamente. Para calcular el %ERCF se realizó la operación señalada en la figura 9, de manera que el biofiltro aerobio removió un 99.99% de coliformes totales y fecales con cada TRH evaluado. Por ello, en este caso los valores de la concentración de coliformes ofrecen más información sobre cual TRH tuvo mayor eficiencia en la remoción de coliformes totales y fecales. Pérez-Rodríguez *et al.*, (2018) reportaron resultados similares en la concentración de coliformes fecales (NMP/100 mL) en el efluente e un sistema bioelectroquímico de doble cámara a  $10^6$ ,  $10^3$  y  $10^3$  en TRH de 24, 48 y 72 h, respectivamente.

**Tabla 3.** Porcentaje de eficiencia de remoción de coliformes fecales a los distintos TRH

TRH	ARM	SAE	%ERCF
48 h	1.E+24	1.E+04	100.000
36 h	1.E+24	1.E+05	100.000
24 h	1.E+24	1.E+04	100.000
12 h	1.E+24	1.E+06	100.000



**Figura 9.** Operación matemática llevada a cabo para calcular el porcentaje de la remoción en las coliformes.

### Huevos de helmintos

La remoción de huevos de helmintos (HH/L) se obtuvieron resultados de eficiencia de remoción del 80.92%, 68.75%, 56.73% y 84.46% en los TRH de 48, 36, 24 y 12 respectivamente. Sin embargo, al comparar con los resultados publicados por Pérez-Rodríguez *et al.*, (2018), donde se puede apreciar que a un menor TRH hay menor remoción de huevos de helmintos, se deduce que hubo un error de análisis al presentar un porcentaje de eficiencia de remoción tan alto en el TRH de 12 h.

**Tabla 4.** Porcentaje de eficiencia de remoción de huevos de helmintos a distintos TRH

<b>TRH</b>	<b>ARM (HH/L)</b>	<b>SAE (HH/L)</b>	<b>%ERHH</b>
48 h	5820	1110	80.92
36 h	6240	1950	68.75
24 h	6240	2700	56.73
12 h	7530	1170	84.46

## CONCLUSIÓN

Los resultados del trabajo de tesis muestran la influencia del tiempo de retención hidráulica en la remoción de la demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, huevos de helmintos, coliformes totales y fecales en el tratamiento de agua residual municipal mediante un biofiltro aerobio. La hipótesis de que el biofiltro tendría una alta eficiencia de remoción de todos los parámetros evaluados directamente proporcional al tiempo de retención hidráulica se refuta, ya que no se apreció una relación proporcional de todos los parámetros antes mencionados, ejemplo de ello es que en los TRH de 48 y 12 h se obtuvieron resultados similares de remoción de DBO<sub>5</sub>, DQO y huevos de helmintos, con excepción de las coliformes fecales. Por ello se concluye que el TRH de 12 h es la opción más adecuada debido a que proporciona resultados eficientes de remoción de DQO, DBO<sub>5</sub>, huevos de helmintos y coliformes fecales del 89%, 89.5%, 84.46% y 99.9%, respectivamente, es decir que ofrece una alta eficiencia de remoción en un menor tiempo de operación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arango Ruiz, Á. (2004). La biofiltración, una alternativa para la potabilización del agua. *Revista Lasallista de Investigación*, 1 (2) pp. 61-66, Redalyc.  
<https://www.redalyc.org/pdf/695/69510210.pdf>
- Arenas-López, J. R. (2005). Simulación del tren de tratamiento de agua residual, anaerobio-aerobio de la empresa Empacadora San Marcos S.A. de C.V., mediante la utilización de modelos matemáticos resueltos en software [Maestría en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Química. Departamento de Ingeniería Química y Alimentos. Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla.]. Capítulo 4. Revisión bibliográfica  
[https://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/meiq/arenas\\_1\\_jr/](https://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/meiq/arenas_1_jr/)
- Arnáiz, C., Lsac, L., & Lebrato, juMan. (2000). Tratamiento biológico de aguas residuales. *Revista Tecnología del Agua*. <https://cidta.usal.es/cursos/etap/modulos/libros/edar.pdf>
- Botello Suárez, W. A., Ortiz Varón, J. C., y Peña Perea, S. A. (2016). Inmovilización microbiana en polímeros sintéticos para el tratamiento de aguas residuales. *NOVA*, 14(26), 99-106.  
<https://doi.org/10.22490/24629448.1755>
- Cáceres, J. (2012). Implementación de material de desecho PET como elemento filtrante en filtros biológicos. *Revista Científica ERIS/USAC – Guatemala*, 7(1), Portal de Revistas del CSUCA. <https://revistas.csuca.org/Record/ASA1461/Details>
- Cedeño-Benavides, J. P., & Lascano-Zambrano, M. A. (2023, 12 septiembre). Determinación del tiempo de retención hidráulica en sistemas plásticos compactos utilizados para el tratamiento de aguas residuales domésticas.  
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/21847>
- Chandillo-Becoche, L. E., & Sánchez-Herrera, G. (2020). Detección de huevos de helmintos en aguas empleadas para riego de cultivos, en el municipio de Mosquera (Cundinamarca)

[Trabajo de grado, Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca Facultad de Ciencias de la Salud].

<https://repositorio.unicolmayor.edu.co/bitstream/handle/unicolmayor/270/Chandillo%20Becoche%20Libia%20Eunise%20%20y%20S%C3%A1nchez%20Herrera%20Geraldine%20Deteccion%20de%20Huevos%20de%20Helminthos%204-46.pdf?sequence=1>

Chavarría-Márquez, E. Y., Huamaní-Astocaza, L. L., Basurto-Contreras, C. M., & Carvo-Baltazar, O. S. (2023). Nivel de calidad de la demanda bioquímica de oxígeno del proceso de filtros biológicos. *Revista Alfa*, 7(19), 153-159.

<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i19.205>

Chávez-Rivero, J. A., Pedroza Sandoval, A., & Maldonado Cabrera, A. (2007). Biodigestores: Una alternativa de aprovechamiento integral de aguas residuales. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 6–191-195. <https://www.redalyc.org/pdf/4555/455545069006.pdf>

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales* (ISBN: 978-607-626-015-9). <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf>

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2023). *Sistema Nacional de Información del Agua [Base de datos]. Registro Público de Derechos de Agua [REPDA] Volumen concesionado para usos consuntivos por tipo de fuente.*

<https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/?opcion=repda>

Duque-Sarango, P., Heras-Naranjo, C., Lojano-Criollo, D., & Vilorio, T. (2018). Vista de Modelamiento del tratamiento biológico de aguas residuales; estudio en planta piloto de contactores biológicos rotatorios. //Modeling of biological wastewater treatment; study in

pilot plant of rotating biological contactors. *Revista Ciencia UNEMI*, 11–pp. 88-96(28).

<https://ojs.unemi.edu.ec/index.php/cienciaunemi/article/view/738/667>

Encarnacion, M. A., Melendez, M. D., Rodrigues, K., Garcia, E. B., Tabata, A., Convidado, Amparo, R., & Cruz, M. (2023). MÉTODO DE BAILENGER MODIFICADO PARA LA INVESTIGACIÓN DE HELMINTOS EN AGUA. *Even3*.

<https://www.even3.com.br/anais/xviicic2022/498142-metodo-de-bailenger-modificado-para-la-investigacion-de-helmintos-en-agua/>

Farinati, A. E. (2016). Biopelículas: un desafío para entender la patogénesis y la terapia

antiinfectiva (VI). *Britania*. <https://www.laensenadacorp.com/documentos/ApunteVI-BIOPELICULAS.pdf>

González-Gutiérrez de Lara, E. (2017). Tratamiento simultáneo de agua residual y colorante Azo azul directo 2 en un filtro biológico aereado con control de oxígeno disuelto. Tesis que para optar por el grado de Maestro en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería].

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/14372/1/Tesis.pdf>

González-Martínez, S., & García-Santana, C. (2015). Desempeño de un filtro biológico combinado e indicadores biológicos en el tratamiento de aguas residuales.

[https://www.researchgate.net/publication/266180381\\_desempeno\\_de\\_un\\_filtro\\_biologico\\_combinado\\_e\\_indicadores\\_biologicos\\_en\\_el\\_tratamiento\\_de\\_aguas\\_residuales](https://www.researchgate.net/publication/266180381_desempeno_de_un_filtro_biologico_combinado_e_indicadores_biologicos_en_el_tratamiento_de_aguas_residuales)

González-Martínez, S., Millán-Salazar, T. C., & González-Barceló, Ó. (2010). Filtración aereada de aguas residuales municipales utilizando un medio filtrante de bajo costo. *Revista AIDIS*, 3–132-144(1), ISSN 0718-378X.

<https://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/23796>



- Instituto Mexicano para la Competitividad, A.C. (IMCO). (2023). Aguas en México: ¿escasez o mala gestión? En Aqua.org.mx. Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2023/07/Aguas-en-Mexico-%C2%BFEscasez-o-mala-gestion-IMCO.pdf>
- Kourkoutas, Y., Bekatorou, A., Banat, I. M., Marchant, R., & Koutinas, A. A. (2004). Immobilization technologies and support materials suitable in alcohol beverages production: a review. *Food Microbiology*, 21(4), 377-397. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2003.10.005>
- López Vázquez, C. M., Buitrón Méndez, G., & García, Héctor. A. (2017). Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño (Francisco. J. Cervantes Carrillo, Ed.). IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780409146>
- López-Vázquez, C. M., Méndez, G. B., García, H. A., & Carrillo, F. J. C. (2017). Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño. *Water Intelligence Online*, 16, 9781780409146. <https://doi.org/10.2166/9781780409146>
- Marín Galvín, R. (2012). Procesos químicos empleados en la depuración de aguas: Teoría y práctica. En *Procesos fisicoquímicos en depuración de aguas: Teoría, práctica y problemas resueltos* (1.a ed.). Diaz de Santos.
- Mejía-López, A., Cabrera, M., & Carrillo, Y. (2017). Remoción de contaminantes orgánicos presentes en agua residual doméstica mediante prototipo a escala de laboratorio. *LA GRANJA: Revista de Ciencias de la Vida*, 26(2). <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/lgr/v26n2/1390-3799-lgr-26-02-00064.pdf>
- Mendoza-Espinosa, L., & Stephenson, T. (1999). A Review of Biological Aerated Filters (BAFs) for Wastewater Treatment. *Environmental Engineering Science*, 16(3), 201-216. <https://doi.org/10.1089/ees.1999.16.201>

Merino Pérez, L., Velázquez Montes, A., & Buratti, S. (2018). Agenda Ambiental 2018:

Diagnóstico y propuestas. En SUMAI | Seminario Universitario de Sociedad, Medio Ambiente E Instituciones.

<https://susmai.sdi.unam.mx/index.php/en/mediateca/publicaciones/63-agenda-ambiental-2018>

Muñoz, M., Reina, J., & Aldás, M. B. (2016). Evaluación de un reactor aerobio piloto con medio

de soporte de polietilentereftalato (PET) para tratamiento de efluente lechero. Enfoque

UTE, 7(4), 31-42. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n4.112>

NMX-AA-028-SCFI-2001. Análisis de agua – determinación de la demanda bioquímica de

oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO<sub>5</sub>) y residuales tratadas – método de prueba.

(2001). <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2001/nmx-aa-028-scfi-2001.pdf>

NMX-AA-030/2-SCFI-2011: Análisis de agua – determinación de la demanda química de

oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba – parte 2

– determinación de índice de la demanda química de oxígeno – método de tubo sellado a pequeña escala. (2011). En Gobierno de México.

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166775/NMX-AA-030-2-SCFI-2011.pdf>

NMX-AA-042-SCFI-2015. Análisis de Agua – enumeración de organismos coliformes totales,

organismos coliformes fecales (termotolerantes) y Escherichia coli – Método del número más probable en tubos múltiples. (2015).

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166147/nmx-aa-042-scfi-2015.pdf>

NMX-AA-113-SCFI-2012. Análisis de agua – medición del número de huevos de helminto en

aguas residuales y residuales tratadas por observación microscópica – método de prueba.

(2012). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166809/NMX-AA-113-SCFI-2012.pdf>

Núñez-García, U., Navarro-Gómez, H. I., González-Sandoval, M. R., & Flores-Badillo, J. (2023). Tratamiento biológico de aguas residuales con perspectiva de economía circular. *Boletín Científico de Ciencias Básicas E Ingenierías del ICBI*, 11(3).  
<https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/view/11486/10647>

ONU, & Secretario general. (2024, julio). La población mundial llegará a un máximo de 10.300 millones en este siglo Noticias ONU. Mirada global Historias humanas.  
<https://news.un.org/es/story/2024/07/1531126#:~:text=La%20poblaci%C3%B3n%20mundial%20alcanz%C3%B3%20casi,segunda%20mitad%20de%20este%20siglo.>

ONU-Habitat. (2021). Comprender las dimensiones del problema del agua. <https://onu-habitat.org/index.php/comprender-las-dimensiones-del-problema-del-agua#:~:text=Alrededor%20del%2036%25%20de%20la,en%20las%20ciudades%20es%20limitado.>

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos | OCDE (2021). *Población Mundial*. Recuperado 24 de febrero de 2024.  
<https://www.oecd.org/centrodemexico/estadisticas/poblacion.html>

Ortega-Peña, S., & Hernández-Zamora, E. (2018). Biopelículas microbianas y su impacto en áreas médicas: fisiopatología, diagnóstico y tratamiento. *Boletín Médico del Hospital Infantil de México*, 75(2). <https://doi.org/10.24875/bmhim.m18000012>

Pérez-Rodríguez, P., Martínez-Amador, S. Y., Valdez-Aguilar, L. A., Benavides-Mendoza, A., Rodríguez-de la Garza, J. A., & Ovando-Medina, V. M. (2018). Diseño y evaluación de un sistema secuencial bioelectroquímico para el tratamiento de agua residual municipal y generación de voltaje. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 17(1), 145-154.

Rojas, R. (2002). *Gestión Integral del Tratamiento de aguas residuales | Sistemas de tratamiento de aguas residuales (De Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Organización Panamericana de la Salud, & Organización Mundial de la Salud)*.

[https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57123734/GESTION\\_INTEGRAL\\_DEL\\_TRATAMIENTO\\_AR-libre.pdf?1533264908=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCurso\\_Internacional\\_GETION\\_INTEGRAL\\_DE\\_T.pdf&Expires=1728334182&Signature=XDglBDCc45EfrJRaddRA0T-Re67CPPcZkXagHc3Y~xJd2vpZQoAZkUN6tjV9~Lq~TUBtlfpmkqTXPZs817TYVCT0hVTqEp5~NjPer9I23A0Iy2OpTPdORj2BJeYLPYFwZpTk5CE7D8ZHhm5SrFAOhm8ws1QVKt-bAdv~tc77vEL52EVZxfOyoiVvp9QULQRzOz7Cb7BF6UZLiGfpBeCff9w8xMgqLHFdkKZQUd2MON1xNJJFKWVN9md6HA8xJdqhe4hYsZKTlmK7JNzRA~elYdPpBu5Z8wzkfE4sxFDBusqKeNBDZ9mQgYRn46I0~6-s4vmncKkSnSxKoGq6e7Jd6w\\_\\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57123734/GESTION_INTEGRAL_DEL_TRATAMIENTO_AR-libre.pdf?1533264908=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCurso_Internacional_GETION_INTEGRAL_DE_T.pdf&Expires=1728334182&Signature=XDglBDCc45EfrJRaddRA0T-Re67CPPcZkXagHc3Y~xJd2vpZQoAZkUN6tjV9~Lq~TUBtlfpmkqTXPZs817TYVCT0hVTqEp5~NjPer9I23A0Iy2OpTPdORj2BJeYLPYFwZpTk5CE7D8ZHhm5SrFAOhm8ws1QVKt-bAdv~tc77vEL52EVZxfOyoiVvp9QULQRzOz7Cb7BF6UZLiGfpBeCff9w8xMgqLHFdkKZQUd2MON1xNJJFKWVN9md6HA8xJdqhe4hYsZKTlmK7JNzRA~elYdPpBu5Z8wzkfE4sxFDBusqKeNBDZ9mQgYRn46I0~6-s4vmncKkSnSxKoGq6e7Jd6w__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA)

Secretaría General de la Comunidad Andina, Lecaros, G., & Viale Estremadoyro, A. (2008). *Manual de Estadísticas Ambientales Andinas*. Secretaría General de la Comunidad Andina.

[https://www.comunidadandina.org/StaticFiles/OtrosTemas/MedioAmbiente/Manual\\_estadisticas\\_ambientales.pdf](https://www.comunidadandina.org/StaticFiles/OtrosTemas/MedioAmbiente/Manual_estadisticas_ambientales.pdf)

Simón-Andréu, P., Lardín-Mifsut, C., & Pacheco-Ballarín, S. (2007). *Recuento e identificación de huevos de helmintos en aguas residuales urbanas de la región de Murcia*.

<https://www.aguasresiduales.info/descargar/revista/articulos/fct4X8867Kj2SJChxYsUlowg.pdf>

*Tipos de Aguas Residuales, ¿cuántos existen y qué contienen?* (2019, febrero). Eco-Intellutions.

Recuperado 24 de febrero de 2024. <https://ecointell.com.mx/plantas-de-tratamiento-de-agua/tipos-de-aguas-residuales-cuantos-existen-y-que-contienen>

United Nations. (2022). *World population to reach 8 billion on 15 November 2022 | United*

*Nations*. Recuperado 24 de febrero de 2024. <https://www.un.org/en/desa/world-population-reach-8-billion-15-november-2022>

United Nations. Departamento de Asuntos Sociales y Económicos. (2018). *Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo | Naciones Unidas*.

<https://www.un.org/es/desa/2018-world-urbanization-prospects>

Villanueva Hernández, J. A., Gómez Ramos, J. M., Vázquez Sánchez, R. A., Nájera Aguilar, H.

A., Roblero Galdámez, N., & Hernández Sánchez, E. (2012). Evaluación de la remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en dos biofiltros con diferentes empaques.

LACANDONIA, 2, 107-114. <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/1709>