

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO



Tratamiento de agua residual municipal en un sistema secuencial anaerobio/aerobio de
flujo laminar escala planta piloto

Por:

BLANCA ESTELA IBARRA VILLANUEVA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Tratamiento de agua residual municipal en un sistema secuencial anaerobio/aerobio de
flujo laminar escala planta piloto

Por:

BLANCA ESTELA IBARRA VILLANUEVA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por el Comité de Asesoría:


Dr. Pedro Pérez Rodríguez
Asesor Principal Interno


Dr. José Antonio Rodríguez de la Garza
Asesor Principal Externo


Dra. Daniela Alvarado Camarillo
Coasesor


M.C. Laura María González Méndez
Coasesor

Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Tratamiento de agua residual municipal en un sistema secuencial anaerobio/aerobio de
flujo laminar escala planta piloto

Por:

BLANCA ESTELA IBARRA VILLANUEVA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por el jurado examinador:



Dr. Pedro Pérez Rodríguez

Presidente



Dra. Daniela Alvarado Camarillo

Vocal



M.C. Laura María González Méndez

Vocal



Dr. José Antonio Rodríguez de la Garza

Vocal suplente



M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo Coahuila, México

Junio de 2026



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 (cortar y pegar); 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



Blanca Estela Ibarra Villanueva

Asesor principal



Dr. Pedro Pérez Rodríguez

DEDICATORIA

El esfuerzo y dedicación dan como resultado el éxito, mismo que quiero dedicar principalmente a mi familia, que ha sido mi apoyo emocional en cada etapa de mi formación académica, cada día mi motivación para seguir superándome han sido mis papás Enrique y Francis, porque gracias a su impulso, amor y apoyo incondicional estoy en el lugar de ahora, logrando mis metas, les agradezco infinitamente por el respaldo absoluto que me han otorgado y sus esfuerzos por verme salir adelante.

A mis hermanos Maggie, Ricky y Dany que me han acompañado en todo momento convirtiéndose en los mejores ejemplos a seguir y a mis sobrinos que son la chispa que me da felicidad.

A Jorge, mi compañero de vida que ha sido mi punto de estabilidad y me ha brindado la confianza para poder seguir adelante día con día.

A mis compañeras, Esmeralda mi cuñi, que ha sido parte esencial desde el momento que decidimos iniciar juntas esta etapa y acompañarnos hasta lograr el objetivo. A Dominique, Natalia y Monse que han sido un gran complemento y juntas hemos formado un equipo fuerte y confiable.

A mis amigas Aylin, Janeth, Irán y Moni que siempre han estado presentes con sus consejos, les agradezco por su comprensión y compañía.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, mi *Alma Mater*, por brindarme la oportunidad de pertenecer a esta gran institución, así como experiencias, áreas de oportunidad, aprendizajes y herramientas que han sido esenciales para mi formación académica y profesional.

Al Dr. Pedro Pérez Rodríguez, mi asesor, le expreso mi más sincero agradecimiento por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto y por depositar en mí su confianza desde el inicio. Su compromiso, paciencia y disposición para compartir su experiencia han sido determinantes en mi desarrollo académico y personal. Reconozco y valoro el tiempo que dedicó a revisar cada etapa, así como la motivación que siempre transmitió para continuar.

Al Dr. José Antonio Rodríguez de la Garza por su apoyo y colaboración en la realización del proyecto.

A la Dra. Daniela Alvarado Camarillo por su orientación, consejos y respaldo durante la etapa analítica.

A la M.C. Laura María González Méndez por su valiosa ayuda durante el desarrollo de este trabajo.

A la Q.F.B. Brenda Verónica Borrego Limón por su paciencia, tiempo y por compartir sus conocimientos sobre las metodologías de laboratorio, pieza clave en este proyecto.

Al Dr. José Antonio Hernández Herrera, a quien agradezco profundamente por su apoyo incondicional, por compartir su experiencia y conocimientos en áreas fundamentales de mi formación profesional, y por ser un excelente maestro y ejemplo para seguir.

A Leonardo Valle del Departamento de Ciencias del Suelo, por su constante disposición, apoyo y enseñanzas.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN	11
OBJETIVO GENERAL	13
Objetivos específicos.....	13
HIPÓTESIS	14
CAPÍTULO I	15
REVISIÓN DE LITERATURA.....	15
1.1. Aguas residuales municipales	15
1.2. Procesos convencionales del tratamiento de aguas residuales.	16
1.3. Fundamentos de los procesos biológicos anaerobios y aerobios	20
1.4. Sistemas secuenciales anaerobio-aerobio.....	21
1.5. Materiales de soporte en biorreactores	23
CAPÍTULO II	24
MATERIALES Y MÉTODOS	24
2.1. Construcción y operación del sistema.....	24
2.2. Determinación de la calidad del agua residual tratada	25
CAPÍTULO III	26
RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	26
3.1. pH	26
3.2. Conductividad eléctrica (CE).....	27
3.3. Eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (ERDQO)	28
3.4. Eficiencia de remoción de demanda bioquímica de oxígeno (ERDBO)	30
3.5. Eficiencia de remoción de coliformes totales (ERCT)	31
3.6. Eficiencia de remoción de coliformes fecales (ERCF).....	32
3.7. Eficiencia de remoción de huevos de helminto.....	34
CONCLUSIÓN.....	36
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del sistema que se utilizó en este estudio	25
Figura 2. pH obtenido en el sistema secuencial a TRH de 4, 8 y 16 h	27
Figura 3. Conductividad eléctrica obtenida en el sistema secuencial a TRH de 4, 8 y 16 h	28
Figura 4. Eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (ERDQO) en el sistema secuencial a TRH de 4, 8 y 16 h	29
Figura 5. Eficiencia de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (ERDBO) en el sistema secuencial a TRH de 4, 8 y 16 h.....	31
Figura 6. Eficiencia de remoción de coliformes totales (ERCT) en el sistema secuencial a TRH de 4, 8 y 16 h	32
Figura 7. Eficiencia de remoción de coliformes fecales (ERCF) en el sistema secuencial a TRH de 4, 8 y 16 h	33
Figura 8. Eficiencia de remoción de huevos de helminto (ERHH) en el sistema secuencial a TRH de 4, 8 y 16 h	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización del agua residual municipal cruda.	24
--	----

RESUMEN

El tratamiento de aguas residuales municipales es fundamental para la protección del medio ambiente y la salud pública. En este trabajo se evaluó el desempeño de un sistema secuencial anaerobio/aerobio de flujo laminar a escala planta piloto empacado con fieltro de grafito para el tratamiento de agua residual municipal. El sistema fue operado a tres tiempos de retención hidráulica (TRH) de 4, 8 y 16 h, evaluando parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Los resultados mostraron que el pH se mantuvo en un rango ligeramente alcalino (7.92–8.39), mientras que la conductividad eléctrica presentó un incremento moderado (1.87–2.05 dS/m). La eficiencia de remoción de materia orgánica incrementó con el TRH, alcanzando valores máximos de 56.25% para DQO y 54.08% para DBO₅ a 16 h. En cuanto a los parámetros microbiológicos, se obtuvieron altas eficiencias de remoción, con valores de hasta 99.70% para coliformes totales y fecales, y hasta 92.84% para huevos de helminto. Estos resultados evidencian la efectividad del sistema en la mejora de la calidad sanitaria del efluente tratado. En general, el sistema secuencial anaerobio/aerobio de flujo laminar demostró ser una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales municipales, destacando la importancia del tiempo de retención hidráulica en la optimización del proceso.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional y el desarrollo urbano han incrementado significativamente la generación de aguas residuales municipales, las cuales contienen una compleja mezcla de materia orgánica, nutrientes, sólidos suspendidos y microorganismos patógenos. El vertimiento de estas aguas sin un tratamiento adecuado representa un riesgo considerable para la salud pública y el ambiente, ya que contribuye a la degradación de cuerpos acuíferos, la eutrofización y la propagación de enfermedades de origen hídrico. En este contexto, el tratamiento eficiente de aguas residuales se ha convertido en una prioridad para garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos y la protección del medio ambiente. Los sistemas convencionales de tratamiento, aunque ampliamente utilizados, presentan limitaciones importantes como altos costos operativos, elevado consumo energético, requerimientos extensos de espacio y generación considerable de lodos. Estas desventajas han impulsado la búsqueda de tecnologías alternativas más eficientes y sostenibles. Entre estas, los sistemas biológicos que combinan procesos anaerobios y aerobios han ganado relevancia debido a su capacidad para aprovechar las ventajas de ambos mecanismos de degradación de la materia orgánica. Los procesos anaerobios permiten la conversión de materia orgánica en biogás con un bajo consumo energético, mientras que los procesos aerobios complementan el tratamiento al reducir la carga orgánica residual, promover la nitrificación y mejorar la calidad final del efluente. La integración secuencial de estos procesos favorece una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes, así como una operación más estable y sostenible. Además, el uso de materiales de soporte en estos sistemas incrementa la retención de biomasa y la superficie de crecimiento microbiano, mejorando el desempeño del tratamiento. En particular, el empleo de materiales porosos como el fieltro de grafito representa una alternativa innovadora, ya que no solo facilita la formación de biopelículas, sino que también puede favorecer interacciones microbianas que potencien los procesos de degradación. En este sentido, la evaluación de sistemas

secuenciales anaerobio/aerobio a escala piloto constituye una estrategia clave para determinar su viabilidad técnica en condiciones reales de operación.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el tratamiento de agua residual municipal en un sistema secuencial anaerobio/aerobio de flujo laminar escala planta piloto empacado con fieltro de grafito.

Objetivos específicos

1. Fabricar el sistema secuencial anaerobio/aerobio de flujo laminar escala planta piloto.
2. Evaluar los parámetros fisicoquímicos del sistema secuencial anaerobio/aerobio de flujo laminar escala piloto empacado con soportes de fieltro de grafito, durante el tratamiento de agua residual municipal a tres tiempos de retención hidráulica.
3. Determinar la calidad del agua residual municipal tratada para su reúso con base en la NOM-003-SEMARNAT-1997 (coliformes totales y fecales, huevos de helminto, DBO₅, y SST).

HIPÓTESIS

La aplicación de un sistema secuencial anaerobio/aerobio de flujo laminar escala planta piloto empacado con fieltro de grafito promoverá la remoción de contaminantes durante el tratamiento de agua residual municipal.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Aguas residuales municipales

Las aguas residuales municipales se definen como el suministro de agua de una comunidad (residencias, establecimientos comerciales, etc.) después de ser utilizadas en diversas aplicaciones y que contienen elementos que la hacen inadecuada para ser reutilizada sin tener ningún tratamiento previo. Consisten principalmente en una mezcla de agua con excrementos humanos provenientes del uso del inodoro y agua que se origina de actividades domésticas como la limpieza, el lavado y la cocina (Ostermeyer et al., 2022). Los componentes principales de las aguas residuales son los sólidos suspendidos totales (SST), las partículas flotantes de suelo, los productos químicos de limpieza y farmacéuticos, la materia orgánica y otros sedimentos que pueden originarse por la erosión, escorrentía u otras actividades, mismos que afectan la claridad del agua y que pueden causar eutrofización (Pachwarya et al., 2021). Del 100% del contenido de las aguas residuales municipales, el 99% es agua y la materia restante está compuesta por sólidos, de los cuales del 40 al 50% son sustancias orgánicas, del 30 al 40% son material inerte, del 10 al 15% son sustancias no degradables y del 5 al 8% otros materiales; también contienen una amplia gama de recursos que incluyen nutrientes como nitrógeno y fósforo provenientes de la orina y heces disueltas en el agua (Ostermeyer et al., 2022).

Una de las principales características del agua residual municipal es que está cargada de microorganismos patógenos que se originan en los desechos humanos y animales, los cuales se presentan en tres categorías principales que son bacterias, virus y parásitos. La contaminación con estos patógenos representa un riesgo considerable a la salud ya que se pueden transmitir por medio del agua causando una variedad de enfermedades infecciosas al ser humano (Etsuyankpa et al., 2024).

Debido a esto, el vertimiento de agua residual municipal tiene un enorme impacto ambiental y plantea graves problemas de salud a la población. El vertimiento es responsable del deterioro de los cuerpos de agua que lo reciben, como ríos, lagos, arroyos y el océano, afectando negativamente la salud pública, la biodiversidad y el entorno ecológico (Tariq et al., 2023). Una de las consecuencias ecológicas que afecta la calidad del agua es el agotamiento de oxígeno y la eutrofización, que a su vez causan un efecto directo en la supervivencia de los peces y animales acuáticos y/o marinos presentes en los cuerpos de agua que reciben el agua residual (Etsuyankpa et al., 2024). Los contaminantes, incluso a bajas concentraciones en el agua, pueden acumularse en diferentes niveles tróficos del medio ambiente a través de la bioacumulación y la biomagnificación en la vida marina, lo que lleva a la pérdida de biodiversidad y de la estabilidad del ecosistema (Tariq et al., 2023). Se ha relacionado la exposición de los humanos a las aguas residuales, con enfermedades como el cólera, la fiebre tifoidea, disentería, salmonelosis, hepatitis A y el polio, además de otras enfermedades diarreicas que pueden afectar gravemente a la salud e incluso han sido causa de muertes (Etsuyankpa et al., 2024).

1.2. Procesos convencionales del tratamiento de aguas residuales.

Los procesos convencionales tienen como objetivo principal la remoción y degradación de compuestos orgánicos bajo condiciones controladas, se llevan a cabo en una serie de etapas secuenciales que son: Pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario (Shamsad et al., 2025).

El pretratamiento tiene como objetivo principal la remoción de sólidos gruesos y otros materiales grandes presentes en el agua cruda, entre estos se encuentra la arena, aceite, grasas y materia sólida en suspensión (Pachwarya et al., 2021). Esta fase se lleva a cabo durante 3 procesos:

- Cribado: Consiste en la separación de sólidos no sedimentables gruesos (trapos, plásticos, etc.) del medio acuoso. El cribado grueso retiene

materiales mayores a 2 centímetros, mientras que el cribado fino retiene partículas mayores a 1 milímetro (Trifirò et al., 2024).

- Desarenado: Separación de sólidos gruesos sedimentables, como la arena y la tierra en suspensión (Pachwarya et al., 2021).
- Desengrasado: Eliminación de sustancias aceitosas y grasosas que flotan en la superficie (Trifirò et al., 2024).

El tratamiento primario consiste en la sedimentación por gravedad con el objetivo de separar los sólidos suspendidos fácilmente removibles y disminuir la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), en esta etapa se reduce la concentración de nutrientes, organismos patógenos, oligoelementos y compuestos orgánicos potencialmente tóxicos que están adsorbidos a los sólidos sedimentables. Los constituyentes removidos generan subproductos que luego serán contenidos en los lodos primarios (Ramzanipour et al., 2023).

El tratamiento secundario se basa en la degradación biológica; en esta etapa los sólidos suspendidos restantes son descompuestos por microorganismos y el número de patógenos se reduce, aquí el objetivo principal es reducir eficazmente los contaminantes orgánicos. Dentro de esta etapa se encuentran los procesos de lodos activados, biodiscos y lagunas de estabilización (Shamshad et al., 2025):

- Lodos activados: Este proceso es la técnica más conocida y extendida para lograr una remoción efectiva de contaminantes en aguas contaminadas, aquí el efluente del tratamiento primario se bombea a un tanque y se mezcla con un medio rico bacterias conocido como lodo activado (Kassab et al., 2010). Posterior a esto, aire u oxígeno puro son bombeados a través de la mezcla para fomentar el crecimiento microbiano y la descomposición del material orgánico (metabolizar y degradar la materia orgánica). Después de la aireación, la mezcla pasa a un tanque de sedimentación secundario, donde el agua se separa por la parte superior y el resto del lodo, conocido como lodo secundario, se retira del fondo. Una parte del lodo se recicla como inóculo para el tratamiento primario y el resto se envía a tratamiento (Etsuyankpa et al., 2024).

- Biodiscos: Son un sistema donde los microorganismos se adhieren a un soporte que esta parcial o totalmente sumergido y gira lentamente en un eje horizontal en un tanque por el cual fluye el agua residual y se va formando una biopelícula en su superficie. Estos soportes interceptan el compuesto orgánico a medida que gira y lo descomponen aeróbicamente (Trifirò et al., 2024).
- Lagunas de estabilización u oxidación: Son sistemas biológicos (aerobios) donde el efluente del tratamiento primario puede ser tratado, a continuación, se explican dos ejemplos de estos sistemas:
 - Las lagunas aireadas son sistemas de lodos activados de alta tasa, funcionan como su nombre lo indica, con aireadores mecánicos que aportan el oxígeno necesario y mantienen los sólidos en suspensión gracias a la energía cinética. Operan como sistemas de lodos activados de flujo continuo, el efluente resultante generalmente tiene una demanda química de oxígeno (DQO) inaceptable para la descarga, por lo que suele requerirse un segundo estanque para permitir que los sólidos sedimentables se asienten en el fondo antes de verter el agua (Ekama et al., 2008).
 - En las lagunas facultativas, la energía de aireación es menor, lo que provoca la sedimentación de los sólidos más pesados en el fondo, formando una capa de lodo que se degrada anaeróbicamente mientras que en la superficie el proceso continúa aeróbicamente (Van Lier et al., 2008).

El tratamiento terciario se implementa después del tratamiento secundario para reducir la materia orgánica residual, la turbidez, el nitrógeno, el fósforo, los metales pesados y los patógenos. La remoción de nutrientes busca reducir las concentraciones de nitrógeno y fósforo para evitar la eutrofización de los cuerpos de agua receptores, se logra a través de procesos biológicos mejorados y procesos fisicoquímicos. La desinfección tiene como propósito controlar o eliminar microorganismos patógenos, como bacterias, virus y parásitos, que permanecen

después del tratamiento secundario, (Pachwarya et al., 2021). Los métodos de desinfección más utilizados son:

- Cloración: Uso de químicos como cloro o hipoclorito de sodio.
- Ozonización: Uso de ozono gaseoso.
- Radiación UV: Un método físico que utiliza radiación ultravioleta (Shamshad et al., 2025).

Las limitaciones de los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales son significativas en términos de sostenibilidad, eficiencia y costos operativos, especialmente cuando se comparan con tecnologías más recientes como el tratamiento anaerobio o los biorreactores de membrana. El alto consumo de energía es una gran limitante, principalmente en la etapa de suministro de oxígeno. Se estima que los costos de operación atribuidos al uso de energía en una planta tratadora de agua residual convencional representan del 25% al 40% de los costos operativos totales (Küçükbayrak et al., 2025). Otra de las limitantes de los sistemas convencionales es la infraestructura, ya que se requiere un área de gran tamaño para tener sus instalaciones distribuidas estratégicamente, lo que reduce las posibilidades de la implementación de estos sistemas en áreas urbanas con alta densidad poblacional. La gran cantidad de lodos generados que se producen requieren de una gestión y disposición o de un tratamiento, la cual es altamente costosa y compleja, si no se realizan los debidos procesos se pueden tener impactos ambientales negativos incluyendo la contaminación del suelo y agua (Sikosana et al., 2019).

También se pueden presentar limitaciones o problemas en la calidad final del efluente, ya que se generan subproductos y/o residuos durante las distintas etapas del tratamiento, por ejemplo, en la desinfección, aunque es una etapa necesaria, el uso de desinfectantes químicos como el cloro y los procesos de oxidación avanzada también pueden producir subproductos dañinos para el ambiente además de tener altos costos en insumos y operaciones (Küçükbayrak et al., 2025).

1.3. Fundamentos de los procesos biológicos anaerobios y aerobios

La degradación anaerobia es un proceso biológico que ocurre en ausencia de oxígeno y en un ambiente con potencial redox bajo. El proceso convierte la materia orgánica compleja del agua residual o lodo en biogás, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono. El proceso de degradación anaerobia se subdivide en cuatro etapas sucesivas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Van Lier et al., 2008).

- La hidrólisis consiste en la conversión de polímeros complejos e insolubles en monómeros solubles y compuestos menos complejos que pueden atravesar las paredes y membranas celulares de las bacterias fermentativas. Las exoenzimas, como la celulasa, proteasa y lipasa, convierten proteínas en aminoácidos, polisacáridos (carbohidratos) en azúcares simples, (monosacáridos) y lípidos en ácidos grasos de cadena larga y glicerol. La transformación es llevada a cabo por bacterias fermentativas, que incluyen grupos como *Bacillaceae*, *Lactobacillaceae* y *Enterobacteriaceae* (Lohani et al., 2017).
- La acidogénesis que sigue a la hidrólisis se realiza a través de la fermentación y la oxidación anaerobia donde los productos de hidrólisis (aminoácidos, azúcares simples, lípidos), que son compuestos solubles relativamente pequeños, se difunden dentro de las células bacterianas y son convertidos principalmente en ácidos grasos volátiles, principalmente acetato y ácidos orgánicos superiores como propionato y butirato (Patel et al., 2017).
- En la acetogénesis se procesan los ácidos grasos volátiles de cadena larga y otros intermedios producidos durante la acidogénesis para convertirlos en sustratos metanogénicos (Van Lier et al., 2008).
- La metanogénesis es la etapa terminal y la más sensible, donde la materia orgánica degradable se convierte finalmente en gas metano y CO₂ a partir de los productos intermedios finales (Patel et al., 2017).

Por otra parte, la degradación aerobia de la materia orgánica es el principio fundamental detrás del tratamiento biológico. Este proceso se lleva a cabo en

presencia de oxígeno molecular y utiliza microorganismos, principalmente bacterias, para la mineralización controlada de los contaminantes orgánicos en compuestos inocuos como dióxido de carbono y agua. Los principios de la degradación aerobia se centran en la respiración bacteriana para la transferencia de energía y en la oxidación de la materia orgánica para la obtención de energía y materiales para el crecimiento celular (Gallert et al., 2005).

- Catabolismo y anabolismo: se refiere a la conversión controlada de contaminantes en sustancias más simples. En el catabolismo se produce energía, los compuestos orgánicos solubles son degradados dentro de las células. En el anabolismo sucede el crecimiento celular, una porción de los compuestos orgánicos se utiliza como fuente de carbono para la síntesis de nuevas células y la formación de biomasa excedente (Ekama et al., 2008).
- La respiración bacteriana es el mecanismo por el cual las bacterias transfieren electrones para generar energía química, principalmente en forma de ATP. Los microorganismos rompen los compuestos orgánicos y al hacerlo generan electrones. Estos electrones navegan a través de una serie de enzimas respiratorias dentro de la célula, lo que resulta en la producción de energía (Jalili et al., 2024).

1.4. Sistemas secuenciales anaerobio-aerobio.

La implementación de sistemas secuenciales anaerobio-aerobio representan una alternativa viable y atractiva a las tecnologías convencionales de alto costo, especialmente para el tratamiento de aguas residuales municipales. Es una estrategia tecnológica que explota las ventajas de los dos sistemas en la configuración más rentable, por lo que es considerada una tecnología prometedora para el tratamiento biológico de efluentes contaminados. Este enfoque combina las dos fortalezas de la degradación biológica en dos ambientes distintos para optimizar tanto la remoción de contaminantes como la recuperación de recursos utilizando poblaciones bacterianas mixtas (Kassab et al., 2010). El proceso se divide en dos etapas, la primera es la fase anaerobia, durante esta, se somete el agua residual a

un tratamiento biológico anaerobio con el objetivo de convertir la materia orgánica en biogás, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono (Lohani et al., 2017). Los sólidos son atrapados y la materia orgánica se convierte en portadora de energía útil. Se considera de alta eficiencia, ya que un reactor anaerobio de flujo ascendente como pretratamiento puede eliminar más del 60% de DQO de las aguas residuales (Gallert et al., 2005). La siguiente es la fase aerobia. Durante esta, el efluente del reactor anaerobio pasa a la segunda etapa, que se da en condiciones aerobias, con el objetivo de pulir la concentración residual de sólidos suspendidos y materia orgánica que quedaron en la fase anaerobia, aquí sucede la nitrificación (oxidación del amonio) a nitrito/nitrato. La fase aerobia proporciona una reducción adicional de patógenos y se lleva la mayor parte del uso de energía (Montalvo et al., 2020). La ventaja más destacada de los sistemas secuenciales es la reducción del consumo de energía y el potencial de recuperación de energía al consumir notablemente menos que las tecnologías aerobias convencionales (Kassab et al., 2010). Una investigación experimental en Italia mostró que los sistemas anaerobios logran más del 50% de ahorro en el consumo de electricidad por metro cúbico de agua tratada, con un promedio de \$0.43 kWh por metro cúbico para plantas anaerobias, frente a \$1.02 kWh por metro cúbico para plantas aerobias (Ranieri et al., 2021). La etapa anaerobia es la generadora neta de energía del proceso de tratamiento, ya que el metano producido en dicha etapa puede ser utilizado en la generación de energía eléctrica y/o calorífica, además se minimiza drásticamente la producción de lodos excedentes. El lodo excedente generado en el sistema anaerobio ya está digerido y puede ser directamente deshidratado típicamente utilizando lechos de secado, lo que aumenta la eficiencia en el tratamiento de lodos. La combinación de ambos (aerobio y anaerobio) permite un tratamiento más completo, especialmente para contaminantes difíciles como compuestos recalcitrantes, contaminantes orgánicos persistentes y contaminantes emergentes. Otros compuestos como los aromáticos policlorados, polinitrados y los enlaces de azocompuestos, solo pueden degradarse cuando se introduce una etapa anaerobia, siendo complementaria a los aerobia para lograr el tratamiento completo (Ramzanipour et al., 2023).

1.5. Materiales de soporte en biorreactores

Los materiales de soporte son cruciales para el crecimiento microbiano, retención de biomasa y la capacidad de carga, especialmente en sistemas de crecimiento adherido y tecnologías electroquímicas microbianas (Durham et al., 1994). Los materiales mayormente utilizados para los sistemas de tratamiento anaerobio, filtros biológicos y biorreactores químicos son:

- Zeolitas: Son uno de los bioportadores más estudiados, conocidos por su matriz de aluminosilicatos microcristalinos con propiedades fisicoquímicas únicas. Proporcionan un medio adecuado para la colonización microbiana, actúan como intercambiadores de iones de nitrógeno amoniacal, amortiguan la población microbiana inmovilizada en condiciones operativas desfavorables y tienen la capacidad de moderar perturbaciones como los choques de pH debido a sus propiedades de intercambio catiónico, son eficientes en la remoción de fosfato y adsorción de metales pesados (Montalvo et al., 2020).
- Tierra de diatomeas: es usada como bioportador que proporciona una estructura porosa, pero su desempeño para proteger microorganismos de choques de pH es significativamente inferior al de la zeolita (Durham et al., 1994).
- Materiales poliméricos y estructurales: se utilizan en sistemas de lecho móvil y en reactores anaerobios de lecho empacado, algunos de los materiales utilizados son: polietileno de baja densidad, polipropileno, materiales estructurales 3D derivados de biomasa como esponjas o tallos de caña, biopolímeros y compuestos de membrana. Ofrecen una gran área superficial específica y estructura porosa interconectada, mejoran la permeabilidad, la estabilidad, la adsorción y la capacidad de intercambio iónico además tienen características antibacterianas (Khademolqorani et al., 2025).

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Construcción y operación del sistema

La Figura 1 muestra la configuración del sistema que se utilizó en los experimentos. Se construyó sistema secuencial anaerobio/aerobio con tres niveles en un contenedor con un volumen total de 35 L. Los soportes fueron fabricados a partir de fieltro de grafito recortando 10 piezas de 35 x 6 x 0.8 cm para el primer nivel, 10 piezas de 42 x 5.3 x 0.8 cm para el segundo nivel y 10 piezas de 44 x 5.5 x 0.8 cm para el tercer nivel. El sistema fue alimentado con agua residual municipal cruda (obtenida de una PTAR de la ciudad de Saltillo, Coahuila) de forma secuencial (anaerobio/aerobio) mediante una bomba de agua sumergible (Lomas, FL7788). Las características del agua residual municipal cruda se muestran en la Tabla 1. El agua residual actuó como sustrato e inóculo en el sistema. El sistema fue aireado de forma externa mediante una bomba de aireación (Lomas, FL7950). El sistema fue acondicionado por 30 días para fomentar la formación de biopelícula bacteriana. Posteriormente, se evaluaron tres tiempos de retención hidráulica de 4 h, 8 h y 16 h. Los experimentos fueron llevados a cabo a temperatura ambiente por triplicado.

Tabla 1. Caracterización del agua residual municipal cruda.

pH	CE	ORP	Salinidad	DQO	DBO	Coliformes Totales		Coliformes fecales		Huevos de helminto
	µs/cm	mV	ppm	mg/L	mg/L	NMP	(+) Hasta	NMP	(+) Hasta	H/L
8.11	1953	-186	969	704,072	340,425	>2400	1,00E+15	>2400	1,00E+15	6711

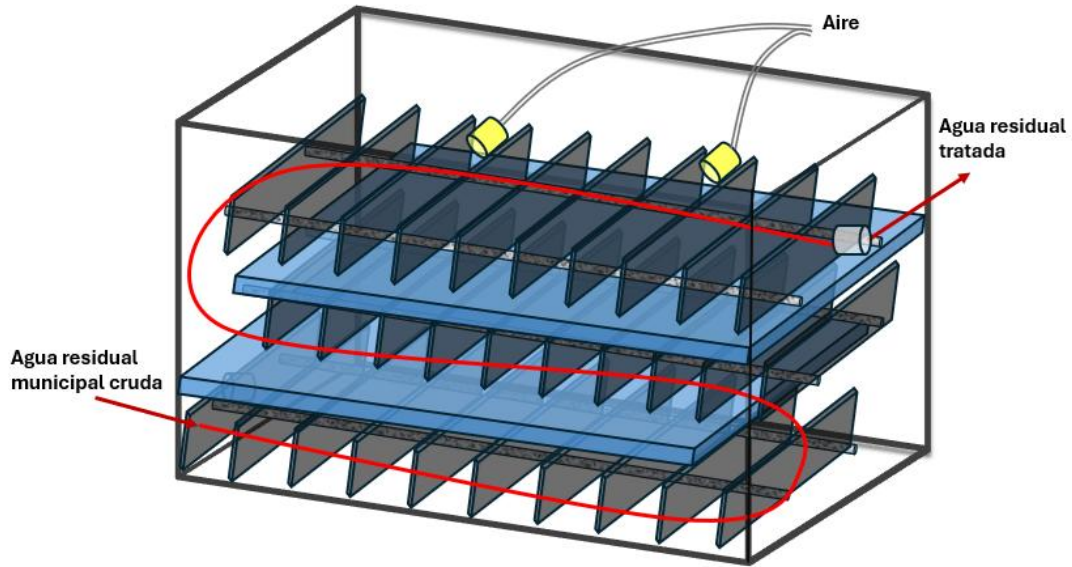


Figura 1. Esquema del sistema que se utilizó en este estudio.

2.2. Determinación de la calidad del agua residual tratada

Se determinó la calidad del agua residual municipal tratada en el sistema. Los sólidos suspendidos totales (SST), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), la demanda química de oxígeno (DQO), coliformes totales, fecales, y huevos del helminto, fueron evaluados en función de lo estipulado en las normas oficiales mexicanas NMX-AA-034-SCFI-2015, NMX-AA-028-SCFI-2021, NMX-AA-030/1-SCFI-2012, NMX-AA-042-SCFI-2015 y NMX-AA-113-SCFI-2012, respectivamente. Estos parámetros fueron evaluados al inicio y al final de cada TRH analizado.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. pH

En la Figura 2 se puede observar el pH evaluado en el sistema secuencial anaerobio/aerobio de flujo laminar escala planta piloto. En esta imagen se observa que el pH obtenido en el efluente a TRH de 4, 8 y 16 h fue de 7.92, 8.10 y 8.39, respectivamente. Los resultados indican una tendencia gradual al incremento del pH conforme aumenta el tiempo de retención hidráulica. Este comportamiento puede asociarse a la estabilización progresiva del sistema biológico, donde la transformación de compuestos intermedios generados en la fase anaerobia (conversión de ácidos grasos volátiles durante la metanogénesis) y su posterior consumo en la fase aerobia favorecen condiciones cercanas a la neutralidad o ligeramente alcalinas (Ni et al., 2023). En particular, la reducción de compuestos ácidos y la dinámica del carbono inorgánico disuelto pueden contribuir a este incremento del pH. Asimismo, el hecho de que el pH se mantenga dentro de un rango relativamente estrecho sugiere que el sistema presenta una adecuada capacidad amortiguadora, lo cual es fundamental para evitar desequilibrios en los procesos biológicos. Valores de pH en este intervalo son favorables para la actividad microbiana, lo que indica que el sistema operó bajo condiciones estables en todos los tiempos de retención evaluados.

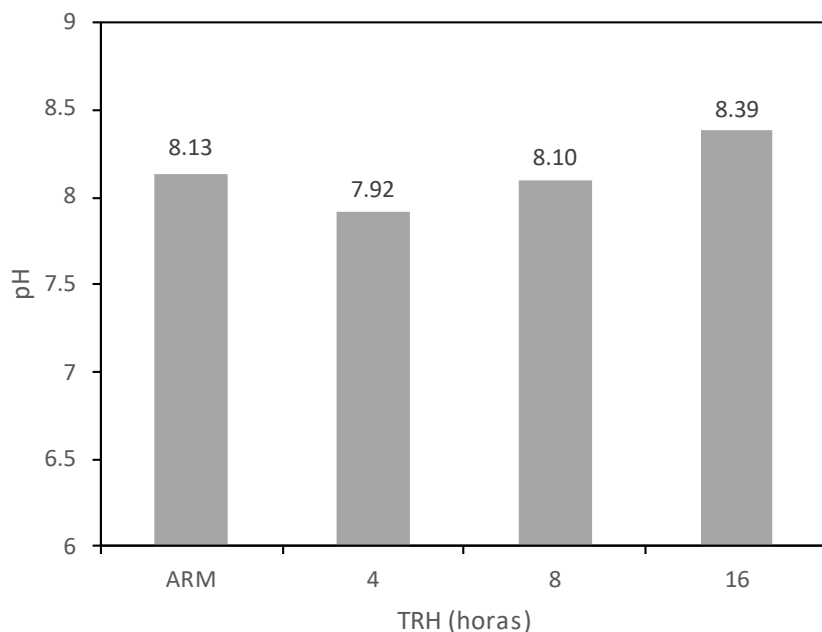


Figura 2. pH obtenido en el sistema secuencial a TRH de 4, 8 y 16 h.

3.2. Conductividad eléctrica (CE)

En la Figura 3 se puede observar la CE evaluada en el sistema secuencial anaerobio/aerobio de flujo laminar escala planta piloto. En esta imagen se observa que la conductividad eléctrica del efluente presentó valores de 1.87 dS/m, 2.02 dS/m y 2.05 dS/m para los TRH de 4, 8 y 16 h, respectivamente, mostrando una ligera tendencia al incremento conforme aumenta el tiempo de retención hidráulica. Este comportamiento puede atribuirse a la mineralización de la materia orgánica durante el tratamiento biológico, proceso en el cual los compuestos complejos son transformados en especies iónicas más simples, como amonio, bicarbonatos y otros iones disueltos, lo que contribuye al aumento de la conductividad eléctrica (Henze et al., 2008; Metcalf et al., 2014). Asimismo, el mayor tiempo de contacto favorece una mayor liberación de estos compuestos al medio líquido. Por otro lado, la variación observada puede ser considerada como moderada, lo que sugiere que el sistema mantiene un comportamiento estable en términos de acumulación de sales disueltas. Este tipo de respuesta es común en sistemas biológicos de tratamiento

de aguas residuales, donde la conductividad tiende a incrementarse ligeramente debido a los procesos de degradación, sin presentar cambios abruptos bajo condiciones operativas estables. En conjunto, los resultados indican que el sistema promueve la transformación de la materia orgánica sin generar incrementos excesivos en la concentración de sólidos disueltos, lo cual es relevante para la calidad del efluente tratado.

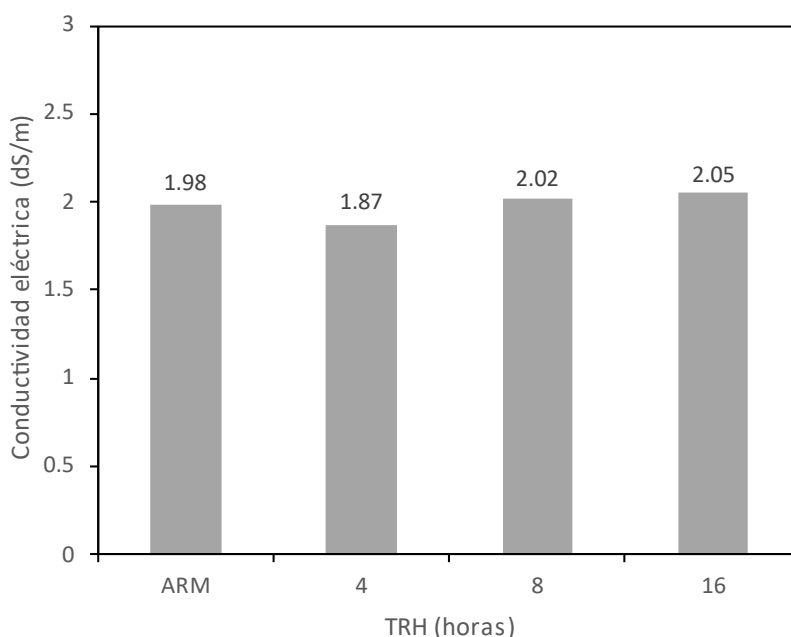


Figura 3. Conductividad eléctrica obtenida en el sistema secuencial a TRH de 4, 8 y 16 h.

3.3. Eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (ERDQO)

En la Figura 4 se observa la ERDQO en el sistema secuencial anaerobio/aerobio, donde se obtuvieron valores de 21.49%, 39.60% y 56.25% para los TRH de 4, 8 y 16 h, respectivamente. En esta imagen, se aprecia un incremento significativo en la eficiencia de remoción conforme aumenta el tiempo de retención hidráulica. Este comportamiento indica que el tiempo de contacto influye directamente en la

degradación de la materia orgánica, ya que periodos más largos permiten una mayor actividad microbiana y un aprovechamiento más completo del sustrato disponible. En sistemas biológicos, el aumento del TRH favorece tanto la hidrólisis de compuestos complejos en la etapa anaerobia como su posterior oxidación en la fase aerobia, lo que se traduce en una mayor reducción de la DQO. Asimismo, la tendencia observada es consistente con el funcionamiento de sistemas secuenciales, donde la etapa anaerobia actúa como un pretratamiento que reduce la carga orgánica inicial, mientras que la etapa aerobia complementa la remoción al degradar los compuestos remanentes (Tawfik et al., 2008). Esto explica el incremento progresivo en la eficiencia al pasar de 4 a 16 h. Sin embargo, los valores obtenidos sugieren que, aunque el sistema presenta una mejora notable con el incremento del TRH, la remoción aún es moderada en comparación con sistemas convencionales optimizados, lo cual puede estar relacionado con las condiciones de operación a escala piloto o con el tiempo de adaptación del sistema.

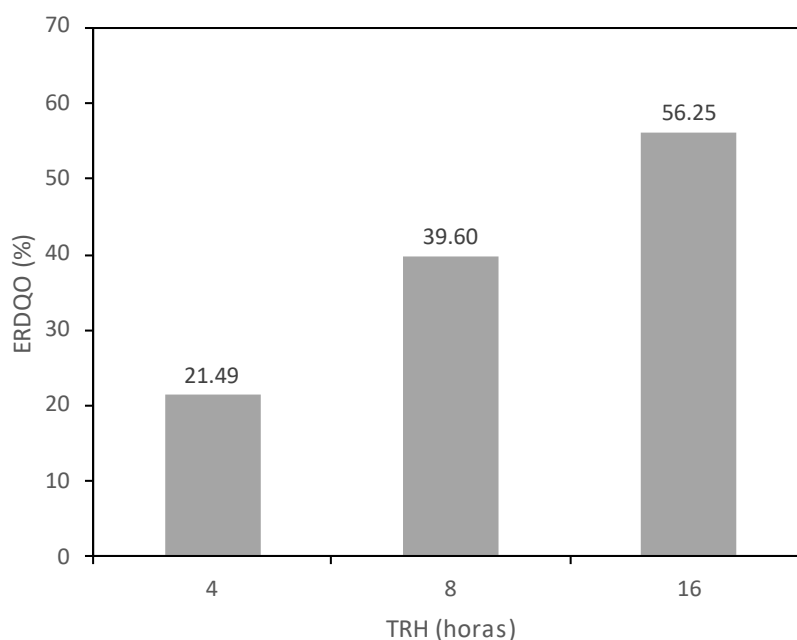


Figura 4. Eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (ERDQO) en el sistema secuencial a TRH de 4, 8 y 16 h.

3.4. Eficiencia de remoción de demanda bioquímica de oxígeno (ERDBO)

En la Figura 5 se observa la ERDBO en el sistema secuencial anaerobio/aerobio, donde se obtuvieron valores de 23.62%, 38.78% y 54.08% para los TRH de 4, 8 y 16 h, respectivamente. Al igual que en el caso de la DQO, se presenta un incremento progresivo en la eficiencia conforme aumentó el tiempo de retención hidráulica. Este comportamiento refleja un mayor consumo de la fracción biodegradable de la materia orgánica, la cual es directamente medida por la DBO. A mayores tiempos de retención, los microorganismos disponen de un periodo más prolongado para asimilar y oxidar los compuestos orgánicos, lo que se traduce en una mayor eficiencia del sistema. Asimismo, la tendencia observada es consistente con el funcionamiento de sistemas biológicos secuenciales, en los cuales la etapa anaerobia contribuye a la transformación inicial de la materia orgánica, mientras que la etapa aerobia favorece su oxidación más completa. Esto permite una remoción más eficiente de la DBO conforme se incrementa el TRH (Hai et al., 2018; Merino-Solís et al., 2015). Por otra parte, la similitud en la tendencia de remoción entre DBO y DQO sugiere que el sistema presenta un comportamiento coherente en la degradación de materia orgánica, aunque con eficiencias moderadas, lo cual puede estar asociado a las condiciones de operación del sistema a escala planta piloto. En conjunto, los resultados indican que el tiempo de retención hidráulica es un factor determinante en la ERDBO, influyendo directamente en la actividad microbiana y en la estabilidad del proceso.

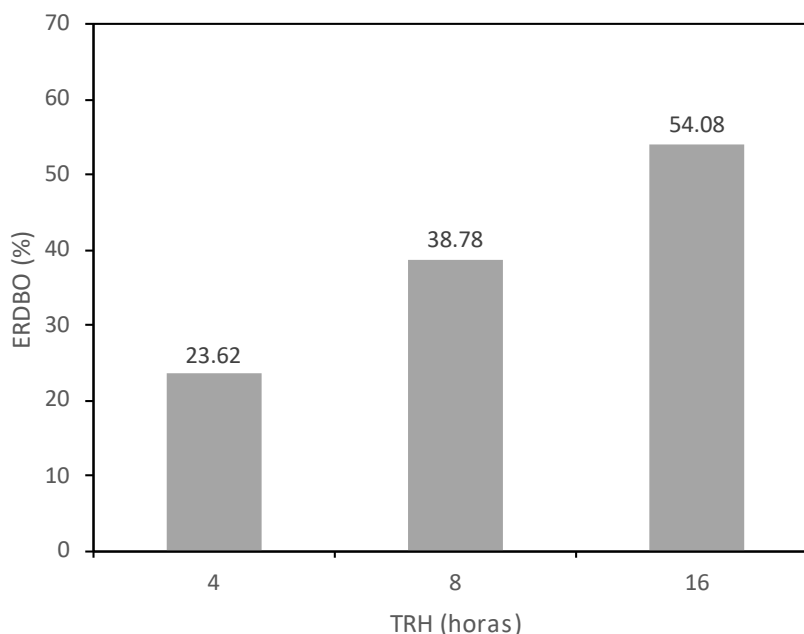


Figura 5. Eficiencia de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (ERDBO) en el sistema secuencial a TRH de 4, 8 y 16 h.

3.5. Eficiencia de remoción de coliformes totales (ERCT)

En la Figura 6 se observa la ERCT en el sistema secuencial anaerobio/aerobio, donde se obtuvieron valores de 70.30%, 97.03% y 99.70% para los TRH de 4, 8 y 16 h, respectivamente. Se aprecia un incremento significativo en la eficiencia de remoción conforme aumenta el tiempo de retención hidráulica, alcanzando valores cercanos a la eliminación casi total a las 16 h. Este comportamiento puede atribuirse al efecto combinado de las condiciones anaerobias y aerobias, así como al mayor tiempo de exposición de los microorganismos patógenos a un ambiente desfavorable. En el tratamiento anaerobio, factores como la competencia microbiana, la producción de metabolitos y las condiciones reductoras contribuyen a la inactivación parcial de los coliformes. Posteriormente, en la fase aerobia, la presencia de oxígeno, la actividad microbiana y posibles procesos de oxidación favorecen una reducción adicional de estos microorganismos. Asimismo, el incremento del TRH permite una mayor permanencia de los coliformes dentro del

sistema, lo que aumenta la probabilidad de su eliminación por mecanismos como la sedimentación, adsorción en el material de soporte y depredación biológica. Este efecto explica el aumento progresivo en la eficiencia observado entre 4 y 16 h (Aghalari et al., 2020; Mahapatra et al., 2022). Los altos porcentajes de remoción obtenidos, especialmente a mayores tiempos de retención, indican que el sistema presenta una elevada capacidad para la reducción de microorganismos indicadores, lo cual es un aspecto relevante en términos de calidad del agua del efluente tratado.

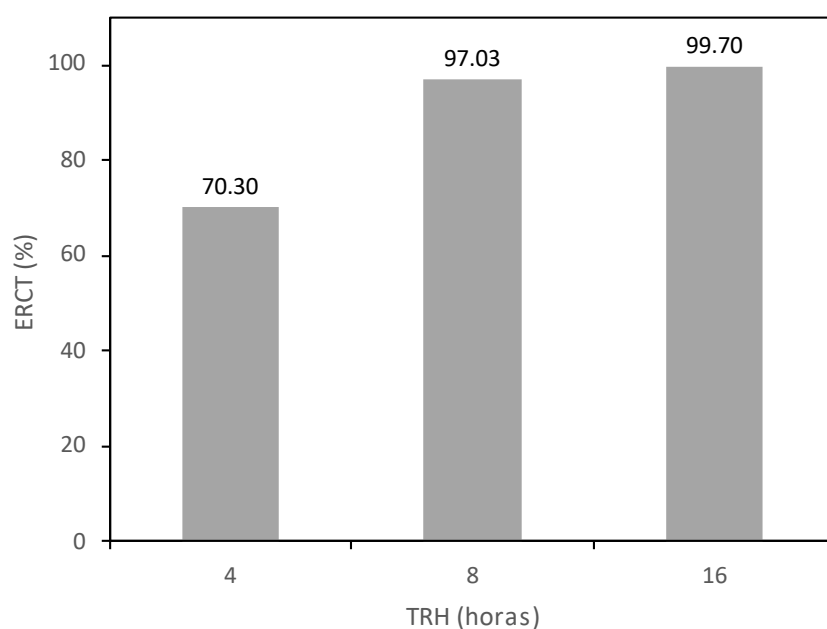


Figura 6. Eficiencia de remoción de coliformes totales (ERCT) en el sistema secuencial a TRH de 4, 8 y 16 h.

3.6. Eficiencia de remoción de coliformes fecales (ERCF)

En la Figura 7 se observa la eficiencia de remoción de coliformes fecales en el sistema secuencial anaerobio/aerobio, donde se obtuvieron valores de 70.30%, 97.03% y 99.70% para los TRH de 4, 8 y 16 h, respectivamente. Se presenta una tendencia creciente en la eficiencia conforme aumenta el tiempo de retención

hidráulica, alcanzando valores cercanos a la eliminación total a 16 h. Este comportamiento indica que el sistema es altamente efectivo en la remoción de microorganismos de origen fecal, los cuales son considerados indicadores más específicos de contaminación sanitaria. El incremento en la eficiencia con el TRH puede asociarse a una mayor exposición de estos microorganismos a condiciones adversas dentro del sistema, lo que favorece su inactivación progresiva. A diferencia de los coliformes totales, los coliformes fecales suelen ser más sensibles a cambios en las condiciones ambientales, como la disponibilidad de oxígeno, la competencia con otras comunidades microbianas y la permanencia en el sistema. Por ello, el aumento en el tiempo de retención permite intensificar estos efectos, promoviendo una mayor remoción (Olaolu et al., 2014; Scott et al., 2003). Los altos porcentajes obtenidos sugieren que el sistema no solo reduce la carga orgánica, sino que también mejora significativamente la calidad microbiológica del efluente, lo cual es fundamental para su posible reúso y cumplimiento de normativas vigentes.

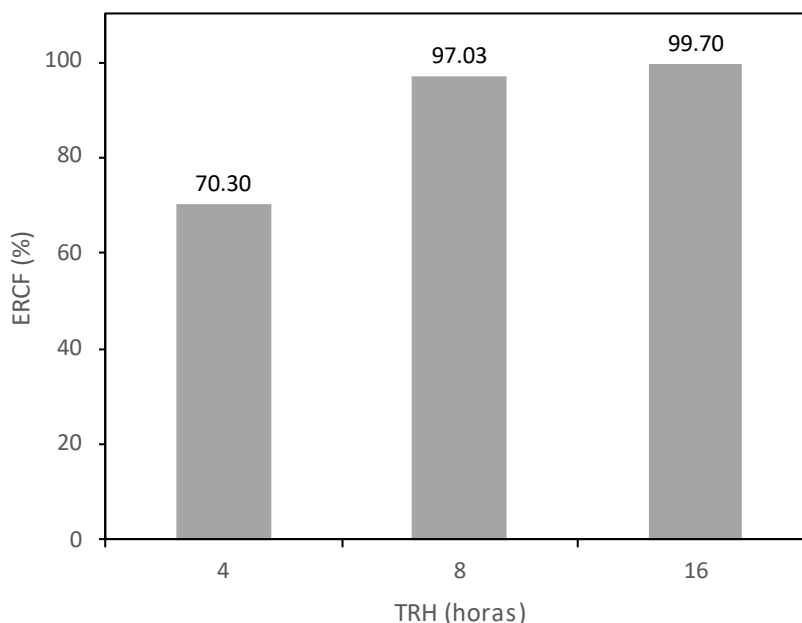


Figura 7. Eficiencia de remoción de coliformes fecales (ERCF) en el sistema secuencial a TRH de 4, 8 y 16 h.

3.7. Eficiencia de remoción de huevos de helminto

En la Figura 8 se observa la eficiencia de remoción de huevos de helminto (ERHH) en el sistema secuencial anaerobio/aerobio, donde se obtuvieron valores de 87.68%, 91.81% y 92.84% para los TRH de 4, 8 y 16 h, respectivamente. A diferencia de los parámetros anteriores, se observa una alta eficiencia de remoción desde el menor tiempo de retención hidráulica, con incrementos moderados al aumentar el TRH. Este comportamiento puede atribuirse principalmente a la naturaleza física de los huevos de helminto, los cuales presentan mayor tamaño y peso en comparación con otros contaminantes, lo que favorece su remoción por mecanismos como la sedimentación y retención en el medio de soporte. En este sentido, el sistema de flujo laminar y la presencia de materiales empacados contribuyen significativamente a su captura desde etapas tempranas del tratamiento. Asimismo, el ligero incremento en la eficiencia con el TRH sugiere que un mayor tiempo de contacto permite mejorar la retención y posible inactivación de estos organismos, aunque el efecto es menos pronunciado en comparación con parámetros anteriormente descritos. Esto indica que la remoción de huevos de helminto depende en mayor medida de procesos físicos que de la actividad biológica del sistema (Jiménez, 2007; Zdybel et al., 2015). Los altos porcentajes de remoción obtenidos son relevantes desde el punto de vista sanitario, ya que los huevos de helminto son considerados uno de los indicadores más restrictivos en normativas de reúso de agua residual, debido a su alta resistencia en el ambiente.

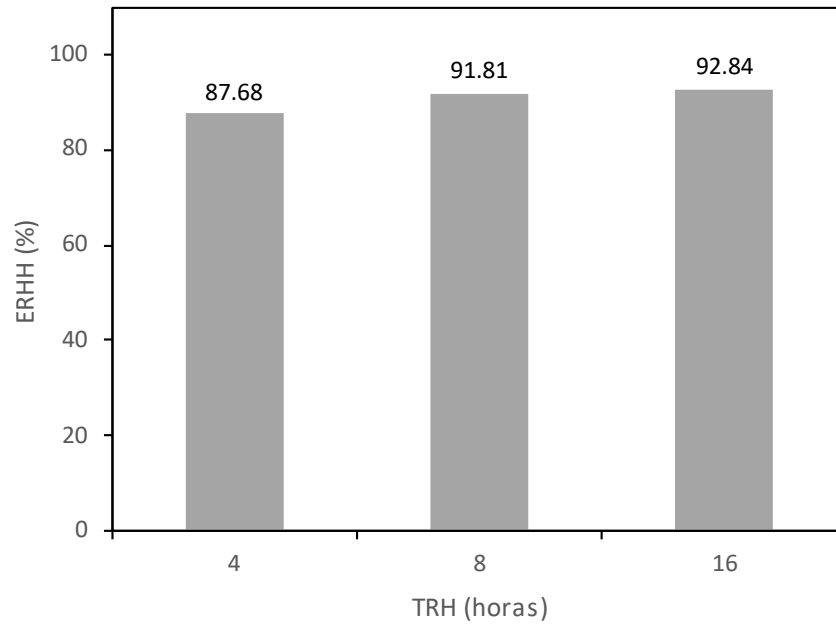


Figura 8. Eficiencia de remoción de huevos de helminto (ERHH) en el sistema secuencial a TRH de 4, 8 y 16 h.

CONCLUSIÓN

El sistema secuencial anaerobio/aerobio de flujo laminar a escala planta piloto empacado con fieltro de grafito demostró ser una alternativa viable para el tratamiento de agua residual municipal, mostrando un buen desempeño en todos los tiempos de retención hidráulica evaluados. El pH del sistema se mantuvo dentro de un rango ligeramente alcalino, lo que indica condiciones favorables para el desarrollo de la actividad microbiana y una adecuada estabilidad del proceso biológico. Por su parte, la conductividad eléctrica presentó un incremento moderado, asociado a la mineralización de la materia orgánica, sin evidenciar acumulaciones excesivas de sales disueltas. La eficiencia de remoción de materia orgánica, evaluada mediante la DQO y DBO, mostró una tendencia creciente con el incremento del tiempo de retención hidráulica. Estos resultados indican que el TRH es un factor determinante en el desempeño del sistema, favoreciendo la actividad microbiana y la degradación de los compuestos orgánicos. En cuanto a los parámetros microbiológicos, se observaron altas eficiencias de remoción. Los coliformes totales y fecales fueron removidos casi en su totalidad, evidenciando la capacidad del sistema para mejorar significativamente la calidad sanitaria del efluente. Asimismo, la remoción de huevos de helminto fue superior al 87% en todos los TRH evaluados, lo cual es relevante debido a su alta resistencia y su importancia en normativas de reúso. En conjunto, los resultados indican que el sistema presenta un buen desempeño tanto en la remoción de materia orgánica como en la reducción de microorganismos patógenos, destacando el efecto positivo del incremento del tiempo de retención hidráulica. Por lo tanto, este tipo de sistema representa una alternativa eficiente y sustentable para el tratamiento de aguas residuales municipales a escala planta piloto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aghalari, Z., Dahms, H. U., Sillanpää, M., Sosa-Hernandez, J. E., & Parra-Saldívar, R. (2020). Effectiveness of wastewater treatment systems in removing microbial agents: a systematic review. *Globalization and health*, 16(1), 13.
- Durham, DR, Marshall, LC, Miller, JG y Chmurny, AB (1994). Caracterización de bioportadores inorgánicos que moderan las alteraciones del sistema durante los procesos de biotratamiento con película fija. *Microbiología Aplicada y Ambiental* , 60 (9), 3329-3335.
- Ekama, GA y Wentzel, MC (2008). Eliminación de materia orgánica. *Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelado y diseño*. IWA Publishing, Londres , 53-86.
- Etsuyankpa, M. B., Augustine, A. U., Musa, S. T., Mathew, J. T., Ismail, H., Salihu, A. M., & Mamman, A. (2024). An overview of wastewater characteristics, treatment and disposal: A Review. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 28(5), 1553-1572.
- Gallert, C. y Winter, J. (2005). Metabolismo bacteriano en sistemas de tratamiento de aguas residuales. *Biotecnología ambiental. Conceptos y aplicaciones*.
- Hai, F. I., Yamamoto, K., & Lee, C. H. (Eds.). (2018). *Membrane biological reactors: theory, modeling, design, management and applications to wastewater reuse*. Iwa Publishing.
- Henze, M., van Loosdrecht, M. C., Ekama, G. A., & Brdjanovic, D. (Eds.). (2008). *Biological wastewater treatment*. IWA publishing.
- Jalili, P., Ala, A., Nazari, P., Jalili, B. y Ganji, DD (2024). Una revisión exhaustiva de celdas de combustible microbianas considerando materiales, métodos, estructuras y microorganismos. *Heliyon* , 10 (3).
- Jiménez, B. (2007). Helminth ova control in sludge: a review. *Water Science and Technology*, 56(9), 147-155.

- Kassab, G., Halalsheh, M., Klapwijk, A., Fayyad, M. y Van Lier, J.B. (2010). Tratamiento anaeróbico-aeróbico secuencial de aguas residuales domésticas: una revisión. *Bioresource Technology* , 101 (10), 3299-3310.
- Khademolqorani, S., Shah, KJ, Dilamian, M., Osman, AI, Altiok, E., Azizi, S., ... y Banitaba, SN (2025). Integración innovadora de materiales de carbono estratificados en membranas fibrosas de biopolímeros para el tratamiento sostenible del agua. *Advanced Sustainable Systems* , 2500035.
- Küçükbayrak, M. y Alver, A. (2025). Enfoques innovadores y rentables para mejorar la eliminación de nutrientes y la eficiencia energética en plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales. *Journal of Environmental Management* , 382 , 125350.
- Lohani, SP, y Havukainen, J. (2017). Digestión anaeróbica: factores que afectan el proceso de digestión anaeróbica. En *Biorremediación de residuos* (pp. 343-359). Singapur: Springer Singapur.
- Mahapatra, S., Samal, K., & Dash, R. R. (2022). Waste Stabilization Pond (WSP) for wastewater treatment: A review on factors, modelling and cost analysis. *Journal of Environmental Management*, 308, 114668.
- Merino-Solís, M. L., Villegas, E., De Anda, J., & López-López, A. (2015). The effect of the hydraulic retention time on the performance of an ecological wastewater treatment system: an anaerobic filter with a constructed wetland. *Water*, 7(3), 1149-1163.
- Metcalf & Eddy, A. E. C. O. M. (2014). *Wastewater engineering treatment and resource recovery*. McGraw-Hill Education..
- Montalvo, S., Huiliñir, C., Borja, R., Sánchez, E., y Herrmann, CJBT (2020). Aplicación de zeolitas en procesos de tratamiento biológico de residuos sólidos y aguas residuales: una revisión. *Bioresource Technology* , 301 , 122808.
- Ni, G., Leung, P. M., Daebeler, A., Guo, J., Hu, S., & Cook, P. (2023). Nitrification in acidic and alkaline environments. *Essays in Biochemistry*, 67(4), 753-768.

- NMX-AA-034-SCFI-2015 (secretaría de economía, 2015a) ANÁLISIS DE AGUA - MEDICIÓN DE SÓLIDOS Y SALES DISUELTAS EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS – MÉTODO DE PRUEBA
- NMX-AA-028-SCFI-2021 (secretaría de economía, 2021) ANÁLISIS DE AGUA- MEDICIÓN DE DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO5) EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES -TRATADAS- DILUSIÓN Y MÉTODO DE SIEMBRA MÉTODO DE PRUEBA
- NMX-AA-030/1-SCFI-2012 (secretaría de economía, 2012) ANÁLISIS DE AGUA - MEDICIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS.- MÉTODO DE PRUEBA - PARTE 1 - MÉTODO DE REFLUJO ABIERTO
- NMX-AA-042-SCFI-2015 (secretaría de economía, 2015b) ANÁLISIS DE AGUA-ENUMERACIÓN DE ORGANISMOS COLIFORMES TOTALES, ORGANISMOS COLIFORMES FECALIS (TERMOTOLERANTES) Y ESCHERICHIA COLI-MÉTODO DEL NÚMERO MÁS PROBABLE EN TUBOS MÚLTIPLES
- NMX-AA-113-SCFI-2012 (secretaría de economía, 2012) ANÁLISIS DE AGUA – MEDICIÓN DEL NÚMERO DE HUEVOS DE HELMINTO EN AGUAS RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS POR OBSERVACIÓN MICROSCÓPICA - MÉTODO DE PRUEBA
- NOM-003-SEMARNAT-1997 QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS QUE SE REUSEN EN SERVICIOS AL PÚBLICO.
- Olaolu, D. T., Akpor, O. B., & Akor, C. O. (2014). Pollution indicators and pathogenic microorganisms in wastewater treatment: implication on receiving water bodies. *International Journal of environmental protection and policy*, 2(6), 205-212.
- Ostermeyer, P., Capson-Tojo, G., Hülsen, T., Carvalho, G., Oehmen, A., Rabaey, K., & Pikaar, I. (2022). Resource recovery from municipal

wastewater: what and how much is there?. In *Resource recovery from water: principles and application* (pp. 1-19). IWA.

- Pachwarya, R. B., Mina, U., Ramanathan, A. L., Meena, R., & Hidayat, E. N. (2021). Advanced and traditional methods of wastewater treatment. *Geodiversity & Impact on Environment*, 24(3), 8-18.
- Patel, V., Pandit, S. y Chandrasekhar, K. (2017). Fundamentos de la metanogénesis en digestores anaeróbicos. En *Aplicaciones Microbianas, vol. 2: Biomedicina, Agricultura e Industria* (págs. 291-314). Cham: Springer International Publishing.
- Ramzanipour, MM, Mousavi, SJ y Vajargah, MF (2023). Panorama general del proceso de tratamiento de aguas residuales y lodos municipales. *Ecol. Conserv. Sci* , 2 , 555-596.
- Ranieri, E., Giuliano, S. y Ranieri, AC (2021). Consumo energético en plantas de tratamiento de aguas residuales anaeróbicas y aeróbicas en Italia. *Water Practice & Technology* , 16 (3), 851-863.
- Scott, T. M., McLaughlin, M. R., Harwood, V. J., Chivukula, V., Levine, A., Gennaccaro, A., ... & Rose, J. B. (2003). Reduction of pathogens, indicator bacteria, and alternative indicators by wastewater treatment and reclamation processes. *Water Science and Technology: Water Supply*, 3(4), 247-252.
- Shamshad, J. y Rehman, RU (2025). Enfoques innovadores para el tratamiento sostenible de aguas residuales: una exploración exhaustiva de tecnologías convencionales y emergentes. *Ciencias Ambientales: Avances*.
- Sikosana, ML, Sikhwivhilu, K., Moutloali, R. y Madyira, DM (2019). Tecnologías de tratamiento de aguas residuales municipales: Una revisión. *Procedia Manufacturing* , 35 , 1018-1024.
- Tariq, A. y Mushtaq, A. (2023). Causas y causas de las aguas residuales sin tratar: Una revisión de las zonas y ciudades más afectadas. *Int. J. Chem. Biochem. Sci* , 23 (1), 121-143.
- Tawfik, A., El-Gohary, F., Ohashi, A., & Harada, H. (2008). Optimization of the performance of an integrated anaerobic–aerobic system for domestic wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 58(1), 185-194.

- Trifirò, F. y Zanirato, P. (2024). Purificación del agua: tratamientos físicos, mecánicos, químicos y biológicos. *Mathews J Pharma Sci* , 8 (3), 42.
- Van Lier, J. B., Mahmoud, N., y Zeeman, G. (2008). Tratamiento anaeróbico de aguas residuales. *Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelado y diseño* , 415-456.
- Zdybel, J., Cencek, T., Karamon, J., & Kłapeć, T. (2015). Effectiveness of selected stages of wastewater treatment in elimination of eggs of intestinal parasites. *Journal of Veterinary Research*, 59(1), 51-57.