

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA



“Arranque de un sistema secuencial de biofiltros anaerobio-aerobio para el tratamiento de agua residual municipal”

Por:

ABIGAIL ZAVALA RAMÍREZ

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Junio 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

“Arranque de un sistema secuencial de biofiltros anaerobio-aerobio para el tratamiento de agua residual municipal”

Por:

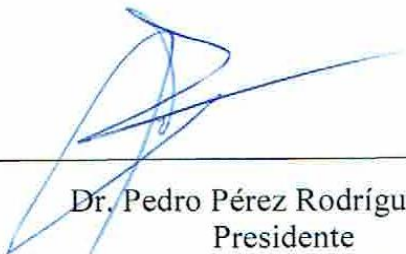
ABIGAIL ZAVALA RAMÍREZ

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



M.C. Laura María González Méndez
Vocal



Dra. Aida Isabel Leal Robles
Vocal



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

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

“Arranque de un sistema secuencial de biofiltros anaerobio-aerobio para el tratamiento de agua residual municipal”

Por:

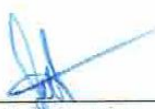
ABIGAIL ZAVALA RAMÍREZ

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



M.C. Laura María González Méndez
Coasesor

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2024

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, graficas, 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, organizacional, medio público o privado.

Autor principal



Abigail Zavala Ramirez

Nombre y firma

Asesor principal



Dra. Silvia Judith Martínez Amador

Nombre y firma

DEDICATORIA

A mis padres Alberto Zavala González y Elia Ramírez Jiménez por brindarme su apoyo incondicional en cada una de mis etapas de crecimiento profesional y personal, por haber confiado siempre en mí, por ser el motor de mi vida, por darme su ejemplo de vida motivándome, llenándome de amor siempre, por ser unos padres ejemplares y luchar contra todo para darme siempre lo mejor y llenarme de felicidad, por estar en mis días soleados y mis días grises, por sus consejos de vida, por llenarme de herramientas suficientes para enfrentar la vida y por dejarme la mejor herencia: una carrera profesional.

A mis hermanos Isaí, Alberto y Lupita por brindarme su apoyo, amor, sabiduría, por llenar mi vida de felicidad, por confiar en mí, por protegerme, por llenar mi vida de risas, momentos únicos, por llenarme de ánimos, por enseñarme a no rendirme y por ser parte de mi vida.

A mis sobrinos Yeray, Saira, Eliel y Tadeo por contagiarme de sus carcajadas cuando la carga de trabajo estudiantil era mucha, por brindarme su amor tan sincero y puro de un niño, por animarme cuando estaba estresada por tareas, por ser mis motores, por llenarme de mucha sabiduría sobre la vida, por enseñarme que los lazos de amor nada ni nadie los rompe, por enseñarme a ser fuerte, por enseñarme que la vida es tan hermosa y por estar tan cerquita de mi vida llenándola de momentos hermosos a su lado.

A mi amiga Rocío por brindarme su amistad tan noble, tan leal, real y tan merecedora de mi respeto, por su apoyo incondicional a lo largo de la carrera, por no soltarme cuando las cosas se complicaban, por estar conmigo en los días soleados, grises y oscuros, por enseñarme que siempre es calidad y no cantidad, por hacer de esta etapa estudiantil la más bonita.

A Joel por brindarme su amistad y apoyo incondicional, por confiar en mí, por amarme y nunca soltarme.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por brindarme las herramientas necesarias para lograr esta meta, por llenarme de sabiduría, fortaleza y responsabilidad, por poner a las personas adecuadas en mi camino y por guiarme para llegar a la meta.

A mi familia por siempre estar para mí, por amarme, por confiar en mí, por sus consejos, por apoyarme siempre y por ser el motor de vida.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por brindarme esta oportunidad de lograr mi sueño, por apoyarme a lo largo de la carrera, por ser mi segunda casa, por su apoyo incondicional y por ser mi Alma Mater.

A la Dra. Silvia Yudith Martínez Amador quien fue mi asesora de tesis, una gran maestra y amiga quien además de darme la oportunidad de trabajar en este proyecto confió en mí en todo momento, me brindó su apoyo, su tiempo y su conocimiento incondicional.

A la Q.F.B Brenda Verónica Borrego Limón por su gran apoyo tecno científico y comprensión, por enseñarme y tenerme paciencia a lo largo de la ejecución de este proyecto de tesis y ayudarme en todo momento mediante su experiencia y conocimiento. Así como también por brindarme su confianza y su gran amistad como amiga.

A mis amigos Rocío Estrada, Eduardo Mendieta, Verenisse Maya, Lenica López, Joel Santiago, Bryan Rivera, Mónica Valenzuela, quienes marcaron mi vida con sus consejos, los buenos momentos a su lado, las risas que pasamos juntos y por su apoyo incondicional a lo largo de la carrera

CONTENIDO

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO.....	2
DEDICATORIA.....	¡Error! Marcador no definido.
AGRADECIMIENTOS.....	6
ABREVIATURAS	9
INDICE DE FIGURAS.....	10
RESUMEN	11
1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. OBJETIVO GENERAL	14
3. HIPÓTESIS	14
4. REVISIÓN DE LITERATURA.....	15
4.1 ¿Qué son las aguas residuales municipales?.....	15
4.2 Problemática de las ARM.....	15
4.3 Tratamiento de aguas residuales municipales.	16
4.3.1 Tratamiento primario.....	16
4.3.2 Tratamiento secundario	16
4.3.2.1 Tratamiento biológico.....	17
4.3.2.2 Discos biológicos.....	17
4.3.2.3 Lodos activados	18
4.3.2.4 Reactores biológicos secuenciales.....	19
4.3.2.5 Lagunas aireadas.....	19
4.3.2.6 Biorreactores con membrana	20
4.3.2.7 Filtro rociador	21
4.3.3 Tratamiento terciario	22

5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
5.1 Localización donde se llevó a cabo el experimento	22
5.2 Materiales y equipo	22
5.3 Metodología.....	24
5.3.1 Diseño del RBS	24
5.3.2 Parámetros evaluados	25
5.3.3 Métodos analíticos.....	25
5.3.3.1 pH	25
5.3.3.2 Temperatura.....	26
5.3.3.3 Conductividad eléctrica	26
5.3.3.4 Demanda Química de Oxígeno.....	26
5.3.3.4.1 Materiales utilizados para determinar la DQO	27
5.3.3.4.2 Solución de dicromato de potasio.....	28
5.3.3.4.3 Solución de sulfato de plata y ácido sulfúrico.....	28
5.3.3.4.4 Determinación de la DQO	28
6. RESULTADOS	29
6.1 pH	29
6.2 Temperatura.....	30
6.2.1 Eficiencia de remoción de la DQO y la temperatura ambiente	30
6.2.2 Demanda química de oxígeno (DQO) y la temperatura ambiente	31
6.3 Conductividad eléctrica	32
7. CONCLUSIONES.....	33
8. BIBLIOGRAFÍA	34

ABREVIATURAS

ARM: Agua residual municipal

CE: Conductividad eléctrica

DBO: Demanda bioquímica de oxígeno

DQO: Demanda química de oxígeno

pH: Potencial de hidrógeno

RBS: Reactor biológico secuencial

SST: Sólidos suspendidos totales

TRH: Tiempo de retención hidráulica

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Colonia de protozoos en un ecosistema de lodos actividades	19
Figura 2: Tipos de reactores de biopelícula.....	21
Figura 3. Partes del sistema secuencial anaerobio – aerobio.....	25
Figura 4. Sistema secuencial anaerobio-aerobio utilizado durante la investigación	25
Figura 5. Comportamiento del pH del agua residual municipal del influente y efluente.....	30
Figura 6. Comparación de las temperatura máximas y mínimas con el porcentaje de remoción de la DQO.....	31
Figura 7. Comparación de las temperatura máximas y mínimas con el porcentaje de remoción de la DQO del efluente (mg/l) respecto a la del influente (mg/l)	32
Figura 8. Comportamiento de la conductividad eléctrica del ARM tratada.....	33

RESUMEN

Los sistemas biológicos secuenciales son un tipo de tratamiento de las aguas residuales que consiste en la unión de las reacciones de diferentes microorganismos como pueden ser anaerobios, anaerobios facultativos y aerobios. En esta investigación se monitoreo el arranque de un sistema secuencial de biofiltros anaerobio-aerobio para el tratamiento de agua residual municipal (ARM) con una capacidad combinada de 3.320 L. El objetivo de evaluar el desempeño en el arranque de un sistema de tratamiento de agua residual municipal consistente en biofiltros secuenciales anaerobio-aerobio empacados con fieltro de grafito y operado a un TRH de 32.78 h y a temperatura ambiente en los meses de Noviembre-Diciembre de 2022. Los parámetros monitoreados fueron demanda química de oxígeno (DQO), pH y conductividad eléctrica (CE) durante 21 días de trabajo. Se obtuvo un buen desempeño del sistema secuencial de biofiltros que fue determinado por la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno del agua residual municipal (ARM), donde se obtuvo un porcentaje promedio de 83.41% . El pH del influente promedio fue 7.4, mientras que el promedio del efluente fue de 8.4, cambiando de casi neutro a alcalino. La conductividad eléctrica (CE) del influente tuvo un promedio de 1770.25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ valor que disminuyó ligeramente en el efluente hasta un promedio de 1615.12 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La temperatura fue un factor que para el porcentaje de remoción de la DQO no afecto de manera directa. Los resultados obtenidos indican que el arranque del reactor secuencial de biofiltros anaerobio-aerobio tuvo un buen desempeño, ya que en los 21 días de monitoreo se obtuvo una alta eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno, por tanto este sistema puede llegarse a aplicar a gran escala pero habría que hacer estudios por más tiempo y determinar una mayor cantidad de parámetros.

Palabras clave: sistema secuencial, agua residual municipal, tratamiento de agua residual municipal, efluente, influente, remoción de DQO, norma oficial Mexicana.

1. INTRODUCCIÓN

El agua residual municipal es aquella que surge una vez que se utiliza para realizar actividades domésticas, de algún negocio, escuelas, etc. El tratamiento de agua residual es el proceso por medio del cual se eliminan nutrientes como lo son el nitrógeno y fosforo, así mismo, su objetivo principal radica en la disminución de materia tanto orgánica como inorgánica. Este tratamiento surgió debido a la contaminación de los cuerpos de agua, el agotamiento de la misma y la necesidad de usarla en actividades domésticas por el crecimiento demográfico de la población, en un inicio se comenzó por descargar este tipo de agua directamente en el suelo, posterior a esto las superficies de terreno no fueron suficientes para abastecer la demanda de agua residual, por lo cual el tratamiento de la misma se comenzó a realizar por medio de los sistemas de alcantarillado y por ende la construcción de plantas de tratamiento de agua (CONAGUA, 2019).

Con el objetivo de no causar alguna afectación en la población se tuvieron que realizar tratamientos de las aguas residuales municipales como los primarios donde se retira la mayor cantidad de partículas sólidas y flotantes de gran tamaño que el agua pueda contener, tratamientos secundarios que son muy importantes debido a que se realiza el 90% de remoción de sólidos contenidos en el agua y tratamientos terciarios donde se elimina la carga orgánica residual y sustancias que son contaminantes (López-Vázquez *et al.*, 2017).

Uno de los tipos de tratamiento secundario son los biológicos que tienen como objetivo el uso de microorganismos como lo son las bacterias, los hongos, plantas, etc., para la eliminación de materia orgánica o bien la conversión de contaminantes o nutrientes a otros más simples y menos dañinos para el medio ambiente, este tipo de tratamiento se realizan en biorreactores que son diseñados especialmente, su operación es muy sistemática (Pandey *et al.*, 2019). Los procesos biológicos aeróbicos y anaeróbicos se pueden utilizar para el tratamiento de agua residual municipal y son considerados procesos muy rentables y lo más importante: amigables con el medio ambiente, por lo cual un sistema combinado es decir, anaeróbico- aeróbico, donde los beneficios de cada uno de ellos lo hacen un proceso eficiente para el tratamiento de agua residual municipal y que cada vez más países lo ponen en práctica para el beneficio del medio ambiente (Pandey *et al.*, 2019). Es importante mencionar que cada tipo de biorreactor tiene sus propias características, así mismo es utilizado para tratar

diferentes tipos de agua residual, sin embargo, es muy importante el tratamiento de aguas residuales debido a que se disminuye el impacto ambiental que estas puedan generar si se descargan directamente sin tratamiento previo a cuerpos de agua o superficies naturales (Tran *et al.*, 2018)

Los biofiltros son dispositivos que son utilizados para la remoción de una amplia gama de contaminantes en el agua, donde el uso de los mismos contribuye a evitar la contaminación de los cuerpos de agua tanto superficiales como subterráneos causado por verter de manera directa el agua residual. Existen trabajos previos que han sido realizados con biofiltros secuenciales para el tratamiento de agua residual municipal, por ejemplo, con el estudio de un sistema de biofiltro anóxico–anaeróbico/aeróbico alterno para el enriquecimiento de organismos desnitrificantes que acumulan fosforo en el tratamiento de aguas residuales. Estos organismos desnitrificantes que acumulan fosforo después de 60 días de funcionamiento mostraron que se enriquecieron con éxito y que eliminaron un 84% del total del fosforo presente en el agua residual, así mismo cuando se realizó un análisis de la comunidad de microorganismos se obtuvo que la abundancia de los organismos desnitrificantes que acumulan fosforo son: *Aeromonas* (4.47%), *Hyphomicrobium* (0.42%), *Pseudomonas* (0.21%) y *Pseudofulvimonas* (0.18%), también estos microorganismos aumentan en óptimas condiciones en comparación con la etapa de puesta en marcha. Los resultados de este estudio son importantes en la contribución del papel de estos microorganismos para la remoción biológica de nutrientes (Mingchang Gao, *et al.*, 2023). Otro trabajo se realizó por medio de una biopelícula que fue integrada a un reactor secuencial anaeróbico / aeróbico para el tratamiento de agua residual *in situ*, consta de 2 biofiltros, el primero anaeróbico y el segundo aeróbico, el tiempo de retención hidráulica fue de 24 horas para el sistema anaeróbico y 2 horas para el aeróbico buscando mejorar la calidad del efluente. Este reactor secuencial fue operado con dos tipos de alimentación, los resultados que se obtuvieron en el desempeño de flujo estacionario respecto a solidos suspendidos totales (SST), nitrógeno total (TN), coliformes fecales (FC) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO) fueron más eficientes respecto al flujo no estacionario, debido a que en este el desempeño disminuyo, de igual manera con ayuda del microscopio electrónico de barrido por emisión de campo se pudo confirmar la presencia y morfología de bacterias aeróbicas y anaeróbicas en el lodo formado dentro del reactor. Este estudio demostró que este sistema

secuencial tiene un gran éxito para el tratamiento de agua residual municipal *in situ*, además de que es una alternativa sostenible en países en desarrollo (Surya *et al.*, 2023)

2. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el desempeño en el arranque de un sistema de tratamiento de agua residual municipal consistente en biofiltros secuenciales anaerobio-aerobio empacados con fieltro de grafito.

3. HIPÓTESIS

En la fase de arranque el sistema secuencial de biofiltros anaerobio-aerobio tendrá una alta eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno como producto de la degradación de compuestos orgánicos e inorgánicos contenidos en el agua residual municipal.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 ¿Qué son las aguas residuales municipales?

Se le llama agua residual municipal a aquella que es producto de los desagües en escuelas, hogares, restaurantes, supermercados, cafeterías, etc., esta agua se identifica de las demás por poseer baja fuerza orgánica, sin embargo tiene un alto contenido de materia orgánica que se encuentra particulada en ella, además de que es un tipo de agua la cual se produce en grandes cantidades, por tal motivo lo que actualmente se busca es el tratamiento de agua residual municipal, para volver a reutilizar el agua para distintas actividades necesarias para el ser humano y plantas, como lo son agua para fines medicinales, para bañarse, limpieza del hogar, escuelas, negocios, entre otras actividades más, con esto lo que se pretende es darle un nuevo uso al agua, es importante mencionar que de acuerdo al crecimiento demográfico y el mal uso de la misma, el agua potable es escasa por ello en los últimos años se ha trabajado con nuevas tecnologías que nos permitan reutilizarla y satisfacer nuestras necesidades (tratamiento de agua residual municipal) ya que en un futuro el agua potable será cada vez menos (Nasiru *et al.*, 2018).

El primer objetivo del tratamiento de agua residual municipal es reducir los residuos que el agua contiene en forma particulada, posteriormente se puede realizar algún método químico, biológico e inclusive térmico para el mismo fin que tienen el objetivo de procesar toda el agua residual municipal para obtener agua de buena calidad, la cual puede utilizarse para los fines antes mencionados, en caso de necesitar una tecnología más nueva para el tratamiento de agua residual se puede utilizar algún tipo de proceso biológico como lo son: lagunas aireadas, lodos activados o bien tratamiento aeróbico - anaeróbico o cualquier otro con el mismo principio, de igual manera se puede utilizar la radiación, radiación ionizante o bien uso de zeolitas. Es importante considerar que para el tratamiento de aguas residuales se debe de contar con permisos y regulaciones específicas que permitan la práctica del mismo, así como la descarga en cuerpos de agua una vez culminado el proceso (Hejna *et al.*, 2022).

4.2 Problemática de las ARM

En la actualidad el crecimiento demográfico, el estilo de vida de las personas y las actividades que realizan conllevan a que las aguas residuales que se producen contengan diversos tipos de nutrientes, contaminantes y demás sustancias, todo esto lleva a que el tratamiento de las

mismas sea un proceso más complejo y que además de eso las personas que están involucradas tengan un amplio conocimiento en el desarrollo de esta área para que así el tratamiento de las aguas residuales municipales sea multidisciplinario, esto con el fin de que los resultados obtenidos tengan un gran éxito (CONAGUA, 2020).

4.3 Tratamiento de aguas residuales municipales.

El tratamiento de aguas residuales permite obtención de agua de buena calidad, además que permite el cuidado de los cuerpos de agua, así mismo se obtienen subproductos de gran importancia económica por ejemplo: abono, bioplásticos y combustibles por mencionar algunos, cabe destacar que existen objetivos, planeación, recursos técnicos, económicos diferentes en los sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales, lo que se busca es: remoción de patógenos, materia orgánica y sólidos suspendidos, aunque existen tratamientos más específicos que buscan: la remoción de fósforo, nitrógeno, metales pesados, sustancias inorgánicas disueltas y fenoles o algún pesticida (Gani *et al.*, 2020; Mmontshi *et al.*, 2020).

4.3.1 Tratamiento primario

Se utilizan rejillas, desarenadores, filtros gruesos, oxidación química, sedimentación, etc., con el objetivo de remover partículas gruesas, arena o sólidos suspendidos o bien una fracción de la carga orgánica que pueda contener el agua residual. Este porcentaje de carga orgánica removida representa entre el 25 al 40% del total de la DBO, por otra parte, el porcentaje de los sólidos suspendidos removidos en este tratamiento primario se encuentra entre el 50 al 65% (Rojas *et al.*, 2021).

4.3.2 Tratamiento secundario

Se utiliza el tratamiento biológico con el objetivo de remover o convertir la materia orgánica disuelta que pueda contener el agua residual en sólidos sedimentables que son separados por medio de sedimentación en tanques de decantación. Cabe mencionar que estos procesos biológicos tienen modificaciones de acuerdo al requerimiento de cada tratamiento debido a que estos pueden ser muy específicos.

Los tratamientos biológicos para el tratamiento secundario tienen una remoción de la materia orgánica presente muy eficiente, es decir entre el 85 al 95% de la DBO y son los siguientes:

- a) Lodos activados: convencionales, aireación prolongada y alta capacidad.
- b) Lagunas: estabilización (facultativas y aerobias) y aireadas (difusión de aire, aireadas facultativas, etc.).
- c) Filtración biológica: alta capacidad (biofiltros, filtros comunes, etc.) y baja capacidad (filtros clásicos) (Loosdrecht *et al.*, 2020).

4.3.2.1 Tratamiento biológico

El objetivo del tratamiento biológico es degradar la materia orgánica disuelta con ayuda de microorganismos como lo son las bacterias debido a que estas ayudan a cerrar los ciclos elementales como lo son el carbono, nitrógeno y potasio, las condiciones necesarias para que estos microorganismos se desarrollen deben de ser las óptimas, los factores principales que afectan en su crecimiento son: oxígeno, temperatura, pH y la presión atmosférica (Comeau *et al.*, 2019).

4.3.2.2 Discos biológicos

Se le conoce así a este proceso debido a la presencia de discos de plástico o algún otro material que están colocados en tanques sujetos por una flecha horizontal que es rotatoria, de forma que el 40% de ellos están sumergidos en el agua residual y el otro 60% está en contacto con el medio ambiente, el objetivo principal de este tratamiento es la remoción de sólidos en los tratamientos secundarios, aunque también se usa para nitrificación y desnitrificación, el principio de este proceso es la formación de biopelículas o películas biológicas, es decir los microorganismos presentes en el agua residual se adhieren sobre la superficie mojada de los discos, así mismo la población biológica del medio ambiente se alimenta de los microorganismos que se encuentran en el agua residual, la turbulencia que provocan estos discos permite la transferencia de oxígeno manteniendo la biomasa en estado aerobio. Cabe destacar que para evitar tener problemas de desprendimiento de olores de debe de tener un buen manejo del proceso, así como un buen diseño del mismo (Thanki *et al.*, 2020).

4.3.2.3 Lodos activados

Se le conoce así a este proceso debido a la combinación de microorganismos y lodos activados, estos lodos en el reactor están ligados a la respiración endógena, es decir que se consume oxígeno, el objetivo principal de este tratamiento de agua residual es la remoción de la materia orgánica que se pueda encontrar en el agua en términos de DBO que se logra por medio de una conversión biológica por microorganismos en presencia de oxígeno como se mencionó anteriormente, este se suministra por medio de aireadores mecánicos (con turbina sumergida de alta o baja velocidad) aunque hay posibilidad de que se formen aerosoles o bien difusores, la DBO se convierte en CO_2 y agua, además de nuevas células para los microorganismos presentes. Los lodos deben estabilizarse para evitar alguna condición insalubre y para evitar los problemas con posibles olores fuertes se debe de tener una buena operación del sistema, pero lo más importante un buen diseño, Cabe destacar que para el consumo de energía de este proceso depende del suministro de oxígeno y por supuesto de las características que el agua posee, aunque por lo general hay un alto consumo de energía eléctrica. Sin embargo, el resultado de este proceso es que es más económico comparándolo con uno convencional (Hooijmas *et al*, 2022).

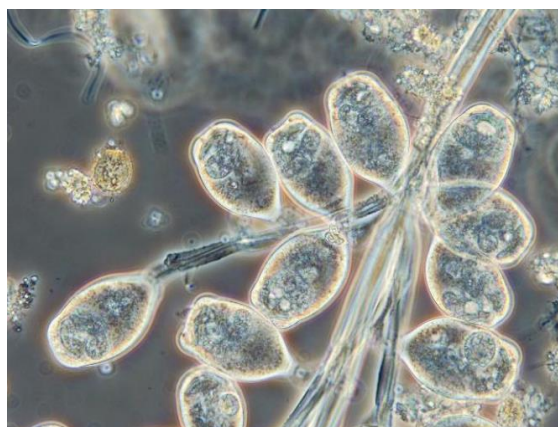


Figura 1. Colonia de protozoos en un ecosistema de lodos activados (Brdjanovic, 2019).

4.3.2.4 Reactores biológicos secuenciales

Se conoce así debido a que el agua residual se mezcla con un lodo biológico en un medio que se encuentra en presencia de aire, por ello es el único proceso biológico donde se mezclan en el mismo tanque la aireación y clarificación, su objetivo principal es la remoción de contaminantes tales como compuestos aromáticos, plaguicidas y hasta hidrocarburos o bien que permita convertirlos a otros compuestos que se puedan degradar con mayor facilidad y sean menos tóxicos. Este sistema cuenta con 4 etapas que se repiten de manera cíclica: el llenado donde lo que se realiza es introducir el agua residual al tanque de manera estática, la reacción se lleva a cabo de manera mecánica con el objetivo de degradar la espuma que se encuentre en la superficie y al mismo tiempo preparar a los microorganismos para recibir el oxígeno que necesitan permitiendo así obtener una degradación biológica, decantación en esta etapa los lodos se decantan por medio de reposo y vaciado donde el agua que ha sido tratada se deposita en un tanque para eliminar el sobrenadante que se encuentra en la superficie culminando con la purgación del lodo para mantener una concentración que sea constante, tanto del lodo biológico como del agua residual (Zhifena Hu *et al*, 2019; Sarangi *et al*, 2023).

Es importante que al momento del diseño se tome en cuenta las características del agua, así como los requerimientos del efluente por ejemplo el pH, la alcalinidad, el caudal máximo, entre otros parámetros, esto para lograr el objetivo por el cual se construyó el sistema de tratamiento (Rabiger *et al.*, 2022).

4.3.2.5 Lagunas aireadas

Se le conoce así debido a que es una variante de los lodos activados, sin embargo en este tipo de procesos no se utiliza la recirculación de lodos por lo cual resulta más económica la construcción de este tipo de reactores, de igual manera se requieren de tiempos altos de retención comparado con el proceso de lodos activados, lo cual es una ventaja que permite resistencia a las cargas orgánicas del agua residual, así mismo una baja concentración de biomasa en el reactor, el oxígeno necesario para llevarse a cabo este proceso es administrado de manera mecánica, esto para conservar el proceso de oxidación biológica.

Este tipo de tratamiento permite que las algas no se desarrollen, así como otras condiciones como lo son: variación de temperatura y sobrecarga orgánica, al final del proceso se obtiene:

- Remoción de SST: 70% - 90%
- Remoción de DBO: 60% - 90%
- Remoción de DQO: 70% - 90%

Para la construcción de este tipo de tratamiento se es importante mencionar que para no contaminar los acuíferos es necesario emplear impermeabilizante, así como tener en cuenta el gasto de energía eléctrica, tener en cuenta el tipo de agua con la que se va a trabajar y el propósito de este proceso (CONAGUA, 2020).

4.3.2.6 Biorreactores con membrana

Se conoce así debido a que está compuesto de dos partes en una misma, es decir, el reactor que es el encargado del tratamiento biológico del agua y otra parte donde se separa la biomasa y el agua por medio de filtración que se lleva a cabo mediante una membrana (barrera física) que atrapa a las bacterias permitiendo que estas no pasen. Aunque si bien lo que delimito esta tecnología en un principio fue su elevado costo económico de inversión, así como la falta de conocimiento para su operación, en la actualidad las variedades de otros tipos de membrana permitan que este proceso sea un poco más barato, lo cual ha permitido que esta tecnología tenga mayor auge en la actualidad (Vázquez *et al.*, 2022).

Este tipo de tratamiento permite una mayor eficacia en la retención de las bacterias, así como en la calidad de los efluentes (son más estériles), por lo cual no es necesario procesos como la desinfección al término del proceso, aunado a esto la ausencia del sedimentador permite que las bacterias se desarrollen de manera más lenta por lo cual vuelve más eficiente al proceso. Para el diseño de estos biorreactores hay que considerar que tipo se desea construir debido a que existen muchos tipos, así mismo hay que tener en cuenta el tipo de agua con la cual se desea trabajar, el objetivo del mismo y el costo de fabricación (Mongenroth *et al.*, 2022).

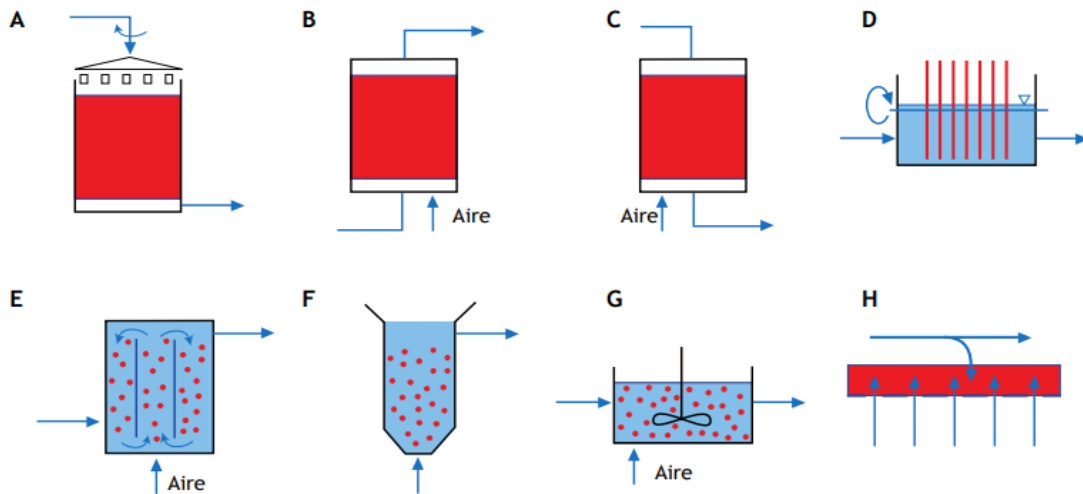


Figura 2. Tipos de reactores de biopelícula: (A) filtros percoladores; (B) reactores de biopelícula sumergida de lecho fijo, operados con flujo ascendente o (C) flujo descendente; (D) reactores biológicos rotativos de contacto; y (E) reactores de biopelícula suspendida incluyendo reactores tipo “air-lift”, (F) reactores de lecho fluidizado, (G) reactores de lecho móvil, y (H) reactores de biopelícula adherida a una membrana (Mongenroth *et al.*, 2022).

4.3.2.7 Filtro rociador

Se le conoce así debido a que el agua se deja caer sobre un medio sintético (rocas, arena, etc.) que funciona como un filtro primario debido a que en la parte superior del mismo se oxidan biológicamente los contaminante, por su parte el oxígeno que se necesita para este sistema se encuentra en los espacios que se encuentran en este medio sintético, es suficiente debido a la corriente natural en el medio ambiente ya que se encuentra expuesto al mismo y el agua es depositada a este filtro primario gracias a brazos giratorios. El efluente es recolectado en la parte inferior del filtro, cabe mencionar que este no posee biomasa y por ende no se necesita volver a recircular, sin embargo, se puede dar el caso de que los lodos se encuentren en exceso y estos sean arrastrados por el efluente, por lo cual es necesario la instalación de sedimentación secundaria para la recolección de los mismos. Por otra parte, una de las ventajas de este tipo de tratamiento es que no se necesita un consumo excesivo de energía eléctrica ya que el único consumo que se tiene es el de los brazos para bombear el agua y alimentar el filtro (Comeau *et al.*, 2019).

4.3.3 Tratamiento terciario

Este tipo de tratamiento es muy eficaz se utiliza para la remoción de helmintos y parásitos protozoarios que pueda contener el agua residual una vez pasada por tratamiento secundario y así obtener un efluente más puro y que pueda utilizarse en diferentes actividades industriales, agrícolas por medio de diferentes tipos de procesos como lo es la filtración, la adición de productos químicos, por medio de membranas de ultrafiltración, humedales, etc. Los tratamientos terciarios en general eliminan más del 99% de helmintos presentes en el agua y entre un 95 a 99% de protozoos, aunque algunos virus que pueda contener el agua este tipo de tratamiento es menos eficaz debido al tamaño de los mismos, por lo cual se opta por recurrir al siguiente tratamiento que es la desinfección del agua tratada ya sea por cloro, ozono o luz ultravioleta (Loosdrech *et al.*, 2020).

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Localización donde se llevó a cabo el experimento

El presente experimento fue llevado a cabo en el laboratorio de Biología, ubicado en el Departamento de Botánica de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro que se encuentra en la localidad de Buenavista, municipio de Saltillo, estado de Coahuila.

5.2 Materiales y equipo

- Ácido Sulfúrico
- Agitador Magnético Civeq
- Aluminio
- Balanza electrónica de precisión US Solid
- Bascula American Scientific Products
- Bomba peristáltica Monostat Simon
- Capsula de Porcelana
- Centrifuga J-600
- Crisoles
- Cúter
- Desecador Pyrex
- Digestor Hach DRB 200
- Electrodo ORION 013005MD

- Espátula
- Espectrofotómetro Hach DR5000
- Filtro de grafito
- Filtros de Fibra de Vidrio Ahlstrom 47 cm
- Frascos de Cultivo Kimax 80 ml
- Gradillas
- Guantes de Látex Mc Gloves
- Horno Orsa
- Incubadora Hach Modelo 205
- Jeringas BD 5 ml
- Matraces 50 ml y 500 ml
- Matraz de Aforación Pyrex 1 L
- Micropipeta Labmate
- Parafilm
- Pissetas
- Pinzas
- Potenciometro Thermo Scientific Orion Star A215
- Probetas Pyrex 100ml y 250ml
- Puntillas
- Refrigerador Mabe
- Sistema de Filtración Glassco 250 ml
- Termómetro
- Tijeras
- Tiras de pH Macherey-Nagel
- Tubos Hach con Tapa
- Tubos Kimax
- Vasos de Precipitado Pyrex 200 ml y 500 ml

5.3 Metodología

5.3.1 Diseño del RBS

El RBS utilizado constaba de dos compartimentos que tenían una capacidad combinada de 3.320 L, un compartimento era aerobio y el otro anaerobio cada compartimento soportaba 1.660 L de carga y se encontraban separados por una membrana de intercambio catiónico. El SBE estaba formado por un paquete de 6 soportes en cada compartimento compuestos de fieltro de grafito, estos se encontraban en forma de discos con un diámetro de 8.5 cm, a su vez tenían 10 perforaciones circulares con diámetro de 0.5 cm. Dentro de cada reactor se alojaron 6 soportes que se acoplaban a cada compartimento gracias a una malla de acero inoxidable cuya función era mantenerlos bajo la superficie del agua donde los microorganismos pudieran adherirse, en el compartimento aerobio se adaptó un difusor el cual ayudaba a tener un ambiente con oxígeno. En la figura 3 se observan las partes del sistema secuencial anaerobio – aerobio.

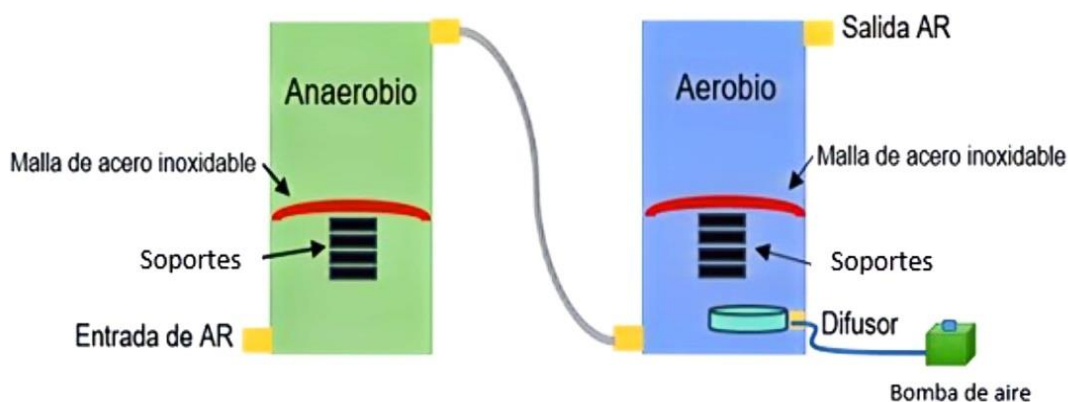


Figura 3. Partes del sistema secuencial anaerobio – aerobio utilizado en esta investigación.

El RBS estuvo siendo alimentado con las ARM con ayuda de una bomba peristáltica donde se introducía al compartimento anaerobio y después pasaba al compartimento aerobio. La investigación fue llevada a cabo durante 21 días con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 32.78 horas. En la figura 4 se puede observar el RBS utilizado en la investigación.



Figura 4. Sistema secuencial anaerobio-aerobio utilizado durante la investigación.

5.3.2 Parámetros evaluados

La investigación se llevó a cabo durante un periodo total de 21 días en el cual se realizaron diversos parámetros para monitorear la efectividad del RBS, los parámetros que se midieron fueron pH tanto de la muestra influente como el efluente; la DQO de las muestras influente y efluente, la temperatura y la conductividad eléctrica (CE), fueron medidos diariamente.

5.3.3 Métodos analíticos

El pH, la temperatura y la DQO fueron parámetros que se midieron diariamente durante todo el tiempo de la investigación, en el caso del pH y la DQO se tomaron las muestras del influente (agua residual sin tratamiento) y el efluente (agua tratada). La CE fue un parámetro que se comenzó a tomar en el sexto día dando un total de 32 lecturas.

5.3.3.1 pH

El pH se define como un logaritmo de la concentración de iones de hidrogeno, esta puede encontrarse en un rango que va de 0 a 14, donde 0 es el punto más ácido, 14 es el punto más alcalino y 7 es el rango neutral, los rangos altos y bajos de pH son tóxicos para los diferentes tipos de microorganismos presentes en el agua, ya sea de manera directa o indirectamente, este parámetro es muy importante en el tratamiento de agua residual debido a que juega un papel en el funcionamiento efectivo de este proceso y de su control, por ejemplo la floculación y desinfección con cloro o bien en el tratamiento biológico de aguas residuales (NMX-AA-008-SCFI-2016).

Para la investigación el pH fue determinado con un electrodo de la marca ORION 013005MD conectado al potenciómetro de la marca Thermo Scientific Orion Star A215.

5.3.3.2 Temperatura

La temperatura es una constante que influye mucho en cuanto al desarrollo de los microorganismos, es por ello que los microorganismos que operan en un intervalo de temperatura más alta tienen una mayor tasa de crecimiento que los que operan en un intervalo que es inferior. En general existen cuatro clasificaciones de microorganismos según la temperatura a la que crecen y pueden reproducirse; psicrófilos; debajo de los 15°C, mesófilos; entre 15- 40°C, termófilos; entre 40-70°C y hipertermófilos 70-110°C (Comeau *et al.*, 2019).

Las temperaturas máximas y mínimas fueron obtenidas de la página de internet Meteored.

5.3.3.3 Conductividad eléctrica

La CE se define como un parámetro numérico de la capacidad de una solución para transportar corriente eléctrica, por lo cual esta capacidad depende de la presencia de iones, de su concentración total, temperatura y valencia. La determinación de este parámetro es de suma importancia debido a que gracias a ello podemos darnos una idea del grado de mineralización del agua residual tratada y no tratada, además de la calidad de la misma para usos y actividades agrícolas o bien para el contacto humano (NMX-AA-008-SCFI-2016).

La CE se determinó con un electrodo de la marca ORION 013005MD conectado al potenciómetro de la marca Thermo Scientific Orion Star A215.

5.3.3.4 Demanda Química de Oxígeno

La DQO es un análisis que incluye tanto el material orgánico biodegradable como no biodegradable, la parte biodegradable y soluble determina la concentración esperada de la DQO filtrada en el efluente, mientras que la parte no biodegradable y particulada influye en la producción diaria de lodos y en la acumulación de los mismos en un reactor biológico. Se ha observado que la diferencia entre la concentración de la DQO soluble en el efluente para sistemas con bajos tiempos de retención hidráulica (2-3 h) y sistemas que tienen altos tiempos de retención hidráulica (18-24h) es muy baja, lo que indica que la materia orgánica

lentamente soluble y biodegradable se encuentra presente en concentración baja en aguas residuales municipales (Ekama *et al.*, 2019).

El método estándar para la determinación de la DQO es usando el dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), la muestra se oxida debido a una solución sulfúrica caliente del dicromato de potasio con sulfato de plata (Ag_2SO_4) que es usado como catalizador para oxidar la materia orgánica y el sulfato de mercurio ($HgSO_4$) es utilizado para reducir la interferencia de los iones cloruros. Para muestras digeridas turbias y de color atípico se usa la titulación con sulfato de amonio (NH_4) y hierro estandarizado. Generalmente la DQO debe tener un límite máximo permisible diario de 72 mg/l y mensual de 60 mg/l según la norma mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación, ya que su uso está destinado hacia el riego agrícola. Este análisis se realizó por espectrofotometría con tubo cerrado.

La espectrofotometría es una técnica analítica que es utilizada para medir cuanta luz absorbe una sustancia química, midiendo así la cantidad de luz cuando un haz luminoso pasa a través de la muestra, de igual manera esta medición puede utilizarse para medir la cantidad de un producto químico conocido en una sustancia con base en la ley de Beer – Lambert.

5.3.3.4.1 Materiales utilizados para determinar la DQO

- Agitador magnético Civeq
- Agua destilada
- Balanza electrónica de precisión US Solid
- Desecador Pyrex
- Dicromato de potasio
- Digestor Hach DRB 200
- Espectrofotómetro Hach DR5000
- Frascos ámbar
- Matraz de aforación Pyrex
- Sulfato de mercurio
- Sulfato de plata
- Tubos Hach con tapa

5.3.3.4.2 Solución de dicromato de potasio

Se recomienda usar material de vidrio para manipular los reactivos y una balanza de precisión para una medición exacta de los ingredientes. Se pesaron 20 gr. del dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), una vez pesado se metió al horno para secarlo durante 2 horas a una temperatura de $100^\circ C$. Después se pasó a un desecador para enfriarse y de ahí se tomaron 10.216 gr. del dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y 500 ml de agua destilada para pasarlos a un matraz de aforación con capacidad de 1 litro a esto se le añadió 33.3 gr de sulfato de mercurio ($HgSO_4$) y 167 ml de ácido sulfúrico concentrado, añadiéndolo lentamente, ya que la solución se haya enfriado se afora a un litro con agua destilada, posteriormente se introdujo un agitador magnético para poder obtener una solución homogénea para finalmente pasarla a frascos de color ámbar para evitar el contacto directo con la luz ya que la mezcla resulta ser fotosensible.

5.3.3.4.3 Solución de sulfato de plata y ácido sulfúrico

Se pesaron 15 gr de sulfato de plata (Ag_2SO_4) y se vaciaron en un matraz de aforación con capacidad de 1 litro. Después se afora con ácido sulfúrico concentrado y se deja reposar durante una noche en un lugar sin humedad ni luz, después se agito nuevamente con el fin de disolver todo el sulfato de plata (Ag_2SO_4), finalmente se pasa la solución a un frasco de vidrio color ámbar para ser protegido de la luz solar directa ya que la disolución es fotosensible. La disolución es estable por doce meses (NMX-AA-030-SCFI-2011).

5.3.3.4.4 Determinación de la DQO

Se tomaron 3.5 ml de la mezcla de sulfato de plata (Ag_2SO_4) y ácido sulfúrico y 1.5 ml de la mezcla del dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y se pasaron a un tubo Hach con tapa, a esto se le agrega 2.5 ml de la muestra de ARM y se tapa bien, se realiza el mismo el paso cambiando la muestra de ARM por agua destilada para tener un blanco, se debe agitar lentamente por inversión y llevar al digestor durante 2 horas a una temperatura de $150^\circ C$. ya que haya pasado el tiempo en el digestor se sacan los tubos y se dejan enfriar a temperatura ambiente para después llevarlos al espectrofotómetro y poder leer su absorbancia a una longitud de onda de 620 nm.

6. RESULTADOS

6.1 pH

En la figura 5 se observa el comportamiento del pH del agua residual tratada (efluente) por el RBS y del agua residual cruda o no tratada (influyente) durante la investigación, cabe mencionar que el pH fue un parámetro que se comenzó a tomar en el sexto día esto para tener una adaptación del RBS y este parámetro fue medido diariamente teniendo como pH del influente una lectura mínima de 7.1 siendo un número neutro y un pH máximo de 7.5 siendo más alcalino, teniendo un promedio de influente de 7.4. La lectura mínima de pH del efluente fue de 8.2 siendo un punto alcalino y un pH máximo de 8.7, teniendo un promedio del efluente de 8.4. El pH influye en el crecimiento de los microorganismos ya que el pH entre 6.5 y 7.5 es óptimo para el desarrollo de los mismos, la mayoría no toleran pH mayor de 9.5 o inferior a 4.0, por lo cual es importante monitorear el pH durante el tratamiento biológico del agua residual municipal. (Delgado *et al.*, 2019)

Se observa en la figura 5 que no hubo una variación muy fuerte en cuanto a los valores de pH, sin embargo, del día 17 al 21 se reportó una variación entre el pH influente y el pH efluente que se debió al cambio de agua residual (influyente).

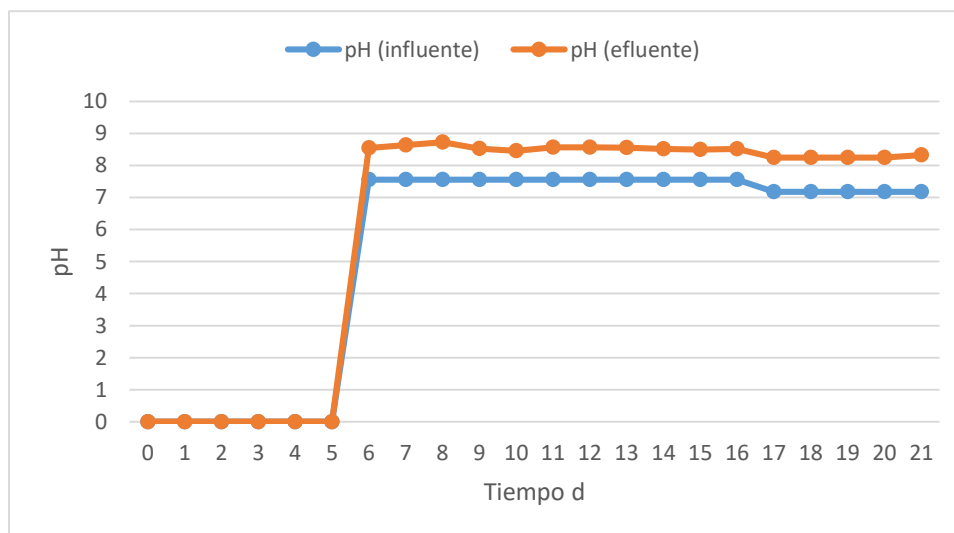


Figura 5. Comportamiento del pH del agua residual municipal del influente y efluente

6.2 Temperatura

6.2.1 Eficiencia de remoción de la DQO y la temperatura ambiente

La figura 6 muestra la eficiencia de la remoción de la DQO respecto a la temperatura ambiente (mínima y máxima) que se registró durante el periodo de estudio. Se puede notar que el porcentaje de remoción no se ve afectado por la temperatura ambiente, aunque la literatura menciona que la eficiencia de remoción de la materia orgánica está relacionado a la temperatura ya que a temperaturas bajas la eficiencia de los microorganismos disminuye (Castro *et al.*, 2019). En este caso los microorganismos estaban adheridos dentro de una biopelícula a un soporte (discos de fieltro de grafito) que les permitió trabajar de forma estable, aunque la temperatura ambiente fuera cambiante (Thanki *et al.*, 2020)

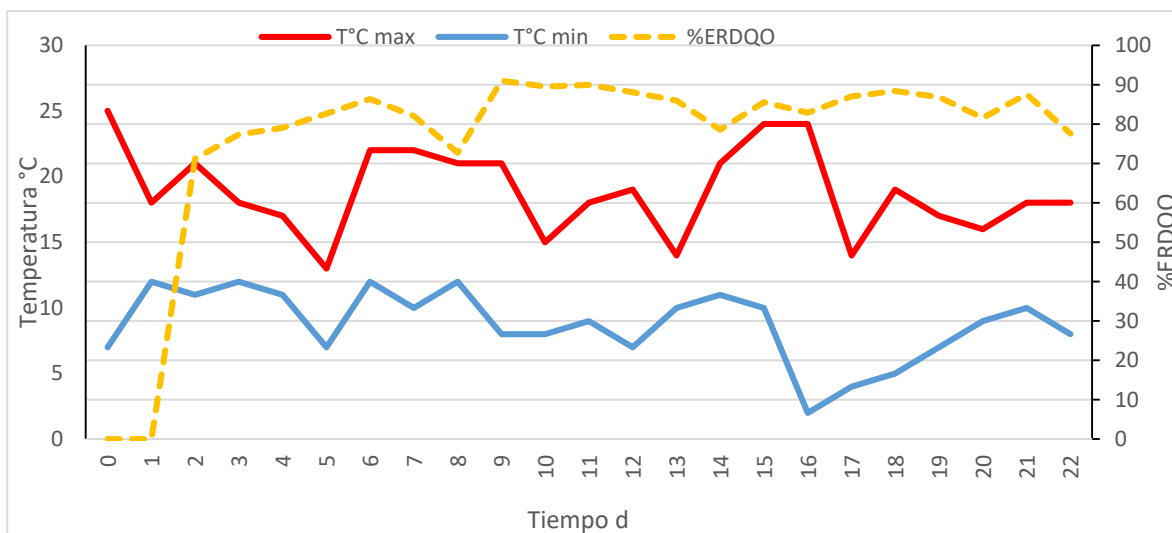


Figura 6. Porcentaje de eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno con relación a la temperatura ambiente.

6.2.2 Demanda química de oxígeno (DQO) y la temperatura ambiente

La figura 7 muestra el comportamiento de la DQO del influente respecto a la temperatura ambiente (mínima y máxima), donde muestra que la DQO no se ve afectada por la temperatura, se realizaron dos cambios de ARM donde esta misma del día 1 al 17 tuvo una concentración de 710 mg DQO/L y del día 18 al 21 tuvo una concentración de 778 mg DQO/L. En el efluente se observa que en los primeros siete días se obtuvo una concentración en un rango de 96 mg DQO/L a 205 mg DQO/L, posteriormente del día 8 al 18 se obtuvo el pico más alto que fue de 194.16 mg DQO/L, al cambiar el ARM del influente en el día 18 se obtuvo una concentración de 102.5 mg DQO/L concluyendo el día 21 en una concentración de 174.16 mg DQO/L. Todo esto nos indica que la mayor concentración de DQO con respecto a la temperatura ambiente se obtuvo entre los 18°C y 21°C, por el contrario la menor concentración de DQO con respecto a la temperatura ambiente se obtuvo entre los 8°C Y 9°C.

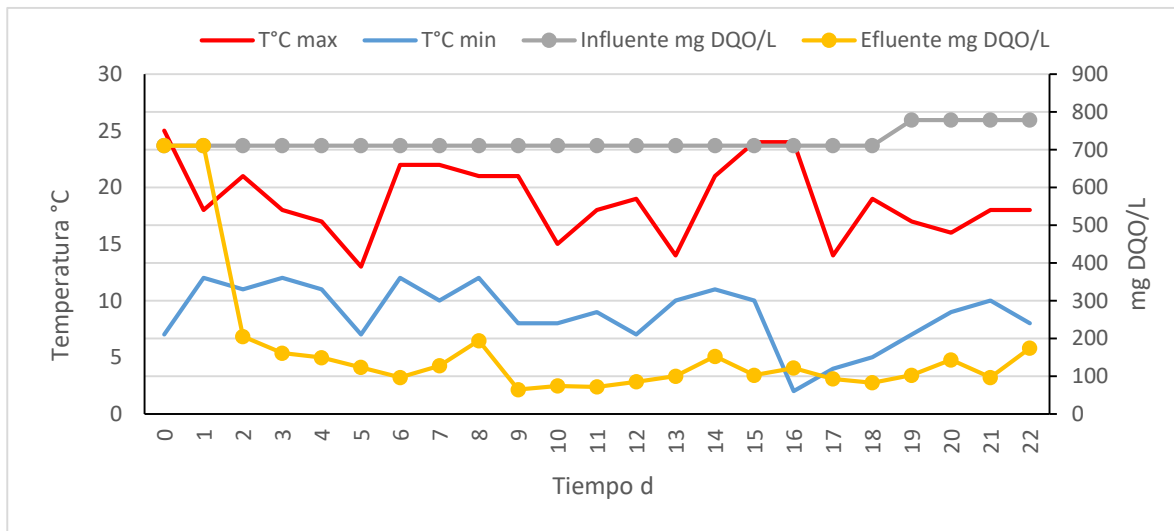


Figura 7. Demanda química de oxígeno del influente y efluente y su relación con la temperatura ambiente.

6.3 Conductividad eléctrica

La CE es la capacidad del agua para transportar la corriente eléctrica y está relacionada con la cantidad de sales en disolución la cual depende de la temperatura por lo cual varía conforme a la misma, todo esto para generar iones capaces de transportar la corriente eléctrica (Solís *et al.*, 2017). En la figura 8 se muestra el comportamiento que tuvo la CE del influente (agua residual no tratada) y del efluente (agua residual tratada) en donde se tomaron un total de 32 muestras durante el desarrollo de la investigación, estas muestras fueron tomadas de manera ordenada en cuanto a los días, sin embargo la CE que fue tomada con esas muestras se pudieron obtener como resultado el pico máximo de CE del efluente que fue de 1674 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el mínimo que fue de 1529 $\mu\text{S}/\text{cm}$, de igual manera se pudo obtener el promedio de todos los días en los que se tomaron las muestras para CE del efluente y se obtuvo un promedio de 1615.12 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por el contrario como resultado el pico máximo del influente fue de 1794 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el mínimo que fue de 1699 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por ende se obtuvo un promedio de los días que se tomaron las muestras para CE influente el cual fue de 1770.25 no hubo muchas variaciones en las 32 muestras tomadas, sin embargo el día 18 y 20 se registraron datos bajos y del día 6 al 17 el comportamiento fue más uniforme sin alteraciones relevantes.

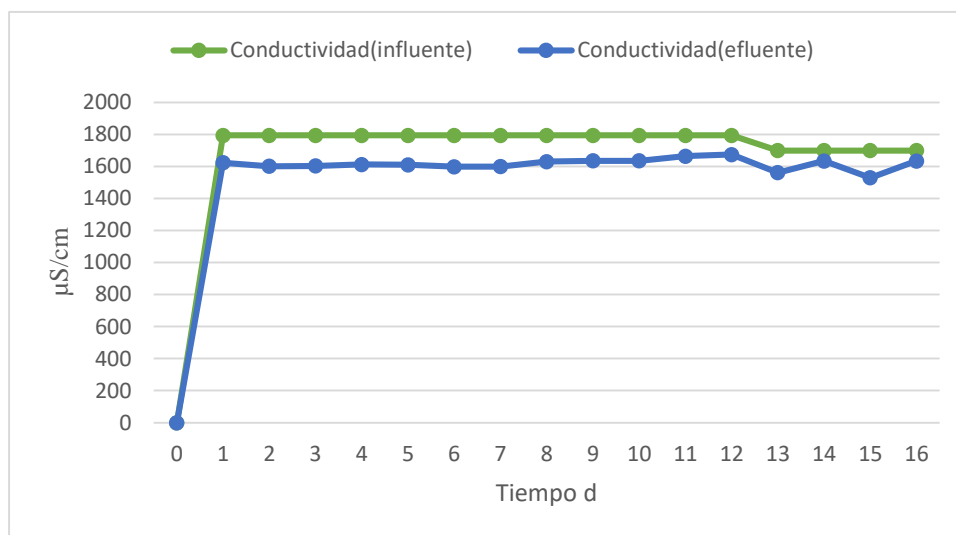


Figura 8. Comportamiento de la conductividad eléctrica del influente y efluente.

7. CONCLUSIONES

El arranque del sistema secuencial de biofiltros anaerobio-aerobio para el tratamiento de agua residual municipal utilizado durante esta investigación en un periodo de 21 días tuvo un buen desempeño con un porcentaje de remoción de la DQO promedio del 84.41%, lo cual indica que el establecimiento previo del reactor fue exitoso.

Por lo anterior se acepta la hipótesis planteada durante el desarrollo de este sistema secuencial de biofiltros anaerobio-aerobio para el tratamiento de agua residual municipal la cual fue obtener una alta eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno como producto de la degradación de compuestos orgánicos e inorgánicos contenidos en el agua residual municipal.

Esta investigación aporta conocimiento inicial que demuestra que es un proyecto factible el cual se puede llegar a aplicar a gran escala teniendo un alto porcentaje de remoción de la materia orgánica.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado Suárez, T. M., & Guamán Pacalla, T. D. R. (2022). Remoción de la demanda bioquímica de oxígeno DBO en un reactor aeróbico secuencial discontinuo usando medio de soporte plástico tratando agua residual doméstica (Bachelor's thesis, Guayaquil: ULVR, 2022.). Disponible en: <http://repositorio.ulvr.edu.ec/bitstream/44000/5287/1/T-ULVR-4280.pdf>
- Andrés, E. B. J. (2023). Que para obtener el título de: Biólogo (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Autónoma de México). Disponible en: <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000835365/3/0835365.pdf>
- Arreguín-Cortés, F. I., López-Pérez, M., & Cervantes-Jaimes, C. E. (2020). Los retos del agua en México/Water challenges in Mexico. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(2), 341-371. DOI: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-02-10>
- Baek, SH y Pagilla, K. (2003, enero). Comparación de biorreactores de membrana aeróbicos y anaeróbicos para el tratamiento de aguas residuales municipales. En *WEFTEC 2003* (págs. 356-375). Federación Medioambiental del Agua. DOI: [10.2175/193864703784755355](https://doi.org/10.2175/193864703784755355)
- Bodik, I., Kratochvíl, K., Herdova, B., Tapia, G. y Gašpariková, E. (2002). Tratamiento de aguas residuales municipales en el reactor de filtro anaeróbico-aeróbico con desconcertantes a temperatura ambiente. *Ciencia y tecnología del agua*, 46 (8), 127-135. DOI:<https://doi.org/10.2166/wst.2002.0160>
- Cáñez-Cota, A. (2022). Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en México: diagnóstico y desafíos de política pública. *Tecnología y ciencias del agua*, 13(1), 184-245. DOI:<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-01-05>
- Carmona, A., & Dalila, I. (2015). Semiconducting Polyurethane Polypyrrole Polyaniline for Microorganism Immobilization and Wastewater Treatment in Anaerobic Aerobic Sequential Packed bed Reactors. y Biofiltros a base de Compositos de Poliuretano (Polipirrolco-Polianilina) en el Tratamiento de Agua Residual Municipal: NOM-003-ECOL-1997. DOI:<https://doi.org/10.1002/app.42242>

- Castillo, A. y Mata-Álvarez, J. (1999). Un estudio cinético de un sistema combinado anaeróbico-aeróbico para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Investigación del agua*, 33 (7), 1742-1747. DOI:[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00405-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00405-9)
- Chama Rodriguez, R., García Moreno, M. E., Chincheros, J., & Quispe, R. V. (2011). Optimización en la metodología de la demanda química de oxígeno (DQO) y en parámetros físico-químicos en aguas y suelos (Doctoral dissertation, Universidad Mayor de San Andrés. Facultad de Ciencias Puras y Naturales. Carrera Ciencias Químicas). DOI:<http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/17938>
- Chan, Y. J., Chong, M. F., Law, C. L., & Hassell, D. G. (2009). A review on anaerobic–aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. *Chemical engineering journal*, 155(1-2), 1-18. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.06.041>
- Chavez Aquino, D. J., Justo Roque, R. G., & Ramirez Perez, E. D. (2023). Diseño y evaluación de la eficiencia de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales para el distrito de Ripán, provincia Dos de Mayo-Huánuco-2022. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12394/13304>
- Comisión Nacional del Agua (México). (2015). Estadísticas del agua en México, edición 2015. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua. Disponible en: <https://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2015.pdf>
- Crini, G. y Lichtfouse, E. (2019). Ventajas y desventajas de las técnicas utilizadas para el tratamiento de aguas residuales. *Cartas de Química Ambiental*, 17, 145-155. DOI:<https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>
- Daverey, A., Pandey, D., Verma, P., Verma, S., Shah, V., Dutta, K. y Arunachalam, K. (2019). Avances recientes en el tratamiento biológico energéticamente eficiente de aguas residuales municipales. *Informes de Tecnología de Recursos Biológicos*, 7, 100252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100252>

NOM-003-ECOL-1997. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Disponible en: <https://www.carbet.com.mx/images/2020/normas/SEMARNAT/NOM-003-SEMARNAT-1997.pdf>

De la Peña, M. E., Ducci, J., & Plascencia, V. Z. (2013). Tratamiento de aguas residuales en México. Disponible en: <https://webimages.iadb.org/publications/spanish/document/Tratamiento-de-aguas-residuales-en-M%C3%A9xico.pdf>

Dincer, S., Uslu, FM, Yiğittekin, ES, Takci, HAM y Ozdenefe, MS (Eds.). (2024). Calidad del agua: nuevas perspectivas. BoD: libros a la carta.

Gizgis, N., Georgiou, M. y Diamadopoulos, E. (2006). Tratamiento biológico secuencial anaeróbico/aeróbico de aguas residuales de almazara y aguas residuales municipales. Revista de Tecnología Química y Biotecnología: Investigación Internacional en Procesos, Tecnología Ambiental y Limpia, 81 (9), 1563-1569. DOI: <https://doi.org/10.1002/jctb.1552>

González, M. B. (2019). La contribución de la tecnología para la solución de problemas ambientales en México y el mundo: una perspectiva multidisciplinaria. RD-ICUAP. DOI: <https://doi.org/10.32399/icuap.rdic.2448-5829.2019.14.404>

Gray, N. F. (2004). Biology of wastewater treatment (Vol. 4). World Scientific. Disponible en: [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Ae23CgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Gray,+N.+F.+\(2004\).+Biology+of+wastewater+treatment+\(Vol.+4\).+World+Scientific.&ots=pzLW7D7u9u&sig=JdwaahFIGISbstVVYAGalB7okAQ#v=onepage&q=Gray%2C%20N.%20F.%20\(2004\).%20Biology%20of%20wastewater%20treatment%20\(Vol.%204\).%20World%20Scientific.&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Ae23CgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Gray,+N.+F.+(2004).+Biology+of+wastewater+treatment+(Vol.+4).+World+Scientific.&ots=pzLW7D7u9u&sig=JdwaahFIGISbstVVYAGalB7okAQ#v=onepage&q=Gray%2C%20N.%20F.%20(2004).%20Biology%20of%20wastewater%20treatment%20(Vol.%204).%20World%20Scientific.&f=false)

Güven, H., Dereli, RK, Özgün, H., Ersahin, ME y Öztürk, I. (2019). Hacia un tratamiento de aguas residuales municipales sostenible y energéticamente eficiente mediante una

mayor concentración de sustancias orgánicas. Progreso en Ciencias de la Energía y la Combustión, 70 , 145-168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.10.002>

Guyer, J. P., & PE, R. (Eds.). (2019). Una introducción al tratamiento de aguas residuales Municipales. Guyer Partners. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=osC3DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Una+Introducci%C3%B3n+al+Tratamiento+de+Aguas+Residuales+Municipales&ots=UVJIZJ4Dez&sig=E-ZIR1F3y13Vzli02_bRwss8r7E#v=onepage&q=Una%20Introducci%C3%B3n%20a%20Tratamiento%20de%20Aguas%20Residuales%20Municipales&f=false

Henze, M., van Loosdrecht, MC, Ekama, GA y Brdjanovic, D. (Eds.). (2008). Tratamiento biológico de aguas residuales. Publicación IWA. Disponible en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=41JButufnm8C&oi=fnd&pg=PP2&dq=Biological+wastewater+treatment.&ots=nUC5g0AI-k&sig=EwGKV41t049j1EsnT9Xr8IR8Zhs#v=onepage&q=Biological%20wastewater%20treatment.&f=false>

Jetten, MS, Horn, SJ y van Loosdrecht, MC (1997). Hacia un sistema de tratamiento de aguas residuales municipales más sostenible. Ciencia y Tecnología del Agua 35 (9), 171-180. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00195-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00195-9)

Liu, D. H., & Lipták, B. G. (Eds.). (2020). Wastewater treatment. CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003075752>

NOM-001-SEMARNAT-2021. Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0

Mishra, S., Singh, V., Ormeci, B., Hussain, A., Cheng, L. y Venkiteshwaran, K. (2023). Tratamiento anaeróbico-aeróbico de aguas residuales y lixiviados: una revisión de la integración de procesos, el diseño del sistema, el rendimiento y los ingresos energéticos asociados. Revista de Gestión Ambiental, 327, 116898.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116898>

Muñoz Paredes, JF, & Ramos Ramos, M. (2014). Reactores discontinuos secuenciales: Una tecnología versátil en el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 24 (1), 49-66.

Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_isoref&pid=S0124-81702014000100003&lng=en&tlng=es

NMX AA-030-SCFI-2011. Análisis de agua. determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166775/NMX-AA-030-2-SCFI-2011.pdf>

Prieto, L. E. P., Martínez, M. M., & Correa, A. M. E. (2000). Tratamiento de aguas residuales municipales y su impacto ambiental sobre un ecosistema. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/229165342.pdf>

Pulido, V. M. M., & de Anda Sánchez, J. (2021). Metodología multicriterio para la selección de sitios para la reconversión tecnológica de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. *Sociedad y Ambiente*, (24), 1-28. DOI: <https://doi.org/10.31840/sya.vi24.2413>

Rodríguez Miranda, J. P., García Ubaque, C. A., & Pardo Pinzón, J. (2015). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Tecnura*, 19(46), 149-164.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.4.a03>

Russell, DL (2019). Tratamiento práctico de aguas residuales. John Wiley e hijos. Disponible en: DOI: [10.5860/elección.44-3310](https://doi.org/10.5860/elección.44-3310)

Sagastume, J. M. M., Martínez, C. M., Higareda, B. L. R., & Robles, A. N. (2023). Tratamiento y reuso de agua residual municipal. DOI: <https://doi.org/10.22201/iingen.9786073082693e.2023>

- Sánchez Alavez, Y. (2016). Tratamiento secuencial de un agua residual municipal en reactores airlift (Tesis de Maestría, Tesis (MC)--Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Departamento de Biotecnología y Bioingeniería). Disponible en: <https://repositorio.cinvestav.mx/bitstream/handle/cinvestav/2520/SSIT0013928.pdf?sequence=1>
- Sarango, P. J. D., Heras-Naranjo, C., Lojano-Criollo, D., & Vilorio, T. (2018). 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. *Ciencia Unemi*, 11(28), 88-96. DOI: <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol11iss28.2018pp88-96p>
- Sikosana, ML, Sikhwivhilu, K., Moutloali, R. y Madyira, DM (2019). Tecnologías de tratamiento de aguas residuales municipales: una revisión. *Fabricación de Procedia* , 35 , 1018-1024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.051>
- Sonune, A. y Ghate, R. (2004). Avances en los métodos de tratamiento de aguas residuales. *Desalación*, 167 , 55-63. DOI: [10.1016/j.desal.2004.06.113](https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.113)
- Stazi, V. y Tomei, MC (2018). Mejora del tratamiento anaeróbico de aguas residuales domésticas: estado del arte, tecnologías innovadoras y perspectivas de futuro. *Ciencia del Medio Ambiente Total*, 635 , 78-91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.071>
- Vidal-Álvarez, M. (2019). Tratamiento de aguas residuales en México: problemáticas de salud pública y oportunidad de uso de ecotecnologías sustentables. *RINDERESU*, 3(1-2), 41-58. Disponible en: <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/32/38>
- Wang, K. (1994). Tratamiento integrado anaeróbico y aeróbico de aguas residuales. Universidad e Investigación de Wageningen. Disponible en: <https://www.proquest.com/openview/cfa3519feedb831ad46515c225d355f9/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>

Zurita-Martínez, F., Castellanos-Hernández, O. A., & Rodríguez-Sahagún, A. (2011). El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(SPE1), 139-150.

Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000700011&lng=es&nrm=iso. ISSN 2007-0934.