



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES AGROINDUSTRIALES EN UN SISTEMA
EXPERIMENTAL DE SBR- CON HUMEDALES ARTIFICIALES**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

PRESENTA:

ANAYELI VALENCIA ÁLVAREZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DR. GASPAR LÓPEZ OCAÑA

EN CODIRECCIÓN DE:

DR. ROBERTO RODRÍGUEZ BASTARMÉRITO

VILLAHERMOSA, TABASCO. SEPTIEMBRE DE 2025

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, el día 26 del mes agosto del año 2025, el que suscribe Anayeli Valencia Alvarez, alumna del Programa de Ingeniería Ambiental con número de matrícula 192G24130, adscrita a la División Académica de Ciencias Biológicas, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del título de Licenciatura en Ingeniería Ambiental y titulada "TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES AGROINDUSTRIALES EN UN SISTEMA EXPERIMENTAL DE SBR- CON HUMEDALES ARTIFICIALES" dirigida por el Dr. Gaspar López Ocaña y el Dr. Roberto Rodríguez Bastarmérito.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente

Villahermosa, Tabasco a 26 de agosto de 2025.



Anayeli Valencia Alvarez

Nombre y firma del tesista



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

Villahermosa, Tab., a 21 de Agosto de 2025

ASUNTO: Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
PRESENTE**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza a la **C. ANAYELI VALENCIA ALVAREZ** egresada de la Lic. en **ING. AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis denominado: "**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES EN SISTEMA EXPERIMENTAL DE SBR-CON HUMEDALES ARTIFICIALES**".

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E


**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica
C.c.p.- Interesado

**U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



DIRECCIÓN





**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2025
AÑO DE LA **Mujer**
Indígena

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

AGOSTO 21 DE 2025

**C. ANAYELI VALENCIA ALVAREZ
PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL
PRESENTE**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: **"TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES EN SISTEMA EXPERIMENTAL DE SBR-CON HUMEDALES ARTIFICIALES"**, asesorado por el Dr. Gaspar López Ocaña y Dr. Roberto Rodríguez Bastarmérito sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por el M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar, Dra. Melina del Carmen Uribe López, Dr. Gaspar López Ocaña, Mtro. David Guerrero Zarate y MIPA. Elías de la Cruz Luna.

ATENTAMENTE
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente del Alumno.
Archivo.



20 de agosto de 2025

C. ANAYELI VALENCIA ALVAREZ
Pasante de la Lic. en Ingeniería Ambiental

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, se implementó la revisión del trabajo recepcional (Tesis), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad y el Código Institucional de Ética para la Investigación.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones, el índice de similitud y el reporte de originalidad obtenido a través de la revisión en la plataforma iThenticate de su trabajo recepcional **TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES AGROINDUSTRIALES EN UN SISTEMA EXPERIMENTAL DE SBR- CON HUMEDALES ARTIFICIALES.**

OBSERVACIONES:

Se incluyó citas, se excluyó bibliografía y fuentes pequeñas (o palabras), y se limitó el tamaño de coincidencias a 16 palabras.

RESULTADO DE SIMILITUD	5 %
	38 páginas y 10171 palabras

Finalmente, se le solicita a la **C. ANAYELI VALENCIA ALVAREZ**, integrar en la versión final del trabajo recepcional, este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"




DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



C.c.p. Dr. Gaspar López Ocaña. Director de tesis
C.c.p. Archivo

Fuentes principales

- 11%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	ciba.org.mx	3%
2	Internet	aldeser.org	2%
3	Internet	www.pubiabm.com.py	1%
4	Internet	ri.ujat.mx	<1%
5	Internet	hdl.handle.net	<1%
6	Internet	www.ciba.org.mx	<1%
7	Internet	www.coursehero.com	<1%
8	Internet	repositorio.ug.edu.ec	<1%
9	Internet	alicia.concytec.gob.pe	<1%
10	Internet	www.researchgate.net	<1%
11	Internet	rinacional.tecnm.mx	<1%

12	Internet	repositorio.uncp.edu.pe	<1%
13	Internet	dspace.ucuenca.edu.ec	<1%
14	Internet	www.slideshare.net	<1%
15	Internet	consultaspublicas.semarnat.gob.mx	<1%
16	Publicación	Josué Nava-Rojas, Fabiola Lango-Reynoso, María del Refugio Castañeda-Chávez, C...	<1%
17	Internet	doaj.org	<1%
18	Publicación	Carlos M. López Vázquez, Germán Buitrón Méndez, Héctor A. García, Francisco J. C...	<1%

Carta de Cesión de Derechos

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTOR(A) y/o AUTORES(RAS) en la producción, creación y/o realización de la obra denominada TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES AGROINDUSTRIALES EN UN SISTEMA EXPERIMENTAL DE SBR- CON HUMEDALES ARTIFICIALES.


Con fundamento en el artículo 83 de la Lev Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

Villahermosa, Tabasco a 26 de Agosto 2025.

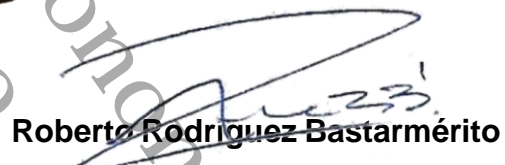
COLABORADORES



Anayeli Valencia Alvarez




Gaspar Lopez Ocaña



Roberto Rodriguez Bastarmérito

TESTIGOS



Carlos Alberto Torres Balcázar



Ing. Pedro Luis García Martínez

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la vida y por darme la oportunidad de cursar mi carrera profesional, así como ser mi fuerza en los momentos difíciles y lograr alcanzar mi meta.

A mis padres Fredy Valencia Valencia y Teófila Álvarez Balcázar gracias por los sacrificios que hicieron por darme una educación digna, ya que sin su apoyo no hubiera sido posible terminar con mis estudios, por la paciencia, el cariño y el amor incondicional que han dado, y doy gracias a dios por la enorme fortuna de tenerlos a mi lado.

A mi pareja Rogelio Vargas Zavala por su incondicional apoyo desde el inicio de mi carrera, por creer en mí y animarme en momentos difíciles. A mi hijo Benito Vargas Valencia por ser parte de este logro profesional en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Gaspar López Ocaña, por guiarme y orientarme en todo el proceso de mi investigación, por abrirme las puertas del laboratorio y brindarme parte de su tiempo en cada momento de mi investigación.

A la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas, por abrirme las puertas de sus instalaciones y brindarme las herramientas para formación como profesional.

Mi codirector el M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar por darse el tiempo de resolver mis dudas, ser paciente y siempre apoyarme en mi investigación.

A la familia Vargas Zavala. Sr. Armida, Vicente, Mónica, Yareli y Benito. Por brindarme su apoyo incondicional en mi desarrollo profesional y personal gracias por brindarme las herramientas necesarias para culminar este logro y enseñarme que siempre se puede salir adelante a pesar de las adversidades.

A mis amistades que hice en la carrera: José Ignacio, Humberto, Williams, Pedro, por brindarme su apoyo, por su amistad y por estar en los buenos y malos momentos. Los aprecio y estimo mucho.

A la maestra, Nancy Estrada Pérez, por ser parte fundamental en la realización de este proyecto, ya que siempre me brindó su apoyo incondicional en todo momento tanto profesional como personal.

A compañeros que integran el Laboratorio de Tecnología del Agua, por los momentos de risas, por el compañerismo y apoyo mutuo, todos son personas maravillosas.

A todos, ¡GRACIAS!

INDICE

COLABORADORES.....	8
DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS.....	9
AGRADECIMIENTOS.....	9
RESUMEN	13
PALABRAS CLAVES:.....	13
ABSTRACT.....	14
KEY WORDS:.....	14
1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. ANTECEDENTES.....	17
3. JUSTIFICACIÓN.....	19
4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	19
5. HIPÓTESIS	20
6. OBJETIVOS	20
6.1 Objetivo general	20
6.2 Objetivos específicos	20
7. MATERIALES Y MÉTODOS	21
7.1 Descripción del tren de tratamiento.....	21
7.1.1 Cárcamo.....	21
7.1.2 Reactor SBR.....	21
7.1.2 Sedimentadores secundarios	22
7.1.3 Humedales artificiales en serie	22
7.2 Operación del Sistema Experimental.....	22
7.2.1 Llenado.....	22
7.2.2 Aireación	22
7.2.3 Extracción.....	22
7.2.4 Sedimentación.....	22
7.2.5 Fase inactiva	23
7.3 Parámetro de medición del reactor SBR.....	23
7.3 Actividades de Campo y Laboratorio.....	23
7.3.1 Colecta de biomasa porcina, caracterización y siembra de vegetación.....	23
7.3.2 Caracterización fisicoquímica del agua residual agroindustrial	24
7.4 Actividades de gabinete	24
7.4.1 Eficiencia de remoción de contaminantes.....	24
7.4.2 Diseño experimental y análisis estadísticos.....	25
7.5 Cronograma de actividades (junio 2024 – abril 2025).....	25
7.6 Costos del proyecto	25
8. RESULTADOS	27
8.1 Estabilización del SBR.....	27
8.2 Comportamiento de la especie.....	27
8.3 Calidad del agua en los procesos	28
8.3.1. Gastos de operación del sistema	28
8.3.2 Potencial de hidrógeno y temperatura.....	28
8.3.3 Conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales	29
8.3.4 Turbiedad, Color	30
8.3.5 Oxígeno disuelto y potencial oxido reducción	31
8.3.6 Demanda química de oxígeno	32
8.4 Cumplimiento ambiental en los tratamientos	33

8.5	Eficiencias de remoción de los tratamientos.....	33
9.	DISCUSIONES	35
9.1	Desarrollo y comportamiento de las especies	35
9.2	Calidad del agua del efluente.....	36
	Potencial de hidrógeno (UpH) y Temperatura (°C)	36
	Conductividad eléctrica (µs/cm) y Sólidos disueltos totales (ppm)	36
	Turbiedad (UTN) y Color (UC).....	37
	Oxígeno disuelto (mg/L) y Potencial oxido reducción (mV)	37
	Demanda química de oxígeno (mg/L)	38
10.	CONCLUSIÓN.....	38
11.	LITERATURA CITADA.....	39
12.	ANEXO FOTOGRÁFICO	45
13.	ALOJAMIENTO DE TESIS.....	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Antecedentes internaciones de tratamiento de agua industrial.	17
Tabla 2.	Antecedentes nacionales	18
Tabla 3.	Parámetros de operación del reactor SBR.....	23
Tabla 4.	Cronograma de actividades. Fuente: Creación propia.	25
Tabla 5.	Costos de proyecto. Fuente: Creación propia.....	25
Tabla 7.	Comportamiento de especies en los trenes de tratamiento (N=4). Fuente: Elaboración propia.	28
Tabla 8.	Cumplimiento ambiental en el tren 1	33
Tabla 9.	Cumplimiento ambiental en el tren 2.....	33
Tabla 10.	Cumplimiento ambiental en el tren 3.....	33
Tabla 11.	Eficiencia de remoción del tren 1	34
Tabla 12.	Eficiencia de remoción del tren 2.....	34
Tabla 13.	Eficiencia de remoción del tren 3.....	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Sistema de tratamiento aplicado a las aguas residuales reconstituidas de la industria agropecuaria mediante SBR- HA. Fuente: Creación propia.....	21
Figura 2.	Sistema de tratamiento aplicado a las aguas residuales reconstituidas de la industria agropecuaria mediante SBR- HA. Fuente: Creación propia.....	29
Figura 3.	Valores medianos (±Q1, Q3) para la variable pH (UpH) (N=27).....	30
Figura 4.	Valores medianos (±Q1, Q3) para la variable Temperatura (°C) (N=36).....	30
Figura 5.	Valores medianos (±Q1, Q3) para la variable CE (µs/cm). (N=18).....	30
Figura 6.	Valores medianos (±Q1, Q3) para la variable SDT (mg/L) (N=18).....	31
Figura 7.	Valores medianos (±Q1, Q3) para la variable Turbiedad (UNT) (N=36).....	31
Figura 8.	Valores medianos (±Q1, Q3) para la variable Color (UC) (N=36).....	32
Figura 9.	Valores medianos (±Q1, Q3) para la variable OD (mg/L) (N=36).....	32
Figura 10.	Valores medianos (±Q1, Q3) para la variable POR (mV) (N=36).....	33
	33

Figura 11. Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable DQO (mg/L) (N=36).....	45
Figura 12. Captura de los análisis estadísticos.....	45
Figura 13 Preparación del lodo bacteriano.....	45
Figura 14. Sistema experimental SBR-Humedales en serie.....	45
Figura 15. Colecta de vegetación <i>Sagittaria lancifolia</i>	45
Figura 16. Evaluación de DQO.....	46
Figura 17. Análisis de parámetros fisicoquímicos del agua residual.....	46
Figura 18. Integrantes de laboratorio de tecnología del agua.....	46
Figura 19. Preparación del agua residual reconstituida.....	46
Figura 20. Herbicida líquido PARAQUAT.....	46
Figura 21. Funguicida en polvo MANCOZEB.....	46

México

RESUMEN

Los reactores biológicos secuenciales (SBR) son tecnologías para el tratamiento de aguas residuales industriales, su funcionamiento discontinuo basado en ciclos que se repiten a lo largo del tiempo, les proporciona una gran flexibilidad para adaptarse a diferentes modalidades de tratamiento y, en concreto, para la eliminación de nutrientes. Así, el objetivo general de la investigación fue evaluar el desempeño del reactor SBR en combinación con los humedales artificiales (HA) en serie para el tratamiento de agua residual industrial. El estudio consistió en utilizar el sistema SBR a escala experimental para tratar agua residual reconstituida (ARR) con características similares a un efluente de una industria agrícola.

Se evaluó la eficiencia de remoción de los parámetros de control utilizando las macrófitas *Sagittaria lancifolia* y *Potenderia sagittata*, en humedales de flujo libre y subsuperficial en Villahermosa, Tabasco, México. Las unidades experimentales se integran por un SBR (40 cm de ancho y 50 cm de altura), dos sedimentadores (40 cm de ancho y 30 cm de largo) y seis humedales artificiales en tres trenes con dos humedales (30 cm ancho y 120 cm de largo). De los humedales, 3 son de flujo subsuperficial y 3 de flujo libre, 4 con especies y 2 sin especies de control. Se comparó la morfología de las especies evaluadas y la calidad del agua tratada (pH, temperatura, SDT, CE, color, turbiedad, OD, POR y DQO). Las eficiencias de remoción alcanzadas fueron del 97.7%, 97.6, 97.3, de DQO 76.9%, 89.5%, 92.5% para color y 94.4%, 94.4%, 97.8% para turbiedad en los tres trenes de tratamiento. Sucesivamente se puede destacar que la *Potenderia sagittata* es la especie con mayor adaptación y tolerancia al tratamiento.

PALABRAS CLAVES:

Cumplimiento ambiental, Eficiencia de remoción, Humedales Artificiales, SBR.

ABSTRACT

Sequential biological reactors (SBRs) are technologies for industrial wastewater treatment. Their discontinuous operation, based on cycles repeated over time, provides them with great flexibility to adapt to different treatment modalities, specifically for nutrient removal. Thus, the overall objective of this research was to evaluate the performance of the SBR reactor in combination with constructed wetlands (CWs) in series for the treatment of industrial wastewater. The study consisted of using the SBR system on an experimental scale to treat reconstituted wastewater (RW) with characteristics similar to an effluent from an agricultural industry.

The removal efficiency of control parameters was evaluated using the macrophytes *Sagittaria lancifolia* and *Potenderia sagittata* in free-flow and subsurface wetlands in Villahermosa, Tabasco, Mexico. The experimental units were composed of a SBR (40 cm wide and 50 cm high), two settlers (40 cm wide and 30 cm long), and six artificial wetlands in three trains with two wetlands (30 cm wide and 120 cm long). Of the wetlands, 3 were subsurface flow and 3 were free-flow, 4 with control species and 2 without. The morphology of the evaluated species and the quality of the treated water (pH, temperature, TDS, EC, color, turbidity, DO, ORP, and COD) were compared. The removal efficiencies achieved were 97.7%, 97.6%, and 97.3% of COD. 76.9%, 89.5%, 92.5% for Color, 94.4%, 94.4%, 97.8% for Turbidity. This was achieved successively across the three treatment lines. It should be noted that *Potenderia sagittata* is the species with the greatest adaptation and tolerance.

KEY WORDS:

Environmental compliance, nitrogen and phosphorus removal efficiency, constructed wetlands, SBR.

1. INTRODUCCIÓN

Cada vez más se cuestiona el uso de productos de origen químicos en el sector agroindustrial en las aguas residuales por lo que son efluentes que provienen de la descarga de procesos, manipulación y transformación de los recursos en producción, las cuales deterioran en mayor parte la calidad del agua y dañando el suelo. Por lo tanto, estas afectan de manera crítica y toxicológica la flora y fauna existente en los cuerpos de agua (Mendoza et al 2022).

México es la segunda nación en el mundo después de china que más hace uso de aguas residuales crudas, para los cuerpos de aguas, suelos o canales de riego el cual no cuenta con controles de tratamiento adecuado (UNAM, 2020).

Para este proceso se genera un alto índice de contaminación, tomando en cuenta que, si el efluente descargado es proveniente de industrias agrícolas, cosméticas, alimentarias, de producción, petrolera, etc. (Diaz et al., 2022) contienen alta carga química, la cual es en ocasiones de difícil degradación, lo que nos exige la selección de tecnologías aptas para los efluentes de las diversas industrias (Iñiguez, Rivadeneira 2021).

Entre las tecnologías existentes (procesos de oxidación avanzada, tecnologías de membranas, etc.) que se aplican a las aguas residuales hay procesos biológicos, químicos y fisicoquímicos que son capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes, con la finalidad de reducir, transformar o eliminar a estos (López 2021). Para el proceso de tratamiento de aguas residuales industriales, se aplican tecnologías que presentan altos costos de operación y mantenimiento, sin embargo, en la actualidad existen tecnologías económicamente viables en cuanto a costos, operación y mantenimiento, dentro de las cuales se aplican biorreactores anaerobios, humedales artificiales, entre otros, los cuales tienden a ser sistemas muy eficientes en la separación de materia en suspensión y coloidal, que permiten obtener aguas regeneradas de elevada calidad fisicoquímica y microbiológica (Verdaguer, 2024). Las lagunas de estabilización se combinan para lugares donde existe disponibilidad de construcción, y dentro de los sistemas biológicos las más comunes son las tecnologías de lodos activados convencionales, de aireación extendida y lodos activados discontinuos secuenciales (SBR) (Filipigh 2021).

En la siguiente investigación se evaluó un sistema a escala piloto experimental de SBR en combinación con humedales artificiales para tratar efluentes con características agrícolas-forestales de la sierra tabasqueña, que presentan dentro de sus contaminantes principales herbicidas y fungicidas como Paraquat y Mancozet, teniendo en cuenta que ambas son tecnologías que en la actualidad han generado altos impactos por su reconocimiento en cuanto a las altas eficiencias de remoción de contaminantes (materia orgánica e inorgánica y metales pesados).

México

2. ANTECEDENTES

En la tabla 1 y 2 se presentan una serie de investigaciones a nivel nacional e internacional de tratamientos híbridos, humedales artificiales (HA) y reactores biológicos secuenciales (SBR).

Tabla 1. Antecedentes internaciones de tratamiento de agua industrial.

Autores	Año	Tecnología	AR	Contaminantes	%ER
Domínguez	2022	Tratamiento Biológico secuencial	Efluentes de industria cárnica	DQO: 1.500 mg/L Ph: 6-10 UpH	DQO: 94%
Linares et al.	2020	Reactores por carga secuencial (SBR)	Aguas residuales generadas en una embotelladora de bebidas no alcohólicas	DQO: 3100 y 4500 mg/L Ph:6.0 UpH	DQO: 88,73%
Mongelos et al.	2021	Sistema SBR a escala de laboratorio	Agua residual sintética (ARS) con características similares a un efluente de una industria láctea.	DQO: 1.374 mg/L Ph:5 a-9 UpH	DQO: 80%
Vera y Patricio	2022	cavitación hidrodinámica (CH) y la precipitación ácida seguida de filtración por membranas o tratamiento biológico	Tratamiento de aguas residuales de planta de beneficio bovino con cavitación hidrodinámica y subsecuente cultivo de microalgas	DQO:4221 Ph:7	DQO:85%
Ortiz et al.	2023	Reactor biológico secuencial (SBR)	Agua sintética que contiene fármacos.		DQO: 86.47% Turbiedad:76.92%

Tabla 2. Antecedentes nacionales

Autores	Año	Tecnología	Especie	AR	Contaminante	%ER
Romellón et al.	2023	Humedales artificiales en serie (HAS)	<i>Pontederia cordata</i> , <i>Thalia geniculata</i> y <i>Sagittaria lancifolia</i>	DQO: 373 mg/L DQO: 83.05 mg/L Turbiedad: 96.37 UNT Turbiedad: 35 UNT Color: 1305.1 UC Color: 47.7 UC pH: 8.66 UpH pH: UpH SDT: 950.5 mg/L SDT: mg/L	Demanda química de Oxígeno	DQO: 78.65% Turbiedad: 62.2% Color: 61.4% pH: 3.0% SDT: -4.7%
				S. latifolia: DQO: 2955 DQO: 10.81 Ph:7 Turbierdad: 3.89 UNT Turbiedad: 1.15 UNT S. lancifolia: DQO:59.62 DQO:5.88 Ph:7 Turbiedad:7.68 UNT Turbiedad:0.58 UNT		Demanda química de Oxígeno

3. JUSTIFICACIÓN

La falta de tratamientos altamente efectivos para aguas residuales de difícil degradación como las aguas provenientes de la industria, es uno de los principales obstáculos en México, el cual llega a limitar el derecho humano al agua, esto debido a la falta de terreno para su construcción, la limitación económica y a las gestiones correspondientes (Núñez, 2022). CONAGUA (2021) reporta que para el sector industrial operan 2,832 plantas, en su mayoría en grandes industrias y en medianas autoabastecidas, desafortunadamente a las microempresas solo les corresponde un 0.8%, mientras que para las empresas menores no existe tratamiento alguno. Teniendo en cuenta que en la actualidad existen diversas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, tales como el pretratamiento (rejillas, tamices, microfiltros y desarenador), tratamiento primario (cribas, mallas de filtrado, trapa de grasa y aceites, etc.) tratamiento secundario (lecho bacteriano, lodos activados, filtros verdes, etc.) y avanzado o terciario (ósmosis inversa, destilación, coagulación, adsorción, etc.), estos tipos de tratamientos suelen ser de costos elevando (Hernández et al., 2020), por lo que en México los que más se utilizan es la membranas de ultrafiltración, nanofiltración u ósmosis inversa (SEMARNAT, 2021). Por lo anterior, en esta investigación se busca una alternativa para los efluentes agroindustrial por lo que se simulara el agua de la industria agrícola. para ser tratada en un sistema a escala experimental que estará compuesto por unidades como, cárcamo, reactor SBR, dos sedimentadores secundarios, acoplado a tres trenes de tratamiento con dos módulos de humedales artificiales, donde se evaluarán la remoción desde sólidos sedimentables, sólidos gruesos, eliminación de materia orgánica con emulsión de nutrientes (Alarcón, 2016).

4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿La combinación de ambas tecnologías acopladas (SBR-HA) podrán ser una alternativa viable, técnica y económicamente factible para el tratamiento de aguas residuales agroindustriales?

5. HIPÓTESIS

Ho: En un sistema a escala piloto experimental de SBR en combinación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales industriales cumple con eficiencias de remoción del 90% en parámetros importantes como DQO, N, P y metales, permitiendo cumplir con la normatividad vigente.

Ha: En un sistema a escala piloto experimental de SBR en combinación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales industriales no cumple con eficiencias de remoción del 90% en parámetros importantes como DQO, N, P y metales, por lo que no cumple con la normatividad vigente.

6. OBJETIVOS

6.1 Objetivo general

Analizar la remoción de carga orgánica e inorgánica (DQO) en un sistema a escala piloto experimental de SBR en combinación con humedales artificiales para la simulación de agua sintética de sector agrícola.

6.2 Objetivos específicos

- Caracterizar morfológicamente las especies macrófitas durante el periodo experimental midiendo el peso de la especie, el número de hojas, el ancho y largo de las hojas, y el diámetro del tallo.
- Caracterizar fisicoquímicamente el afluente y efluente de las unidades de proceso, midiendo el potencial de hidrógeno (pH), temperatura, sólidos disueltos totales (SDT), conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), potencial de óxido reducción (POR), color, turbiedad y demanda química de oxígeno (DQO).
- Evaluar la eficiencia remoción y cumplimiento ambiental de la descarga, mediante la NOM-001-SEMARNAT-2021.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 Descripción del tren de tratamiento

El sistema de tratamiento está construido a escala laboratorio y contiene las siguientes unidades de proceso: cárcamo, reactor SBR, sedimentador 1 y 2 y humedales artificiales (HAFLC, HAFSC, HAFSPs, HAFSSI, HAFLPs y HAFLSI). Cada unidad experimental cuenta con alimentación propia y las primeras tres unidades consta con una descarga de los lodos generados durante el tratamiento del agua residual industriales.

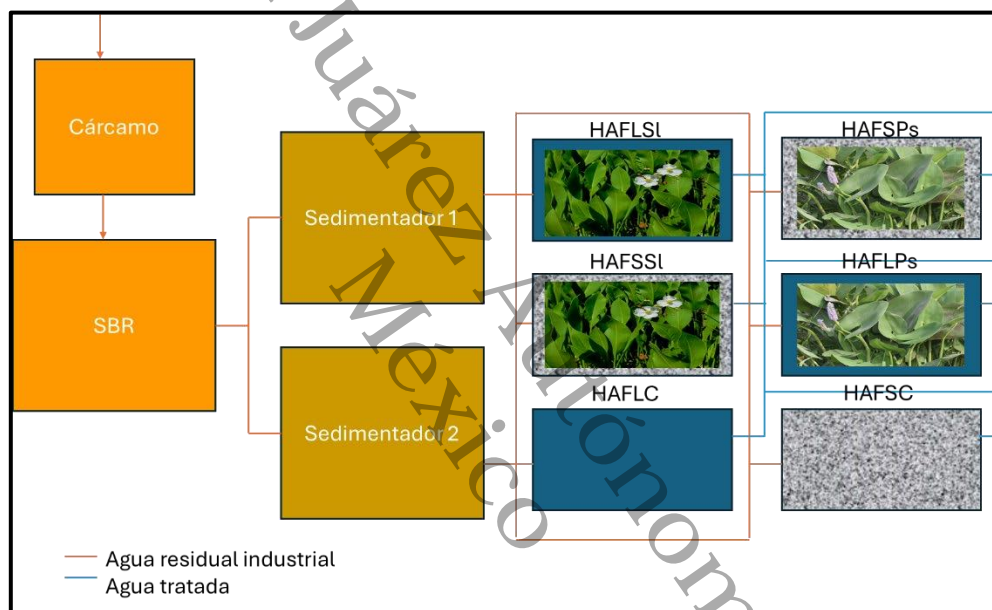


Figura 1. Sistema de tratamiento aplicado a las aguas residuales reconstituidas de la industria agropecuaria mediante SBR- HA. Fuente: Creación propia.

7.1.1 Cárcamo

El lugar de pretratamiento el cual recibe el agua residual reconstituida (A-RR9 con características agrícolas, con el objetivo de controlar la velocidad y remover posibles solidos sedimentables (arena). Posteriormente se realizó el bombeo al SBR.

7.1.2 Reactor SBR

SBR por sus siglas en inglés, es un sistema de lodos activados en el cual se trató el agua residual. Utilizó ciclos de llenado y descarga. Para homogenizar las propiedades fisicoquímicas su unidad costa de ancho 40 cm y una altura de 50 cm

(doméstica e industriales) su nivel de oxígenos del tanque debe estar como mínimo 2 mg/L y máximo de 4 mg/L. Para garantizar condiciones necesarias, en el nivel de sólidos suspendidos en el licor de mezclado a nivel bajo el agua debe ser de alrededor de 4000 mg/L para aguas residuales domésticas. Es necesario manejar los sólidos suspendidos en el tanque de aireación para obtener un lodo de purga estabilizado.

7.1.2 Sedimentadores secundarios

Esta etapa, consto de dos sedimentadores secundarios paralelos y de igual manera del efluente el cual llegará por gravedad. Las medidas de estas unidades serán de 40 cm de ancho y 30 cm de largo.

7.1.3 Humedales artificiales en serie

Por último, el agua llego a los trenes de HA en serie por gravedad. Los dos trenes miden 30 cm de ancho y 120 cm de largo, el cual cuentan con una red de tubería de PVC de 1/2" pulgadas, que se divide en tres secciones de dos partes cada uno. De los cuales se destinó a humedales artificiales de flujo libre (HAFL) y humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFS).

7.2 Operación del Sistema Experimental

7.2.1 Llenado

Para la generación de los microorganismos fue necesario agregar 1 kilogramo de materia orgánica (heces porcinas) en combinación con agua residual reconstituida de la industria agropecuaria, para su preparación realizó la mezcla de los químicos Paraquat y Mancozeb.

7.2.2 Aireación

El sistema de aireación se mantuvo las 24 h, con tiempos de descargas y sedimentación de 8h. Ya que es necesario para el proceso de agitación por lo que se necesitó tener una cubierta de oxígeno, ya que favoreció la correcta sedimentación y homogenización de los lodos activado.

7.2.3 Extracción

En este proceso se realizó el vaciado del agua tratada del reactor por medio de decantación. El tiempo que se tomó en realizar este proceso fue de 10 min.

7.2.4 Sedimentación

El tiempo del proceso sedimentación constará de una hora, el cual permitirá

que las partículas más pesadas comiencen a asentarse al fondo debido a la gravedad permitiendo la separación de los lodos.

7.2.5 Fase inactiva

Esta fase fue el tiempo inactivo del reactor una vez concluido su proceso, para iniciar otro. El tiempo muerto fue de 1.25 horas.

7.3 Parámetro de medición del reactor SBR

En la tabla 3 se presentan parámetros a medir en el reactor SBR, sugeridos por Balcázar et al. (2020).

Tabla 3. Parámetros de operación del reactor SBR.

Parámetro	Valor	Unidad
Q entrada	114	L/d
Concentración de lodos		mg/L
DQO (Demanda química de oxígeno)		mg/L
Tiempo de reacción	8	H
Tiempo de sedimentación	4	H
Tiempo muerto	1	H
Tiempo de llenado	0.5	Min
OD (oxígeno disuelto)		mg/L
Temperatura		°C
pH		UpH
SSVLM (microorganismos)	4000-6000	mg/L

7.3 Actividades de Campo y Laboratorio

7.3.1 Colecta de biomasa porcina, caracterización y siembra de vegetación

Para realizar el proceso de evaluación se procedió, a la expedición de la búsqueda de biomasa bacteriana a establos porcinos, tradicionales, donde se recolecto aproximadamente un kilo de biomasa porcina. Posteriormente se procedió a aforar en 3 L de agua residual para formar una mezcla de sólidos en suspensión y depositarlo al sistema SBR. Durante el periodo se alimentó con alta carga orgánica, para mantener los lodos bacterianos vivos el cual conto de alimentación diaria cada 8 h. De igual manera, monitoreando los parámetros siguientes pH, temperatura, turbiedad, color y oxígeno disuelto OD.

Se realizó la búsqueda de vegetación nativa en áreas naturales, se recolecto un total de 40 plantas, las cuales fueron extraídas manualmente con la ayuda de palas y trasladadas con carretilla y cubetas, para después sembrarlas en las unidades experimentales. Posterior a la colecta, de cada especie se determinó las

características fisiológicas vegetales y adicionalmente se tomaron muestra de agua del sitio y se analizaron Los parámetros básicos los cuales fueron temperatura, turbiedad, color, pH, CE, OD, SST y DQO. Para determinar las condiciones del agua a la que la especie fue expuesta. Debido al diseño de las unidades experimentales de los HA se optó en sembrar la vegetación en una sola serie, por lo tanto, en cada unidad solamente se sembraron 4 surcos de cada vegetación recolectada a una profundidad de 5 cm para los HAFL y 20 cm para los HAFS.

7.3.2 Caracterización fisicoquímica del agua residual agroindustrial

Se realizó la determinación de los parámetros de control como la temperatura (SM 2550), turbiedad (SM 2130 B), color (APHA 2120), oxígeno disuelto (OD, SM 4500 OG), potencial de hidrógeno (pH SM 9040 B), conductividad eléctrica (CE, SM 1250 B) y sólidos disueltos totales (SDT SM 2540,) Para el cálculo de temperatura, CE, SDT y pH se utilizó el multiparamétrico HANNA Waterproof Tester modelo HI 98129, para medir oxígeno disuelto se empleó un HANNA Dissolved Oxygen modelo HI 98193, el color se estimó con un fotómetro LaMotte SMART3 y la turbidez se determinó con un turbidímetro HANNA HI 98703, con el fin de evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes para las descargas de aguas y verificar el cumplimiento de los límites máximos permisibles como lo refiere la NOM-001-SEMARNAT-2021.

7.4 Actividades de gabinete

7.4.1 Eficiencia de remoción de contaminantes

Durante las dos etapas a evaluar se determinó la eficiencia de remoción del proceso en función de las concentraciones promedio de las entradas y salidas de cada una de las unidades de tratamiento. Según Cardona y Vanegas (2009), para cualquier sustancia se puede aplicar el cálculo de eficiencia requerida mediante la siguiente ecuación:

$$\% R = \frac{[[a]A - [a]E}{[a]A} * 100$$

Donde:

[a]A = La masa del análito en el afluente

[a]E = La masa del análito en el efluente

% R = Porcentaje de remoción

7.4.2 Diseño experimental y análisis estadísticos

Se realizó un análisis estadístico para determinar si los datos cumplen con los postulados de normalidad y homocedasticidad, en donde se emplearon un análisis ANOVA simple para datos paramétricos y una prueba de Kruskal-Wallis para los datos no paramétricos. Todos los análisis estadísticos y gráficos se llevaron a cabo empleando el software STATGRAPHICS CENTURION® v19.0 (nivel de significancia establecido en $\alpha = 0.05$).

7.5 Cronograma de actividades (junio 2024 – abril 2025)

En la tabla 4 se presentan las actividades realizadas durante el proyecto.

Tabla 4. Cronograma de actividades. Fuente: Creación propia.

Actividad	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
Búsqueda y recolección de vegetación.	■										
Fase de siembra y caracterización de la vegetación.	■	■									
Inicio del arranque del tren de tratamiento.		■	■	■	■						
Evaluación del crecimiento y comportamiento de la vegetación		■	■	■	■	■					
Semana de muestro y monitoreo										■	
Caracterización fisicoquímica del afluente y efluente										■	
Inicio de la fase de estabilización del tren de tratamiento.											■
Caracterización fisicoquímica del afluente y efluente											■
Resultados y conclusiones											■
Redacción de la tesis											■
Presentación de la tesis											■

7.6 Costos del proyecto

En la tabla 5 se desglosan los costos realizados dentro del proyecto.

Tabla 5. Costos de proyecto. Fuente: Creación propia.

Concepto	Partida	Unidad	Precio unitario	Precio Total
Prototipo experimental				
Integrado por un cárcamo (40 L), un SBR (40 L), dos sedimentadores (30 L), seis humedales (50 l), construidos en acero al carbón calibre 12.	1 ^a	1	\$60,000.00	\$60,000.00
			Total de partida	\$60,000.00
Materiales de pailería (Aportado por laboratorio de tecnología del Agua)				

Manguera para aire (7 mts)	2 ^a	1	\$250	\$250
Tubo de PVC 2 pulgada de 6 metro	2b	4	\$129	\$516
Válvulas ½	2c	33	\$22	\$726
PVC Codos de ½	2d	45	\$5	\$225
Pegamento para tuberías de PVC 240ml	3 ^a	2	\$104	\$208
PVC Tee ½	3b	30	\$5	\$150
Poliducto ½ (mts)	3d	50	\$500	\$500
PVC Coplee ½ paquete de 10 piezas	4 ^a	3	\$50	\$150
			Total \$1,065	\$2,725
Herramientas de campo (Aportado por laboratorio de tecnología del Agua)				
Malla sombra	5 ^a	1	\$406	\$406
Pala de cuchara	5b	1	\$327	\$327
Pala plana	5c	1	\$250	\$250
Tijeras	5d	1	\$169	\$169
Segueta	6 ^a	1	\$128	\$128
Tijeras de jardín	6b	1	\$150	\$150
Carretilla	6c	1	\$1200	\$1200
Guates de carnaza	7 ^a	1	\$88	\$88
Escoba	7b	1	\$55	\$55
			Total \$2,773	\$2,773
Equipo de protección personal (Aportado por el estudiante)				
Guantes látex (cajas)	8 ^a	2	\$318	\$318
Botas	8b	1	\$290	\$290
Lentes de seguridad	8c	1	\$630	\$630
Guantes de nitrilo	8d	1	\$714	\$714
Cubre bocas de seguridad industrial	9 ^a	20	\$16	\$320
Batas de laboratorio	9b	1	\$200	\$200
			Total \$2,168	\$2,472
Materiales de laboratorio				
Bailer	10 ^a	1	\$2000	\$2000
Conos imhoff 1000ml	10b	3	\$5832	\$5832
Vaso de precipitado	10c	1	\$190	\$190
Botes de 1 L para muestra	10d	251	\$20	\$5020
			Total \$8,042	\$13,042
Análisis de laboratorio (Aportado por laboratorio de tecnología del Agua)				
*Análisis de Ph	11 ^a	100	\$250	\$25000
*Análisis de Temperatura	11b	100	\$250	\$25000
*Análisis de CE	11c	100	\$250	\$25000
*Análisis de SDT	11d	100	\$250	\$25000
*Análisis de color	12 ^a	100	\$500	\$50000
*Análisis de Turbiedad	12b	100	\$500	\$50000
*Análisis de OD	12c	100	\$250	\$25000
*Análisis de POR	12d	100	\$250	\$25000
*Análisis de DQO	13 ^a	10	\$1050	\$10500
HI23754C-25 Viales para DQO rango bajo	13b	2	\$1125	\$2250
HI23754C-25 Viales para DQO rango Alto	13c	1	\$1125	\$1125
Reactivo marino nitrato – LR- (25 TEST)	13d	2	\$974	\$974
Reactivos para fósforo, método de aminoácido, para 100 pruebas	14 ^a	2	\$1670	\$1670
			Total \$ 8,444	\$216,519
			\$80,732.00	\$342,511.00
PRESUPUESTO TOTAL				\$342,511.00

Gastos adsorbidos por la institución
Monto aportado por el laboratorio de tecnología de agua
Monto aportado por el estudiante.

8. RESULTADOS

8.1 Estabilización del SBR

A continuación, en la tabla 6 se presentan los valores promedio (\pm DE) de las concentraciones de entrada y salida del SBR, durante la fase de estabilización.

Tabla 6. Características de entrada y salidas del agua residual en el SBR. Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Entrada	Salida	V. Ref	Ref.
pH (UpH)	8.0 \pm 0.4	8.2 \pm 0.4	6 a 9	A
Temperatura (°C)	25.1 \pm 4.9	27.2 \pm 3.0	35.0	A
CE (μ s/cm)	390.9 \pm 92.4	391.3 \pm 65.3	1000.0	B
SDT (ppm)	196.2 \pm 46.9	200.7 \pm 48.5	500.0	B
Turb (UNT)	50.6 \pm 44.3	40.5 \pm 38.7	15.0	C
Color (UC)	1440.6 \pm 535.6	1578.7 \pm 1244.7	10.0	E
OD (mg/L)	5.1 \pm 2.6	5.4 \pm 3.4	6 a 9	A
POR (mV)	80.4 \pm 59.9	9.6 \pm 86.0	35.0	A

NOM-001-SEMARNAT-2021 (A); CECA/1989 (B); NADF-003-AGUA-2023 (C); Gerónimo (2022) POR (+) aerobio, POR (-) anaerobio (D); LFDDAMAN 2024 (E); NADF-003-AGUA-2002.

8.2 Comportamiento de la especie

En la tabla 7 se muestran la diferencia de las especies vegetales y su comportamiento en el periodo experimental. Por lo que en la parte inicial se colocaron cuatro especies macrófitas en cada tren de tratamiento. *Sagittaria lancifolia*, fue colocada en el FSSI-T2. y *Potenderia Sagittata* FLPs-T2. En el periodo de estabilización presentaron una diferencia significativa de crecimiento. En la fase final se puede observar que no sobrevivieron a las altas concentraciones de agroquímicos presentes. Para el caso de la especie *Sagittaria lancifolia* que fue sembrada en el FLSI-T3. Se desarrollaron 18 individuos al final del tratamiento y para la especie *Potenderia sagittata* en el reactor FSPs-T3 se desarrollaron 20 individuos.

Tabla 7. Comportamiento de especies en los trenes de tratamiento (N=4). Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	FSSI-T2		FLPs-T2		FSPs-T3		FLSI-T3	
	<i>S. lancifolia</i>		<i>P. Sagittata</i>		<i>P. Sagittata</i>		<i>S. lancifolia</i>	
Tipo de vegetación	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Etapa	4	0	4	0	4	20	4	18
No de especie	4	0	4	0	4	20	4	18
Largo raíz (cm)	25.3 ± 9.5	0	33.3 ± 2.1	0	27.7 ± 6.1	119.3 ± 17.9	29.3 ± 8.4	55.0 ± 37.7
Ancho raíz (mm)	1.0 ± 0.0	0	1.0 ± 0.0	0	1.0 ± 0.0	3.7 ± 0.6	1.0 ± 0.0	4.3 ± 3.2
Largo tallo (cm)	38.7 ± 11.8	0	63.7 ± 40.2	0	51.0 ± 3.0	28.3 ± 9.8	36.4 ± 12.9	16.3 ± 3.2
Ancho tallo (cm)	2.0 ± 1.0	0	2.0 ± 0.0	0	3.0 ± 0.0	2.7 ± 0.6	2.0 ± 0.0	0.8 ± 0.6
Largo de hoja (cm)	19.0 ± 3.6	0	11.0 ± 4.6	0	24.7 ± 4.2	146.7 ± 20.8	7.7 ± 1.5	97.7 ± 12.5
Ancho de hoja (cm)	5.3 ± 1.5	0	9.0 ± 1.7	0	7.0 ± 1.0	1.0 ± 1.0	7.0 ± 2.0	1.0 ± 1.7
Número de hojas	7.7 ± 1.2	0	12.3 ± 2.5	0	7.7 ± 2.1	6.7 ± 0.6	6.3 ± 1.5	11.0 ± 11.4
Número de flores	1.3 ± 1.5	0	0.3 ± 0.6	0	0.7 ± 1.2	4.7 ± 0.6	0.3 ± 0.6	9.3 ± 7.6
Peso de planta (gr)	383.3 ± 317.5	0	573.3 ± 145.0	0	443.3 ± 248.3	219.7 ± 109.7	243.3 ± 225.0	660.0 ± 520.0

8.3 Calidad del agua en los procesos

8.3.1. Gastos de operación del sistema

En este experimento, el gasto de operación del sistema diario fue de caudal máximo (Q_{\max}) de 0.14 m³/d, el mínimo (Q_{\min}) de 0.11 m³/d, presentándose al inicio de operaciones el Q_{\max} y este mantiene constante sobre los siguientes días por las condiciones controladas de operación del sistema, ya que el SBR tiene una capacidad máxima de 60 L, pero el volumen de intercambio es de 40 L de agua residual reconstituida y quedando un volumen de lodo de 20 L.

8.3.2 Potencial de hidrógeno y temperatura

La prueba de Kruskal-Wallis para pH (UpH) ($P < 0.05$) (Figura 2), muestra que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor mediano más bajo se presenta en el tratamiento FSPs-T3 ± RI ($Q_1=6.9$, $Q_3= 6.70427$) (UpH), seguido de los tratamientos FLPs-T2, FSSI-T2, FLSI-T3 con 6.85 ± ($Q_1= 6.8$, $Q_3= FLPs-T2 7.1$, FSSI-T2, 7.18936, FLSI-T3, 7.0) (UpH) y finalmente el tratamiento con valor mediano más alto se presentó en el FLC-T1 con 7.35 ± ($Q_1= 7.21064$, $Q_3= 7.68936$) (UpH). Para la temperatura (Figura 3) (°C) se muestra una diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher con un 95.0% confianza. El promedio (± DE) más bajo se reporta en el tratamiento FLC-T1

con $22.7 \pm \text{RI}$ ($Q_1= 22.2213$, $Q_3= 23.5$) temperatura, seguido de FSC-T1 con $23.1 \pm$ ($Q_1= 22.7106$, $Q_3= 23.5$) temperatura, y finalmente el tratamiento con valor mediano más alto se presentó en el FSSI-T2 con $24.35 \pm$ ($Q_1= 23.2$, $Q_3= 24.9$) temperatura.

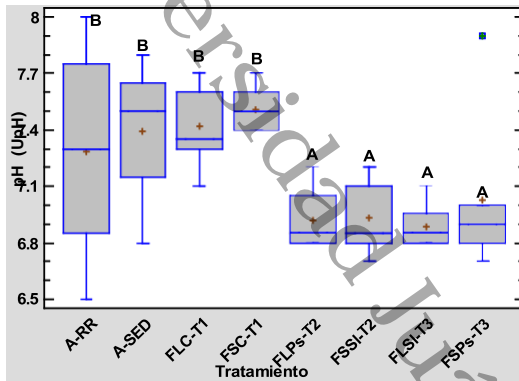


Figura 2. Valores medianos ($\pm Q_1$, Q_3) para la variable pH (UpH) (N=27).

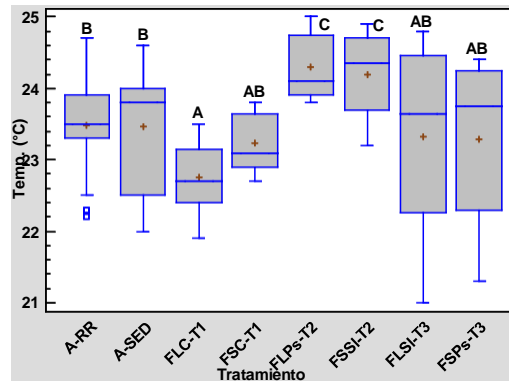


Figura 3. Valores medianos ($\pm Q_1$, Q_3) para la variable Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (N=36).

Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas Fuente: Creación propia.

8.3.3 Conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales

La prueba de Kruskal-Wallis para CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$) ($P < 0.05$) (Figura 4), muestra que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor mediano más bajo se presenta en el tratamiento A-SED con $345.0 \pm \text{RI}$ ($Q_1= 33.0$, $Q_3= 350.0$) CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$), seguido del tratamiento FLC-T1 con $460.0 \pm$ ($Q_1= 440.0$, $Q_3= 590.0$) CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$) y finalmente el tratamiento con valor mediano más alto se presentó en el FSPS-T3 con $705.0 \pm$ ($Q_1= 490.0$, $Q_3= 748.936$) CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$).

La prueba de Kruskal-Wallis para SDT (mg/L) ($P < 0.05$) (Figura 5), muestra que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor mediano más bajo se presenta en el tratamiento A-SED con $155.0 \pm \text{RI}$ ($Q_1= 150.0$, $Q_3= 160.0$) SDT (mg/L), seguido del tratamiento FLC-T1 con $205.0 \pm$ ($Q_1= 200.0$, $Q_3= 270.0$) SDT mg/L y finalmente el tratamiento con valor mediano más alto se presentó en el FSPS-T3 con $320.0 \pm$ ($Q_1= 220.0$, $Q_3= 338.936$) SDT mg/L.

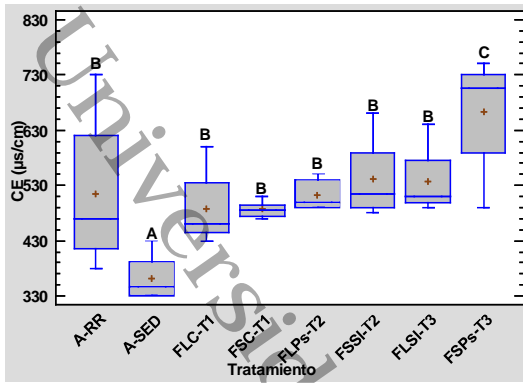


Figura 4. Valores medianos (\pm Q1, Q3) para la variable CE (μ s/cm). (N=18).

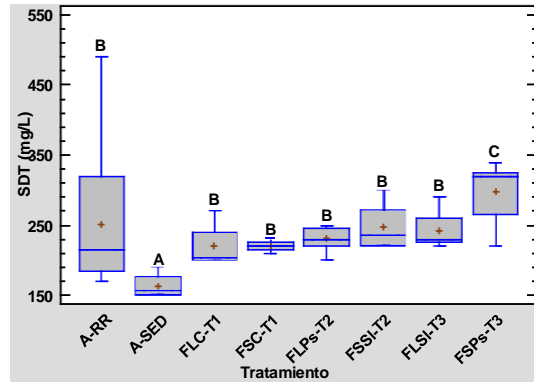


Figura 5. Valores medianos (\pm Q1, Q3) para la variable SDT (mg/L) (N=18).

Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas Fuente: Creación propia.

8.3.4 Turbiedad, Color

La prueba de Kruskal-Wallis para Turbiedad (UNT) ($P < 0.05$) (Figura 6), muestra que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor mediano más bajo se presenta en el tratamiento FSPs-T3 con $5.85 \pm$ RI (Q1= 4.51064, Q3= 11.4894) Turbiedad (UNT), seguido del tratamiento FFSC-T1 con $8.55 \pm$ (Q1= 5.06164, Q3= 21.5788) Turbiedad (UNT), y finalmente el tratamiento con valor mediano más alto se presentó en el ARR- con $187.7 \pm$ (Q1= 102.2, Q3= 277.2) Turbiedad (UNT).

La prueba de Kruskal-Wallis para Color (UC) ($P < 0.05$) (Figura 7), muestra que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor mediano más bajo se presenta en el tratamiento FSPs-T3 con $198.5 \pm$ RI (Q1= 95.2127, Q3= 341.894) Color (UC), seguido del tratamiento FLPs-T2 con $279.5 \pm$ (Q1= 180.213, Q3= 432.681) Color (UC), y finalmente el tratamiento con valor mediano más alto se presentó en el ARR- con $2524.0 \pm$ (Q1= 1702.0, Q3= 3458.0) Color (UC)

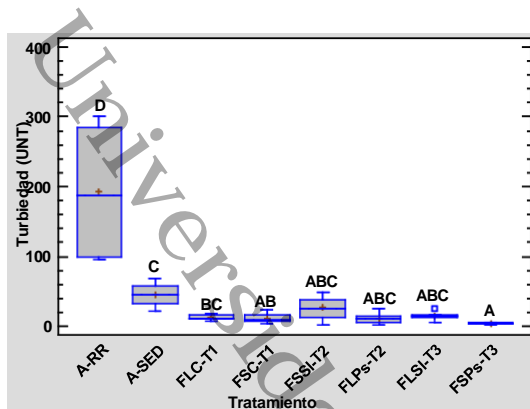


Figura 6. Valores medianos (\pm Q1, Q3) para la variable Turbiedad (UNT) (N=36).

Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas Fuente: Creación propia.

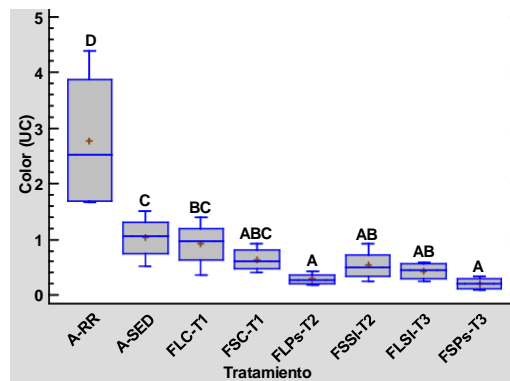


Figura 7. Valores medianos (\pm Q1, Q3) para la variable Color (UC) (N=36).

8.3.5 Oxígeno disuelto y potencial oxido reducción

La prueba de Kruskal-Wallis para OD (mg/L) ($P < 0.05$) (Figura 8), muestra que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor mediano más bajo se presenta en el tratamiento FLPs-T2 con $2.35 \pm$ RI (Q1= 2.2, Q3= 2.78936) OD (mg/L), seguido del tratamiento FSSI-T2 con $2.35 \pm$ (Q1= 2.11064, Q3= 2.58936) OD (mg/L), y finalmente el tratamiento con valor mediano más alto se presentó en el FSPs-T3 con $2.55 \pm$ (Q1= 2.11064, Q3= 4.09364) OD (mg/L).

La prueba de Kruskal-Wallis para POR (mV) ($P < 0.05$) (Figura 9), muestra que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor mediano más bajo se presenta en el tratamiento A-SED con $2.0 \pm$ RI (Q1= -16.0, Q3= 11.0) POR (mV), seguido del tratamiento A-RR con $-18.5 \pm$ (Q1= -48.0, Q3= -16.0) POR (mV), y finalmente el tratamiento con valor mediano más alto se presentó en el FSSI-T2 con $-177.5 \pm$ (Q1= -187.894, Q3= -137.106) POR (mV).

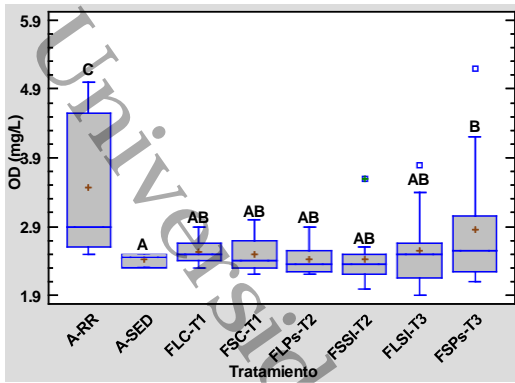


Figura 8. Valores medianos (\pm Q1, Q3) para la variable OD (mg/L) (N=36).

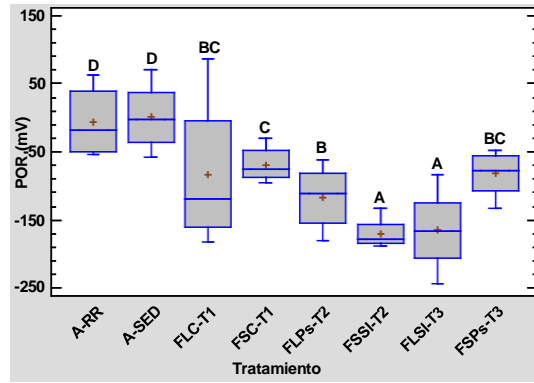


Figura 9. Valores medianos (\pm Q1, Q3) para la variable POR (mV) (N=36).

Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas Fuente: Creación propia.

8.3.6 Demanda química de oxígeno

La prueba de Kruskal-Wallis para DQO (mg/L) ($P < 0.05$) (Figura 10), muestra que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor mediano más bajo se presenta en el tratamiento FSC-T1 con $53.0 \pm$ RI ($Q_1 = 41.1064$, $Q_3 = 182.936$) mg/L, seguido del tratamiento FLPs-T2 con $70 \pm$ ($Q_1 = 57.2127$, $Q_3 = 152.936$) mg/L y finalmente el tratamiento con valor mediano más alto se presentó en el A-RR con $3501.5 \pm$ ($Q_1 = 3423.0$, $Q_3 = 3590.0$) mg/L.

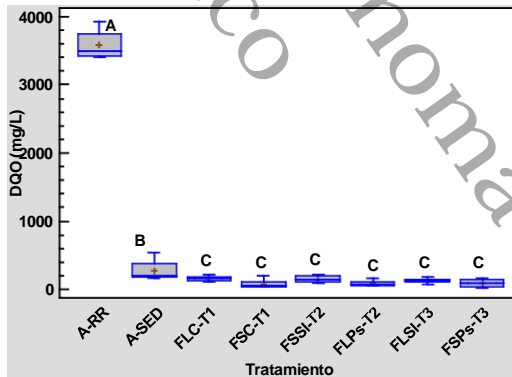


Figura 10. Valores medianos (\pm Q1, Q3) para la variable DQO (mg/L) (N=36).

Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas Fuente: Creación propia.

8.4 Cumplimiento ambiental en los tratamientos

La tabla 8 muestra los valores promedio alcanzados en los tratamientos siendo el FLPs-T1 el que presenta mejor eficiencia en la remoción de DQO con valores de 76.4 ± 63.5 , color 593.2 ± 262.2 , Turbiedad 10.1 ± 6.6 , cumpliendo así con la normativa NOM-001-SEMARNAT-2021 y valores establecidos por LFDDAMAN 2024 y NADF-003-AGUA-2023.

Tabla 8. Cumplimiento ambiental en el tren 1

PARAMETRO	A-RR		A- SED		FSSI-T1		FLPs-T1		LMP	Ref.
	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE		
pH (UpH)	7.3	0.6	6.8	2.1	6.8	2.1	7.6	2.1	6 a 9	A
Tem (°C)	21.1	6.4	21.2	6.4	21.0	6.3	21.4	6.5	35.0	A
CE (µs/cm)	474.6	190.6	333.1	108.0	450.8	149.0	449.2	135.7	1000.0	B
SDT (ppm)	232.3	114.8	150.0	139.9	203.1	67.6	203.1	61.4	1000.0	B
Turb (UNT)	178.4	107.8	41.9	20.6	12.3	5.0	10.1	6.6	15	C
Color (UC)	2562.9	1375.7	955.0	449.7	855.2	445.4	593.2	262.2	10	E
OD (mg/L)	3.2	1.4	2.2	0.7	2.3	0.7	2.3	0.7	5.0	B
POR (mV)	-5.5	47.4	1.5	44.9	-77.0	104.9	-63.6	30.1	NA	D
DQO (mg/L)	3308.3	1015.0	255.9	170.0	146.8	55.6	76.4	63.5	150.0	A

NOM-001-SEMARNAT-2021 (A); CECA/1989 (B); NADF-003-AGUA-2002 (C); Gerónimo (2022) POR (+) aerobio, POR (-) anaerobio (D); LFDDAMAN 2024 (E); NOM-127-SSA1- (F).

La tabla 9 muestra los valores promedio alcanzados en los tratamientos siendo el FLPs-T2 el que presenta mejor eficiencia en la remoción de DQO con valores de 81.00 ± 46.16 , Color 270.08 ± 123.77 , Turbiedad 10.7 ± 7.06 , cumpliendo así con la normativa NOM-001-SEMARNAT-2021 y valores establecidos por LFDDAMAN 2024 y NADF-003-AGUA-2023.

Tabla 9. Cumplimiento ambiental en el tren 2

PARAMETRO	A-RR		A- SED		FSSI-T2		FLPs-T2		LMP	Ref.
	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE		
pH (UpH)	7.28	0.55	6.82	2.08	11.04	16.92	7.08	1.92	6 a 9	A
Tem (°C)	22.29	6.71	22.28	6.70	22.34	6.74	22.43	6.76	35.0	A
CE (µs/cm)	474.62	190.55	333.08	108.04	500.00	165.68	473.85	144.66	1000.0	B
SDT (ppm)	232.31	114.83	150.00	139.89	227.69	75.40	213.08	65.88	1000.0	B
Turb (UNT)	178.39	107.78	41.87	20.64	24.44	16.93	10.07	7.06	15.0	C
Color (UC)	2562.92	1375.71	955.00	449.67	497.69	283.35	270.08	123.77	10.0	E
OD (mg/L)	3.20	1.37	2.23	0.68	7.85	11.13	2.24	0.71	5.0	B
POR (mV)	-5.54	47.41	1.46	44.95	-156.77	51.26	-107.85	53.71	NA	D
DQO (mg/L)	3308.31	1014.97	255.92	169.98	140.85	60.72	81.00	46.16	150.0	A

NOM-001-SEMARNAT-2021 (A); CECA/1989 (B); NADF-003-AGUA-2023 (C); Gerónimo (2022) POR (+) aerobio, POR (-) anaerobio (D); LFDDAMAN 2024 (E); NOM-127-SSA1-2021 (F).

La tabla 10 muestra los valores promedio alcanzados en los tratamientos siendo el FLPs-T3 el que presenta mejor eficiencia en la remoción de DQO con valores de 88.38 ± 59.14 , Color 192.31 ± 114.61 , Turbiedad 3.95 ± 1.71 , cumpliendo así con la normativa NOM-001-SEMARNAT-2021 y valores establecidos por LFDDAMAN 2024 y NADF-003-AGUA-2023.

Tabla 10. Cumplimiento ambiental en el tren 3

PARAMETRO	A- RR		A- SED		FSSI-T3		FLPs-T3		LMP	Ref.
	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE		
pH (UpH)	7.28	0.55	6.82	2.08	6.35	1.91	7.18	1.99	6 a 9	A
Tem (°C)	13.28	7.06	9.97	3.75	19.85	8.44	21.50	6.57	35.0	A
CE (µs/cm)	474.62	190.55	333.08	108.04	496.15	160.60	611.54	209.80	1000.0	B
SDT (ppm)	232.31	114.83	150.00	139.89	201.54	92.54	274.62	94.31	500.0	B
Turb (UNT)	178.39	107.78	41.87	20.64	14.29	6.62	3.95	1.71	15.0	C
Color (UC)	2562.92	1375.71	955.00	449.67	402.31	184.46	192.31	114.61	10.0	E
OD (mg/L)	3.20	1.37	2.23	0.68	8.86	13.18	12.84	20.44	5.0	B
POR (mV)	-5.54	47.41	1.46	44.95	-152.15	72.02	-75.85	36.91	NA	D
DQO (mg/L)	3308.31	1014.97	255.92	169.98	117.92	47.86	88.38	59.14	150.0	A

NOM-001-SEMARNAT-2021 (A); CECA/1989 (B); NADF-003-AGUA-2023 (C); Gerónimo (2022) POR (+) aerobio, POR (-) anaerobio (D); LFDDAMAN 2024 (E); NOM-127-SSA1-2021 (F).

8.5 Eficiencias de remoción de los tratamientos

La tabla 11 presenta la eficiencia total de los parámetros medido durante el proceso el cual costa de 97.7 % para DQO presentando una mayor eficiencia en el FSSI-T1 (70.2 %) En comparación con el FLPs-T1 (42.7) En color y turbiedad se tiene una eficiencia total del proceso de 76.9% y 94.4% teniendo mejor eficiencia nuevamente FSSI-T1 (37.9%, 76.0%) que el FLPs-T1 (10.5%, 70.6%). Para el caso del OD se tiene una ganancia del 28.1% en el FSSI-T1. Esto se debe al exceso de Nitrógeno y Fósforo los cuales son nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, pero en exceso puede causar la eutrofización, donde la alta cantidad de nutrientes hace que haya un crecimiento excesivo de algas provocando la disminución de oxígeno en el agua.

Tabla 11. Eficiencia de remoción del tren 1

Parámetros	Eficiencias de remoción			
	A-SED (%)	FLPs-T1 (%)	FSSI-T1 (%)	ETP (%)
pH (UpH)	6.3	-0.3	-11.7	-4.7
Tem (°C)	-0.3	0.8	-1.3	-1.6
CE (µs/cm)	29.8	-35.3	-34.9	5.3
SDT (ppm)	35.4	-35.4	-35.4	12.6
Turb (UNT)	76.5	70.6	76.0	94.4
Color (UC)	62.7	10.5	37.9	76.9
OD (mg/L)	30.3	-4.8	-3.1	28.1
ORP (mV)	126.4	5368.4	4452.6	-1048.6
DQO (mg/L)	92.3	42.7	70.2	97.7

Esed: Efluente Sedimentador; FSC-T1: Flujo Subsuperficial Control Tren 1; FLC-T1: Flujo Libre Control Tren 1; ETP: Evaluación Total de Proceso.

La tabla 12 presenta los parámetros medidos en el tren 2, podemos observar la eficiencia total del proceso el cual costa de 97.6% para DQO, siendo el FSSI-T2 con mayor eficiencia (68.35%) en comparación con el FLPs-T2 (44.97%). En color y turbiedad se tiene una eficiencia total de proceso de 89.5% y 94.4%, teniendo mejor eficiencia en el FSSI-T2 (71.72%, 75.95%). Para el caso del OD se tiene una ganancia de 30.0% esto se debe principalmente por la Proliferación de algas que se desarrolla en el FSSI-T2.

Tabla 12. Eficiencia de remoción del tren 2

Parámetros	Eficiencias de remoción			
	A- SED	FLPs-T2 (%)	FSSI-T2(%)	ETP (%)
pH (UpH)	6.32	-61.78	-3.72	2.8
Tem (°C)	0.07	-0.28	-0.69	-0.6
CE (µs/cm)	29.82	-50.12	-42.26	0.2
SDT (ppm)	35.43	-51.79	-42.05	8.3
Turb (UNT)	76.53	41.63	75.95	94.4
Color (UC)	62.74	47.89	71.72	89.5
OD (mg/L)	30.29	-252.07	-0.34	30.0
ORP (mV)	126.39	10826.32	7478.95	-1847.2
DQO (mg/L)	92.26	44.97	68.35	97.6

Esed: Efluente Sedimentador; FSC-T1: Flujo Subsuperficial Control Tren 1; FLC-T1: Flujo Libre Control Tren 1; ETP: Evaluación Total de Proceso.

Dentro de los parámetros medidos en el tren 3 (Tabla 13), se puede observar que la eficiencia total del proceso fue de 97.3% para DQO, siendo FSPs-T3 con mayor eficiencia (93.9%) en comparación con el FSSI-T3 (65.46). En color y Turbiedad se tiene una eficiencia total de proceso de 92.5% y 97.8%, teniendo mejor eficiencia en el FSSI-T3 (79.86%, 90.56%). Para el OD se tiene una ganancia significativa de -301.2%, y en la eficiencia total del proceso se obtiene una eficiencia de 16.5% esto se

debe por la cantidad de algas que proliferan en el humedal.

Tabla 13. Eficiencia de remoción del tren 3

Parámetros	Eficiencias de remoción			
	A- sed	FLPs-T3	FSSI-T3	ETP (%)
pH (UpH)	6.32	6.88	-5.19	1.5
Tem (°C)	24.96	-99.07	-115.66	-61.8
CE (µs/cm)	29.82	-48.96	-83.60	-28.8
SDT (ppm)	35.43	-34.36	-83.08	-18.2
Turb (UNT)	76.53	65.86	90.56	97.8
Color (UC)	62.74	57.87	79.86	92.5
OD (mg/L)	11.31	-83.45	5.86	16.5
ORP (mV)	126.39	10510.53	5289.47	-1269.4
DQO (mg/L)	92.26	53.92	65.46	97.3

Esed: Efluente Sedimentador; FSC-T1: Flujo Subsuperficial Control Tren 1; FLC-T1: Flujo Libre Control Tren 1; ETP: Evaluación Total de Proceso.

9. DISCUSIONES

9.1 Desarrollo y comportamiento de las especies

Al principio de la fase de arranque se sembraron 4 individuos de cada especie, *S. lancifolia* colocada en los humedales HAFL-T2 y HAFS-T3 se pudo observar una diferencia significativa en cuanto a su crecimiento el cual influyeron algunos factores como el espacio ya que al encontrarse en un espacio limitado la especie no alcanzo a aumentar su producción y por ende la cantidad de nutrientes para el número de especie no abasteció, sin embargo podemos observar que esta especie en su estado natural tiende a alcanzar una longitud de 145.7 cm, aproximadamente según Gallegos (2017). Para el caso de *P. sagittata* estas fueron sembradas en el HAFS-T2 y HAFL-T3 por lo que presentó una altura de 16.8 cm y 28.3 cm por lo que podemos observar las mismas diferencias en su crecimiento. Romellón (2022) reportó que la especie *P. sagittata* alcanza alturas entre 1.29 m a 1.37 m.

En la parte final del tratamiento se trabajó con dos productos químicos comúnmente usados en la industria platanera. El Mancozeb es un fungicida de amplio espectro que se usa para prevenir y controlar enfermedades fúngicas y el paraquat un herbicida químico que se utiliza para controlar la maleza. Por lo que las altas concentraciones de este producto durante el tratamiento presentaron consecuencias negativas en los primeros humedales HAFL-T2 y HAFS-T3 donde había especies *S. lancifolia* y *P. sagittata* las cuales no lograron sobrevivir ya que aún contaban con una alta concentración de los contaminantes.

9.2 Calidad del agua del efluente

Potencial de hidrógeno (UpH) y Temperatura (°C)

El valor de pH en los tratamientos tiene valores promedio de 7.3 UpH, por lo que cumple con el LMP establecido por la NOM-001-SEMARNAT-2021 que establece de 6 a 9 UpH. Utilizando especies *Potenderia sagittata* y *Sagitaria lancifolia* obtuvo rango de 7.7 y 8.5 UpH. García (2019).

Referente a la temperatura se presentaron valores por debajo del LMP establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021, la cual es de 35.0°C. Dentro de los valores presentados en el tratamiento, se encuentran rangos de 23.3- 24.8°C. Estos valores son similares a lo presentado por Pech, (2013) que implemento (HAFL) y (HAFS), con especies *Typha dominguensis* y *Thalia geniculata*, el cual alcanzo valores promedio de 28.7 a 30.7 lo que conlleva a favorecer el crecimiento de microorganismos mesófilos los cuales se encargan de la degradación de la materia orgánica (Kadlec y Wallace, 2009).

Conductividad eléctrica (µs/cm) y Sólidos disueltos totales (ppm)

La CE muestras una serie de impurezas puesto que cuando se presenta una conductividad elevada indica una concentración de sales disueltas de tal manera que afectan la calidad del agua y así mismo la fauna acuática Solís (2018). Los tratamientos FSSI-T1 con 449.2±135.7 µs/cm, FLPs-T2(473.85±144.66 µs/cm). FSSI T3(611.54±209.80 µs/cm). Esto son los valores más bajos reportados, lo que permite cumplir con las referencias de CE-CCA-001/89, la cual establece valores de 1000 µs/cm para su uso en riego agrícola. Javier (2020), en la fase de estabilización utilizando la especie *Cyperus odoratus* presentó valores de 1575.0 µS/cm y 1670.0 µS/cm, en humedal de flujo subsuperficial.

En cuanto a los SDT, los tratamientos de mejor remoción son FSSI-T1 con 203.1 ppm, FLPsT2 227.69 ppm y FSSI-T3 con 274.62 ppm Cumpliendo con las especificaciones de la NOM-127-SSA1-2021, la cual establece valores de 1000 ppm, aunque está es una norma establecida en concentraciones para el uso y consumo humano, puede tomarse de referencia para aguas tratadas en el caso de SDT.

Cabe mencionar que cuanto mayor sea la concentración de los SDT mayor será la conductividad. Por lo que se debe principalmente por las concentraciones acuosas de sólidos disueltos (Rodríguez 2023).

Turbiedad (UTN) y Color (UC)

Para turbiedad en los efluentes alcanzaron valores de 3.95 a 10.07 UNT, lo que permitió tener eficiencia de remoción de 41.63% a 90.56% (Julca, 2019). Reporta que la turbiedad es materia en suspensión y coloidal, finamente dividida, plancton y otros organismos microscópicos; son cofactores de incremento de este parámetro fisicoquímico que se asocia con una menor eliminación de patógenos.

Para el caso de color se presentaron concentraciones de 192.31 UC a 593.2 UC, permitiendo tener una eficiencia de remoción de 37.9% a 79.86%. El color y la turbiedad están relacionados con la presencia de sólidos en suspensión en el agua residual en los HA García y Corzo (2008).

Oxígeno disuelto (mg/L) y Potencial oxido reducción (mV)

Los niveles de oxígeno disuelto tienden a ser más crítico en las épocas estivales (Metcalf & Eddy, 1996). En el caso de los humedales artificiales la evaluación de la fase de arranque se hizo en junio, presentando una disminución de oxígeno disuelto en cada uno de los tratamientos.

Se ha demostrado en varios estudios que la presencia de plantas en los humedales artificiales influye en la concentración de oxígeno disuelto, debido a la liberación de oxígeno a través de las raíces hacia la rizósfera (Veloz 2024), en esta investigación se reportan incrementos de OD de un 4 mg/L en el humedal plantado con *Heliconia latispatha*, siendo favorable para la presencia de organismos aerobios y cumple con los lineamientos establecidos por la CE-CCA-001/89, con valores de 5 mg/L.

En los tratamientos evaluados, claramente se puede identificar que los tratamientos A-RR, FLPs-T1, FSSI-T1, FLPs-T2, FSSI-T2, FLPs-T3 y FSSI-T3 presentan valores negativos, por lo tanto cuentan con condiciones anaerobias, siendo El A- SED el único con valores positivos, esto se debe a que microorganismos son los encargados de alterar las condiciones del potencial de óxido reducción al ser los

principales responsables de llevar a cabo las reacciones de óxido-reducción convirtiendo los contaminantes asimilables para las plantas (CONAGUA, 2015).

Demanda química de oxígeno (mg/L)

Según la NOM-001-SEMARNAT-2021 el límite máximo permisible es de 150 mg/L para infiltración y uso público. Los valores de la demanda química de oxígeno encontrados en esta investigación muestran resultados de DQO de 76.4 mg/L (60.2 % ER DQO), 81.00 mg/L (68.35 % ER DQO) y 88.38 mg/L (65.46 ER DQO), en los humedales FSSI-T1, FSSI-T2 y FSSI-T3 respectivamente, dichos valores se comportan de manera similar a lo reportado por (Cedeño 2020). Tratando de aguas residuales de industria atunera se ha verificado que en humedales artificiales aireados utilizando *Chrysopogon zizanioides*, *Saccharomyces cerevisiae* y *Trichoderma harzianum* se logran remociones de DQO de hasta 64.56% (164.36 mg·L⁻¹).

10. CONCLUSIÓN

En la literatura citada, todos los estudios sobre el tratamiento de efluentes agrícolas son a escala experimental, el aporte de este proyecto consiste en aplicar un tratamiento eficiente, que opere con sistemas discontinuos y presente una operación mínima, garantizando que el tratamiento pueda generar efluentes que no sean agresivos hacia el ambiente.

La tecnología de humedales artificiales con las configuraciones Libre-Subsuperficial y Subsuperficial-Libre utilizando especies macrófitas, *Pontederia sagittata* y *Sagittaria lancifolia* tienden a ser viables en la fitodepuración de aguas residuales de origen agrícola ya que en gran parte disminuyo la DQO del tratamiento y lograron una buena adaptación y estabilización

Sin embargo, es importante mencionar que en los primeros humedales FSSI-T2 y FLPs-T3 al recibir una alta carga de químicos, no soportaron concentraciones mayores a 3900 mg/L que venían del SBR-sedimentadores. A diferencia de los humedales FSSI-T1 y FLPs-T2 que se ubicaron en la segunda sección en serie, y recibieron concentraciones menores a 200 mg/L.

11. LITERATURA CITADA

Amabilis-Sosa, L. E., Siebe, C., Moeller-Chávez, G., & Durán-Domínguez-de-Bazúa, M. D. C. (2016). Remoción de mercurio por *Phragmites australis* empleada como barrera biológica en humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes a metales pesados. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(1), pp. 47-53.

Arteaga-Cortez, V. M., Quevedo-Nolasco, A., Valle-Paniagua, D. H. D., Castro-Popoca, M., Bravo-Vinaja, Á., & Ramírez-Zierold, J. A. (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(5), pp. 319-343.

Balcázar, C. A. T., Ocaña, G. L., Cerino, M. J. R., González, M. B. V., & Sánchez, L. E. C. (2020). Biomasa de origen vacuno en la remoción de contaminantes básicos en un reactor discontinuo secuencial. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 9(18), 1-32.

Carreño Rodríguez, D. I. (2023). Propuesta de remediación de aguas del lago Sochagota según parámetros de salinidad.

Carrera-Muyo, J. & Suárez-Ojeda, M. E. (2019). Aguas residuales industriales en Iberoamérica. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

Cedeño, D., Loureiro, J., Delgado. M., Delgado, C., & Fajardo, P. (2020, julio 04). Evaluación de un humedal artificial aireado en efluente de una planta de tratamiento de aguas residuales de la industria atunera, manabí, Ecuador. *Mikarimin.*, 6, p. 1.

CONAGUA (2015) Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales artificiales. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. México. 134p. Libro 30. Consultado el 15 de mayo de 2025 de: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas>

Crites, R. y Tchobanoglous, G. (2000). Tratamiento de aguas residuales en

pequeñas poblaciones. Santafé de Bogotá, Colombia. McGraw-Hill.

Díaz González, Y. K., & Garnica Barragán, K. D. (2023). Análisis sistemático de literatura sobre el aprovechamiento de los procesos naturales y bioquímicos en algas o plantas en la recuperación de aguas residuales y generación de energía eléctrica.

https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_ylo=2021&q=Vera%2C+I.+G.+C.+%282021%29.+Dise%C3%B1o+e+implementaci%C3%B3n+de+un+sistema+de+tratamiento+de+Aguas+residuales.

Díaz Rodríguez, Yuletsis, Mendiola Lau, Leonardo, González Suárez, Aimeé, Navarro Sosa, Yamila, Acosta Díaz, Silvia, & Chao Reyes, Claudia. (2022). Biofiltración de efluentes líquidos de la industria petrolera con materiales naturales. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 43(1), 12-24

Estrada-Pérez, N., Comparán-Sánchez, L.E., García-Ramírez, F.Y y López-Ocaña, G. (24-26 de junio de 2020). Propuesta de tratamiento de aguas residuales para un Parque Industrial en Tabasco [Sesión de conferencia]. Congreso Internacional de Investigación Academia Journals, Chiapas, México.

Ferrer-Polo, J., Seco-Torrecillas, A., Robles-Martínez, Á., Asensi-Dasí, E. J., & Serralta-Sevilla, J. (2022). Tratamientos biológicos de aguas residuales. Editorial Universitat Politècnica de València.

Filipigh, Á. A. (2021). Valoración de un consorcio de microalgas y bacterias: comparación de métodos convencionales y nuevos métodos de extracción asistida.

García Ocaña, J. A., López Ocaña, G., & Torres Balcázar, C. A. (2019). Evaluación de medios de soporte en humedales artificiales con vegetación *Sagittaria latifolia* en la remoción de contaminantes básicos / Evaluation of media of support of artificial wetlands with vegetation *Sagittaria latifolia* in the removal of basics pollutants. *CIBA Revista Iberoamericana De Las Ciencias Biológicas Y Agropecuarias*, 8(15), 16 - 51. <https://doi.org/10.23913/ciba.v8i15.82>

García, J. y Corzo, A. (2008). Depuración con humedales construidos: guía práctica de diseño. Construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo

subsuperficial. Barcelona: Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/2474> .

García-Valero, A., Martínez-Martínez, S., Acosta, J. A., Terrero, A., & Faz, A. (2019). Fitorremediación de aguas residuales industriales mediante humedales artificiales para uso agrícola (No. COMPON-2019-agri-3439).

García-Valero, A., Martínez-Martínez, S., Acosta, J. A., Terrero, A., & Faz, A. (2019). Fitorremediación de aguas residuales industriales mediante humedales artificiales para uso agrícola (No. COMPON-2019-agri-3439).

Geissen, V., Mol, H., Klumpp, E., Umlauf, G., Nadal, M., Van der Ploeg, M., Van de Zee, S. & Ritsema, C. J. (2015). Emerging pollutants in the environment: a challenge for water resource management. *International soil and water conservation research*, 3(1), pp. 57-65.

Gerónimo-López M. A. (2022). *Asclepias curassavica* L. y especies de césped en el tratamiento de aguas residuales domésticas vía humedales artificiales de flujo subsuperficial. Tesis de Licenciatura. Universidad Juárez Autónoma De Tabasco. División Académica De Ciencias Biológicas.

Iñiguez Iñiguez, C. R., & Rivadeneira Rodríguez, P. E. (2021). Diseño de una planta piloto de filtros naturales para aguas residuales domésticas (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay). <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/11545/1/17077.pdf>

Javier-Rodríguez, L. M. (2020). *Cyperus odoratus* en el tratamiento de agua residual doméstica en un humedal de flujo subsuperficial (Tesis de licenciatura. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas).

Julca R.T.L.B (2019). Remoción de la turbiedad del agua del canal Miraflores, con almidón de yuca y sulfato de aluminio, jaén, Cajamarca. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Jaén].

http://m.repositorio.unj.edu.pe/bitstream/handle/UNJ/183/Julca_RLT.pdf?seq

uence=1&isAllowed=y

Kadlec, R. H., y Wallace, S. (2009). Treatment wetlands. Second edition. Boca Raton: CRC Press Taylo & Francis Group. Pp 348.

Ley Federal de Derechos Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes para el ejercicio fiscal (LFDDAMAN) 2024.

Linares, A., Pire-Sierra, M. G., Lameda-Cuicas, E., Molina-Quintero, L., & Pire-Sierra, M. C. (2017). Tratamiento biológico de aguas residuales generadas en una embotelladora de bebidas no alcohólicas. *Agroindustria, Sociedad y Ambiente*, 1(8), 89-107.

López Ramírez, M. Á., Castellanos Onorio, O. P., Lango Reynoso, F., Castañeda Chávez, M.

D. R., Montoya Mendoza, J., Sosa Villalobos, C. A., & Ortiz Muñiz, B. (2021). Oxidación avanzada como tratamiento alternativo para las aguas residuales. Una revisión. *Enfoque UTE*, 12(4), 76-87.

Magaña-Flores, A., López-Ocaña, G., & Romellón-Cerino, M. J. (2022). Kinetic behavior and modeling the space distribution of basic pollutants in a subsurface flow constructed wetlands with *Pontederia cordata*. *Renewable energy, biomass & sustainability*, 4(1), 1-13.

MELLID, R. S. M. (2021). Evaluación del desempeño de un reactor biológico secuencial con ciclos aerobico-anoxico para el tratamiento de agua residual industrial (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Asunción).

Metcalf, & Eddy. (1996). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización (Tercera Ed). McGrawHill.

NOM-001-SEMARNAT-2021. (2022). Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Orduña-Gaytán, F., Alvarado-Lassman, A., Vallejo-Cantú, N., Alvarado-Vallejo,

A., & Sandoval Herazo, L. C. (2021). Tratamiento híbrido (Biorreactor Anaerobio-Humedal Construido) para el manejo sustentable de aguas residuales de la industria azucarera. *Rinderesu*, 5(2).

Pech, O. M. S., & Ocaña, G. L. (2013). Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales. *Kuxulkab'*, 19(36).

Quintero Pulgar, L. F., MolanoGuarín, A. F., & Pramparo, L. M. (2021). Diseño hidráulico y evaluación a escala laboratorio de un sistema RBC (Rotating Biological Contactor) para tanque primario de aguas residuales no domésticas provenientes de una industria de bebidas no alcohólicas. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 29(2),324-333.https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-33052021000200324&script=sci_arttext

Rodríguez-Guerra, A., & Martínez, F. S. (2020). Responsabilidad social y gestión ambiental del agua, solución en la industria de lácteos de Ecuador. *Revista Alfa*, 4(12), 211-230. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v4i12.85>

Rosario Mendoza, Erick Josué, Rodríguez Guerrero, Víctor Vicente, Cellan Palacios, Jessica Jasmín, & Estrella Gómez, Federico Miguel. (2022). Educational prevention actions to avoid pollution. *Conrado*, 18(88), 158-165. Epub 30 de octubre de 2022. Recuperado en 11 de junio de 2025, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1990-86442022000500158&lng=es&tlng=en.

Silva, A., Monge, S. B., Bengoa, C., Torres-Pinto, A., & Ribeiro, R. S. (2018). Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales

Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L. A., & Mora-Alvarado, D. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(1), 35-46.

Uispe Pérez, r. V. (2021). Tratamiento de efluente de curtiembre utilizando

typha agustifolia y escoria volcánica en humedal artificial [universidad nacional tecnológica de lima sur facultad de ingeniería y gestión escuela profesional de ingeniería ambiental].
http://repositorio.untels.edu.pe/jspui/bitstream/123456789/192/1/Quispe_Rosario_Tra bajo_Suficiencia_2017.pdf

Vásquez Alvarado, T. (2022). Diseño de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical para el tratamiento de aguas residuales porcinas en la finca Linda Vista en Santa Cruz de Turrialba. [Universidad de Costa Rica facultad de ingeniería escuela de ingeniería de biosistemas].
<https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2023/03/TFG-TatianaVasquezAlvarado.pdf>

Veloz Romero, D. P. (2024). Análisis del rendimiento de los procesos de eliminación del nitrato en los humedales artificiales en la Albufera de Valencia, España.

Verdaguer Dominguez, (2024). Diseño de una estación depuradora SBR, sistema de tratamiento biológico secuencial para la industria de productos cárnicos. Universidad miguel Hernández de elche, Escuela politécnica superior de elche, grado en ingeniería mecánica.

Núñez, J. 2017. Los Derechos Humanos y el Nuevo Orden Económico Mundial. Revista AFESE, 12(12).

Admin, & Admin. (2020, 6 agosto). Aguas residuales inciden en males crónico-degenerativos. Gaceta UNAM. <https://www.gaceta.unam.mx/aguas-residuales-inciden-en-males-cronico-%20disolventes%20industriales%20y%20plaguicidas>.

Alarcón, M. E. H. (2016, 6 octubre). Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México. Hernández Alarcón | RINDERESU.
<http://www.rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/16/32>

12. ANEXO FOTOGRÁFICO



Figura 11 Preparación del lodo bacteriano



Figura 12. Captura de los análisis estadísticos.



Figura 13. Colecta de vegetación *Sagittaria lancifolia*



Figura 14. Sistema experimental SBR-Humedales en serie.



Figura 15. Evaluación de DQO.



Figura 17. Análisis de parámetros fisicoquímicos del agua residual



Figura 18. Preparación del agua residual reconstituida



Figura 19. Integrantes de laboratorio de tecnología del agua.

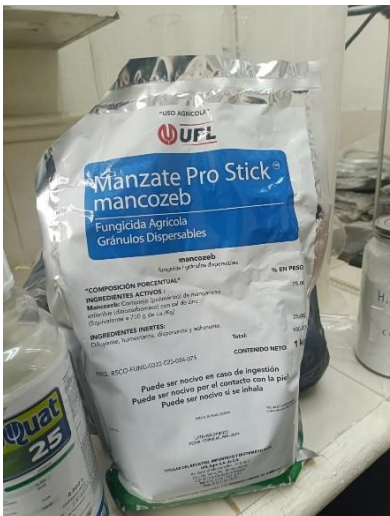


Figura 21. Fungicida en polvo MANCOZEB

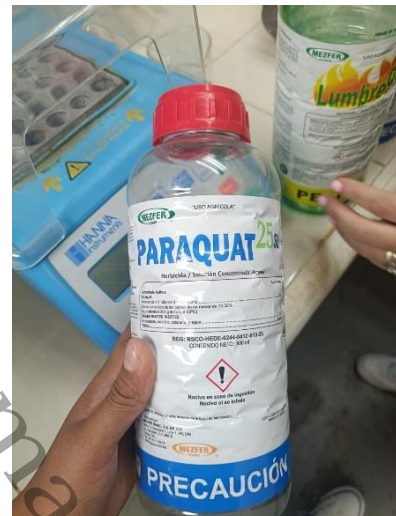


Figura 20. Herbicida líquido PARAQUAT

13. ALOJAMIENTO DE TESIS

Título de la tesis:	Tratamiento de aguas residuales agroindustriales en un sistema experimental de sbr- con humedales artificiales
Autor:	Anayeli valencia Álvarez
ORCID:	https://orcid.org/0009-0003-4353-2154
Resumen:	<p>Los reactores biológicos secuenciales (SBR) son tecnologías para el tratamiento de aguas residuales industriales, su funcionamiento discontinuo basado en ciclos que se repiten a lo largo del tiempo, les proporciona una gran flexibilidad para adaptarse a diferentes modalidades de tratamiento y, en concreto, para la eliminación de nutrientes. Así, el objetivo general de la investigación fue evaluar el desempeño del reactor SBR en combinación con los humedales artificiales (HA) en serie para el tratamiento de agua residual industrial. El estudio consistió en utilizar el sistema SBR a escala experimental para tratar agua residual reconstituida (ARR) con características similares a un efluente de una industria agrícola.</p> <p>Se evaluó la eficiencia de remoción de los parámetros de control utilizando las macrófitas <i>Sagittaria lancifolia</i> y <i>Potenderia sagittata</i>, en humedales de flujo libre y subsuperficial en Villahermosa, Tabasco, México. Las unidades experimentales se integran por un SBR (40 cm de ancho y 50 cm de altura), dos sedimentadores (40 cm de ancho y 30 cm de largo) y seis humedales artificiales en tres trenes con dos humedales (30 cm ancho y 120 cm de largo). De los humedales, 3 son de flujo subsuperficial y 3 de flujo libre, 4 con especies y 2 sin especies de control. Se comparó la morfología de las especies evaluadas y la calidad del agua tratada (pH, temperatura, SDT, CE, color, turbiedad, OD, POR y DQO). Las eficiencias de remoción alcanzadas fueron del 97.7%, 97.6, 97.3, de DQO 76.9%, 89.5%, 92.5% para color y 94.4%, 94.4%, 97.8% para turbiedad en los tres trenes de tratamiento. Sucesivamente se puede destacar que la <i>Potenderia sagittata</i> es la especie con mayor adaptación y tolerancia al tratamiento.</p>
Palabras Clave:	Cumplimiento ambiental, DQO, Eficiencia de remoción, Humedales Artificiales, SBR
Referencias:	<p>Amabilis-Sosa, L. E., Siebe, C., Moeller-Chávez, G., & Durán-Domínguez-de-Bazúa, M. D. C. (2016). Remoción de mercurio por <i>Phragmites australis</i> empleada como barrera biológica en humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes a metales pesados. <i>Revista internacional de contaminación ambiental</i>, 32(1), pp. 47-53.</p> <p>Arteaga-Cortez, V. M., Quevedo-Nolasco, A., Valle-Paniagua, D. H. D., Castro-Popoca, M., Bravo-Vinaja, Á., & Ramírez-Zierold, J. A. (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. <i>Tecnología y ciencias del agua</i>, 10(5), pp. 319-343.</p> <p>Balcázar, C. A. T., Ocaña, G. L., Cerino, M. J. R., González, M. B. V., & Sánchez, L. E. C. (2020). Biomasa de origen vacuno en la remoción de contaminantes básicos en un reactor discontinuo secuencial. <i>CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias</i>, 9(18), 1-32.</p> <p>Carreño Rodríguez, D. I. (2023). Propuesta de remediación de aguas del lago Sochagota según parámetros de salinidad.</p> <p>Carrera-Muyo, J. & Suárez-Ojeda, M. E. (2019). Aguas residuales industriales en Iberoamérica. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).</p> <p>Cedeño, D., Loureiro, J., Delgado, M., Delgado, C., & Fajardo, P. (2020, julio 04). Evaluación de un humedal artificial aireado en efluente de una planta de tratamiento de aguas residuales de la industria atunera, manta, manabí, Ecuador. <i>Mikarimín</i>, 6, p. 1.</p> <p>CONAGUA (2015) Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales artificiales. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. México. 134p. Libro 30. Consultado el 15 de mayo de 2025 de: https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas</p>

Crites, R. y Tchobanoglous, G. (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Santafé de Bogotá, Colombia. McGraw-Hill.

Díaz González, Y. K., & Garnica Barragán, K. D. (2023). Análisis sistemático de literatura sobre el aprovechamiento de los procesos naturales y bioquímicos en algas o plantas en la recuperación de aguas residuales y generación de energía eléctrica. https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_ylo=2021&q=Vera%2C+I.+G.+C.+%282021%29.+Dise%C3%B1o+e+implementaci%C3%B3n+de+un+sistema+de+tratamiento+de+Aguas+residuales.

Díaz Rodríguez, Yuletsis, Mendiola Lau, Leonardo, González Suárez, Aimeé, Navarro Sosa, Yamila, Acosta Díaz, Silvia, & Chao Reyes, Claudia. (2022). Biofiltración de efluentes líquidos de la industria petrolera con materiales naturales. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 43(1), 12-24

Estrada-Pérez, N., Comparán-Sánchez, L.E., García-Ramírez, F.Y y López-Ocaña, G. (24-26 de junio de 2020). Propuesta de tratamiento de aguas residuales para un Parque Industrial en Tabasco [Sesión de conferencia]. Congreso Internacional de Investigación Academia Journals, Chiapas, México.

Ferrer-Polo, J., Seco-Torrecillas, A., Robles-Martínez, Á., Asensi-Dasí, E. J., & Serralta- Sevilla, J. (2022). Tratamientos biológicos de aguas residuales. Editorial Universitat Politècnica de València.

Filipigh, Á. A. (2021). Valoración de un consorcio de microalgas y bacterias: comparación de métodos convencionales y nuevos métodos de extracción asistida.

García Ocaña, J. A., López Ocaña, G., & Torres Balcázar, C. A. (2019). Evaluación de medios de soporte en humedales artificiales con vegetación *Sagittaria latifolia* en la remoción de contaminantes básicos / Evaluation of media of support of artificial wetlands with vegetation *Sagittaria latifolia* in the removal of basics pollutants. *CIBA Revista Iberoamericana De Las Ciencias Biológicas Y Agropecuarias*, 8(15), 16 - 51. <https://doi.org/10.23913/ciba.v8i15.82>

García, J. y Corzo, A. (2008). Depuración con humedales construidos: guía práctica de diseño. Construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Barcelona: Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/2474>.

García-Valero, A., Martínez-Martínez, S., Acosta, J. A., Terrero, A., & Faz, A. (2019). Fitorremediación de aguas residuales industriales mediante humedales artificiales para uso agrícola (No. COMPON-2019-agri-3439).

García-Valero, A., Martínez-Martínez, S., Acosta, J. A., Terrero, A., & Faz, A. (2019). Fitorremediación de aguas residuales industriales mediante humedales artificiales para uso agrícola (No. COMPON-2019-agri-3439).

Geissen, V., Mol, H., Klumpp, E., Umlauf, G., Nadal, M., Van der Ploeg, M., Van de Zee, S. & Ritsema, C. J. (2015). Emerging pollutants in the environment: a challenge for water resource management. *International soil and water conservation research*, 3(1), pp. 57-65.

Gerónimo-López M. A. (2022). *Asclepias curassavica* L. y especies de césped en el tratamiento de aguas residuales domésticas vía humedales artificiales de flujo subsuperficial. Tesis de Licenciatura. Universidad Juárez Autónoma De Tabasco. División Académica De Ciencias Biológicas.

Iñiguez Iñiguez, C. R., & Rivadeneira Rodríguez, P. E. (2021). Diseño de una planta piloto de filtros naturales para aguas residuales domésticas (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay). <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/11545/1/17077.pdf>

Javier-Rodríguez, L. M. (2020). *Cyperus odoratus* en el tratamiento de agua residual doméstica en un humedal de flujo subsuperficial (Tesis de licenciatura. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas).

Julca R.T.L.B (2019). Remoción de la turbiedad del agua del canal Miraflores, con almidón de yuca y sulfato de aluminio, jaén, Cajamarca. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Jaén]. http://m.repositorio.unj.edu.pe/bitstream/handle/UNJ/183/Julca_RLT.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Kadlec, R. H., y Wallace, S. (2009). Treatment wetlands. Second edition. Boca Raton: CRC Press Taylo & Francis Group. Pp 348.

Ley Federal de Derechos Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes para el ejercicio fiscal (LFDDAMAN) 2024.

Linares, A., Pire-Sierra, M. G., Lameda-Cuicas, E., Molina-Quintero, L., & Pire-Sierra, M. C. (2017). Tratamiento biológico de aguas residuales generadas en una embotelladora de bebidas no alcohólicas. *Agroindustria, Sociedad y Ambiente*, 1(8), 89-107.

López Ramírez, M. Á., Castellanos Onorio, O. P., Lango Reynoso, F., Castañeda Chávez, M. D. R., Montoya Mendoza, J., Sosa Villalobos, C. A., & Ortiz Muñiz, B. (2021). Oxidación avanzada como tratamiento alternativo para las aguas residuales. Una revisión. *Enfoque UTE*, 12(4), 76-87.

Magaña-Flores, A., López-Ocaña, G., & Romellón-Cerino, M. J. (2022). Kinetic behavior and modeling the space distribution of basic pollutants in a subsurface flow constructed wetlands with *Pontederia cordata*. *Renewable energy, biomass & sustainability*, 4(1), 1-13.

MELLID, R. S. M. (2021). Evaluación del desempeño de un reactor biológico secuencial con ciclos aerobico-anoxico para el tratamiento de agua residual industrial (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Asunción).

Metcalf, & Eddy. (1996). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización (Tercera Ed). McGrawHill.

NOM-001-SEMARNAT-2021. (2022). Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Orduña-Gaytán, F., Alvarado-Lassman, A., Vallejo-Cantú, N., Alvarado-Vallejo, A., & Sandoval Herazo, L. C. (2021). Tratamiento híbrido (Biorreactor Anaerobio-Humedal Construido) para el manejo sustentable de aguas residuales de la industria azucarera. *Rinderesu*, 5(2).

Pech, O. M. S., & Ocaña, G. L. (2013). Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales. *Kuxulkab*, 19(36).

Quintero Pulgar, L. F., Molano Guarín, A. F., & Pramparo, L. M. (2021). Diseño hidráulico y evaluación a escala laboratorio de un sistema RBC (Rotating Biological Contactor) para tanque primario de aguas residuales no domésticas provenientes de una industria de bebidas no alcohólicas. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 29(2), 324-333. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-33052021000200324&script=sci_arttext

Rodríguez-Guerra, A., & Martínez, F. S. (2020). Responsabilidad social y gestión ambiental del agua, solución en la industria de lácteos de Ecuador. *Revista Alfa*, 4(12), 211-230. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v4i12.85>

Rosario Mendoza, Erick Josué, Rodríguez Guerrero, Víctor Vicente, Cellan Palacios, Jessica Jasmín, & Estrella Gómez, Federico Miguel. (2022). Educational prevention actions to avoid pollution. *Conrado*, 18(88), 158-165. Epub 30 de octubre de 2022. Recuperado en 11 de junio de 2025, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1990-86442022000500158&lng=es&tlng=en.

Silva, A., Monge, S. B., Bengoa, C., Torres-Pinto, A., & Ribeiro, R. S. (2018). Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales

Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L. A., & Mora-Alvarado, D. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(1), 35-46.

Uispe Pérez, r. V. (2021). Tratamiento de efluente de curtiembre utilizando typha agustifolia y escoria volcánica en humedal artificial [universidad nacional tecnológica de lima sur facultad de ingeniería y gestión escuela profesional de ingeniería ambiental]. http://repositorio.untels.edu.pe/jspui/bitstream/123456789/192/1/Quispe_Rosario_Trab

	<p>ajo_Suficiencia_2017.pdf</p> <p>Vásquez Alvarado, T. (2022). Diseño de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical para el tratamiento de aguas residuales porcinas en la finca Linda Vista en Santa Cruz de Turrialba. [Universidad de Costa Rica facultad de ingeniería escuela de ingeniería de biosistemas]. https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2023/03/TFG-TatianaVasquezAlvarado.pdf</p> <p>Veloz Romero, D. P. (2024). Análisis del rendimiento de los procesos de eliminación del nitrato en los humedales artificiales en la Albufera de Valencia, España.</p> <p>Verdaguer Dominguez, (2024). Diseño de una estación depuradora SBR, sistema de tratamiento biológico secuencial para la industria de productos cárnicos. Universidad Miguel Hernández de elche, Escuela politécnica superior de elche, grado en ingeniería mecánica.</p> <p>Núñez, J. 2017. Los Derechos Humanos y el Nuevo Orden Económico Mundial. Revista AFESE, 12(12).</p> <p>Admin, & Admin. (2020, 6 agosto). Aguas residuales inciden en males crónico-degenerativos. Gaceta UNAM. https://www.gaceta.unam.mx/aguas-residuales-inciden-en-males-cronico-%20disolventes%20industriales%20y%20plaguicidas.</p> <p>Alarcón, M. E. H. (2016, 6 octubre). Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México. Hernández Alarcón RINDERESU. http://www.rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/16/32</p>
--	---