



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

**REMOCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA Y METALES EN UN SISTEMA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES.**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA, TECNOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL.**

**PRESENTA:
ING. AMB. ERIKA CITLALLY ALONSO MENDOZA.**

**BAJO LA DIRECCIÓN DE:
DR. GASPAR LÓPEZ OCAÑA.**

**EN CODIRECCIÓN:
M. en C. CARLOS ALBERTO TORRES BALCÁZAR.**

VILLAHERMOSA, TABASCO, SEPTIEMBRE DE 2024.



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, el día 26 del mes de agosto del año 2024, el que suscribe **C. ERIKA CITLALLY ALONSO MENDOZA** alumna del Programa de la Maestría en **INGENIERÍA, TECNOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL** con número de matrícula **222G21002**, adscrito a la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS**, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor(a) (es) de la Tesis de Maestría y titulada **“REMOCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA Y METALES EN UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES”** dirigida por el Dr. Gaspar López Ocaña y M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar.

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 2024.

Erika Citlally Alonso Mendoza

Nombre y Firma



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
 AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2024
Felipe Carrillo
PUERTO
PRIMERO EN SU TIEMPO
 SECRETARIO DE EDUCACIÓN
 DEL ESTADO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
 DIRECCIÓN

AGOSTO 26 DE 2024

C. ERIKA CITLALLY ALONSO MENDOZA
PAS. DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA, TECNOLOGÍA Y
GESTIÓN AMBIENTAL
P R E S E N T E

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 de Maestría en Ingeniería, Tecnología y Gestión Ambiental titulado: **"REMOCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA Y METALES EN UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES"**, asesorado por el Dr. Gaspar López Ocaña y M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar, sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado integrado por la Dra. Liliana Pampillón González, Dr. Juan Barajas Fernández, Dr. Gaspar López Ocaña, Dr. Raul German Bautista Margulis y M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar.

Por lo cual puede proceder a concluir con los trámites finales para fijar la fecha de examen.

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
 ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

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



DIRECCIÓN

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



KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
 Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 y 6401, e-mail: direccion.dacbiol@ujat.mx

Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despillarro de agua y ayuda a conservar los bosques

www.ujat.mx



Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 26 de Agosto de 2024.

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 "REMOCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA Y METALES EN UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES".

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley 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.

COLABORADORES

ERIKA CITLALLY ALONSO MENDOZA
ALUMNA EGRESADA

DR. GASPAR LÓPEZ OCAÑA
DIRECTOR DE TESIS

C. CARLOS ALBERTO TORRES BALCÁZAR
CODIRECTOR DE TESIS

TESTIGOS

DRA. LILIANA PAMPILLÓN GONZÁLEZ

DR. RAÚL GERMAN BAUTISTA MARGULIS



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

Villahermosa, Tabasco a 16 de agosto de 2024

C. ERIKA CITLALLY ALONSO MENDOZA
EGRESADA DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA,
TECNOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL
PRESENTE

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad, y por instrucciones de la Dirección de Posgrado, se implementó la revisión de los trabajos recepcionales (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, el Reglamento General de Estudios de Posgrado, el Código Institucional de Ética para la Investigación y con los requerimientos para los posgrados en el SNP-CONAHCYT.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones y el reporte de originalidad de su documento de tesis. Con el objetivo de fortalecer y enriquecer el programa de posgrado, se realizó la revisión del documento en la plataforma iThenticate, obteniendo el reporte de originalidad, el índice de similitud y se emitieron las siguientes sugerencias y recomendaciones para dar seguimiento en el documento de tesis del proyecto de investigación: **"Remoción de la carga orgánica y metales en un sistema de tratamiento de aguas industriales"**.

OBSERVACIONES:

1. **El índice de similitud obtenido fue de 05%**, el cual se ubica dentro del estándar de tolerancia de acuerdo a las Políticas y Lineamientos para el uso y manejo del Software Antiplagio de la UJAT.
2. Aun que el índice de similitud obtenido indica coincidencias, éstas se refieren a frases en la sección de Introducción, Antecedentes y Resultados, principalmente. Lo anterior no demerita el documento de tesis, pero se solicita a la sustentante revisar las oraciones identificadas con similitud y ajustarlas a una redacción propia. Las máximas similitudes corresponden con la expresión de los resultados de las pruebas estadísticas (3%) y en textos citados de los que se manifiesta con suficiente claridad la fuente original.



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
 AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2024
Felipe Carrillo
PUERTO
 GOBIERNO DEL ESTADO DE TABASCO
 GOBIERNO FEDERAL DE MÉXICO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
 DIRECCIÓN

3. **Se adjunta el informe de originalidad de la tesis** obtenido a través de la herramienta Turnitin iThenticate.
4. Finalmente, se le solicita a la C. ERIKA CITLALLY ALONSO MENDOZA, integrar en la versión final de su documento de tesis, 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



C.C.P. Archivo



KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
 Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 y 6401, e-mail: direccion.dacbiol@ujat.mx

Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda a conservar los bosques



Remoción de la carga orgánica y metales en un sistema de tratamiento de aguas industriales

INFORME DE ORIGINALIDAD

5%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	aldeser.org Internet	364 palabras — 3%
2	ciba.org.mx Internet	69 palabras — 1%
3	ri.ujat.mx Internet	29 palabras — < 1%
4	docplayer.es Internet	28 palabras — < 1%
5	hdl.handle.net Internet	25 palabras — < 1%
6	revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe Internet	25 palabras — < 1%
7	www.researchgate.net Internet	19 palabras — < 1%
8	bdigital.zamorano.edu Internet	16 palabras — < 1%
9	repositorio.upse.edu.ec Internet	15 palabras — < 1%



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



10	www.prensalibre.com Internet	15 palabras — < 1%
11	www.scielo.org.bo Internet	15 palabras — < 1%
12	doaj.org Internet	14 palabras — < 1%
13	noesis.uis.edu.co Internet	14 palabras — < 1%
14	www.bcsnoticias.mx Internet	14 palabras — < 1%

EXCLUIR CITAS

DESACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

DESACTIVADO

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS < 14 PALABRAS



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



Agradecimientos

A mi familia, por apoyarme en cada una de mis decisiones y darme las fuerzas que me hacen falta para continuar con mis sueños y anhelos, por impulsarme a lograr cada una de mis metas y objetivos en la vida, por recordarme lo capaz que puedo ser, pero sobre todo por amarme incondicionalmente y ser el pilar más importante en mi vida y en mis travesías.

A mis maestros, por compartir una parte de su conocimiento en cada clase, por su tiempo y por recordarme cada día que el esforzarse es primordial para llegar hasta donde quiero, pero sobre todo al Dr. Gaspar López Ocaña quien confió en mí y mis capacidades y me apoyo en cada momento y por compartir su conocimiento y consejos para guiarme en el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros y amigos de la escuela que hicieron que mi tiempo en la maestría y estancia fuera más amena y agradable, pero sobre todo a Nancy, que me apoyo y aconsejo incondicionalmente durante este tiempo e hizo que estar fuera de casa fuera más sencillo.

A mi comité sinodal, Dra. Liliana Pampillón González, Dr. Juan Barajas Fernández, Dr. Gaspar López Ocaña, Dr. Raúl German Bautista Margulis y MC. Carlos Alberto Torres Balcázar por el apoyo que me brindaron y por el tiempo que me dedicaron para asesorarme y aconsejarme para mejorar y finalizar este trabajo.

A la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y la División Académica de Ciencias Biológicas por permitirme ser parte de su institución y abrirme las puertas para desarrollar mi trabajo. Al Laboratorio de Tecnología del Agua por recibirme para poder realizar mis actividades de metodología y a la encargada MI. Nancy Estrada Pérez por recibirme en el laboratorio, apoyarme y ayudarme a resolver mis dudas durante mi transcurso en el laboratorio.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por otórgame una beca con mi CV 1192904, la cual me ayudo a lo largo de mi maestría para poder concluirla.



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



INDICE

Resumen.....	15
Abstract.....	16
1. Introducción.....	17
2. Antecedentes.....	19
2.1 Tecnologías aplicadas al tratamiento de aguas residuales industriales. 19	
2.2 Tecnologías alternativas	20
2.3 Aplicación de humedales artificiales como tecnología alternativa.	22
3. Justificación.....	25
4. Objetivos.....	27
4.1 Objetivo general	27
4.2 Objetivos específicos.....	27
5. Materiales y métodos.....	28
5.1 Actividades de campo.....	28
5.1.1 Visita e identificación de las unidades experimentales	28
5.1.2 Obtención de las muestras	29
5.2 Actividades de laboratorio.....	30
5.2.1 Gasto de operación	30
5.2.2 Caracterización fisicoquímica y metales	30
5.3 Actividades de gabinete.....	31
5.3.1 Evaluación de la eficiencia de remoción parcial y total.	31
5.3.2 Análisis estadístico de la eficiencia del tren de tratamiento.....	31
5.3.3 Evaluación de la capacidad hidráulica.....	32
6. Resultados y discusiones	33



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



6.1	Gasto de operación	33
6.2	Comportamiento de las unidades del tren de tratamiento.....	34
6.3	Análisis estadístico del tren de tratamiento	38
6.1	Eficiencias de remoción en las unidades del tren de tratamiento.	49
6.2	Evaluación hidráulica del sistema de tratamiento.	53
7.	Conclusiones.....	55
8.	Referencias	56
9.	Anexos.....	62
9.1	Memoria fotográfica.....	62
9.2	Alojamiento de tesis.....	65



INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de control a caracterizar de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-2021	31
Tabla 2. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos (Tren 1).	35
Tabla 3. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos (Tren 2).	35
Tabla 4. Comportamiento de los metales (Tren 1).....	37
Tabla 5. Comportamiento de los metales (Tren 2).....	37
Tabla 4. Eficiencia de remoción de parámetros fisicoquímicos	50
Tabla 5. Eficiencia de remoción de metales	50
Tabla 6. Evaluación hidráulica.	54



INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de las actividades a realizar en la metodología experimental	28
Figura 2: Diagrama del tren de tratamiento de aguas residuales.....	29
Figura 3: Diagrama del tren de tratamiento.....	30
Figura 4. Gasto de operación horaria de la PTAR.....	33
Figura 5. Gasto de operación diaria de la PTAR.....	34
Figura 6. Valores medianos de la variable pH (UpH) (N=6).....	38
Figura 7. Valores medianos de la variable color (UC) (N=6).....	39
Figura 8. Valores medianos de la variable turbiedad (UNT) (N=6).....	40
Figura 9. Valores medianos de la variable DQO (mg/L) (N=6).....	40
Figura 10. Valores medianos de la variable CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$) (N=6).....	41
Figura 11. Valores medianos de la variable ORP (Mv) (N=6).....	42
Figura 12. Valores medianos de la variable OD (mg/L) (N=6).....	42
Figura 13. Valores medianos de la variable zinc (mg/L) (N=6).....	43
Figura 14. Valores medianos de la variable aluminio (mg/L) (N=6).....	44
Figura 15. Valores medianos de la variable hierro (mg/L) (N=6).....	44
Figura 16. Valores medianos de la variable manganeso (mg/L) (N=6).....	45
Figura 17. Valores medianos de la variable níquel (mg/L) (N=6).....	46
Figura 19. Valores medianos de la variable cromo VI (mg/L) (N=6).....	46
Figura 20. Valores medianos de la variable cobre (mg/L) (N=6).....	47
Figura 21. Valores promedio de la variable temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (N=6).....	48
Figura 22. Valores promedio de la variable SDT (mg/L) (N=6).....	48



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



**Remoción de la carga orgánica y metales en un sistema de
tratamiento de aguas industriales**



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



Resumen

Existen diferentes tipos de tratamientos que son empleados para el tratamiento de aguas residuales industriales, entre ellos se encuentran los tratamientos híbridos; que se caracterizan por combinar sinérgicamente la actividad de procesos individuales, logrando potenciar los aspectos beneficiosos y previniendo o eliminando los factores negativos que ocurren en estos procesos, consiguiendo así una mayor eficiencia de remoción de los contaminantes presentes en las aguas residuales. El siguiente trabajo tuvo como objetivo evaluar la remoción de contaminantes básicos y metales pesados en un proceso de tratamiento de agua residual industrial con tecnología híbrida integrada por filtros biológicos y humedales artificiales (HA) en serie.

Para ello, se realizaron campañas de monitoreo con una duración de un año en los meses de diciembre de 2022, mayo y noviembre de 2023; cada campaña tuvo una durabilidad de 7 días a fin de lograr caracterización volumétrica y fisicoquímica de la calidad del agua en el afluente y efluente de cada unidad de proceso y así lograr determinar la eficiencia de remoción parcial y total del tren de tratamiento y su cumplimiento ambiental.

Los resultados mostraron que la planta de tratamiento de aguas residuales tiene un comportamiento discontinuo de operación obteniendo un Qmed de 3.3 L/s para un gasto operacional horario, por lo que rebasa los criterios de diseño establecidos por normatividad. Por el contrario, tiene un cumplimiento ambiental satisfactorio cumpliendo un 73.3% de los límites permisibles establecidos por la normatividad mexicana, sin embargo, presenta ciertas irregularidades el cual puede atraer problemas en algún futuro.

Finalmente, los resultados obtenidos demostraron que el tren 1 de HA presenta mejores resultados en la remoción de contaminantes y metales pesados, teniendo una remoción de 73.2% en color, 43% en turbiedad, 25.5% en SDT, 74.5% en DQO y 52.4% en OD, respectivamente.

Palabras claves: tratamiento híbrido, biofiltro, humedales artificiales, evaluación, cumplimiento ambiental.



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



Abstract

There are different types of treatments that are used for industrial wastewater treatment, among them are hybrid treatments, which are characterized by synergistically combining the activity of individual processes, managing to enhance the beneficial aspects and preventing or eliminating the negative factors that occur in these processes, thus achieving greater removal efficiency of the contaminants present in wastewater. The following work aimed to evaluate the removal of basic contaminants and heavy metals in an industrial wastewater treatment process with hybrid technology integrated by biological filters and artificial wetlands in series.

To this end, monitoring campaigns were conducted for a period of one year in December 2022, May and November 2023; each campaign lasted 7 days in order to achieve volumetric and physicochemical characterization of the water quality in the influent and effluent of each process unit and thus determine the partial and total removal efficiency of the treatment train and its environmental compliance.

The results showed that the wastewater treatment plant has a discontinuous operating behavior, obtaining a Qmed of 3.3 L/s for an hourly operational expenditure, which exceeds the design criteria established by regulations. Likewise, it has satisfactory environmental compliance, meeting 73.3% of the permissible limits established by Mexican regulations; however, it presents certain irregularities which may attract problems in the future.

Finally, the results obtained demonstrated that HA train 1 presents better results in the removal of contaminants and heavy metals, having removal of 73.2% in color, 43% in turbidity, 25.5% in TDS, 74.5% in COD and 52.4% in O.D, respectively.

Keywords: Hybrid treatment, biofilter, constructed wetlands, evaluation, environmental compliance.



1. Introducción

El sector industrial es una de las principales fuentes de contaminación de agua, estas consumen grandes cantidades del recurso y por lo tanto el aumento de las descargas de aguas residuales que transportan contaminantes al medio son cada vez mayores lo que ocasiona la destrucción de hábitats (Zhou, et al., 2019) y la pérdida de la calidad del agua la cual se ve afectada al introducir factores externos (García, et al., 2021).

Las aguas residuales industriales se caracterizan por ser heterogéneas, no obstante, su composición depende del sector que las produce y a las materias primas utilizadas en los procesos, sin embargo, gran cantidad de ellas están compuestas por contaminantes orgánicos (materia orgánica, hidrocarburos, pesticidas, plastificantes, entre otros) y contaminantes inorgánicos (metales pesados) lo que las ha convertido en un gran problema a nivel mundial (Karri, et al., 2021).

Su principal problema es que su tratamiento no es uniforme en todo el mundo. Las grandes empresas han logrado grandes avances en la depuración de estas aguas, pero por otro lado las pequeñas y medianas empresas aun presentan grandes desafíos y deficiencias en los tratamientos derivado a la falta de recursos económicos lo que agudiza la problemática de la contaminación del agua (Carrera y Suárez, 2019). Por consecuencia, a nivel mundial las organizaciones gubernamentales han constituido una serie de leyes que señalan que la gestión del recurso es un gran compromiso y por ello es necesario cumplir con una serie de obligaciones y responsabilidades (Verdín, et al., 2016).

En México la mayor parte de los cuerpos de agua reciben altas cantidades de aguas residuales sin un correcto tratamiento y emisiones contaminantes por infiltración del suelo lo que ha originado que los niveles de calidad vayan disminuyendo volviendo limitante su uso (García, et al., 2021). Por lo cual con el fin de proteger el ambiente se han establecido políticas e instrumentos de calidad que ayuden al control de la contaminación del agua y son establecidos a través de regulaciones, permisos, impuestos, entre otros; por lo que se han promulgado criterios y límites permisibles en la emisión de descargas (Mercado y de Lourdes, 2003). Los principales límites en México se encuentran establecidos en los Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua (CE-CCA-001/89), en la Ley Federal de Derechos



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales (LFDDAMAN, LCA) y en la NOM-001-SEMARNAT-2021 que fijan los límites máximos permisibles (LMP) para parámetros relevantes de acuerdo con el uso al que se destine el agua, mientras que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es la encargada de establecer los criterios de diseño a través de sus manuales de agua potable alcantarillado y saneamiento.

Debido a ello, las industrias se han visto en la necesidad de implementar un correcto tratamiento para las aguas residuales que generan cada día. A lo largo del tiempo se han desarrollado diversas tecnologías que degraden en su mayoría la presencia de contaminantes antropogénicos, aunque no todos logran eliminar los contaminantes presentes originando que estos puedan ingresar a los cuerpos de agua a través de las descargas de efluentes y/o eliminación de lodos (Zhou, et al., 2019).

Los tratamientos biológicos emplean principalmente microorganismos en el tratamiento, quienes los contaminantes en el agua como fuente de carbono y/o energía. Estos microorganismos son empleados para la degradación de la materia orgánica y estabilización o remoción de metales pesados (Ferrer, et al., 2022). La planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de nuestro estudio es híbrida con biofiltro + humedales artificiales (HA) en serie con dos etapas. La primera etapa se encarga de degradar la materia orgánica disuelta con ayuda de una comunidad microbiana (suspensión y fija) y la segunda etapa sucede mediante los HA los cuales remueven y degradan los contaminantes a través de una interacción intrínseca de bacterias, plantas macrófitas y un sustrato (Orduña, et al., 2021).

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar una PTAR híbrida (Biofiltro-HA) realizando la caracterización volumétrica y fisicoquímica, verificando el cumplimiento ambiental de acuerdo con los instrumentos ambientales vigentes en el país. Así mismo se busca conocer la eficiencia de remoción de los contaminantes básicos y metales pesados en el proceso, conociendo la remoción parcial y total de las etapas del tratamiento. Finalmente, se analizó estadísticamente el comportamiento de los contaminantes a través de una comparación de cada unidad del proceso durante dos campañas de monitoreo semestrales durante el 2023.



2. Antecedentes

La contaminación del agua causada por las descargas de los procesos industriales es un problema con mayor afectación a los países en desarrollo. En 2016 la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) reportó que solamente existen 2,832 plantas de tratamiento, las cuales se encuentran principalmente en las grandes y medianas empresas industriales y por el lado de las pequeñas industrias es casi nulo la presencia de trenes de tratamiento derivado a los bajos ingresos económicos (Hernández, et al., 2018).

2.1 Tecnologías aplicadas al tratamiento de aguas residuales industriales.

Existen diversos tratamientos usados para el tratamiento de aguas residuales, a continuación, se describen algunos de ellos:

Jacobo, et al. (2019) estudiaron la operación de un reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) a escala de laboratorio en el tratamiento de agua residual de una industria chocolatera. Para ello utilizaron el reactor con un tiempo de retención (THR) de 6 h a una temperatura psicrófila y el agua residual con dos cargas orgánicas volumétricas aplicadas (COV_{apl}), la fase experimental tuvo dos fases en donde la primera utilizaron una carga orgánica de 1.8 ± 0.8 kg de DQO y la segunda con 3.5 ± 0.9 kg de DQO y analizaron principalmente la remoción de DQO, la producción de biogás y el rendimiento celular experimental. Al finalizar el experimento determinaron que el reactor UASB trató eficientemente el agua residual industrial con COV_{apl} ya que les permitió alcanzar altos niveles de DQO en el estado estacionario del reactor (90.3 ± 1.3 % y 90.6 ± 3.1 % durante las etapas experimentales I y II, respectivamente), además de que la producción de biogás se incrementó al momento de elevar las cargas orgánicas obteniendo 0.3 y 0.8 L de biogás, respectivamente.

Ibrahim, et al. (2020) analizaron un tren de tratamiento de lodos activados y reactores UV-C para mejorar su tratamiento. Esta planta trata aguas residuales provenientes de la zona residencial de Chargaia I, en los suburbios del noreste de la ciudad de Túnez. El estudio tuvo una durabilidad de 10 meses en donde recolectaron 7 muestras de agua residuales cada mes y analizaron las muestras con base a parámetros bacteriológicos, enfocándose principalmente



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



en la inactivación de virus (*Norovirus GI* y *Norovirus GII*). Al finalizar el análisis obtuvieron una considerable inactivación de *Norovirus GI* y *Norovirus GII* del 66,4 y el 86,4%, respectivamente al finalizar todo el tratamiento, demostrando una efectividad en el tratamiento biológico y UV-C254 para la eliminación de los virus.

El Saidy, et al. (2020) analizaron la eficiencia de remoción de cadmio (Cd), níquel (Ni) y plomo (Pb) y pesticidas (malatión) en aguas residuales sintéticas (agrícola e industrial) a través del uso de bioadsorbentes (paja de arroz (RS) y la zeolita (Z)) para posteriormente reutilizarla en unidades de cría de peces. Estudiaron 11 grupos de tratamiento encontrando que la más eficiente fue el grupo 10 en donde utilizaron una mezcla de RS entero y picado y zeolita encontrando eficiencias de remoción del 92%, 95%, 96%. y 99% para Cd, Ni, Pb y malatión, respectivamente.

Estrada, et al. (2020) evaluaron el proceso de una planta de tratamiento de aguas residuales industriales de un Parque Industrial en Tabasco. La investigación se enfocó en corroborar que la operación del sistema de tratamiento sea adecuada y para ello realizaron un análisis de los siguientes parámetros fisicoquímicos: pH, color, turbiedad y sólidos disueltos totales (SDT) en donde evaluaron cada una de las etapas de la planta (cárcamo, tanque equalizador, biofiltro, sedimentador y filtro). Al término del análisis determinaron que la planta no cumple con los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 al obtener una eficiencia de remoción del 68.09% para turbidez, 70.4% para color, 63.9% para SDT y un pH promedio de 9.2.

2.2 Tecnologías alternativas

Durante la marcha del tiempo se ha descubierto que los tratamientos convencionales a veces no son muy efectivos para la remoción de algunos contaminantes y suelen ser altamente costosos, lo que ocasiona que las pequeñas industrias no puedan implementar a falta de recursos económicos. Por lo que esto ha inducido a la implementación de nuevas tecnologías a los sistemas de tratamiento. A continuación, se especifican algunos de estas nuevas tecnologías:



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



Cortés, et al. (2017) optimizaron mediante un modelo matemático el sistema de tratamiento de aguas residuales integrado por tres lagunas de estabilización (laguna anaerobia, facultativa y de maduración). El desarrollo del modelo matemático lo hicieron con la finalidad de reducir el área del sistema (relación largo-ancho) e incluir la restricción para el flujo disperso en el modelo matemático, por lo que obtuvieron una mejora en la reducción tiempo de retención y área, no obstante, encontraron que es necesario cambiar los parámetros de temperatura promedio y evaporación. Finalmente encontraron que la optimización ayuda a que los parámetros de DBO5 y coliformes fecales se encuentren por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 y a su vez lograron justificar la implementación de la laguna de maduración, por el lado de la reducción del área lograron una disminución del 15.16%.

Ordóñez, et al. (2019) optimizaron el sistema de tratamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales de bebidas gaseosas provenientes del sector industrial de Guayaquil, Ecuador. Para ello realizaron un análisis básico para identificar los cambios que se necesitaron en la planta de tratamiento que fueron la modificación del punto de adición del coagulante, para evitar la destrucción de los flocs, el cambio de entrada de agua al sedimentador, en donde sellaron los orificios pasados y se perforaron nuevos orificios, modificaron la entrada de agua a unidades de filtración y construyeron un tanque reservorio junto a un floculador. Al término de la optimización los investigadores determinaron que los valores óptimos para un tratamiento eficiente fueron de: 200 ppm de cal, 250 mg/L de sulfato de aluminio y 1 ppm de polímero como dosis óptima para el tratamiento fisicoquímico obteniendo una eficiencia de remoción mayor de 90% de los contaminantes.

Estrada, et al. (2021) implementaron una alternativa de humedales artificiales (HA) al tren de tratamiento de aguas residuales industriales de un Parque Industrial en Tabasco. La optimización consistió en la implementación de cuatro humedales en serie, donde tres de ellos son de flujo libre con las especies *Potenderia cordata*, *Sagittaria lancifolia* y *Thypa dominguensis* y el cuarto humedal es de flujo superficial con la especie *Thalia geniculata*. El estudio consistió en la evaluación del tratamiento y para ello realizaron una caracterización de los siguientes parámetros de control: pH, temperatura, color, turbiedad y sólidos disueltos



totales (SDT) durante su fase de monitoreo, al finalizar el período de evaluación encontraron que la implementación de los humedales logró que el tren de tratamiento tuviera una mejor eficiencia de remoción de los contaminantes obteniendo resultados de remoción de 42.9% en turbiedad, 93.5% en color, 64.6% en SDT y 98.1% en DQO.

2.3 Aplicación de humedales artificiales como tecnología alternativa.

Amabilis, et al. (2016) evaluaron la remoción de mercurio (Hg) empleando humedales artificiales (HA) sin inocular e inoculados con cepas tolerantes a metales pesados y la vegetación *Phragmites australis* (carrizo). Los investigadores determinaron que el tratamiento tuvo una eficiencia de remoción de mercurio del 73% para los sistemas inoculados y una de 66% para los no inoculados después de un lapso de 304 días de operación, encontrando así que de los 33.94 mg de Hg ingresados al inicio el sistema con carrizo e inoculación bacteriana logro acumular y volatizar el 11.14 mg (± 1.01 mg), mientras que los sistemas con carrizo sin inocular lograron una acumulación de 9.08 mg (± 0.92 mg), por lo que concluyeron que la *Phragmites australis* puede ser utilizada como barrera biológica para el Hg en HA sin que la presencia de las bacterias metalotolerantes influya sobre la remoción.

Saeed y Khan (2019), analizaron aguas residuales mixtas (mezcla de efluentes metálicos, papeleros y textiles) provenientes de la zona industrial de Shyampur de la ciudad de Dhaka. En donde emplearon el uso de trenes de humedales híbridos paralelos (humedales verticales y horizontales subsuperficiales) haciendo uso de la especie *Phragmites australis* (carrizo) para ambos trenes, con la finalidad de analizar la remoción de los contaminantes teniendo de base los siguientes parámetros: nitrógeno de amonio (NH₄-N), nitrógeno total (NT) fósforo total (PT), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO) y color. El estudio determinó que los humedales verticales de ambos sistemas fueron ineficientes para la remoción de los contaminantes pero esto mejora al llegar a la última etapa de los humedales horizontales de ambos sistemas logrando mejorar la eliminación de los contaminantes, obteniendo los siguientes resultados: NH₄-N (90%), NT (86%), PT (91%), DBO (92%), DQO (85%) y color (87%), por lo que pudieron demostrar el



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



potencial de los humedales artificiales para lograr tasas satisfactorias de remoción de contaminantes industriales difícilmente degradables.

García, et al. (2019) evaluaron la remoción de contaminantes provenientes de las aguas residuales domésticos, para ello utilizaron humedales artificiales de flujo subsuperficial con la especie *Sagittaria latifolia* (cola de golondrina) y con grava de canto redondo y grava de brecha sedimentaria como medios de soporte. Durante la experimentación evaluaron la densidad aparente y real, la porosidad y la conductividad eléctrica de los medios de soporte con el fin de determinar cuanta porosidad perdía durante el tratamiento y evaluar si es óptima para el tratamiento, así mismo evaluaron los siguientes parámetros de calidad de agua: temperatura, turbiedad, color, pH, conductividad eléctrica, DBO₅, fósforo total (PT), nitrógeno total (NT) y sólidos suspendidos totales (SST). Los resultados que obtuvieron una vez terminado el tratamiento fue que los humedales con el medio de soporte grava de canto redondo fue más eficiente al tener una remoción de 96.85% para SST, 95.85% para DBO₅, 96.78% para NT y 96.7% para PT, mientras que con la grava de brecha sedimentaria como medio de soporte consiguieron una remoción de 95.52% para SST, 95.02% para DBO₅, 95.45% para NT y 95.36% para PT y los medios de soporte son eficientes al solamente perder 5% de su porosidad durante el tratamiento.

Zhang, et al. (2020) evaluaron la remoción de metales en un agua residual sintética, la cual estaba compuesta por una mezcla de sales para simular diferentes cargas de metales, para ello utilizaron humedales artificiales de flujo vertical (VF1/2) y de flujo horizontal (HF3) y la especie *Canna indica L.* La experimentación determino que después de un tratamiento de 8 h a 24 h en todos los humedales la remoción de los metales (Pb, Cd, Cu y Zn) tuvo una eficiencia de 88,6–98,4 %, 86,8–99,3 % y 90,1–100 % en VF1, VF2 y HF3, respectivamente, a su vez encontraron que la remoción del Pb y Cu fue relativamente estable en los tres humedales a las 24 h de tratamiento, mientras que la remoción de Cd y Zn continuó aumentando conforme el transcurso del tratamiento avanzaba independientemente de la carga de los metales.

Márquez, et al. (2020) evaluaron el efecto sinérgico que ocasiona la acumulación de plomo (Pb) y cromo (Cr VI) con la vegetación *Nasturtium officinale* (berro). Por lo que



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



utilizaron una solución compuesta que adicionaron a un humedal artificial compuesto por tres plantas (10 cm de longitud) en un recipiente de 1 L y fueron colocados dentro de una cámara climática. Después del lapso experimental las plantas se retiraron y enjuagaron con agua destilada, para posteriormente ser secadas a 50 °C durante 30 h y así pudieran analizar la absorción de los contaminantes en la vegetación obteniendo una remoción de 99.9% (100 mg/L) para el Pb y 95% para el Cr (VI) (28.5 mg/L).

Estrada (2021) evaluó la efectividad de una propuesta de optimización de un sistema de tratamiento de aguas residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales industriales de un Parque Industrial en Tabasco. El tren de tratamiento está compuesto por el cárcamo, un tanque ecualizador, un filtro colador, un sedimentador secundario y la implementación de un tren de humedales en serie compuesto por un humedal flujo libre con la especie *Potenderia cordata*, un humedal flujo libre con la especie *Sagittaria lancifolia*, un humedal flujo libre con la especie *Thypha dominguensis* y un humedal flujo subsuperficial con la especie *Thalia geniculata*. La optimización del sistema se realizó con la finalidad de mejorar la calidad del agua residual y con ello cumplir con los límites máximos permitidos estipulados por la NOM-001-SEMARNAT-1996, por lo que al término de la evaluación encontró que la optimización logro una remoción del $\leq 95\%$ en todos los contaminantes básicos (DQO, turbidez, color, sólidos disueltos totales y pH) por lo que la implementación de los humedales artificiales al sistema fue una eficiente alternativa.



3. Justificación

El latente crecimiento de la población ha generado una mayor demanda del recurso hídrico para satisfacer las necesidades de producir bienes y servicios básicos de la población para mejorar las condiciones de vida provocando su contaminación. Todos los días miles de litros de aguas residuales provenientes de las actividades humanas se vierten en las vías fluviales de todo el mundo y la falta de saneamiento adecuado conduce a una de las causas más importantes de la contaminación del agua (Geissen et al., 2015).

En 2018 la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) dio a conocer que en México sólo el 50% de las aguas residuales generadas a nivel nacional son tratadas con un tratamiento eficiente, mientras que el otro porcentaje es desechado a cielo abierto o a los cuerpos de agua originando que estas se vuelvan un foco de infección para la población en general y para el ecosistema que los rodea (Vidal, 2019). Generalmente, estas corrientes de aguas residuales suelen contener altos niveles de metales pesados y se liberan al medio ambiente con un tratamiento deficiente y al no ser biodegradables tienden a acumularse en organismos receptores, lo que puede provocar cambios en el metabolismo humano o una acumulación en los órganos vitales alterando el funcionamiento biológico.

En situaciones como estas, es importante instalar plantas de tratamiento de agua y buscar opciones que puedan mejorar su calidad. La PTAR a estudiar se encuentra dentro de un parque industrial en el estado de Tabasco, en donde sus aguas residuales proceden de empresas con giros de comercios de distribución, de servicios especializados y además cuentan con bodegas, cafeterías y tiendas departamentales y la cual fue modificada en el año 2021 en donde se implementó los trenes de HA, ya que es un proceso económico y de alta eficiencia de tratamiento (Estrada, 2021), además de ser una opción de tecnología verde convirtiendo el proceso es un sistema híbrido.

Los biofiltros son sistemas complejos y están compuestos por un componente biótico y un lecho filtrante. El lecho es el sostén del sistema y tiene como fin el retener los contaminantes mediante mecanismos de adsorción/absorción, por lo que es recomendable que esté compuesto sea de origen orgánico e inorgánico para que pueda actuar como una resina natural favoreciendo el crecimiento bacteriano (Díaz, et al., 2022).



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



Por otro lado, los HA son una tecnología altamente usada en el tratamiento de aguas industriales debido a su gran eficiencia en la eliminación de metales pesados, además de tener un costo de operación y mantenimiento reducidos ya que trabajan sin energía. Por lo que en las últimas décadas han sido considerados como procesos biotecnológicos (García, et al., 2019). Los HA tienen enormes ventajas técnicas, económicas, sociales y estéticas en comparación con los sistemas tradicionales (Arteaga et al., 2019).



4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Evaluar la remoción de contaminantes básicos y metales pesados en un proceso de tratamiento de agua residual industrial con tecnología híbrida integrada por filtros biológicos y humedales artificiales en serie.

4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar volumétrica y fisicoquímicamente la calidad del agua en el afluente y efluente de cada unidad de proceso.
- Determinar la eficiencia de remoción parcial y total del tren de tratamiento y su cumplimiento ambiental.
- Evaluar la capacidad hidráulica del sistema de tratamiento (volumen, área y tiempo de retención hidráulico).



5. Materiales y métodos

La finalidad del método experimental es evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes básicos y metales actual del tren de tratamiento y determinar el nivel de cumplimiento de acuerdo con los límites máximos permisibles establecidos por la normatividad ambiental mexicana. En la figura 1 se observa los pasos a realizar durante la metodología experimental.

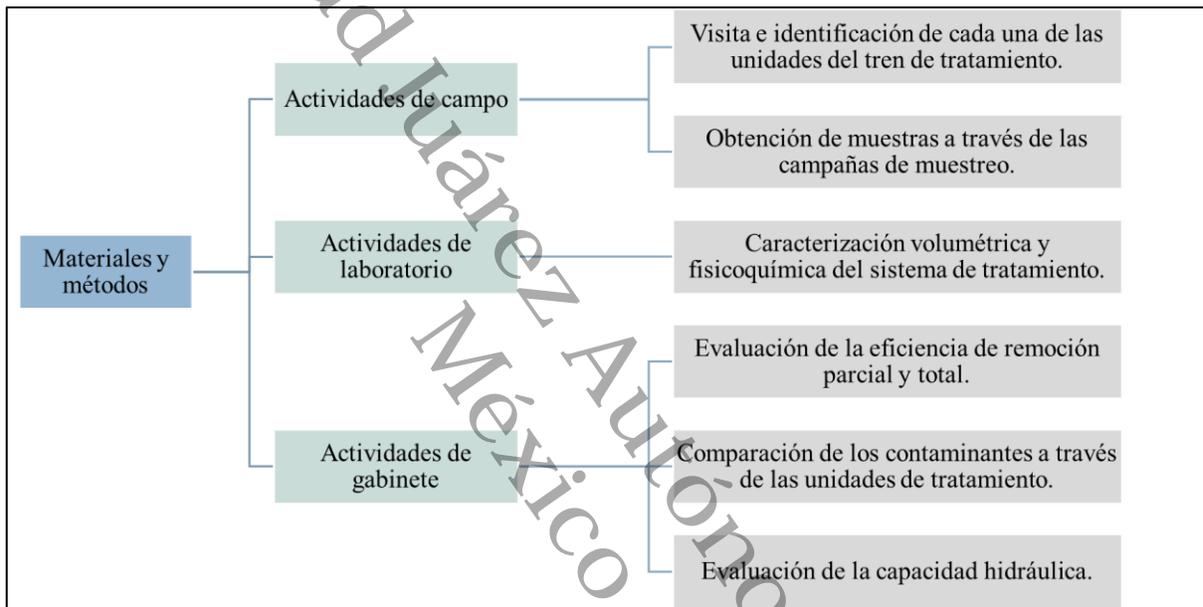


Figura 1: Diagrama de las actividades a realizar en la metodología experimental

5.1 Actividades de campo

5.1.1 Visita e identificación de las unidades experimentales

Se realizó una visita de reconocimiento del sistema de tratamiento híbrida (biofiltro-humedales artificiales) con la finalidad de identificar y reconocer las unidades del tren de tratamiento. Está conformada por las siguientes etapas: un cárcamo, un tanque equalizador, una biotorre, un sedimentador secundario, dos trenes de humedales artificiales en serie (HAFL y HAFS) y un lecho de secado. En la figura 2 se observa la distribución de la PTAR dentro del parque industrial.

El proceso inicia con la recepción de las aguas residuales generadas en el parque, las cuales son depositadas y almacenadas temporalmente en el cárcamo, cuenta con una rejilla para la retención de residuos sólidos urbanos y un tanque de regulación que ayuda a retener



las aguas residuales cuando el gasto máximo extraordinario es rebasado. Posteriormente, las aguas son almacenadas temporalmente en un tanque equalizar que busca homogenizar sus propiedades físicoquímicas, seguidamente el agua es bombeada hacia la biotorre a través de una caída libre por un lecho de placas paralelas el cual tiene adherido un medio microbiano que se encarga de reducir la carga orgánica. A partir de este proceso las aguas llegan a través de gravedad a las últimas unidades del sistema de tratamiento, el sedimentador secundario se dedica a separar sólidos y material suspendido y a través de un canal el efluente llega a la sección de humedales artificiales. Estos están divididos en cuatro secciones en donde las primeras tres secciones trabajan mediante humedales artificiales de flujo libre (HAFL) y la última sección con humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFS).

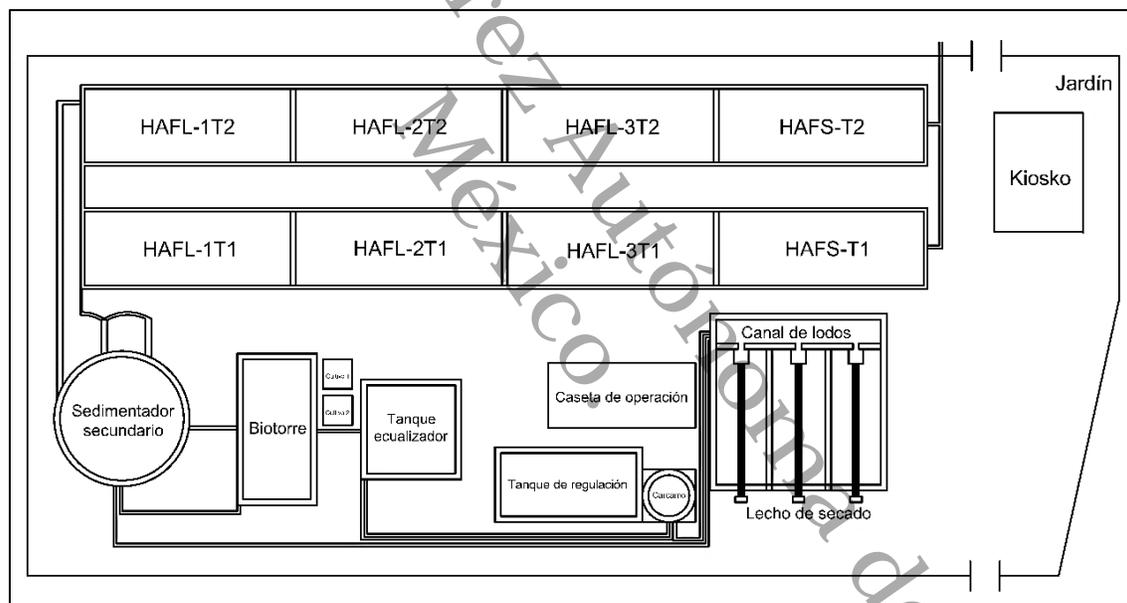


Figura 2: Diagrama del tren de tratamiento de aguas residuales. Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 Obtención de las muestras

El período de evaluación del tren de tratamiento tuvo una duración de un año, en donde se realizaron tres campañas de muestreo en los siguientes meses: diciembre de 2022, mayo y noviembre de 2023. Las campañas tuvieron una durabilidad de 7 días en donde tomó una muestra diariamente de cada una de las salidas de las unidades del tren de tratamiento (figura 3). Cada muestra fue tomada por triplicado.

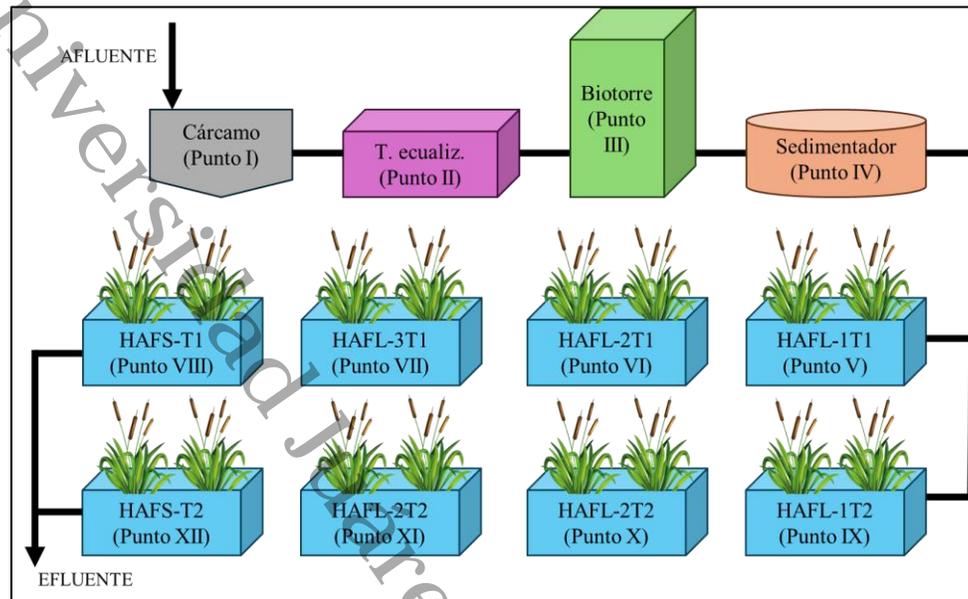


Figura 3: Diagrama del tren de tratamiento. Fuente: Elaboración propia.

5.2 Actividades de laboratorio

5.2.1 Gasto de operación

La evaluación del gasto de operación se determinó con el fin de verificar si la PTAR cumple con los criterios de diseño establecidos por la normatividad establecida. Se utilizó el método volumétrico en donde se midió el tiempo de llenado de un recipiente de volumen conocido y finalmente se determinó la graduación del cárcamo (Briones y García, 2014). Esta campaña de muestro tuvo una durabilidad de 7 días y se realizó en un horario de 8:00 a 16:00 horas en donde la toma de datos se hizo en intervalos de una hora.

$$Q = V * T$$

Donde:

Q = Caudal (m³)

T = Tiempo (s)

5.2.2 Caracterización fisicoquímica y metales

La caracterización del tren de tratamiento se realizó de acuerdo con los procedimientos analíticos señalados por la normatividad vigente mexicana, los métodos estandarizados y la EPA (Tabla 1). Los equipos utilizados para la medición de los parámetros fueron: Hanna® HI98129 (pH, temperatura, SDT, CE, ORP), Hanna® HI 98703 con precisión de 0.01 UNT (turbiedad y color) y Hanna® HI83099 (metales y DQO).



Este procedimiento se realizó por triplicado en cada una de las muestras tomadas de las unidades y se efectuó con el fin de evaluar el cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Tabla 1. Parámetros de control a caracterizar de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-2021

PARÁMETRO	MÉTODO	REFERENCIAS
pH	SM 9040 B	NOM-001-SEMARNAT-2021
Temperatura	SM 2550	
Color	APHA 2120	LFDDAMAN, LCA, 2019.
Turbiedad	SM 2130 B	
Oxígeno disuelto (OD)	SM 4500-OG	
Conductividad eléctrica (CE)	SM 2510 B	CE-CCA-001/89
Sólidos disueltos totales (SDT)	SM 2540	LFDDAMAN, LCA, 2019.
Potencial de oxidación y reducción (ORP)	N/A	
Demanda química de oxígeno (DQO)	USEPA 410.4	NOM-001-SEMARNAT-2021
Cromo VI (Cr VI)	ASTM D1687-92	
Níquel (Ni)	Fotométrico	
Zinc (Zn)	SM 3500-Zn	
Cobre (Cu)	SM 3500-Cu	
Aluminio (Al)	SM 3500-Al	LFDDAMAN, LCA, 2019.
Hierro (Fe)	EPA 315B	
Manganeso (Mn)	SM 3500-Mn	

5.3 Actividades de gabinete

5.3.1 Evaluación de la eficiencia de remoción parcial y total.

La eficiencia de proceso se realizó en función de la concentración promedio de entrada y salida del efluente. Para cualquier sustancia dada se puede aplicar el cálculo de eficiencia requerida y eficiencia de proceso de remoción mediante la siguiente ecuación. (Metcalf y Eddy, 1996).

$$\eta_p = \frac{(C_1 - C_2)}{C_1} * 100$$

donde:

- η_p = eficiencia de proceso (remoción de una sustancia dada) (%)
- C1 = Concentración de entrada de la sustancia al sistema (mg/L)
- C2 = Concentración de salida de la sustancia del sistema (mg/L)

5.3.2 Análisis estadístico de la eficiencia del tren de tratamiento

El análisis estadístico se realizó a través un análisis ANOVA para datos paramétricos y un análisis de varianza de Kruskal – Wallis para datos no paramétricos. Por lo cual se determinó el comportamiento de los parámetros analizados con base a una comparativa



gráfica de cada proceso unitario de la planta de tratamiento durante los días muestreados además se identificó las posibles diferencias estadísticas significativas.

5.3.3 Evaluación de la capacidad hidráulica

La evaluación de la capacidad hidráulica del sistema se llevo a cabo mediante una determinación del tiempo de retención hidráulico (TRH) de cada una de las unidades del tren de tratamiento, para su determinación se tomó en cuenta el área, tirante total y volumen de cada etapa del proceso. El cálculo se obtuvo con la siguiente formula:

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

donde:

TRH = tiempo de retención hidráulico (horas).

V = Volumen de agua contenido en la unidad (m³).

Q = Gasto de agua de entrada a la unidad de tratamiento (m³/h).



6. Resultados y discusiones

6.1 Gasto de operación

La PTAR está diseñada para trabajar con un gasto operacional de 3 L/s, estas aguas residuales provienen de los siguientes giros: bodegas, comercios de distribución, empresas de servicios especializados y cafeterías. En la figura 4 se observa el gasto horario que tuvo el cárcamo durante la semana de campaña de monitoreo, en donde se obtuvo un Q_{min} de 1.1 L/s, un Q_{med} de 3.3 L/s y un $Q_{maxinst}$ de 5.2 L/s, así mismo, se puede visualizar que el gasto tiene una discontinuidad durante las horas evaluadas presentando una mayor actividad durante las 11:00, 13:00, 17:00 y 18:00 horas.

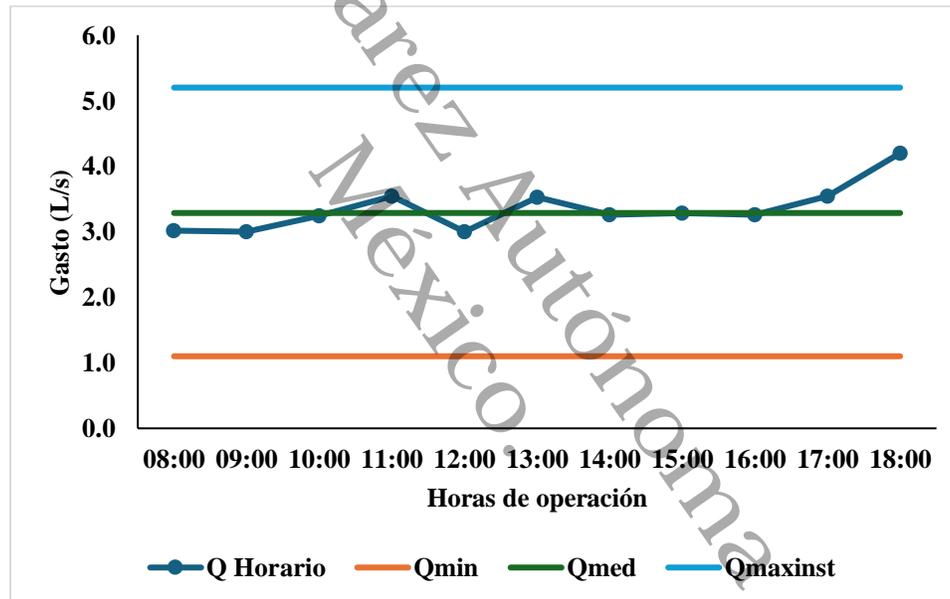


Figura 4. Gasto de operación horaria de la PTAR.

Durante la semana evaluada se observó que las aguas residuales que recibe el sistema rebasan el gasto de diseño por lo tanto no cumple con los criterios de diseño que establece la CONAGUA (2019) y los criterios de diseño internacionales (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Por otro lado, en la figura 5 se presenta el gasto diario que tuvo el cárcamo, en donde se obtuvo un Q_{min} de 2.8 L/s, un Q_{med} de 3.3 L/s y un $Q_{maxinst}$ de 4.1 L/s. Durante esta semana se identificó que los días en donde el sistema recibe un caudal mayor son los sábados y domingos y los días con menor caudal son los lunes y viernes.

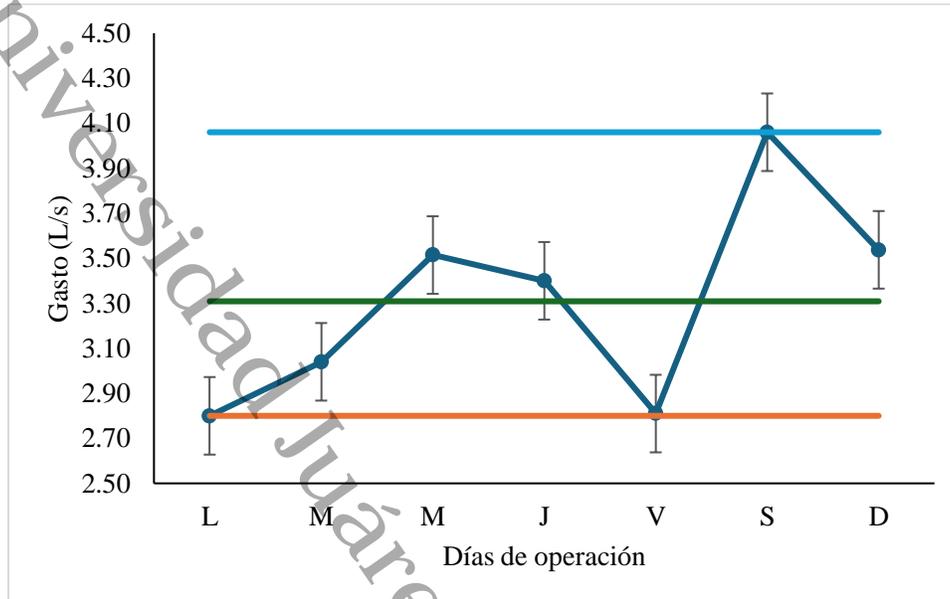


Figura 5. Gasto de operación diaria de la PTAR.

6.2 Comportamiento de las unidades del tren de tratamiento.

La PTAR trabaja con un sistema de tratamiento híbrido (biofiltro-humedales artificiales), la primera fase está conformada por un cárcamo, un tanque equalizador, una bitorre y un sedimentador secundario; mientras que la segunda fase se compone de dos trenes de humedales artificiales en serie el cual se encuentra dividido en cuatro secciones cada uno, las primeras tres secciones trabajan mediante humedales artificiales de flujo libre (HAFL) y la última sección con humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFS).

En la tabla 2 y 3 se presenta el comportamiento promedio que presentó el efluente durante la caracterización fisicoquímica del efluente en cada una de las unidades del tren de tratamiento híbrido. Visualmente se puede determinar que existe una dispersión no significativa en los datos paramétricos obtenidos durante la evaluación, sin embargo, para los parámetros de color, sólidos disueltos totales (SDT), conductividad eléctrica (CE) y DQO se observa una dispersión significativa de los datos y esto se puede deber principalmente a que no existe un área controlada por lo que está a mayor disposición que factores externos intervengan en el proceso.



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



Tabla 2. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos (Tren 1).

Unidad	Cárcamo		T. ecualiz.		Biotorre		Sedimentador		HAFL-1T1		HAFL-2T1		HAFL-3T1		HAFS-T1		LMP	Ref.
	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE		
pH (UpH)	7.37	0.7	7.48	0.5	7.59	0.4	7.76	0.3	7.98	0.4	7.99	0.2	8.06	0.1	8.08	0.1	6-9	A
Temp. (°C)	25.68	0.7	24.93	0.8	23.95	1	23.68	0.9	23.45	0.9	23.27	1	23.35	0.9	23.55	0.8	35	A
Color (UC)	2287	433	1128	464.9	987	241.8	725	282.5	491	157.3	445	97.8	565	175	612	188.9	75	B
Turb. (UNT)	21.37	6.6	9.88	6.1	7.37	3.8	4.3	1.8	3.4	2.9	1.7	1.3	3.9	1.3	12.22	4.9	10	B
SDT (mg/L)	663	68.6	464	69.2	487	69.2	500	56.7	495	54.7	495	40.2	494	44.9	494	42.7	500	B
CE (us/cm)	1301	116.5	955	93.4	1003	96.8	986	122.7	1005	85.1	987	82.2	997	81.6	962	76	4	C
OD (mg/L)	3.32	0.7	2.34	1.3	3.97	0.6	4.58	0.3	4.57	0.3	4.26	0.9	3.49	0.9	1.58	0.7	1,000	B
ORP (Mv)	-200	37.1	-136	28.7	-108	20.3	-108	34.6	-92	28.2	-76	20.9	-61	13.6	-129	79.2		
DQO (mg/L)	306	55.9	212	66.5	259	52.3	163	152.7	198	50.9	104	77.1	79	0.7	78	1.4	180	A

Nota: A) NOM-001-SEMARNAR-2021; B) LFDDAMAN, LCA, 2023; C) CE-CCA-001/89

Tabla 3. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos (Tren 2).

Unidad	Cárcamo		T. ecualiz.		Biotorre		Sedimentador		HAFL-1T2		HAFL-2T2		HAFL-3T2		HAFS-T2		LMP	Ref.
	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE		
pH (UpH)	7.37	0.7	7.48	0.5	7.59	0.4	7.76	0.3	8.12	0.1	8.18	0.1	8.19	0.1	8.16	0.1	6-9	A
Temp. (°C)	25.68	0.7	24.93	0.8	23.95	1	23.68	0.9	23.28	1	23.15	1	23.18	1	23.23	1	35	A
Color (UC)	2287	433	1128	464.9	987	241.8	725	282.5	451	66.3	460	167.4	420	108.5	468	111.1	75	B
Turb. (UNT)	21.37	6.6	9.88	6.1	7.37	3.8	4.3	1.8	2.47	1.2	2.22	0.9	2.68	2.1	2.52	1.6	10	B
SDT (mg/L)	663	68.6	464	69.2	487	69.2	500	56.7	495	52.1	496	45.3	503	47.2	500	40.7	500	B
CE (us/cm)	1301	116.5	955	93.4	1003	96.8	986	122.7	987	94.9	978	95.5	1001	84.5	1011	68.5	4	C
OD (mg/L)	3.32	0.7	2.34	1.3	3.97	0.6	4.58	0.3	4.53	4.5	4.2	1.3	3.83	1	3.65	0.7	1,000	B
ORP (Mv)	-200	37.1	-136	28.7	-108	20.3	-108	34.6	-87	39.2	-70	24.9	-56	23.2	-50	23.9		
DQO (mg/L)	306	55.9	212	66.5	259	52.3	163	152.7	85	5	56	1.4	86	14.9	130	2.8	180	A

Nota: A) NOM-001-SEMARNAR-2021; B) LFDDAMAN, LCA, 2023; C) CE-CCA-001/89



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



Por otro lado, en la tabla 4 y 5 se observa el comportamiento promedio que presentó el efluente durante la caracterización de metales del efluente en cada una de las unidades del tren. Durante esta caracterización se observó que existía una dispersión significativa en los datos paramétricos obtenidos durante la evaluación sobre todo en el parámetro de cobre (Cu) ya que en la primera etapa del tratamiento no se determinó la presencia del metal, pero conforme el efluente fluye a la segunda etapa se puede visualizar un incremento de las concentraciones con valores de 0.01 a 0.0495 mg/L.

Esto puede deberse a que la vegetación ya cumplió con su vida útil y debe ser retirada y sustituida por algún otro ejemplar de la especie, y es que la función principal de la vegetación es brindar una película bacteriana que ayude a la adsorción y filtración de los contaminantes en el proceso (Sucari, 2022).

Durante la evaluación se observó que las aguas residuales descargadas por la planta cumplen en su mayoría con los LMP establecidos por la normatividad ambiental mexicana vigente, sin embargo, la presencia de aluminio, hierro y manganeso sobrepasa las concentraciones permitidas por lo que ocasiona un alza en el color de las aguas.

Los metales pesados tienden a acumularse en los suelos y sedimentos (Zhang, et al., 2020) por lo que puede ser una posible razón de que las concentraciones de aluminio, fierro y manganeso sean elevadas y si bien, las concentraciones no sobrepasan por mucho el LMP, su descarga continua puede arraigar grandes problemas a futuro al cuerpo de agua y a sus alrededores. Los metales son esenciales para el crecimiento y desarrollo de la vegetación (Mn y Fe), no obstante, su presencia en altas cantidades tiende a ocasionar el crecimiento excesivo de la vegetación que rodea al cuerpo y en algunas ocasiones llega a formar raíces laterales y secundarias (Pabón, et al., 2020) y además puede originar peligros adicionales dentro de la cadena trófica como la eutrofización del agua originando un crecimiento excesivo de algas, lo que dañaría la biota existente.

Los HA tienden a presentar una buena remoción de metales pesados en aguas residuales obteniendo remociones del 20 y 97 % para zinc, 95 y 99 % para cromo VI y 55 y 73 % níquel en humedales híbridos (humedal de flujo vertical seguido de un humedal de flujo



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



Tabla 4. Comportamiento de los metales (Tren 1).

Unidad	Cárcamo		T. ecualiz.		Biotorre		Sedimentador		HAFL-1T1		HAFL-2T1		HAFL-3T1		HAFLS-T1		LMP	Ref.
	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE		
Zinc (Zn)	0.195	0.05	0.295	0.12	0.46	0.24	0.65	0.16	0.155	0.06	0.405	0.16	0.355	0.32	0.435	0.36	15	A
Aluminio (Al)	0.065	0.02	0.01	0	0.035	0.04	0.025	0.01	0.075	0.09	0.015	0.01	0.03	0.03	0.02	0.01	0.02	B
Hierro (Fe)	2.385	0.54	0.43	0.21	0.75	1	1.045	1.42	1.1	1.33	1.855	2.38	2.385	3.29	1.28	1.77	0.3	B
Cromo VI (Cr VI)	0.069	0.04	0.004	0.01	0.0125	0.01	0.019	0.01	0.0375	0.02	0.022	0.02	0.039	0.05	0.041	0.06	1.25	A
Manganeso (Mn)	2.75	3.89	0.25	0.35	1.3	1.84	0.9	1.13	1.15	1.63	1.35	0.07	0.5	0.71	0.45	0.64	0.05	B
Níquel (Ni)	0.225	0.28	0.025	0.04	0.105	0.15	0.03	0.01	0.18	0.17	0.11	0	0.03	0	0.04	0	3	A
Cobre (Cu)	ND	0	ND	0	ND	0	ND	0	ND	0	0.085	0.01	0.05	0.04	0.12	0.17	5	A

Nota: A) NOM-001-SEMARNAR-2021; B) LFDDAMAN, LCA, 2023; C) CE-CCA-001/89; ND = No detectable.

Tabla 5. Comportamiento de los metales (Tren 2).

Unidad	Cárcamo		T. ecualiz.		Biotorre		Sedimentador		HAFL-1T2		HAFL-2T2		HAFL-3T2		HAFLS-T2		LMP	Ref.
	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE		
Zinc (Zn)	0.195	0.05	0.295	0.12	0.46	0.24	0.65	0.16	0.255	0.09	0.475	0.52	0.505	0.06	0.38	0.21	15	A
Aluminio (Al)	0.065	0.02	0.01	0	0.035	0.04	0.025	0.01	0.04	0	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0	0.02	B
Hierro (Fe)	2.385	0.54	0.43	0.21	0.75	1	1.045	1.42	1.105	1.39	0.19	0.16	1.35	1.54	1.725	1.42	0.3	B
Cromo VI (Cr VI)	0.069	0.04	0.004	0.01	0.0125	0.01	0.019	0.01	0.02	0.03	0.0145	0.02	0.041	0.01	0.0365	0.01	1.25	A
Manganeso (Mn)	2.75	3.89	0.25	0.35	1.3	1.84	0.9	1.13	0.8	1.13	1.25	1.63	1.75	1.48	0.2	0.14	0.05	B
Níquel (Ni)	0.225	0.28	0.025	0.04	0.105	0.15	0.03	0.01	0.08	0.08	0.025	0.04	0.12	0.17	0.125	0.18	3	A
Cobre (Cu)	ND	0	ND	0	ND	0	ND	0	0.015	0.02	0.06	0.08	0.04	0.03	0.495	0.32	5	A

Nota: A) NOM-001-SEMARNAR-2021; B) LFDDAMAN, LCA, 2023; C) CE-CCA-001/89; ND = No detectable.



horizontal) utilizando como medio de soporte materiales orgánicos (turba de coco) y de construcción (ladrillo y arena) y la vegetación *Phragmites australis* y *Chrysopogon* (Saeed, et al., 2021). Por otro lado, Hamad (2020) logro una eficiencia de remoción de amoniacado del 82.3% utilizando humedales de flujo superficial y la vegetación *Typha latifolia* y *Cyperus papyrus* y para la remoción de metales utilizo 16 tallos de la vegetación obteniendo una remoción de 72% para cobre y 84% para zinc.

6.3 Análisis estadístico del tren de tratamiento

Potencial de hidrogeno. En la figura 6 se puede visualizar el comportamiento que tuvo el pH a través de cada una de las unidades del tratamiento, se puede determinar que no existe un cambio significativo entre las unidades del tren de tratamiento. Para este parámetro el análisis de Kruskal-Wallis de pH (UpH) encontró que el valor-P es menor que 0.05 por lo que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor mediano más bajo se encuentra en el tratamiento cárcamo con 7.315 UpH ($Q_1=6.52$, $Q_3=8.14$), seguido del tratamiento tanque ecualizador con 7.615 UpH ($Q_1=6.69$, $Q_3=8.0$) y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en el tratamiento HAFL-3T2 con un valor de 8.22 UpH ($Q_1=8.05$, $Q_3=8.26$).

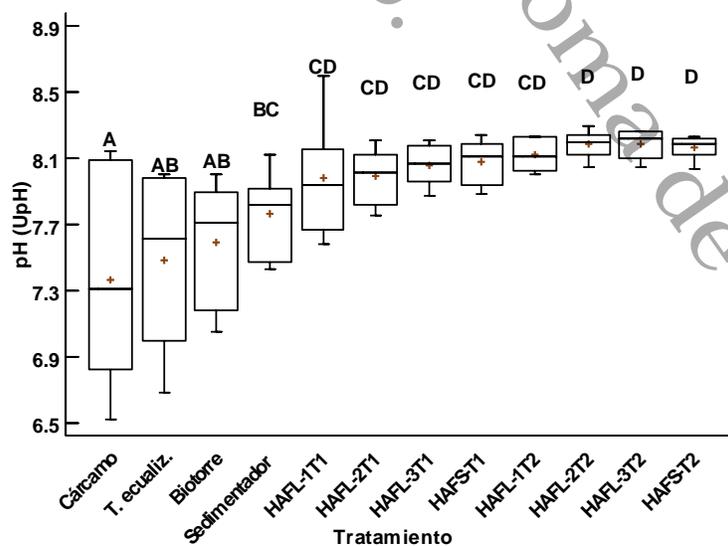


Figura 6. Valores medianos de la variable pH (UpH) (N=6). Letras diferentes indican diferencias significativas estadísticamente.



Color. El análisis de Kruskal-Wallis de color (UC) encontró que el valor-P es menor que 0.05 por lo que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor mediano más bajo se encuentra en el tratamiento HAFL-3T2 con 419.5 UC ($Q_1=290$, $Q_3=577$), seguido del tratamiento HAFL-2T1 con 431.5 UC ($Q_1=339$, $Q_3=599$) y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en el tratamiento Cárcamo con un valor de 2318 UC ($Q_1=1637$, $Q_3=2969$) como se muestra en la figura 7.

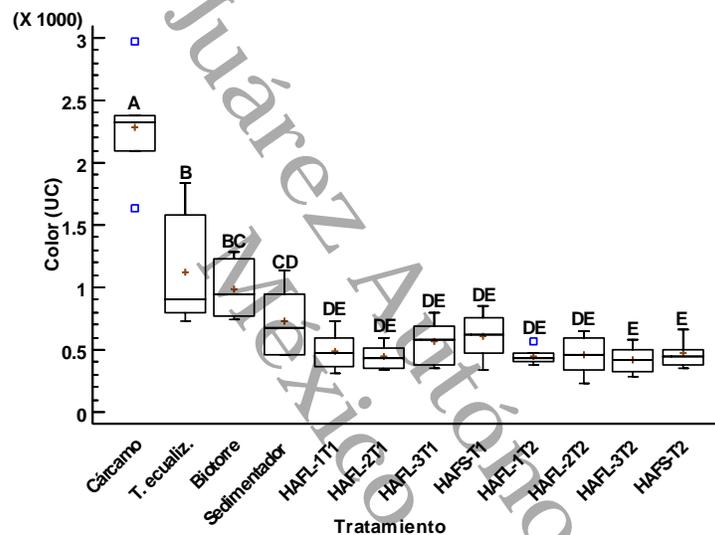


Figura 7. Valores medianos de la variable color (UC) ($N=6$). Letras diferentes indican diferencias significativas estadísticamente.

Turbiedad. El análisis de Kruskal-Wallis de turbiedad (UNT) encontró que el valor-P es menor que 0.05 por lo que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor mediano más bajo se encuentra en el tratamiento HAFL-2T1 con 1.35 UNT ($Q_1=0.6$, $Q_3=4.1$), seguido del tratamiento HAFL-2T2 con 1.85 UNT ($Q_1=1.7$, $Q_3=4.1$) y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en el tratamiento Cárcamo con un valor de 21 UNT ($Q_1=11.11$, $Q_3=30.4$) como se muestra en la figura 8.

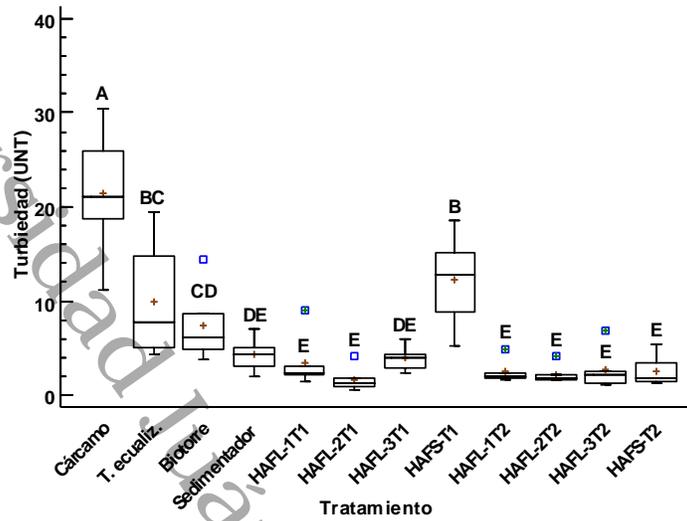


Figura 8. Valores medianos de la variable turbiedad (UNT) (N=6). Letras diferentes indican diferencias significativas estadísticamente.

DQO. El análisis de Kruskal-Wallis para DQO (mg/L) encontró que el valor-P es menor que 0.05 por lo que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Encontrando que el valor mediano más bajo se encuentra en el tratamiento HAFL-2T2 con 56 mg/L ($Q_1=55$, $Q_3=57$), seguido del tratamiento HAFL-T1 con 78 mg/L ($Q_1=77$, $Q_3=79$) y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en el tratamiento cárcamo con un valor de 305.5 mg/L ($Q_1=266$, $Q_3=345$) como se muestra en la figura 9.

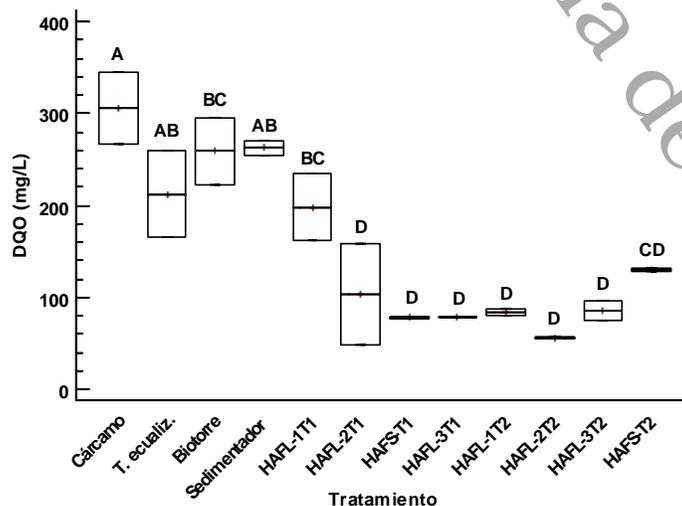


Figura 9. Valores medianos de la variable DQO (mg/L) (N=6). Letras diferentes indican diferencias significativas estadísticamente.



Conductividad eléctrica. El análisis de Kruskal-Wallis para la conductividad eléctrica ($\mu\text{s}/\text{cm}$) encontró que el valor-P es menor que 0.05 por lo que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Encontrando que el valor mediano más bajo se encuentra en el tratamiento Tanque equalizador con $955.33 \mu\text{s}/\text{cm}$ ($Q1=836$, $Q3=1090$), seguido del tratamiento HAFS-T1 con $962.167 \mu\text{s}/\text{cm}$ ($Q1=857$, $Q3=1067$) y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en el tratamiento Cárcamo con un valor de 1301.17 ($Q1=1132$, $Q3=1475$) $\mu\text{s}/\text{cm}$ como se muestra en la figura 10.

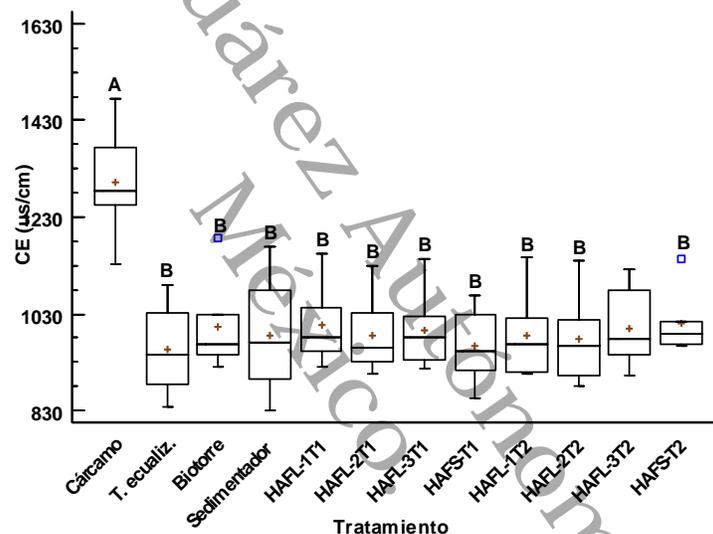


Figura 10. Valores medianos de la variable CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$) ($N=6$). Letras diferentes indican diferencias significativas estadísticamente.

Potencial oxido-reducción (ORP). El análisis de Kruskal-Wallis para ORP (Mv) encontró que el valor-P es menor que 0.05 por lo que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Encontrando que el valor mediano más bajo se encuentra en el tratamiento HAFS-T2 con -49.5 Mv ($Q1=-75$, $Q3=-19$), seguido del tratamiento HAFL-3T2 con -55.66 Mv ($Q1=-80$, $Q3=-23$) y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en el tratamiento Cárcamo con un valor de -200 Mv ($Q1=-232$, $Q3=-140$) como se muestra en la figura 11.

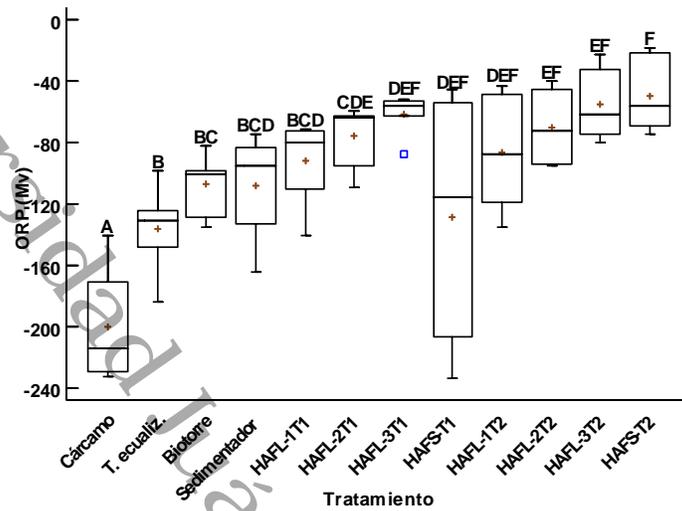


Figura 11. Valores medianos de la variable ORP (Mv) (N=6). Letras diferentes indican diferencias significativas estadísticamente.

Oxígeno disuelto (OD). El análisis de Kruskal-Wallis para ORP (Mv) encontró que el valor-P es menor que 0.05 por lo que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Encontrando que el valor mediano más bajo se encuentra en el tratamiento HAFL-T1 con 1.53 mg/L (Q1=0.83, Q3=2.81), seguido del tratamiento tanque ecuatizador con 2.34 mg/L (Q1=1.09, Q3=3.92) y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en el tratamiento sedimentador con 4.58 (Q1=4.13, Q3=4.86) mg/L como se muestra en la figura 12.

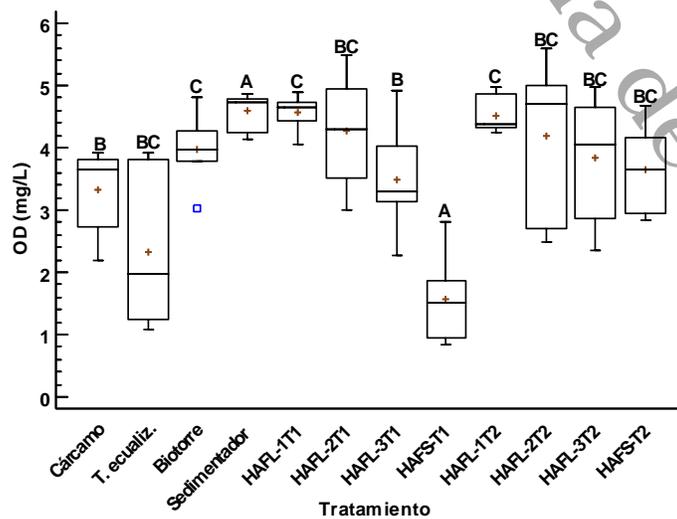


Figura 12. Valores medianos de la variable OD (mg/L) (N=6). Letras diferentes indican diferencias significativas estadísticamente.



Zinc. El análisis de Kruskal-Wallis para zinc (mg/L) encontró que el valor-P es menor que 0.05 por lo que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Encontrando que el valor mediano más bajo se encuentra en el tratamiento HAFL-1T1 con 0.155 mg/L (Q1=0.11, Q3=0.2), seguido del tratamiento cárcamo con 0.195 mg/L (Q1=0.16, Q3=0.23) y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en el tratamiento sedimentador con 0.65 (Q1=0.54, Q3=0.76) mg/L como se muestra en la figura 13.

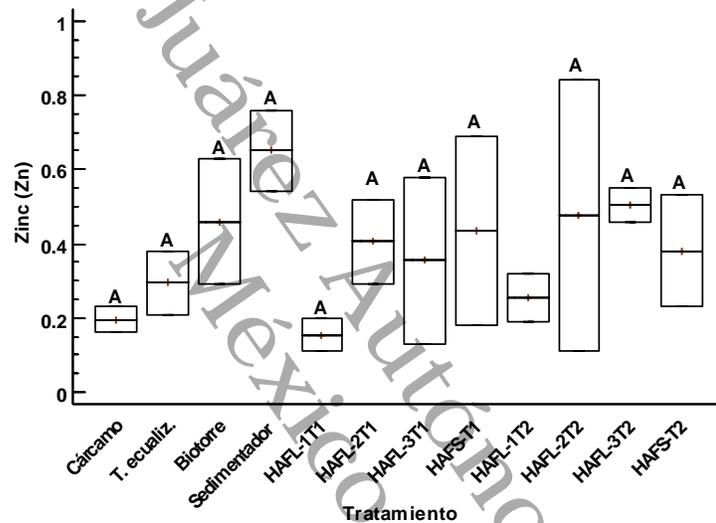


Figura 13. Valores medianos de la variable zinc (mg/L) (N=6). Letras diferentes indican diferencias significativas estadísticamente.

Aluminio. El análisis de Kruskal-Wallis para aluminio (mg/L) encontró que el valor-P es menor que 0.05 por lo que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Encontrando que el valor mediano más bajo se encuentra en el tratamiento tanque equalizador con 0.01 mg/L (Q1=0.01, Q3=0.14), seguido del tratamiento HAFL-2T1 con 0.015 mg/L (Q1=0.01, Q3=0.02) y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en el tratamiento HAFL-1T1 con 0.065 (Q1=0.01, Q3=0.14) mg/L como se observa en la figura 14.

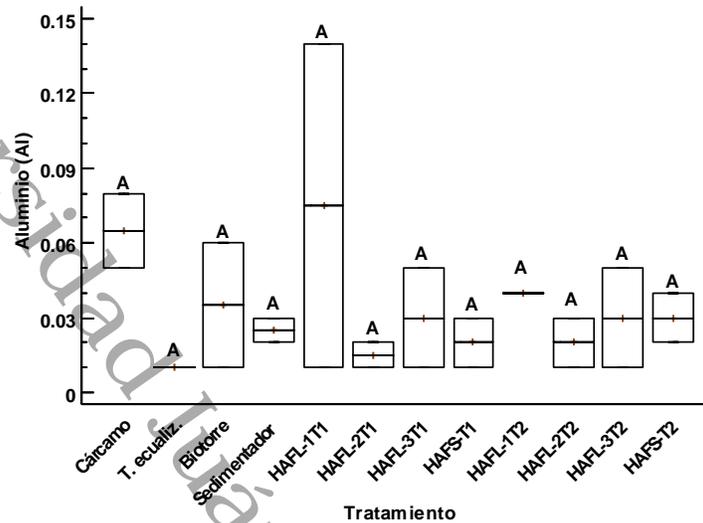


Figura 14. Valores medianos de la variable aluminio (mg/L) (N=6). Letras diferentes indican diferencias significativas estadísticamente.

Hierro. El análisis de Kruskal-Wallis para hierro (mg/L) encontró que el valor-P es menor que 0.05 por lo que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Encontrando que el valor mediano más bajo se encuentra en el tratamiento HAFL-2T2 con 0.19 mg/L (Q1=0.08, Q3=0.3), seguido del tratamiento tanque ecualizador con 0.43 mg/L (Q1=0.28, Q3=0.58) y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en el tratamiento cárcamo con 2.385 mg/L (Q1=2, Q3=2.77) como se muestra en la figura 15.

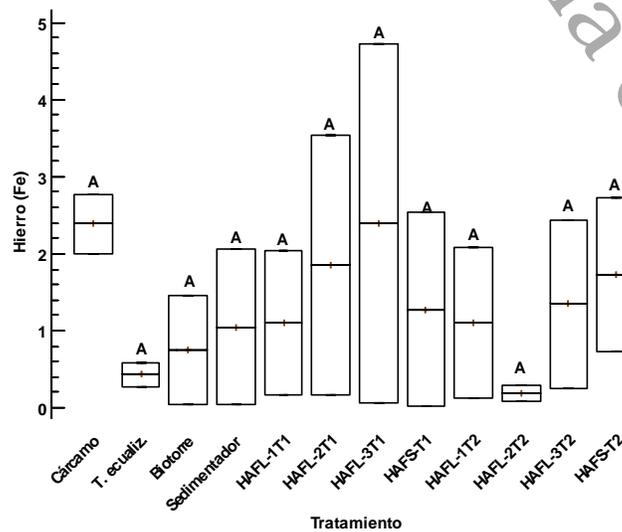


Figura 15. Valores medianos de la variable hierro (mg/L) (N=6). Letras diferentes indican diferencias significativas estadísticamente.



Manganeso. El análisis de Kruskal-Wallis para hierro (mg/L) encontró que el valor-P es menor que 0.05 por lo que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Encontrando que el valor mediano más bajo se encuentra en el tratamiento HAFS-T2 con 0.2 mg/L (Q1=0.1, Q3=0.3), seguido del tratamiento HAFS-T1 con 0.45 mg/L (Q1=0, Q3=0.9) y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en el tratamiento cárcamo con 2.75 mg/L (Q1=0, Q3=5.5) como se observa en la figura 16.

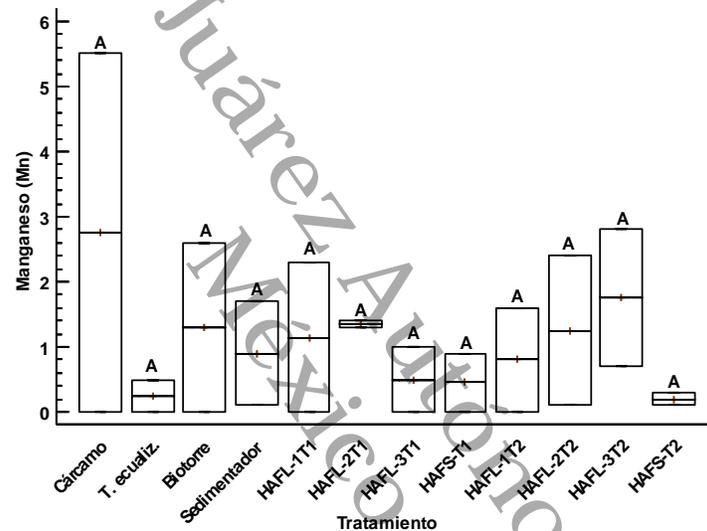


Figura 16. Valores medianos de la variable manganeso (mg/L) (N=6). Letras diferentes indican diferencias significativas estadísticamente.

Níquel. El análisis de Kruskal-Wallis para níquel (mg/L) encontró que el valor-P es menor que 0.05 por lo que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Encontrando que el valor mediano más bajo se encuentra en el tratamiento HAFL-2T2 con 0.025 mg/L (Q1=0, Q3=0.05), seguido del tratamiento HAFL-3T1 con 0.03 mg/L (Q1=0.03, Q3=0.03) y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en el tratamiento cárcamo con 0.225 mg/L (Q1=0.03, Q3=0.42) como se observa en la figura 17.

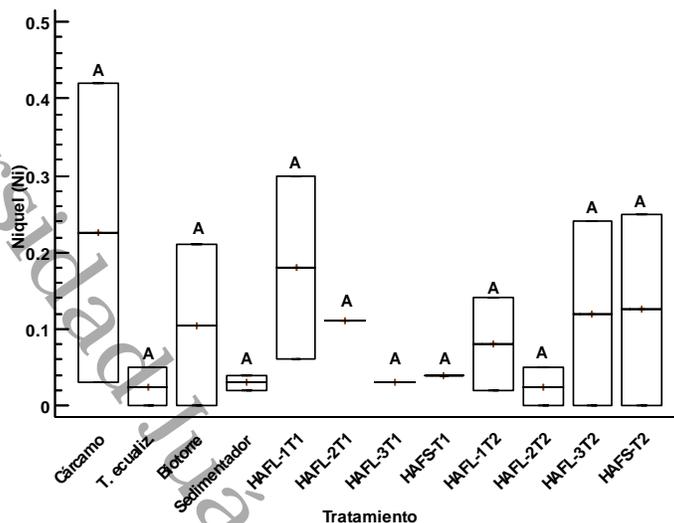


Figura 17. Valores medianos de la variable níquel (mg/L) (N=6). Letras diferentes indican diferencias significativas estadísticamente.

Cromo VI. El análisis de Kruskal-Wallis para cromo VI (mg/L) encontró que el valor-P es menor que 0.05 por lo que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Encontrando que el valor mediano más bajo se encuentra en el tratamiento tanque ecualizador con 0.004 mg/L (Q1=0, Q3=0.008), seguido del tratamiento biotorre con 0.0125 mg/L (Q1=0.003, Q3=0.022) y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en el tratamiento cárcamo con 0.069 mg/L (Q1=0.039, Q3=0.099) como se observa en la figura 18.

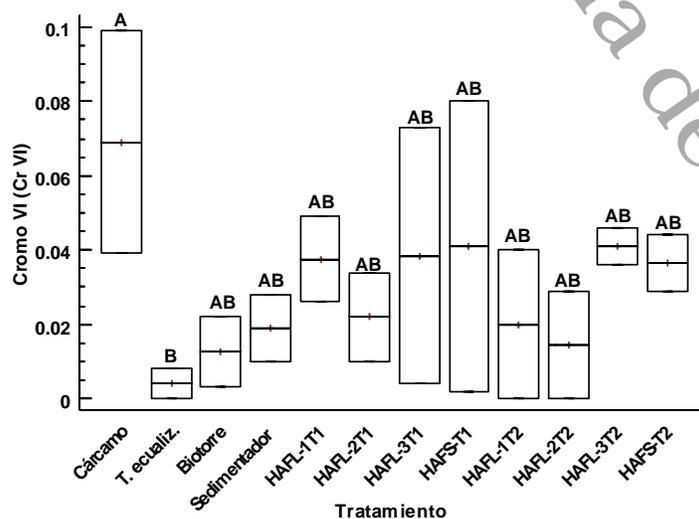


Figura 19. Valores medianos de la variable cromo VI (mg/L) (N=6). Letras diferentes indican diferencias significativas estadísticamente.



Cobre. En la figura 20 se puede observar que durante las primeras unidades del tren de tratamiento la presencia de este metal es nula, sin embargo, a partir de la unidad HAFL-2T1 es cuando se puede visualizar un incremento en la concentración inicial de este contaminante. Esto se puede deber generalmente a los factores externos que rodean al tren de tratamiento o bien a una falta de mantenimiento en los reactores ocasionando que los contaminantes absorbidos por la vegetación retornen al degradarse en el mismo sitio. Pese a esto, el análisis encontró que el valor-P es menor que 0.05 por lo que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza obteniendo que el valor mediano más bajo para este metal se encuentra en el tratamiento HAFL-1T2 con 0.015 mg/L (Q1=0, Q3=0.03), seguido del tratamiento HAFL-3T2 con 0.04 mg/L (Q1=0.02, Q3=0.06) y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en el tratamiento HAFL-T2 con 0.495 mg/L (Q1=0.27, Q3=0.72).

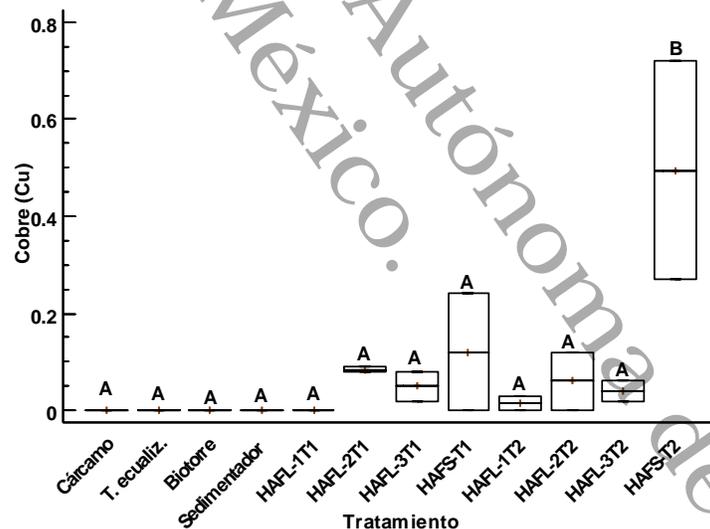


Figura 20. Valores medianos de la variable cobre (mg/L) (N=6). Letras diferentes indican diferencias significativas estadísticamente.

Temperatura. El análisis ANOVA para el parámetro temperatura (°C) comparo los promedios de los 12 tratamientos encontrando que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los promedios. El promedio más bajo se encuentra en el tratamiento HAFL-2T2 con 23.15 ± 0.98 °C, seguido del tratamiento HAFL-3T2 con 23.18 ± 1.04 °C y el promedio más alto es el tratamiento cárcamo con 25.67 ± 0.70 °C como se muestra en la figura 21.

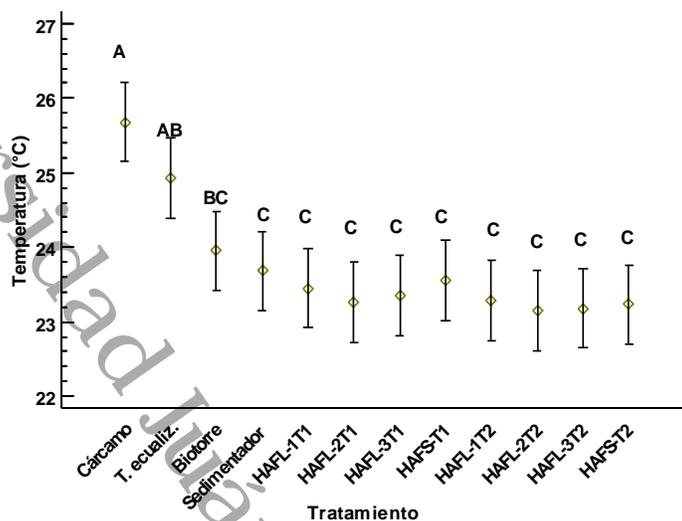


Figura 21. Valores promedio de la variable temperatura (°C) (N=6). Letras diferentes indican diferencias significativas estadísticamente.

Sólidos disueltos totales. El análisis ANOVA para el parámetro SDT (mg/L) comparo los promedios de los 12 tratamientos encontrando que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los promedios. El promedio más bajo se encuentra en el tratamiento “tanque ecualizador” con 463.83 ± 69.19 mg/L, seguido del tratamiento “biotorre” con 487.33 ± 69.15 mg/L y el promedio más alto es el tratamiento “cárcamo” con 663.33 mg/L ± 68.6 como se muestra en la figura 22.

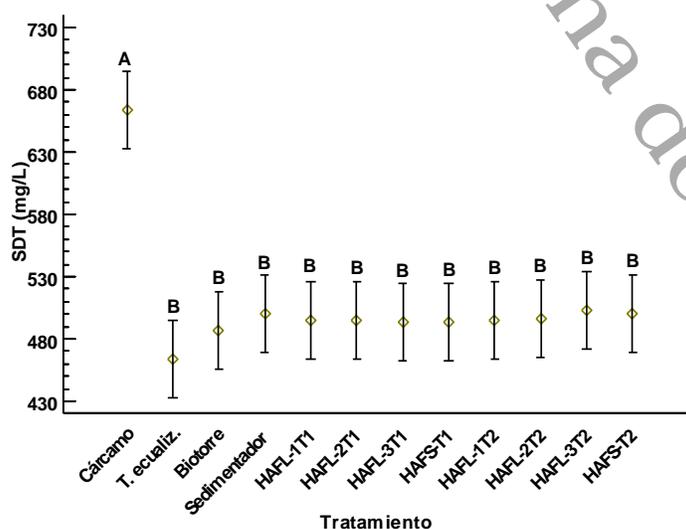


Figura 22. Valores promedio de la variable SDT (mg/L) (N=6). Letras diferentes indican diferencias significativas estadísticamente.



6.1 Eficiencias de remoción en las unidades del tren de tratamiento.

Estrada (2021) realizó una modificación de la PTAR en donde diseñó la segunda etapa del tren siendo esta implementada por el parque en el mismo año, previamente a la construcción de la etapa la planta no cumplía con ninguno de los LMP establecidos por normatividad por lo que el diseño anterior no era apto para tratar las aguas residuales generadas. Durante las campañas de monitoreo el efluente paso a través de un sistema de tratamiento híbrido (biofiltro-humedales artificiales) y la vegetación que se encuentra en la segunda fase del tratamiento son la *Potenderia cordata*, *Sagittaria lancifolia*, *Thypha dominguensis* y *Thalia geniculata*.

En la tabla 4 se visualizan los resultados obtenidos durante la evaluación de los parámetros fisicoquímicos, en donde para el tren 1 se obtuvieron las siguientes eficiencias de remoción de 73.2% en color, 43% en turbiedad, 25.5% en SDT, 74.5% en DQO y 52.4% en OD, mientras que, para el tren 2 se tuvo un 79.5% en color, 88.3% en turbiedad, 24.6% en SDT, 57.5% en DQO y -9.9% en OD. Durante la evaluación de los parámetros fisicoquímicos se encontró que el tren 1 trabaja mejor que el tren 2 para los parámetros de SDT, DQO y OD mientras que para el color y turbiedad el que presenta mejores resultados de remoción es el tren 2 obteniendo resultados mayores a comparación del tren 1.

Mientras que en la tabla 5 se observan los resultados de los metales durante la evaluación, encontrando que para el tren 1 se obtuvieron los siguientes resultados de -123.1% para zinc, 69.2% para aluminio, 46.3% para hierro, 40.6% para cromo VI, 83.6% para manganeso, 82.2% para níquel y 0% cobre. Mientras que para el tren 2 se obtuvo eficiencias de -94.9% para zinc, 53.8% para aluminio, 27.7% para hierro, 47.1% para cromo VI, 92.7% para manganeso, 44.4% para níquel y 0% cobre. En la evaluación de los parámetros fisicoquímicos se encontró que el tren 1 trabaja mejor que el tren 2 para los parámetros de aluminio, hierro y níquel mientras que, para zinc, cromo VI y manganeso el que presenta mejores resultados de remoción es el tren 2 obteniendo resultados mayores a comparación del tren 1.



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



Tabla 4. Eficiencia de remoción de parámetros fisicoquímicos

Unidad	Color (UC)	ER (%)	Turb (UNT)	ER (%)	SDT (mg/L)	ER (%)	DQO (mg/L)	ER (%)	OD (mg/L)	ER (%)
Cárc. – T. ec	2287		21.4		663		306		3.32	
T. ec – Sedimentador	725	68.3	4.3	79.9	500	24.6	163	46.7	4.58	-38.0
HAFL-1T1	491	32.3	3.4	20.9	495	0.9	198	-21.5	4.57	0.2
HAFL-2T1	445	9.5	1.7	50.0	495	0.04	104	47.7	4.26	6.8
HAFL-3T1	565	-27.1	3.9	-129.4	494	0.3	79	24.2	3.49	18.1
HAFS-T1	612	-8.3	12.2	-212.8	494	-0.1	78	0.6	1.58	54.7
E. TOTAL		73.2		43.0		25.5		74.5		52.4
HAFL-1T2	451	37.8	2.5	41.9	495	1.1	85	48.2	4.53	1.1
HAFL-2T2	460	-1.9	2.2	12.0	496	-0.4	56	33.7	4.20	7.3
HAFL-3T2	420	8.7	2.7	-22.7	503	-1.4	86	-52.7	3.83	8.8
HAFS-T2	468	-11.5	2.5	7.4	500	0.6	130	-52.0	3.65	4.7
E. TOTAL		79.5		88.3		24.6		57.5		-9.9

Tabla 5. Eficiencia de remoción de metales

Unidad	Zinc (mg/L)	ER (%)	Aluminio (mg/L)	ER (%)	Hierro (mg/L)	ER (%)	Cromo VI (mg/L)	ER (%)	Manganeso (mg/L)	ER (%)	Níquel (mg/L)	ER (%)	Cobre (mg/L)	ER (%)
Cárc. – T.ec	0.195		0.065		2.385		0.069		2.75		0.225		0	
T. ec – Sedimentador	0.65	-233.3	0.025	61.5	1.045	56.2	0.019	72.5	0.9	67.3	0.03	86.7	0	0.0
HAFL-1T1	0.155	76.2	0.075	-200.0	1.1	-5.3	0.0375	-97.4	1.15	-27.8	0.18	-500.0	0	0.0
HAFL-2T1	0.405	-161.3	0.015	80.0	1.855	-68.6	0.022	41.3	1.35	-17.4	0.11	38.9	0.085	0.0
HAFL-3T1	0.355	12.3	0.03	-100.0	2.385	-28.6	0.0385	-75.0	0.5	63.0	0.03	72.7	0.05	41.2
HAFS-T1	0.435	-22.5	0.02	33.3	1.28	46.3	0.041	-6.5	0.45	10.0	0.04	-33.3	0.12	-140.0
E. TOTAL		-123.1		69.2		46.3		40.6		83.6		82.2		0.0
HAFL-1T2	0.255	60.8	0.04	-60.0	1.105	-5.7	0.02	-5.3	0.8	11.1	0.08	-166.7	0.015	0.0
HAFL-2T2	0.475	-86.3	0.02	50.0	0.19	82.8	0.0145	27.5	1.25	-56.3	0.025	68.8	0.06	-300.0
HAFL-3T2	0.505	-6.3	0.03	-50.0	1.35	-610.5	0.041	-182.8	1.75	-40.0	0.12	-380.0	0.04	33.3
HAFS-T2	0.38	24.8	0.03	0.0	1.725	-27.8	0.0365	11.0	0.2	88.6	0.125	-4.2	0.495	-1137.5
E. TOTAL		-94.9		53.8		27.7		47.1		92.7		44.4		0.0



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



Asimismo, se observó que durante la etapa de los trenes de HA en serie existen eficiencias de remoción con números negativos en algunas unidades, lo cual expresa que existe un corto circuito en el tratamiento, el cual puede ser originado por obstrucción y/o asolvamiento en las canaletas de los HA lo que disminuye notoriamente la eficiencia con la que estos pueden trabajar durante el tratamiento de las aguas residuales.

Unas de las posibles causas se pueden deber a un escaso mantenimiento de las unidades de tratamiento. Estudios realizados han demostrado que la falta de mantenimiento dentro de las unidades es uno de los principales problemas que presentan las PTAR a través de sus evaluaciones. Generalmente esto se debe a una falta de personal capacitado con conocimientos básicos para poder operar y mantener las diferentes unidades que se tienen en las plantas y otra posible razón es la falta de recursos, lo que demuestra una falta de sostenibilidad (Mercado, Cossío y Copa, 2020).

Por lo tanto, es importante mantener las unidades de la PTAR en condiciones óptimas para asegurar un tratamiento eficaz, por ello se recomienda que se establezcan una serie de actividades semanales, mensuales y anuales con el fin de asegurar un buen funcionamiento de las unidades durante el tratamiento del efluente. Algunas de las actividades de mantenimiento que se recomiendan a seguir son las siguientes: remover sólidos de mayor volumen en la rejilla del cárcamo con el fin de mantenerla siempre limpia, despejar de materia orgánica o material de obstrucción, limpiar de desazolvamiento la estructura de PVC de las unidades, realizar una poda exhaustiva de la vegetación seca y/o muerta de los reactores en los trenes de HA, realizar una limpieza de infraestructura de cada una de las unidades y verificar que el TRH y nivel de operación sea el correcto en cada unidad.

Durante la investigación se observó que la concentración de cobre (Cu) no estaba presente en la entrada del efluente al tren de tratamiento, pero al finalizar el tratamiento se observa un incremento en su concentración y esto sucede igualmente con el zinc (Zn) conforme el efluente pasa a través del tratamiento su concentración va incrementando. Esto se puede deber a que el Cu y Zn están altamente asociados con la materia orgánica y los humedales tienen una tendencia de altas tasas de deposición de materia orgánica debido a su fijación de carbón a través de la fotosíntesis y su lenta disposición debido a las condiciones anaeróbicas dominantes, es decir, que



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



los sedimentos con el pasar del tiempo presentaran un alto contenido de materia orgánica que ira enriqueciendo la presencia de los metales (Elhaj, Peck y Xu, 2021). Por lo que es importante realizar mantenimientos correctivos y preventivos a los HA con el fin de prevenir la acumulación de los contaminantes.

Un estudio realizado ha determinado que la especie *Potenderia cordata* logra tolerar la toxicidad de los metales pesados ya que posee un gran potencial de fitorremediación en humedales, sin embargo, aún no se logra determinar cómo confrontan el estrés de los metales pesados, aunque esto no ha sido contraproducente ya que logra adaptarse a los niveles de exposición manteniendo una alta acumulación de biomasa y tasas fotosintéticas logrando remover el 93.3% de cadmio (Xin, et al., 2020), así mismo esta especie también es muy eficiente en la remoción de color y DQO obteniendo resultados de 95.44% y 95.3% respectivamente (Acosta, et al., 2016).

La especie *Sagittaria lancifolia* cuenta con pocos estudios en el tratamiento de aguas residuales y generalmente es utilizada en los tratamientos secundarios y terciarios (HA) para la eliminación de nutrientes. Esta especie al ser una vegetación pequeña ayuda a que su manejo y transporte sea más accesible lo que ayuda a su vez a reducir los costos de construcción, operación y mantenimiento en las unidades. Generalmente esta es utilizada en la remoción de contaminantes básicos de aguas residuales obteniendo una remoción del 89.8% para color, 74,4% para turbidez y 95.7% para DQO para flujos libres, mientras que para flujo subsuperficial ha dado resultados de 95,9% en color, 89,4% en turbiedad y 87.9% en DQO (Magaña y López, 2023).

En cuanto a la especie *Thypha domingensis* al tener un crecimiento rápido y una biomasa elevada ayuda a elevar su capacidad para almacenar nutrientes. En la remoción de metales pesados han logrado resultados de entre el 16% al 46% en el caso del Cr y del 68 al 93% en el caso del Cu, en donde su absorción era más eficaz conforme la concentración del contaminante elevaba (Oggero, et al., 2021). Para el caso de contaminantes básicos esta especie ha obtenido remociones del 97.1% para turbiedad, 83.4% para color, 97.8% para DQO, 97.5% para DBO₅, y 97.7% para SST (Solís et al., 2016).

Y finalmente, la especie *Thalia geniculata* es considerada como una planta ornamental por lo que tiene una alta absorción de nutrientes y contaminantes; esta característica se demuestra



gracias a su alto crecimiento en condiciones eutróficas y a su alta producción de biomasa. Esta vegetación ha logrado remociones del 33.22% de nitrato, 93.04% de nitrito, 95.66% de fosfato, 97.27% de DQO y 80.27% para DBO_5 para el quinto día de retención hidráulica (TRH) del agua residual y resultados del 90.13% para turbiedad y un 83.08 para SST%, con un TRH de tres días (Vergara, et al., 2023).

6.2 Evaluación hidráulica del sistema de tratamiento.

Para realizar la evaluación sistema es indispensable conocer el área de cada unidad del sistema, por lo cual se llevó a cabo un levantamiento de las dimensiones de cada unidad. En la tabla 6 se observan los resultados obtenidos durante la evaluación hidráulica obteniendo el TRH en horas para cada uno de los caudales encontrados durante la evaluación del gasto de operación y en la última columna se colocaron los criterios de diseño (C.D) establecidos nacional e internacionalmente para cada una de las unidades.

Durante la evaluación se observa que la mayoría de las unidades cumple con los C.D establecidos, sin embargo, existen algunas que sobrepasan o están por debajo de estos, como es en el caso de la unidad “cárcamo” en donde si se trabaja con un Q_{min} rebaza el tiempo indicado, para este C.D es necesario que los caudales estén trabajando por debajo del criterio establecido ya que al tener un TRH mayor del 0.75 significaría tener más tiempo estancadas las aguas tratadas durante esta unidad lo que podría ocasionar algunas fallas en las demás unidades.

Por otro lado, las unidades “bitorre y sedimentador” se encuentran por debajo del C.D establecido en el diseño para el Q_{med} y el $Q_{maxinst}$ lo que significa que las aguas residuales no están pasando el tiempo necesario dentro de las unidades y por lo tanto no se está llevando a cabo completamente la reducción de carga orgánica y la separación de sólidos y material suspendido en las aguas lo que afecta la siguiente etapa del tratamiento. El único caudal que cumple con este C.D es el Q_{min} por lo que es recomendable checar el TRH establecido en el diseño y construcción de estas unidades.

Seguidamente, las unidades de los trenes de HA tienen una falta de cumplimiento de su C.D cuando trabajan con el $Q_{maxinst}$ teniendo un TRH por debajo de lo establecido. Al igual que las unidades anteriormente mencionadas es necesario que el TRH esté por encima de lo establecido



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



para que las unidades puedan absorben y remover los contaminantes obteniendo mayores eficiencias de tratamiento de las aguas residuales. Finalmente, durante la evaluación se encontró que la unidad “T. Ecuador” es la única que cumple el C.D para los tres tipos de caudales analizados estando todos por arriba de lo establecido.

Tabla 6. Evaluación hidráulica.

Proceso	Área (m ²)	Tirante	Volumen	TRH (Hr)	TRH (Hr)	TRH (Hr)	C. D. (Hr)
		Total (m)	(m ³)	Qmed	Qmin	Qmaxinst	
Cárcamo	1.8	2.8	4.9	0.42	1.24	0.26	0.75
T. Ecuador	9.6	2.7	25.9	2.19	6.55	1.39	0.42
Biotorre	11.9	1	11.9	1.00	3.00	0.63	3
Sedimentador	16.6	1.85	30.7	2.60	7.76	1.64	4.5
HAFL-1	19.9	0.6	12.0	2.02	6.04	1.28	2
HAFL-2	19.9	0.6	12.0	2.02	6.04	1.28	2
HAFL-3	19.9	0.6	12.0	2.02	6.04	1.28	2
HAFS-1	19.9	0.6	12.0	2.02	6.04	1.28	2



7. Conclusiones

- La planta de tratamiento de aguas residuales presento un comportamiento discontinuo de operación del periodo de monitoreo obteniendo un Q_{min} de 1.1 L/s, un Q_{med} de 3.3 L/s y un $Q_{maxinst}$ de 5.2 L/s para un gasto operacional horario y un Q_{min} de 2.8 L/s, un Q_{med} de 3.3 L/s y un $Q_{maxinst}$ de 4.1 L/s para un gasto operacional diario.
- La PTAR tiene un cumplimiento ambiental satisfactorio obteniendo que de los 15 parámetros evaluados durante la caracterización del efluente 11 (73.3%) de ellos están por debajo de lo establecido, mientras que los otros 4 (23.7%) sobrepasan el límite lo que indica que el sistema pese a ser eficiente tiene ciertas irregularidades por lo que puede atraer en el futuro sanciones de acuerdo con lo estipulado por la normatividad mexicana vigente.
- El tren 1 de HA presento mejores resultados en la remoción de contaminantes y metales pesados teniendo una remoción de 73.2% en color, 43% en turbiedad, 25.5% en SDT, 74.5% en DQO y 52.4% en OD, mientras que para los metales pesados dio eficiencias de remoción de 69.2% para aluminio, 46.3% para hierro, 40.6% para cromo VI, 83.6% para manganeso y 82.2% para níquel.
- La evaluación hidráulica de la PTAR es favorable para las unidades del tren de tratamiento obteniendo resultados con un Q_{med} de TRH de 0.42 h para el carcamo, 2.19 h para el tanque ecualizador, 1 h para biotorre, 2.6 h para el sedimentador secundario y 2.02 h para los trenes de tratamiento. Por lo tanto, cumplen con los C.D.



8. Referencias

- Acosta, C. M., Silván, R. S., Ocaña, G. L., Margulis, R. G. B., & Cerino, M. J. R. (2016). Tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales tropicales en Tabasco, México. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias: CIBA*, 5(10), 2.
- 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.
- Briones-Sánchez, G. & García-Casillas, I. (2014). Aforo del Agua en Canales y Tuberías. Editorial Trillas-Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 100 p. ISBN: 978-968-24-7488-0. Tercera edición, reimpresso 2014.
- Carrera-Muyo, J. & Suárez-Ojeda, M. E. (2019). *Aguas residuales industriales en Iberoamérica*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).
- CONAGUA (2019). Libro 26. Diseño de PTARM: Pretratamiento y tratamiento primario. Libro 28. Diseño de PTARM: Reactores anaerobios de flujo ascendente. Libro 30. Diseño de PTARM: Humedales Artificiales. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento.
- Cortés-Martínez, F., Treviño-Cansino, A., Espinoza-Fraire, A. T., Sáenz-López, A., Alcortaga-García, M. A., González-Barrios, J. L., Martínez-Rojas, R., & de la Cruz-Acosta, F. J. (2017). Optimización en el diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales integrado por tres lagunas de estabilización. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 8(4), pp. 135-155.



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



- Crites, R. y Tchobanoglous, G. (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Santafé de Bogotá, Colombia. McGraw-Hill.
- Díaz Rodríguez, Y., Mendiola Lau, L., González Suárez, A., Navarro Sosa, Y., Acosta Díaz, S., & Chao Reyes, C. (2022). Biofiltración de efluentes líquidos de la industria petrolera con materiales naturales. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 43(1), 12-24.
- El Saidy, N., El Habashi, N., Saied, M., Abdel-Razek, A., Mohamed, R., Abozeid, A., El Midany, S. y Abouelenien, F. (2020). Wastewater remediation of heavy metals and pesticides using rice straw and/or zeolite as bioadsorbents and assessment of treated wastewater reuse in the culture of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(12).
- Elhaj Baddar, Z., Peck, E., & Xu, X. (2021). Temporal deposition of copper and zinc in the sediments of metal removal constructed wetlands. *PloS one*, 16(8).
- Estrada- Pérez, N, Gerónimo-López, M.A., Pampillón-González, L., Ortiz-Alcocer, V. y López-Ocaña, G (26-28 de mayo de 2021). *Evaluación de un sistema de tratamiento de agua residual industrial que fue optimizado vía humedales artificiales* [Sesión de conferencia]. Congreso Internacional de Investigación Academia Journals, Quintana Roo, México.
- Estrada-Pérez, N. (2021). *Optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales de un parque industrial* [Tesis de maestría]. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- 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.
- García-Rodríguez, G., Sandoval-Rojas, M. E., Corona-Romano, E. R., Jesús-de la Rosa, R. E. D., Martínez-Romay, B., García-Gil, E., & García-Gil, E. (2021). Aplicación de dos



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



metodologías para la evaluación de la calidad del agua de cuerpos superficiales destinados a la pesca en el sur del estado de Veracruz, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 37.

- 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.
- Hamad, M. T. (2020). Comparative study on the performance of *Typha latifolia* and *Cyperus Papyrus* on the removal of heavy metals and enteric bacteria from wastewater by surface constructed wetlands. *Chemosphere*, 260.
- Hernández-Salazar, A. B., Moreno-Secena, J. C., & Sandoval-Herazo, L. C. (2018). Tratamiento de aguas residuales industriales en México: Una aproximación a su situación actual y retos por atender. *RINDERESU*, 2(1-2), pp. 75-87.
- Ibrahim, C., Hammami, S., Khelifi, N., Pothier, P., & Hassen, A. (2020). The effectiveness of activated sludge procedure and UV-C254 in Norovirus inactivation in a Tunisian industrial wastewater treatment plant. *Food and Environmental Virology*, 12(3), pp. 250-259.
- Jacobo-López, A., Esparza-Soto, M., Lucero-Chávez, M. y Fall, C. (2019). Tratamiento de un agua residual industrial a temperatura psicrófila con un reactor UASB. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 35(4), pp. 905-915.
- Karri, R. R., Ravindran, G., & Dehghani, M. H. (2021). Wastewater—sources, toxicity, and their consequences to human health. In *Soft computing techniques in solid waste and wastewater management* (pp. 3-33). Elsevier.
- Ley Federal de Derechos Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales. (2023).



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



- Magaña-Flores, A., & López-Ocaña, G. (2023). Domestic wastewater treated with *Sagittaria latifolia* in constructed wetlands. *Dyna*, 90(226), 27-35.
- Márquez-Reyes, J., Valdés-González, A., García-Gómez, C., Rodríguez-Fuentes, H., Gamboa-Delgado, J y Luna-Olvera, H. (2020). Evaluación de los efectos sinérgicos de cromo y plomo durante el proceso de fitorremediación con berro (*Nasturtium officinale*) en un humedal artificial. *Biotecnia*, 22(2), pp. 171-178.
- Mercado, A., & de Lourdes-Blanco, M. (2003). Las Normas Oficiales Mexicanas Ecológicas para la industria mexicana: alcances, exigencia y requerimientos de reforma. *Gestión y política pública*, 12(1), 93-128.
- Mercado-Guzmán, Á.R., Cossío-Grágeda, C.X., & Copa-Mitma, M. (2020). Eficiencia vinculada a la operación y mantenimiento de pequeñas plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas en Cochabamba, Bolivia. *Acta Nova*, 9(4), 524-542.
- Metcalf & Eddy. (1996). *Ingeniería de Aguas Residuales, Tratamiento y Reutilización* McGraw-Hill: México.
- NOM-001-SEMARNAT-2021. (2022). Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- 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), pp. 16 - 51.
- Oggero, A. S., Nakayama, H. D., Ávalos, C. R., Garcia, I. C., Benítez, J. V., Ayala, J. & Peralta, I. (2021). Eficiencia de la absorción de cobre (Cu) y cromo (Cr), una propuesta de fitorremediación de efluentes mediada por *Typha domingensis*. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 26(2), 100-113.



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



- Ordóñez-Ramírez, V., Palacios-Limones, C., López-Vargas, A y Suárez-Escobar, I. (2019). Optimización del sistema de tratamiento fisicoquímico de una estación depuradora de aguas residuales de bebidas gaseosas. *Industrial Data*, 22(2), pp. 199-212.
- 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).
- Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., & Gallo, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18.
- Saeed, T., & Khan, T. (2019). Constructed wetlands for industrial wastewater treatment: alternative media, input biodegradation ratio and unstable loading. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(2).
- Saeed, T., Alam, M. K., Miah, M. J., & Majed, N. (2021). Removal of heavy metals in subsurface flow constructed wetlands: Application of effluent recirculation. *Environmental and Sustainability Indicators*, 12.
- Solís, R., López, G., Bautista, R., Hernández, J. & Romellón, M. (2016). Evaluación de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de contaminantes de aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación macrófita. *Interciencia*, 41(1).
- Sucari-Laura, A. (2022). *Evaluación de la eficiencia de remoción de metales pesados de efluentes mineros a través de humedales artificiales empleando scirpus californicus (totora) y festuca dolichophylla (ichu), en el Distrito de Morococha, Yauli, Junín*. [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.
- Verdín, E., Topete, N., Galaviz, I., Ponce, A. y Soriano E. (2016). Legislación y la cultura del agua: análisis correlacional en Nayarit. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias: CIBA*, 5(9), pp. 115-1140.



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental



- Vergara-Florez, V., Mieles-Galindo, J., Nani, G., Sandoval-Herazo, M., & Sandoval Herazo, L. C. (2023). Treatment Wetland with *Thalia geniculata* for Wastewater Depuration in the Department of Sucre, Colombia. *Processes*, 11(9).
- Vidal-Álvarez, M. (2019). Tratamiento de aguas residuales en México: problemáticas de salud pública y oportunidades de uso de ecotecnologías sustentables. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable*, 3(1-2), 41-58.
- Xin, J., Ma, S., Li, Y., Zhao, C., & Tian, R. (2020). *Pontederia cordata*, an ornamental aquatic macrophyte with great potential in phytoremediation of heavy-metal-contaminated wetlands. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 203.
- Zhang, X., Wang, T., Xu, Z., Zhang, L., Dai, Y., Tang, X. & Tai, Y. (2020). Effect of heavy metals in mixed domestic-industrial wastewater on performance of recirculating standing hybrid constructed wetlands (RSHCWs) and their removal. *Chemical Engineering Journal*, 379.
- Zhou, Y., Meng, J., Zhang, M., Chen, S., He, B., Zhao, H. & Wang, T. (2019). Which type of pollutants need to be controlled with priority in wastewater treatment plants: traditional or emerging pollutants?. *Environment international*, 131.



9. Anexos

9.1 Memoria fotográfica

Visita preliminar e identificación de las unidades del sistema.



Figura A1. Visita de reconocimiento a la PTAR.



Figura A2. Cárcamo.



Figura A3. Tanque ecualizador.



Figura A4. Biotorre.



Figura A5. Sedimentador secundario



Figura A6. Trenes de humedales artificiales.



Toma de muestras.



Figura A7. Toma de muestra cárcamo.



Figura A8. Toma de muestra tanque equalizador.



Figura A9. Toma de muestra biorre.



Figura A10. Toma de muestra s. secundario.



Figura A11. Toma de muestra humedal artificial.



Figura A12. Toma de muestras.



Caracterización fisicoquímica.



Figura A13. Caracterización de parámetros básicos.



Figura A14. Caracterización de oxígeno disuelto.



Figura A15. Caracterización de color.



Figura A16. Caracterización de DQO.



Figura A17. Muestras para análisis de metales.



Figura A18. Caracterización de metales.



9.2 Alojamiento de tesis

Título de la tesis:	Remoción de la carga orgánica y metales en un sistema de tratamiento de aguas industriales.
Autor(a) de la tesis:	Erika Citlally Alonso Mendoza
ORCID:	https://orcid.org/0009-0009-6300-7801
Resumen de la tesis	<p>El siguiente trabajo tuvo como objetivo evaluar la remoción de contaminantes básicos y metales pesados en un proceso de tratamiento de agua residual industrial con tecnología híbrida integrada por filtros biológicos y humedales artificiales en serie. Para ello, se realizaron campañas de monitoreo con una duración de un año en los meses de diciembre de 2022, mayo y noviembre de 2023; cada campaña tuvo una durabilidad de 7 días a fin de lograr caracterización volumétrica y fisicoquímica de la calidad del agua en el afluente y efluente de cada unidad de proceso y así lograr determinar la eficiencia de remoción parcial y total del tren de tratamiento y su cumplimiento ambiental.</p> <p>Los resultados mostraron que la planta de tratamiento de aguas residuales tiene un comportamiento discontinuo de operación obteniendo un Qmed de 3.3 L/s para un gasto operacional horario, por lo que rebasa los criterios de diseño establecidos por normatividad. Asimismo, tiene un cumplimiento ambiental satisfactorio cumpliendo un 73.3% de los límites permisibles establecidos por la normatividad mexicana, sin embargo, presenta ciertas irregularidades el cual puede atraer problemas en algún futuro. Finalmente, los resultados obtenidos demostraron que el tren 1 de HA presenta mejores resultados en la remoción de contaminantes y metales pesados teniendo una remoción de 73.2% en color, 43% en turbiedad, 25.5% en SDT, 74.5% en DQO y 52.4% en OD.</p>
Palabras clave:	Tratamiento híbrido, biofiltro, humedales artificiales, evaluación, cumplimiento ambiental.