



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISION ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS POR UN
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO LIBRE CON *Echinodorus*
cordifolius.**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTA:

WILLIAMS FRANCISCO PÉREZ MARTÍNEZ

DIRECTOR:

DR. GASPAR LÓPEZ OCAÑA

CODIRECTOR:

DR. ROBERTO RODRÍGUEZ BASTARMÉRITO

Villahermosa, Tabasco, Septiembre de 2025.

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, el día 05 del mes septiembre del año 2025, el que suscribe Williams Francisco Pérez Martínez, alumno del Programa de Ingeniería Ambiental con número de matrícula 192G24041, adscrito a la División Académica de Ciencias Biológicas, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del título de Licenciatura en Ingeniería Ambiental y titulada " TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS POR UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO LIBRE CON *Echinodorus cordifolius* " dirigida por el Dr. Gaspar López Ocaña y el Dr. Roberto Rodríguez Bastarmérito.

DECLARO QUE:

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

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

Villahermosa, Tabasco a 05 del mes septiembre de 2025.

Williams Francisco
Pérez Martínez

Williams Francisco Pérez Martínez
Nombre y firma del tesista



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

Villahermosa, Tab., a 21 de Agosto de 2025

ASUNTO: Autorización de Modalidad de Titulación

C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
P R E S E N T E

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza al **C. WILLIAMS FRANCISCO PÉREZ MARTÍNEZ** egresado de la Lic. en **ING. AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis denominado: **"TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS POR UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO LIBRE CON *Echinodorus cordifolius*"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E


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

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



DIRECCIÓN

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



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**



AGOSTO 21 DE 2025

**C. WILLIAMS FRANCISCO PÉREZ MARTÍNEZ
PAS. DE LA LIC. EN ING. 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 denominado: **"TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS POR UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO LIBRE CON *Echinodorus cordifolius*"**, asesorado por el Dr. Gaspar López Ocaña y Dr. Roberto Rodríguez Bastarmérito sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por la Dra. Melina del Carmen Uribe López, Mtro. David Guerrero Zarate, Dr. Gaspar López Ocaña, MIPA. Elías de la Cruz Luna y M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar.

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

**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR**

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



20 de agosto de 2025

C. WILLIAMS FRANCISCO PEREZ MARTINEZ
Pasante de la Lic. en Ingeniería Ambiental

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

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones, el índice de similitud y el reporte de originalidad obtenido a través de la revisión en la plataforma iThenticate de su trabajo recepcional **TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS POR UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO LIBRE CON *Echinodorus cordifolius***.

OBSERVACIONES:

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

RESULTADO DE SIMILITUD	2 %
	51 páginas y 14267 palabras

Finalmente, se le solicita al **C. WILLIAMS FRANCISCO PEREZ MARTINEZ**, integrar en la versión final del trabajo recepcional, este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate.

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

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

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

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



DIRECCIÓN

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




2% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Coincidencias menores (menos de 16 palabras)
- ▶ Abstract
- ▶ Trabajos entregados

Fuentes principales

- 2%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad




N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitan distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

- 2%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

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

1	Internet	ri.ujat.mx	<1%
2	Internet	ciqa.org.mx	<1%
3	Internet	dspace.unica.cu	<1%
4	Internet	integra.cimav.edu.mx	<1%
5	Internet	revistas.ujat.mx	<1%
6	Internet	1library.co	<1%
7	Internet	silvotips	<1%
8	Internet	www.ujat.mx	<1%
9	Internet	www.scielo.org.mx	<1%

Carta de Cesión de Derechos

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

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

Villahermosa, Tabasco a 26 de Agosto 2025.

COLABORADORES

Williams Francisco
Pérez Martínez

Williams Francisco Pérez Martínez


Gaspar López Ocaña


Roberto Rodríguez Bastarmérito

TESTIGOS


M. I. Nancy Estrada Pérez


Ing. Pedro Luis García Martínez

Agradecimientos

Al Dr. Gaspar López Ocaña por abrirme las puertas para ser parte del Laboratorio de Tecnología del Agua e invitarme a ser tesis ahí, por apoyarme y guiarme durante el transcurso de mi proyecto de investigación, brindarme sus conocimientos y tiempo cuando necesitaba de su ayuda y por proporcionarme las herramientas necesarias para mi proyecto, y sobre todo su amistad y la confianza que deposito en mí.

A mis padres, Williams Rubén Pérez Godoy y Juana Alejandra Martínez Escalante, y a mi hermanito, Ángel Rubén Pérez Martínez, por darme brindarme incondicionalmente todo su apoyo y tiempo posible para poder hacer y terminar mi proyecto de investigación, de siempre aconsejarme y brindarme todo su amor, y sobre todo a mis padres por los sacrificios que hicieron para que yo pudiera terminar la universidad.

A la Mtra. Nancy Estrada Pérez, por brindarme su amistad, su tiempo, sus conocimientos y su apoyo durante el transcurso de mi proyecto, le estoy agradecido. A mis sinodales, Dra. Melina del Carmen Uribe del Carmen, Dr. David Guerrero Zarate, MIPA. Elías de la Cruz Luna y MC. Carlos Alberto Torres Balcázar, por dedicarme de su tiempo para la revisión mi tesis.

A mis amigos, Jesús Humberto Hernández Solís, José Ignacio Martínez Santiago, Pedro Luis García Martínez y Anayeli Valencia Álvarez, con quienes entré al Laboratorio, por brindarme su amistad, su tiempo, de darme días de felicidad y de apoyarme durante el transcurso de mi investigación, tuve mucha suerte de tenerlos. Y todos mis amigos, Jairo Antonio, Ana Cristina, Claudia Camelo, Atzel Iván, Nathaly Alejandra, Hansel David, Raúl Deyoses, Rubén Jair, Eduardo Antonio, Zuleyma Ramos, Hixela Contreras, Adolfo Ángel, José Sebastián, Leonardo Mayo, Ingrid Pérez, Estefanía López, Víctor Alfonso, Ángel Daniel, David Alcudia, Monserrat Guadalupe, Karina Alcudia, María Nazareth, José María, Daniel Domínguez, quienes me apoyaron, motivaron y confiaron en mi para terminar mi tesis.

Dedicatoria

Al Dr. Gaspar por confiar en mí y darme la oportunidad de hacer tesis en su Laboratorio.

A mis padres, por sus apoyos y sacrificios para que yo pudiera terminar mis estudios.

A mi hermano, por apoyarme y darme de su tiempo para poder terminar mi tesis.

A todos mis amigos por su amistad y su motivación para que yo acabar la tesis.

Contenido

1. Resumen.....	14
2. Introducción.....	16
3. Justificación	18
4. Antecedentes.....	19
5. Pregunta de Investigación	22
6. Hipótesis.....	22
7. Objetivos.....	22
7.1. Objetivo general.....	22
7.2. Objetivos específicos.....	22
8. Área de estudio.....	23
8.1. Características del sistema de tratamiento.....	24
9. Materiales y métodos	26
9.1. Actividades de campo.....	26
9.1.1. Habilitación de la unidad experimental	26
9.1.2. Colocación del medio de soporte.....	26
9.1.3. Colecta de la vegetación	26
9.1.4. Siembra y estabilización de la vegetación en la unidad experimental	26
9.1.5. Caracterización de la vegetación.....	27
9.1.6. Toma de muestra del agua residual de influente y efluente.....	27
9.1.7. Aforo del caudal.....	28
9.2. Actividades de laboratorio.....	28
9.2.1. Análisis fisicoquímicos del agua residual de influente y efluente.....	28
9.3. Actividades de gabinete	28
9.3.1. Eficiencia de remoción de contaminantes	28
9.3.2. Diseño experimental y análisis estadístico.....	29
9.4. Costos del proyecto	30
10. Resultados	31
10.1. Características de la especie	31
10.2. Características fisicoquímica y volumétrica en el influente y efluente de la unidad experimental	31
10.2.1. Gasto de operación del sistema.....	31
10.2.2. Análisis estadístico de los tratamientos.....	32

10.3.	Cumplimiento ambiental de la normativa vigente	41
10.3.1.	Etapa de arranque	41
10.3.2.	Etapa de estabilización	42
10.3.3.	Etapa de evaluación	43
10.4.	Eficiencia de remoción de los humedales	44
10.4.1.	Etapa de arranque	44
10.4.2.	Etapa de estabilización	45
10.4.3.	Etapa de evaluación	46
11.	Discusiones	47
12.	Conclusiones	51
13.	Referencias	52
14.	Anexo A. Memorias fotográficas	59
15.	Anexo B. Cronograma de actividades	63
16.	Alojamiento de tesis	65

Índice de tablas

Tabla 1.	Antecedentes internacionales	19
Tabla 2.	Antecedentes nacionales	20
Tabla 3.	Antecedentes regionales	21
Tabla 4.	Costo del proyecto	30
Tabla 5.	Evaluación del crecimiento de la macrófita (N = 5)	31
Tabla 6.	Valores promedio (\pm DE) de la calidad del agua del HAFL-T durante la etapa de arranque	42
Tabla 7.	Valores promedio (\pm DE) de la calidad del agua del HAFL-Ec durante la etapa de arranque	42
Tabla 8.	Valores promedio (\pm DE) de la calidad del agua del HAFL-T durante la etapa de estabilización	43
Tabla 9.	Valores promedio (\pm DE) de la calidad del agua del HAFL-Ec durante la etapa de estabilización	43
Tabla 10.	Valores promedio (\pm DE) de la calidad del agua del HAFL-T durante la etapa de evaluación	44
Tabla 11.	Valores promedio (\pm DE) de la calidad del agua del HAFL-Ec durante la etapa de evaluación	44
Tabla 12.	Eficiencia de remoción de los parámetros de la calidad del agua del HAFL-T en la fase de arranque	45
Tabla 13.	Eficiencia de remoción de los parámetros de la calidad del agua del HAFL-Ec en la fase de arranque	45
Tabla 14.	Eficiencia de remoción de los parámetros de la calidad del agua del HAFL-T en la fase de estabilización	46

Tabla 15. Eficiencia de remoción de los parámetros de la calidad del agua del HAFL-Ec en la fase de estabilización.	46
Tabla 16. Eficiencia de remoción de los parámetros de la calidad del agua del HAFL-T en la fase de evaluación.	47
Tabla 17. Eficiencia de remoción de los parámetros de la calidad del agua del HAFL-Ec en la fase de evaluación.	47
Tabla 18. Cronograma de actividades	63

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación geográfica de la unidad experimental y del Laboratorio de Tecnología del Agua.	23
Figura 2. Representación del sistema de tratamiento de aguas residuales por medio de un humedal artificial de flujo libre.	25
Figura 3. Diagrama de siembra por el método de tresbolillo.	27
Figura 4. Gastos de operación del sistema de tratamiento.	32
Figura 5. Medias ($\pm Q_1$; Q_3) del pH (A= arranque, B = estabilización y C = evaluación). Letras diferentes indican las diferencias ($P < 0.05$ de nivel de confianza del 95.0% (N = 60).	33
Figura 6. Medias ($\pm Q_1$; Q_3) de la temperatura (A= arranque, B = estabilización y C = evaluación). Letras diferentes indican las diferencias ($P < 0.05$ de nivel de confianza del 95.0% (N = 60).	34
Figura 7. Medias ($\pm Q_1$; Q_3) de la CE (A= arranque, B = estabilización y C = evaluación). Letras diferentes indican las diferencias ($P < 0.05$ de nivel de confianza del 95.0% (N = 60).	35
Figura 8. Medias ($\pm Q_1$; Q_3) de los SDT (A= arranque, B = estabilización y C = evaluación). Letras diferentes indican las diferencias ($P < 0.05$ de nivel de confianza del 95.0% (N = 60).	36
Figura 9. Media ($\pm Q_1$; Q_3) de la turbiedad (A= arranque, B = estabilización y C = evaluación). Letras diferentes indican las diferencias ($P < 0.05$ de nivel de confianza del 95.0% (N = 60).	37
Figura 10. Medias ($\pm Q_1$; Q_3) del color (A= arranque, B = estabilización y C = evaluación). Letras diferentes indican las diferencias ($P < 0.05$ de nivel de confianza del 95.0% (N = 60).	38
Figura 11. Medias ($\pm Q_1$; Q_3) del OD (A= arranque, B = estabilización y C = evaluación). Letras diferentes indican las diferencias ($P < 0.05$ de nivel de confianza del 95.0% y las letras iguales indican que no hay diferencias ($P \geq 0.05$ de nivel de confianza del 95.0% (N = 60).	39
Figura 12. Medias ($\pm Q_1$; Q_3) del POR (A= arranque, B = estabilización y C = evaluación). Letras diferentes indican las diferencias ($P < 0.05$ de nivel de confianza del 95.0% (N = 60).	40
Figura 13. Medias ($\pm Q_1$; Q_3) de la DQO (A= arranque, B = estabilización y C = evaluación). Letras diferentes indican las diferencias ($P < 0.05$ de nivel de confianza del 95.0% (N = 60).	41
Figura 14. Reactor lavado.	59

Figura 15. Colecta de la Echinodorus cordifolius, extraídos de los pantanos de Centla, Tabasco.....	59
Figura 16. Llegada a la DACBiol con la vegetación.....	59
Figura 17. Siembra de la vegetación en el reactor.	59
Figura 18. Macrófitas en el proceso de aclimatación.	59
Figura 19. HAFL-T en la etapa de arranque.	60
Figura 20. HAFL-Ec en la etapa de arranque.	60
Figura 21. Floración de la vegetación en la etapa de arranque.....	60
Figura 22. Medición del OD de las muestras de agua en la etapa de arranque.	60
Figura 23. HAFL-Ec en el mes de Julio del 2024.....	61
Figura 24. Medición del POR de las muestras de agua en la etapa de estabilización.	61
Figura 25. Captura de datos del monitoreo en una base de datos en Excel.....	61
Figura 26. HAFL-Ec en la etapa de estabilización.	61
Figura 27. Eliminación de las hojas muertas.	62
Figura 28. Algas generadas en el HAFL-T.....	62
Figura 29. Caracterización final de la vegetación.	62

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
 México

1. Resumen

En este trabajo de investigación se evaluó el desempeño de un humedal artificial de flujo libre (HAFL) con la especie macrófita *Echinodorus cordifolius* en el tratamiento de aguas residuales domésticas provenientes de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), durante un año. Este sistema está compuesto por el cárcamo, el tanque anaerobio, el tanque de distribución y dos trenes de humedales artificiales, uno cuenta con un reactor sin la macrófita (HAFL-T) y la otra si cuenta con la macrófita (HAFL-Ec). Los humedales operaron con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 6.67 días y teniendo un gasto promedio (Q_{med}) de 173.3 L/día, un máximo (Q_{max}) de 197.9 L/día y un mínimo (Q_{min}) de 139.6 L/día. El medio de soporte utilizado para la vegetación fue grava con un diámetro de $\frac{3}{4}$ de pulgada.

Los parámetros de control que se consideraron en este trabajo fueron color, turbiedad, temperatura, potencial de hidrogeno (pH), conductividad eléctrica (CE), solidos disueltos totales (SDT), potencial de óxido-reducción (POR), oxígeno disuelto (OD) y demanda química de oxígeno (DQO), se analizaron en tres campañas de monitoreo (arranque, estabilización y evaluación), las cuales duraban 5 días, cada día se tomaron 12 muestras en total (3 muestras del: cárcamo, tanque anaerobio, HAFL-Ec y HAFL-T, respectivamente).

Las eficiencias de remoción (ER%) alcanzadas al final de esta investigación por la *Echinodorus cordifolius* en el HAFL fueron de 18.14% en pH, 4.88% en temperatura, 5.59% en CE, 3.74% en SDT, 91.83% en turbiedad, 86.01% en color, 42.27% en OD, -57.38% en POR y 61.51% en DQO. Además, se evaluó la reproducción y crecimiento de la macrófita, al final de este trabajo acabo con 67 organismos de la misma especie con una masa y altura promedio de 3.89 Kg y 231.8 cm. El agua tratada del HAFL-Ec logra cumplir con el límite máximo permisible (LMP) de la NOM-001-SMARNAT-2021 para la DQO, el cual es de 120 mg/L para embalses, lagos y lagunas.

Palabras claves: Humedal artificial de flujo libre, color, turbiedad, DQO, eficiencia de remoción

Abstract

This research work evaluated the performance of a free-flow artificial wetland (HAFL) with the species *Echinodorus cordifolius* in the treatment of domestic wastewater from the Academic Division of Biological Sciences (DACBiol) of the Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), during one year. This system is composed of the sump, the anaerobic tank, the distribution tank and two artificial wetland trains, one with a reactor without the macrophyte (HAFL-T) and the other with the macrophyte (HAFL-Ec). They operated with a hydraulic retention time (HRT) of 6.67 days and had an average flow (Q_{med}) of 173.3 L/day, a maximum (Q_{max}) of 197.9 L/day and a minimum (Q_{min}) of 139.6 L/day. The supporting medium used for the vegetation was gravel with a diameter of $\frac{3}{4}$ inch.

The control parameters considered for this work were color, turbidity, temperature, hydrogen potential (pH), electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), oxidation-reduction potential (ORP), dissolved oxygen (DO) and chemical oxygen demand (COD), were analyzed in three monitoring campaigns (start-up, stabilization and evaluation), which lasted 5 days, each day 12 samples were taken in total (3 samples from the: sump, anaerobic tank, HAFL-Ec and HAFL-T).

Echinodorus cordifolius in the HAFL were 18.14% in pH, 4.88% in temperature, 5.59% in EC, 3.74% in TDS, 91.83% in turbidity, 86.01% in color, 42.27% in DO, -57.38% in POR and 61.51% in COD. In addition, the reproduction and growth of the macrophytes was evaluated. At the end of this work, there were 67 species with an average mass and height of 3.89 kg and 231.8 cm. The treated water from HAFL-Ec complies with NOM-001-SMARNAT-2021 which establishes a maximum permissible limit (MPL) for COD of 120 mg/L for reservoirs, lakes and lagoons.

Key words: Free-flowing artificial wetland, color, turbidity, COD, removal efficiency.

2. Introducción

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en el 2024, reporta que en el 2022 se utilizó 89 804 hm³ de agua para uso en México, del cual el 60.1% (53 940 hm³) de agua proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos) y el 39.9% (35 860 hm³) de fuentes subterráneas (acuíferos). Los usos del agua en México se agrupan en cuatro grupos consuntivos: 76.3% para uso agrícola (68 521 hm³), 14.8% para abastecimiento público (13 330 hm³), 4.8% para uso industrial integrado (4 273 hm³) y 4.1% para uso de energía eléctrica (3 680 hm³).

Lamentablemente, los cuerpos de agua superficiales, al estar expuestos al alcance del ser humano, son susceptibles a ser contaminadas al ser usados como vertederos para los desechos de aguas residuales y residuos sólidos, esta es una problemática ambiental de gran importancia que afecta muchas regiones de México (Luna, 2021).

Además, la CONAGUA (2022) reporta que en México se generó 279 754 L/s de agua residual, recolectando un aproximado de 215 408 L/s, y solo se pudo tratar 144 710 L/s. A nivel de entidad federativa, los que generaron grandes cantidades de aguas residuales son el Estado de México (38 021 L/s), la Ciudad de México (26 080 L/s) y Veracruz (20 162 L/s), juntos representan el 30.1% del total de volumen de nacional generado.

En estos últimos años, se han estado buscando métodos para eliminar los contaminantes presentes en aguas residuales tales como el nitrógeno, fósforo, metales pesados, sólidos sedimentables, grasas y aceites, entre otros; para ello una de las tecnologías utilizadas son los humedales artificiales (HA). Los HA están ganando cada vez más atención debido a sus bajos costos de construcción, operación y mantenimiento; gran capacidad de remoción de contaminantes, y de igual forma son una tecnología amigable para el ambiente (Arteaga-Cortéz et al. 2019). Además, al estar basada en un humedal natural puede contribuir a la conservación de la biodiversidad al proporcionarles hábitats para diversas especies de flora y fauna (Gitau et al. 2019).

Los HA, de acuerdo al flujo del agua, se pueden clasificar en humedales artificiales de flujo libre (HAFL) y en humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFS), lo

cual este último se divide en horizontal (HAFS-H) y vertical (HAFS-V) (González-Días, 2022). Barretos et al. (2018) y Hernández y Moneris (2023) describen cada sistema de la siguiente forma: los HAFL son sistemas muy parecidos a los naturales, el agua que pasa por estos sistemas está expuesta a la atmósfera y tienen medio de soporte de entre 10 y 20 cm de grosor; HAFS-H son sistemas en el cual el agua transcurre de forma horizontal, el medio de soporte se encuentra por encima del agua; mientras que los HAFS-V se diferencia del horizontal por el modo que transcurre el agua, aquí el agua transcurre de forma vertical.

Jiménez-López et al. (2017), realizaron análisis fisicoquímicos a las aguas tratadas por la *Thalia geniculata* en un HAFL y un HAFS-H, estos reactores tienen una dimensión de $2.5 \times 1.2 \times 1$ m, y un tiempo de retención hidráulica (TRH), que vario de 6.5 a 7.5 días. La eficiencia de remoción de cada humedal fue de 79.91% y 85.33% para sólidos suspendidos totales (SST), 79.83% y 85.34% para nitrógeno total (NT), 79.47% y 85.28% para fósforo total (PT), 79.95% y 85.06% para demanda química de oxígeno (DQO) y 79.91% y 85.53% para demanda bioquímica de oxígeno (DBO), respectivamente. Este trabajo mostró como resultado que el HAFS-H tuvo una mayor eficiencia de remoción en comparación con HAFL.

En el presente trabajo se evaluó la eficiencia de remoción de un HAFL con la especie *Echinodorus cordifolius*, esta macrófita es nativa de la región. Para su evaluación se realizó la caracterización fisicoquímica del influente y el efluente del reactor, de esta forma se verificó el cumplimiento ambiental de los parámetros del control de procesos del tratamiento. Las aguas que se trataron son aguas residuales domésticas provenientes de la División Académica de Ciencias Biológicas.

3. Justificación

En los últimos años, el tratamiento de las aguas residuales por medio de los HA ha estado ganando más aceptación en varias regiones del planeta. Pero el tipo de HA que más es usado ha sido el de flujo subsuperficial, siendo algunos países europeos como Inglaterra, Francia, Dinamarca, Alemania e Italia los que más han emplean esta tecnología de tratamiento (Alarcón et al., 2018). Mientras que en Latinoamérica se tiene registrado que los principales países que emplean esta tecnología para tratar aguas residuales urbanas son México, Chile, Colombia y Brasil. En la búsqueda de investigaciones realizadas sobre HA en Latinoamérica, las mayorías de las investigaciones hablan sobre HA del tipo flujo subsuperficial.

México es reconocido como un país megadiverso principalmente por su gran cantidad de nichos ecológicos, esto debido a su amplia gama de especies de flora y fauna endémicas, por su variedad de climas y hábitats (Prieto, 2021). Hablando de la flora, Villaseñor (2016) tiene registrado que en el país hay 23,314 especies de plantas vasculares nativas, unas de las familias que destacan por su mayor número de especies de los Alismatales es la Alismataceae, entre esos números se encuentra la *Echinodorus cordifolius*. Se tiene registrado su uso para remover nitrógeno total y arsénico en HA (Nakpht et al. 2016; Prum et al., 2018), pero se sabe poco sobre su uso de remoción de los parámetros que yo toque en este trabajo.

Este estudio tiene como objetivo evaluar la fitorremediación de aguas residuales domésticas utilizando la especie *Echinodorus cordifolius*, se comparó el HAFL que tiene las macrófitas con un HAFL sin macrófitas, el TRH es de 6.67 días (Ocaña, 2023), este se encuentra en el TRH recomendado por la CONAGUA (2016), el cual es 6 a 15 días para que ocurra la descomposición orgánica. Esto se hace con el propósito de implementar la especie en HA de pequeñas comunidades de la región, para el saneamiento de aguas, cumpliendo con la protección de este recurso para futuras generaciones.

4. Antecedentes

En la tabla 1, se presentan estudios a nivel internacional de la aplicación de HA, la eficiencia de remoción de diversos contaminantes y los tipos de macrófitas utilizadas.

Tabla 1. Antecedentes internacionales.

Referencias	Tipo de flujo	TRH (d)	Especie	Procedencia de las aguas	Parámetros	Resultados $C_e - C_s$	Unidades	%ER
Cuong et al. 2020	Sistema a escala piloto de un humedal artificial combinado con un flujo subsuperficial vertical y con un flujo libre	--	<i>Colocasia esculenta</i> y <i>Dracaena sandariana</i>	Domésticas	pH	6.7 – 7.25	UpH	-8.2
					OD	0.22 – 6.3	mg/L	--
					CE	750 – 504	μS/cm	32.8
Torres et al. 2017	Sistema a escala piloto de un humedal artificial de flujo libre.	2	<i>Cyperus papyrus</i> y <i>Phragmites australis</i> .	Domésticas	pH	7.8 – 7.5	UpH	4.0
					Temperatura	21 – 21	°C	0.0
					Turbiedad	130 – 30	UNT	77.0
Acero-Oliete et al. 2023	Planta piloto tipo humedal artificial de flujo libre	--	<i>Typha latifolia</i> , <i>Phragmites australis</i> y <i>Sparganium erectum</i>	Domésticas	pH	7.88 – 7.9	UpH	-0.2
					CE	2.09 – 2.02	mS/cm	3.3
					DQO	394.88 – 152.59	mg/L	59.0
					Turbiedad	132.85 – 112.83	NTU	16.0
Maine et al. 2016	Planta piloto tipo humedal artificial de flujo libre	7 – 12	<i>Pistia stratiotes</i> , <i>Eichhornia crassipes</i> , <i>Salvinia rotundifolia</i> , <i>Panicum elephantipes</i> , <i>Pontederia cordata</i> , <i>Typha domingensis</i> y <i>Hydrocotyle ranunculoides</i>	Industriales	pH	10.8 – 8.3	UpH	23.1
					CE	5113 – 1955	μmho/cm	61.8
					OD	3.4 – 2.1	mg/L	38.2
					DQO	85 – 37.1	mg/L	74.6
		7 – 10	<i>Typha domingensis</i>	pH	7.9 – 8	UpH	-1.3	
				CE	3213 – 1203.6	μmho/cm	62.5	
				OD	6 – 6.4	mg/L	-6.7	
				DQO	57.1 – 12.4	mg/L	78.2	

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 2, se presentan estudios a nivel nacional de la aplicación de HA, la eficiencia de remoción de diversos contaminantes y los tipos de macrófitas utilizadas.

Tabla 2. Antecedentes nacionales.

Referencias	Tipo de flujo	TRH (d)	Especie	Procedencia de las aguas	Parámetros	Resultados $C_e - C_s$	Unidades	%ER
Rangel-Peraza et al. 2019	Sistema a escala piloto de un humedal artificial de flujo libre	2 y 4	<i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Typha domingensis</i>	Domesticas	pH	9.01 – 5.5	UP	39.0
					DQO	454.1 – 34.55	mg/L	34.6
Castañeda 2021	Planta piloto tipo humedal artificial	1.1	<i>Phragmites australis</i> , <i>Zantedeschia aethiopica</i> y <i>Typha latifolia</i>	Domesticas	DQO	1360 – 103.9	mg/L	92.4
					CE	3456 – 230.17	μS/cm	93.3
Castañeda 2021	Planta piloto tipo humedal artificial	--	<i>Phragmites australis</i>	Domesticas	DQO	377.8 – 52.9	mg/L	86.0

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3, se presentan estudios a nivel regional de la aplicación de HA, la eficiencia de remoción de diversos contaminantes y los tipos de macrófitas utilizadas.

Tabla 3. Antecedentes regionales.

Referencias	Tipo de flujo	TRH (d)	Especie	Procedencia de las aguas	Parámetros	Resultados $C_e - C_s$	Unidades	%ER
Gallegos-Rodríguez et al. 2018	Sistema a escala piloto de un humedal artificial de flujo libre	6.05	<i>Sagittaria latifolia</i>	Domésticas	DQO	970.8 – 29.55	mg/L	96.0
			<i>Sagittaria lancifolia</i>		DQO	970.9 – 59.62	mg/L	93.0
Magaña-Flores y López-Ocaña 2022	Sistema a escala piloto de un humedal artificial de flujo libre	6.7	<i>Sagittaria latifolia</i>	Domésticas	Turbiedad	99.3 – 10.1	NTU	89.8
					Temperatura	27.4 – 24.7	°C	9.6
					Color	1341.9 – 346.3	UC	74.2
					OD	0.6 – 4.5	mg/L	-
					pH	8.3 – 8.1	UpH	2.2
					CE	1407.8 – 878.6	µS/cm	37.6
					SDT	706.7 – 442.7	mg/L	37.4
					DQO	725.3 – 74.7	mg/L	89.7
Estrada et al. 2025	Sistema a escala piloto de un humedal artificial de flujo libre	6.52	<i>Sagittaria latifolia</i>	Domésticas	DQO	218.92 – 29.55	mg/L	86.5
					Turbiedad	103.41 – 3.89	UNT	96.2
					CE	2.33 – 2.73	µS/cm	-17.2
					pH	7.98 – 7.72	UpH	3.3
Solis et al. 2016	Sistema a escala piloto de un humedal artificial de flujo libre	5.5	<i>Typha domingensis</i>	Domésticas	Turbiedad	143 – 4.1	NTU	97.1
			<i>Eichhornia crassipes</i>		Color	1424 – 236	UC	83.4
					DQO	891.8 – 19.7	mg/L	97.8
					Turbiedad	143 – 7.6	NTU	94.7
					Color	1424 – 291	UC	79.6
					DQO	891.8 – 58.5	mg/L	93.4

Fuente: Elaboración propia.

5. Pregunta de Investigación

¿La especie *Echinodorus cordifolius* podrá cumplir con la fitorremediación de aguas residuales domésticas?

6. Hipótesis

Ho: La especie *Echinodorus cordifolius* alcanzará eficiencias de remoción de DQO mayores al 90% permitiéndole cumplir con los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Ha: La especie *Echinodorus cordifolius* no alcanzará eficiencias de remoción de DQO mayores al 90% por lo que no podrá cumplir con los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

7. Objetivos

7.1. Objetivo general

Evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes básicos en aguas residuales domésticos en el arranque y estabilización mediante el humedal artificial de flujo libre utilizando la especie *Echinodorus cordifolius*.

7.2. Objetivos específicos

- Realizar la colecta, siembra y estabilización de la especie *Echinodorus cordifolius* en el HAFL.
- Caracterizar la especie a utilizar (peso y altura de la especie, largo del tallo, hoja y raíz, y número de hojas y tallos) al inicio y al final del proyecto.
- Caracterizar fisicoquímicamente y volumétricamente el influente y efluente de la unidad experimental (color, turbiedad, temperatura, pH, CE, SDT, POR, OD y DQO).
- Verificar el cumplimiento ambiental y eficiencia de remoción de la unidad experimental.

8. Área de estudio

La unidad experimental se encuentra establecida dentro de la DACBIol, la cual tiene una superficie de 21 ha (figura 1), y esta se encuentra ubicada en el Km 0.5 de la carretera Villahermosa-Cárdenas, entronque a Bosques de Saloya, en el municipio del Centro Tabasco. Esta unidad experimental está en el área del Laboratorio de Tecnología del Agua (figura 1), en el cual se realizaron los monitoreos y los análisis fisicoquímicos (color, turbiedad, temperatura, pH, CE, SDT, OD, DQO y POR).

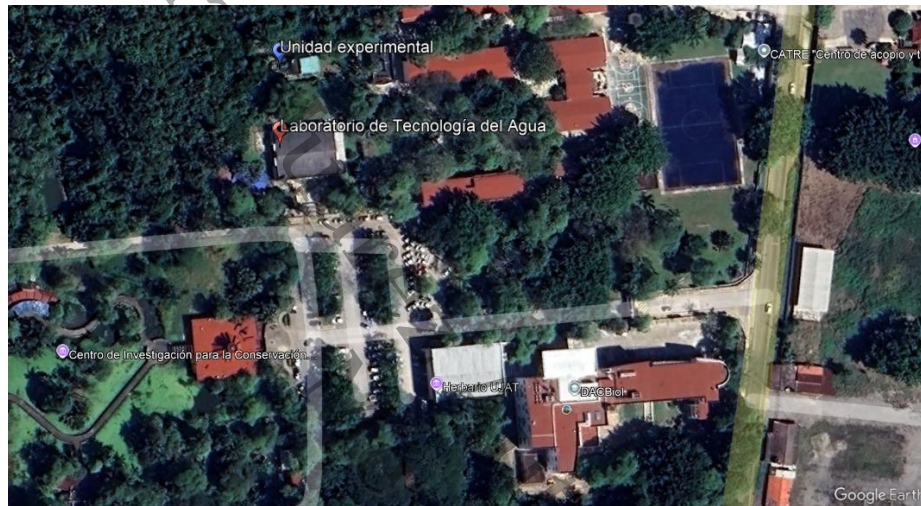


Figura 1. Ubicación geográfica de la unidad experimental y del Laboratorio de Tecnología del Agua.

Fuente: Google Earth

8.1. Características del sistema de tratamiento

Este sistema de tratamiento está diseñado a escala piloto para tratar aguas residuales domésticas, está conformado por las siguientes partes: cárcamo, tanque anaerobio, tanque de control y los reactores.

Cárcamo

Todo este sistema inicia con el cárcamo, en este depósito se almacena temporalmente las aguas residuales de la DACBiol. Las aguas residuales que llegan al cárcamo son generadas de las cafeterías, baños y laboratorios (Guzmán et al., 2021). Cuenta con una bomba sumergible para que cada cierto tiempo se vacíe y sea enviada el agua al tanque anaerobio.

Tanque anaerobio

El tanque anaerobio (5 m × 4 m × 1.8 m) tiene la función de retener todos los sólidos suspendidos presentes de estas aguas y esta se encuentra en el área del Laboratorio de Tecnología del agua de la División (Romellón, 2022). Por medio de una bomba de 1 HP, esta se extrae y se hace llegar al tanque de control, esto por medio de un sistema de tuberías de PVC de 1 pulgada.

Tanque de distribución

El agua residual pretratada del tanque anaerobio se almacena en el tanque de distribución, este tiene una capacidad de 200 L. El tanque se encuentra en un columna y base de concreto, a una altura de 1 m, quedando a una altura superior del HAFL, permitiendo el transporte del agua residual por medio de la fuerza de gravedad. Mediante el sistema de tuberías de PVC el agua es enviada al HAFL y por medio de una válvula de control se regula el flujo del afluente.

Reactores

Los reactores fueron diseñados y construidos anteriormente por Ocaña (2023), edificados con concreto e impermeabilizados, cuyas dimensiones son de 1 m de

altura, 3.2 m de largo, 1 de ancho y 0.1 m de grosor de las paredes, el cual opera con 0.58 m³/día, con un TRH de 6.67 días.

En el interior de los reactores, en la parte del afluente y efluente, cuentan con unos sistemas de tuberías, tubos de PVC de 2 pulgadas de diámetro, comúnmente llamados arañas. El propósito de estos sistemas es que el agua residual que ingrese al humedal sea distribuida uniformemente y que el agua tratada sea descargada a la laguna artificial en el área natural de la división. Por medio de válvulas colocadas en el sistema, se controla el agua que ingresa y se descarga del humedal.

Fueron construidos dos reactores, uno cuenta con la macrófita *Echinodorus cordifolius* (HAFL-Ec), mientras que el, llamado Testigo, no contó con las macrófitas (HAFL-T), esto con el propósito de comparar la efectividad de remoción de contaminantes de los humedales (Figura 2).

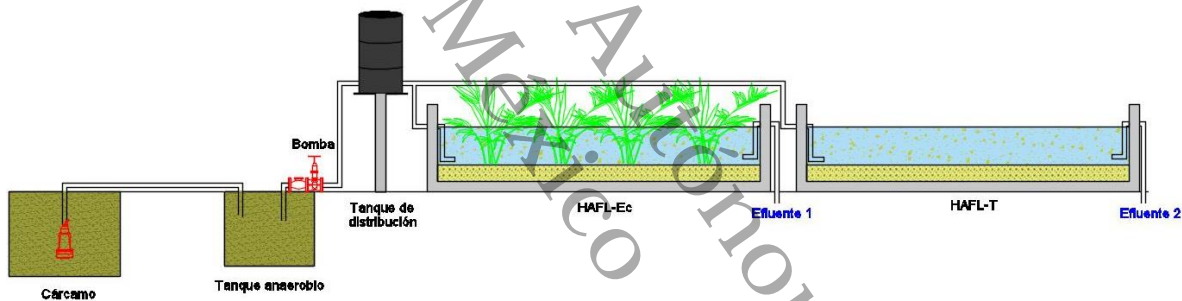


Figura 2. Representación del sistema de tratamiento de aguas residuales por medio de un humedal artificial de flujo libre.

Fuente: Elaboración propia por medio de AutoCAD 2021.

9. Materiales y métodos

9.1. Actividades de campo

9.1.1. Habilitación de la unidad experimental

A un mes previo de la colecta de la vegetación, se inició la habilitación de la unidad experimental. Se empezó con vaciar el agua que se encontraba estancada en la unidad por medio del desagüe, esto debido al tiempo de desuso de la unidad, en el agua estancada se habían desarrollado algas. La unidad se sometió a un lavado con agua potable.

9.1.2. Colocación del medio de soporte

La grava de río fue elegida como el medio de soporte para la vegetación, esta tiene un diámetro de $\frac{3}{4}$ de pulgada (López et al. 2023). La grava se lavó con agua potable antes de ser introducida dentro del reactor, esta alcanzo una altura de 15 cm.

9.1.3. Colecta de la vegetación

La especie *Echinodorus cordifolius* fueron extraídos de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco. Todos los ejemplares fueron recolectados de manera completa y con su sustrato. Se recolectaron 25 ejemplares, pero solo se necesitaron 12 ejemplares, se recolectaron más ejemplares de los necesarios, esto debido que, si algún ejemplar perecía, se tendría otros de reserva.

9.1.4. Siembra y estabilización de la vegetación en la unidad experimental

Los ejemplares que fueron elegidos se sembraron y fueron distribuidos por medio del método tresbolillo, este método tiene mejores resultados de crecimiento para las plantas a comparación de otras técnicas (Somarriba-Toruño y Reyes-Saavedra, 2022). Los ejemplares sembrados estaban separados de cada una a 48 cm aproximadamente. La unidad se alimentó primero con agua potable con un nivel adecuado para que la vegetación se aclimatara y ya con el tiempo se le agrego el agua residual pretratada de la división para que se adaptara.

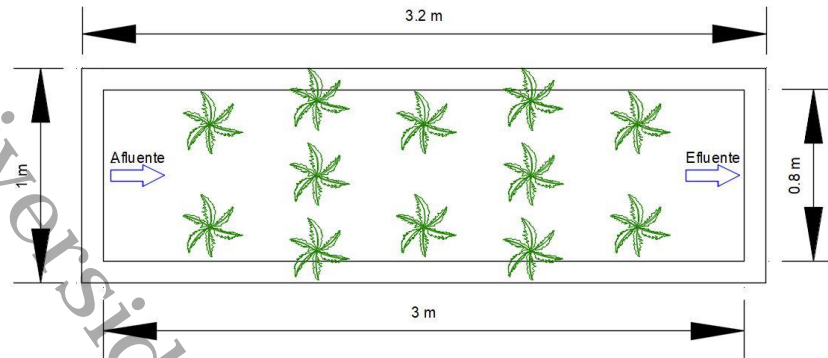


Figura 3. Diagrama de siembra por el método de tresbolillo.
Fuente: Elaboración propia por medio de AutoCAD 2021.

9.1.5. Caracterización de la vegetación

De los ejemplares que fueron elegidos para ser sembrados en el reactor, se tomaron en cuenta 5 de ellos, de diferentes tamaños, esto con el fin de ser caracterizados al inicio y final de este trabajo, esto consistió en pesarlo y medir su altura total, también se midió el largo del tallo, hoja y raíz, ancho de la hoja, y se contaron el número de hojas, tallos y ramas de flores, esto tiene el propósito de que estos datos fueran comparados para observar de cómo se adaptaron y proliferaron en el reactor con agua residual (Romellón-Cerinoa et al. 2021).

9.1.6. Toma de muestra del agua residual de influente y efluente

Para la toma de muestras de agua del HAFL-Ec se siguieron los procedimientos indicados por la NMX-AA-003-1990. Todas las muestras que se obtuvieron fueron colocadas en envases de 1 L de plástico con su respectiva etiqueta para poder identificarlos. Todas las muestras fueron transportadas en hieleras hasta el laboratorio.

Se tomarán muestras del cárcamo, tanque anaerobio, HAFL-Ec y del HAFL-T, se obtuvieron 12 muestras simples en total, para la determinación de la DQO se recolectaron 4 muestras compuesta en total. La toma de muestra para el cárcamo y tanque anaerobio fueron tomadas de manera superficial, mientras que para el resto fueron de manera de descarga libre.

9.1.7. Aforo del caudal

De acuerdo con Rodas (2020), para determinar el caudal de los humedales se empleó el método de aforo directo, el cual se basa en registrar el tiempo requerido de llenada de agua en un recipiente de volumen conocido, en este caso es una probeta de vidrio de 1 L llenada por la descarga de cada humedal. Posteriormente, se calcula el caudal usando la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{V}{t} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde Q es el caudal (L/min), V es el volumen del recipiente (L) y t es el tiempo de llenado (min). La medición del llenado de la probeta fue de 5 días, desde las 07:00 a.m. hasta 18:00 p.m., en intervalos de 1 hora.

9.2. Actividades de laboratorio

9.2.1. Análisis fisicoquímicos del agua residual de influente y efluente

Los parámetros que se evaluaron de las muestras fueron el pH, color, temperatura, turbiedad, OD, CE, SDT, POR. Los equipos que se usaron para medir los parámetros son los siguientes: para la temperatura (Standar Method 2550), CE (Standar Method 1250), SDT (Standar Method 2540) y pH (Standar Method 9040 B) se utilizó el multiparamétrico HANNA Waterproof Tester modelo HI 98129, respectivamente. Para color (APHA 2120) se empleó el fotómetro LaMotte SMART3, para la turbiedad (Standar Method 2130 B) se empleó el turbidímetro HANNA HI 98703, para el OD (Standar Method 4500 OG) se determinó con el HANNA Dissolved Oxygen HI 98193 y para POR (Standar Method 2580 A) se determinó con el HANNA HI98121.

9.3. Actividades de gabinete

9.3.1. Eficiencia de remoción de contaminantes

La eficiencia de remoción es una medida que indica que tan eficaz es el proceso de eliminación de contaminantes, en este caso será en los humedales. El porcentaje

de eliminación de cada contaminante se calculó de acuerdo a la siguiente fórmula (Rojas, 2020):

$$ER\% = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde $ER\%$ es eficiencia de remoción (en %), mientras que C_i y C_f son las concentraciones inicial y final de cada contaminante del reactor.

9.3.2. Diseño experimental y análisis estadístico

Una vez teniendo los datos experimentales, se llevó a cabo una verificación de que estos cumplan con los postulados de la estadística paramétrica (normalidad y homocedasticidad). Si los datos cumplen con los postulados, se procederá a aplicar un análisis de varianza ANOVA simple, de lo contrario, si estos datos no cumplen, se procederá a utilizar la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (López et al. 2023).

Los resultados que se obtendrán, mediante el software STATGRAPHICS CENTURION® v19.0 (nivel de significancia establecido en $\alpha = 0.05$), se le realizarán los análisis estadísticos y gráficos, para posteriormente ser interpretados. Si el nivel de significancia tiene un valor de ($P <$) 0.05, esto indica que existen una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza, sin embargo, si este tiene un valor de ($P \geq$) 0.05, esto indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza.

9.4. Costos del proyecto

En la tabla 4 se presenta el presupuesto total que se generara durante el tiempo que dure el proyecto:

Tabla 4. Costo del proyecto

Concepto	Unidad	Precio unitario	Precio total
Herramientas			
*Pala de cuchara	1	\$285	\$285
*Pala plana	1	\$269	\$269
*Tijera para poda	1	\$150	\$150
*Carretilla	1	\$1,200	\$1,200
*Escoba	1	\$60	\$60
*Rastrillo de jardín metálico recto	1	\$160	\$160
*Pala de mano	1	\$45	\$45
*Flexómetro de 5 m	1	\$62	\$62
Cinta adhesiva transparente	1	\$30	\$30
Equipo de seguridad			
Guantes de carnaza	1	\$88	\$88
Guantes de látex (cajas)	2	\$318	\$636
Guantes de nitrilo	1	\$714	\$714
Cubre bocas de seguridad industrial	20	\$16	\$320
Lentes de seguridad	1	\$77	\$77
Botas de hule	1	\$170	\$170
Gel desinfectante 1 L	1	\$90	\$90
Equipo de muestreo			
Etiquetas	12	\$1	\$12
Botes de plásticos de 1 L para muestreo	12	\$20	\$240
*Bailer	1	\$2,000	\$2,000
*Hielera	1	\$1,000	\$1,000
Análisis de laboratorio			
*Análisis de pH	36	\$80	\$2,880
*Análisis de temperatura	36	\$80	\$2,880
*Análisis de CE	36	\$80	\$2,880
*Análisis de SDT	36	\$80	\$2,880
*Análisis de color	36	\$100	\$3,600
*Análisis de turbiedad	36	\$100	\$3,600
*Análisis de OD	36	\$80	\$2,880
*Análisis de POR	36	\$80	\$2,880
*Análisis de DQO	12	\$150	\$1,800
*HI23754C-25 Viales para DQO rango bajo	1	\$1,050	\$1,050
*HI23754C-25 Viales para DQO rango alto	1	\$1,050	\$1,050
Total			\$94,338
*Gastos adsorbidos por el Laboratorio de Tecnología del Agua.			

Fuente: Elaboración propia.

10. Resultados

10.1. Características de la especie

En la tabla 5 se puede observar los datos que se evaluaron de la macrófita de la etapa inicial y final. Se puede ver que la *Echinodorus cordifolius* se adaptó bien, creció y se reprodujo. Al inicio de la investigación se sembraron 12 especies, al final de este, el humedal tenía 67 especies.

Tabla 5. Evaluación del crecimiento de la macrófita (N = 5).

Parámetros evaluados	Etapa inicial		Etapa final	
	X	DE	X	DE
Masa (Kg)	0.42	0.14	3.89	0.26
Altura (cm)	92.00	15.62	231.80	24.23
Largo del tallo (cm)	61.00	10.32	135.60	12.38
Numero de tallos (cm)	5.20	0.84	17.80	2.59
Numero de hojas	3.80	0.84	15.60	1.52
Ancho de la hoja (cm)	11.60	2.88	18.80	2.17
Largo de la hoja (cm)	23.60	4.39	44.20	2.95
Largo de la raíz (cm)	19.40	5.03	52.60	5.98
Rama de flores	0.00	0.00	3.60	3.36

Fuente: Elaboración propia

10.2. Características fisicoquímica y volumétricamente en el influente y efluente de la unidad experimental

10.2.1. Gasto de operación del sistema

En este trabajo de investigación se determinó y gráfico el gasto total de operación del sistema diario, en el transcurso del trabajo se obtuvieron valores de un caudal máximo (Qmax) de 197.9 L/día, un mínimo (Qmin) de 139.6 L/día y un gasto promedio (Qmed) de 173.3 L/día en los HAFL.

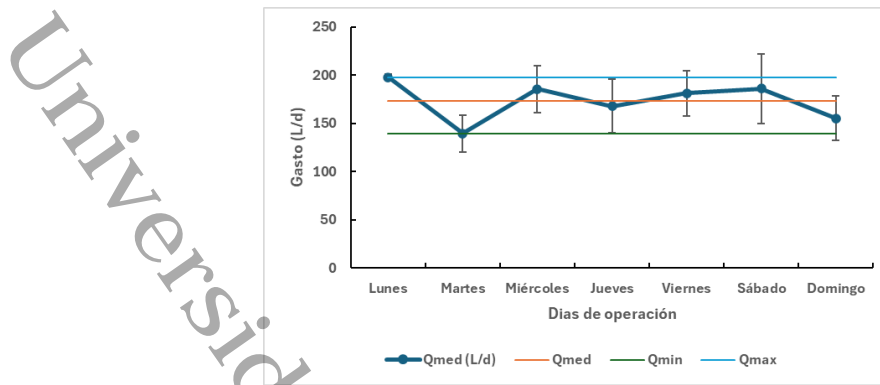


Figura 4. Gastos de operación del sistema de tratamiento.
Fuente: Elaboración propia.

10.2.2. Análisis estadístico de los tratamientos

Potencial de hidrogeno

La prueba de Kruskal-Wallis para el potencial de Hidrogeno (UpH), en la etapa de arranque, se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento HAFL-Ec con $8.2 \pm \text{RI}$ ($Q_1 = 7.82535$; $Q_3 = 8.31822$) UpH, seguido de Tanque anaerobio con $8.31 \pm \text{RI}$ ($Q_1 = 8.12$; $Q_3 = 8.53109$) UpH y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento HAFL-T con $8.67 \pm \text{RI}$ ($Q_1 = 8.45891$; $Q_3 = 8.71822$) UpH. En el caso en la etapa de estabilización, se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento HAFL-Ec con $8.31 \pm \text{RI}$ ($Q_1 = 8.20069$; $Q_3 = 8.58149$) UpH, seguido el Cárcamo con $8.440 \pm \text{RI}$ ($Q_1 = 8.0$; $Q_3 = 8.59644$) mg/L y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento HAFL-T con $8.77 \pm \text{RI}$ ($Q_1 = 8.61$; $Q_3 = 9.01644$) mg/L. Y, por último, en la etapa de evaluación se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento HAFL-Ec con $6.7 \pm \text{RI}$ ($Q_1 = 6.6$; $Q_3 = 6.7$) UpH, seguido el HAFL-T con $7.3 \pm \text{RI}$ ($Q_1 = 7.2$; $Q_3 = 7.4$) UpH y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento Cárcamo con $8.2 \pm \text{RI}$ ($Q_1 = 8.0$; $Q_3 = 8.3$) UpH.

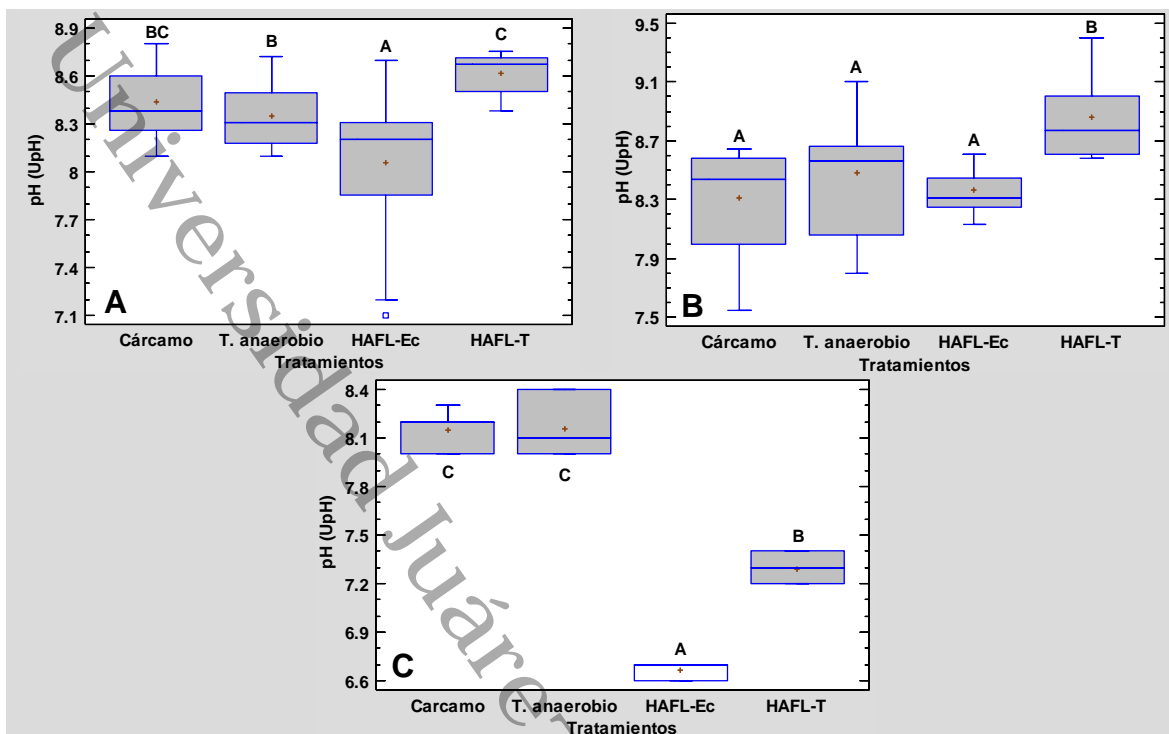


Figura 5. Medias (\pm Q₁; Q₃) del pH (A= arranque, B= estabilización y C= evaluación). Letras diferentes indican las diferencias ($P < 0.05$ de nivel de confianza del 95.0% (N = 60). Fuente: Elaboración propia.

Temperatura

La prueba de Kruskal-Wallis para la Temperatura ($^{\circ}$ C), en la etapa de arranque, se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento HAFL-Ec con $30.4 \pm$ RI ($Q_1 = 29.1$; $Q_3 = 31.6$) $^{\circ}$ C, seguido de HAFL-T con $31.2 \pm$ RI ($Q_1 = 29.7$; $Q_3 = 31.9287$) $^{\circ}$ C y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento Cárcamo con $31.7 \pm$ RI ($Q_1 = 31.5$; $Q_3 = 32.1287$) $^{\circ}$ C. En el caso en la etapa de estabilización, se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento Tanque anaerobio con $26.8 \pm$ RI ($Q_1 = 26.1713$; $Q_3 = 28.3396$) $^{\circ}$ C, seguido el HAFL-Ec con $27.3 \pm$ RI ($Q_1 = 24.5891$; $Q_3 = 27.9465$) $^{\circ}$ C y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento Cárcamo con $28.9 \pm$ RI ($Q_1 = 27.0$; $Q_3 = 29.2822$) $^{\circ}$ C. Y, por último, en la etapa de evaluación se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento HAFL-Ec con $26.7 \pm$ RI ($Q_1 = 26.3$; $Q_3 = 26.8922$) $^{\circ}$ C, seguido el HAFL-T $26.9 \pm$ RI ($Q_1 = 26.3$; $Q_3 = 27.1$) $^{\circ}$ C y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento Tanque anaerobio con $28.1 \pm$ RI ($Q_1 = 27.7078$; $Q_3 = 28.2$) $^{\circ}$ C.

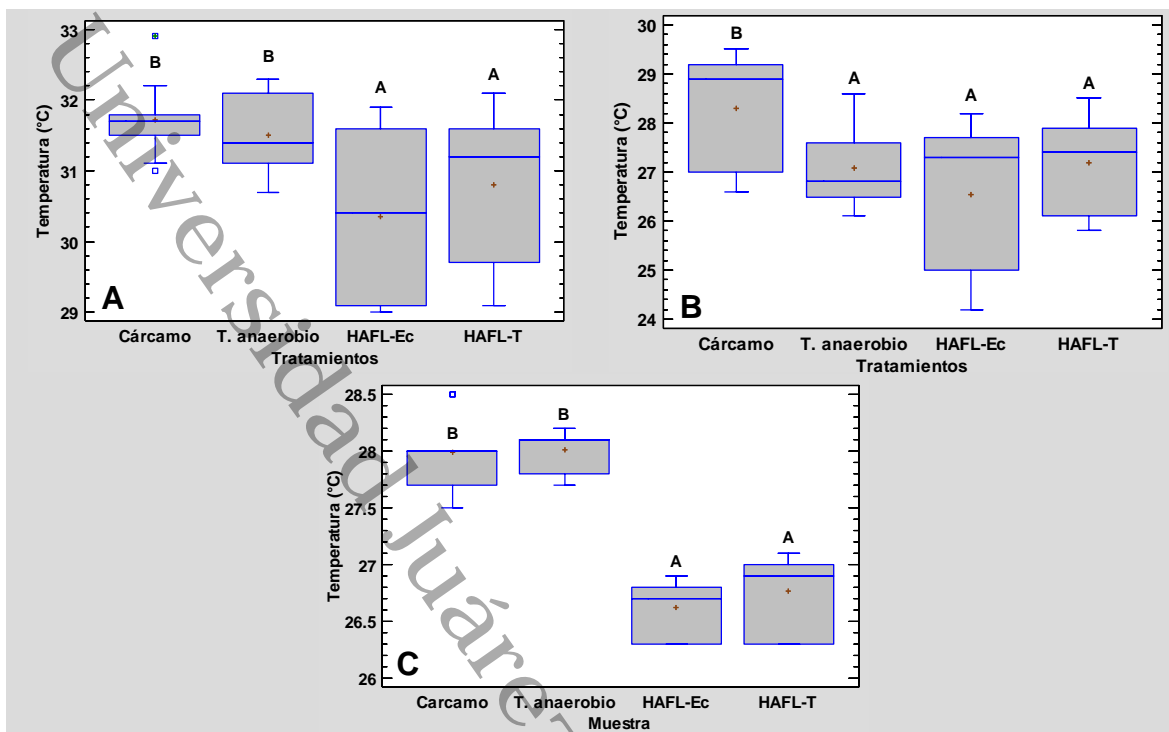


Figura 6. Medias (\pm Q₁; Q₃) de la temperatura (A=arranque, B = estabilización y C = evaluación). Letras diferentes indican las diferencias ($P < 0.05$ de nivel de confianza del 95.0% (N = 60). Fuente: Elaboración propia.

Conductividad eléctrica

La prueba de Kruskal-Wallis para la CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$), en la etapa de arranque, se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento Cárcamo con un $730.0 \pm \text{RI}$ (Q₁ = 649.0; Q₃ = 846.0) $\mu\text{s}/\text{cm}$, seguido de HAFL-T con $855.0 \pm \text{RI}$ (Q₁ = 839.247; Q₃ = 934.477) $\mu\text{s}/\text{cm}$ y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento HAFL-Ec con $920.0 \pm \text{RI}$ (Q₁ = 879.029; Q₃ = 948.437) $\mu\text{s}/\text{cm}$. En el caso en la etapa de estabilización, se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento HAFL-T con $585.0 \pm \text{RI}$ (Q₁ = 490.075; Q₃ = 612.822) $\mu\text{s}/\text{cm}$, seguido el HAFL-Ec con $795.0 \pm \text{RI}$ (Q₁ = 762.356; Q₃ = 815.644) $\mu\text{s}/\text{cm}$ y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento Tanque anaerobio con $1205.0 \pm \text{RI}$ (Q₁ = 1091.91; Q₃ = 1417.51) $\mu\text{s}/\text{cm}$. Y, por último, en la etapa de evaluación se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento HAFL-Ec con $680.0 \pm \text{RI}$ (Q₁ = 660.0; Q₃ = 855.222) $\mu\text{s}/\text{cm}$, seguido el Cárcamo con $730.0 \pm \text{RI}$ (Q₁ = 720.0; Q₃ = 760.0) $\mu\text{s}/\text{cm}$ y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento Tanque anaerobio con $1390.0 \pm \text{RI}$ (Q₁ = 1268.56; Q₃ = 1410.0) $\mu\text{s}/\text{cm}$.

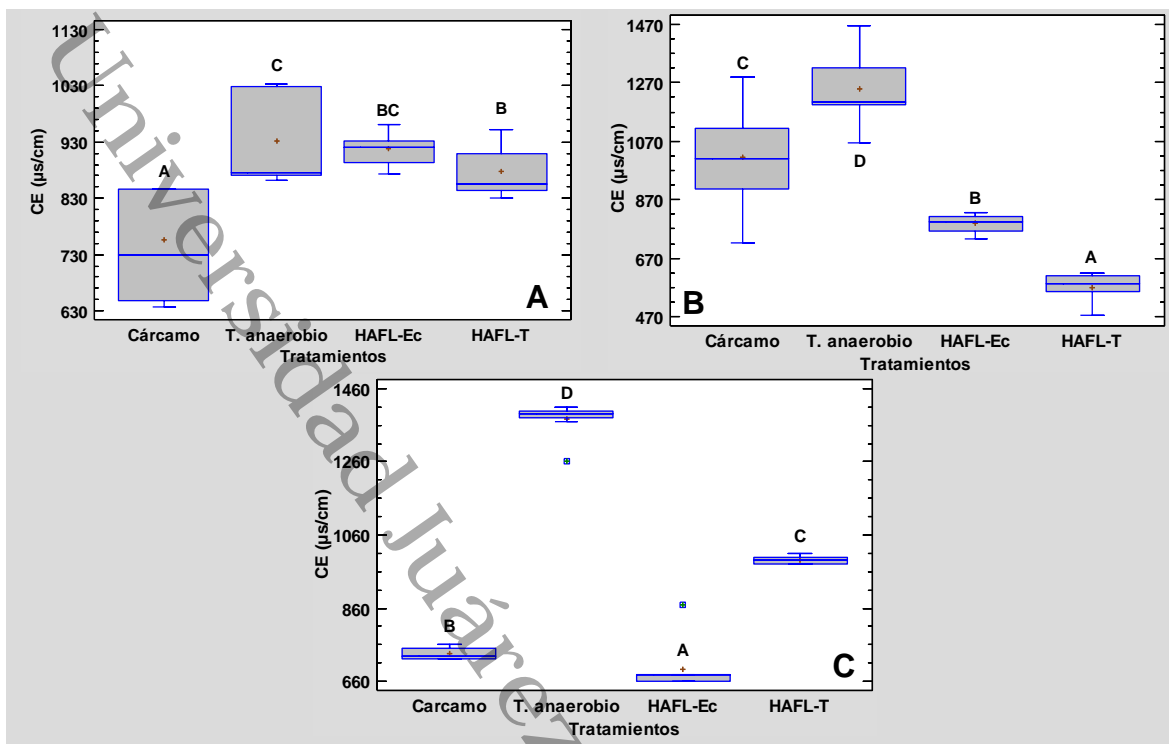


Figura 7. Medias (\pm Q₁; Q₃) de la CE (A=arranque, B = estabilización y C = evaluación). Letras diferentes indican las diferencias ($P < 0.05$ de nivel de confianza del 95.0% (N = 60).

Fuente: Elaboración propia.

Sólidos disueltos totales

La prueba de Kruskal-Wallis para los SDT (mg/L), en la etapa de arranque, se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento Cárcamo con $365.0 \pm$ RI ($Q_1 = 327.385$; $Q_3 = 418.822$) mg/L, seguido de Tanque anaerobio con $437.0 \pm$ RI ($Q_1 = 423.782$; $Q_3 = 515.0$) mg/L y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento HAFL-Ec con $460.0 \pm$ RI ($Q_1 = 410.178$; $Q_3 = 550.166$) mg/L. En el caso en la etapa de estabilización, se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento HAFL-T con $293.0 \pm$ RI ($Q_1 = 246.552$; $Q_3 = 307.644$) mg/L, seguido el HAFL-Ec con $398.0 \pm$ RI ($Q_1 = 381.178$; $Q_3 = 406.822$) mg/L y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento Tanque anaerobio con $610.0 \pm$ RI ($Q_1 = 545.868$; $Q_3 = 708.844$) mg/L. Y, por último, en la etapa de evaluación se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento HAFL-Ec con $310.0 \pm$ RI ($Q_1 = 300.0$; $Q_3 = 330.0$) mg/L, seguido el Cárcamo con $320.0 \pm$ RI ($Q_1 = 310.778$; $Q_3 = 340.0$) mg/L y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento Tanque anaerobio con $630.0 \pm$ RI ($Q_1 = 620.778$; $Q_3 = 640.0$) mg/L.

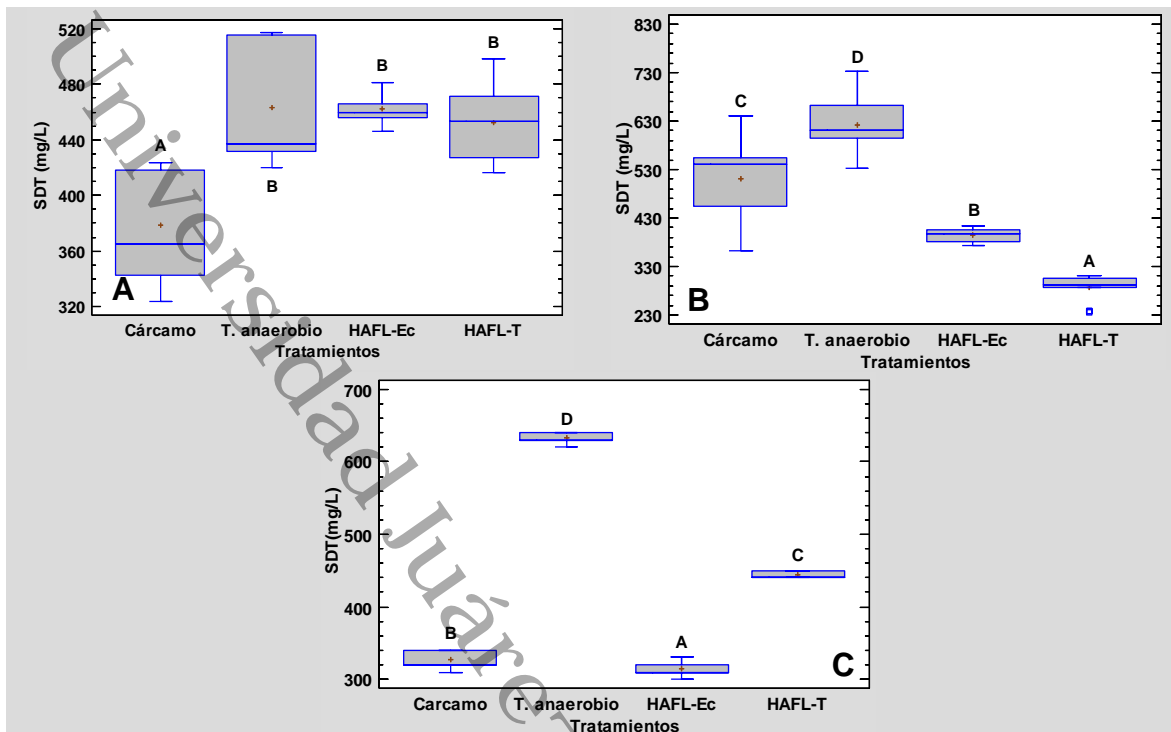


Figura 8. Medias (\pm Q₁; Q₃) de los SDT (A= arranque, B = estabilización y C = evaluación). Letras diferentes indican las diferencias ($P < 0.05$ de nivel de confianza del 95.0% (N = 60). Fuente: Elaboración propia.

Turbiedad

La prueba de Kruskal-Wallis para la Turbiedad (UNT), en la etapa de arranque, se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento Tanque anaerobio con $20.9 \pm$ RI (Q₁ = 14.243; Q₃ = 28.1419) UNT, seguido de HAFL-Ec con $24.1 \pm$ RI (Q₁ = 22.8178; Q₃ = 29.3753) UNT y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento HAFL-T con $41.0 \pm$ RI (Q₁ = 35.888; Q₃ = 47.0695) UNT. En el caso en la etapa de estabilización, se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento HAFL-Ec con $6.7 \pm$ RI (Q₁ = 6.23563; Q₃ = 8.00401) UNT, seguido el HAFL-T con $23.2 \pm$ RI (Q₁ = 7.07428; Q₃ = 27.1971) UNT y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento Tanque anaerobio con $33.3 \pm$ RI (Q₁ = 16.634; Q₃ = 38.5586) UNT. Y, por último, en la etapa de evaluación se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento HAFL-Ec con $2.8 \pm$ RI (Q₁ = 1.7; Q₃ = 3.89222) UNT, seguido el HAFL-T con $15.1 \pm$ RI (Q₁ = 10.9; Q₃ = 16.3) UNT y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento Cárcamo con $35.2 \pm$ RI (Q₁ = 26.7; Q₃ = 40.1922) UNT.

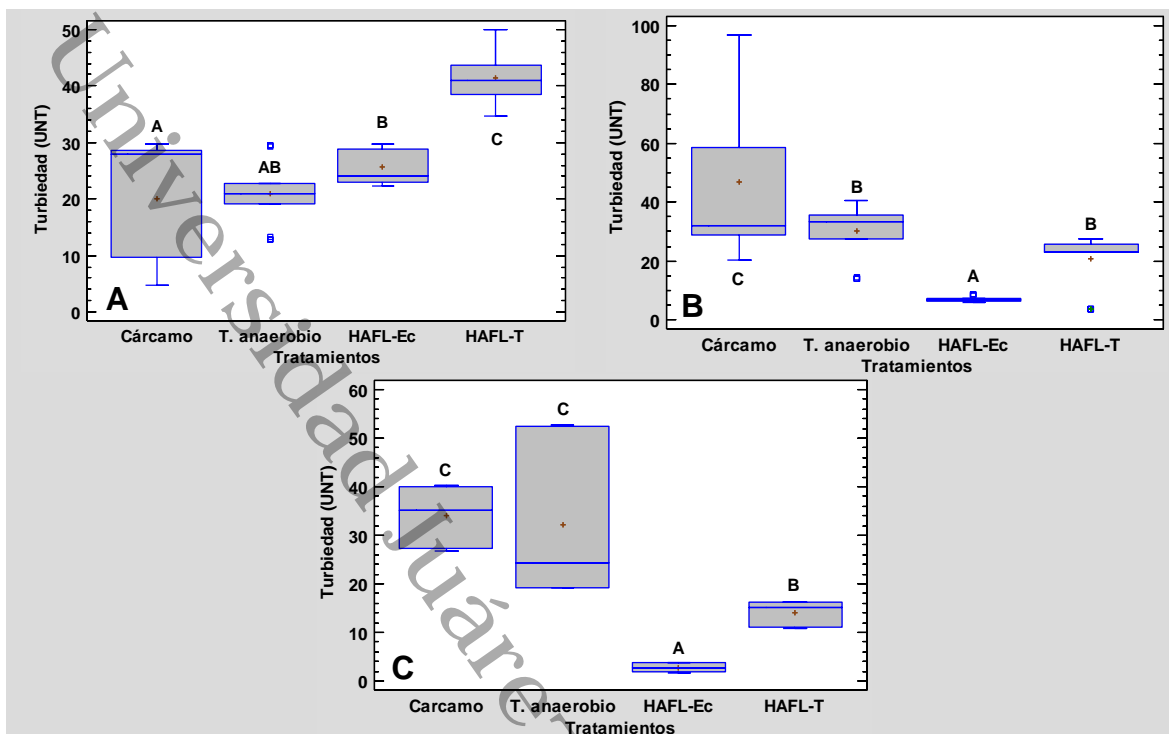


Figura 9. Media (\pm Q₁; Q₃) de la turbiedad (A= arranque, B= estabilización y C= evaluación). Letras diferentes indican las diferencias ($P < 0.05$ de nivel de confianza del 95.0% (N = 60). Fuente: Elaboración propia.

Color

La prueba de Kruskal-Wallis para el Color (UC), en la etapa de arranque, se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento HAFL-Ec con $565.0 \pm$ RI (Q₁ = 368.058; Q₃ = 743.292) UC, seguido de Cárcamo con $945.0 \pm$ RI (Q₁ = 454.719; Q₃ = 1054.72) UC y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento HAFL-T con $2871.0 \pm$ RI (Q₁ = 2792.18; Q₃ = 3205.82) UC. En el caso en la etapa de estabilización, se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento HAFL-Ec con $329.0 \pm$ RI (Q₁ = 293.989; Q₃ = 353.437) UC, seguido el Tanque anaerobio con $1107.0 \pm$ RI (Q₁ = 816.972; Q₃ = 1312.27) UC y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento HAFL-T con $2553.0 \pm$ RI (Q₁ = 2455.18; Q₃ = 2676.22) UC. Y, por último, en la etapa de evaluación se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento HAFL-Ec con $181.0 \pm$ RI (Q₁ = 139.311; Q₃ = 299.767) UC, seguido el HAFL-T con $315.0 \pm$ RI (Q₁ = 186.0; Q₃ = 439.844) UC y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento Cárcamo con $1368.0 \pm$ RI (Q₁ = 1276.24; Q₃ = 1784.0) UC.

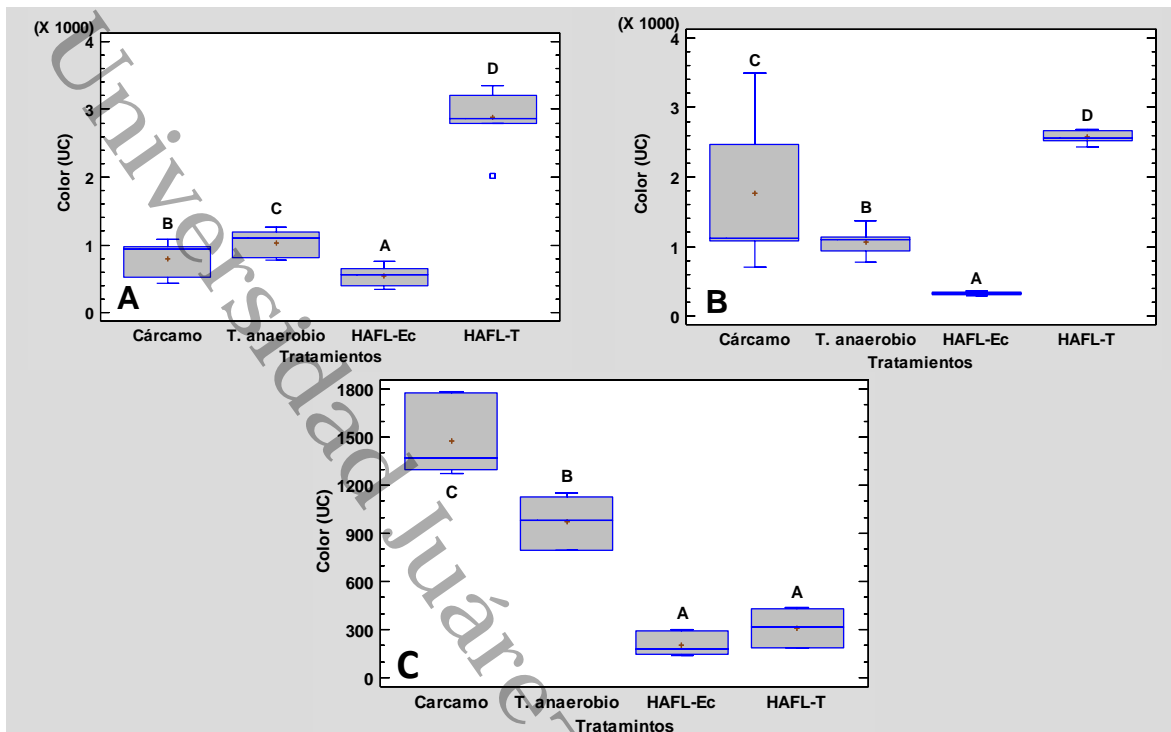


Figura 10. Medias (\pm Q₁; Q₃) del color (A= arranque; B = estabilización y C = evaluación). Letras diferentes indican las diferencias ($P < 0.05$ de nivel de confianza del 95.0% (N = 60). Fuente: Elaboración propia.

Oxígeno disuelto

La prueba de Kruskal-Wallis para el OD (mg/L), en la etapa de arranque, se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento HAFL-T con $3.12 \pm$ RI (Q₁ = 1.55329; Q₃ = 3.31218) mg/L, seguido de HAFL-Ec con $3.26 \pm$ RI (Q₁ = 1.53041; Q₃ = 3.99862) mg/L y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento Tanque anaerobio con $3.54 \pm$ RI (Q₁ = 1.56317; Q₃ = 3.72109) mg/L. En el caso en la etapa de estabilización, se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento HAFL-Ec con $1.1 \pm$ RI (Q₁ = 1.01782; Q₃ = 1.2) mg/L, seguido el Tanque anaerobio con $1.3 \pm$ RI (Q₁ = 1.1; Q₃ = 1.4) mg/L y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento Cárcamo con $2.3 \pm$ RI (Q₁ = 2.11782; Q₃ = 2.4) mg/L. Y, por último, en la etapa de evaluación se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento HAFL-Ec con $1.2 \pm$ RI (Q₁ = 1.00778; Q₃ = 1.49222) mg/L, seguido el Tanque anaerobio con $1.3 \pm$ RI (Q₁ = 1.2; Q₃ = 1.49222) mg/L y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento Cárcamo con $2.2 \pm$ RI (Q₁ = 2.00778; Q₃ = 2.29222) mg/L.

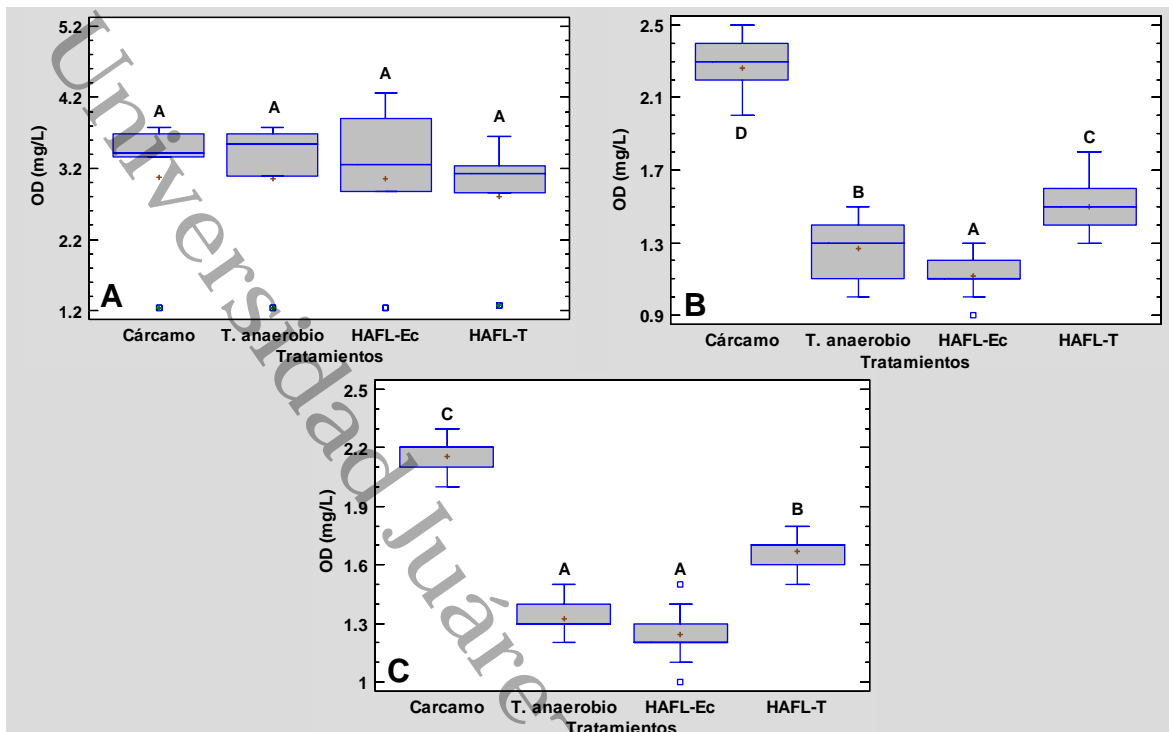


Figura 11. Medias (\pm Q₁; Q₃) del OD (A= arranque, B= estabilización y C= evaluación). Letras diferentes indican las diferencias ($P < 0.05$ de nivel de confianza del 95.0% y las letras iguales indican que no hay diferencias ($P \geq 0.05$ de nivel de confianza del 95.0% (N = 60).
Fuente: Elaboración propia.

Potencial de óxido-reducción

La prueba de Kruskal-Wallis para el POR (mV), en la etapa de arranque, se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento HAFL-Ec con $-289.0 \pm$ RI (Q₁ = -296.109; Q₃ = -249.454) mV, seguido de Tanque anaerobio con $-286.0 \pm$ RI (Q₁ = -309.793; Q₃ = -249.029) mV y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento HAFL-T con $-207.0 \pm$ RI (Q₁ = -237.793; Q₃ = -164.305) mV. En el caso en la etapa de estabilización, se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento Tanque anaerobio con $-190.0 \pm$ RI (Q₁ = -263.982; Q₃ = -175.425) mV, seguido el Cárcamo con $-151.0 \pm$ RI (Q₁ = -203.0; Q₃ = -91.069) mV y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento HAFL-Ec con $-68.0 \pm$ RI (Q₁ = -88.793; Q₃ = -48.1782) mV. Y, por último, en la etapa de evaluación se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento Cárcamo con $-311.0 \pm$ RI (Q₁ = -317.844; Q₃ = -304.311) mV, seguido el HAFL-T con $-188.0 \pm$ RI (Q₁ = -191.0; Q₃ = -173.156) mV y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento HAFL-Ec con $-72.0 \pm$ RI (Q₁ = -73.0; Q₃ = -71.0778) mV.

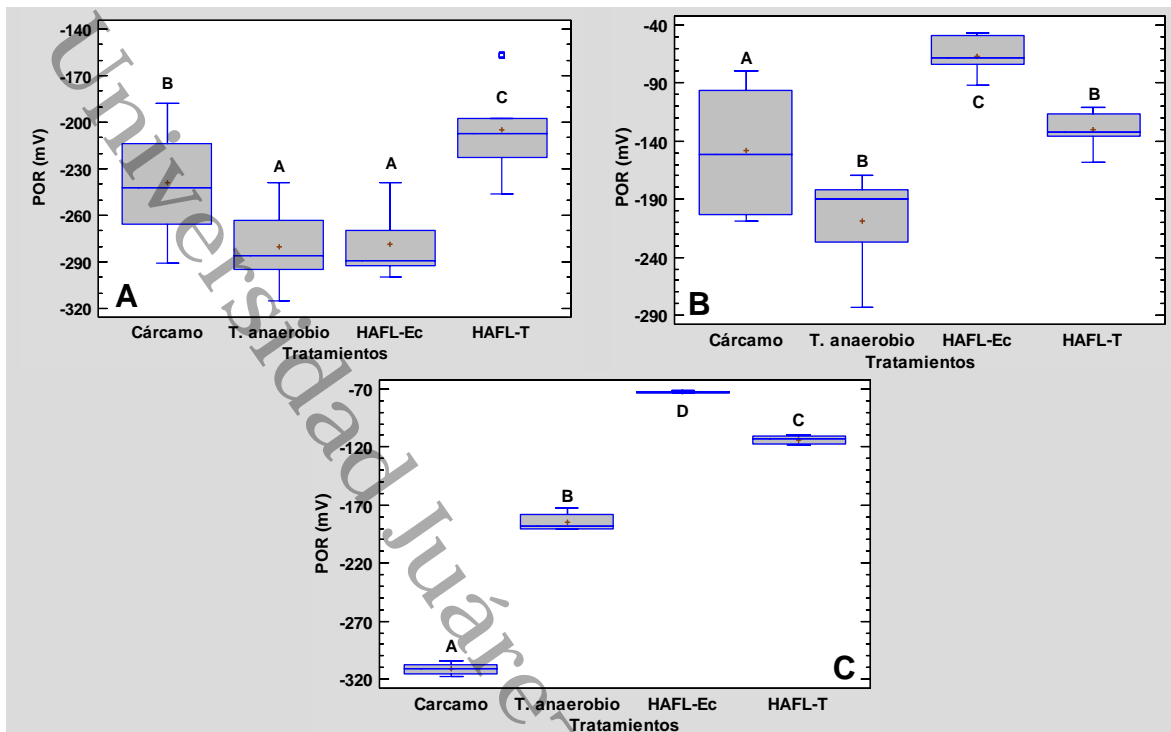


Figura 12. Medias (\pm Q₁; Q₃) del POR (A= arranque, B = estabilización y C = evaluación). Letras diferentes indican las diferencias ($P < 0.05$ de nivel de confianza del 95.0% (N = 60). Fuente: Elaboración propia.

Demanda química de oxígeno

La prueba de Kruskal-Wallis para la DQO (mg/L), en la etapa de arranque, se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento HAFL-Ec con $56.0 \pm RI$ (Q₁ = 42.7127; Q₃ = 66.1092) mg/L, seguido de HAFL-T con $153.0 \pm RI$ (Q₁ = 143.178; Q₃ = 163.822) mg/L y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento Cárcamo con $421.0 \pm RI$ (Q₁ = 410.178; Q₃ = 550.166) mg/L. En el caso en la etapa de estabilización, se encontró que la media con valor más bajo es el tratamiento HAFL-Ec con $8.0 \pm RI$ (Q₁ = 2.0; Q₃ = 11.8218) mg/L, seguido el HAFL-T con $48.0 \pm RI$ (Q₁ = 38.3563; Q₃ = 57.6437) mg/L y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento Cárcamo con $517.0 \pm RI$ (Q₁ = 423.857; Q₃ = 832.092) mg/L. Y, por último, en la etapa de evaluación se encontró que el valor mediano más bajo es el tratamiento HAFL-Ec con $109.0 \pm RI$ (Q₁ = 101.311; Q₃ = 118.922) mg/L, seguido el HAFL-T con $197.0 \pm RI$ (Q₁ = 152.778; Q₃ = 223.222) mg/L y finalmente la media con valor más alto está en el tratamiento Tanque anaerobio con $310.0 \pm RI$ (Q₁ = 253.778; Q₃ = 360.222) mg/L.

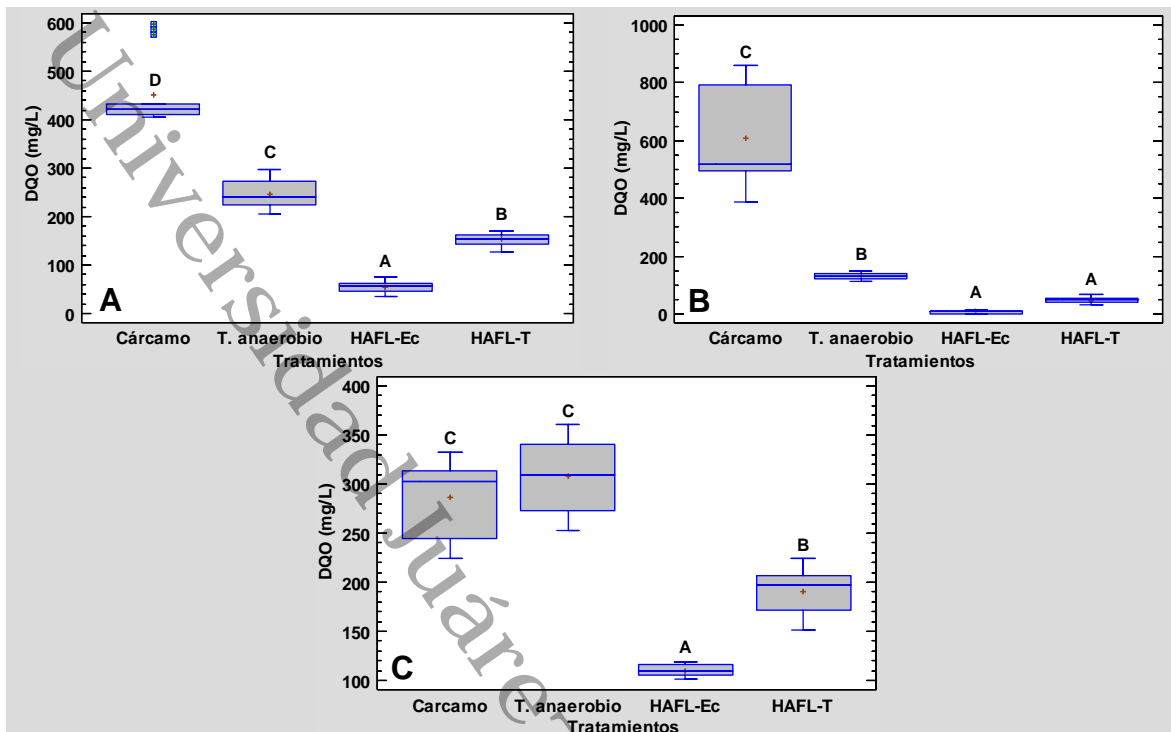


Figura 13. Medias (\pm Q₁; Q₃) de la DQO (A= arranque, B = estabilización y C = evaluación). Letras diferentes indican las diferencias ($P < 0.05$ de nivel de confianza del 95.0% (N = 60). Fuente: Elaboración propia

10.3. Cumplimiento ambiental de la normativa vigente

10.3.1. Etapa de arranque

El cumplimiento ambiental de los dos humedales durante la etapa de arranque se puede observar en la tabla 6 y 7. De los humedales, los parámetros que no cumplen con los LMP para la descarga a cuerpos receptores para el HAFL-T son la turbiedad, color y DQO; mientras que para el HAFL-Ec son la turbiedad y el color.

Tabla 6. Valores promedio (\pm DE) de la calidad del agua del HAFL-T durante la etapa de arranque.

Parámetros	Cárcamo		Tanque anaerobio		Testigo		LMP	Referencia
	X	DE	X	DE	X	DE		
pH (UpH)	8.44	0.21	8.35	0.20	8.61	0.13	6 - 9	A
Tem (°C)	31.73	0.46	31.50	0.54	30.79	1.03	35	A
CE (μ s/cm)	755.60	86.69	931.80	75.34	877.53	43.39	1000	B
SDT (mg/L)	378.80	40.36	462.80	40.84	452.33	28.95	500	E
Turb (UNT)	20.10	10.93	20.90	5.48	41.50	4.94	15	C
Color (UC)	792.07	262.35	1,031.67	199.28	2,884.47	398.30	10	C
OD (mg/L)	3.08	0.96	3.06	0.97	2.80	0.82	5	B
POR (mV)	- 238.60	35.00	- 280.40	25.41	- 205.20	29.76	NA	D
DQO (mg/L)	452.00	69.90	247.20	27.46	153.00	11.89	120	A
A: NOM-001-SEMARNAT-2021; B: CECA/1989; C: LFDDAMAN 2024; D: Gerónimo (2022) POR (+) aerobio, POR (-) anaerobio; E: NADF-003-AGUA-2002								

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Valores promedio (\pm DE) de la calidad del agua del HAFL-Ec durante la etapa de arranque.

Parámetros	Cárcamo		Tanque anaerobio		HAFL		LMP	Referencia
	X	DE	X	DE	X	DE		
pH (UpH)	8.44	0.21	8.35	0.20	8.05	0.43	6 - 9	A
Tem (°C)	31.73	0.46	31.50	0.54	30.35	1.16	35	A
CE (μ s/cm)	755.60	86.69	931.80	75.34	917.27	28.09	1000	B
SDT (mg/L)	378.80	40.36	462.80	40.84	462.33	9.90	500	E
Turb (UNT)	20.10	10.93	20.90	5.48	25.58	2.97	15	C
Color (UC)	792.07	262.35	1,031.67	199.28	547.00	159.55	10	C
OD (mg/L)	3.08	0.96	3.06	0.97	3.06	1.04	5	B
POR (mV)	- 238.60	35.00	- 280.40	25.41	- 278.73	21.18	NA	D
DQO (mg/L)	452.00	69.90	247.20	27.46	54.20	11.75	120	A
A: NOM-001-SEMARNAT-2021; B: CECA/1989; C: LFDDAMAN 2024; D: Gerónimo (2022) POR (+) aerobio, POR (-) anaerobio; E: NADF-003-AGUA-2002								

Fuente: Elaboración propia.

10.3.2. Etapa de estabilización

El cumplimiento ambiental de los dos humedales durante la etapa de estabilización se puede observar en la tabla 8 y 9. De los humedales, los parámetros que no cumplen con los LMP para la descarga a cuerpos receptores para el HAFL-T son la turbiedad y color; mientras que para el HAFL-Ec solo es el color.

Tabla 8. Valores promedio (\pm DE) de la calidad del agua del HAFL-T durante la etapa de estabilización.

Parámetros	Cárcamo		Tanque anaerobio		Testigo		LMP	Referencia
	X	DE	X	DE	X	DE		
pH (UpH)	8.31	0.33	8.48	0.39	8.86	0.27	6 - 9	A
Tem (°C)	28.29	1.06	27.09	0.88	27.18	0.96	35	A
CE (μ s/cm)	1,013.27	190.39	1,247.93	132.22	568.93	52.82	1000	B
SDT (mg/L)	509.80	96.38	622.07	65.09	285.73	26.39	500	E
Turb (UNT)	47.06	27.76	30.13	9.16	20.63	9.01	15	C
Color (UC)	1,760.40	1,072.81	1,065.87	199.64	2,568.67	90.26	10	C
OD (mg/L)	2.26	0.14	1.27	0.15	1.50	0.13	5	B
POR (mV)	- 148.40	51.36	- 209.33	39.87	- 130.47	15.37	NA	D
DQO (mg/L)	609.00	181.43	129.53	9.67	47.20	10.52	120	A
A: NOM-001-SEMARNAT-2021; B: CECA/1989; C: LFDDAMAN 2024; D: Gerónimo (2022) POR (+) aerobio, POR (-) anaerobio; E: NADF-003-AGUA-2002								

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Valores promedio (\pm DE) de la calidad del agua del HAFL-Ec durante la etapa de estabilización.

Parámetros	Cárcamo		Tanque anaerobio		HAFL		LMP	Referencia
	X	DE	X	DE	X	DE		
pH (UpH)	8.31	0.33	8.48	0.39	8.36	0.16	6 - 9	A
Tem (°C)	28.29	1.06	27.09	0.88	26.55	1.53	35	A
CE (μ s/cm)	1,013.27	190.39	1,247.93	132.22	789.60	27.88	1000	B
SDT (mg/L)	509.80	96.38	622.07	65.09	395.00	12.21	500	E
Turb (UNT)	47.06	27.76	30.13	9.16	6.93	0.84	15	C
Color (UC)	1,760.40	1,072.81	1,065.87	199.64	326.00	23.89	10	C
OD (mg/L)	2.26	0.14	1.27	0.15	1.11	0.11	5	B
POR (mV)	- 148.40	51.36	- 209.33	39.87	- 66.60	16.22	NA	D
DQO (mg/L)	609.00	181.43	129.53	9.67	7.27	4.35	120	A
A: NOM-001-SEMARNAT-2021; B: CECA/1989; C: LFDDAMAN 2024; D: Gerónimo (2022) POR (+) aerobio, POR (-) anaerobio; E: NADF-003-AGUA-2002								

Fuente: Elaboración propia.

10.3.3. Etapa de evaluación

El cumplimiento ambiental de los dos humedales durante la etapa de evaluación se puede observar en la tabla 10 y 11. Los dos humedales, los parámetros que no cumplen con los LMP para la descarga a cuerpos receptores son el color y la DQO.

Tabla 10. Valores promedio (\pm DE) de la calidad del agua del HAFL-T durante la etapa de evaluación.

Parámetros	Cárcamo		Tanque anaerobio		Testigo		LMP	Referencia
	X	DE	X	DE	X	DE		
pH (UpH)	8.14	0.12	8.16	0.19	7.29	0.09	6 - 9	A
Tem (°C)	27.99	0.34	28.01	0.19	26.77	0.36	35	A
CE (μ s/cm)	735.56	17.40	1,376.67	45.83	993.33	12.25	1000	B
SDT (mg/L)	326.67	11.18	633.33	7.07	444.44	5.27	500	E
Turb (UNT)	34.01	5.79	32.11	15.55	14.16	2.44	15	C
Color (UC)	1,479.11	229.03	969.56	149.48	312.67	108.72	10	C
OD (mg/L)	2.16	0.09	1.32	0.10	1.67	0.10	5	B
POR (mV)	- 72.22	0.67	- 311.22	4.49	- 184.89	7.37	NA	D
DQO (mg/L)	286.33	41.21	308.00	39.11	191.00	24.54	120	A
A: NOM-001-SEMARNAT-2021; B: CECA/1989; C: LFDDAMAN 2024; D: Gerónimo (2022) POR (+) aerobio, POR (-) anaerobio; E: NADF-003-AGUA-2002								

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Valores promedio (\pm DE) de la calidad del agua del HAFL-Ec durante la etapa de evaluación.

Parámetros	Cárcamo		Tanque anaerobio		HAFL		LMP	Referencia
	X	DE	X	DE	X	DE		
pH (UpH)	8.14	0.12	8.16	0.19	6.67	0.05	6 - 9	A
Tem (°C)	27.99	0.34	28.01	0.19	26.62	0.25	35	A
CE (μ s/cm)	735.56	17.40	1,376.67	45.83	694.44	66.54	1000	B
SDT (mg/L)	326.67	11.18	633.33	7.07	314.44	11.30	500	E
Turb (UNT)	34.01	5.79	32.11	15.55	2.78	0.91	15	C
Color (UC)	1,479.11	229.03	969.56	149.48	207.00	70.06	10	C
OD (mg/L)	2.16	0.09	1.32	0.10	1.24	0.15	5	B
POR (mV)	- 72.22	0.67	- 311.22	4.49	- 113.67	3.61	NA	D
DQO (mg/L)	286.33	41.21	308.00	39.11	110.22	6.30	120	A
A: NOM-001-SEMARNAT-2021; B: CECA/1989; C: LFDDAMAN 2024; D: Gerónimo (2022) POR (+) aerobio, POR (-) anaerobio; E: NADF-003-AGUA-2002								

Fuente: Elaboración propia.

10.4. Eficiencia de remoción de los humedales

10.4.1. Etapa de arranque

La eficiencia de remoción de los dos humedales durante la etapa de arranque se muestra en la tabla 12 y 13. El parámetro que tuvo una mayor eficiencia de remoción en los dos humedales fue la DQO con un 66.15% en el HAFL-T y un 88.01% en el HAFL-Ec. De ahí, los parámetros que tuvieron mayor eficiencia de remoción de cada

humedal fueron el color en el HAFL-Ec con un 30.94%, mientras que en el HAFL-T tuvo un -264.17%, seguido del POR en el HAFL-T con un 14%, mientras que en el HAFL-Ec tuvo un -16.82%. Los parámetros que tuvieron nula eficiencia en los dos humedales fueron CE, SDT y turbiedad.

Tabla 12. Eficiencia de remoción de los parámetros de la calidad del agua del HAFL-T en la fase de arranque.

Parámetros	T. anaerobio	Testigo	ETP% Testigo
pH (UpH)	1.12	- 3.22	- 2.06
Tem (°C)	0.71	2.24	2.94
CE (µs/cm)	- 23.32	5.82	- 16.14
SDT (mg/L)	- 22.18	2.26	- 19.41
Turb (UNT)	- 3.87	- 98.60	- 106.49
Color (UC)	- 30.25	- 179.59	- 264.17
OD (mg/L)	0.45	8.66	9.07
POR (mV)	- 17.53	26.82	14.00
DQO (mg/L)	45.31	38.11	66.15

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Eficiencia de remoción de los parámetros de la calidad del agua del HAFL-Ec en la fase de arranque.

Parámetros	T. anaerobio	HAFL	ETP% HAFL
pH (UpH)	1.12	3.51	4.60
Tem (°C)	0.71	3.66	4.35
CE (µs/cm)	- 23.32	1.56	- 21.40
SDT (mg/L)	- 22.18	0.10	- 22.05
Turb (UNT)	- 3.87	- 22.41	- 27.28
Color (UC)	- 30.25	46.98	30.94
OD (mg/L)	0.45	0.26	0.71
POR (mV)	- 17.53	0.59	16.82
DQO (mg/L)	45.31	3.51	88.01

Fuente: Elaboración propia.

10.4.2. Etapa de estabilización

La eficiencia de remoción de los dos humedales durante la etapa de estabilización se muestra en la tabla 14 y 15. Los parámetros que tuvieron una mayor eficiencia de remoción en los dos humedales fue la DQO con un 92.25% en el HAFL-T y un 98.81% en el HAFL-Ec, seguido de la turbiedad con un 56.17% en el HAFL-T y un 85.27% en el HAFL-Ec. De ahí, los parámetros que tuvieron mayor eficiencia de remoción de cada humedal fueron el color en el HAFL-Ec con un 81.48%, mientras que en el HAFL-T tuvo un -45.91%, seguido del CE en el HAFL-T con un 43.85%, mientras que en el HAFL-Ec tuvo un 22.07%. El parámetro que tuvo nula eficiencia en los dos humedales fue el pH.

Tabla 14. Eficiencia de remoción de los parámetros de la calidad del agua del HAFL-T en la fase de estabilización.

Parámetros	T. anaerobio	Testigo	ETP% Testigo
pH (UpH)	- 2.04	- 4.47	- 6.60
Tem (°C)	4.24	- 0.32	3.93
CE (µs/cm)	- 23.16	54.41	43.85
SDT (mg/L)	- 22.02	54.07	43.95
Turb (UNT)	35.97	31.55	56.17
Color (UC)	39.45	- 140.99	- 45.91
OD (mg/L)	43.95	- 18.42	33.63
POR (mV)	- 41.06	37.68	12.08
DQO (mg/L)	78.73	63.56	92.25

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Eficiencia de remoción de los parámetros de la calidad del agua del HAFL-Ec en la fase de estabilización.

Parámetros	T. anaerobio	HAFL	ETP% HAFL
pH (UpH)	- 2.04	1.38	- 0.63
Tem (°C)	4.24	2.02	6.17
CE (µs/cm)	- 23.16	36.73	22.07
SDT (mg/L)	- 22.02	36.50	22.52
Turb (UNT)	35.97	76.99	85.27
Color (UC)	39.45	69.41	81.48
OD (mg/L)	43.95	12.11	50.74
POR (mV)	- 41.06	68.18	55.12
DQO (mg/L)	78.73	94.39	98.81

Fuente: Elaboración propia.

10.4.3. Etapa de evaluación

La eficiencia de remoción de los dos humedales durante la etapa de estabilización se muestra en la tabla 16 y 17. El parámetro que tuvo una mayor eficiencia de remoción en los dos humedales fue el color con un 78.86% en el HAFL-T y un 86.01% en el HAFL-Ec. Además, en esta etapa el HAFL-Ec todas sus eficiencias de remoción supera al de el HAFL-T. El parámetro que tuvo nula eficiencia en los dos humedales fue el POR.

Tabla 16. Eficiencia de remoción de los parámetros de la calidad del agua del HAFL-T en la fase de evaluación.

Parámetros	T. anaerobio	Testigo	ETP% Testigo
pH (UpH)	- 0.14	10.63	10.50
Tem (°C)	- 0.08	4.44	4.37
CE (µs/cm)	- 87.16	27.85	- 35.05
SDT (mg/L)	- 93.88	29.82	- 36.05
Turb (UNT)	5.59	55.92	58.38
Color (UC)	34.45	67.75	78.86
OD (mg/L)	38.66	- 26.05	22.68
POR (mV)	- 330.92	40.59	- 156.00
DQO (mg/L)	- 7.57	37.99	33.29

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Eficiencia de remoción de los parámetros de la calidad del agua del HAFL-Ec en la fase de evaluación.

Parámetros	T. anaerobio	HAFL	ETP% HAFL
pH (UpH)	- 0.14	18.26	18.14
Tem (°C)	- 0.08	4.96	4.88
CE (µs/cm)	- 87.16	49.56	5.59
SDT (mg/L)	- 93.88	50.35	3.74
Turb (UNT)	5.59	91.35	91.83
Color (UC)	34.45	78.65	86.01
OD (mg/L)	38.66	5.88	42.27
POR (mV)	- 330.92	63.48	- 57.38
DQO (mg/L)	- 7.57	64.21	61.51

Fuente: Elaboración propia.

11. Discusiones

Se pudo observar que la *Echinodorus cordifolius* pudo proliferar en él HA, uno de los elementos esenciales que influyó en su crecimiento fue la abundancia de nutrientes que contiene las aguas residuales, además de su adaptación y su reproducción en estas aguas (Kinidi y Salleh, 2017). Se ha reportado que esta especie puede desarrollarse en el agua, de forma sumergida o emergente y en diferentes tipos de suelos (como franco arenosos o arcillosos), en rangos de temperatura de 6 – 44 °C y pH de 7.8 – 9 UpH, además, se reproducen tanto sexual como asexualmente durante el año (Naz y Kabir, 2024).

En la primera etapa de monitoreo, los valores de ER% del HAFL con la *Echinodorus cordifolius* tuvieron valores muy bajos, esto debido a que todavía la macrófita y los microorganismos se estaban adaptando al humedal (López et al., 2023). En este trabajo se realizaron tres campañas de muestreo (arranque, estabilización y

evaluación), algunos parámetros presentaron eficiencias negativas (-), esto se puede deber al fenómeno llamado "Corto Circuito", esto sucede por un descontrol de procesos como el aumento del caudal del fluido, muerte de la vegetación que causa la liberación de los contaminantes previamente adsorbidos o absorbidos, entre otros (Magaña, 2024).

Los valores promedio de pH del HAFL-Ec para la etapa de arranque (8.05 ± 0.43) y estabilización (8.36 ± 0.16) se comportó con una tendencia alcalina y en la última etapa (6.67 ± 0.05) presento un valor ligeramente ácido, de este modo, cumpliendo con lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021 (6 a 9 UpH). La reducción del pH se debe por las interacciones entre el sustrato empleado y la biopelícula, la presencia de la vegetación (Lara, 2021). Según Shah et al. (2015), un pH y temperatura adecuados para una favorable fitorremediación, se encuentran en un rango de 6 a 9 UpH y 15 a 38 °C. Por otra parte, los valores promedio de temperatura de cada etapa se encontraron por debajo de lo establecido por la NOM-001-SEMARNAT-2021 (35 °C), estos fueron de 30.35 ± 1.16 (arranque), 26.55 ± 1.53 (estabilización) y de 26.62 ± 0.25 (evaluación). Además, De La Mora et al. (2020), expone que una temperatura por encima de los 17 °C en un humedal artificial favorece el crecimiento acelerado de las macrófita, lo que, a su vez, igual favorece a la degradación de contaminantes.

De acuerdo con Iturri et al. (2022), la CE en el HAFL indica la medida de la capacidad para poder conducir corriente eléctrica a través del agua, este valor es proporcional a las concentraciones de iones en el agua, lo que permite estimar la cantidad de sales disueltas en el medio. Mientras que, Hussain (2019), menciona que los SDT en el agua indica la medida del contenido de todas las sustancias inorgánicas y orgánicas disueltas en este medio en forma molecular, iónica o microgranular. De acuerdo con estos dos conceptos, nos da a entender que los SDT y la CE están relacionadas por los iones, entre mayor sea el valor de la CE, aun mayor es el valor de los SDT, estas relaciones las podemos observar en los resultados que se obtuvieron en la etapa de arranque con un $917.27 \mu\text{s/cm}$ y 462.33 mg/L ; en estabilización con un $789.60 \mu\text{s/cm}$ y 395 mg/L ; y en evaluación con un

694.44 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y 314.44 mg/L ; estos resultados obtenidos cumplen con los criterios establecidos por la CECA/1989 y por NADF-003-AGUA-2002.

Los parámetros de turbiedad y color están relacionados debido que estos indican la presencia de sólidos suspendidos en las aguas residuales (Ortiz et al., 2018). En la primera etapa, no bajaron los niveles de turbiedad, por lo que no se cumple con el criterio establecido por la LFDDAMAN 2024, mientras que en las etapas de estabilización y evaluación hubo una ER% del 85.27% y 91.83%, de este modo cumpliendo con los criterios establecidos. Sin embargo, todas las ER% de color que hubo en cada etapa (30.94%, 81.48% y 86.01%), no removieron lo suficiente para poder cumplir con los criterios establecidos por la LFDDAMAN 2024. Los valores obtenidos en la última etapa son parecidos a los que obtuvo Solís et al. (2016), se evaluó el *Cyperus articulatus* L en un HAFL la cual trataba aguas residuales domésticas y su TRH fueron de 5.5 y 7.5 días, este tuvo una ER% de 94.7% para turbiedad y 79.6 para color. El aumento de la turbiedad se asocia por una baja eliminación de patógenos, algunos cofactores que se relaciona por este aumento son la presencia de materia coloidal y en suspensión (finamente dividida), así como el plancton y otros organismos microscópicos (Julca, 2019).

El OD mide la cantidad de oxígeno molecular disuelta en el agua (Deacutis, 2016). Los valores que se obtuvieron de OD cumplieron con los criterios establecidos por CECA/1989, cada etapa tuvo una ER% de 0.71% (3.06 mg/L), 50.74% (1.11 mg/L) y 42.27% (1.24 mg/L). Batista et al. (2018), y Alarcón et al. (2018), explican que la reducción del OD en el humedal se debe principalmente a la limitada difusión y a la velocidad con la que los microorganismos y las raíces consumen el oxígeno para eliminar ciertos parámetros (DQO, DBO y nitrógeno amoniacal), pero igual, factores como temperatura y turbiedad reducen el OD. Estos valores que se obtuvieron nos dan entender que el humedal está en condiciones anaerobias (Nuñez et al., 2019). Además, Gerónimo (2022), nos explica que cuando un HA presenta valores negativos de POR este está en condiciones anaerobias; este valor negativo se debe a que el OD tiene concentraciones bajas y de que hay un ambiente con condiciones reductoras en él HA. Los valores que se obtuvieron de POR en cada etapa (-278.73, -66.60 y -113.67) fueron negativos. Los valores que se obtuvieron de OD y POR de

la etapa de evaluación son parecidos a los que obtuvo Alonso (2024), el cual trataba aguas residuales industriales con *Thalia geniculata* por medio de un HAFS con un TRH de 2.02 hora, los niveles de OD y POR que salía del humedal eran de 1.58 mg/L y -129 mV.

La DQO es un parámetro usado para evaluar la calidad del agua, este mide la cantidad de oxígeno necesario para poder oxidar la materia orgánica presente en el agua (Guarnizo, 2024). Cada etapa tuvo una ER% de 88.01% (54.20 mg/L), 98.81% (7.27 mg/L) y 61.51% (110.22 mg/L), para el arranque, estabilización y evaluación, respectivamente; eliminando con ello una gran cantidad de DQO de modo que cumple con la NOM-001-SMARNAT-2021 el cual establece un LMP de 120 mg/L para embalses, lagos y lagunas. El valor obtenido en la última etapa es parecido al que Rojas y Purihuamán (2018), trataron aguas residuales domésticas de una comunidad por medio de un HAFS, usando la macrófita *Chrysopogon zizanioides* y con TRH de 10 días, tuvieron un valor de tratamiento de 93.00 mg/L (72.97%).

Como se pudo observar en esta investigación, se contó con dos humedales, uno contaba con vegetación (HAFL-Ec) y el otro no contaba con vegetación (HAFL-T), el propósito de tener estos dos humedales era para evaluar el impacto que tiene la macrófita en el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, se generaron algas en el HAFL-T, esto debido a la falta de vegetación, la disponibilidad de nutrientes en el agua residual y a la presencia de luz solar (Lee et al., 2017). Las algas tienen el potencial de remover de las aguas residuales la materia orgánica y nutrientes (Pérez-Álvarez et al., 2023).

12. Conclusiones

De acuerdo a los análisis realizados en esta investigación se concluye que los HAFL con la vegetación acuática *Echinodorus cordifolius*, la cual es nativa del estado de Tabasco, es viable para la fitorremediación de aguas residuales domésticas, esto debido a la capacidad de sintetizar y de asimilar la materia orgánica que se encuentran presentes en el agua residual doméstica dando como resultado la proliferación de esta macrófita.

La *Echinodorus cordifolius*, se inició esta investigación con 12 especies con una masa y altura promedio de 0.42 Kg y 92 cm, al final de este acabo con 67 especies con una masa y altura promedio de 3.89 Kg y 231.8 cm, demostrando que esta macrófita se adaptó bien a este tipo de aguas, ya que esta tuvo una propagación y crecimiento significativo.

En la última etapa de los monitoreos, se logró una ER% del 5.59% en CE, 3.74% en SDT, 91.83% en turbiedad, 86.01% en color, 42.27% en OD, -57.38% en POR y 61.51% en DQO, en un TRH de 6.67 días y con un gasto de operación promedio (Qmed) de 173.3 L/día.

En cuanto al cumplimiento con la NOM-001-SMARNAT-2021 el cual establece un LMP para DQO de 120 mg/L para embalses, lagos y lagunas, esta se cumple, ya que en cada etapa (arranque, estabilización y evaluación), el agua tratada sale con valores de 54.20 mg/L (88.01%), 7.27 mg/L (98.81%) y 110.22 mg/L (61.51%), respectivamente. Sin embargo, solo la etapa de estabilización alcanzo una ER% >90%, y la de arranque estuvo cerca de alcanzar ese límite mínimo establecido.

13. Referencias

- Acero-Oliete, A., López-Julián, P. L., Russo, B., Sánchez-Catalán, J. C., Ruiz-Lozano, O. (2023). Depuración de aguas residuales con humedales artificiales. Resultados de la experiencia en la planta piloto de La Almunia de Doña Godina (2019-2023). VII Jornadas de Ingeniería del Agua, Cartagena. <http://dx.doi.org/10.31428/10317/16693>.
- Alarcón Herrera, M. T., Zurita Martínez, F., Lara-Borrero, J. A., Vidal Sáez, G. C. (2018). *Humedales de tratamiento: alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina*. Pontificia Universidad Javeriana. https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/34519/Humedales_epub?sequece=1&isAllowed=y
- Alonso Mendoza, E. C. (2024). *Remoción de la carga orgánica y metales en un sistema de tratamiento de aguas residuales* (Tesis de Maestría). División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. <https://ri.ujat.mx/handle/200.500.12107/4770>
- Arteaga-Cortez, V. M., Quevedo-Nolasco, A., del Valle-Paniagua, D. H., Castro-Popoca, M. y 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), 319-342. <https://doi.org/10.24850/t-tyca-2019-05-12>.
- Batista, A., Carreño, C., Gaitán, C., Núñez, N. y Vallester, E. (2018). Importancia del nivel de oxígeno en la eficiencia de un humedal artificial con flujo subsuperficial vertical ascendente. *Revista de Iniciación Científica*, 4(1), 40-45. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v4.1.1865>
- Castañeda, A. A. (2021). Valoración de humedal de tratamiento para el saneamiento de aguas residuales en una población del lago de Patzcuaro, Michoacán – México. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 12(4), 11-20. <https://www.executivebs.org/publishing.cl/aci/2021/Vol12/Nro4/2-ACI1388-21%20full.pdf>
- Castañeda Villanueva, A. A. (2021). Evaluación de humedales construidos en Los Altos de Jalisco: Los casos de Jesús María (Ojo Zarco) y Arandas (Martínez Valadez). *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, 11(28), 287-291. <https://rlac.buap.mx/?q=content/volumen-11-n%C3%BAmero-especial-foro-octubre-2020>
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2016). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Libro 30. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: humedales artificiales. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf>

- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2022). Estadísticas del Agua en México 2021. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM%202021.pdf>
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2024). Estadísticas del Agua en México 2023. https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Descargas/pdf/EAM2023_f.pdf
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2024). Ley Federal de Derechos: Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes para el ejercicio fiscal 2024. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/915768/Ley_Federal_de_Derechos_2024.pdf
- Deacutis, C. F. (2016). Dissolved Oxygen. In: Kennish, M. J. (eds) *Encyclopedia of Estuaries. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Dordrecht. <https://link.springer.com/referencework/10.1007/978-94-017-8801-4>
- De La Mora-Orozco, C., Saucedo-Terán, R. A., González-Acuña, I, J., Gómez-Rosales, S. y Flores-López, H. E. (2020). *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11(2), 1-17. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11s2.4681>
- Gallegos-Rodríguez, J., López-Ocaña, G., Bautista-Margulis, R. G., Torres-Balcázar, C. A. (2018). Evaluation of free flow constructed wetlands with *Sagittaria latifolia* and *Sagittaria lancifolia* in domestic wastewater treatment. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 10(2), 49-65. <http://dx.doi.org/10.5154/r.inagbi.2017.03.005>
- Gerónimo López, M. A. (2022). *Asclepias curassavica L. y especies de césped en el tratamiento de aguas residuales domesticas vía humedales artificiales de flujo subsuperficial* (Tesis de Licenciatura). División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. <https://ri.ujat.mx/handle/200.500.12107/6419>
- Gitau, P. N., Ndiritu, G. G. y Gichuki, N. N. (2019). Ecological, recreational and educational potential of a small artificial wetland in an urban environment. *African Journal of Aquatic Science*, 44(4), 329-338. <https://doi.org/10.2989/16085914.2019.1663721>.
- Guarnizo Crespo, D. M., Lapo Escobar, L. M. y Rodriguez Iñiguez, D. L. (2024). Medicion de la DQO como parámetro eficaz en el control ambiental en descargas de áreas urbanas. *Ciencia latina revista científica multidisciplinar*, 8(4), 9399-9417. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.13083
- Guzmán Pérez, J., Cruz Hernández, C. V., Torres Castro, P., Domínguez Rodríguez, C. V., Adams Schroeder, R. H., Baltierra Trejo, E. y Gómz Cruz, R. (2021). Efectos del pH y temperatura en lagunas de estabilización de un

- campus universitario. *Kuxulkab'*, 27(59), 19-29.
<https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a27n59.4038>
- Hussain, M. S. (2019, diciembre). Total dissolve salts (TDS) [Presentación]. Federal urban university of arts, science and technology.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11858.30406>
- Iturri, A., Kloster, N. S., Alvarez, C., Isasti, J. y Díaz-Zorita, M. (2022). ¿Qué medimos cuando analizamos la conductividad eléctrica de aguas y suelos?. *Notas Agrícolas Pampeanas*, 6, 17-22.
<https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/13256?show=full#>
- Jiménez-López, E. C., López-Ocaña, G., Bautista-Margulis, R.G., Castelán-Estrada, M., Guerrero-Peña, A., Hernández-Barajas, J. R., Torres-Balcázar, C. A., De la Cruz Luna, E., Remellón-Cerino, M. J., Solís-Sílván, R. (2017). Wastewater treatment by constructed wetlands with *Thalia geniculata* and *Paspalum paniculatum* in a tropical system of Mexico. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 12(1), 42-50.
<https://doi.org/10.2495/SDP-V12-N1-42-50>
- Julca Riojas, L. T. (2019). *Remoción de la turbiedad del agua del canal Miraflores, con almidón de yuca y sulfato de aluminio, Jaén, Cajamarca* (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional de Jaén. Jaén, Perú.
http://m.repositorio.unj.edu.pe/bitstream/handle/UNJ/183/Julca_RLT.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Kinidi, L., y Salleh, S. (2017). Phytoremediation of nitrogen as green chemistry for wastewater treatment system. *International Journal of Chemical Engineering*, 2017(1), 1-12. <https://doi.org/10.1155/2017/1961205>
- Lara Acosta, M. (2021). *Tratamiento de aguas residuales universitarias mediante un humedal artificial con sustratos híbridos y plantas ornamentales tropicales* (Tesis de Maestría). Instituto Tecnológico de Boca del Río del Tecnológico Nacional de México. Boca del Río, Veracruz.
- Lee, S., Maniquiz-Redillas, M. C., Choi, J. y Kim, L. H. (2017). Causes and control measures for algae occurrence in a constructed wetland treating stream runoff from agricultural land use. *Desalination and water treatment*, 63, 404-411. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.11445>
- López Ocaña, G., Calderón Miranda, M., Campos Campos, B., Pérez de la Cruz, M. (2023). Indicadores y bioindicadores de la calidad de agua en humedales artificiales: caso de estudio en Centro, Tabasco. *Kuxulkab'*, 30(67), 1-14.
<https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a30n67.5983>
- López Ocaña, G., Estrada Pérez, N., Aguilar Pérez, N. y Alonso Mendoza, E. C. (2023). Degradación de contaminantes en humedales artificiales en serie con

- especies macrófitas del trópico húmedo. *Revista iberoamericana de las ciencias biológicas y agropecuarias*, 12(24), 19-48. <https://doi.org/10.23913/ciba.v12i24.122>
- Luna Nemecio, J. (2021). Conflictos socioambientales por la defensa del agua en México: un meta-análisis cartográfico conceptual. *UNIVERSIDAD Y SOCIEDAD*, 13(4), 398-412. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202021000400398&lng=es&nrm=iso.
- Magaña-Flores, A. y López-Ocaña, G. (2022). Domestic wastewater treated with *Sagittaria latifolia* in constructed wetlands. *DYNA*, 90(226), 27-35. <https://doi.org/10.15446/dyna.v90n226.105263>
- Maine, M. A., Hadad, H. R., Sánchez, G. C., Di Luca, G. A., Mufarrege, M. M., Caffaratti, S. E., Pedro, M. C. (2016). Long-term performance of two free-water surface wetlands for metallurgical effluent treatment. *Ecological Engineering*, 98, 372-377. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.07.005>.
- Nakphe, S., Ritchie, R. J., Kiriratnikom, S. (2016). Aquatic plants for bioremediation in red hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* × *Oreochromis mossambicus*) recirculating aquaculture. *Aquacult Int*, 25(2), 619-633. <https://doi.org/10.1007/s10499-016-0060-7>
- Naz, s., y Kabir, S. (2024). Intrusion of aquatic invasive plant *Echinodorus cordifolius* L. in Bangladesh. *Asian Journal of Applied Science and Technology*, 8(4), 136-144. <https://doi.org/10.38177/ajast.2024.8412>
- Nguyen, X. C., Nguyen, D. D., Tran, Q. B., Nguyen, T. T. H., Tran, T. K. A., Tran, T. C. P., Nguyen, T. H. G., Tran, T. N. T., La, D. D., Chang, S. W., Balasubramani, R., Chung, W. J., Yoon, Y. S., Nguyen, V. K. (2020). Two-step system consisting of novel vertical flow and free water Surface constructed wetland for effective sewage treatment and reuse. *Bioresource Technology*, 306(123095). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123095>
- Núñez Morales, E., Saboya Rios, N. y Cruz Huaranga, M. (2019). Fitorremediación mediante las especies palustre y flotante, *Zantedeschia aethiopica* y *Eichhornia crassipes* en el tratamiento de aguas residuales domesticas en la zona de la región natural Quechua-Cajamarca. *Revista de investigación: ciencia, tecnología y desarrollo*, 5(2), 46-63. <https://doi.org/10.17162/rictd.v5i2.886>
- Ocaña García, J. A. (2023). *Diseño y construcción de un sistema piloto de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en DACBio-UJAT* (Tesis de Licenciatura). División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México.

- Ortiz Alcocer, V., López Ocaña, G., Torres Balcazar, C. A. y Pampillón González, L. (2018). Almidón de yuca (*Manihot esculenta Crantz*) como coadyuvante en la coagulación floculación de aguas residuales domésticas. *Revista iberoamericana de las ciencias biológicas y agropecuarias*, 7(13), 18-46. <https://doi.org/10.23913/ciba.v7i13.73>
- Pérez-Álvarez, P., Torres-Balcázar, C. A. y López-Ocaña, G. (2023). *Typha dominguensis* en humedales construidos de un sistema de tratamiento de aguas residuales, en periodo de contingencia COVID-19 en Tabasco, México. *Tendencias en energías renovables y sustentabilidad*, 2(1), 104-113. <https://aldeser.org/journals/index.php/TERYS/article/view/269>
- Prieto Hernández, D., Castilleja González, A. (2021). *México Grandeza y Diversidad. Instituto Nacional de Antropología e Historia*. https://google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=899784449&url=https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/692328/mexico_grandeza_y_diversidad_13ene22.pdf&ved=2ahUKEwisx4TRkZuKAXu8L0QIHTLSAm4QFnoECCQQAQ&usq=AOvVaw1EQI2_KR0kdCzRL6NW5-8
- Prum, C., Dolphen, R., Thiravetyan, P. (2018). Enhancing arsenic removal from arsenic-contaminated water by *Echinodorus cordifolius*-endophytic *Arthrobacter creatinolyticus* interactions. *Journal of Environmental Management*, 213(2018), 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.060>
- Rangel-Peraza, J. G., Mendivil-García, K., Cedillo-Herrera, C. I. G., Rochín-Medina, J. J., Rodríguez-Mata, A. E., Bustos-Terrones, Y. A. (2019). Optimization of organic matter degradation kinetics and nutrient removal on artificial wetlands using *Eichhornia crassipes* and *Typha domingensis*. *Environmental technology*, 40(5), 633-641. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1400111>
- Rodas López, P. V. (2020). *Remoción de contaminantes básicos en agua residual doméstica en humedal artificial de flujo subsuperficial con Enydra sessilifolia* (Tesis de licenciatura). División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México.
- Rojas Díaz, M. Y. y Purihuamán Leonardo, C. N. (2018). Tratamiento de aguas residuales domesticas con la especie vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en humedales de flujo subsuperficial. *Tzhoecoen*, 10(1), 13-24. <https://doi.org/10.26495/rtzh1810.125751>
- Rojas Cerda, K. V. (2020). Valoración de la eficiencia de remoción de arsénico en agua con carbón activado de jícara sabanero (*Crescentia alata*) y su combinación con óxidos de hierro. *Revista torreón universitario*, 9(24), 58-68. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9774568.pdf>

- Romellón Cerino, M. J. (2022). *Evaluación de los humedales artificiales en serie de la DACBiol-UJAT* (Tesis de Doctorado). Universidad de Xalapa. Xalapa-Enrique, Veracruz, México.
- Romellón-Cerino, M. J., Estrada-Pérez, N. y López-Ocaña, G. (2021). Remoción y cinética de contaminantes básicos en humedales artificiales en serie. *Renewable energy, biomass y sustainability*, 3(1), 24-34. <https://doi.org/10.56845/terys.v1i1.123>
- Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (1980). NMX-AA-003-1980, Aguas Residual – Muestro. México D.F. https://www.dof.gob.mx/nota_to_imagen_fs.php?cod_diario=208564&pagina=9&seccion=0
- Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecológico (1989). CE-CCA-001/89, Criterios ecológicos de calidad del agua. México D.F. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989#gsc.tab=0
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2022). NOM-001-SEMARNAT-2021, Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México D.F. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0
- Shah, M., Hashmi, H. N., Ghumman, A. R. y Zeeshan, M. (2015). Performance assessment of aquatic macrophytes for treatment of municipal wastewater. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 57(3), 18-25. https://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1021-20192015000300003
- Solís Sílván, R., López Ocaña, G., Bautista Margulis, R. G., Hernández Barajas, J. R., Romellón Cerino, M. J. (2016). Evaluación de húndales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de contaminantes de aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación macrófita. *Interciencia*, 41(1), 40-47. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33943362007>
- Somarriba-Toruño, R. A., y Reyes-Saavedra, L. M. (2022). Efecto de tres arreglos de siembra sobre variables agronómicas, productivas y patométricas en el cultivo de chiltoma (*Capsicum annum*) en camas biointensivas. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 8(16), 1969-1978. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v8i16.15126>
- Torres Guerra, J. D., Magno Vargas, J. S., Pineda Aguirre, R.R., Cruz Huaranga, M. A. (2017). Evaluación de la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales para riego mediante humedales artificiales de flujo libre superficial (FLS) con

las especies *Cyperus Papyrus* y *Phragmites Australis*, en Carapongo-Lurigancho. *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 3(2), 48-64. <http://dx.doi.org/10.17162/rictd.v1i2.954>

Villaseñor, J. L. (2016). Checklist of the native vascular plants of Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(3), 559-902. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-34532016000300559

México

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

14. Anexo A. Memorias fotográficas



Figura 14. Reactor lavado.



Figura 15. Colecta de la *Echinodorus cordifolius*, extraídos de los pantanos de Centla, Tabasco.



Figura 16. Llegada a la DACBiól con la vegetación.



Figura 17. Siembra de la vegetación en el reactor.



Figura 18. Macrófitas en el proceso de aclimatación.



Figura 19. HAFL-T en la etapa de arranque.



Figura 20. HAFL-Ec en la etapa de arranque.



Figura 21. Floración de la vegetación en la etapa de arranque.



Figura 22. Medición del OD de las muestras de agua en la etapa de arranque.



Figura 23. HAFL-Ec en el mes de Julio del 2024.



Figura 24. Medición del POR de las muestras de agua en la etapa de estabilización.

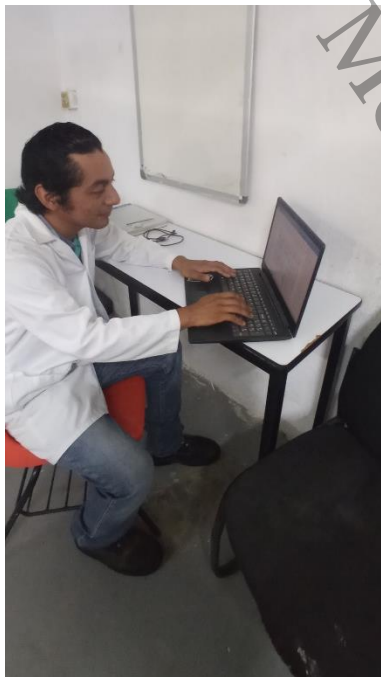


Figura 25. Captura de datos del monitoreo en una base de datos en Excel.



Figura 26. HAFL-Ec en la etapa de estabilización.



Figura 27. Eliminación de las hojas muertas.



Figura 28. Algas generadas en el HAFL-T.



Figura 29. Caracterización final de la vegetación.

15. Anexo B. Cronograma de actividades

A continuación, se presenta el calendario de desarrollo del proyecto realizado que abarca un total de 19 meses de trabajo.

Tabla 18. Cronograma de actividades

Actividades	Año																			
	2024												2025							
	Mes																			
	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
Revisión bibliográfica	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Habilitación del HA	X																			
Selección y recolección de vegetación		X																		
Siembra de la vegetación en el HA		X																		
Campaña de monitoreo de arranque				X																
Campaña de monitoreo de estabilización								X												
Campaña de monitoreo de evaluación													X							
Estabilización de la vegetación en el HA		X	X																	
Evaluación del crecimiento de la vegetación		X											X							

Análisis de resultados														X	X	X	X	X			
Redacción de la tesis														X	X	X	X	X	X	X	
Presentación de la tesis																					X

Fuente: Elaboración propia.

16. Alojamiento de tesis

Título de tesis	TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS POR UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO LIBRE CON <i>Echinodorus cordifolius</i>
Autor de la tesis	Williams Francisco Pérez Martínez
ORCID	https://orcid.org/0009-0008-3310-8911
Resumen de la tesis	En este trabajo de investigación se evaluó el desempeño de un humedal artificial de flujo libre (HAFL) con la especie <i>Echinodorus cordifolius</i> en el tratamiento de aguas residuales domesticas provenientes de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), durante un año. Este sistema está compuesto por el cárcamo, el tanque anaerobio, el tanque de distribución y dos trenes de humedales artificiales, uno cuenta con un reactor sin la macrófita (HAFL-T) y la otra si cuenta con la macrófita (HAFL-Ec). Operaron con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 6.67 días y teniendo un gasto promedio (Qmed) de 173.3 L/día, un máximo (Qmax) de 197.9 L/día y un mínimo (Qmin) de 139.6 L/día. El medio de soporte utilizado para la vegetación fue grava con un diámetro de ¾ de pulgada.
Palabras clave	Los parámetros de control que se consideraron para este trabajo fueron color, turbiedad, temperatura, potencial de hidrogeno (pH), conductividad eléctrica (CE), solidos disueltos totales (SDT), potencial de óxido-reducción (POR), oxígeno disuelto (OD) y demanda química de oxigeno (DQO), se analizaron en tres campañas de monitoreo (arranque, estabilización y evaluación), las cuales duraban 5 días, cada día se tomaron 12 muestras en total (3 muestras del: cárcamo, tanque anaerobio, HAFL-Ec y HAFL-T).
Referencias citadas	<p>Acero-Oliete, A., López-Julián, P. L., Russo, B., Sánchez-Catalán, J. C., Ruiz-Lozano, O. (2023). Depuración de aguas residuales con humedales artificiales. Resultados de la experiencia en la planta piloto de La Almunia de Doña Godina (2019-2023). VII Jornadas de Ingeniería del Agua, Cartagena. http://dx.doi.org/10.31428/10317/16693.</p> <p>Alarcón Herrera, M. T., Zurita Martínez, F., Lara-Borrero, J. A., Vidal Sáez, G. C. (2018). <i>Humedales de tratamiento: alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina</i>. Pontificia Universidad Javeriana. https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/34519/Humedales.epub?sequece=1&isAllowed=y</p> <p>Alonso Mendoza, E. C. (2024). <i>Remoción de la carga orgánica y metales en un sistema de tratamiento de aguas residuales</i> (Tesis de Maestría). División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. https://ri.ujat.mx/handle/200.500.12107/4770</p> <p>Arteaga-Cortez, V. M., Quevedo-Nolasco, A., del Valle-Paniagua, D. H., Castro-Popoca, M. y Ramírez-Zierold, J. A. (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. <i>Tecnología y ciencias del agua</i>, 10(5), 319-342. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-12.</p> <p>Batista, A., Carreño, C., Gaitán, C., Núñez, N. y Vallester, E. (2018). Importancia del nivel de oxígeno en la eficiencia de un humedal artificial con flujo subsuperficial vertical ascendente. <i>Revista de Iniciación Científica</i>, 4(1), 40-45. https://doi.org/10.33412/rev-ric.v4.1.1865</p> <p>Castañeda, A. A. (2021). Valoración de humedal de tratamiento para el saneamiento de aguas residuales en una población del lago de Patzcuaro, Michoacán – México. <i>Avances en Ciencias e Ingeniería</i>, 12(4), 11-20. https://www.executivebs.org/publishing.cl/aci/2021/Vol12/Nro4/2-ACI1388-21%20full.pdf</p>

- Castañeda Villanueva, A. A. (2021). Evaluación de humedales construidos en Los Altos de Jalisco: Los casos de Jesús María (Ojo Zarco) y Arandas (Martínez Valadez). *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, 11(28), 287-291. <https://riac.buap.mx/?q=content/volumen-11-n%C3%BAmero-especial-foro-octubre-2020>
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2016). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Libro 30. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: humedales artificiales. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf>
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2022). Estadísticas del Agua en México 2021. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM%202021.pdf>
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2024). Estadísticas del Agua en México 2023. https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Descargas/pdf/EAM2023_f.pdf
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2024). Ley Federal de Derechos: Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes para el ejercicio fiscal 2024. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/915768/Ley_Federal_de_Derechos_2024.pdf
- Deacutis, C. F. (2016). Dissolved Oxygen. In: Kennish, M. J. (eds) *Encyclopedia of Estuaries. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Dordrecht. <https://link.springer.com/referencework/10.1007/978-94-017-8801-4>
- De La Mora-Orozco, C., Saucedo-Terán, R. A., González-Acuña, I, J., Gómez-Rosales, S. y Flores-López, H. E. (2020). *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11(2), 1-17. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11s2.4681>
- Gallegos-Rodríguez, J., López-Ocaña, G., Bautista-Margulis, R. G., Torres-Balcázar, C. A. (2018). Evaluation of free flow constructed wetlands with *Sagittaria latifolia* and *Sagittaria lancifolia* in domestic wastewater treatment. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 10(2), 49-65. <http://dx.doi.org/10.5154/r.inagbi.2017.03.005>
- Gerónimo López, M. A. (2022). *Asclepias curassavica L. y especies de césped en el tratamiento de aguas residuales domésticas vía humedales artificiales de flujo subsuperficial* (Tesis de Licenciatura). División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. <https://ri.ujat.mx/handle/200.500.12107/6419>
- Gitau, P. N., Ndiritu, G. G. y Gichuki, N. N. (2019). Ecological, recreational and educational potential of a small artificial wetland in an urban environment. *African Journal of Aquatic Science*, 44(4), 329-338. <https://doi.org/10.2989/16085914.2019.1663721>.
- Guarnizo Crespo, D. M., Lapo Escobar, L. M. y Rodríguez Iñiguez, D. L. (2024). Medición de la DQO como parámetro eficaz en el control ambiental en descargas de áreas urbanas. *Ciencia Latina revista científica multidisciplinar*, 8(4), 9399-9417. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.13083
- Guzmán Pérez, J., Cruz Hernández, C. V., Torres Castro, P., Domínguez Rodríguez, C. V., Adams Schroeder, R. H., Baltierra Trejo, E. y Gomz Cruz, R. (2021). Efectos del pH y temperatura en lagunas de estabilización de un campus universitario. *Kuxulkab'*, 27(59), 19-29. <https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a27n59.4038>
- Hussain, M. S. (2019, diciembre). Total dissolve salts (TDS) [Presentación]. Federal urbu university of arts, science and technology. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11858.30406>
- Iturri, A., Kloster, N. S., Alvarez, C., Isasti, J. y Díaz-Zorita, M. (2022). ¿Qué medimos cuando analizamos la conductividad eléctrica de aguas y suelos?. *Notas Agrícolas Pampeanas*, 6, 17-22. <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/13256?show=full#>

- Jiménez-López, E. C., López-Ocaña, G., Bautista-Margulis, R.G., Castelán-Estrada, M., Guerrero-Peña, A., Hernández-Barajas, J. R., Torres-Balcázar, C. A., De la Cruz Luna, E., Remellón-Cerino, M. J., Solís-Silvan, R. (2017). Wastewater treatment by constructed wetlands with *Thalia geniculata* and *Paspalum paniculatum* in a tropical system of Mexico. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 12(1), 42-50. <https://doi.org/10.2495/SDP-V12-N1-42-50>
- Julca Riojas, L. T. (2019). *Remoción de la turbiedad del agua del canal Miraflores, con almidón de yuca y sulfato de aluminio, Jaén, Cajamarca* (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional de Jaén. Jaén, Perú. http://m.repositorio.unj.edu.pe/bitstream/handle/UNJ/183/Julca_RLT.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Kinidi, L., y Salleh, S. (2017). Phytoremediation of nitrogen as green chemistry for wastewater treatment system. *International Journal of Chemical Engineering*, 2017(1), 1-12. <https://doi.org/10.1155/2017/1961205>
- Lara Acosta, M. (2021). *Tratamiento de aguas residuales universitarias mediante un humedal artificial con sustratos híbridos y plantas ornamentales tropicales* (Tesis de Maestría). Instituto Tecnológico de Boca del Río del Tecnológico Nacional de México. Boca del Río, Veracruz.
- Lee, S., Maniquiz-Redillas, M. C., Choi, J. y Kim, L. H. (2017). Causes and control measures for algae occurrence in a constructed wetland treating stream runoff from agricultural land use. *Desalination and water treatment*, 63, 404-411. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.11445>
- López Ocaña, G., Calderón Miranda, M., Campos Campos, B., Pérez de la Cruz, M. (2023). Indicadores y bioindicadores de la calidad de agua en humedales artificiales: caso de estudio en Centro, Tabasco. *Kuxulkab'*, 30(67), 1-14. <https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a30n67.5983>
- López Ocaña, G., Estrada Pérez, N., Aguilar Pérez, N. y Alonso Mendoza, E. C. (2023). Degradación de contaminantes en humedales artificiales en serie con especies macrófitas del trópico húmedo. *Revista iberoamericana de las ciencias biológicas y agropecuarias*, 12(24), 19-48. <https://doi.org/10.23913/ciba.v12i24.122>
- Luna Nemecio, J. (2021). Conflictos socioambientales por la defensa del agua en México: un meta-análisis cartográfico conceptual. *UNIVERSIDAD Y SOCIEDAD*, 13(4), 398-412. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202021000400398&lng=es&nrm=iso.
- Magaña-Flores, A. y López-Ocaña, G. (2022). Domestic wastewater treated with *Sagittaria latifolia* in constructed wetlands. *DYNA*, 90(226), 27-35. <https://doi.org/10.15446/dyna.v90n226.105263>
- Maine, M. A., Hadad, H. R., Sánchez, G. C., Di Luca, G. A., Mufarrege, M. M., Caffaratti, S. E., Pedro, M. C. (2016). Long-term performance of two free-water surface wetlands for metallurgical effluent treatment. *Ecological Engineering*, 98, 372-377. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.07.005>.
- Nakphe, S., Ritchie, R. J., Kiriratnikom, S. (2016). Aquatic plants for bioremediation in red hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* × *Oreochromis mossambicus*) recirculating aquaculture. *Aquacult Int*, 25(2), 619-633. <https://doi.org/10.1007/s10499-016-0060-7>
- Naz, s., y Kabir, S. (2024). Intrusion of aquatic invasive plant *Echinodorus cordifolius* L. in Bangladesh. *Asian Journal of Applied Science and Technology*, 8(4), 136-144. <https://doi.org/10.38177/ajast.2024.8412>
- Nguyen, X. C., Nguyen, D. D., Tran, Q. B., Nguyen, T. T. H., Tran, T. K. A., Tran, T. C. P., Nguyen, T. H. G., Tran, T. N. T., La, D. D., Chang, S. W., Balasubramani, R., Chung, W. J., Yoon, Y. S., Nguyen, V. K. (2020). Two-step system

- consisting of novel vertical flow and free water Surface constructed wetland for effective sewage treatment and reuse. *Bioresource Technology*, 306(123095). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123095>
- Núñez Morales, E., Saboya Ríos, N. y Cruz Huaranga, M. (2019). Fitorremediación mediante las especies palustre y flotante, *Zantedeschia aethiopica* y *Eichhornia crassipes* en el tratamiento de aguas residuales domesticas en la zona de la región natural Quechua-Cajamarca. *Revista de investigación: ciencia, tecnología y desarrollo*, 5(2), 46-63. <https://doi.org/10.17162/rictd.v5i2.886>
- Ocaña García, J. A. (2023). *Diseño y construcción de un sistema piloto de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en DACBio-UJAT* (Tesis de Licenciatura). División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México.
- Ortiz Alcocer, V., López Ocaña, G., Torres Balcazar, C. A. y Pampillón González, L. (2018). Almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) como coadyuvante en la coagulación floculación de aguas residuales domésticas. *Revista iberoamericana de las ciencias biológicas y agropecuarias*, 7(13), 18-46. <https://doi.org/10.23913/ciba.v7i13.73>
- Pérez-Álvarez, P., Torres-Balcázar, C. A. y López-Ocaña, G. (2023). *Typha domingensis* en humedales construidos de un sistema de tratamiento de aguas residuales, en periodo de contingencia COVID-19 en Tabasco, México. *Tendencias en energías renovables y sustentabilidad*, 2(1), 104-113. <https://aldeser.org/journals/index.php/TERYS/article/view/269>
- Prieto Hernández, D., Castilleja González, A. (2021). *México Grandeza y Diversidad*. Instituto Nacional de Antropología e Historia. https://google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/692328/mexico_grandeza_y_diversidad_13ene22.pdf&ved=2ahUKEwisx4TRkZuKAXu8L0QIHTLSAm4QFnoEC_CQQAQ&usq=AOvVaw1EQI2_KR0kdCzRL6NW5-8
- Prum, C., Dolphen, R., Thiravetyan, P. (2018). Enhancing arsenic removal from arsenic-contaminated water by *Echinodorus cordifolius*-endophytic *Arthrobacter creatinolyticus* interactions. *Journal of Environmental Management*, 213(2018), 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.060>
- Rangel-Peraza, J. G., Mendivil-Garcia, K., Cedillo-Herrera, C. I. G., Rochín-Medina, J. J., Rodríguez-Mata, A. E., Bustos-Terrones, Y. A. (2019). Optimization of organic matter degradation kinetics and nutrient removal on artificial wetlands using *Eichhornia crassipes* and *Typha domingensis*. *Environmental technology*, 40(5), 633-641. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1400111>
- Rodas López, P. V. (2020). *Remoción de contaminantes básicos en agua residual doméstica en humedal artificial de flujo subsuperficial con *Enydra sessilifolia** (Tesis de licenciatura). División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México.
- Rojas Díaz, M. Y. y Purihuamán Leonardo, C. N. (2018). Tratamiento de aguas residuales domesticas con la especie vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en humedales de flujo subsuperficial. *Tzhoecoen*, 10(1), 13-24. <https://doi.org/10.26495/rtzh1810.125751>
- Rojas Cerda, K. V. (2020). Valoración de la eficiencia de remoción de arsénico en agua con carbón activado de jícara sabanero (*Crescentia alata*) y su combinación con óxidos de hierro. *Revista torreón universitario*, 9(24), 58-68. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9774568.pdf>

- Romellón Cerino, M. J. (2022). *Evaluación de los humedales artificiales en serie de la DACBiol-UJAT* (Tesis de Doctorado). Universidad de Xalapa. Xalapa-Enrique, Veracruz, México.
- Romellón-Cerino, M. J., Estrada-Pérez, N. y López-Ocaña, G. (2021). Remoción y cintica de contaminantes básicos en humedales artificiales en serie. *Renewable energy, biomass y sustainability*, 3(1), 24-34. <https://doi.org/10.56845/terys.v1i1.123>
- Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (1980). NMX-AA-003-1980, Aguas Residual – Muestra. México D.F. https://www.dof.gob.mx/nota_to_imagen_fs.php?cod_diario=208564&pagina=9&seccion=0
- Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecológico (1989). CE-CCA-001/89, Criterios ecológicos de calidad del agua. México D.F. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989#gsc.tab=0
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2022). NOM-001-SEMARNAT-2021, Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México D.F. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0
- Shah, M., Hashmi, H. N., Ghumman, A. R. y Zeeshan, M. (2015). Performance assessment of aquatic macrophytes for treatment of municipal wastewater. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 57(3), 18-25. https://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1021-20192015000300003
- Solís Silvan, R., López Ocaña, G., Bautista Margulis, R. G., Hernández Barajas, J. R., Remellón Cerino, M. J. (2016). Evaluación de húndales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de contaminantes de aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación macrófita. *Interciencia*, 41(1), 40-47. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33943362007>
- Somarriba-Toruño, R. A., y Reyes-Saavedra, L. M. (2022). Efecto de tres arreglos de siembra sobre variables agronómicas, productivas y patométricas en el cultivo de chiltoma (*Capsicum annuum*) en camas biointensivas. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 8(16), 1969-1978. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v8i16.15126>
- Torres Guerra, J. D., Magno Vargas, J. S., Pineda Aguirre, R.R., Cruz Huaranga, M. A. (2017). Evaluación de la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales para riego mediante humedales artificiales de flujo libre superficial (FLS) con las especies *Cyperus Papyrus* y *Phragmites Australis*, en Carapongo-Lurigancho. *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 3(2), 48-64. <http://dx.doi.org/10.17162/rictd.v1i2.954>
- Villaseñor, J. L. (2016). Checklist of the native vascular plants of Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(3), 559-902. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-34532016000300559