



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE HUMEDALES
ARTIFICIALES DE FLUJO LIBRE EN SERIE**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

PRESENTA:

PEDRO LUIS GARCÍA MARTÍNEZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DR. GASPAR LÓPEZ OCAÑA

CODIRECTOR:

DR. DAVID GUERRERO ZARATE

VILLAHERMOSA, TABASCO, MAYO DE 2024.

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, el día 14 del mes mayo del año 2025, el que suscribe Pedro Luis García Martínez alumno del Programa de Ingeniería Ambiental con número de matrícula 192G24110, 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 "EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO LIBRE EN SERIE" dirigida por el Dr. Gaspar López Ocaña y el Dr. David Guerrero Zarate.

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 14 de Mayo de 2025.



Pedro Luis García 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 06 de Mayo 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. PEDRO LUIS GARCÍA 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: **“EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO LIBRE EN SERIE”**.

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



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”



2025
AÑO DE LA
Mujer
Indígena

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

MAYO 06 DE 2025

**C. PEDRO LUIS GARCÍA 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: **“EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO LIBRE EN SERIE”**, asesorado por el Dr. Gaspar López Ocaña, sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por la Dra. Melina del Carmen Uribe López, Mtro. Roberto Rodríguez Bastarmerito, 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

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



DIRECCIÓN

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

Consortio de
Universidades
Mexicanas

UNA ALIANZA DE CALIDAD POR LA EDUCACIÓN SUPERIOR

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

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

www.ujat.mx



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2025
AÑO DE LA
Mujer
Indígena

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

06 de mayo de 2025

C. Pedro Luis García Martínez
Pasantes 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 "**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO LIBRE EN SERIE**".

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	10 %
	10448 palabras, 30 coincidencias y 8 fuentes

Finalmente, se le solicita al **C. Pedro Luis García Martínez**, 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

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



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

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

www.ujat.mx

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO LIBRE EN SERIE

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	aldeser.org Internet	562 palabras — 6%
2	ri.ujat.mx Internet	163 palabras — 2%
3	www.dacbiol.ujat.mx Internet	64 palabras — 1%
4	1library.co Internet	34 palabras — < 1%
5	docplayer.es Internet	34 palabras — < 1%
6	www.scielo.org.mx Internet	25 palabras — < 1%
7	www.ciba.org.mx Internet	23 palabras — < 1%
8	www.clubensayos.com Internet	22 palabras — < 1%

EXCLUIR CITAS

DESACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

< 10 PALABRAS

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS < 16 PALABRAS

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco, a 14 de mayo de 2025

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 "EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO LIBRE EN SERIE".

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

Colaboradores


Pedro Luis García Martínez


Dr. Gaspar López Ocaña


Dr. David Guerrero Zarate

Testigos


MI. Nancy Estrada Pérez


MC. Carlos Alberto Torres Balcázar

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Dedicatorias

A mi padre, Santiago García Hernández, por ser la base fundamental en mis metas, por apoyarme incondicionalmente y siempre estar orgullosos de mí, por todo el amor y cariño, así como cada sacrificio que ha hecho a lo largo de mi vida para darme una buena educación. A mis hermanas Adelina García Martínez y Claudia Esther García Martínez por ser mis mejores amigas y confidentes, estar conmigo en los momentos difíciles y enseñarme que todo se puede lograr creyendo en mí mismo. A mis profesores, los cuales me han brindado conocimientos y experiencias principalmente al Dr. Gaspar López Ocaña que desde el primer momento logro ver mi potencial y creyó en mí y me siguió apoyando hasta el final. A ti, Virginia Ovando Torres, por ser mi apoyo emocional, por animarme cada día a seguir luchando por mis sueños, por aceptarme tal como soy y quererme en los buenos y en los momentos difíciles.

Agradecimiento

Te doy gracias, Padre de nuestro Señor Jesucristo, por llenarme de vida, salud, fortaleza y conocimiento, el cual hoy estoy formándome e intentando usar para ser cada día un mejor ser humano y profesional, ya que sin ti no podría hacer nada. Agradezco a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco específicamente a la División Académica de Ciencias Biológicas, Laboratorio de Tecnología del Agua, por abrirme las puertas y aceptarme como estudiante, así mismo a todos los profesores y compañeros que me acompañaron en esta etapa, en especial la maestra Nancy Estrada Pérez por el apoyo incondicional estando siempre preocupándose por mí y mi progreso como profesional, al Dr. David Guerrero Zarate por su apoyo como CO-director y a la Lic. Vianey del Carmen Concepción Ortiz por ser una amiga idónea y estuvo en las buenas y en las malas. De manera destacada a mi comité, Dra. Melina del Carmen Uribe López, Mtro. Roberto Rodríguez Bastarmérito, Mtro. Elías De La Cruz Luna, MC. Carlos Alberto Torrez Balcázar, por sus consejos, comentarios y observaciones.

Índice de Contenido

RESUMEN.....	12
Palabras claves	12
ABSTRACT	13
Keywords.....	13
1. INTRODUCCIÓN.....	14
2. JUSTIFICACIÓN.....	15
3. Pregunta de Investigación.....	16
4. Hipótesis.....	16
5. ANTECEDENTES.....	17
6. OBJETIVOS.....	19
6.1 Objetivo general.....	19
6.2 Objetivos específicos.....	19
7. ÁREA DE ESTUDIO.....	20
7.1. Ubicación geográfica.....	20
8. MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
8.1. Generalidades del proyecto.....	21
8.2. Actividades de campo.....	22
8.2.1. Monitoreo de la calidad del agua.....	22
8.3. Actividades de laboratorio.....	22
8.4. Actividades de gabinete.....	23
8.4.1. Diseño experimental y análisis estadístico.....	23
8.4.2. Eficiencia de remoción.....	23
8.4.3. Modelado de distribución espacial de contaminantes.....	24
8.5. Cronograma de actividades.....	24
8.6. Costos del proyecto.....	24
9. RESULTADOS.....	26
9.1. Caracterización volumétrica y fisicoquímica del sistema.....	26
9.1.1. Gastos de operación del sistema.....	26
9.1.2. Parámetros de control del proceso del sistema en su primera fase.....	26
9.1.3. Parámetros de control del proceso del sistema en su segunda fase.....	30
9.2. Características de las especies vegetales.....	34
9.3. Modelado de parámetros de control de procesos.....	36
9.4. Cumplimiento ambiental de la normatividad vigente.....	44
9.5 Eficiencia de remoción de los trenes de tratamientos.....	45
10. DISCUSIONES.....	46
11. CONCLUSIONES.....	48
12. LITERATURA CITADA.....	49
13. ANEXO FOTOGRÁFICO.....	54
14. Alojamiento de tesis.....	57

Índice de Tablas

Tabla 1. Antecedentes de humedales de flujo libre con diversas macrófitas. Fuente: elaboración propia.....	17
Tabla 2. Cronograma de actividades durante 12 meses. Fuente: elaboración propia.....	24
Tabla 3. Costo realizado durante el proyecto. Fuente: elaboración propia.....	24
Tabla 4.-Especie <i>Potenderia sagittata</i> en el FLPs T1 y FLPs T2 (N=10). Fuente: elaboración propia.....	34
Tabla 5.-Especie <i>Sagittaria latifolia</i> en el FLTd T1 y FLTd T2 (N=10). Fuente: elaboración propia.....	34
Tabla 6.-Especie <i>Sagittaria lancifolia</i> en el FLSIn T1 y FLSIn T2 (N=10). Fuente: elaboración propia.....	35
Tabla 7. Cumplimiento normativo del Tren 1 en la primera etapa (N=10).....	44
Tabla 8. Cumplimiento normativo del Tren 2 en la primera etapa (N=10).....	44
Tabla 9. Eficiencias de remoción promedio del Tren 1 en la primera etapa.	45
Tabla 10. Eficiencias de remoción promedio del Tren 2 en la primera etapa.	45
Tabla 11. Alojamiento de tesis.....	57

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación geografía de la PTAR. Fuente: Google Earth 2024.....	20
Figura 2. Representación ilustrativa del tren de tratamiento de ARD.	21
Fuente: elaboración propia.	21
Figura 3. Gasto promedio diario. Fuente: Elaboración propia.....	26
Figura 4.- Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable pH (UpH) (N=10). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas.....	27
Figura 5.- Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable Temperatura ($^{\circ}C$) (N=10). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas.....	27
Figura 6.- Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable CE ($\mu S/cm$) (N=10). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas.....	28
Figura 7.- Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable STD (mg/L) (N=10). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas.....	28
Figura 8.- Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable Turbiedad (UNT) (N=10). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas.....	28
Figura 9.- Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable Color (UC) (N=10). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas.....	28
Figura 10.- Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable OD (mg/L) (N=10). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas.....	29
Figura 11.- Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable POR (mV) (N=10). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas.....	29
Figura 12.- Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable DQO (mg/L) (N=10). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas.....	30
Figura 13.- Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable pH (upH) (N=10). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas.....	30
Figura 14.- Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable Temperatura ($^{\circ}C$) (N=10). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas.....	30
Figura 15.- Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable CE ($\mu S/cm$) (N=10). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas.....	31

Figura 16.- Valores medianos ($\pm Q1$, $Q3$) para la variable STD (mg/L) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas	31
Figura 17.- Valores medianos ($\pm Q1$, $Q3$) para la variable Turbiedad (UNT) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas	32
Figura 18.- Valores medianos ($\pm Q1$, $Q3$) para la variable Color (UC) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas	32
Figura 19.- Valores medianos ($\pm Q1$, $Q3$) para la variable OD (mg/L) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas	32
Figura 20.- Valores medianos ($\pm Q1$, $Q3$) para la variable POR (mV) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas	32
Figura 21.- Valores medianos ($\pm Q1$, $Q3$) para la variable DQO (mg/L) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas	33
Figura 22.- Distribución del pH en el Tren 1	36
Figura 23.- Distribución del pH en el Tren 2	36
Figura 24.- Distribución de la Temperatura en el Tren 1	37
Figura 25 Distribución de la Temperatura en el Tren 2	37
Figura 26.- Distribución de CE en el Tren 1	38
Figura 27 Distribución CE en el Tren 2	38
Figura 28.- Distribución espacial de SDT en el Tren 1	39
Figura 29 Distribución espacial de SDT en el Tren 2	39
Figura 30.- Distribución de la Turbiedad en el Tren 1	40
Figura 31.- Distribución de la Turbiedad en el Tren 2	40
Figura 32.- Distribución del Color en el Tren 1	41
Figura 33.- Distribución del Color en el Tren 2	41
Figura 34.- Distribución de OD en el Tren 1	42
Figura 35.- Distribución de OD en el Tren 2	42
Figura 36.- Distribución del POR en el Tren 1	43
Figura 37.- Distribución del POR en el Tren 2	43
Figura 38.- Colecta de la vegetación <i>Potenderia Sagittata</i> , municipio de Centro, Tabasco; Área protegida “el Tintal”, DACBIOL.	54
Figura 39.- Colecta de vegetación <i>Sagittaria latifolia</i> , Pantanos de Centla	54
Figura 40.- Colecta de vegetación <i>Sagittaria lancifolia</i> , Municipio de Centro, Tabasco; vertedero a cielo abierto.	54
Figura 41.- Evaluación de parámetros fisicoquímicos del agua residual	54
Figura 42.- Siembra en los trenes de tratamiento	54
Figura 43.- Muestreo en los trenes de tratamiento en influentes y efluentes.	54
Figura 44.- arañas lobo “ <i>Lycosidae</i> ” encontrada en el FL T2 R2	55
Figura 45.- araña cazadora gigante (<i>Heteropoda venatoria</i>) encontrada en el FL T2 R2 ..	55
Figura 46.- Araña pescadora (<i>Dolomedes</i>) encontrada en el FL T2 R2	55
Figura 47.- Tortuga de orejas rojas (<i>Trachemys scripta elegans</i>) Encontrada en el FL T1 R3	55
Figura 48.- Tortuga Guao (<i>Staurotypus triporcatus</i>) Encontrada en el FL R3T1	55
Figura 49.- “ <i>Kinosternon leucostomum</i> ” Encontrada en el FL R3T1	55
Figura 50.- <i>Potenderia sagittata</i> en la etapa de estabilización	55
Figura 51.- Muestreo en los trenes de tratamiento en influentes y efluentes	55
Figura 52.- <i>Sagittaria lancifolia</i> en la etapa de estabilización	56
Figura 53.- HA en la etapa de cosecha final	56
Figura 54.- Mantenimiento correctivo de los Trenes de tratamiento	56

RESUMEN

Se evaluó el desempeño de la PTAR de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), la cual trata sus aguas residuales a través de Humedales Artificiales de Flujo Libre (HAFL), sistema compuesto por 7 tratamientos de los cuales 6 cuentan con sustrato y 3 tipos de vegetaciones. El periodo de estudio fue de marzo de 2024 a marzo de 2025, donde los humedales operaron con las especies *Pontederia sagittata*, *Sagittaria latifolia* y *Sagittaria lancifolia*. Se evaluó la eficiencia de remoción de los parámetros de control (pH, Temperatura, CE, SDT, Turbiedad, Color, OD y DQO) además se caracterizó volumétrica y fisicoquímicamente el afluente y efluente de aguas residuales de las unidades del sistema determinando el Qmed, Qmin, Qmax. De igual manera se caracterizaron las especies de vegetación que tiene cada humedal en serie (ancho y largo de hoja, planta, tallo, raíz, peso de la especie y humedad). Asimismo, se realizó el modelado de la distribución espacial de los parámetros de control de procesos en cada tren. Los humedales artificiales en serie con la configuración Libre-Libre-Libre con las especies macrófitas *Pontederia sagittata*, *Sagittaria latifolia* y *Sagittaria lancifolia*, son viables para la Fito depuración de aguas residuales domésticas, presentan adaptación y estabilización de manera tal que logran una reproducción temprana lo cual es viable para los humedales. En un año de operación el T1 logró una eficiencia de remoción de 12% en turbiedad, 63% en color y en DQO un 94%, mientras el T2 removió el 45 % de turbiedad, 72% de color y 63% de DQO, con un TRH de 6 días y un gasto de operación (Qmed) para ambos trenes de tratamiento de 12.1 m³/día. En cuanto a calidad de agua cumple perfectamente el LMP de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021 que es de 150 mg/L de DQO para la infiltración y otros riegos, teniendo la DACBiol un permiso para descarga al suelo por la CONAGUA. Del mismo modo cumple con los otros parámetros normados como son temperatura y pH.

Palabras claves

Humedales artificiales, flujo libre, tratamiento de aguas residuales, eficiencia de remoción.

ABSTRACT

The performance of the wastewater treatment plant (WWTP) of the Academic Division of Biological Sciences (DACBiol) at the Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) was evaluated. This facility treats its wastewater through Free Surface Flow Constructed Wetlands (FWS CWs), a system composed of seven treatment units, six of which contain substrate and three types of vegetation. The study period spanned from March 2024 to March 2025, during which the wetlands operated with the species *Pontederia sagittata*, *Sagittaria latifolia*, and *Sagittaria lancifolia*. The removal efficiency of key control parameters (pH, temperature, EC, TDS, turbidity, color, DO, and COD) was evaluated. Additionally, the influent and effluent of the system were volumetrically and physicochemically characterized, determining the average (Q_{med}), minimum (Q_{min}), and maximum (Q_{max}) flow rates. The plant species in each wetland were also characterized based on leaf, plant, stem, and root dimensions, species weight, and moisture content. Furthermore, spatial modeling of process control parameters was performed for each treatment train. The constructed wetlands configured in a Free-Free-Free arrangement with the macrophyte species *Pontederia sagittata*, *Sagittaria latifolia*, and *Sagittaria lancifolia* are viable for the phytoremediation of domestic wastewater. These species showed good adaptation and stabilization, achieving early reproduction, which is favorable for wetland systems. After one year of operation, Train 1 achieved a removal efficiency of 12% for turbidity, 63% for color, and 94% for COD, while Train 2 achieved 45% removal for turbidity, 72% for color, and 63% for COD, with a hydraulic retention time (HRT) of 6 days and an average flow rate (Q_{med}) of 12.1 m³/day for both treatment trains. Regarding water quality, the system fully complies with the maximum permissible limit (MPL) established in NOM-001-SEMARNAT-2021, which is 150 mg/L of COD for soil infiltration and other irrigation purposes. DACBiol holds a permit from CONAGUA for soil discharge. The system also meets other regulated parameters such as temperature and pH.

Keywords

Constructed wetlands, free surface flow, wastewater treatment, removal efficiency •

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad tres cuartas partes del planeta están cubiertas por agua, sin embargo, se presentan problemáticas importantes sobre su conservación pues el 97.5% es salada encontrándose en los mares y océanos, y solo el 2.5% es agua dulce, donde solo el 0.3% de esta se localiza en lagos y ríos siendo esta mayormente utilizada por el hombre, teniendo como resultado la generación de aguas residuales domésticas poniendo en peligro este recurso por las descargas recibidas a los cuerpos de agua receptores (CONAGUA, 2019).

En México, el INEGI (2019) reportó en el último informe de estadística del agua en México 2019, que el volumen total concesionado para usos consuntivos es de 85,664.6 hm³, teniendo la agricultura como primer lugar en la utilización de este recurso con 68.23% del volumen mencionado, siguiendo en importancia el uso público con 14.52%, el uso industrial con 7.41% y en diversos usos 6.50%. De este volumen descrito, sólo el 57% de agua residuales es tratada correctamente, el 43% sobrante no recibe un tratamiento eficiente en la remoción de contaminantes básicos.

Se conoce que en México los sistemas de tratamiento de aguas residuales son un problema serio, por lo que desafortunadamente no es prioridad. Se le han dado prioridad a hacer más eficientes los procesos e incrementar la producción, generando esto el incremento de aguas residuales, de ese modo se han empleado tratamientos como lodos activados o lagunas de estabilización, implicado altos costos de arranque, mantenimiento y operación, lo cual nos incita a implementar nuevas tecnologías de tratamiento para estas aguas (Hernández et, al 2017).

Entre las tecnologías económicamente viables para el tratamiento de aguas residuales domésticas, existen los Humedales Artificiales (HA), los cuales suelen ser empleados como aquellos sistemas que se diseñan para utilizar procesos naturales que ocurren en el ambiente y que implica el uso de vegetación, un medio de soporte y asociaciones microbianas, con el objetivo de ayudar al tratamiento de aguas residuales domésticas (Asprilla et al., 2020).

Con base a lo anterior, en la presente investigación se evaluó, la calidad del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBioI) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), verificando los parámetros de control: potencial de hidrogeno (pH), Temperatura (T), Conductividad eléctrica (CE), Solidos disueltos totales (SDT), Oxígeno disuelto (OD), potencial de oxido reducción (POR) y reportando la remoción de color, turbiedad y demanda química de oxígeno (DQO) del período 2024, para así, verificar el cumplimiento con la NOM-001-SEMARNAT-2021 en su descarga a cuerpos receptores.

2. JUSTIFICACIÓN

Los HA combinan microorganismos y plantas para lograr niveles de tratamientos eficientes con bajo consumo energético y poco mantenimiento. Existen diversos flujos aplicables a los humedales artificiales de flujo superficial vertical (HAFV), de flujo horizontal subsuperficial (HAFS) y de flujo libre (HAFL). Estos últimos son aquellos sistemas en los cuales el agua se encuentra expuesta a la atmósfera, sobre la superficie del suelo y las especies vegetales desde el punto de entrada hasta la descarga, usados normalmente para un tratamiento avanzado o terciario. Un aspecto importante de esta tecnología son las macrófitas, las cuales están adaptadas a crecer bajo condiciones de suelos saturados por agua, permitiéndoles la provisión de aire bajo condiciones de suelo saturado con agua desde la atmósfera hacia raíces y rizoma (Torres, et al., 2017).

Dentro de los sistemas de tratamientos de aguas residuales que hay en las comunidades se encuentran los sistemas descentralizados que corresponden a comunidades, escuelas o industrias. En este caso particular, el problema está centralizado en una institución educativa superior con una población de más de 1000 habitantes que tienen actividades diarias por más de ocho horas. Su sistema de tratamiento inició operación en el 2018 con una configuración inicial de 3 humedales de flujo libre y 3 humedales de flujos subsuperficial para condiciones de no más de 2400, operaba con un caudal medio (Qmed) de 40 m³/día (Romellón, 2022). Sin embargo, hoy en día después de la postpandemia se tiene una población

irregular de 1142 habitantes, de los cuales 143 son profesores. En la actualidad la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) opera para un caudal de 60 m³/día por lo que es importante conocer si el aumento de este caudal este ocasionado estrago en la planta de tratamiento y evaluar la situación para recomendar acciones específicas de operación dentro de ellos. Del mismo modo, se verifico el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021, la cual entró en vigor en 2022. Por lo anterior, se procedió a evaluar la PTAR, ya que en esta etapa de operación el sistema está conformado por un reactor anaerobio y tres humedales de flujo libre en serie, acoplados en dos módulos gemelos con especies macrófitas como *Pontederia sagittata*, *Sagittaria latifolia* y *Sagittaria lancifolia*.

3. Pregunta de Investigación

¿Cuál es la eficiencia de remoción de contaminantes en cada uno de los trenes de tratamiento?

¿El sistema cumple con los parámetros establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021 para la descarga de aguas residuales?

4. Hipótesis

Ho: El sistema de tratamiento con humedales artificiales de flujo libre en serie de la PTAR – DACBiol – UJAT es eficiente en la remoción de contaminantes fisicoquímicos y cumple con los límites establecidos de la DQO por la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Ha: El sistema de tratamiento con humedales artificiales de flujo libre en serie de la PTAR – DACBiol – UJAT no es eficiente en la remoción de contaminantes fisicoquímicos y no cumple con los límites establecidos de la DQO por la NOM-001-SEMARNAT-2021.

5. ANTECEDENTES

En la tabla 1 muestran los resultados obtenidos en investigaciones anteriores en donde se presentan concentraciones de entrada y salida, así como eficiencias de remoción de humedales artificiales de flujo libre con especies macrófitas que ayuda a la degradación y asimilación de contaminantes.

Tabla 1. Antecedentes de humedales de flujo libre con diversas macrófitas. Fuente: elaboración propia.

Autores y año	Tipo de humedal y afluente	especies	Contaminantes evaluados (Ce y Co)	Eficiencias de remoción
Torres et al., (2017)	TH: Humedal artificial de flujo libre escala piloto. a: aguas residuales domesticas	<i>Cyperus papyrus</i> y <i>Phragmites australis</i>	pH:7.8 UpH Temperatura: 21°C Turbiedad:130 UNT	Turbiedad:77%.
Cruz y Juárez., (2024)	TH: Humedal artificial de flujo libre escala piloto. a: aguas residuales domesticas	<i>Eichhornia crassipes</i>	pH: 7.16 UpH pH: 7.79 UpH Turbiedad: 19.92 UNT Turbiedad: 0.9 UNT DQO: 41.7 mg/L DQO: 70.76 mg/L	Turbiedad:95.48% DQO: 53.67%
Núñez et al., (2019)	TH: Humedal artificial de flujo libre escala piloto. a: aguas residuales domesticas	<i>Zantedeschia aethiopica</i> y <i>Eichhornia crassipes</i>	CE:1186.5 µS/cm CE:491.5 5 µS/cm Turbiedad: 19.92 UNT Turbiedad: 0.9 UNT Color:56.4 Color:97.5 DQO: 687.8 mg/L DQO: 54.3 mg/L	CE:59% Color:34% Turbiedad:96% DQO:92%
Correa et al., (2023)	TH: Humedal artificial de flujo libre escala piloto. a: aguas residuales domesticas	<i>Chrysopogon zizanioides</i>	DQO: 464 mg/L DQO: mg/L	DQO:58%
	TH: Humedal artificial de flujo libre escala piloto.	<i>Cyperus papyrus</i>	pH:8.14 UpH pH:7.94 UpH	Temperatura: 6% DQO:17%

Autores y año	Tipo de humedal y afluente	especies	Contaminantes evaluados (Ce y Co)	Eficiencias de remoción
Cifuentes et al., (2021)	a: aguas residuales domesticas		Temperatura: 21.7°C Temperatura:20.5 °C DQO: 191 mg/L DQO: 159mg/L	
Inga et al., (2024)	TH: Humedal artificial de flujo libre escala piloto. a: aguas residuales domesticas	<i>Typha domingensis</i>	DQO: 200 mg/L DQO: 101mg/L	DQO:77.41%

6. OBJETIVOS

6.1 Objetivo general

Evaluar el desempeño de la PTAR – DACBiol – UJAT que opera con tres humedales de flujo libre en serie en dos módulos gemelos.

6.2 Objetivos específicos

- Caracterizar volumétrica y fisicoquímicamente el afluente y efluente de aguas residuales de las unidades del sistema.
- Caracterizar las especies de vegetación que tiene cada humedal en serie. (ancho y largo de hoja, planta, tallo, raíz, peso de la especie y humedad).
- Realizar el modelado de la distribución espacial de los parámetros de control de procesos.
- Verificar el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021 que establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales.

7. ÁREA DE ESTUDIO

7.1. Ubicación geográfica

La (PTAR) de Humedales Artificiales trata el agua de la comunidad de estudiantes y profesores de la DACBIOL, y tomó este nombre en 1989, sin embargo, la PTAR entró en operaciones el primero de junio de 2018. La DACBIOL se encuentra ubicada en el Km. 0.5 de la carretera Villahermosa - Cárdenas, entronque con Bosques de Saloya. Ocupa una superficie de 21 hectáreas, en donde se ofrecen las Licenciaturas en Biología, Ecología, Gestión Ambiental e Ingeniería Ambiental, así como dos Maestrías, la Maestría en Ingeniería, Tecnología y Gestión Ambiental y la Maestría en Ciencias Ambientales, y un Doctorado en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales. Se estima que en la DACBIOL se encuentran desarrollando actividades diarias cerca de 1142 personas al día, entre los cuales se encuentran 143 profesores (Figura 1).

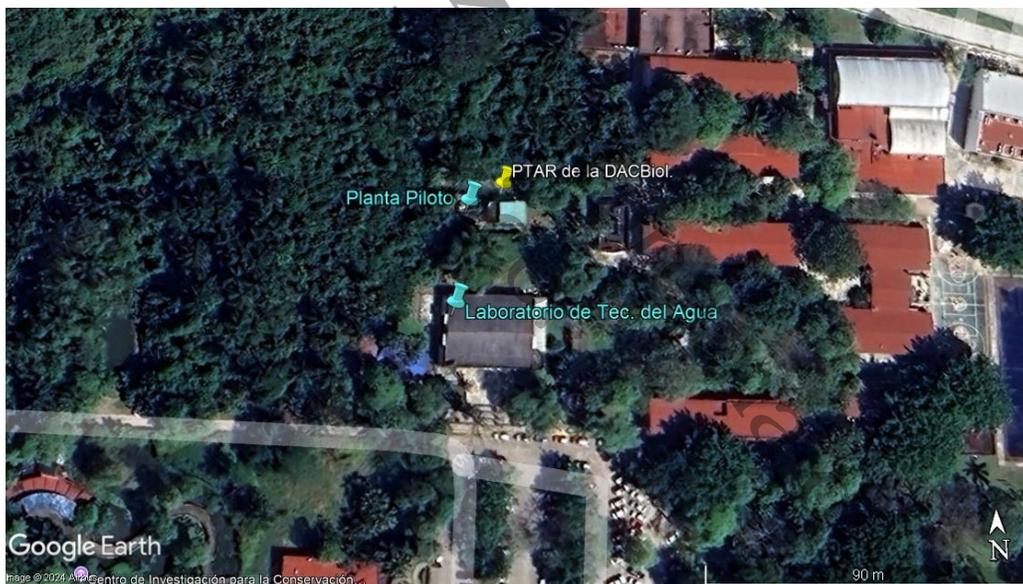


Figura 1. Ubicación geográfica de la PTAR. Fuente: Google Earth 2024.

8. MATERIALES Y MÉTODOS

8.1. Generalidades del proyecto.

La PTAR de HA de la DACBIOL trata el agua residual (AR) generada en los baños, la cafetería y los laboratorios de la DACBIOL. Una vez producida, el AR llega a un cárcamo que se encarga de concentrarla. Cuando el nivel del AR se acerca a su capacidad máxima, se enciende manualmente una bomba sumergible tipo cubeta de 1 HP, la cual la envía hacia el tanque séptico (T. anaerobio), una estructura de 6 m de largo, 7 m de ancho y 0.9 m de profundidad. Después de dos días, el AR alcanza su nivel máximo y desciende por gravedad hasta la entrada de los humedales. El AR ya homogenizada y sedimentada entra en ambos trenes idénticos de tratamiento que miden 25 m de largo por 2.5 m de ancho y 1 m de altura, cada tren está dividido en 3 HAFL con 3 etapas diferentes configurados por Romellón (2022), de la siguiente manera: las dos primeras unidades de tratamiento están sembradas con la especie *Pontederia sagittata* (HAFL1-Ps-T1 y HAFL1-Ps-T2), las 2 siguientes con *Sagittaria latifolia* (HAFL2-SL-T1 y HAFL2-SL-T2) y las 2 últimas con *Sagittaria lancifolia* (HAFL3-SLn-T1 y HAFL3-SLn-T2). Finalmente, el agua tratada es descargada a un terreno filtrante. En la Figura 2 se puede observar una representación gráfica de los tratamientos que se realizan en los HA.

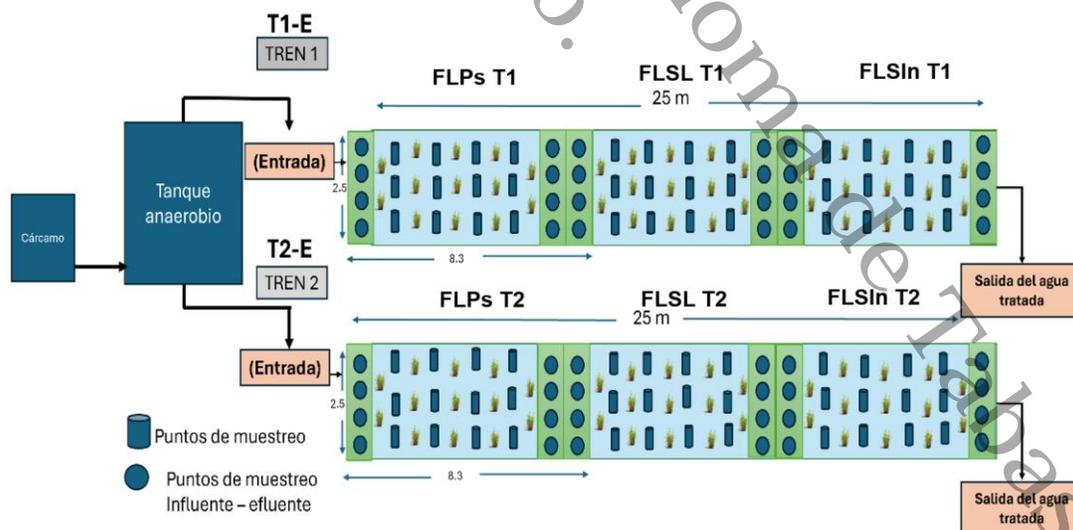


Figura 2. Representación ilustrativa del tren de tratamiento de ARD.

Fuente: elaboración propia.

8.2. Actividades de campo

8.2.1. Monitoreo de la calidad del agua.

La campaña de monitoreo constó de una toma de muestra matutina y una vespertina siendo un total de 24 muestras simples y 8 muestras compuestas para determinar la calidad de agua y 216 muestras simples para modelación de distribución espacial, para cada campaña de monitoreo semanal en recipientes de 1 L, previamente etiquetados y limpios, según la NMX-AA-003-1980 para afluentes y efluentes de las unidades del sistema (Figura 2). Se copilaron las muestras del agua residual, que es captada en el registro (cárcamo), seguido del agua depositada en el T. anaerobio, para luego tomar muestras de los trenes de tratamiento y por último de la descarga final. Se evaluó el comportamiento hidráulico, la eficiencia de remoción del sistema y los parámetros de operación tomando en cuenta incrementos de temperaturas, carga y gasto.

La medición del gasto de operación se realizó en base al método volumétrico: midiendo el tiempo de llenado (t) de un recipiente de volumen conocido (V), donde se colecta la descarga (Briones, 2008). La medición del gasto se realizó durante las campañas de monitoreo de la calidad del agua, en las etapas de estabilización y evaluación en horario de 8:00 a 16:00 horas con intervalos de 2 horas.

$$Q = V / t$$

Donde: Q = Gasto (L/s), V= Volumen (L), t= Tiempo (s).

8.3. Actividades de laboratorio

Se llevó a cabo la determinación de los parámetros de control como la temperatura, turbiedad, color, oxígeno disuelto (OD), potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (SDT), mediante los métodos SM 2550, SM 2130 B, APHA 2120, SM 4500 OG, SM 9040 B, SM 1250 B Y SM 2540, respectivamente. Para la determinación de temperatura, CE, SDT y pH se utilizó el multiparamétrico HANNA Waterproof Tester modelo HI 98129, para medir oxígeno disuelto se empleó un HANNA Dissolved Oxygen modelo HI 98193, el color se estimó con un fotómetro LaMotte SMART3 y la turbidez se determinó con un turbidímetro HANNA HI 98703, con el fin de evaluar la eficiencia de remoción de

contaminantes para las descargas de aguas y verificar el cumplimiento de los límites máximos permisibles como lo refiere la NOM-001-SEMARNAT-2021. Esta etapa se realizó en Laboratorio de Tecnología del Agua de la UJAT-DACBioI llevando el control de proceso. Finalmente, las campañas de muestreo en el sistema correspondieron a dos periodos la primera fase en el mes de septiembre de 2024 y la segunda fase de muestreo en el mes de marzo de 2025.

8.4. Actividades de gabinete.

8.4.1. Diseño experimental y análisis estadístico

Los resultados se registraron en la bitácora del laboratorio para después ser capturados en una base de datos en Excel y se realizaron los análisis correspondientes. Se planteó un análisis simple de un factor para analizar los sistemas de tratamiento (Unidades de proceso) para evaluar las variables de respuesta como temperatura, turbiedad, color, pH, SDT y OD, etc. Los resultados no paramétricos por no cumplir con los postulados de normalidad y homocedasticidad se determinaron como análisis no paramétrico realizando la prueba de Kruskal-Wallis y el contraste de medianas de Mann-Whitney. Aquellos datos que cumplieron los postulados de normalidad y homocedasticidad se les realizó un ANOVA. Todos los datos fueron analizados con el software STATGRAPHICS versión 19.1. El número de repeticiones fue de tres por cada tratamiento.

8.4.2. Eficiencia de remoción

La eficiencia de remoción de contaminantes básicos se evaluó comparando los valores de entrada y salida de los contaminantes en agua residual, de acuerdo con la ecuación siguiente (López et al., 2018):

$$\eta = \left(\frac{C_e - C_s}{C_e} \right) \times 100$$

Dónde: η = remoción en porcentaje, C_e = concentración de entrada de agua residual, C_s = concentración de salida del agua residual tratada.

8.4.3. Modelado de distribución espacial de contaminantes

El modelado de la distribución espacial se realizó de acuerdo con López-Ocaña et al., (2019), para los parámetros pH, color aparente, conductividad eléctrica, turbiedad, SDT y temperatura. Los gráficos serán modelados con ayuda del programa Golden Surfer en su versión V.14, procedimiento que consiste en la creación de mapas de contorno en un plano cartesiano, donde el eje “Y” fue el largo y el eje “X” el ancho de cada humedal artificial.

8.5. Cronograma de actividades.

Tabla 2. Cronograma de actividades durante 12 meses. Fuente: elaboración propia.

N°	Actividades	Marzo 2004 - Marzo 2025											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Mantenimiento preventivo de los HA												
2	Fase de siembra												
3	Caracterización fisicoquímica del afluente y efluente												
4	Fase de estabilización												
5	Caracterización fisicoquímica del afluente y efluente												
6	Fase de evaluación												
7	Caracterización fisicoquímica del afluente y efluente												
8	Resultados y conclusiones												
9	Redacción de la tesis												
10	Presentación de la tesis												

8.6. Costos del proyecto

Tabla 3. Costo realizado durante el proyecto. Fuente: elaboración propia.

Concepto	Unidad	Precio unitario	Precio Total
*Pala de cuchara	1	\$327	\$327
*Pala plana	1	\$250	\$250
Botas	1	\$290	\$290
Lentes de seguridad	1	\$630	\$630
Guantes de nitrilo	1	\$714	\$714
Cubre bocas de seguridad	20	\$16	\$320
*Machete	1	\$440	\$440
Lima	2	\$75	\$150
Tijeras de jardín	1	\$150	\$150
*Rastrillo de jardín	1	\$200	\$200
*Carretilla	1	\$1200	\$1200
Guates de carnaza	1	\$88	\$88

Concepto	Unidad	Precio unitario	Precio Total
*Escoba	1	\$55	\$55
*Escoba metálica	1	\$118	\$118
*Bailer	1	\$2000	\$2000
Botes de 1 L para muestra	251	\$20	\$5020
*Análisis de pH	243	\$50	\$12150
*Análisis de Temperatura	243	\$50	\$12150
*Análisis de CE	243	\$50	\$12150
*Análisis de SDT	243	\$50	\$12150
*Análisis de color	243	\$80	\$19440
*Análisis de Turbiedad	243	\$80	\$19440
*Análisis de OD	243	\$50	\$12150
*Análisis de POR	243	\$50	\$12150
*Análisis de DQO	18	\$100	\$1800
HI23754C-25 Viales para DQO rango bajo	2	\$1050	\$2700
HI23754C-25 Viales para DQO rango Alto	1	\$1050	\$1050
TOTAL			\$124,523.00
Gastos adsorbidos por el Lab. Tec. Del Agua.			

9. RESULTADOS

9.1. Caracterización volumétrica y fisicoquímica del sistema.

9.1.1. Gastos de operación del sistema

La cantidad de agua de la DACBiol depende generalmente de la cantidad de personal que está en actividades durante el día. En este caso particular, el aforo presente corresponde al gasto total que se recibe en el cárcamo de aguas residuales de la DACBiol, donde para el periodo de estudio se encontraron los valores del caudal máximo ($Q_{\text{máx}}$) de $13.9 \text{ m}^3/\text{d}$, el mínimo ($Q_{\text{mín}}$) de $8.4 \text{ m}^3/\text{día}$ y el gasto promedio (Q_{med}) $12.1 \text{ m}^3/\text{día}$, el cual corresponde a un periodo con interacción de 1142 habitantes, de los cuales 143 son profesores, el resto son administrativos, alumnos y demás personal de servicio de la universidad.

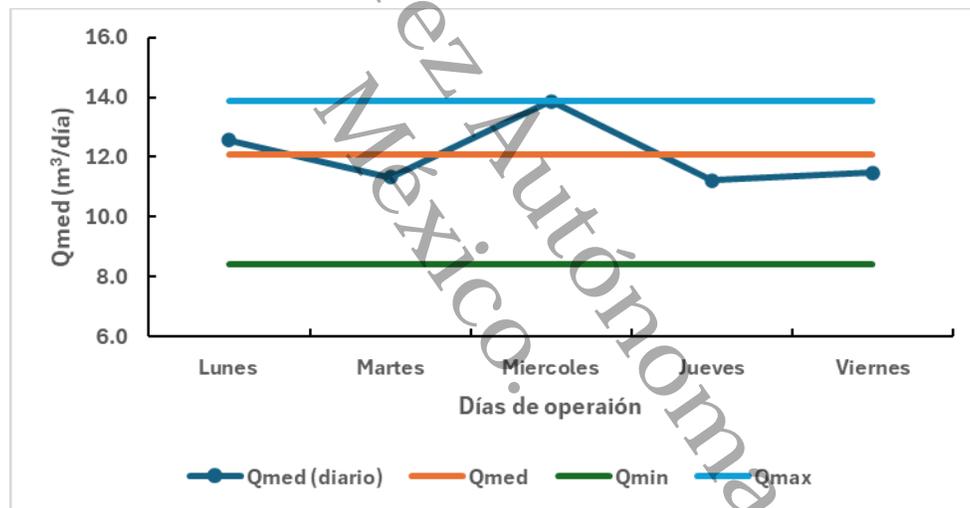


Figura 3. Gasto promedio diario. Fuente: Elaboración propia

9.1.2. Parámetros de control del proceso del sistema en su primera fase potencial de hidrógeno y temperatura

La prueba de Kruskal-Wallis para pH (U_{pH}) reportó que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza ($P < 0.05$). Se encontró que el valor mediano más bajo se muestra en el tratamiento FLSL T1 con un valor de $8.28 \pm \text{RI}$ ($Q_1=8.13356$; $Q_3=8.4$) U_{pH} seguido del tratamiento FLPs T2 con $8.32 \pm$ ($Q_1= 8.14247$; $Q_3= 8.4$) U_{pH} y el valor mediano más alto en el tratamiento cárcamo con $8.85 \pm$ ($Q_1= 8.07127$; $Q_3= 8.92575$) U_{pH}

(Figura 4). El ANOVA realizado a la Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) muestra una diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher con un 95.0% confianza. El promedio ($\pm\text{DE}$) más bajo se reporta en el tratamiento FLPs T2 con $27.34 \pm \text{DE} (1.98561)$ $^{\circ}\text{C}$, seguido de FLsLn T2 con 27.44 ± 1.07761 $^{\circ}\text{C}$, finalmente el valor más alto se reportó en cárcamo con 29.27 ± 0.572547 $^{\circ}\text{C}$ (Figura 5).

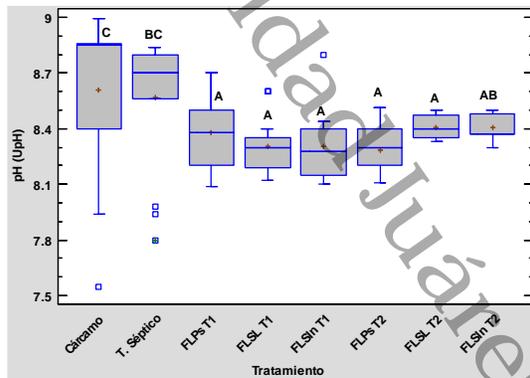


Figura 4.- Valores medianos ($\pm\text{Q1}$, Q3) para la variable pH (UpH) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas

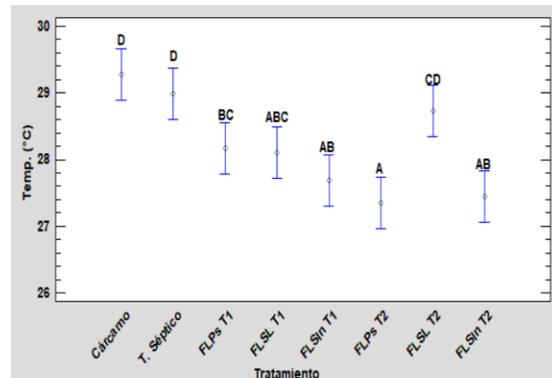


Figura 5.- Valores medianos ($\pm\text{Q1}$, Q3) para la variable Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas

Conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales

La prueba de Kruskal-Wallis para CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) reportó que existe una diferencia estadísticamente ($P < 0.05$). Se encontró que el valor mediano más bajo se muestra en el tratamiento FLsLn T1 con un valor de $978.0 \pm (Q_1= 899.742; Q_3= 1008.57)$ $\mu\text{S}/\text{cm}$, seguido de Cárcamo con $1149.0 \pm (Q_1= 1044.89; Q_3= 1289.0)$ $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el valor mediano más alto en el tratamiento FLPs T1 con $1619.0 \pm (Q_1= 1359.47; Q_3= 1664.0)$ $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 6). Para SDT (mg/L) se reportó que existe una diferencia estadísticamente significativa ($P < 0.05$). El valor mediano más bajo se muestra en el tratamiento FLsLn T1 con un valor de $489.0 \pm (Q_1= 457.356; Q_3= 503.287)$ mg/L, seguido de cárcamo con $575.0 \pm (Q_1= 517.0; Q_3= 663.0)$ mg/L y el valor mediano más alto en el tratamiento FLsLn T2 con $781.0 \pm (Q_1= 537.414; Q_3= 804.644)$ mg/L (Figura 7).

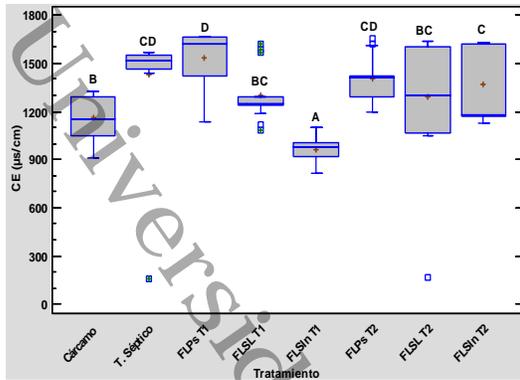


Figura 6.- Valores medianos ($\pm Q1$, $Q3$) para la variable CE ($\mu S/cm$) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas

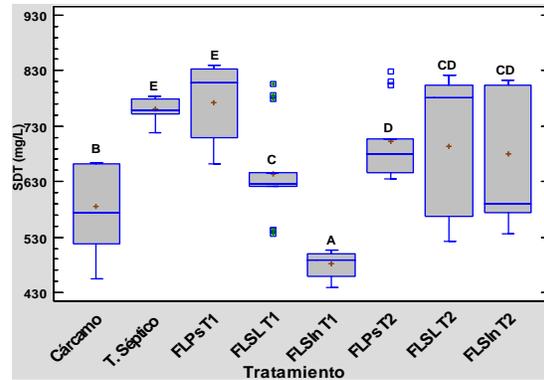


Figura 7.- Valores medianos ($\pm Q1$, $Q3$) para la variable STD (mg/L) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas

Turbiedad y color

Para Turbiedad (UNT) se reportó que existe una diferencia estadísticamente significativa ($P < 0.05$). El valor mediano más bajo se muestra en el tratamiento FLPs T1 con un valor de $5.5 \pm (Q_1=3.39599; Q_3= 21.3465)$ UNT, seguido de FLSL T2 con $7.3 \pm (Q_1=5.2069; Q_3= 20.2143)$ UNT y el valor mediano más alto en el tratamiento T. Séptico con $30.1 \pm (Q_1= 15.0661; Q_3= 33.7724)$ UNT (Figura 8). Para Color (UC) se reportó que existe una diferencia estadísticamente significativa ($P < 0.05$). El valor mediano más bajo se muestra en el tratamiento FLPs T1 con un valor de $434.0 \pm (Q_1= 300.782; Q_3= 891.0)$ UC, seguido de FLSL T1 con $495.0 \pm (Q_1= 241.571; Q_3= 934.945)$ UC y el valor mediano más alto en el tratamiento cárcamo con $2468.0 \pm (Q_1= 675.5; Q_3= 2743.82)$ UC (Figura 9).

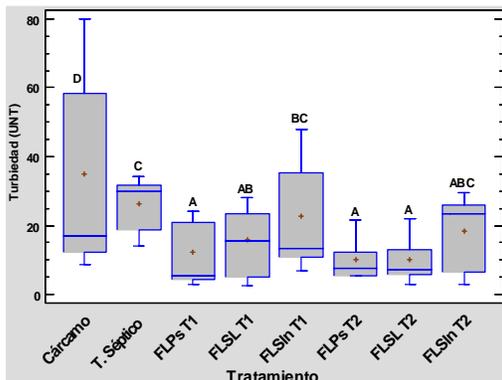


Figura 8.- Valores medianos ($\pm Q1$, $Q3$) para la variable Turbiedad (UNT) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas

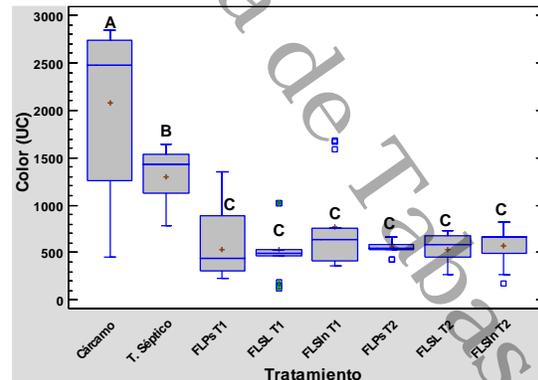


Figura 9.- Valores medianos ($\pm Q1$, $Q3$) para la variable Color (UC) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas

Oxígeno disuelto y Potencial óxido-reducción

Para OD (mg/L) se reportó que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas ($P < 0.05$). El valor mediano más bajo se muestra en el tratamiento FLPs T1 con un valor de $1.4 \pm$ ($Q_1= 1.3$; $Q_3= 1.7$) mg/L, seguido de FLSL T1 con $1.7 \pm$ ($Q_1= 1.61782$; $Q_3= 1.8$) mg/L y el valor mediano más alto en el tratamiento Cárcamo con $3.9 \pm$ ($Q_1= 3.61782$; $Q_3= 4.08218$) mg/L (Figura 10). Para el POR (mV) se reportó que existe una diferencia estadísticamente significativa ($P < 0.05$). El valor mediano más bajo se muestra en el tratamiento FLSIn T1 con un valor de $-124.0 \pm$ ($Q_1= -191.488$; $Q_3= -101.316$) mV, seguido de Cárcamo con $-140.0 \pm$ ($Q_1= -249.644$; $Q_3= -107.029$) mV y el valor mediano más alto en el tratamiento T. Séptico con $-300.0 \pm$ ($Q_1= -312.822$; $Q_3= -274.425$) mV (Figura 11).

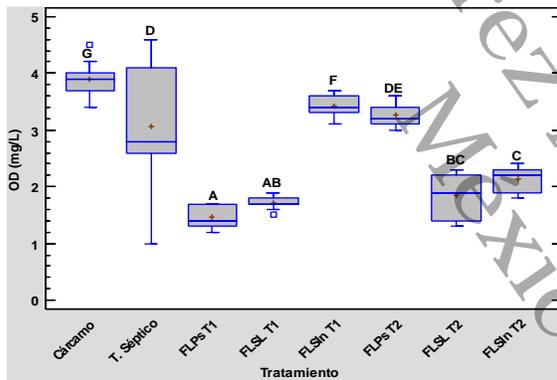


Figura 10.- Valores medianos ($\pm Q_1$, Q_3) para la variable OD (mg/L) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas

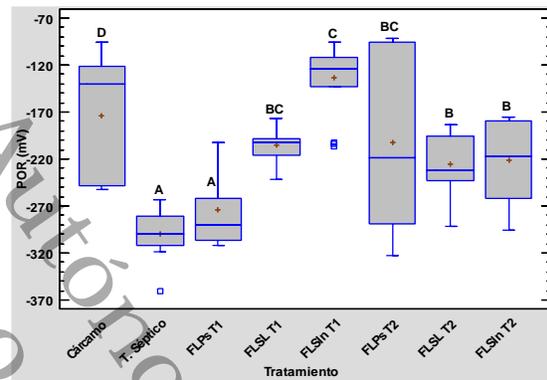


Figura 11.- Valores medianos ($\pm Q_1$, Q_3) para la variable POR (mV) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas

Demanda química de oxígeno

Para DQO (mg/L) reportó que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza ($P < 0.05$). Se encontró que el valor mediano más bajo se muestra en el tratamiento FLSIn T2 con un valor de $29 \pm$ ($Q_1=28.1782$; $Q_3= 30.8218$) mg/L, seguido de FLSIn T1 con $30 \pm$ ($Q_1=28.1782$; $Q_3= 32.6437$) mg/L y el valor mediano más alto en el tratamiento cárcamo con $508 \pm$ ($Q_1=417.42$; $Q_3= 797.437$) mg/L (Figura 12).

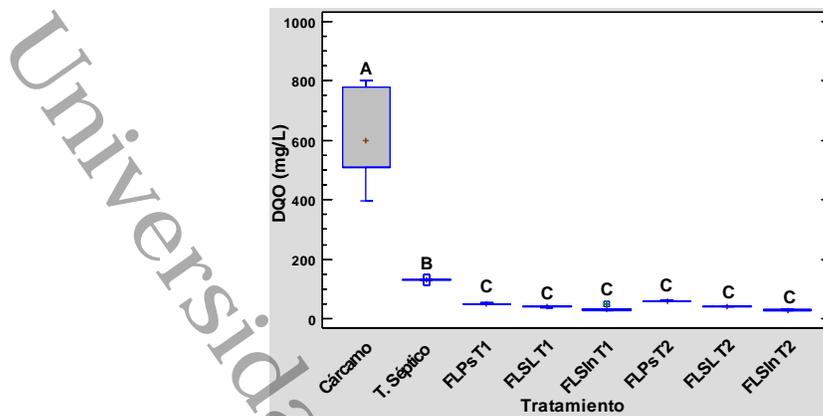


Figura 12.- Valores medianos ($\pm Q1$, $Q3$) para la variable DQO (mg/L) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas

9.1.3. Parámetros de control del proceso del sistema en su segunda fase Potencial de hidrógeno y temperatura

Para pH (upH) reportó que el valor mediano más bajo se muestra en el tratamiento FLPs T1 con un valor de $7.5 \pm (Q_1=7.4; Q_3= 7.9)$ upH seguido del tratamiento FLPs T2 con $7.6 \pm (Q_1= 7.40778; Q_3=7.8)$ upH y el valor mediano más alto en el tratamiento cárcamo con $8.0 \pm (Q_1= 8.07127; Q_3= 8.92575)$ upH y el tratamiento T. Séptico con $8.0 \pm RI (Q_1= 8.0; Q_3=8.5)$ (Figura 13). El ANOVA realizado a la variable Temperatura ($^{\circ}C$) mostró que el promedio ($\pm DE$) más bajo se reporta en el tratamiento FLSin T2 con 26.84 ± 0.698411 $^{\circ}C$, seguido de FLPs T2 con 27.06 ± 0.187083 $^{\circ}C$, finalmente el valor más alto se reportó en Cárcamo con 27.86 ± 0.187083 $^{\circ}C$ (Figura 14).

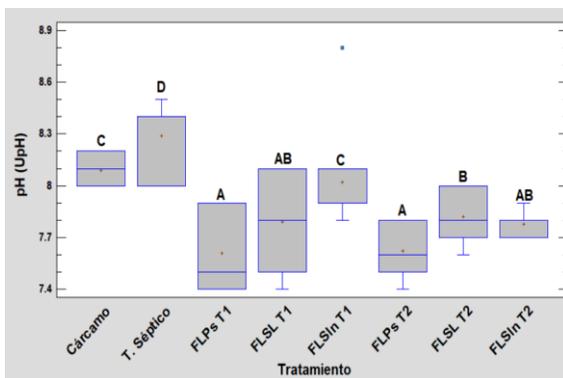


Figura 13.- Valores medianos ($\pm Q1$, $Q3$) para la variable pH (upH) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas

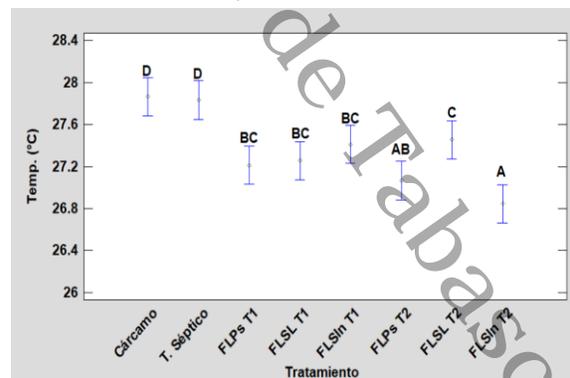


Figura 14.- Valores medianos ($\pm Q1$, $Q3$) para la variable Temperatura ($^{\circ}C$) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas

Conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales

Se encontró que el valor mediano más bajo se muestra en el tratamiento FLSIn T1 con un valor de $680.0 \pm (Q_1= 670.0; Q_3= 1240.0) \mu\text{S/cm}$, seguido de cárcamo con $740.0 \pm (Q_1= 720.0; Q_3= 759.689) \mu\text{S/cm}$ y el valor mediano más alto en el tratamiento FLPs T2 con $1475.0 \pm (Q_1= 1460.0; Q_3= 1545.33) \mu\text{S/cm}$ (Figura 15). Del mismo modo se encontró que el valor mediano más bajo se muestra en el tratamiento FLSIn T1 con un valor de $489.0 \pm (Q_1= 457.356; Q_3= 503.287) \text{mg/L}$, seguido de Cárcamo con $575.0 \pm (Q_1= 517.0; Q_3= 663.0) \text{mg/L}$ y el valor mediano más alto en el tratamiento FLSL T2 con $781.0 \pm (Q_1= 537.414; Q_3= 804.644) \text{mg/L}$ (Figura 16).

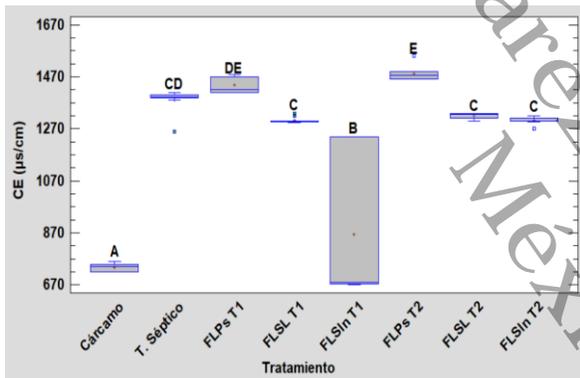


Figura 15.- Valores medianos ($\pm Q_1, Q_3$) para la variable CE ($\mu\text{S/cm}$) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas

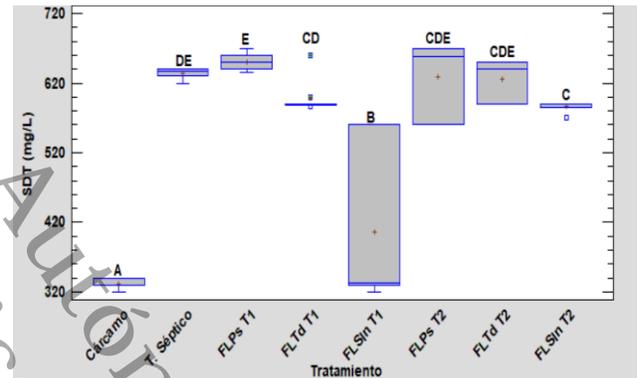


Figura 16.- Valores medianos ($\pm Q_1, Q_3$) para la variable STD (mg/L) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas

Turbiedad y color

Para Turbiedad (UNT) se encontró que el valor mediano más bajo se muestra en el tratamiento FLSIn T1 con un valor de $5.9 \pm (Q_1=5.2; Q_3= 9.0) \text{UNT}$, seguido de FLTd T1 con $12.3 \pm (Q_1= 11.2078; Q_3= 33.9922) \text{UNT}$ y el valor mediano más alto en el tratamiento FLPs T1 con $53.0 \pm (Q_1= 52.2078; Q_3= 57.0) \text{UNT}$ (Figura 17). Para Color (UC) se encontró que el valor mediano más bajo se muestra en el tratamiento FLSIn T1 con un valor de $357.0 \pm (Q_1= 308.622; Q_3= 377.844) \text{UC}$, seguido de FLTd T1 con $560.0 \pm (Q_1= 527.156; Q_3= 993.689) \text{UC}$ y el valor mediano más alto en el tratamiento Cárcamo con $1673.0 \pm (Q_1= 1276.24; Q_3= 1784.0) \text{UC}$ (Figura 18).

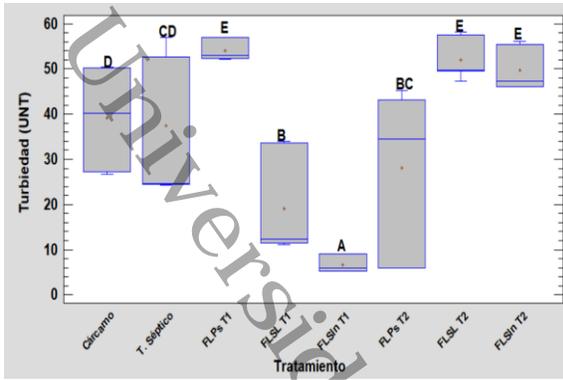


Figura 17.- Valores medianos (\pm Q1, Q3) para la variable Turbiedad (UNT) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas

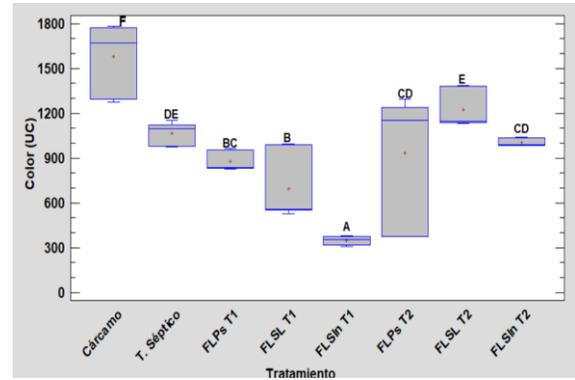


Figura 18.- Valores medianos (\pm Q1, Q3) para la variable Color (UC) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas

Oxígeno disuelto y Potencial oxido reducción

Para OD (mg/L) se reportó que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza ($P < 0.05$). El valor mediano más bajo se muestra en el tratamiento FLTd T1 con un valor de $0.7 \pm$ ($Q_1=0.6$; $Q_3=0.892$) mg/L y el tratamiento FLTd T2 con un valor de $0.7 \pm$ ($Q_1=0.6$; $Q_3=0.8$) mg/L seguido de FLSIn T2 con $1.3 \pm$ ($Q_1=1.2$; $Q_3=1.4$) mg/L y el valor mediano más alto en el tratamiento Cárcamo con $2.3 \pm$ ($Q_1=2.10778$; $Q_3=2.4$) mg/L (Figura 19). Para el POR (mV) se reportó que el valor mediano más bajo se muestra en el tratamiento FLSIn T1 con un valor de $-51.0 \pm$ ($Q_1=-55.8444$; $Q_3=-33.1556$) mV, seguido de Cárcamo con $-72.0 \pm$ ($Q_1=-75.0$; $Q_3=-72.0$) mV y el valor mediano más alto en el tratamiento FLPs T2 con $-339.0 \pm$ ($Q_1=-352.922$; $Q_3=-325.078$) mV y el tratamiento FLTd T2 con $-339.0 \pm$ ($Q_1=-342.844$; $Q_3=-333.233$) mV (Figura 20).

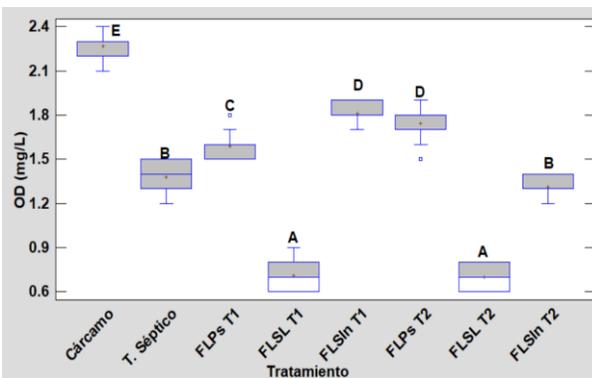


Figura 19.- Valores medianos (\pm Q1, Q3) para la variable OD (mg/L) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas

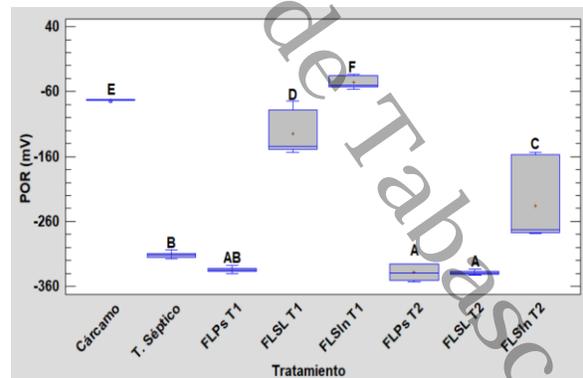


Figura 20.- Valores medianos (\pm Q1, Q3) para la variable POR (mV) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas

Demanda química de oxígeno

Para DQO (mg/L) se reportó que el valor mediano más bajo se muestra en el tratamiento FLSIn T1 con un valor de $173.0 \pm (Q_1= 131.0; Q_3= 197.0)$ mg/L, seguido de FLPs T2 con $193.0 \pm (Q_1= 150.0; Q_3= 212.0)$ mg/L y el tratamiento FLTd T1 con un valor de $193.0 \pm (Q_1= 126.0; Q_3= 199.0)$ mg/L el valor mediano más alto en el tratamiento Cárcamo con $302.0 \pm (Q_1=228.0.42; Q_3= 323.0)$ mg/L (Figura 21).

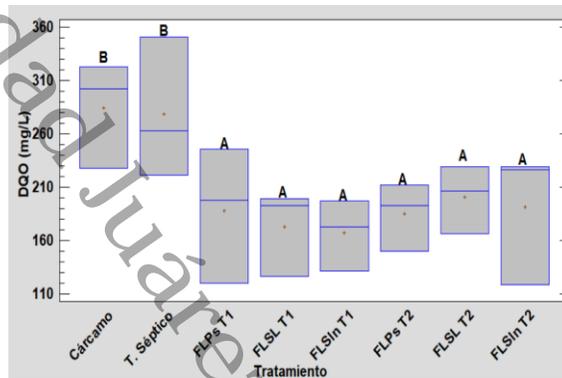


Figura 21.- Valores medianos ($\pm Q_1, Q_3$) para la variable DQO (mg/L) ($N=10$). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas

9.2. Características de las especies vegetales

Las características de las especies macrófitas del Tren 1 y el Tren 2 de la PTAR se presentan en las siguientes tablas mostrando condiciones de siembra inicial y cosecha final durante la etapa de estudio.

Tabla 4.-Especie *Potenderia sagittata* en el FLPs T1 y FLPs T2 (N=10). Fuente: elaboración propia.

Parámetro	T1 inicial		T1 final		T2 inicial		T2 final	
	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE
Peso planta (Kg)	1.4	0.3	7.2	0.1	1.8	0.3	7.0	0.1
Longitud de tallo (cm)	100.3	11.0	212.3	1.7	102.5	11.8	158.0	104.0
Diámetro de tallo (cm)	1.7	0.2	4.1	0.0	1.7	0.2	3.8	0.5
Diámetro de raíz (cm)	0.6	0.1	3.1	0.1	0.6	0.1	2.8	0.6
Largo de raíz (cm)	39.6	5.2	68.3	1.0	39.5	5.0	66.5	3.0
Número de hojas	11.5	3.9	18.8	0.5	11.5	3.9	18.0	0.8
Número de tallo	9.8	2.6	18.8	0.5	9.0	2.6	17.5	0.6
Ancho de hojas (cm)	29.1	2.4	33.6	0.5	29.5	2.7	33.7	0.4
Largo de hojas (cm)	17.0	2.0	32.6	0.5	16.7	1.6	32.0	1.4
Número de flores	1	0.0	4	0.0	0	0.0	3	0.0
Humedad (%)	87.2				85.1			
Cosecha semanal (kg)	3.1	2.4			2.0	1.5		

Tabla 5.-Especie *Sagittaria latifolia* en el FLTd T1 y FLTd T2 (N=10). Fuente: elaboración propia.

Parámetro	T1 inicial		T1 final		T2 inicial		T2 final	
	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE
Peso (Kg)	1.3	0.2	2.3	0.4	1.3	0.2	2.5	0.3
Longitud de tallo (cm)	62.8	3.5	172.9	18.7	63.8	3.5	157.8	12.1
Diámetro de tallo (cm)	1.2	0.1	4.4	0.4	1.2	0.1	4.1	0.5
Diámetro de raíz (cm)	0.7	0.1	2.5	0.6	0.7	0.1	2.9	0.3
Largo de raíz (cm)	26.5	2.6	93.3	9.2	27.5	2.6	92.0	5.2
Número de hojas	6.8	1.7	10.8	3.9	7.5	2.1	11.3	2.2
Número de tallo	6.5	1.3	11.8	3.3	7.5	1.3	10.8	2.5
Ancho de hojas (cm)	22.6	1.1	29.3	4.4	23.5	1.3	31.0	2.9
Largo de hojas (cm)	18.8	1.7	44.3	6.8	19.8	1.7	35.3	3.1
Número de flores	0	0	18	0.0	0	0.0	16.0	0.0
Humedad (%)	85.8				78.3			

Cosecha semanal (kg)	2.1	1.4			2.3	1.3		
----------------------	-----	-----	--	--	-----	-----	--	--

Tabla 6.-Especie *Sagittaria lancifolia* en el FLSIn T1 y FLSIn T2 (N=10). Fuente: elaboración propia.

Parámetro	T1 inicial		T1 final		T2 inicial		T2 final	
	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE
Peso (Kg)	1.4	0.1	3.3	0.0	2.6	0.5	3.4	0.5
Longitud de tallo (cm)	73.8	4.3	146.0	1.2	76.0	5.2	141.3	2.2
Diámetro de tallo (cm)	1.2	0.1	4.0	0.0	1.2	0.1	4.1	0.3
Diámetro de raíz (cm)	8.0	14.7	2.6	0.3	0.8	0.1	2.2	0.2
Largo de raíz (cm)	27.8	3.5	37.5	0.6	29.3	3.0	40.5	2.5
Número de hojas	7.3	2.2	14.8	1.0	8.3	2.2	12.3	0.5
Número de tallo	6.5	1.3	15.3	1.0	6.5	1.3	15.5	0.6
Ancho de hojas (cm)	17.0	1.6	49.8	0.6	17.8	1.7	43.0	1.1
Largo de hojas (cm)	52.8	3.5	16.2	0.9	53.8	3.5	22.9	2.3
Número de flores	0	0.0	22	0.0	0	0.0	19	0.0
Humedad (%)	71.2				69.6			
Cosecha semanal (kg)	2.5	1.7			2.8	2.1		

9.3. Modelado de parámetros de control de procesos

En las figuras siguientes se observa el modelado de la distribución espacial de los parámetros de control de procesos en el Tren 1 y 2 respectivamente. Este análisis identifica la mayor acumulación o disminución en el sistema y nos permite planear un mantenimiento correctivo o preventivo según las necesidades observadas. En las figuras 22 y 23 se muestra que el pH va de ligeramente alcalino a alcalino.

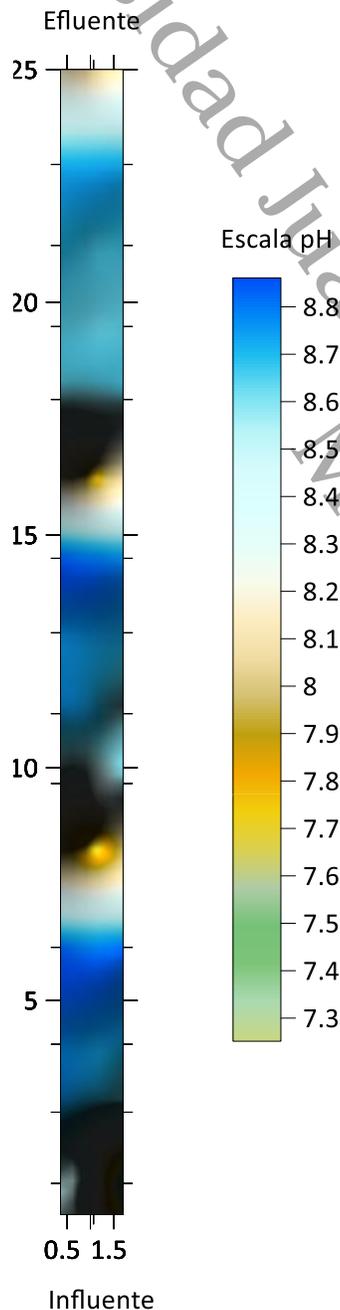


Figura 22.- Distribución del pH en el Tren 1

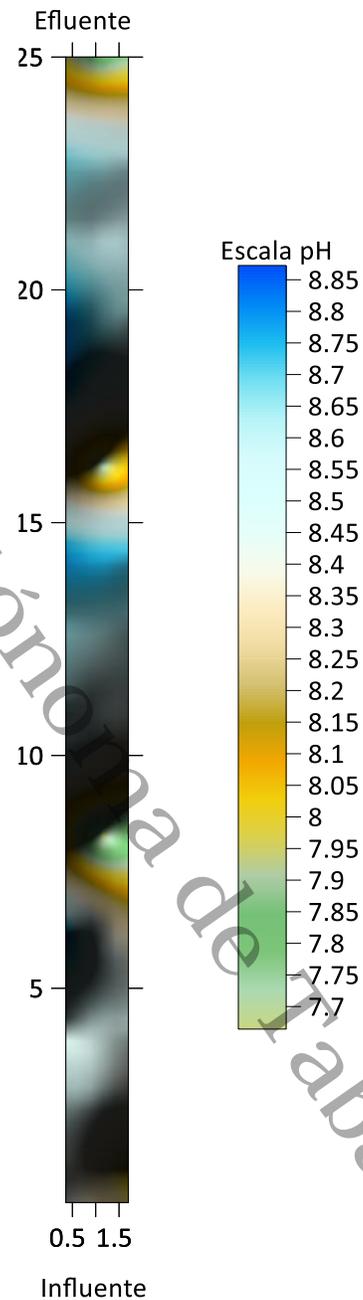


Figura 23.- Distribución del pH en el Tren 2

En las figuras 24 y 25 se muestra que las temperaturas típicas están entre 24 y 25°C por el efecto de la sombra que proporcionan las especies vegetales sobre la superficie del agua.

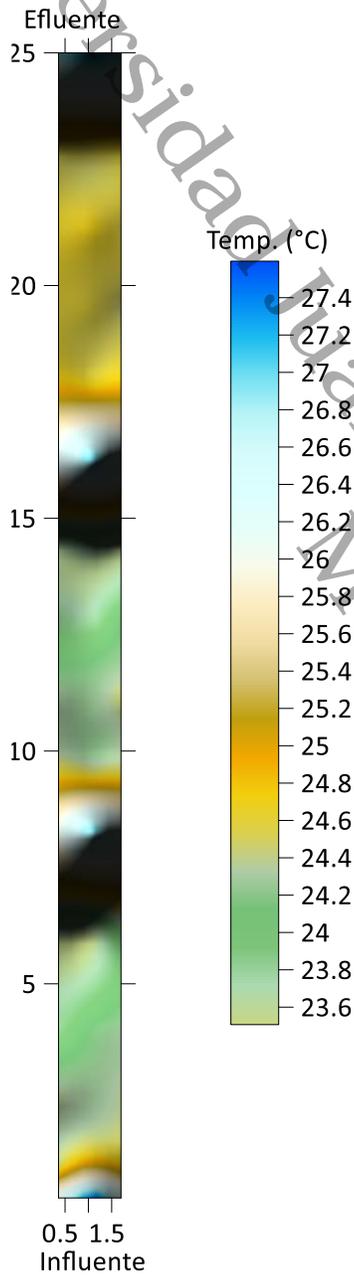


Figura 24.- Distribución de la Temperatura en el Tren 1

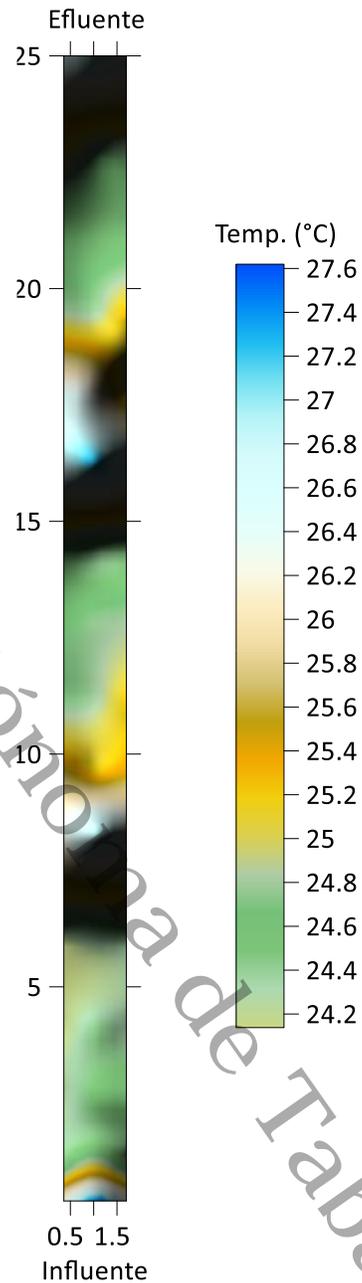


Figura 25 Distribución de la Temperatura en el Tren 2

En las figuras 26 y 27 se muestra que la CE disminuye hacia el final del humedal por el efecto de la absorción de las especies, sin embargo, en algunos puntos centrales muestran picos de CE como parte del proceso de liberación de iones como parte del ciclo de vida de las plantas.

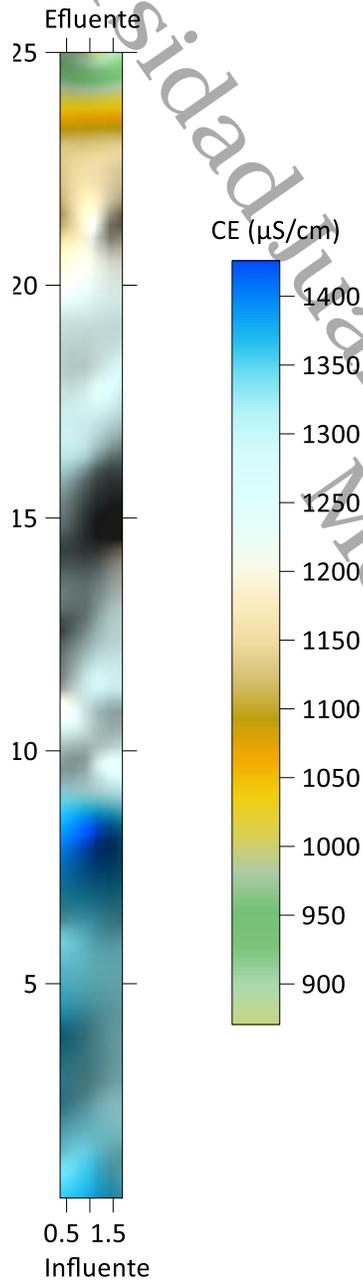


Figura 26.- Distribución de CE en el Tren 1

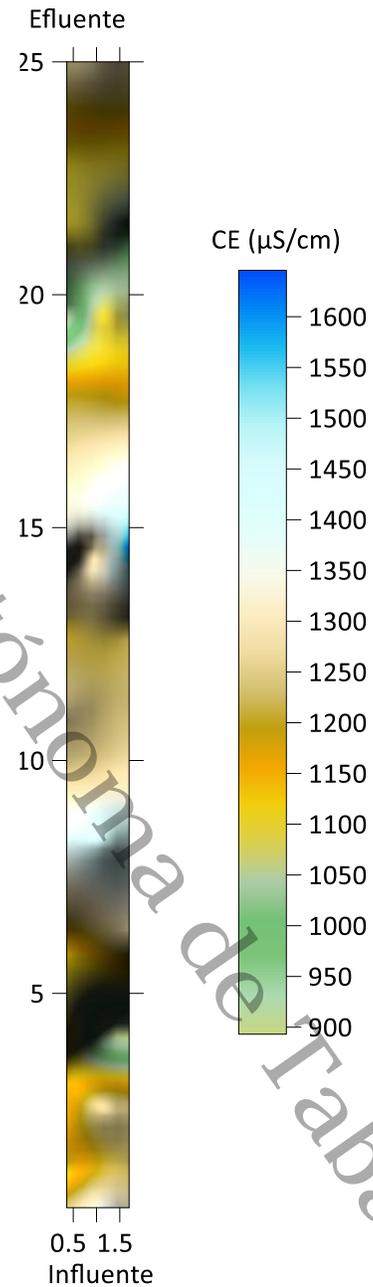


Figura 27 Distribución CE en el Tren 2

En las figuras 28 y 29 se muestra que los SDT se comportan similares a la CE, es decir, se disminuyen la concentración hacia el final del humedal por el efecto de la absorción de las especies. En algunos puntos centrales muestran picos de SDT como parte del proceso de liberación de iones como parte del ciclo de vida de las plantas.

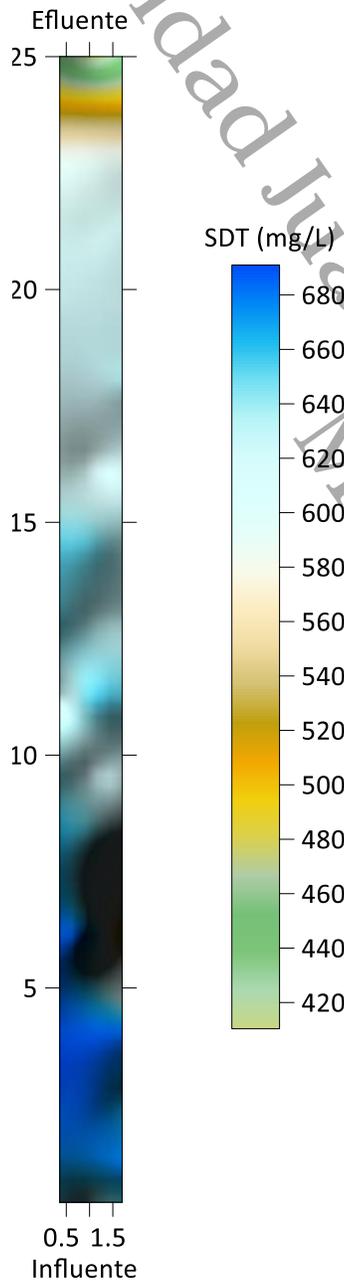


Figura 28.- Distribución espacial de SDT en el Tren 1

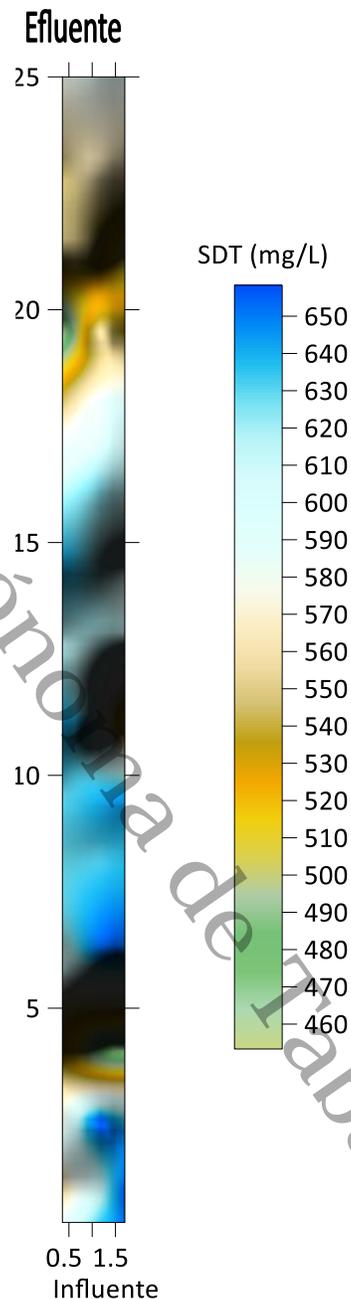


Figura 29 Distribución espacial de SDT en el Tren 2

En las figuras 30 y 31 se muestra que la concentración de turbiedad disminuye a la salida de los reactores, para el segundo periodo se observa que la concentración del influente es mayor.

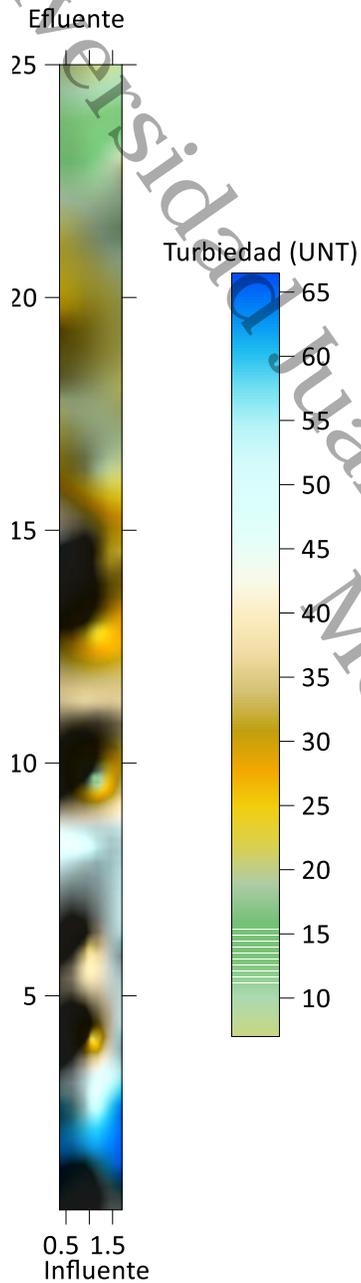


Figura 30.- Distribución de la Turbiedad en el Tren 1

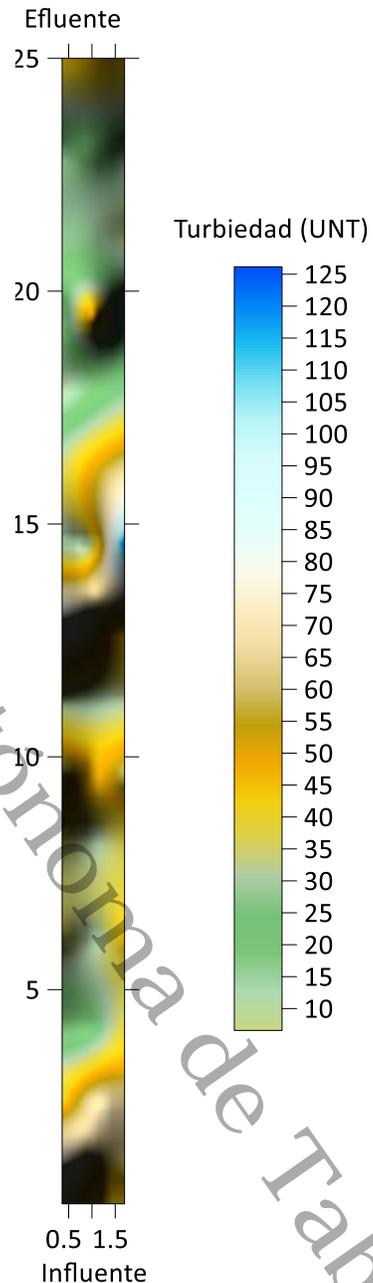


Figura 31.- Distribución de la Turbiedad en el Tren 2

En las figuras 32 y 33 se muestra que la concentración de color disminuye a la salida de los reactores, para el segundo periodo se observa que la concentración del influente es mayor, sin embargo, el efluente presenta concentraciones entre 300 y 400 UC.

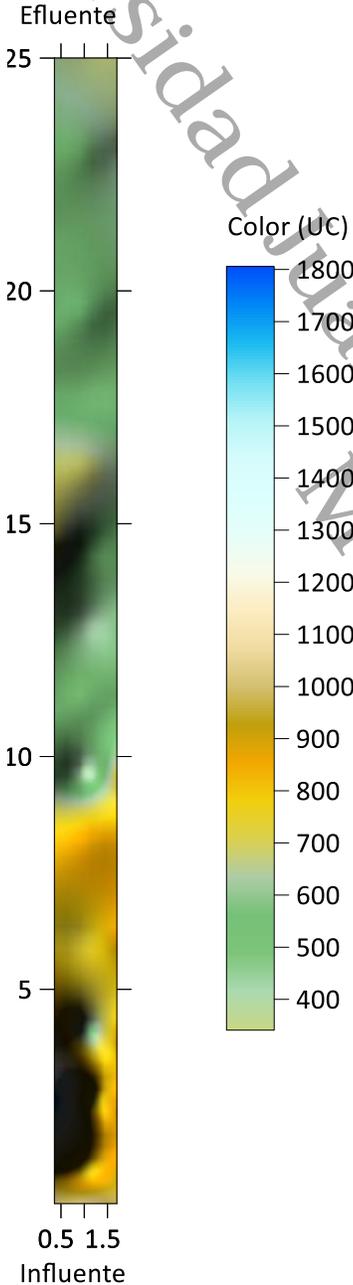


Figura 32.- Distribución del Color en el Tren 1

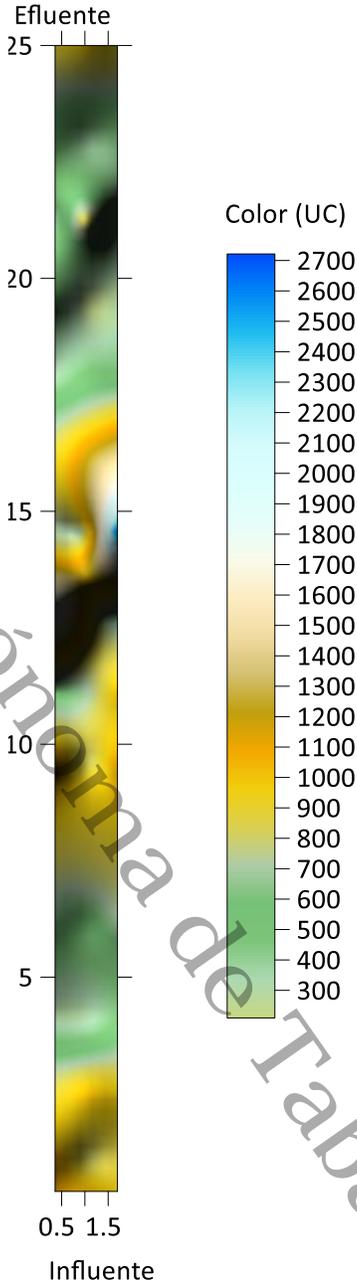


Figura 33.- Distribución del Color en el Tren 2

En las figuras 34 y 35 se muestra que la concentración de OD es mayor en los puntos donde existe mayor presencia de especies vegetales dentro de los reactores, para el segundo periodo se observa que la concentración de OD fue más baja con respecto al primero.

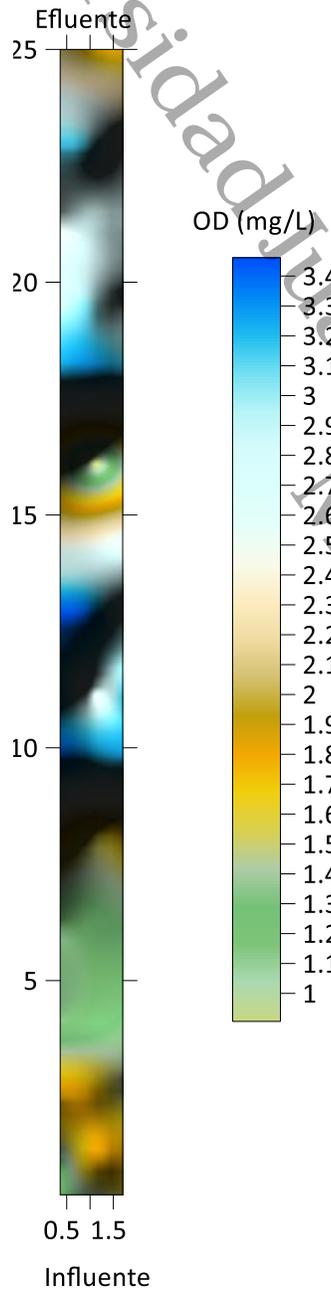


Figura 34.- Distribución de OD en el Tren 1

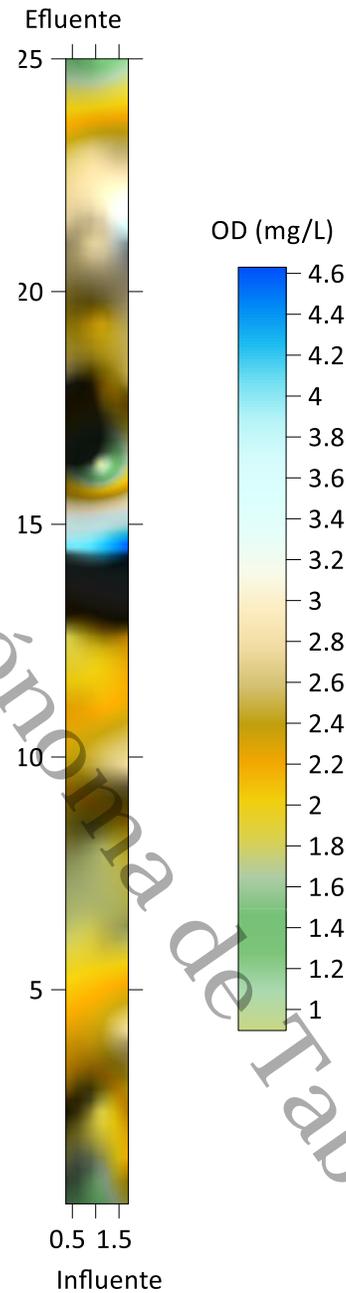


Figura 35.- Distribución de OD en el Tren 2

Finalmente, en las figuras 36 y 37 se muestra que la concentración de POR es mayor en los puntos donde existe mayor presencia de especies vegetales dentro de los reactores coincidiendo con el OD, sin embargo, en ambos periodos se muestra que el sistema se comporta de manera anaerobia por tener valores negativos.

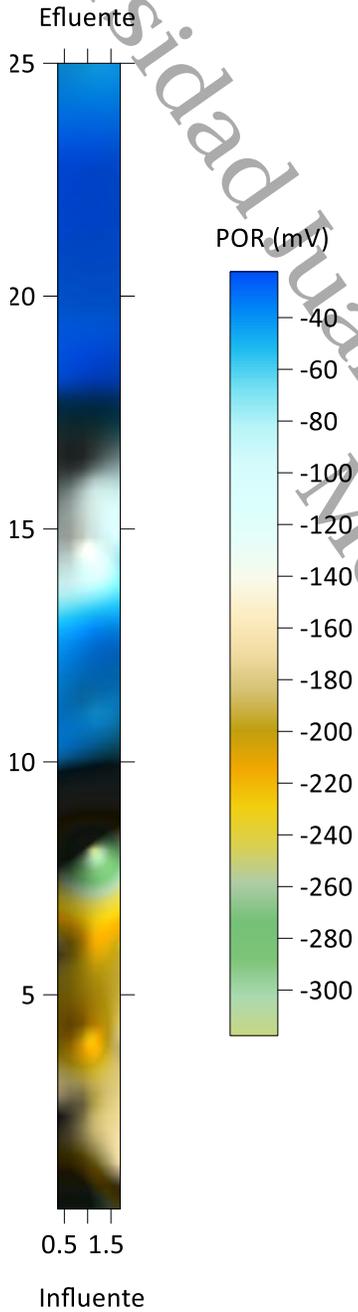


Figura 36.- Distribución del POR en el Tren 1

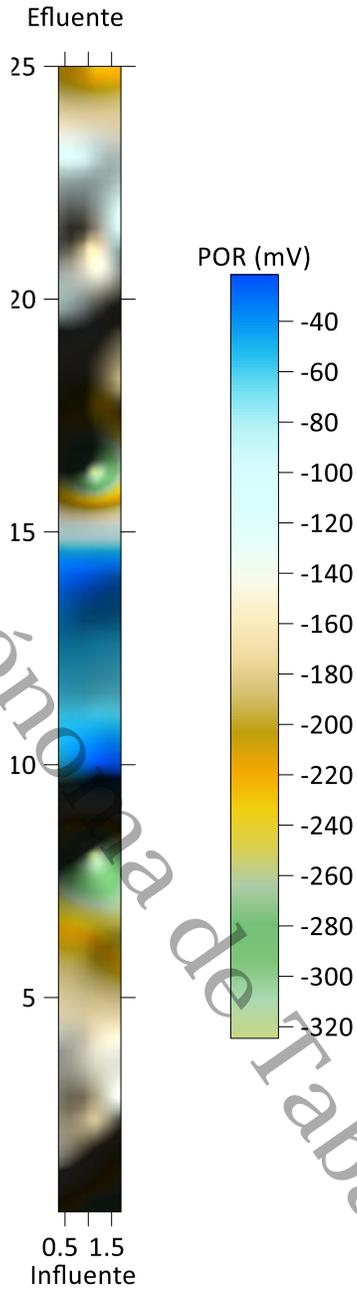


Figura 37.- Distribución del POR en el Tren 2

9.4. Cumplimiento ambiental de la normatividad vigente

El comportamiento promedio de los tratamientos con el cumplimiento normativo del Tren 1 y del Tren 2 se visualizan en la tabla 7 y 8. En ambos trenes se cumple con los criterios de descarga de la NOM-001-SEMARNAT-2021, sin embargo, los otros parámetros de control se muestran que no cumplen con criterios de descarga a cuerpos receptores en parámetros como color, OD, CE y SDT en el segundo tren de tratamiento.

Tabla 7. Cumplimiento normativo del Tren 1 en la primera etapa (N=10).

Parámetros	Cárcamo		T. Séptico		FLPsT1		FLSL T1		FLSInT1		LMP	Ref.
	x	DE	x	DE	x	DE	x	DE	x	DE		
pH (UpH)	8.6	0.4	8.6	0.4	8.4	0.2	8.3	0.2	8.3	0.2	6-9	A
Tem (°C)	29.3	0.6	29.0	0.5	28.2	0.6	28.1	0.6	27.7	0.8	35	A
CE (µs/cm)	1162.9	127.5	1425.4	353.8	1535.5	161.9	1297.5	161.9	961.8	68.1	1000	B
SDT (ppm)	584.7	72.7	760.3	21.4	771.4	69.1	642.9	69.1	481.7	21.9	1000	F
Turb (UNT)	35.1	26.8	26.2	7.5	12.2	9.1	15.8	9.1	22.9	14.1	15	E
Color (UC)	2072.3	895.4	1295.7	316.5	538.4	320.7	535.5	320.7	773.1	466.5	10	E
OD (mg/L)	3.9	0.3	3.1	1.2	1.5	0.2	1.7	0.2	3.4	0.2	5	B
ORP (mV)	-174.3	65.4	-300.1	24.4	-274.6	39.3	-274.6	39.3	-134.0	38.6	NA	D
DQO (mg/L)	562		127		51.7		41		30.3		150	A

Cuerpo receptor: suelo; A: NOM-001-SEMARNAT-2021; B: CECA/1989; C: NADF-003-AGUA-2003; D: Gerónimo (2022) POR (+) aerobio, POR (-) anaerobio; E: LFDDAMAN 2024; F: NADF-003-AGUA-2002. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Cumplimiento normativo del Tren 2 en la primera etapa (N=10).

Parámetros	Cárcamo		T. Séptico		FLPsT2		FLSL T2		FLSInT2		LMP	Ref.
	x	DE	x	DE	x	DE	x	DE	x	DE		
pH (UpH)	8.6	0.4	8.6	0.4	8.3	0.1	8.4	0.1	8.4	0.1	6-9	A
Tem (°C)	29.3	0.6	29.0	0.5	27.3	2.0	28.7	1.4	27.4	1.1	35	A
CE (µs/cm)	1162.9	127.5	1425.4	353.8	1404.3	134.3	1294.3	388.3	1367.5	227.5	1000	B
SDT (ppm)	584.7	72.7	760.3	21.4	702.3	63.1	693.7	120.9	582.0	117.2	1000	F
Turb (UNT)	35.1	26.8	26.2	7.5	10.2	6.2	10.3	6.6	18.5	9.9	15	E
Color (UC)	2072.3	895.4	1295.7	316.5	557.3	66.8	536.9	135.1	572.4	194.6	10	E
OD (mg/L)	3.9	0.3	3.1	1.2	3.3	0.2	1.8	0.4	2.1	0.2	5	B
ORP (mV)	-174.3	65.4	-300.1	24.4	-202.7	97.0	-225.5	29.0	-220.8	43.8	NA	D
DQO (mg/L)	408.5	251.6539	241.5	91.4385	153.75	67.66769	160.5	83.81	150.5	96.06	150	A

Cuerpo receptor: suelo; A: NOM-001-SEMARNAT-2021; B: CECA/1989; C: NADF-003-AGUA-2003; D: Gerónimo (2022) POR (+) aerobio, POR (-) anaerobio; E: LFDDAMAN 2024; F: NADF-003-AGUA-2002. Fuente: Elaboración propia.

9.5 Eficiencia de remoción de los trenes de tratamientos

Las eficiencias promedio de remoción de contaminantes se presentan en las tablas 9 y 10 para ambos periodos. Durante el estudio el sistema alcanzó su máxima eficiencia de remoción de la DQO pues fue de 96.4% dentro del tren 1, mientras que para el segundo tren se presentó un 63.3% en la eficiencia final del proceso. Como podemos observar este comportamiento se debe que en general del tren 2 sufrió mayor depredación por la herbivorías por la especie *Iguana iguana* que se alimentó constantemente la especie *Sagittaria latifolia*, por ello en la actualidad esta especie vegetal fue sustituida por *Thypha dominguensis*.

Tabla 9. Eficiencias de remoción promedio del Tren 1 en la primera etapa.

Parámetros	T. Séptico (%)	FLPsT1 (%)	FLSL T1 (%)	FLSInT1 (%)	ETP T1 (%)
pH	0.5	2.3	0.8	0.0	3.5
OD	1.0	2.9	0.2	1.5	5.4
T	-22.6	-7.7	15.5	25.9	17.3
CE	-30.0	-1.5	16.7	25.1	17.6
SDT	25.4	53.2	-28.7	-45.1	34.9
Color	37.5	58.4	0.5	-44.4	62.7
Turbiedad	21.4	52.1	-16.8	-100.0	12.0
POR	-72.2	8.5	0.0	51.2	23.1
DQO	77.4	59.3	20.6	26.0	94.6

Tabla 10. Eficiencias de remoción promedio del Tren 2 en la primera etapa.

Parámetros	T. Séptico (%)	FLPsT2 (%)	FLSL T2 (%)	FLSInT2 (%)	ETP T2 (%)
pH	0.5	3.4	-1.5	-0.1	2.4
OD	1.0	5.7	-5.1	4.5	6.2
T	-22.6	1.5	7.8	-5.7	-17.6
CE	-30.0	7.6	1.2	16.1	0.5
SDT	25.4	60.9	-0.3	-80.4	47.3
Color	37.5	57.0	3.7	-6.6	72.4
Turbiedad	21.4	-7.0	43.6	-15.5	45.2
POR	-72.2	32.5	-11.3	2.1	-26.7
DQO	40.9	36.34	-4.39	6.23	63.16

10. DISCUSIONES

Las variaciones del gasto en esta institución educativa han sido variadas desde el inicio de operación de este sistema. Para enero de 2020 el sistema de tratamiento operaba con una configuración de flujo subsuperficial-libre-libre en ambos trenes de tratamiento con un gasto de 47.2 ± 6.6 m³/día en promedio (2500 habitantes) (Hernández-Almeida 2021). Durante periodos intersemestrales (verano) se presentan gastos de 8.9 ± 3.4 m³/día (Romellón et al., 2022) y finalmente durante este periodo de evaluación el Qmed es de 12.1 m³/día operando el sistema con tres flujos libres en ambos trenes de HA. Estos resultados muestran que este gasto es directamente proporcional a la población servida en este periodo que es de 1142 habitantes, pues la población estudiantil disminuyó considerablemente después de pandemia.

Los HA en serie operan como unidades de tratamiento secundario para la eliminación de materia orgánica soluble y los TRH recomendados para la degradación de este contaminante está en un rango que va de 2 a 5 días para HAFL y de 3 a 4 para HAFS (Crites y Tchobanoglous, 2000; Kadlec y Wallace, 2009; CONAGUA, 2016), en el caso de este humedal para este periodo presentó un TRH que varía de 4.2 a 6.2 días.

En cuanto a la calidad del agua comenzaremos a describir que el pH en ambos trenes se comportó con una tendencia ligeramente alcalina y tiende a neutralizarse, permitiendo el establecimiento de bacterias (López, 2019), los efluentes están cumpliendo con el LMP de la NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece un rango de descarga a cuerpos receptores entre 6 a 9 unidades, rango adecuado para proliferación de la vida acuática en un cuerpo de agua, favoreciendo los procesos de nitrificación y desnitrificación (Cevallos Mendoza, 2019). La disminución del pH se debe a las interacciones entre el sustrato, la biopelícula, la presencia de plantas y a la acción del CaCO₃ presente en el sustrato (Kadlec & Wallace, 2009). La temperatura presente en los HA favorece el crecimiento de microorganismos mesófilos saprófitos que degradan la materia orgánica (Kadlec y Wallace, 2009) y

como se puede observar los valores más altos se presentan en los primeros reactores en ambos trenes.

Los SDT son material soluble integrado por materia inorgánica y orgánica, en el T1 se obtuvo un resultado de 481 mg/L y en T2 se obtuvo un resultado de 582 mg/L concentración inferior a 1000 mg/L, que es el límite permisible cumpliendo con límite máximo permisible de NADF-003-AGUA-2002. Este comportamiento es similar al presentado por la CE el cual es conocido como la carga de iones cationes presentes en el agua y están dentro del límite de referencia de los criterios ecológicos de calidad del agua (CECA/89).

El color en nuestro sistema presenta concentraciones entre 600 y 800 UC, lo que permitió alcanzar eficiencias de remoción del 62 a 72% en este parámetro, mientras que a turbiedad presentó efluentes de 19 a 23 UNT, alcanzando remoción de 12 a 45% durante este periodo. García y Corzo (2008), reportan que el color y la turbiedad están relacionados con la presencia de sólidos en suspensión en el agua residual en los HA. La turbiedad es materia en suspensión y coloidal, finamente dividida, plancton y otros organismos microscópicos; son cofactores de incremento de este parámetro fisicoquímico que se asocia con una menor eliminación de patógenos (Julca, 2019).

La DQO indica la oxidación química de material orgánico e inorgánico en el agua produciendo la degradación de estos compuestos, en el caso del T1 obtuvo una disminución de DQO de 30.3 mg/L es decir se removió el 94.6% y el T2 de 150.5 mg/L removiendo solo de un 63%. Según la NOM-001-SEMARNATA-2021 el límite máximo permisible es de 150 mg/L para infiltración, uso público y para uso agrícola de 200 mg/L, por lo que sí cumple con lo establecido. El tren 1 se comporta muy similar a los valores reportados por Núñez et al., (2019), quien evaluó un HA que trató aguas residuales domésticas con *Zantedeschia aethiopica* y *Eichhornia crassipes*, donde alcanzó una remoción de 59% en CE, 34% en Color, 96% en

Turbiedad y 92% de DQO. Los HA muestran ser mas eficientes en configuración subsuperficial-libre - libre como lo reportan Hernández 2021 y Romellón 2022.

11. CONCLUSIONES

Los humedales artificiales en serie con la configuración Libre-Libre-Libre con las especies macrofitas *Pontederia sagittata*, *Sagittaria latifolia* y *Sagittaria lancifolia*, son viables para la fitodepuración de aguas residuales domésticas, presentan adaptación y estabilización de manera tal que logran una reproducción temprana lo cual es viable para los humedales.

En un año de operación el T1 logró una eficiencia de remoción de 12% en turbiedad, 63% en color y en DQO un 94%, mientras el T2 removió el 45 % de turbiedad, 72% de color y 63% de DQO, con un TRH de 6 días y un gasto de operación (Qmed) para ambos trenes de tratamiento de 12.1 m³/día.

En cuanto a calidad de agua cumple perfectamente el LMP de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021 que es de 150 mg/L para la infiltración y otros riegos, teniendo la DACBIOL un permiso para descarga al suelo por la CONAGUA. Del mismo modo cumple con los otros parámetros normados como son temperatura y pH.

La especie *Pontederia sagittata* incrementó 5 veces la biomasa por individuo, *Sagittaria latifolia* incremento dos veces más el peso del individuo y *Sagittaria lancifolia* incrementó 2.5 veces en su biomasa. Esto nos muestra que la especie *Pontederia* presentó mayor captación de CO₂ para su estructura o biomasa vegetal. Esto muestra que es la que más se adaptó al sistema de humedales presente.

La distribución espacial de contaminantes nos permitió observar que áreas del humedal requieren atención para el mantenimiento preventivo como poda, cosecha o siembra de la vegetación. Esta configuración de humedales debe mejorarse cambiando uno de los reactores a flujo subsuperficial.

12. LITERATURA CITADA

Agua potable y drenaje. (2019). INEGI. Recuperado 4 de septiembre de 2024, de <https://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/dispon.aspx>

Asprilla, W. J., Ramírez, J. S., & Rodríguez, D. C. (2020). Humedales artificiales subsuperficiales: comparación de metodologías de diseño para el cálculo del area superficial basado en la remoción de la materia organica. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7973095>

Cevallos-Mendoza, M.F. (2019). Evaluación de las variables físicas en el agua del humedal La Segua Chone en periodo seco y lluvioso del 2019 [Tesis de Licenciatura, Escuela superior politécnica agropecuaria de Manabí] <http://repositorio.espam.edu.ec/bitstream/42000/1200/1/TTMA67.pdf>

Cifuentes, J. I., Paiz, J., Barrera, A., Rivera, P., Cortez, J., Cabrera, W., & Montoya, C. (2020). Humedales artificiales para Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales. Facultad de Ingeniería Universidad de San Carlos de Guatemala, 1(1).

Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2016). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales. Recuperado de <http://mapasconagua.net/libros/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf>

Comisión Nacional de Agua (CONAGUA) (2019). Inventario de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. gob.mx. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/inventario-de-plantas-municipales-de-potabilizacion-y-de-tratamiento-de-aguas-residuales-en-operacion>

Correa-Torres, S. N., Reátiga, A., Duran, M. C., & Florville, T. R. (2023). Eficiencia de la aplicación de *Chrysopogon zizanioides* en un sistema de agua residual doméstica rural con pretratamiento de pozo séptico. Información Tecnológica, 34(5), 1-10. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642023000500001>

Criterios Ecológicos de Calidad del Aguas CE-CCA-001/89.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989#gsc.tab=0

Crites, R. y Tchobanoglous, G. (2000). Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. Bogotá (Colombia): McGraw-Hill Interamericana, S. A.

Cruz-Palacios, G. R., & Juárez García, K. Y. (2024). Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales de flujo libre superficial (FLS) utilizando lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) [facultad de ingeniería y arquitectura escuela profesional de ingeniería ambiental].
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/145928?locale-attribute=es>

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

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. Universidad Juárez Autónoma De Tabasco. División Académica De Ciencias Biológicas.

Guerra, J. D. T., Vargas, J. S. M., Aguirre, R. R. P., & Huaranga, M. A. C. (2018). 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).
<https://doi.org/10.17162/rictd.v1i2.954>

Hernández-Almeida, M. F.; Estrada Pérez, N. & López Ocaña, G. (2021). Tratamiento de Agua Residual Doméstica en una Institución Educativa vía

- Humedales-Artificiales. En Academia Journals & Instituto Tecnológico de Chetumal (Eds). Memoria del congreso internacional de investigación, Academia Journals, (Chetumal Quintana Roo, México; Vol.13, Tomo 3, pp 338-343). elibro online con ISSN 1946-5352. <https://www.academiajournals.com/pubchetumal2021>
- Hernández-Salazar, A. B., Moreno-Seceña, J. C., & Sandoval-Herazo, L. C. (2018). Tratamiento de aguas residuales industriales en México: Una aproximación a su situación actual y retos por atender. Hernández-Salazar | RINDERESU. <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/27/33>
- Julca R.T.L.B (2019). Remoción de la turbiedad del agua del canal Miraflores, con almidón de yuca y sulfato de aluminio, jaén, Cajamarca. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Jaén]. http://m.repositorio.unj.edu.pe/bitstream/handle/UNJ/183/Julca_RLT.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Kadlec, R. H., y Wallace, S. (2009). Treatment wetlands. Second edition. Boca Raton: CRC Press Taylo & Francis Group. Pp 348.
- Ley Federal de Derechos Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes para el ejercicio fiscal (LFDDAMAN) 2024. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/915768/Ley_Federal_de_Derechos_2024.pdf
- López-Ocaña, G., Bautista Margulis, R.G., Valdés Manzanilla, A., Torres Balcázar, C. A., López Vidal, R., Pérez Sánchez, E., Pampillón González, L. (2019). Spatial distribution behavior of basic pollutants in a subsurface-flow wetland with *Thalia geniculata*. International Journal of Environmental Impacts. Vol. 2, No. 2 (2019) 145–160. DOI: 10.2495/EI-V2-N2-145-160
- Machado, A.I.; Beretta, M.; Fragoso, R.; Duarte, E. (2017). Overview of the State of the Art of Constructed Wetlands for Decentralized Wastewater Management in Brazil. Journal of Environmental Management, 187, 560–570.

- Machado, A.; Beretta, M.; Fragoso, R.; Duarte, E. (2017). Panorama del estado del arte de los humedales artificiales para la gestión descentralizada de aguas residuales en Brasil. *Journal of Environmental Management*, 187, 560–570.
- Morales, E. N., Ríos, N. S., & Huaranga, M. C. (2019). Fitorremediación mediante las especies palustre y flotante, *Zantedeschia aethiopica* y *Eichhornia crassipes* en el tratamiento de aguas residuales domésticas en la zona de la región natural Quechua-Cajamarca. *Revista de Investigación Ciencia Tecnología y Desarrollo*, 5(2). <https://doi.org/10.17162/rictd.v5i2.886>
- 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.
- Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-003-AGUA-2002, que establece las condiciones y requisitos para la recarga en el distrito federal por inyección directa de agua residual tratada al acuífero de la zona metropolitana de la ciudad de México. <https://paot.org.mx/centro/normas/NADF-003-AGUA-2002.pdf>
- NMX-AA-003-1980. Establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de aguas residuales, con el fin de determinar sus características físicas y químicas, debiéndose observar las modalidades indicadas en las normas de métodos de prueba correspondientes. México D.F.
- Osorio-Rivera, M. A., Carrillo-Barahona, W. E., Negrete-Costales, J. H., Loo-Lalvay, X. A., & Riera-Guachichulca, E. J. (2021). La calidad de las aguas residuales domésticas. *Polo del Conocimiento: Revista Científico - Profesional*, 6(3), 228-245. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i3.2360>
- Núñez - Morales, Erlin, Saboya Rios, Nemias, & Cruz Huaranga, Milda. (2019). Fitorremediación mediante las especies palustre y flotante, *Zantedeschia aethiopica* y *Eichhornia crassipes* en el tratamiento de aguas residuales domésticas 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>

Torres-Bojorges, Á. X., Hernández Razo, N. A., Fausto Urquieta, A. A., & Zurita Martínez, F. (2017). Evaluación de tres sistemas de humedales híbridos a escala piloto para la remoción de nitrógeno. Revista internacional de contaminación ambiental, 33(1), 37-47. <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.01.03>

Remellón-Cerino, M.J., Estrada-Pérez, N. y López-Ocaña, G. 2022. Remoción y cinética de contaminantes básicos en humedales artificiales en serie. Renewable Energy, Biomass & Sustainability (REB&S), Vol. 3, No. 1, 24-34. https://aldeser.org/uploads/1/3/0/8/130818527/a3_v3n1_reb_s.pdf

13. ANEXO FOTOGRÁFICO



Figura 38.- Colecta de la vegetación *Potentilla Sagittata*, municipio de Centro, Tabasco; Área protegida "el Tintal", DACBIOL.



Figura 39.- Colecta de vegetación *Sagittaria latifolia*, Pantanos de Centla.



Figura 40.- Colecta de vegetación *Sagittaria lancifolia*, Municipio de Centro, Tabasco; vertedero a cielo abierto.



Figura 41.- Evaluación de parámetros fisicoquímicos del agua residual



Figura 42.- Siembra en los trenes de tratamiento



Figura 43.- Muestreo en los trenes de tratamiento en influentes y efluentes.



Figura 44.- arañas lobo "*Lycosidae*"
encontrada en el FL T2 R2



Figura 45.-araña cazadora gigante
(*Heteropoda venatoria*) encontrada en el FL T2
R2



Figura 46.- Araña pescadora (*Dolomedes*)
encontrada en el FL T2 R2



Figura 47.- Tortuga de orejas rojas (*Trachemys
scripta elegans*) Encontrada en el FL T1 R3



Figura 48.- Tortuga Guao (*Staurotypus
triporcatus*) Encontrada en el FL R3T1



Figura 49.- "*Kinosternon leucostomum*"
Encontrada en el FL R3T1



Figura 50.- *Potenteria sagittata* en la etapa de
estabilización

Figura 51.- Muestreo en los trenes de
tratamiento en influentes y efluentes



Figura 52.- Sagittaria lancifolia en la etapa de estabilización



Figura 53.- HA en la etapa de cosecha final.



Figura 54.- Mantenimiento correctivo de los Trenes de tratamiento

Autónoma de Tabasco.

14. Alojamiento de tesis

Título de la tesis:	EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO LIBRE EN SERIE
Autor de la tesis	Pedro Luis García Martínez
ORCID:	https://orcid.org/0009-0003-0811-8863
Resumen de la tesis	<p>Se evaluó el desempeño de la PTAR de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), la cual trata sus aguas residuales a través de Humedales Artificiales de Flujo Libre (HAFL), sistema compuesto por 7 tratamientos de los cuales 6 cuentan con sustrato y 3 tipos de vegetaciones. El periodo de estudio fue de marzo de 2024 a marzo de 2025, donde los humedales operaron con las especies <i>Pontederia sagittata</i>, <i>Sagittaria latifolia</i> y <i>Sagittaria lancifolia</i>. Se evaluó la eficiencia de remoción de los parámetros de control (pH, Temperatura, CE, SDT, Turbiedad, Color, OD y DQO) además se caracterizó volumétrica y fisicoquímicamente el afluente y efluente de aguas residuales de las unidades del sistema determinando el Qmed, Qmin, Qmax. De igual manera se caracterizaron las especies de vegetación que tiene cada humedal en serie (ancho y largo de hoja, planta, tallo, raíz, peso de la especie y humedad). Asimismo, se realizó el modelado de la distribución espacial de los parámetros de control de procesos en cada tren. Los humedales artificiales en serie con la configuración Libre-Libre-Libre con las especies macrófitas <i>Pontederia sagittata</i>, <i>Sagittaria latifolia</i> y <i>Sagittaria lancifolia</i>, son viables para la Fito depuración de aguas residuales domésticas, presentan adaptación y estabilización de manera tal que logran una reproducción temprana lo cual es viable para los humedales. En un año de operación el T1 logró una eficiencia de remoción de 12% en turbiedad, 63% en color y en DQO un 94%, mientras el T2 removió el 45 % de turbiedad, 72% de color y 63% de DQO, con un TRH de 6 días y un gasto de operación (Qmed) para ambos trenes de tratamiento de 12.1 m³/día. En cuanto a calidad de agua cumple perfectamente el LMP de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021 que es de 150 mg/L de DQO para la infiltración y otros riegos, teniendo la DACBiol un permiso para descarga al suelo por la CONAGUA. Del mismo modo cumple con los otros parámetros normados como son temperatura y pH.</p>
Palabras clave:	Humedales artificiales, flujo libre, tratamiento de aguas residuales, eficiencia de remoción.

<p>Referencias citadas:</p>	<p>Agua potable y drenaje. (2019). INEGI. Recuperado 4 de septiembre de 2024, de https://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/dispon.aspx</p> <p>Asprilla, W. J., Ramírez, J. S., & Rodríguez, D. C. (2020). Humedales artificiales subsuperficiales: comparación de metodologías de diseño para el cálculo del área superficial basado en la remoción de la materia orgánica. Dialnet. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7973095</p> <p>Cevallos-Mendoza, M.F. (2019). Evaluación de las variables físicas en el agua del humedal La Segua Chone en periodo seco y lluvioso del 2019 [Tesis de Licenciatura, Escuela superior politécnica agropecuaria de Manabí] http://repositorio.espam.edu.ec/bitstream/42000/1200/1/TTMA67.pdf</p> <p>Cifuentes, J. I., Paiz, J., Barrera, A., Rivera, P., Cortez, J., Cabrera, W., & Montoya, C. (2020). Humedales artificiales para Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales. Facultad de Ingeniería Universidad de San Carlos de Guatemala, 1(1).</p> <p>Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2016). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales. Recuperado de http://mapasconagua.net/libros/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf</p> <p>Comisión Nacional de Agua (CONAGUA) (2019). Inventario de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. gob.mx. https://www.gob.mx/conagua/documentos/inventario-de-plantas-municipales-de-potabilizacion-y-de-tratamiento-de-aguas-residuales-en-operacion</p> <p>Correa-Torres, S. N., Reátiga, A., Duran, M. C., & Florville, T. R. (2023). Eficiencia de la aplicación de <i>Chrysopogon zizanioides</i> en un sistema de agua residual doméstica rural con pretratamiento de pozo séptico. Información Tecnológica, 34(5), 1-10. https://doi.org/10.4067/s0718-07642023000500001</p> <p>Criterios Ecológicos de Calidad del Aguas CE-CCA-001/89. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989#gsc.tab=0</p> <p>Crites, R. y Tchobanoglous, G. (2000). Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. Bogotá (Colombia): McGraw-Hill Interamericana, S. A.</p> <p>Cruz-Palacios, G. R., & Juárez García, K. Y. (2024). Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales de flujo libre superficial (FLS) utilizando lirio acuático (<i>Eichhornia crassipes</i>) [facultad de ingeniería y arquitectura escuela profesional de ingeniería ambiental]. https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/145928?locale-attribute=es</p>
-----------------------------	---

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

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

Guerra, J. D. T., Vargas, J. S. M., Aguirre, R. R. P., & Huaranga, M. A. C. (2018). 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). <https://doi.org/10.17162/rictd.v1i2.954>

Hernández-Almeida, M. F.; Estrada Pérez, N. & López Ocaña, G. (2021). Tratamiento de Agua Residual Doméstica en una Institución Educativa vía Humedales-Artificiales. En Academia Journals & Instituto Tecnológico de Chetumal (Eds). Memoria del congreso internacional de investigación, Academia Journals, (Chetumal Quintana Roo, México; Vol.13, Tomo 3, pp 338-343). elibro online con ISSN 1946-5352. <https://www.academijournals.com/pubchetumal2021>

Hernández-Salazar, A. B., Moreno-Secena, J. C., & Sandoval-Herazo, L. C. (2018). Tratamiento de aguas residuales industriales en México: Una aproximación a su situación actual y retos por atender. Hernández-Salazar | RINDERESU. <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/27/33>

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

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

Ley Federal de Derechos Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes para el ejercicio fiscal (LFDDAMAN) 2024. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/915768/Ley_Federal_de_Derechos_2024.pdf

López-Ocaña, G., Bautista Margulis, R.G., Valdés Manzanilla, A., Torres Balcázar, C. A., López Vidal, R., Pérez Sánchez, E., Pampillón González, L. (2019). Spatial distribution behavior of basic

pollutants in a subsurface-flow wetland with *Thalia geniculata*. International Journal of Environmental Impacts. Vol. 2, No. 2 (2019) 145–160. DOI: 10.2495/EI-V2-N2-145-160

Machado, A.I.; Beretta, M.; Fragoso, R.; Duarte, E. (2017). Overview of the State of the Art of Constructed Wetlands for Decentralized Wastewater Management in Brazil. Journal of Environmental Management, 187, 560–570.

Machado, A.I.; Beretta, M.; Fragoso, R.; Duarte, E. (2017). Panorama del estado del arte de los humedales artificiales para la gestión descentralizada de aguas residuales en Brasil. Journal of Environmental Management, 187, 560–570.

Morales, E. N., Ríos, N. S., & Huaranga, M. C. (2019). Fitorremediación mediante las especies palustre y flotante, *Zantedeschia aethiopica* y *Eichhornia crassipes* en el tratamiento de aguas residuales domésticas en la zona de la región natural Quechua-Cajamarca. Revista de Investigación Ciencia Tecnología y Desarrollo, 5(2). <https://doi.org/10.17162/rictd.v5i2.886>

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.

Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-003-AGUA-2002, que establece las condiciones y requisitos para la recarga en el distrito federal por inyección directa de agua residual tratada al acuífero de la zona metropolitana de la ciudad de México. <https://paot.org.mx/centro/normas/NADF-003-AGUA-2002.pdf>

NMX-AA-003-1980. Establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de aguas residuales, con el fin de determinar sus características físicas y químicas, debiéndose observar las modalidades indicadas en las normas de métodos de prueba correspondientes. México D.F.

Osorio-Rivera, M. A., Carrillo-Barahona, W. E., Negrete-Costales, J. H., Loo-Lalvay, X. A., & Riera-Guachichulca, E. J. (2021). La calidad de las aguas residuales domésticas. Polo del Conocimiento: Revista Científico - Profesional, 6(3), 228-245. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i3.2360>

Núñez - Morales, Erlin, Saboya Rios, Nemias, & Cruz Huaranga, Milda. (2019). Fitorremediación mediante las especies palustre y flotante, *Zantedeschia aethiopica* y *Eichhornia crassipes* en el tratamiento de aguas residuales domésticas 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>

Torres-Bojorges, Á. X., Hernández Razo, N. A., Fausto Urquieta, A. A., & Zurita Martínez, F. (2017). Evaluación de tres sistemas de humedales híbridos a escala piloto para la remoción de nitrógeno. Revista internacional de contaminación ambiental, 33(1), 37-47. <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.01.03>

	<p>Remellón-Cerino, M.J., Estrada-Pérez, N. y López-Ocaña, G. 2022. Remoción y cinética de contaminantes básicos en humedales artificiales en serie. Renewable Energy, Biomass & Sustainability (REB&S), Vol. 3, No. 1, 24-34. https://aldeser.org/uploads/1/3/0/8/130818527/a3_v3n1_reb_s.pdf</p>
--	--

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.