



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ALTA CARGA
EN UN SISTEMA EXPERIMENTAL SBR-HA EN SERIE**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:
JOSÉ IGNACIO MARTÍNEZ SANTIAGO

BAJO LA DIRECCIÓN DE:
DR. GASPAR LÓPEZ OCAÑA

EN CODIRECCIÓN DE:
M. EN C. CARLOS ALBERTO TORREZ BALCÁZAR

VILLAHERMOSA, TABASCO. JUNIO DE 2025

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, el día 09 del mes junio del año 2025, el que suscribe José Ignacio Martínez Santiago alumno del Programa de Ingeniería Ambiental con número de matrícula 192G24099, adscrito a la División Académica de Ciencias Biológicas, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del título de Licenciatura en Ingeniería Ambiental y titulada "TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ALTA CARGA EN UN SISTEMA EXPERIMENTAL SBR-HA EN SERIE" dirigida por el Dr. Gaspar López Ocaña y el M. en C. Carlos Alberto Torrez Balcázar.

DECLARO QUE:

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

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

Villahermosa, Tabasco a 09 de Junio de 2025.



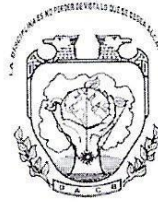
José Ignacio Martínez Santiago

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 03 de Junio 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. JOSÉ IGNACIO MARTÍNEZ SANTIAGO** egresado de la Lic. en **ING. AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis denominado: **"TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ALTA CARGA EN UN SISTEMA EXPERIMENTAL SBR-HA 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 ACADEMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

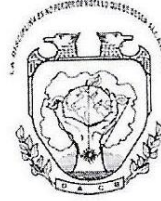
C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica
C.c.p.- Interesado





**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

JUNIO 03 DE 2025

**C. JOSÉ IGNACIO MARTÍNEZ SANTIAGO
PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL
PRESENTE**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: **“TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ALTA CARGA EN UN SISTEMA EXPERIMENTAL SBR-HA EN SERIE”**, asesorado por el Dr. Gaspar López Ocaña y M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar, sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por la MIPA. María Berzabe Vázquez González, Dra. Melina del Carmen Uribe López, Dr. Gaspar López Ocaña, MIPA. Elías de la Cruz Luna y Dr. Roberto Rodríguez Bastarmerito

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


**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR**

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



C.c.p.- Expediente del Alumno.
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



**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

03 de junio de 2025

C. José Ignacio Martínez Santiago
Pasante de la Lic. en Ingeniería Ambiental

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

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones, el índice de similitud y el reporte de originalidad obtenido a través de la revisión en la plataforma iThenticate de su trabajo recepcional **TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ALTA CARGA EN UN SISTEMA EXPERIMENTAL SBR-HA 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 | 5 % |
| | 10743 palabras, 20 coincidencias y 9 fuentes |

Finalmente, se le solicita al **C. José Ignacio Martínez Santiago**, integrar en la versión final del trabajo recepcional, este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate.

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

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

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

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



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

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

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ALTA CARGA EN UN SISTEMA EXPERIMENTAL SBR-HA EN SERIE

INFORME DE ORIGINALIDAD

5%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

| | | |
|---|--|--------------------|
| 1 | uvadoc.uva.es Internet | 100 palabras — 1% |
| 2 | aldeser.org Internet | 86 palabras — 1% |
| 3 | scielo.sld.cu Internet | 73 palabras — 1% |
| 4 | ri.ujat.mx Internet | 53 palabras — 1% |
| 5 | www.researchgate.net Internet | 31 palabras — < 1% |
| 6 | rtyc.utn.edu.ar Internet | 24 palabras — < 1% |
| 7 | www.scielo.cl Internet | 20 palabras — < 1% |
| 8 | www.ciba.org.mx Internet | 17 palabras — < 1% |
| 9 | ciba.org.mx Internet | 16 palabras — < 1% |

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco, a 09 de Junio 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 "TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ALTA CARGA EN UN SISTEMA EXPERIMENTAL SBR-HA 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, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

Colaboradores



José Ignacio Martínez Santiago

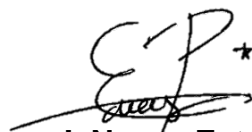


Dr. Gaspar López Ocaña



M. en C. Carlos Alberto Torrez Balcázar

Testigos



M. en I. Nancy Estrada Pérez



Ing. Pedro Luis García Martínez

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

A MIS PADRES

Ing. Ignacio Martínez Regalado y María Luisa Santiago Rosado, por confiar en mí, por siempre apoyarme incondicionalmente, por inculcarme valores y la valentía para enfrentar cualquier adversidad y nunca darme por vencido, por darme la educación y por estar en cada una de las etapas de mi formación personal y profesional.

AGRADECIMIENTOS

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

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

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

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

A la maestra, Nancy Estrada Pérez, por ser pieza fundamental en la realización de este proyecto, por siempre brindarme su apoyo incondicional y alentarme en seguir adelante y no decaer.

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

A todos, ¡GRACIAS!

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS | 8 |
| AGRADECIMIENTOS | 8 |
| RESUMEN | 14 |
| PALABRAS CLAVES | 14 |
| ABSTRAC | 14 |
| KEY WORDS | 15 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 15 |
| 2. ANTECEDENTES | 17 |
| 3. JUSTIFICACIÓN | 20 |
| 4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN | 20 |
| 5. HIPÓTESIS | 21 |
| 6. OBJETIVOS | 21 |
| 6.1 Objetivo general | 21 |
| 6.2 Objetivos específicos | 21 |
| 7. MATERIALES Y MÉTODOS | 22 |
| 7.1 Descripción del tren de tratamiento | 22 |
| 7.1.1 Cárcamo | 22 |
| 7.1.2 Reactor SBR | 22 |
| 7.1.3 Sedimentadores secundarios | 23 |
| 7.1.4 Humedales artificiales en serie | 23 |
| 7.2 Operación del Sistema Experimental | 23 |
| 7.2.1 Llenado | 23 |
| 7.2.2 Aireación | 23 |
| 7.2.3 Extracción | 23 |
| 7.2.4 Sedimentación | 24 |
| 7.2.5 Fase inactiva | 24 |
| 7.3 Parámetros de medición del sistema experimental | 24 |
| 7.4 Actividades de campo | 24 |
| 7.4.1 Colecta biomasa porcina | 24 |

| | | |
|-------|---|----|
| 7.4.2 | Colecta de vegetación | 25 |
| 7.4.3 | Caracterización de la vegetación..... | 25 |
| 7.4.4 | Siembra de vegetación en humedales artificiales..... | 25 |
| 7.4.5 | Evaluación del crecimiento y comportamiento de la vegetación..... | 25 |
| 7.4.6 | Obtención de muestras de agua..... | 25 |
| 7.5 | Actividades de laboratorio..... | 26 |
| 7.5.1 | Caracterización del lodo microbiano..... | 26 |
| 7.5.2 | Parámetros de operación del SBR | 26 |
| 7.5.3 | Caracterización fisicoquímica del agua residual..... | 26 |
| 7.6 | Actividades de gabinete | 27 |
| 7.6.1 | Eficiencia de remoción de contaminantes | 27 |
| 7.6.2 | Diseño experimental y análisis estadísticos | 27 |
| 7.7 | Cronograma de actividades..... | 28 |
| 7.8 | Costos del proyecto | 29 |
| 8. | RESULTADOS..... | 30 |
| 8.1 | Estabilización del SBR..... | 30 |
| 8.2 | Comportamiento de las especie..... | 30 |
| 8.3 | Aforo..... | 31 |
| 8.3.1 | Gastos de operación del sistema..... | 31 |
| 8.4 | Calidad del agua en el sistema..... | 32 |
| 8.4.1 | Potencial de hidrogeno y Temperatura..... | 32 |
| 8.4.2 | Conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales | 33 |
| 8.4.3 | Turbiedad y Color | 34 |
| 8.4.4 | Oxígeno disuelto y potencial oxido reducción..... | 35 |
| 8.4.5 | Demanda química de oxigeno..... | 35 |
| 8.5 | Cumplimiento ambiental en los tratamientos..... | 36 |
| 8.6 | Eficiencias de remoción de los tratamientos..... | 37 |
| 9. | DISCUSIONES..... | 39 |
| 9.1 | Desarrollo y comportamiento de las especies..... | 39 |
| 9.2 | Tiempo de retención hidráulico | 40 |
| 9.3 | Calidad del agua en los efluentes..... | 40 |
| 10. | CONCLUSIONES..... | 43 |
| 11. | LITERATURA CITADA..... | 44 |

| | | |
|-----|----------------------------|----|
| 12. | ANEXOS FOTOGRAFICOS | 51 |
| 13. | ALOJAMIENTO DE TESIS | 54 |

Índice de figuras

| | | |
|---|---|----|
| Figura 1.- | Sistema de tratamiento. Fuente: Creación propia..... | 22 |
| Figura.2. | Gastos de operación del sistema de tratamiento. Fuente: Elaboración propia..... | 32 |
| Figura 3.- | Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable pH (UpH) (N=15). | 33 |
| Figura 4.- | Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable Temperatura ($^{\circ}C$) (N=45). | 33 |
| Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas. Fuente: Creación propia..... | | 33 |
| Figura 5.- | Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable CE ($\mu s/cm$) (N=15). | 34 |
| Figura 6.- | Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable SDT (ppm) (N=15)..... | 34 |
| Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas. Fuente: Creación propia..... | | 34 |
| Figura 7.- | Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable Turbiedad (UNT) (N=45).34 | |
| Figura 8.- | Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable Color (UC) (N=45). | 34 |
| Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas. Fuente: Creación propia..... | | 34 |
| Figura 9.- | Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable OD (mg/L) (N=45)..... | 35 |
| Figura 10.- | Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable POR (mV) (N=45)..... | 35 |
| Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas. Fuente: Creación propia..... | | 35 |
| Figura 11.- | Valores medianos ($\pm Q1$, Q3) para la variable DQO (mg/L) (N=45). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas. Fuente: Creación propia..... | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 12. Colecta de vegetación Sagittaria lancifolia..... | 51 |
| Figura 13. Colecta de vegetación Pontederia sagittata..... | 51 |
| Figura 14. Preparación del lodo bacteriano en el SBR..... | 51 |
| Figura 15. Colecta del estiércol porcino..... | 51 |
| Figura 16. Elaboración del agua reconstituida con desechos de comida..... | 51 |
| Figura 17. Elaboración del agua reconstituida..... | 51 |
| Figura 18. Análisis de DQO..... | 52 |
| Figura 19. Análisis de parámetros fisicoquímicos del agua residual..... | 52 |
| Figura 20. Viales de DQO analizados..... | 52 |
| Figura 21. Volumen de lodos generado durante el proyecto..... | 52 |
| Figura 22. Clarificación del agua residual tratada en el SBR..... | 52 |
| Figura 23. Colonias presentes en el lodo bacteriano..... | 52 |
| Figura 24. Microorganismos observados en el lodo bacteriano..... | 53 |
| Figura 25. Fauna presente en los humedales artificiales..... | 53 |
| Figura 26. Sistema experimental SBR-Humedales en serie..... | 53 |
| Figura 27. Fauna presente en el humedal artificial..... | 53 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Antecedentes internaciones..... | 17 |
| Tabla 2. Antecedentes nacionales..... | 18 |
| Tabla 3. Antecedentes regionales..... | 19 |
| Tabla 4. Parámetros de medición en el reactor SBR. Fuente: Elaboración propia. | 24 |
| Tabla 5. Cronograma de actividades. Fuente: Elaboración propia..... | 28 |
| Tabla 6. Costos de proyecto. Fuente: Elaboración propia..... | 29 |
| Tabla 7. Características de entrada y salidas del agua residual en el SBR. Fuente: Elaboración propia..... | 30 |

| | |
|--|----|
| Tabla 8. Comportamiento de especies en los trenes de tratamiento (N=4). Fuente: Elaboración propia..... | 31 |
| Tabla 9. Cumplimiento ambiental en el tren 1..... | 36 |
| Tabla 10. Cumplimiento ambiental en el tren 2..... | 37 |
| Tabla 11. Cumplimiento ambiental en el tren 3..... | 37 |
| Tabla 12. Eficiencias de remoción del Tren 1..... | 38 |
| Tabla 13. Eficiencias de remoción del Tren 2..... | 38 |
| Tabla 14. Eficiencias de remoción del Tren 3..... | 39 |

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México

RESUMEN

Se evaluó la eficiencia de remoción de contaminantes básicos en un tren de tratamiento experimental híbrido con SBR-HA en serie tratando efluentes domésticos, utilizando macrófitas *Sagittaria lancifolia* y *Potenderia sagittata*. El sistema está integrado por un SBR, dos sedimentadores y tres trenes de humedales artificiales en serie, el primer tren consta de un humedal de flujo libre y flujo subsuperficial (testigos, sin especies), el segundo un flujo subsuperficial y flujo libre (*S. lancifolia* y *P. sagittata*) y tercer tren con flujo libre y subsuperficial (*P. sagittata* y *S. lancifolia*). Se comparó la morfología de las especies evaluadas y la calidad del agua tratada (pH, temperatura, SDT, CE, color, turbiedad, OD, POR y DQO). Las eficiencias de remoción alcanzadas fueron del 92.6%, 91.1%, 97.0% de DQO, 46.1%, 64.8%, 71.2% para Color, 68.4%, 60.9%, 65.8% para Turbiedad, esto en los 3 trenes de tratamiento respectivamente. La *Potenderia sagittata* es la especie con mayor adaptación y tolerancia.

PALABRAS CLAVES: Cumplimiento ambiental, DQO, Eficiencia de remoción, Humedales Artificiales, SBR

ABSTRAC

The efficiency of removal of basic pollutants was evaluated in an experimental treatment train of hybrid treatment with SBR-HA in series treating domestic effluents, using *Sagittaria lancifolia* and *Potenderia sagittata* macrophytes. The system is composed of an SBR, two sedimentators and three artificial wetland trains in series, the first train consists of a free-flow and subsurface flow wetland (controls, without species), the second a subsurface flow and free flow (*S. lancifolia* and *P. sagittata*) and third train with free flow and subsurface flow (*P. sagittata* and *S. lancifolia*). The morphology of the species evaluated and the quality of the treated water (pH, temperature, SDT, EC, color, turbidity, DO, POR and COD) were compared. The removal efficiencies achieved were 92.6%, 91.1%, 97.0% for COD, 46.1%, 64.8%, 71.2% for Color, 68.4%, 60.9%, 65.8% for Turbidity, this in the 3 treatment trains respectively. *Potenderia sagittata* is the species with the highest adaptation and tolerance.

KEY WORDS: Environmental Compliance, COD, Removal Efficiency, Constructed Wetlands, SBR

1. INTRODUCCIÓN

Durante la primera mitad del siglo XX en México el agua fue sinónimo de desarrollo hidráulico, la política hidráulica se centró en privilegiar a la construcción de infraestructuras y el aprovechamiento del agua, todo esto sin tomar en cuenta los efectos sobre el medio ambiente (Mussetta, 2022). Es por ello, que la importancia del agua en la actualidad tiende a ser un tema trascendental ya que afecta de manera directa a la sociedad en conjunto (Ortega y Peña, 2016). Se ha reportado para el 2019 que 72% de lagos, ríos y humedales naturales del mundo se encuentran contaminados por vertidos urbanos e industriales provocando afectaciones al ser humano y sobre todo a la biota que habita en los cuerpos de agua ya mencionados (Cusiche et al. 2019).

La mayoría de los vertidos urbanos contienen altas cantidades de microorganismos patógenos, sólidos, materia orgánica y tóxicos que perjudican la calidad del agua, sin embargo, existen tratamientos físicos (tamizado, sedimentación, desnatado, etc.), químicos (neutralización, desinfección, floculación, precipitación, etc.) y biológicos (lagunas, oxidación bioquímica, digestión de fangos, etc.) que logran la remoción y degradación de estos contaminantes (Peña, 2018). Los países en vía de desarrollo no cuentan con sistemas eficientes de tratamiento de aguas residuales domésticas, típicamente por problemas económicos o debido a la limitada aplicación de alternativas viables de bajos costos como las naturales, las cuales consisten en biorreactores anaerobios, lagunas de estabilización, humedales artificiales, etc. Siendo combinadas en lugares donde no existen problemas en la disposición de terrenos, es muy común encontrar dentro de las tecnologías convencionales de lodos activados muchas de sus variantes, tales como los lodos activados convencional, de acción extendida y lodos activados discontinuos secuenciales por sus siglas en inglés SBR (Vargas et al., 2020).

En la actualidad, una de las tecnologías recientes aplicables para el tratamiento de aguas residuales son los SBR, siendo un sistema de lodos activados de llenado y extracción para el tratamiento de aguas residuales municipales e

industriales en el que la aireación, la sedimentación y la clarificación son etapas del mismo tratamiento (Jafarinejad, 2017), otra de las tecnologías aplicadas con altas eficiencias de tratamiento son los humedales construidos los cuales son sistemas diseñados para simular los procesos naturales que ocurren en el ambiente que implican el uso de vegetación, material de soporte asociaciones microbianas, con el objetivo de ayudar en el tratamiento de las aguas residuales (Ramírez, 2020).

Por lo anterior expuesto, en esta investigación se realizará el estudio a escala experimental de un sistema híbrido de tratamiento de aguas residuales domésticas que consta de un reactor SBR y humedales artificiales (HA) en serie, verificando la eficiencia de remoción de contaminantes básicos de las aguas residuales domésticas de alta carga.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México

2. ANTECEDENTES

En la tabla 1 se presenta una serie de investigaciones a nivel internacional con respecto al tratamiento de aguas residuales con la ayuda de tratamientos híbridos, en donde se enfoca en su mayoría al uso de las tecnologías de humedales artificiales (HA) y reactores biológicos secuenciales (SBR).

Tabla 1. Antecedentes internaciones

| Autores | Año | Tecnología | Especie | AR | Contaminantes | %ER |
|------------------|------|--|---------------------|-----------|----------------------------------|--|
| Chavan y Mutnuri | 2021 | Tratamiento híbrido (HAFV-sistema de microalgas) | <i>Canna indica</i> | Domestica | DQO: 1738 mg/L pH: 6.5 UpH | DQO: 68.9% |
| Sylla, A. | 2020 | Tratamiento híbrido (HAFV-filtros de arena) | <i>Arundo donax</i> | Domestica | DQO: 317.22 mg/L pH: 8 UpH | DQO: 63,26% |
| Ng. J. Y. et al. | 2021 | SBR | - | Domestica | DQO:684 mg/L | DQO: 93% |
| Akula et al. | 2021 | Tratamiento híbrido (reactor discontinuo-reactor electroquímico) | - | Domestica | DQO: 135.9 mg/L pH: 7.37 UpH | DQO: 90% |
| Hameedah et al. | 2021 | Tratamiento híbrido (SBR-filtro grueso) | - | Domestica | Demanda química de oxígeno (DQO) | DQO (sin filtro): 93% DQO (con filtro): 97% |

En la tabla 2 se muestra una recopilación de investigaciones a nivel nacional con respecto al tratamiento de aguas residuales con tratamientos híbridos, enfocándose mayormente en el uso de tecnologías como los humedales artificiales (HA) y reactores biológicos secuenciales (SBR).

Tabla 2. Antecedentes nacionales

| Autores | Año | Tecnología | Especie | TRH (d) | AR | Contaminantes | %ER |
|-----------------|------|--|---|-------------------------------|------------|--|---|
| Romellón et al. | 2023 | Humedales artificiales en serie (HAS) | <i>Pontederia cordata</i> , <i>Thalia geniculata</i> y <i>Sagittaria lancifolia</i> | 0.9 | Domesticas | DQO: 373 mg/L DQO: 83.05 mg/L Turbiedad: 96.37 UNT Turbiedad: 35 UNT Color: 1305.1 UC Color: 47.7 UC pH: 8.66 UpH pH: UpH SDT: 950.5 mg/L SDT: mg/L Temperatura: 27.3 °C | DQO: 78.65% Turbiedad: 62.2% Color: 61.4% pH: 3.0% SDT: -4.7% |
| Magaña y López | 2023 | Humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial (HAFL y HAFS) | <i>Sagittaria latifolia</i> | 6-7 para HAFL y 3-5 para HAFS | Domesticas | Turbiedad: 103.3 UNT Color: 1349.3 UC DQO: 755.7 mg/L OD: 0.6 mg/L pH: 8.3 UpH SDT: 699.5 mg/L | Turbiedad: 95.9% Color: 89.4% DQO: 95.7% |
| Sandoval et al. | 2023 | Tratamiento híbrido (HA y PET como sustituto de medios filtrantes) | Híbridos de <i>Canna</i> , <i>Spathiphyllum blandum</i> , <i>Anturium</i> spp, y <i>Thypha</i> spp. | - | Domesticas | DQO: 274.65 mg/L DQO: mg/L | Con vegetación 86.95% DQO Sin vegetación 81.33% DQO |
| Marín et al. | 2023 | Humedales Artificiales (HA) | <i>Typha</i> , <i>Cyperus hydrophytes</i> , <i>Zantedeschia aethiopica</i> ., <i>Canna</i> | - | Domesticas | Demanda química de oxígeno (DQO) | 90% DQO |

| Autores | Año | Tecnología | Especie | TRH (d) | AR | Contaminantes | %ER |
|---------|-----|------------|--|---------|----|---------------|-----|
| | | | <i>genus., Heliconia genus, Hedychium coronarium, y Anturium andreanum</i> | | | | |

En la tabla 3 se muestran diversas investigaciones realizadas a nivel regional con respecto al tratamiento de aguas residuales con tratamientos híbridos, enfocándose mayormente en el uso de tecnologías como los humedales artificiales (HA) y reactores biológicos secuenciales (SBR).

Tabla 3. Antecedentes regionales

| Autores | Año | Tecnología | Especie | TRH (d) | AR | Contaminantes | %ER |
|---------------|------|---|--|---------|-----------|--|---|
| López et al. | 2023 | Humedales Artificiales en serie (HAFL y HAFS) | <i>Thalia geniculata, Sagittaria latifolia Eichhornia crassipes y Pontederia cordata</i> | 1.28 | Domestica | Demanda química de oxígeno (DQO), | 89.2 % DQO |
| Magaña et al. | 2022 | Humedales Artificiales | <i>Pontederia cordata</i> | 4-5 | - | Turbidez: 19.79 NTU Color: 1038.67 CU pH: 8.93UpH CE: 1765.43 µS/cm | Turbiedad: 70% Color: 81.0 % CE: 40.8 % |

3. JUSTIFICACIÓN

Hoy en día las comunidades de México cuentan con una diversidad heterogénea de aguas residuales de origen doméstico en donde dentro de estas podemos encontrar procesos que generan altas cargas de materia orgánica. Buscando alternativas de tratamiento para este tipo de agua, existe la posibilidad de combinar sistemas biológicos con tecnologías avanzadas para el tratamiento de aguas residuales y aumentar el valor de la utilidad de la combinación de tales tecnologías ajustando diseños y condiciones de operación (Casierra, 2016). El sistema de tratamiento SBR es una opción basada en lodos activados que tiene ventajas comparativas con respecto a las plantas continuas convencionales, presentando simplicidad y una operación económicamente viable, así como flexibilidad en operación y control, consistiendo en un llenado y vaciado que opera cíclicamente en una secuencia temporal (Santa Cruz et al. 2018), así como el sistema de humedales artificiales en donde las especies vegetales son un elemento importante, ya que históricamente se han utilizado plantas nativas de humedales llamadas macrófitas las cuales presentan altos porcentajes de remoción de contaminantes básicos así como nutrientes e incluso químicos (Alarcón, 2016).

Es por ello que en esta investigación surge la necesidad de combinar a escala experimental ambas tecnologías para que posterior al tratamiento primario y secundario, en donde se realizará la remoción de sólidos más voluminosos y sólidos sedimentables (cárcamo, SBR y sedimentadores), se reduzca la concentración de la demanda química de oxígeno (DQO) por debajo de los límites máximos permisibles (LMP) que establece la NOM-001-SEMARNAT-2021 (100 mg/L), con un tratamiento terciario de humedales artificiales en serie de flujo libre y flujo subsuperficial con *Potenderia sagittata* y *Sagittaria Latifolia*, el cual busca degradar y sintetizar contaminantes específicos difíciles de eliminar en los sistemas, tales como los nutrientes, nitrógeno (NT) y fósforo (PT).

4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Podrá ser una opción viable y económica la combinación de ambas tecnologías (SBR-HA) en el tratamiento de aguas residuales con alta carga? •

5. HIPÓTESIS

- H0: El sistema experimental SBR combinado con HA en el tratamiento de aguas residuales domésticas, sí cumple con las eficiencias de remoción del 90% en parámetros como potencial de hidrogeno, temperatura, solidos disueltos totales, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, potencial de óxido reducción, color, turbiedad y DQO.
- H1: El sistema experimental SBR combinado con HA en el tratamiento de aguas residuales domésticas, no cumple con las eficiencias de remoción del 90% en parámetros como potencial de hidrogeno, temperatura, solidos disueltos totales, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, potencial de óxido reducción, color, turbiedad y DQO.

6. OBJETIVOS

6.1 Objetivo general

Evaluar la remoción de contaminantes básicos en un tren de tratamiento experimental hibrido con SBR-HA en serie de efluentes domésticos.

6.2 Objetivos específicos

- Colectar, estabilizar y caracterizar la biomasa porcina en un reactor discontinuo secuencial para el tratamiento de efluentes domésticos.
- Caracterizar morfológicamente las especies durante el periodo de experimentos (colecta, siembra y estabilización) midiendo peso de la especie, número de hojas, ancho de hoja, largo de hoja, diámetro de tallo.
- Evaluar el afluente y efluente de las unidades de proceso midiendo el potencial de hidrogeno (pH), temperatura, solidos disueltos totales (SDT), conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), potencial de óxido reducción (POR), color, turbiedad y DQO.
- Verificar el cumplimiento ambiental del efluente tratado con base a la NOM-001-SEMARNAT-2021

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 Descripción del tren de tratamiento

El sistema de tratamiento se diseñó a escala piloto y se compone por los siguientes elementos: cárcamo, reactor SBR, sedimentadores secundarios en serie y humedales artificiales en serie. Todas las unidades cuentan con alimentación propia, además de que el reactor SBR y sedimentadores tienen su propia descarga de lodos (figura 1).

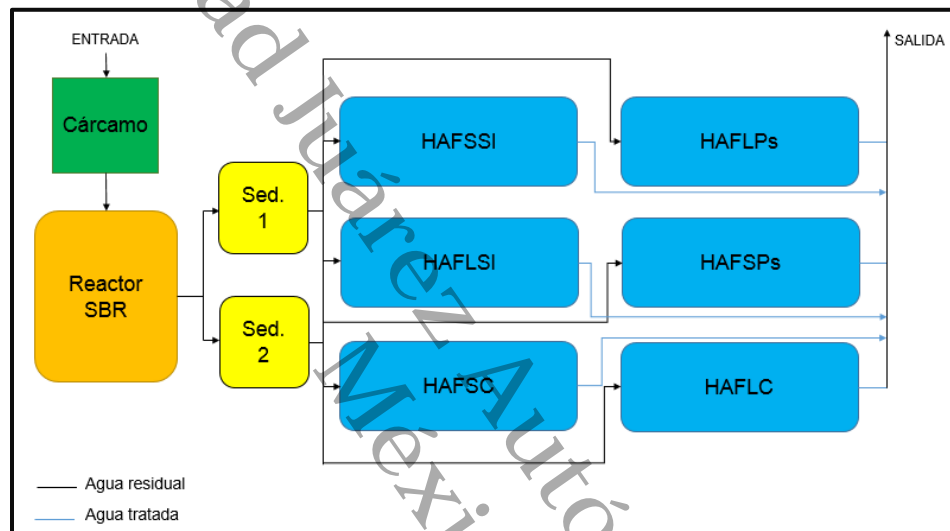


Figura 1.- Sistema de tratamiento. Fuente: Creación propia.

7.1.1 Cárcamo

El proceso inició con la deposición del agua residual en el cárcamo. Este tiene medidas de 30 cm de ancho, una altura de 40 cm y un tirante operativo de 1 m, además de contar con una instalación de tubería de PVC de 1/2".

7.1.2 Reactor SBR

El cárcamo a través de una bomba depositó el agua a tratar en el reactor SBR. Estos reactores se caracterizan por homogenizar propiedades fisicoquímicas de las aguas residuales, el diseño de esta unidad tiene un ancho de 40 cm y una altura de 50 cm, así mismo cuentan con una instalación de tubería de PVC de 1/2".

7.1.3 Sedimentadores secundarios

Para esta etapa el flujo volumétrico fue dividido en dos sedimentadores secundarios y el efluente llega por gravedad. Estas unidades tienen las siguientes dimensiones 40 cm de ancho y 30 cm de largo.

7.1.4 Humedales artificiales en serie

Finalmente, el agua llega a los trenes de HA en serie por gravedad. Estos tienen dimensiones de 30 cm de ancho y 120 cm de largo para cada unidad de igual forma cuentan con una instalación de tubería de PVC de ½". La división de estos estuvo compuesta de la siguiente forma: tres trenes en serie el cual contaron con dos secciones cada uno de un humedal artificial de flujo libre (HAFL) y un humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFS).

7.2 Operación del Sistema Experimental

El proceso requirió de un sistema de aireación y de agitación los cuales se encargaron de suministrar el oxígeno requerido por las bacterias depuradoras, así mismo esta evitaba la sedimentación de los flocúlos en el reactor y permitía la homogenización de los lodos activados (Sasso, 2017).

7.2.1 Llenado

Se agregó 1 kilogramo de heces porcinas al reactor, con la finalidad de generar bacterias, las cuales se encargaron de consumir toda la carga orgánica. Así mismo, con ayuda de una bomba se agregó agua residual doméstica proveniente del cárcamo situado en la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol) al SBR. El tiempo de llenado del reactor fue de 15 min.

7.2.2 Aireación

Se realizó con el fin de suministrar oxígeno a las bacterias generadas y completar el proceso iniciado en la fase anterior.

7.2.3 Extracción

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

7.2.4 Sedimentación

Se dejó sedimentar por una hora, para conseguir la separación de los lodos y así poder obtener un sobrenadante clarificado en el efluente.

7.2.5 Fase inactiva

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

7.3 Parámetros de medición del sistema experimental

En la tabla se presentan los parámetros medidos en el reactor SBR durante el proyecto, los cuales fueron sugeridos por Balcázar et al (2020).

Tabla 4. Parámetros de medición en el reactor SBR. Fuente: Elaboración propia.

| Parámetro | Valor | Unidad |
|-------------------------|-------|----------------|
| Q entrada | 120 | L/d |
| Concentración de lodos | 0.02 | m ³ |
| DQO | 160.1 | mg/L |
| Tiempo de reacción | 8 | H |
| Tiempo de sedimentación | 4 | H |
| Tiempo muerto | 1.25 | H |
| Tiempo de llenado | 15 | Min |
| OD | 2 | mg/L |
| Temperatura | 25 | °C |
| pH | 7.5 | UpH |
| SSVLM (microorganismos) | 1600 | mg/L |

7.4 Actividades de campo

7.4.1 Colecta biomasa porcina

En la obtención de las heces porcinas estas se colectaron en la ranchería Anacleto Canabal 1era sección (17° 59.241'N, 92° 59.132'O) en donde se obtuvo un volumen de 1 kg, a esta se le realizó la determinación de sólidos totales y sólidos totales volátiles, las heces porcinas, fueron añadidas al reactor SBR y alimentadas con el afluente de aguas residuales domésticas, diariamente durante dos semanas se realizaron las determinaciones de parámetros de control, del afluente, efluente y licor mezclado, se operó el sistema hasta conseguir las condiciones de equilibrio.

7.4.2 Colecta de vegetación

A través de una búsqueda se seleccionó y recolecto vegetación nativa del estado de Tabasco en donde se colectaron un total de 40 plantas, las cuales fueron extraídas manualmente con la ayuda de palas y trasladadas con carretilla y cubetas, para después sembrarlas en las unidades experimentales (Zepeda et al., 2005).

7.4.3 Caracterización de la vegetación

Para este punto fue necesario determinar las características fisiológicas de cada una de las plantas recolectadas, además fue necesario realizar un análisis de la muestra de agua en donde fueron depositadas con el fin de determinar las condiciones iniciales de nuestra agua a tratar, Ramírez (2018) establece como caracterización: peso de la especie, numero de hojas, ancho de hoja, largo de hoja, diámetro de tallo, mismas que fueron tomadas como referencias.

7.4.4 Siembra de vegetación en humedales artificiales

Debido al diseño de las unidades experimentales de los HA se optó en sembrar la vegetación en una sola serie. Por lo cual en cada unidad solamente se sembraron 4 surcos de cada vegetación recolectada a una profundidad de 5 cm para los HAFL y 20 cm para los HAFS (Mei et al., 2014).

7.4.5 Evaluación del crecimiento y comportamiento de la vegetación

La evaluación del crecimiento y comportamiento de la vegetación en los tratamientos se realizó según lo planteado por Machado (2011) y Escutia et al. (2010), por ende, fue necesario determinar el largo y ancho máximo de las hojas, el número de hojas por planta, la densidad y productividad de la vegetación de acuerdo con su base seca. Estas mediciones se realizaron cada diez días durante la etapa de arranque, y cada mes para la etapa de estabilización.

7.4.6 Obtención de muestras de agua

La campaña de monitoreo se realizó en el arranque (1ª fase) y en la estabilización (2ª fase) de la planta de tratamiento, el monitoreo tuvo un tiempo de duración de dos semanas tomando una muestra simple durante 10 días (en ambas fases) por cada unidad de proceso (10 elementos, figura 1), para determinar la calidad de agua de 180 muestras simples a las que se les determinaron pH,

Temperatura, CE, SDT, POR, OD, Sólidos sedimentables, Color, turbiedad y DQO. Las muestras se tomaron en recipientes de 1 L, previamente etiquetados y limpios, según la NMX-AA-003-1980. El tiempo de estudio del tren híbrido inició a partir del mes de junio de 2024 hasta el mes de marzo de 2025. Se realizó una campaña de monitoreo en septiembre de 2024 y febrero de 2025.

7.5 Actividades de laboratorio

7.5.1 Caracterización del lodo microbiano

Para la generación del inóculo (cultivo bacteriano) se implementó la metodología sugerida por Balcázar et al. (2020), el cual constó de materia fecal porcina. Una vez recolectada en campo, a este estiércol, se le determinó su humedad, pH y sólidos volátiles. En el SBR se añadió 1 kg de estiércol hasta aforar 60 L de agua residual. Posteriormente se inició con la aireación constante por cinco días para estabilizarlos.

7.5.2 Parámetros de operación del SBR

Para su operación se emplearon parámetros sugeridos por Dautan et al. (1998), como lo es la DQO (Demanda Química de Oxígeno). Así mismo, se midieron las concentraciones de lodos, carga volumétrica, relación alimento/microorganismo, tiempo de retención, tiempo de reacción, tiempo de sedimentación, oxígeno disuelto, temperatura y potencial de hidrogeno.

7.5.3 Caracterización fisicoquímica del agua residual

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

de aguas y verificar el cumplimiento de los límites máximos permisibles como lo refiere la NOM-001-SEMARNAT-2021.

7.6 Actividades de gabinete

7.6.1 Eficiencia de remoción de contaminantes

La eficiencia de remoción parcial y total del sistema se realizó durante ambas etapas y estuvo en función de las concentraciones promedio. Para cualquier sustancia fue necesario aplicar el cálculo de eficiencia requerida y se efectuó mediante la siguiente ecuación (Cardona y Vanegas 2009).

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

Donde:

$[a]A$ = La masa del analito en el afluente

$[a]E$ = La masa del analito en el efluente

% R = Porcentaje de remoción

7.6.2 Diseño experimental y análisis estadísticos

Al final cada etapa del sistema se llevó a cabo una comparativa de los contaminantes en cada unidad. Por lo cual se utilizó el software STATGRAPHICS CENTURION® v19.0, utilizando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, en donde para los datos paramétricos se utilizó un análisis ANOVA y para los datos no paramétricos se utilizó una prueba de Kruskal-Wallis para los datos no paramétricos.

7.7 Cronograma de actividades

En la presente tabla se muestran las actividades que se realizaron durante el periodo de evaluación del proyecto.

Tabla 5. Cronograma de actividades. Fuente: Elaboración propia.

| Actividad | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Búsqueda y recolección de vegetación. | ■ | | | | | | | | | | | |
| Fase de siembra y caracterización de la vegetación. | ■ | | | | | | | | | | | |
| Inicio del arranque del tren de tratamiento. | | | | | | | | | | | | |
| Semana de muestro y monitoreo | | | | | ■ | | | | | ■ | | |
| Caracterización fisicoquímica del afluente y efluente | | | | | ■ | | | | | ■ | | |
| Inicio de la fase de estabilización del tren de tratamiento. | | | | | | ■ | | | | | | |
| Evaluación del crecimiento y comportamiento de la vegetación | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | ■ | | ■ | | | |
| Caracterización fisicoquímica del afluente y efluente | | | | | | | | | | ■ | ■ | |
| Resultados y conclusiones | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Redacción de la tesis | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Presentación de la tesis | | | | | | | | | | | ■ | ■ |

7.8 Costos del proyecto

En la siguiente tabla se desglosa los gastos que se realizaron durante la durabilidad del proyecto:

Tabla 6. Costos de proyecto. Fuente: Elaboración propia.

| Concepto | Unidad | Precio unitario | Precio Total |
|-------------------------------------|--------|-----------------|--------------|
| Materiales de construcción | | | |
| Malla sombra | 1 | \$406 | \$406 |
| Pegamento para tuberías de PVC | 2 | \$238 | \$476 |
| Manguera para aire (metros) | 3 | \$250 | \$750 |
| Válvulas ½ pulgadas | 33 | \$22 | \$726 |
| Poliducto ½ pulgada (50 metros) | 1 | \$500 | \$500 |
| Codos de ½ pulgadas | 45 | \$5 | \$225 |
| PVC Tee ½ pulgadas | 30 | \$6 | \$180 |
| Tubo de PVC 2 pulgada de 6 metro | 4 | \$129 | \$516 |
| Coples ½ | 30 | \$5 | \$150 |
| Extensión eléctrica | 1 | \$200 | \$200 |
| Pala de cuchara | 1 | \$327 | \$327 |
| Pala plana | 1 | \$250 | \$250 |
| Herramientas | | | |
| Segueta | 1 | \$128 | \$128 |
| Tijeras de jardín | 1 | \$150 | \$150 |
| Carretilla | 1 | \$1,200 | \$1,200 |
| Bomba sumergible fuente pecera | 1 | \$217 | \$217 |
| Bomba eléctrica | 1 | \$515 | \$515 |
| Aireadores | 4 | \$254 | \$1,016 |
| Escoba | 1 | \$55 | \$55 |
| Tijeras | 1 | \$169 | \$169 |
| Equipo de seguridad | | | |
| Guates de carnaza | 1 | \$88 | \$88 |
| Guantes látex (cajas) | 2 | \$318 | \$636 |
| Guantes de nitrilo | 1 | \$714 | \$714 |
| Cubre bocas de seguridad industrial | 20 | \$16 | \$320 |
| Lentes de seguridad | 1 | \$630 | \$630 |
| Botas | 1 | \$290 | \$290 |
| Equipo de muestreo | | | |
| Bailer | 1 | \$2,000 | \$2,000 |
| Conos imhoff 1000ml | 3 | \$5,832 | \$17,496 |
| Vaso de precipitado | 1 | \$190 | \$190 |
| Botes de 1 L para muestra | 27 | \$20 | \$540 |
| Análisis de laboratorio | | | |
| Análisis de pH | 180 | \$250 | \$45,000 |
| Análisis de Temperatura | 180 | \$250 | \$45,000 |
| Análisis de CE | 180 | \$250 | \$45,000 |
| Análisis de SDT | 180 | \$250 | \$45,000 |
| Análisis de color | 180 | \$500 | \$90,000 |
| Análisis de Turbiedad | 180 | \$500 | \$90,000 |
| Análisis de OD | 180 | \$250 | \$45,000 |

| | | | |
|--|-----|---------|---------------------|
| Análisis de POR | 180 | \$250 | \$45,000 |
| Análisis de DQO | 45 | \$1,050 | \$47,250 |
| HI23754C-25 Viales para DQO rango bajo (Caja 25 piezas) | 2 | \$1,125 | \$2,250 |
| HI23754C-25 Viales para DQO rango medio (Caja 25 piezas) | 2 | \$1,125 | \$2,250 |
| HI23754C-25 Viales para DQO rango alto (Caja 25 piezas) | 1 | \$1,125 | \$1,125 |
| TOTAL | | | \$533,935.00 |
| Gastos adsorbidos por el Laboratorio de Tecnologías del Agua. | | | |

8. RESULTADOS

8.1 Estabilización del SBR

Se presentan los valores promedio (\pm DE) de las concentraciones de entrada y salida del reactor SBR, durante la fase de estabilización.

Tabla 7. Características de entrada y salidas del agua residual en el SBR. Fuente: Elaboración propia

| Caracterización del agua residual en el reactor SBR | | | | |
|---|--------------------|---------------------|--------|------|
| | Entrada | Salida | LMP | Ref. |
| pH (UpH) | 8.0 \pm 0.4 | 8.2 \pm 0.4 | 6 a 9 | A |
| Temperatura (°C) | 25.1 \pm 4.9 | 27.2 \pm 3.0 | 35.0 | A |
| CE (μ s/cm) | 390.9 \pm 92.4 | 391.3 \pm 65.3 | 1000.0 | B |
| SDT (ppm) | 196.2 \pm 46.9 | 200.7 \pm 48.5 | 1000.0 | F |
| Turb (UNT) | 50.6 \pm 44.3 | 40.5 \pm 38.7 | 15.0 | C |
| Color (UC) | 1440.6 \pm 535.6 | 1578.7 \pm 1244.7 | 10.0 | E |
| OD (mg/L) | 5.1 \pm 2.6 | 5.4 \pm 3.4 | 6 a 9 | A |
| POR (mV) | 80.4 \pm 59.9 | 9.6 \pm 86.0 | 35.0 | A |
| NOM-001-SEMARNAT-2021 (A CE-CCA-001/89 (B); NADF-003-AGUA-2002 (C); Gerónimo (2022) POR (+) aerobio, POR (-) anaerobio (D); LFDDAMAN 2024 (E), NOM-127-SSA1-2021 (F). | | | | |

8.2 Comportamiento de las especies

En la siguiente tabla se presentan las diferentes especies y su comportamiento en los trenes de tratamiento, cabe de mencionar que la especie *Sagittaria lancifolia* que fue colocada en HAFL-T2 y HAFS-T3 presenta una diferencia en su crecimiento, en el caso particular del HAFL-T2 se sembraron 4 especies teniendo al final un éxito de 24 individuos, a diferencia del HAFS-T3 en el cual solo se obtuvieron 18 individuos, teniendo una diferencia mínima. Para el caso de la especie *Potenderia sagittata* esta fue sembrada en los HAFS-T2 y HAFL-T3 teniendo un comportamiento similar este en su crecimiento en ambos reactores, ya que para el caso específico del HAFS-T2 se desarrollaron 21 individuos al final del estudio y en el caso del HAFL-T3 solo se desarrollaron 20 individuos, otra de las características importantes es que en su crecimiento, la especie *Potenderia*

sagittata tiene mayor biomasa en el HAFS-T2, de igual forma la especie *Sagitaria lancifolia* en el HAFS-T3.

Tabla 8. Comportamiento de especies en los trenes de tratamiento (N=4). Fuente: Elaboración propia.

| Parámetro | HAFL-T2 | | HAFS-T2 | | HAFL-T3 | | HAFS-T3 | |
|---------------------|----------------------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|----------------------|---------------|
| | <i>S. lancifolia</i> | | <i>P. Sagittata</i> | | <i>P. Sagittata</i> | | <i>S. lancifolia</i> | |
| Tipo | | | | | | | | |
| Etapa | Inicial | Final | Inicial | Final | Inicial | Final | Inicial | Final |
| No. de especie | 4 | 24 | 4 | 21 | 4 | 20 | 4 | 18 |
| Largo raíz (cm) | 25.3 ± 9.5 | 88.3 ± 38.8 | 33.3 ± 2.1 | 88.3 ± 35.5 | 27.7 ± 6.1 | 119.3 ± 17.9 | 29.3 ± 8.4 | 55.0 ± 37.7 |
| | 1.0 ± 0.0 | 3.3 ± 1.5 | 1.0 ± 0.0 | 3.7 ± 2.1 | 1.0 ± 0.0 | 3.7 ± 0.6 | 1.0 ± 0.0 | 4.3 ± 3.2 |
| Largo tallo (cm) | 38.7 ± 11.8 | 30.3 ± 3.1 | 63.7 ± 40.2 | 16.8 ± 4.6 | 51.0 ± 3.0 | 28.3 ± 9.8 | 36.4 ± 12.9 | 16.3 ± 3.2 |
| | 2.0 ± 1.0 | 2.7 ± 0.6 | 2.0 ± 0.0 | 1.2 ± 0.7 | 3.0 ± 0.0 | 2.7 ± 0.6 | 2.0 ± 0.0 | 0.8 ± 0.6 |
| Largo de hoja (cm) | 19.0 ± 3.6 | 145.3 ± 22.4 | 11.0 ± 4.6 | 83.2 ± 34.3 | 24.7 ± 4.2 | 146.7 ± 20.8 | 7.7 ± 1.5 | 97.7 ± 12.5 |
| | 5.3 ± 1.5 | 0.7 ± 0.6 | 9.0 ± 1.7 | 1.0 ± 1.0 | 7.0 ± 1.0 | 1.0 ± 1.0 | 7.0 ± 2.0 | 1.0 ± 1.7 |
| Número de hojas | 7.7 ± 1.2 | 6.0 ± 1.0 | 12.3 ± 2.5 | 3.3 ± 2.5 | 7.7 ± 2.1 | 6.7 ± 0.6 | 6.3 ± 1.5 | 11.0 ± 11.4 |
| | 1.3 ± 1.5 | 256.7 ± 109.7 | 0.3 ± 0.6 | 10.7 ± 11.6 | 0.7 ± 1.2 | 4.7 ± 0.6 | 0.3 ± 0.6 | 9.3 ± 7.6 |
| Peso de planta (gr) | 383.3 ± 317.5 | 88.3 ± 38.8 | 573.3 ± 145.0 | 606.3 ± 423.0 | 443.3 ± 248.3 | 219.7 ± 109.7 | 243.3 ± 225.0 | 660.0 ± 520.0 |

8.3 Aforo

8.3.1 Gastos de operación del sistema

En este experimento, el aforo presente corresponde al gasto total de operación del sistema diario, durante el proceso se obtuvieron valores de caudal máximo ($Q_{\text{máx}}$) de 0.14 m³/d, el mínimo ($Q_{\text{mín}}$) de 0.11 m³/d, presentándose al inicio de operaciones el Q_{max} y este mantiene constante sobre los siguientes días por las condiciones controlada de operación del sistema.

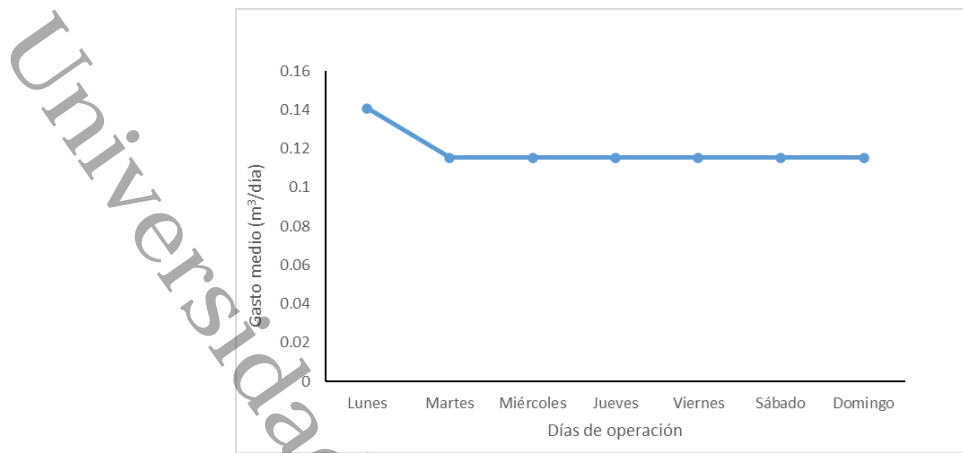


Figura.2. Gastos de operación del sistema de tratamiento. Fuente: Elaboración propia.

8.4 Calidad del agua en el sistema

8.4.1 Potencial de hidrogeno y Temperatura

La prueba de Kruskal-Wallis para pH (UpH) ($P < 0.05$), indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Se encontró que el tratamiento con mediana más baja se presenta en el tratamiento FSPs-T3 con $6.8 \pm (\text{RI})$ ($Q1 = 6.71782$, $Q3 = 7.82183$) UpH, seguido de Esed con $6.9 \pm (Q1 = 6.9, Q3 = 7.2)$ y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en el tratamiento FSC-T1 con $7.5 \pm (Q1 = 7.3, Q3 = 7.7)$. Así mismo para Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ($P < 0.05$), esta prueba indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Se encontró que el tratamiento con mediana más baja se presenta en el tratamiento FLC-T1 con $23.4 \pm (\text{RI})$ ($Q1 = 21.5247$, $Q3 = 24.1$) $^{\circ}\text{C}$, seguido de FSC-T1 con $23.5 \pm (Q1 = 22.7178, Q3 = 24.7)$ y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en el Arr con $25.7 \pm (Q1 = 25.0, Q3 = 26.0)$.

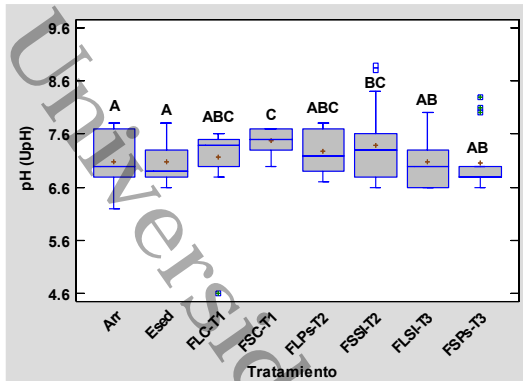


Figura 3.- Valores medianos ($\pm Q1, Q3$) para la variable pH (UpH) (N=15). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas. Fuente: Creación propia.

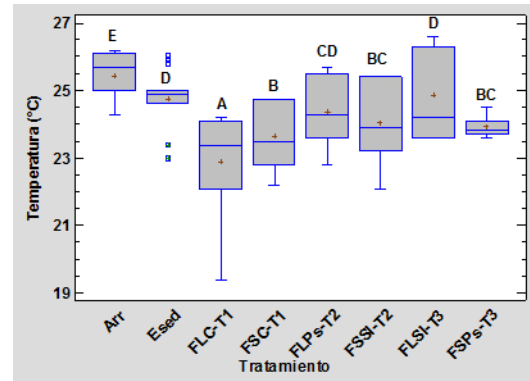


Figura 4.- Valores medianos ($\pm Q1, Q3$) para la variable Temperatura ($^{\circ}C$) (N=45). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas. Fuente: Creación propia.

8.4.2 Conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales

La prueba de Kruskal-Wallis para CE ($\mu s/cm$) ($P < 0.05$), indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Se encontró que los tratamientos con las medianas más bajas se presentan en Arr y Esed con $290 \pm (RI)$ ($Q1 = 280.0$ (Arr) $Q1 = 290.0$ (Esed), $Q3 = 379.611$ (Arr) $Q3 = 380.0$ (Esed)) $\mu s/cm$, seguido de FLC-T1 con $480.0 \pm (Q1 = 470.0, Q3 = 494.931)$ y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en el FSPs-T3 con $690.0 \pm (Q1 = 640.0, Q3 = 750.0)$. Para SDT (ppm) ($P < 0.05$) esta prueba indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Se encontró que los tratamientos con las medianas más bajas se presentan en Arr y Esed con $130.0 \pm (RI)$ ($Q1 = 130, Q3 = 170.0$) ppm, seguido de FLC-T1 con $220.0 \pm (Q1 = 210.0, Q3 = 241.465)$ y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en el FSPs-T3 con $310.0 \pm (Q1 = 290.0, Q3 = 368.764)$.

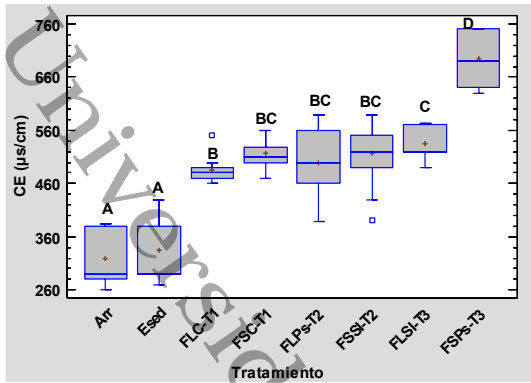


Figura 5.- Valores medianos ($\pm Q1, Q3$) para la variable CE ($\mu s/cm$) (N=15). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas. Fuente: Creación propia

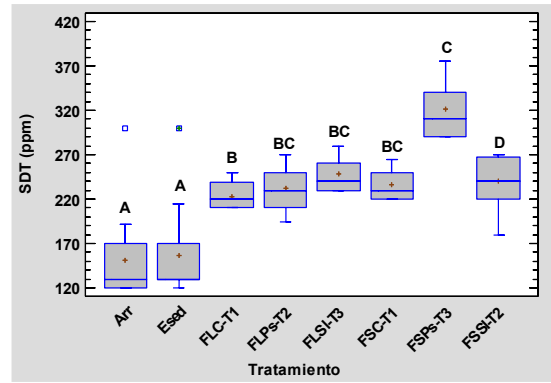


Figura 6.- Valores medianos ($\pm Q1, Q3$) para la variable SDT (ppm) (N=15). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas. Fuente: Creación propia

8.4.3 Turbiedad y Color

La prueba de Kruskal-Wallis para Turbiedad (UNT) ($P < 0.05$), indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Se encontró que los tratamientos con las medianas más bajas se presentan en el tratamiento FSPs-T3 con $4.4 \pm (RI)$ ($Q1 = 4.1, Q3 = 21.662$) UNT, seguido de FSSI-T2 con $8.3 \pm (Q1 = 6.5, Q3 = 22.6615)$ y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en Arr con $28.4 \pm (Q1 = 28.0778, Q3 = 29.1)$. Para Color (UC) ($P < 0.05$) esta prueba indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Se encontró que el tratamiento con mediana más baja se presenta en FSPs-T3 con $293.0 \pm (RI)$ ($Q1 = 174.915, Q3 = 484.683$) UC, seguido del tratamiento FLPs-T2 con $333.0 \pm (Q1 = 244.276, Q3 = 567.074)$ y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en FLC-T1 con $1367.0 \pm (Q1 = 1056.61, Q3 = 1525.52)$.

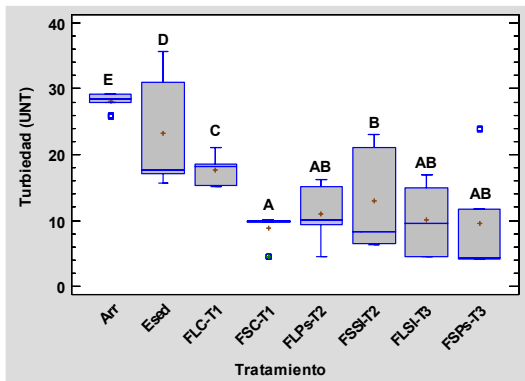


Figura 7.- Valores medianos ($\pm Q1, Q3$) para la variable Turbiedad (UNT) (N=45). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas. Fuente: Creación propia.

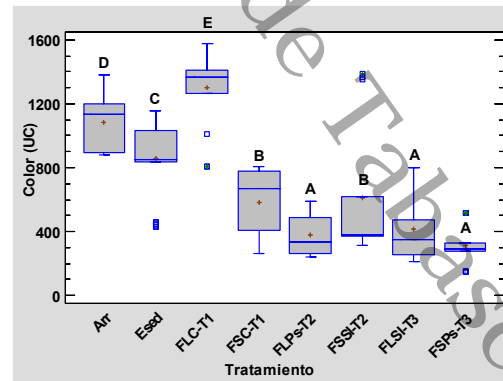


Figura 8.- Valores medianos ($\pm Q1, Q3$) para la variable Color (UC) (N=45). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas. Fuente: Creación propia.

8.4.4 Oxígeno disuelto y potencial oxido reducción

La prueba de Kruskal-Wallis para OD (mg/L) ($P < 0.05$), indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Se encontró que el tratamiento con mediana más baja se presenta en FSPs-T3 con $1.3 \pm$ (RI) ($Q1= 1.11782$, $Q3= 1.6$) mg/L, seguido de los tratamientos FLPs-T2 y FLSI-T3 con $1.5 \pm$ ($Q1= 1.31782$ (FLPs-T2) $Q1= 1.3$ (FLSI-T3), $Q3= 1.6$) y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en Arr con $2.4 \pm$ ($Q1=2.4$, $Q3=2.4$). Para POR (mV) ($P < 0.05$), esta prueba indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Se encontró que el tratamiento con mediana más baja se presenta en FLPs-T2 con $-27.0 \pm$ (RI) ($Q1=-100.971$, $Q3=35.5458$) mV, seguido del tratamiento FLSI-T3 con $-32.0 \pm$ ($Q1= -211.149$, $Q3= 46.0803$) y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en Arr con $24.0 \pm$ ($Q1= 21.0$, $Q3= 91.6109$).

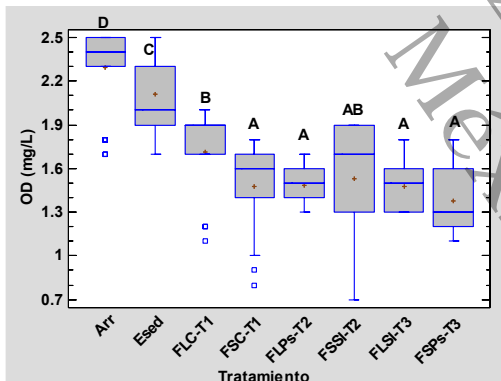


Figura 9.- Valores medianos ($\pm Q1$, $Q3$) para la variable OD (mg/L) ($N=45$).

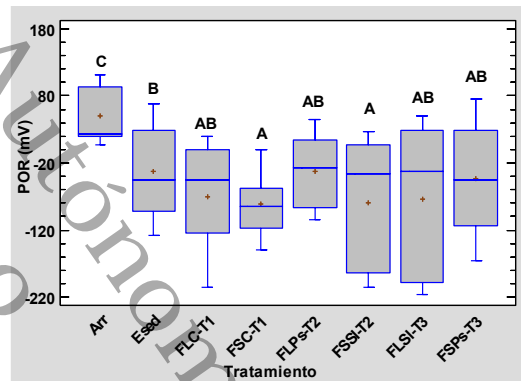


Figura 10.- Valores medianos ($\pm Q1$, $Q3$) para la variable POR (mV) ($N=45$).

Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas. Fuente: Creación propia

8.4.5 Demanda química de oxígeno

La prueba de Kruskal-Wallis para DQO (mg/L) ($P < 0.05$), indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Se encontró que el tratamiento con mediana más baja se presenta en FSPs-T3 con $16.0 \pm$ (RI) ($Q1=1.06901$, $Q3=37.0$) mg/L, seguido del tratamiento FSSI-T2 con $26.0 \pm$ ($Q1=7.78168$, $Q3=100.0$) y finalmente el valor mediano más alto se encuentra en Arr con $610.0 \pm$ ($Q1=600.0$, $Q3=711.0$).

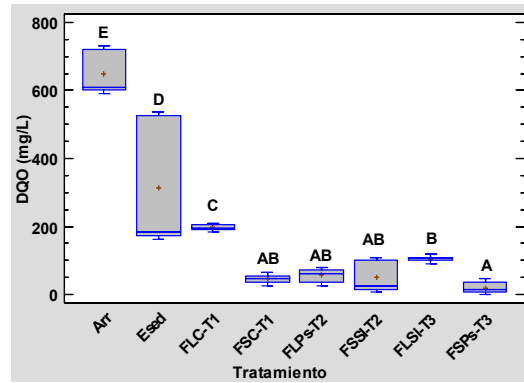


Figura 11.- Valores medianos (\pm Q1, Q3) para la variable DQO (mg/L) (N=45). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas. Fuente: Creación propia.

8.5 Cumplimiento ambiental en los tratamientos.

El cumplimiento ambiental en el tren 1 con humedales FLC-T1 y FSC-T1, se puede observar que los parámetros DQO, POR, OD, Color, Turbiedad, SDT, CE, Temperatura y pH, cumplen con los criterios de referencia siendo el FSC-T1 el tratamiento que mejor funcionamiento ha presentado.

Tabla 9. Cumplimiento ambiental en el tren 1

| Parámetros | Arr | | Esed | | FLC-T1 | | FSC-T1 | | LMP | Ref. |
|------------------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|------|
| | X | DE | X | DE | X | DE | X | DE | | |
| pH (UpH) | 7.1 | 0.5 | 7.1 | 0.3 | 7.2 | 0.7 | 7.5 | 0.2 | 6 a 9 | A |
| Tem (°C) | 25.4 | 0.7 | 24.7 | 0.9 | 22.9 | 1.5 | 23.6 | 1.0 | 35.0 | A |
| CE (μ s/cm) | 318.9 | 53.0 | 333.6 | 61.9 | 484.6 | 21.5 | 516.9 | 26.9 | 1000.0 | B |
| SDT (ppm) | 147.5 | 28.9 | 152.8 | 36.3 | 223.3 | 14.8 | 236.7 | 18.0 | 1000.0 | F |
| Turb (UNT) | 28.2 | 1.2 | 23.2 | 8.3 | 17.7 | 2.3 | 8.9 | 2.2 | 15.0 | C |
| Color (UC) | 1086.3 | 189.3 | 860.8 | 246.5 | 1298.6 | 242.6 | 585.6 | 220.8 | 10.0 | E |
| OD (mg/L) | 2.3 | 0.3 | 2.1 | 0.3 | 1.7 | 0.3 | 1.5 | 0.3 | 5.0 | B |
| POR (mV) | 50.9 | 42.0 | -32.3 | 72.1 | -70.4 | 84.2 | -80.6 | 50.9 | NA | D |
| DQO (mg/L) | 648.4 | 61.9 | 315.2 | 179.2 | 197.0 | 8.8 | 47.8 | 12.4 | 150.0 | A |

NOM-001-SEMARNAT-2021 (A); CE-CCA-001/89 (B); NADF-003-AGUA-2002 (C); Gerónimo (2022) POR (+) aerobio, POR (-) anaerobio (D); LFDDAMAN 2024 (E), NOM-127-SSA1-2021 (F).

El cumplimiento ambiental en el tren 2 con humedales FLPs-T2 y FSSI-T2, se puede observar que los parámetros DQO, POR, OD, Color, Turbiedad, SDT, CE, Temperatura y pH, cumplen con los criterios de referencia siendo el FSSI-T2 el tratamiento que mejor funcionamiento ha presentado.

Tabla 10. Cumplimiento ambiental en el tren 2

| Parámetros | Arr | | Esed | | FLPs-T2 | | FSSI-T2 | | LMP | Ref. |
|------------|--------|--------|-------|-------|---------|-------|---------|-------|--------|------|
| | X | DE | X | DE | X | DE | X | DE | | |
| pH (UpH) | 7.1 | 0.5 | 7.1 | 0.3 | 7.4 | 0.8 | 7.3 | 0.4 | 6 a 9 | A |
| Tem (°C) | 25.4 | 0.7 | 24.7 | 0.9 | 24.0 | 1.3 | 24.4 | 1.1 | 35.0 | A |
| CE (µs/cm) | 318.9 | 53.0 | 333.6 | 61.9 | 516.2 | 58.1 | 499.4 | 73.9 | 1000.0 | B |
| SDT (ppm) | 158.8 | 48.33 | 164.1 | 51.9 | 240.5 | 29.4 | 231.8 | 27.8 | 1000.0 | F |
| Turb (UNT) | 28.2 | 1.25 | 23.2 | 8.3 | 13.1 | 7.6 | 11.0 | 4.3 | 15.0 | C |
| Color (UC) | 1086.3 | 189.31 | 860.8 | 246.5 | 610.8 | 406.6 | 382.2 | 138.5 | 10.0 | E |
| OD (mg/L) | 2.3 | 0.28 | 2.1 | 0.3 | 1.5 | 0.4 | 1.5 | 0.1 | 5.0 | B |
| POR (mV) | 50.9 | 41.97 | -32.3 | 72.1 | -78.5 | 98.1 | -32.5 | 57.2 | NA | D |
| DQO (mg/L) | 648.4 | 61.94 | 315.2 | 179.2 | 49.6 | 43.4 | 57.4 | 19.2 | 150.0 | A |

NOM-001-SEMARNAT-2021 (A); CE-CCA-001/89 (B); NADF-003-AGUA-2002 (C); Gerónimo (2022) POR (+) aerobio, POR (-) anaerobio (D); LFDDAMAN 2024 (E), NOM-127-SSA1-2021 (F).

El cumplimiento ambiental en el tren 3 con humedales FLSI-T3 y FSPs-T3, se puede observar que los parámetros DQO, POR, OD, Color, Turbiedad, SDT, CE, Temperatura y pH, cumplen con los criterios de referencia siendo el FSPs-T3 el tratamiento que mejor funcionamiento ha presentado.

Tabla 11. Cumplimiento ambiental en el tren 3

| Parámetros | Arr | | Esed | | FLSI-T3 | | FSPs-T3 | | LMP | Ref. |
|------------|--------|--------|-------|-------|---------|-------|---------|-------|--------|------|
| | % | DE | % | DE | % | DE | % | DE | | |
| pH (UpH) | 7.1 | 0.5 | 7.1 | 0.3 | 7.1 | 0.5 | 7.1 | 0.6 | 6 a 9 | A |
| Tem (°C) | 25.4 | 0.7 | 24.7 | 0.9 | 24.9 | 1.4 | 23.9 | 0.3 | 35.0 | A |
| CE (µs/cm) | 318.9 | 53.0 | 333.6 | 61.9 | 534.7 | 27.4 | 694.1 | 51.9 | 1000.0 | B |
| SDT (ppm) | 147.5 | 28.87 | 152.8 | 36.3 | 248.2 | 18.8 | 321.0 | 33.8 | 1000.0 | F |
| Turb (UNT) | 28.2 | 1.25 | 23.2 | 8.3 | 10.1 | 5.3 | 9.6 | 8.0 | 15.0 | C |
| Color (UC) | 1086.3 | 189.31 | 860.8 | 246.5 | 418.6 | 217.6 | 313.4 | 123.7 | 10.0 | E |
| OD (mg/L) | 2.3 | 0.28 | 2.1 | 0.3 | 1.5 | 0.2 | 1.4 | 0.2 | 5.0 | B |
| POR (mV) | 50.9 | 41.97 | -32.3 | 72.1 | -73.3 | 115.5 | -43.7 | 88.5 | NA | D |
| DQO (mg/L) | 648.4 | 61.94 | 315.2 | 179.2 | 106.0 | 9.9 | 19.2 | 16.8 | 150.0 | A |

NOM-001-SEMARNAT-2021 (A); CE-CCA-001/89 (B); NADF-003-AGUA-2002 (C); Gerónimo (2022) POR (+) aerobio, POR (-) anaerobio (D); LFDDAMAN 2024 (E), NOM-127-SSA1-2021 (F)

8.6 Eficiencias de remoción de los tratamientos

Dentro de los parámetros medidos en el tren 1, se puede observar que la eficiencia total de proceso fue de 92.6% para DQO, presentando una mayor eficiencia el FSC-T1 (84.8 %) en comparación con el FLC-T1 (37.5 %). En color y Turbiedad se tiene una eficiencia total de proceso de 46.1% y 68.4%, teniendo mejor eficiencia nuevamente el FSC-T1 (32.0%, 61.6%) que el FLC-T1 (-50.9%, 23.9%). Para el caso del OD se tiene una ganancia del 35.8%, esto debido principalmente a las algas que se desarrollan en el FSC-T1.

Tabla 12. Eficiencias de remoción del Tren 1.

| Eficiencias de remoción | | | | |
|-------------------------|----------|------------|------------|---------|
| Parámetros | Esed (%) | FLC-T1 (%) | FSC-T1 (%) | ETP (%) |
| pH (UpH) | 0.0 | -1.1 | -5.6 | -5.6 |
| Tem (°C) | 2.8 | 7.5 | 4.4 | 7.1 |
| CE (µs/cm) | -4.6 | -45.3 | -55.0 | -62.1 |
| SDT (ppm) | -3.6 | -46.1 | -54.9 | -60.5 |
| Turb (UNT) | 17.6 | 23.9 | 61.6 | 68.4 |
| Color (UC) | 20.8 | -50.9 | 32.0 | 46.1 |
| OD (mg/L) | 7.8 | 18.9 | 30.3 | 35.8 |
| POR (mV) | 163.4 | -118.2 | -149.8 | 258.2 |
| DQO (mg/L) | 51.4 | 37.5 | 84.8 | 92.6 |

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

Dentro de los parámetros medidos en el tren 2, se observa que la eficiencia total de proceso fue de 91.1% para DQO, siendo el FLPs-T2 con mayor eficiencia (84.3%) en comparación con el FSSI-T2 (81.8%). En color y Turbiedad se tiene una eficiencia total de proceso de 64.8% y 60.9%, teniendo mejor eficiencia el FSSI-T2 (55.6%, 52.5%) que el FLPs-T2 (29.0%, 43.7%). Para el caso del OD se tiene una ganancia del 35.2%, esto debido principalmente a las algas que se desarrollan en el FSSI-T2.

Tabla 13. Eficiencias de remoción del Tren 2.

| Eficiencias de remoción | | | | |
|-------------------------|----------|-------------|-------------|---------|
| Parámetros | Esed (%) | FLPs-T2 (%) | FSSI-T2 (%) | ETP (%) |
| pH (UpH) | 0.00 | -4.2 | -2.8 | -2.8 |
| Tem (°C) | 2.78 | 2.8 | 1.5 | 4.2 |
| CE (µs/cm) | -4.60 | -54.7 | -49.7 | -56.6 |
| SDT (ppm) | -3.36 | -46.5 | -41.2 | -46.0 |
| Turb (UNT) | 17.64 | 43.7 | 52.5 | 60.9 |
| Color (UC) | 20.76 | 29.0 | 55.6 | 64.8 |
| OD (mg/L) | 7.85 | 27.4 | 29.7 | 35.2 |
| POR (mV) | 163.35 | -143.2 | -0.6 | 163.7 |
| DQO (mg/L) | 51.39 | 84.3 | 81.8 | 91.1 |

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

Dentro de los parámetros medidos en el tren 3, se observa que la eficiencia total de proceso fue de 97.0% para DQO, siendo el FSPs-T3 con mayor eficiencia (93.9%) en comparación con el FLSI-T3 (66.4%). En color y Turbiedad se tiene una eficiencia total de proceso de 71.2% y 65.8%, teniendo mejor eficiencia el FSPs-T3 (63.3%, 58.4%) que el FLSI-T3 (51.4%, 56.2%). Para el caso del OD se tiene una ganancia del 40.1%, esto debido principalmente a las algas que se desarrollan en el FSPs-T3.

Tabla 14. Eficiencias de remoción del Tren 3.

| Eficiencias de remoción | | | | |
|-------------------------|----------|-------------|-------------|---------|
| Parámetros | Esed (%) | FLSI-T3 (%) | FSPs-T3 (%) | ETP (%) |
| pH (UpH) | 0.00 | 0.2 | 0.3 | 0.3 |
| Tem (°C) | 2.78 | -0.5 | 3.3 | 5.9 |
| CE (µs/cm) | -4.60 | -60.3 | -108.1 | -117.6 |
| SDT (ppm) | -3.62 | -62.4 | -110.1 | -117.7 |
| Turb (UNT) | 17.64 | 56.2 | 58.4 | 65.8 |
| Color (UC) | 20.76 | 51.4 | 63.6 | 71.2 |
| OD (mg/L) | 7.85 | 30.0 | 35.0 | 40.1 |
| POR (mV) | 163.35 | -127.1 | -35.3 | 185.7 |
| DQO (mg/L) | 51.39 | 66.4 | 93.9 | 97.0 |

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

9. DISCUSIONES

9.1 Desarrollo y comportamiento de las especies

Al inicio de la investigación se sembraron 4 individuos de cada especie, la especie *S. lancifolia* colocada en los humedales HAFL-T2 y HAFS-T3 presentó diferencias en su crecimiento y como consecuencia en el desarrollo de su biomasa con 383.3 g y 243.3 g respectivamente, esto debido a que no presentó un crecimiento y reproducción significativo al encontrarse en un espacio limitado, ya que Gallegos (2017) reportó que la especie *S. lancifolia* alcanza una longitud de tallo de 145.7 cm, mientras que para el HAFL-T2 en este experimento alcanzó 30.3 cm y en el HAFS-T3 16.3 cm. Para el caso de *P. sagittata* estas fueron sembradas en HAFS-T2 y HAFL-T3 las cuales tuvieron un comportamiento similar en su etapa final en ambos reactores con 606.3 g y 219.7 g en el desarrollo de su biomasa respectivamente. Así mismo, Romellón (2022) reportó que la especie *P. sagittata* alcanza alturas de 1.29 m a 1.37 m y largos de hoja de entre 33.53 cm a 36.21 cm, mientras que en este experimento se alcanzaron longitudes de tallo de 16.8 cm y 28.3 cm para los humedales HAFS-T2 y HAFL-T3 respectivamente, esto ratifica que el tamaño del reactor o humedal limita el crecimiento de las plantas, pues al estar en un recipiente de menor volumen se limita la cantidad de nutrientes en los mismos para que sean aprovechados por las especies.

Aunque las plantas reportadas por Gallegos (2017) y Romellón (2022) son reportadas para la misma zona geográfica tropical las condiciones de los reactores

influyen en la cantidad de volumen y masa de las aguas presentes, la cual limita el crecimiento de las plantas.

9.2 Tiempo de retención hidráulico

Es importante mencionar que en el sistema de tratamiento implementado el TRH del SBR es de 8 horas, los tanques sedimentadores operaron con 4 horas y finalmente el TRH de todo el sistema de humedales es de 1.12 días, cabe mencionar que los humedales en este sentido funcionan como un tratamiento terciario es por ello que no cuentan con los tiempos de retención como comúnmente se dimensionan para tratamientos secundarios, los cuales son 6.5 días para flujo libre y 3 a 5 días para flujo subsuperficial.

9.3 Calidad del agua en los efluentes

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

El valor de pH en los tratamientos tiende a la neutralidad, teniendo valores promedio de 7.2 UpH, cumpliendo con la NOM-001-SEMARNAT-2021 que establece de 6 a 9 UpH. Jiménez (2014), utilizando las especies *Thalia geniculata* y *Paspalum paniculatum*, obtuvo rangos de entre 7.4 y 7.7 UpH.

En cuanto a la temperatura se presentaron valores por debajo del LMP establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021 la cual es de 35.0°C. Los valores presentados en los tratamientos se encuentran dentro del rango de 22.9-25.4°C, estos valores son similares a lo presentado por Rodas-López (2020), que implementó un HAFS con la especie *Enydra sessilifolia* y cual alcanzó valores promedios de 25 a 30 °C. Cabe destacar que estas temperaturas favorecen el crecimiento de microorganismos mesófilos, que degradan la materia orgánica (Kadlec y Wallace, 2009).

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

La CE muestra impurezas ya que cuando se presenta una conductividad elevada esta indica principalmente la existencia de sales disueltas, que afectan la calidad del agua y también influyen en la biota acuática (Rodas-López 2020). Los tratamientos FSC-T1 con 516.9±26.9 µs/cm, FLPs-T2 (516.2±58.1 9 µs/cm) y FSPs-T3 (534.7±27.4 9 µs/cm) son los valores más bajos reportados, lo que permite

cumplir con las referencias de CE-CCA-001/89, la cual establece valores de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para su uso en riego agrícola. Javier (2020), en la fase de estabilización utilizando la especie *Cyperus odoratus* presentó valores de 1575.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 1670.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en humedal de flujo subsuperficial.

En cuanto a los SDT, los tratamientos de mejor remoción son FSC-T1 con 236.6 ppm, FLPS-T2 con 240.5 pmm y 321.0 pmm para FSPs-T3. Estos valores obtenidos cumplen con las especificaciones de la NOM-127-SSA1-2021, la cual establece valores de 1000 ppm, aunque está siendo una norma establecida en concentraciones para el uso y consumo humano, puede tomarse de referencia para aguas tratadas en el caso de SDT.

Cuanto mayor sea la concentración de los SDT mayor será la conductividad, esto es debido a que en soluciones acuosas este valor es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos (Rodas-López 2020).

Turbiedad (UTN) y Color (UC)

La turbiedad (materia en suspensión y coloidal), en el efluente tratado se refiere al plancton y otros organismos microscópicos, y son asociados con una menor eliminación de patógenos (Romellón-Cerino 2022). La turbiedad en los efluentes alcanzaron valores de 8.9 a 11.0 UNT, lo que permitió tener eficiencias de remoción de 52.5% a 61.6%, para el caso del color se presentaron concentraciones de 313.4 UC a 585.6 UC, permitiendo tener eficiencias de remoción de 32.0% a 63.6%. De acuerdo con García & Corzo (2008) el color se relaciona principalmente con la presencia de sólidos en suspensión en el agua residual dentro de los HA.

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

Para el caso del OD los tratamientos en nuestro experimento mostraron valores promedio de 1.5 mg/L, mientras que Javier (2020), utilizando HAFS presentó valores de 5.91 mg/L y 5.3 mg/L en su fase de estabilización, en este proyecto no cumplen con las especificaciones que establece la CE-CCA-001/89, con valores de 5 mg/L.

Los valores de POR negativos (-) indican que sus condiciones son anaerobias (Gerónimo 2022). Es por ello que al obtenerse en promedio valores de POR entre -80.6 mV y 50.9 mV en los tratamientos evaluados, claramente se puede identificar que los tratamientos Esed, FLC-T1, FSC-T1, FLPs-T2, FSSI-T2, FLSI-T3 y FSPs-T3 presentan valores negativos, por lo tanto cuentan con condiciones anaerobias, siendo el Arr el único con valores positivos, esto se debe a que microorganismos son los encargados de alterar las condiciones del potencial de óxido-reducción al ser los principales responsables de llevar a cabo las reacciones de óxido-reducción convirtiendo los contaminantes asimilables para las plantas (CONAGUA, 2015).

Demanda química de oxígeno (mg/L)

Según la NOM-001-SEMARNAT-2021 el límite máximo permisible es de 150.0 mg/L para infiltración y uso público. La DQO en este proyecto fue de 47.8 mg/L, 49.6 mg/L y 19.2 mg/L en los humedales FSC-T1, FLPs-T2 y FSPs-T3 respectivamente, alcanzando eficiencias de remoción del 84.8%, 84.3% y 93.9% en el FSC-T1, FLPs-T2 y FSPs-T3 respectivamente, dichos valores se comportan de manera similar a lo reportado por Núñez et al., (2019) el cual evaluó un HA con aguas residuales domesticas utilizando especies *Zantedeschia aethiopica* y *Eichhornia crassipes*, alcanzando valores de 92% en la remoción de la DQO.

De igual forma se obtuvieron eficiencias totales de proceso de 92.6%, 91.1% y 97.0% para los trenes 1, 2 y 3 respectivamente.

10. CONCLUSIONES

Los humedales artificiales en serie con las configuraciones Libre-Subsuperficial y Subsuperficial-Libre utilizando las especies macrófitas *Pontederia sagittata* y *Sagittaria lancifolia* son viables en la fitodepuración de aguas residuales domésticas, ya que estas presentaron una buena adaptación y estabilización logrando una reproducción temprana siendo de esta forma viable para los humedales en reactores de tratamiento secundario y terciario.

La calidad de agua obtenida en estos humedales cumple perfectamente con los LMP establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021 la cual es de 150 mg/L para la infiltración y otros riegos para DQO, así mismo estas cumplen con la temperatura y pH.

En el proceso de operación los trenes de tratamiento 1, 2 y 3 lograron eficiencias totales de proceso en la remoción de 68.4%, 60.9%, 65.8% en turbiedad, 46.1%, 64.8%, 71.2% en color y 92.6%, 91.1%, 97.0% en DQO, respectivamente, teniendo un caudal máximo ($Q_{\text{máx}}$) de operación de 0.14 m³/d y un TRH de 27 horas.

Con este experimento se corrobora que el tamaño de los reactores influye significativamente en la morfología de la planta, debido a que el volumen limita la disponibilidad de nutrientes para el crecimiento de estas.

11. LITERATURA CITADA

- Akula, L.K., Gaddam, V.B., Damaraju, M., Bhattacharyya, D. y Kurilla, K.K. (2021). Tratamiento de aguas residuales domésticas en un proceso acoplado de reactor discontinuo-reactor electroquímico. Investigación sobre el medio ambiente acuático, 93 (6), 953-967.
- Alarcón, M. E. H. (2016, 6 octubre). Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México. Hernández Alarcón | RINDERESU. <http://www.rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/16/32>
- Al-Rekabi, W. S., & Abbas, S. A. (2021). Biological Treatment for Domestic Wastewater by SBR Combined With Coarse Filter. *International Journal of Latest Transactions in Engineering And Science (IJLTES)*, 11(4).
- Casierra-Martínez, H., Casalins-Blanco, J., Vargas-Ramírez, X., & Caselles-Osorio, A. (2016). Desinfección de agua residual doméstica mediante un sistema de tratamiento acoplado con fines de reúso. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(4), 97-111. Recuperado en 21 de septiembre de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000400097&lng=es&tlng=es.
- Cazares-Palacios, I. M., Valdés-García, K. P., & Arce, A. D. (2021). Estrategias de las mujeres del noreste de México para la sostenibilidad de la vida frente a la escasez del agua. *Región y sociedad*, 33.
- Chavan, R., & Mutnuri, S. (2021). Domestic wastewater treatment by constructed wetland and microalgal treatment system for the production of value-added products. *Environmental technology*, 42(21), 3304-3317.
- CONAGUA (2015) Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales artificiales. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. México. 134p. Libro 30. Consultado el 15 de mayo de 2025 de: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas>

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

Cusiche-Pérez, L.F., & Miranda-Zambrano, G.A. (2019). Contaminación por aguas residuales e indicadores de calidad en la reserva nacional 'Lago Junín', Perú. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(6), 1433-1447. Epub 02 de octubre de 2020. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.1870>

Dautan, R., Pérez, M. L., Contreras, A., Marzana, A., Rincones, B., El Trigal Centro, C. P. N., & Valencia, E. C. (1988). Diseño y construcción de un reactor discontinuo secuencial para remoción de DBO. In *Ponencia presentada en el XXVI Congreso Interamericano de AIDIS, Lima, Perú. Recuperada de <https://docobook.com/diseo-y-construccion-de-un-reactor-discontinuo-secuencial.html>*.

DOF, Diario Oficial de la Federación. (2021). NOM-127-SSA1-2021. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Diario Oficial de la Federación.

Gallegos-Rodríguez, J. (2017). Tratamiento de aguas residuales domesticas en humedales artificiales de flujo libre con *Sagittaria latifolia* y *Sagittaria lancifolia*. (Tesis de Maestría, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas).

García, J. & 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.

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).

- Jafarinejad, S. (2017). Recent developments in the application of sequencing batch reactor (SBR) technology for the petroleum industry wastewater treatment. *Chemistry International*, 3(3), 2410-9649. <https://doi.org/10.31221/osf.io/fu27y>
- Javier-Rodríguez, L. M. (2020). *Cyperus odoratus* en el tratamiento de agua residual doméstica en un humedal de flujo subsuperficial (Tesis de licenciatura. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas).
- Jiménez-López, E. del C. (2014). Humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales. (Tesis de Maestría, Colegio de postgraduados institución de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas, campus tabasco). <https://www.repositorionacionalcti.mx/recurso/oai:colposdigital.colpos.mx:10521/2575>
- Kadlec, R. H., y Wallace, S. (2009). *Treatment wetlands*. Second edition. Boca Raton: CRC Press Taylor & 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
- Londoño-Cardona, L. A., & Marín-Vanegas, C. (2009). Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética (Doctoral dissertation, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Tecnología Química).
- López-Ocaña, G., Estrada-Pérez, N., Aguilar-Pérez, G., Alonso-Mendoza, E. C., & Torres-Balcázar, C. A. (2023). Degradación de contaminantes en humedales artificiales en serie con especies macrófitas del trópico húmedo. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 12(24), 19-48.

- Magaña-Flores, A., & López-Ocaña, G. (2023). Domestic wastewater treated with *Sagittaria latifolia* in constructed wetlands. *Dyna*, 90(226), 27-35.
- Magaña-Flores, A., López-Ocaña, G., & Romellón-Cerino, M. J. (2022). Kinetic behavior and modeling the space distribution of basic pollutants in a subsurface flow constructed wetlands with *Pontederia cordata*. *Renewable energy, biomass & sustainability*, 4(1), 1-13.
- Marín-Muñiz, J. L., Sandoval-Herazo, L. C., López-Méndez, M. C., Sandoval-Herazo, M., Meléndez-Armenta, R. Á., González-Moreno, H. R., & Zamora, S. (2023). Treatment Wetlands in Mexico for Control of Wastewater Contaminants: A Review of Experiences during the Last Twenty-Two Years. *Processes* 2023, 11, 359.
- Mei, X.-Q., Yang, Y., Fung-yee Tam, N., Wang, Y. w., & Li, L. (2014). Roles of root porosity, radial oxygen loss, Fe plaque formation on nutrient removal and tolerance of wetland plants to domestic wastewater. *Water Research*, 147-159
- Ng, J. Y., Wong, D. L., Kutty, S. R. M., & Jagaba, A. H. (2021). Organic and nutrient removal for domestic wastewater treatment using bench-scale sequencing batch reactor. *AIP Conference Proceedings* 2339(1).
- 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-AGUA2002.pdf>
- Núñez-Morales, E., Saboya-Rios, N., & Cruz-Huaranga, M. (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>
- Ortega-Gaucin, D. & Peña-García, A. (2016). Análisis crítico de las campañas de comunicación para fomentar la "cultura del agua" en México. Comunicación y sociedad, (26), 223-246. Recuperado en 21 de septiembre de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-252X2016000200223&lng=es&tlng=es.
- Peña, S., Mayorga, J., & Montoya, R. (2018). Propuesta de tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Yaguachi (Ecuador). Ciencia E Ingeniería, 39(2), 161-167. <http://bdigital2.ula.ve:8080/xmlui/handle/654321/366>
- Ramírez, J. S., Loaiza, D. C. R., & Asprilla, W. J. (2020). Humedales artificiales subsuperficiales: comparación de metodologías de diseño para el cálculo del área superficial basado en la remoción de la materia orgánica. Ingenierías USBmed, 11(1), 65-73. <https://doi.org/10.21500/20275846.4558>
- Ramírez-Cadavid, J. D. (2018). Evaluación del vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) y la elefanta (*Pennisetum purpureum*) en la caracterización de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Revista Científica En Ciencias Ambientales Y Sostenibilidad, 4(1). Recuperado a partir de <https://revistas.udea.edu.co/index.php/CAA/article/view/335340>
- Rivera-Sasso, O. (2017). Cinética de degradación de un agua residual sintética en un reactor discontinuo secuencial a escala laboratorio. (Tesis de licenciatura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas).
- Rodas-López, P. V. (2020). Remoción de contaminantes básicos en agua residual doméstica en humedal artificial de flujo subsuperficial con *Enydra sessilifolia* (Tesis de licenciatura. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas).

- Romellón-Cerino, M. J., Cocoltzi-Vázquez, E., & López-Ocaña, G. (2023). Tratamiento de aguas residuales domésticas de una institución educativa por un sistema de humedales artificiales en serie. *Universita Ciencia*, 11(30), 147-162.
- Romellón-Cerino, M. J., Estrada-Pérez, N., & López-Ocaña, G. (2022). Remoción y cinética de contaminantes básicos en humedales artificiales en serie. *Tendencias en energías renovables y sustentabilidad*, 1(1), 108-118.
- Romellón-Cerino, M. J., López-Ocaña, G., Reyes-Osorio, J., Romellón-Cerino, J. C., & Arias-Peregrino, V. M. (2022). Efecto de la poda de macrófitas sobre microorganismos adheridos al medio de soporte y la carga orgánica en humedales artificiales. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias: CIBA*, 11(21), 1.
- Sandoval Herazo, L.C., Marín-Muñiz, J.L., Alvarado-Lassman, A., Zurita, F., Marín-Peña, O., & Sandoval-Herazo, M. (2023). Humedales artificiales a gran escala plantados con especies ornamentales y PET como sustituto de medios filtrantes para el tratamiento de aguas residuales municipales: una experiencia en una comunidad rural mexicana. *Agua*, 15 (12), 2280.
- Santa Cruz, J. A., Scenna, N. J., & Mussati, M. C. (2018). Análisis Económico de un Proceso Basado en Reactores Discontinuos Secuenciales (SBR) para la Reducción de Nutrientes Biológicos de Aguas Residuales. *Revista Tecnología Y Ciencia*, (30), 152–160. Recuperado a partir de <https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/rtyc/article/view/148>
- Sierra-Pech, O. M. (2016). Eficiencia de remoción de un sistema experimental de humedal artificial de flujo libre y subsuperficial en el tratamiento de aguas residuales domésticas. Tesis de Maestría, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas).
- Sylla, A. (2020). Domestic wastewater treatment using vertical flow constructed wetlands planted with *Arundo donax*, and the intermittent sand filters impact. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 20(1), 48-58.

- Torres-Balcázar, C. A., López-Ocaña, G., Romellón-Cerino, M. J., Vázquez-González, M. B., & Comparán-Sánchez, L. E. (2020). Biomasa de origen vacuno en la remoción de contaminantes básicos en un reactor discontinuo secuencial. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 9(18), 1-32.
- Vargas, A.K.N., Calderón, J., Velásquez, D., Castro, M., & Núñez, D.A. (2020). Análisis de los principales sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales domésticas en Colombia. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 28(2), 315-322. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052020000200315>
- Zepeda-Gómez, C. y Lot, A. (2005). Distribución y uso tradicional de *Sagittaria macrophylla* Zucc. y *Sagittaria latifolia* Willd en el Estado de México. *Ciencia Ergo Sum*, 12(3). <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10412308>

12. ANEXOS FOTOGRAFICOS



Figura 12. Colecta de vegetación *Sagittaria lancifolia*



Figura 13. Colecta de vegetación *Pontederia sagittata*



Figura 14. Preparación del lodo bacteriano en el SBR



Figura 15. Colecta del estiércol porcino



Figura 16. Elaboración del agua reconstituida con desechos de comida



Figura 17. Elaboración del agua reconstituida



Figura 18. Análisis de DQO



Figura 19. Análisis de parámetros fisicoquímicos del agua residual

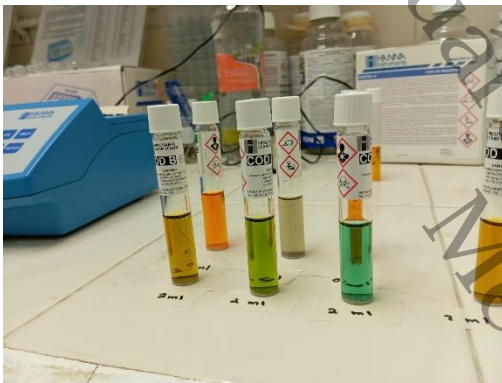


Figura 20. Viales de DQO analizados



Figura 21. Volumen de lodos generado durante el proyecto



Figura 22. Clarificación del agua residual tratada en el SBR

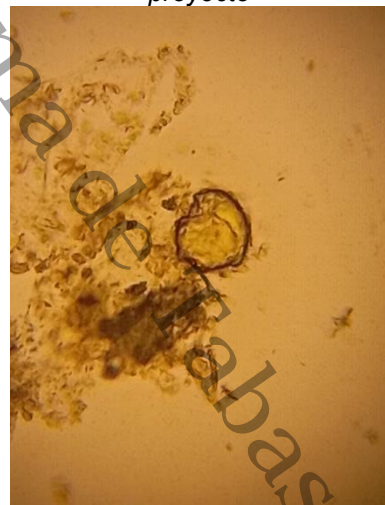


Figura 23. Colonias presentes en el lodo bacteriano

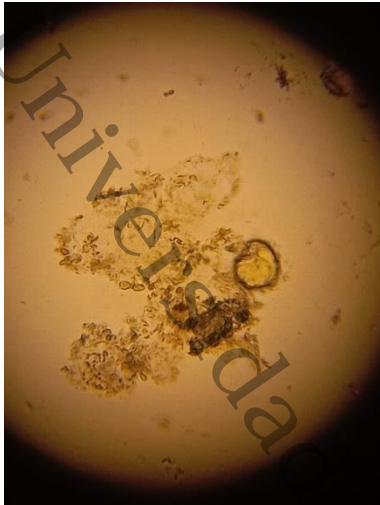


Figura 24. Microorganismos observados en el lodo bacteriano



Figura 25. Fauna presente en los humedales artificiales



Figura 26. Sistema experimental SBR-Humedales en serie



Figura 27. Fauna presente en el humedal artificial

13. ALOJAMIENTO DE TESIS

| | |
|-----------------------------|--|
| Título de la tesis: | TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ALTA CARGA EN UN SISTEMA EXPERIMENTAL SBR-HA EN SERIE |
| Autor de la tesis: | José Ignacio Martínez Santiago |
| ORCID: | https://orcid.org/0009-0001-7112-3388 |
| Resumen de la tesis: | Se evaluó la eficiencia de remoción de contaminantes básicos en un tren de tratamiento experimental híbrido con SBR-HA en serie tratando efluentes domésticos, utilizando macrófitas <i>Sagittaria lancifolia</i> y <i>Potenderia sagittata</i> . El sistema está integrado por un SBR, dos sedimentadores y tres trenes de humedales artificiales en serie, el primer tren consta de un humedal de flujo libre y flujo subsuperficial (testigos, sin especies), el segundo un flujo subsuperficial y flujo libre (<i>S. lancifolia</i> y <i>P. sagittata</i>) y tercer tren con flujo libre y subsuperficial (<i>P. sagittata</i> y <i>S. lancifolia</i>). Se comparó la morfología de las especies evaluadas y la calidad del agua tratada (pH, temperatura, SDT, CE, color, turbiedad, OD, POR y DQO). Las eficiencias de remoción alcanzadas fueron del 92.6%, 91.1%, 97.0% de DQO, 46.1%, 64.8%, 71.2% para Color, 68.4%, 60.9%, 65.8% para Turbiedad, esto en los 3 trenes de tratamiento respectivamente. La <i>Potenderia sagittata</i> es la especie con mayor adaptación y tolerancia. |
| Palabras Clave: | Cumplimiento ambiental, DQO, Eficiencia de remoción, Humedales Artificiales, SBR |
| Referencias Citadas: | <p>Akula, L.K., Gaddam, V.B., Damaraju, M., Bhattacharyya, D. y Kurilla, K.K. (2021). Tratamiento de aguas residuales domésticas en un proceso acoplado de reactor discontinuo-reactor electroquímico. Investigación sobre el medio ambiente acuático, 93 (6), 953-967.</p> <p>Alarcón, M. E. H. (2016, 6 octubre). Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México. Hernández Alarcón RINDERESU. http://www.rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/16/32</p> <p>Al-Rekabi, W. S., & Abbas, S. A. (2021). Biological Treatment for Domestic Wastewater by SBR Combined With Coarse Filter. <i>International Journal of Latest Transactions in Engineering And Science (IJLTES)</i>, 11(4).</p> <p>Casierra-Martínez, H., Casalins-Blanco, J., Vargas-Ramírez, X., & Caselles-Osorio, A. (2016). Desinfección de agua residual doméstica mediante un sistema de tratamiento acoplado con fines de reúso. <i>Tecnología y ciencias del agua</i>, 7(4), 97-111. Recuperado en 21 de septiembre de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000400097&lng=es&tlng=es.</p> <p>Cazares-Palacios, I. M., Valdés-García, K. P., & Arce, A. D. (2021). Estrategias de las mujeres del noreste de México para la sostenibilidad de la vida frente a la escasez del agua. <i>Región y sociedad</i>, 33.</p> <p>Chavan, R., & Mutnuri, S. (2021). Domestic wastewater treatment by constructed wetland and microalgal treatment system for the production of value-added products. <i>Environmental technology</i>, 42(21), 3304-3317.</p> <p>CONAGUA (2015) Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales artificiales. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. México. 134p. Libro 30. Consultado el 15 de mayo de 2025 de: https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas</p> <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>Cusiche-Pérez, L.F., & Miranda-Zambrano, G.A. (2019). Contaminación por aguas residuales e indicadores de calidad en la reserva nacional 'Lago Junín', Perú. <i>Revista mexicana de ciencias agrícolas</i>, 10(6), 1433-1447. Epub 02 de octubre de 2020. https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.1870</p> |

Dautan, R., Pérez, M. L., Contreras, A., Marzana, A., Rincones, B., El Trigal Centro, C. P. N., & Valencia, E. C. (1988). Diseño y construcción de un reactor discontinuo secuencial para remoción de DBO. In *Ponencia presentada en el XXVI Congreso Interamericano de AIDIS, Lima, Perú. Recuperada de <https://docobook.com/diseo-y-construccion-de-un-reactor-discontinuo-secuencial.html>*.

DOF, Diario Oficial de la Federación. (2021). NOM-127-SSA1-2021. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Diario Oficial de la Federación.

Gallegos-Rodríguez, J. (2017). Tratamiento de aguas residuales domesticas en humedales artificiales de flujo libre con *Sagittaria latifolia* y *Sagittaria lancifolia*. (Tesis de Maestría, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas).

García, J. & 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.

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).

Jafarinejad, S. (2017). Recent developments in the application of sequencing batch reactor (SBR) technology for the petroleum industry wastewater treatment. *Chemistry International*, 3(3), 2410-9649. <https://doi.org/10.31221/osf.io/fu27y>

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

Jiménez-López, E. del C. (2014). Humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales. (Tesis de Maestría, Colegio de postgraduados institución de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas, campus tabasco). <https://www.repositorionacionalcti.mx/recurso/oai:colposdigital.colpos.mx:10521/2575>

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

Londoño-Cardona, L. A., & Marín-Vanegas, C. (2009). Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética (Doctoral dissertation, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías, Tecnología Química).

López-Ocaña, G., Estrada-Pérez, N., Aguilar-Pérez, G., Alonso-Mendoza, E. C., & Torres-Balcázar, C. A. (2023). Degradación de contaminantes en humedales artificiales en serie con especies macrófitas del trópico húmedo. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 12(24), 19-48.

Magaña-Flores, A., & López-Ocaña, G. (2023). Domestic wastewater treated with *Sagittaria latifolia* in constructed wetlands. *Dyna*, 90(226), 27-35.

Magaña-Flores, A., López-Ocaña, G., & Romellón-Cerino, M. J. (2022). Kinetic behavior and modeling the space distribution of basic pollutants in a

subsurface flow constructed wetlands with *Pontederia cordata*. Renewable energy, biomass & sustainability, 4(1), 1-13.

Marín-Muñiz, J. L., Sandoval-Herazo, L. C., López-Méndez, M. C., Sandoval-Herazo, M., Meléndez-Armenta, R. Á., González-Moreno, H. R., & Zamora, S. (2023). Treatment Wetlands in Mexico for Control of Wastewater Contaminants: A Review of Experiences during the Last Twenty-Two Years. *Processes* 2023, 11, 359.

Mei, X.-Q., Yang, Y., Fung-ye Tam, N., Wang, Y. w., & Li, L. (2014). Roles of root porosity, radial oxygen loss, Fe plaque formation on nutrient removal and tolerance of wetland plants to domestic wastewater. *Water Research*, 147-159

Ng, J. Y., Wong, D. L., Kutty, S. R. M., & Jagaba, A. H. (2021). Organic and nutrient removal for domestic wastewater treatment using bench-scale sequencing batch reactor. *AIP Conference Proceedings* 2339(1).

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-AGUA2002.pdf>

Núñez-Morales, E., Saboya-Rios, N., & Cruz-Huaranga, M. (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>

Ortega-Gaucin, D. & Peña-García, A. (2016). Análisis crítico de las campañas de comunicación para fomentar la "cultura del agua" en México. *Comunicación y sociedad*, (26), 223-246. Recuperado en 21 de septiembre de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-252X2016000200223&lng=es&tlng=es.

Peña, S., Mayorga, J., & Montoya, R. (2018). Propuesta de tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Yaguachi (Ecuador). *Ciencia E Ingeniería*, 39(2), 161-167. <http://bdigital2.ula.ve:8080/xmlui/handle/654321/366>

Ramírez, J. S., Loaiza, D. C. R., & Asprilla, W. J. (2020). Humedales artificiales subsuperficiales: comparación de metodologías de diseño para el cálculo del área superficial basado en la remoción de la materia orgánica. *Ingenierías USBmed*, 11(1), 65-73. <https://doi.org/10.21500/20275846.4558>

Ramírez-Cadavid, J. D. (2018). Evaluación del vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) y la elefanta (*Pennisetum purpureum*) en la caracterización de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista Científica En Ciencias Ambientales Y Sostenibilidad*, 4(1). Recuperado a partir de <https://revistas.udea.edu.co/index.php/CAA/article/view/335340>

Rivera-Sasso, O. (2017). Cinética de degradación de un agua residual sintética en un reactor discontinuo secuencial a escala laboratorio. (Tesis de licenciatura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas).

Rodas-López, P. V. (2020). Remoción de contaminantes básicos en agua residual doméstica en humedal artificial de flujo subsuperficial con *Enhydra sessilifolia* (Tesis de licenciatura. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas).

Romellón-Cerino, M. J., Cocoltzi-Vázquez, E., & López-Ocaña, G. (2023). Tratamiento de aguas residuales domésticas de una institución educativa por

| | |
|--|---|
| | <p>un sistema de humedales artificiales en serie. <i>Universita Ciencia</i>, 11(30), 147-162.</p> <p>Romellón-Cerino, M. J., Estrada-Pérez, N., & López-Ocaña, G. (2022). Remoción y cinética de contaminantes básicos en humedales artificiales en serie. <i>Tendencias en energías renovables y sustentabilidad</i>, 1(1), 108-118.</p> <p>Romellón-Cerino, M. J., López-Ocaña, G., Reyes-Osorio, J., Romellón-Cerino, J. C., & Arias-Peregrino, V. M. (2022). Efecto de la poda de macrófitas sobre microorganismos adheridos al medio de soporte y la carga orgánica en humedales artificiales. <i>Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias: CIBA</i>, 11(21), 1.</p> <p>Sandoval Herazo, L.C., Marín-Muñiz, J.L., Alvarado-Lassman, A., Zurita, F., Marín-Peña, O., & Sandoval-Herazo, M. (2023). Humedales artificiales a gran escala plantados con especies ornamentales y PET como sustituto de medios filtrantes para el tratamiento de aguas residuales municipales: una experiencia en una comunidad rural mexicana. <i>Agua</i>, 15 (12), 2280.</p> <p>Santa Cruz, J. A., Scenna, N. J., & Mussati, M. C. (2018). Análisis Económico de un Proceso Basado en Reactores Discontinuos Secuenciales (SBR) para la Reducción de Nutrientes Biológicos de Aguas Residuales. <i>Revista Tecnología Y Ciencia</i>, (30), 152–160. Recuperado a partir de https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/rtyc/article/view/148</p> <p>Sierra-Pech, O. M. (2016). Eficiencia de remoción de un sistema experimental de humedal artificial de flujo libre y subsuperficial en el tratamiento de aguas residuales domésticas. Tesis de Maestría, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas).</p> <p>Sylla, A. (2020). Domestic wastewater treatment using vertical flow constructed wetlands planted with <i>Arundo donax</i>, and the intermittent sand filters impact. <i>Ecohydrology & Hydrobiology</i>, 20(1), 48-58.</p> <p>Torres-Balcázar, C. A., López-Ocaña, G., Romellón-Cerino, M. J., Vázquez-González, M. B., & Comparán-Sánchez, L. E. (2020). Biomasa de origen vacuno en la remoción de contaminantes básicos en un reactor discontinuo secuencial. <i>CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias</i>, 9(18), 1-32.</p> <p>Vargas, A.K.N., Calderón, J., Velásquez, D., Castro, M., & Núñez, D.A. (2020). Análisis de los principales sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales domésticas en Colombia. <i>Ingeniare. Revista chilena de ingeniería</i>, 28(2), 315-322. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052020000200315</p> <p>Zepeda-Gómez, C. y Lot, A. (2005). Distribución y uso tradicional de <i>Sagittaria macrophylla</i> Zucc. y <i>Sagittaria latifolia</i> Willd en el Estado de México. <i>Ciencia Ergo Sum</i>, 12(3). http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10412308</p> |
|--|---|