UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES Y ACUMULACIÓN DE METALES EN HUMEDALES ARTIFICIALES

PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA Y MANEJO DE SISTEMAS TROPICALES

PRESENTA:
M.C. ANEL MAGAÑA FLORES

DIRECTOR
DR. GASPAR LÓPEZ OCAÑA.

CODIRECTOR
DR. ARTURO VALDÉS MANZANILLA

VILLAHERMOSA, TABASCO. 9 DE OCTUBRE DE 2024

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Villahermosa, Tab., a 10 de Septiembre de 2024

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 a la **C. ANEL MAGAÑA FLORES** egresada del Doctorado en **CIENCIAS EN ECOLOGÍA Y MANEJO DE SISTEMAS TROPICALES** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis de Doctorado denominado: **"DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES Y ACUMULACIÓN DE METALES EN HUMEDALES ARTIFICIALES"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E

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

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

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

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, el día 17 del mes 09 del año 2024, el que suscribe Anel Magaña Flores alumna(o) del Programa de Doctorado en ciencias en ecología y manejos de sistemas tropicales con número de matrícula 202g26002, adscrito a la división académica de ciencias biológicas, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor(a) (es) de la Tesis presentada para la obtención del (título, diploma o grado según sea el caso) grado de Dr. En ciencias en ecología y manejo de sistemas tropicales y titulada "Degradación de contaminantes y acumulación de metales en humedales artificiales" dirigida por el Dr. Gaspar López Ocaña y Dr. Arturo Valdés Manzanilla.

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 17 de septiembre 2024.

Anel Magaña Flores

Nombre y Firma

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

SEPTIEMBRE 10 DE 2024

C. ANEL MAGAÑA FLORES
PAS. DEL DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA Y MANEJO DE SISTEMAS TROPICALES
P R E S E N T E

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Doctorado en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales titulado: **"DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES Y ACUMULACIÓN DE METALES EN HUMEDALES ARTIFICIALES"**, asesorado por el Dr. Gaspar López Ocaña y Dr. Arturo Valdés Manzanilla, sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado está integrado por el Dr. Humberto Hernández Trejo, Dr. Rudy Solís Silvan, Dr. Gaspar López Ocaña, Dra. Liliana Pampillón González, Dr. Raúl German Bautista Margulis, Dr. Roberto Rodríguez Bastarmerito y Dr. David Guerrero Zarate

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

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

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

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

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

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

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 17 de septiembre 2024.

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTOR(A) y/o AUTORES(RAS) en la producción, creación y/o realización de la obra denominada Degradación de contaminantes y acumulación de metales en humedales artificiales.

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

COLABORADORES

Anel Magaña Flores
Egresado

Gaspar López Ocaña
Director

Arturo Valdés Manzanilla
Codirector

TESTIGOS

Raúl German Bautista Margulis

Humberto Hernández Trejo

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

Villahermosa, Tabasco a 16 de mayo de 2024

C. ANEL MAGAÑA FLORES
EST. DEL DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA
Y MANEJO DE SISTEMAS TROPICALES
P R E S E N T E

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad, y por instrucciones de la Dirección de Posgrado, se implementó la revisión de los trabajos recepcionales (tesis), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad, el Reglamento General de Estudios de Posgrado, el Código Institucional de Ética para la Investigación y con los requerimientos para los posgrados en el SNP-CONAHCyT.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones y el reporte de originalidad de su documento de tesis. Con el objetivo de fortalecer y enriquecer el programa de posgrado, se realizó la revisión del documento en la plataforma iThenticate, obteniendo el reporte de originalidad, el índice de similitud y se emitieron las siguientes sugerencias y recomendaciones para dar seguimiento en el documento de tesis del proyecto de investigación: ***"Degradación de contaminantes y acumulación de metales en humedales artificiales".***

OBSERVACIONES:

1. **El índice de similitud obtenido fue de 15%**, el cual se ubica dentro del estándar de tolerancia de acuerdo a las Políticas y Lineamientos para el uso y manejo del Software Antiplagio de la UJAT. Se demuestra el nivel de originalidad del documento y de la investigación.

2. Cabe señalar que debido a la naturaleza del sujeto-objeto de investigación, se presentan diversidad de fórmulas para determinar la presencia y concentración de metales pesados en agua, sedimentos y plantas, por lo que hay referencias que marcan similitud a lo largo del documento.

3. Por un lado, se identificó un 2% del índice de similitud por la consulta de referencias bibliográficas contenidas en el Sistema de Información Científica Redalyc, y un 2% más en el portal Dianet.

4. El restante 11%, se distribuye -1% cada uno en la consulta de revistas y fuentes primarias de citación de internet tales como la *Revista Iberoamericana de las Ciencias*

Biológicas y Agropecuarias (CIBA), SciELO, Handle.Net, además de repositorios institucionales vinculados a temas de desarrollo sustentable y energías renovables, por mencionar algunos.

5. **Se adjunta el informe de originalidad de la tesis** obtenido a través de la herramienta Turnitin iThenticate.

6. Finalmente, se le solicita a la C. Anel Magaña Flores, integrar en la versión final de tesis, este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate.

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

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

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

C.C.P. Archivo

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

Degradación de contaminantes y acumulación de metales en humedales artificiales

INFORME DE ORIGINALIDAD

15%
ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	www.redalyc.org Internet	462 palabras — 2%
2	dialnet.unirioja.es Internet	394 palabras — 2%
3	www.ciba.org.mx Internet	366 palabras — 1%
4	aldeser.org Internet	335 palabras — 1%
5	ciba.org.mx Internet	321 palabras — 1%
6	hdl.handle.net Internet	305 palabras — 1%
7	www.scielo.org.mx Internet	298 palabras — 1%
8	ri.ujat.mx Internet	134 palabras — 1%
9	archivos.ujat.mx Internet	93 palabras — < 1%

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a Dios y a mi pequeña gran familia, ya que sin ellos y sin el poder de su amor en sus oraciones no habría llegado a este punto de mi vida.

Agradecimientos

A mi asesor y amigo Dr. Gaspar López Ocaña, gracias por la guía y el impulso para culminar este grado, sé que no fue fácil aguantar a esta contreras con muchísima iniciativa.

A los miembros del comité Sinodal, gracias por sus consejos y acompañamiento a lo largo de estos cuatro años

A la directiva de mi centro de trabajo y alma mater, Instituto Tecnológico de Villahermosa, por darme la facilidad de superación fuera de sus instalaciones.

A mi amiga Dra. Roció del Carmen Antonio Cruz, por apoyarme y ser el vínculo con centros de investigación.

A la División Académica de Ciencias Básicas de la UJAT y al Dr. Durvel de la Cruz Romero por apoyarme con la estancia en sus instalaciones.

Al Instituto Tecnológico de Toluca por abrirme las puertas de sus laboratorios para poder llevar a cabo parte de mi experimentación.

A la División Académica de Ciencias Biológicas, por aceptarme como un miembro de su comunidad estudiantil y entregarme este grado. Gracias por convertirme también en Juchiman.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por haber otorgado el financiamiento de mis estudios.

Gracias a todas y cada una de esas personas que me brindaron una mano durante estos 4 años.

Gracias Totales

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

I N D I C E

Resumen 12
Abstract....13
Capítulo 1. Protocolo de Tesis 14
1.1. Introducción....14
1.2. Justificación....16
1.3. Antecedentes 17
1.4. Hipótesis....20
1.5. Objetivos 21
1.5.1. Objetivo General 21
1.5.2. Objetivos Específicos....21
1.6. Referencias 21
Capítulo 2. Aguas residuales domésticas tratadas con *Sagittaria latifolia* en humedales artificiales....25
2.1. Resumen 25
2.2. Introducción 25
2.3. Materiales y Métodos 27
2.4. Resultados....29
2.5. Discusión 35
2.6. Conclusiones 38
2.7. Referencias....38
Capítulo 3. Comportamiento cinético y modelación de la distribución espacial de contaminantes básicos en un humedal artificial de flujo subsuperficial con *Pontederia cordata*....42
3.1. Resumen 42
3.2. Introducción 42
3.3. Materiales y métodos....44
3.4. Resultados y Discusión....46
3.5. Conclusiones 55
3.6. Referencias....55
Capítulo 4. Distribución de metales pesados en humedales en serie de flujo libre con especies, *Sagittaria latifolia, Thalia geniculata y Pontederia cordata* 59
4.1. Resumen 59
4.2. Introducción 59
4.3. Materiales y métodos....61
4.4. Resultados....63
4.5 Discusiones....85
4.6. Conclusiones 87
4.7. Referencias....88
Capítulo 5. Conclusiones generales....91
Anexo A. Publicaciones del proyecto 93
Anexo B. Memoria fotográfica....94
Anexo C. Perspectivas y lecciones aprendidas....96
Anexo D. Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional 97

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Índice de figuras

Figura 1. Arreglo de humedales artificiales (HA) en el experimento. 29
Figura 2. Gasto de operación promedio (X) ± error estándar (ES) en los humedales artificiales de flujo libre HAFL y humedales artificiales de flujo HAFS (N=20). 30
Figura 3. Valores medianos ± rango intercuartil para temperatura (°C). Letras diferentes indican diferencias significativas (Kruskal-Wallis; p<0,05) con un 95% de confianza estadísticamente significativas entre los tratamientos..... 31
Figura 4. Valores medianos ± rango intercuartil para pH (UpH). Letras diferentes indican diferencias significativas (Kruskal-Wallis; p<0,05) con un 95% de confianza estadísticamente significativas 32
Figura 5. Valores medianos ± rango intercuartil para sólidos disueltos totales (mg/L). Letras diferentes indican diferencias significativas (Kruskal-Wallis; p<0,05) con un 95% de confianza estadísticamente significativas entre los tratamientos. 32
Figura 6. Valores medianos ± rango intercuartil para turbiedad (UNT). Letras diferentes indican diferencias significativas (Kruskal-Wallis; p<0,05) con un 95% de confianza estadísticamente significativas entre los tratamientos..... 33
Figura 7. Valores medianos ± rango intercuartil para color (UC). Letras diferentes indican diferencias significativas (Kruskal-Wallis; p<0,05) con un 95% de confianza estadísticamente significativas entre los tratamientos..... 33
Figura 8. Valores medianos ± rango intercuartil para oxígeno disuelto (mg/L). Letras diferentes indican diferencias significativas (Kruskal-Wallis; p<0,05) con un 95% de confianza estadísticamente significativas entre los tratamientos..... 34
Figura 9. Valores medianos ± rango intercuartil para la demanda química de oxígeno (mg/L). Letras diferentes indican diferencias significativas (Kruskal-Wallis; p<0,05) con un 95% de confianza estadísticamente significativas entre los tratamientos. 34
Figura 10. Los puntos de M1 a M9 indican el punto de muestreo en el HAFS. También se midieron los puntos de entrada y salida. Diseño López *et al*., (2014). 45
Figura 11. Valores medianos (±DE) de la variable pH de los diferentes tratamientos del HC evaluados (N=11). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. 48
Figura 12. Valores promedio (±DE) de la variable Temperatura de los diferentes tratamientos del HA evaluado (N=11). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. 49
Figura 13. Valores medianos (±DE) de la variable Turbidez de los diferentes tratamientos del AC evaluados (N=11). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. 49
Figura 14. Valores promedio (±DE) de la variable CE de los diferentes tratamientos del HA evaluados (N=11). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. 50
Figura 15. Valores medianos (±DE) de la variable Color de los diferentes tratamientos del HA evaluados (N=11). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. 51
Figura 16. Modelo ajustado al parâmetro pH(N=11). 52
Figura 17. Modelo ajustado al parámetro de temperatura**(**N=11). 52
Figura 18. Modelo ajustado al parámetro de CE (*N=11*)..... 53
Figura 19. Modelo ajustado al parametro de Color(*N=11*). 53
Figura 20. Modelo ajustado al parámetro de Turbiedad (N=11)..... 53

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Figura 21. Modelo ajustado al parámetro de BOD_5 (N=11)..... 54
Figura 22. Distribución espacial de microorganismos (N=11)..... 54
Figura 23. Comportamiento cinético durante la fase de evaluación, la cual se evaluó después de dos años de operación (n=1, k=-0.37 días^{-1})..... 55
Figura 24. Diagrama de configuración del tren de HA..... 61
Figura 25. Gasto promedio diario, de los trenes de HA por días de operación (N= 240). 63
Figura 26. Valores medianos ± rango intercuartil de pH y Temperatura en HA. Letras diferentes indican diferencias (p<0.05) con un nivel de confianza del 95%. (N=240)..... 66
Figura 27. Valores medianos ± rango Inter cuartil de CE y SDT en HA. Letras diferentes indican diferencias (p<0.05) con un nivel de confianza del 95%. (N=240)..... 67
Figura 28. Valores medianos ± rango Inter cuartil de OD y ORP en HA Letras diferentes indican diferencias (p<0.05) con un nivel de confianza del 95%. (N=240)..... 67
Figura 29. Valores medianos ± rango Inter cuartil de turbiedad y color en HA. Letras diferentes indican diferencias (p<0.05) con un nivel de confianza del 95%. N=240)..... 68
Figura 30. Valores medianos ± rango Inter cuartil de DQO en HA. Letras diferentes indican diferencias (p<0.05) con un nivel de confianza del 95%. (N=240)..... 68
Figura 31. Valores medianos ± rango Inter cuartil de concentración de Al y Fe en HA. Letras diferentes indican diferencias (p<0.05) con un nivel de confianza del 95%. (N=240). 69
Figura 32. Valores medianos ± rango Inter cuartil de concentración de Cr y Cu en HA. Letras diferentes indican diferencias (p<0.05) con un nivel de confianza del 95%. (*N=240*) 69
Figura 33. Valores medianos ± rango Inter cuartil de concentración de Mn y Ni en HA. Letras diferentes indican diferencias (p<0.05) con un nivel de confianza del 95%. (N=240). 70
Figura 34. Valores medianos ± rango Inter cuartil de concentración de Zn en HA Letras diferentes indican diferencias (p<0.05) con un nivel de confianza del 95%. (*N=240*)..... 71
Figura 35. Acumulación de Aluminio en especies y sedimentos..... 73
Figura 36. Acumulación de Hierro en especies y sedimentos..... 74
Figura 37. Acumulación de Hierro en especies y sedimentos..... 75
Figura 38. Acumulación de Hierro en especies y sedimentos..... 76
Figura 39. Micrografias de SEM de rocas en R1T1 76
Figura 40. Micrografias de SEM de rocas R2T1..... 77
Figura 41. Micrografias de SEM de rocas R3T1..... 77
Figura 42. Micrografias de SEM de rocas R1T2..... 77
Figura 43. Micrografias de SEM de rocas R2T2..... 78
Figura 53. Segundo hallazgo en rocas de R1T2 a 100 µm..... 82

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Índice de tablas

Tabla 1. Antecedentes a nivel internacional..... 17
Tabla 2 Antecedentes a nivel nacional 18
Tabla 3. Antecedentes a nivel local 19
Tabla 4. Valores promedio ± DE de las unidades experimentales: agua residual cruda, HA con especies y sin especies. 30
Tabla 5. Eficiencia de remoción en humedales artificiales de flujo libre (HAFL) y humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFS) con y sin Sagittaria latifolia. Valores promedio (N=20). 34
Tabla 6. Constantes cinéticas de remoción en humedales artificiales de flujo libre (HAFL) y humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFS) con y sin Sagittaria latifolia. 35
Tabla 7. Datos de crecimiento de Pontederia cordata..... 46
Tabla 8. Eficiencia de remoción promedio del HAFS con Pontederia cordata (N=11)..... 47
Tabla 9. Concentración mediana ± rango intercuartil de la entrada y efluentes de los tratamientos de contaminantes básicos en HA (N=240). 64
Tabla 10. Concentración promedio ±DE de la entrada y efluentes de los tratamientos de metales (N=240)..... 64
Tabla 11. Cumplimiento ambiental..... 65
Tabla 12. Eficiencias de remoción de los parámetros básicos en HA. 71
Tabla 13. Eficiencias de remoción de metales en HA. 72
Tabla 14. Constantes cinéticas de remoción en HA..... 72

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Resumen

Las aguas residuales representan un problema grave de contaminación ambiental, pues el mundo entero entro en la crisis del agua ella ahora es indispensable tratarla e integrarla al ciclo urbano del agua. Esto ha hecho que se desarrollen tecnologías de tratamiento para recuperar y aprovechar el agua después de diversos usos en la sociedad. Entre los tratamientos que han presentado mayor aceptación a nivel mundial son los humedales artificiales (HA), que son alternativas ecológicamente viables. Sin embargo, aunque esta tecnología se emplea en el tratamiento de diversas aguas residuales, con HA de flujo libre y subsuperficial, todavía es necesario conocer el comportamiento cinético por tipo de humedal y especie utilizada, pues pueden alcanzar diferentes velocidades de degradación y se desconoce la bioacumulación de metales en su sistema por lo que es importante conocer los efectos a largo plazo que estos pueden provocar y es necesario conocerlos para recomendar un manejo adecuado. En este trabajo se estudió la degradación de contaminantes y acumulación de metales en humedales artificiales, y se presenta en el capítulo 1 el Protocolo de Tesis, en capítulo 2, aguas residuales domésticas tratadas con *Sagittaria latifolia*, en el capítulo 3, comportamiento cinético y modelación de la distribución espacial de contaminantes básicos en un humedal artificial de flujo subsuperficial con *Pontederia cordata*, en el capítulo 4, distribución de metales pesados en humedales en serie de flujo libre con especies, *Sagittaria latifolia*, *Thalia geniculata* y *Pontederia cordata*. Finalmente, el capítulo 5 presenta las conclusiones y recomendaciones.

De manera general al evaluar el desempeño de *S. latifolia* y *P. cordata* en HA experimentales de flujo libre y flujo subsuperficial, en la remoción de contaminantes básicos, las mejores eficiencias de remoción de contaminantes se presentaron en HA de flujo subsuperficial. *S. latifolia* obtuvo porcentajes de remoción de turbiedad, color y DQO en 95.9%, 89.4% y 95.7% respectivamente, y un coeficiente cinético de DQO 0.89 días^{-1}. *P. cordata* presentó remociones de DQO y turbiedad del 80 y 70% respectivamente. En cuanto a metales pesados la mayor acumulación presentada en HA en serie (tres de flujo libre) se encontró en los sedimentos, seguido del raíz, tallo y hojas. *T. geniculata* es la mayor acumuladora de Aluminio y Hierro con 0.33 y 29.08 mg/g, (mg de metal por gramos de materia seca) respectivamente y *S. latifolia* es la mayor acumuladora de cromo y cobre con 0.30 y 0.13 mg/g respectivamente. En el medio de soporte no se encontró acumulado algún metal pesado. Los HA operados con estas especies nativas alcanzaron eficiencias de remoción de DQO (>80%). La acumulación de metales pesados varia conforme a la especie. Los HA confirman ser una alternativa viable para el tratamiento de efluentes de las comunidades del sureste de México y garantizan la protección de cuerpos receptores con la remoción de carga orgánica e inorgánica siendo eficientes en la remoción de metales. Esta información es importante para el sector científico-académico y para los organismos reguladores y responsables del tratamiento de las aguas residuales en México y la región.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México.

Abstract

Wastewater represents a serious problem of environmental pollution, since the entire world is entering the water crisis and it is now essential to treat it and integrate it into the urban water cycle. This has led to the development of treatment technologies to recover and use water after various uses in society. Among the treatments that have been most widely accepted worldwide are constructed wetlands (CW), which are ecologically viable alternatives. However, although this technology is used in the treatment of various wastewaters, with free-flowing and subsurface CW, it is still necessary to know the kinetic behavior by type of wetland and species used, since they can reach different degradation rates and the bioaccumulation of metals in your system, so it is important to know the long-term effects that these can cause and it is necessary to know them to recommend appropriate management. In this work, the degradation of contaminants and accumulation of metals in artificial wetlands was studied, and the Thesis Protocol is presented in chapter 1, in chapter 2, domestic wastewater treated with Sagittaria latifolia, in chapter 3, kinetic behavior and modeling. of the spatial distribution of basic contaminants in a subsurface flow artificial wetland with *Pontederia cordata*, in chapter 4, distribution of heavy metals in free-flow serial wetlands with species, *Sagittaria latifolia*, *Thalia geniculata* and *Pontederia cordata*. Finally, chapter 5 presents the conclusions and recommendations.

In general, when evaluating the performance of *S. latifolia* and *P. cordata* in experimental CW of free flow and subsurface flow, in the removal of basic contaminants, the best contaminant removal efficiencies were presented in CW of subsurface flow. *S. latifolia* obtained turbidity, color and COD removal percentages of 95.9%, 89.4% and 95.7% respectively, and a COD kinetic coefficient of 0.89 $days^{-1}$. *P. cordata* presented COD and turbidity removals of 80 and 70% respectively. Regarding heavy metals, the highest accumulation presented in series CW (three free-flowing) was found in the sediments, followed by the root, stem and leaves. *T. geniculata* is the greatest accumulator of Aluminum and Iron with 0.33 and 29.08 mg/g, (mg of metal per grams of dry matter) respectively and *S. latifolia* is the greatest accumulator of chromium and copper with 0.30 and 0.13 mg/g respectively. No heavy metal was found accumulated in the support medium. The CW operated with these native species achieved COD removal efficiencies (>80%). The accumulation of heavy metals varies according to the species. The CW confirm to be a viable alternative for the treatment of effluents from the communities of southeastern Mexico and guarantee the protection of receiving bodies with the removal of organic and inorganic load, being efficient in the removal of metals. This information is important for the scientific-academic sector and for the regulatory bodies responsible for wastewater treatment in Mexico and the region.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Capítulo 1. Protocolo de Tesis

1.1. Introducción

El tratamiento del agua residual y el que ésta cumpla las normas establecidas es uno de los máximos desafíos que presenta el gobierno, sin embargo, entornos diferentes necesitan acciones de acuerdo con las necesidades y características de cada sitio (Rivera, 2018). Ya que las descargas de aguas residuales contienen altas cargas de turbiedad, color, sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno total (NT), fósforo total (PT), demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), lo cual provoca daños a los ecosistemas acuáticos y terrestres (Solís *et al*. 2016).

El aumento de la población ha ocasionado una mayor demanda e impacto en recursos naturales como el del agua. (Rivera *et al*., 2018). El medio ambiente se está modificando debido principalmente a la globalización, contaminado agua aire y suelo (Upadhyay *et al*., 2016). Sin embargo, la naturaleza presta servicios ambientales ligados al agua, en el cual se incluyen los suelos y la corteza vegetal, esta sinergia ayuda a mantener integro el ciclo ecológico (CONAGUA, 2018); estos dadores de servicios son los humedales, ya que ellos hacen la sinergia entre los sistemas acuáticos y terrestres, son áreas captación pluvial temporal o permanente con vegetación hidrófila y suelos siempre húmedos debido a la descarga de aguas.

Los HA recomendado por CONAGUA traen consigo problemas de operación de los mismo, que van desde costo elevados por traslados, mortandad o mala adaptación de la especie, ya que se utiliza vegetación y medios de soportes que no pertenecen a la región, razón por la cual se continua evaluando materiales pétreos que puedan servir como medio de soporte, así como vegetación regional que resulte en fácil adaptación y tenga eficiencia de absorción por arriba del 60% similares a la vegetación recomendada, aunado a esto se evaluara la cinética de degradación de contaminantes y acumulación de metales que puedan ejercer las especies vegetales estudias en humedal artificial de flujo libre (HAFL) y humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFS) bajo las condiciones climáticas del estado de Tabasco.

Aunque existen numerosas tecnologías para tratar las aguas residuales, se tiene el inconveniente de ser de alto costo y por ende poco accesibles; por esta razón, se buscan alternativas de tratamiento afables con el medio ambiente, tratando de igualar los procesos de la naturaleza, los humedales artificiales (HA) son uno de ellos (Arias, 2017), ya que de acuerdo con Granados; (2019), Los HA son sistemas socio-ecológicos que ofrecen beneficios ambientales, sociales y económicos a los asentamientos humanos que los rodean. Arteaga *et al*., (2019), aporto que este tipo de tratamientos (HA) se utiliza como una tecnología verde para tratar diversos afluentes de aguas residuales replicando la tecnología de los humedales naturales.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

En la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco División Académica De Ciencias Biológicas (UJAT-DACBIOL), se llevó a cabo este proyecto, con la finalidad, de definir entre la vegetación nativa, aquellas que proporcionaran capacidades de absorción semejantes, a los recomendados en HA, buscando reducir aún más los costos de producción y traslado del material, se usaron aguas residuales con características domiciliarias producidas por la institución, evaluándose para ello los parámetros de calidad del agua como: pH, temperatura, CE, color, turbiedad, y SD en las entradas y salidas de los HAFL y HAFS.

Para el arranque de este proyecto se realizó mantenimiento preventivo y correctivo de las unidades experimentes, así como selección y evaluación de los medios de soporte, se seleccionaron dos medios de soporte, grava heterogénea de ¾, mezcla usada en el laboratorio de tecnología del agua.

Como primera fase se evaluaron las especies *Ludwigia octovalvis, Gymnocoronis sessilis* S. F. Blake, *Asclepias curassavica*, *Justicia comata l. lam*, *Sagittaria latifolia y Pontederia cordata, cada* una sometida a dos tipos de flujo libre y subsuperficial. Llevándose a cabo la evaluación morfología de las especies, al inicio y al final del tratamiento, se evaluó la eficiencia de degradación de contaminantes, su comportamiento cinético con su respectivo ajuste matemático.

Con este experimento se seleccionaron como especies con mejores comportamientos, *Sagittaria latifolia y Pontederia cordata,* y con ellas se llevó a cabo el estudio de acumulación de metales. De las especies no seleccionadas, se realizaron publicaciones en congresos tales como: *Ludwigia octovalvis* en la Remoción de Color y Turbiedad en Humedales Artificiales; *Gymnocoronis sessilis* en el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas con Humedales Artificiales y Remoción de Color y Turbiedad con *Asclepias curassavica* y *Justicia comata* l. lam en Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (Anexo A, publicaciones).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

1.2. Justificación

En los últimos años, la implementación de humedales artificiales ha tomado fuerza debido a que este tratamiento puede soportar descontroles de proceso como carga, temperatura, pH, caudal entre otros, brindando tecnología técnicamente viable (Solís *et al*., 2016). Desde el 2004, Luna Pabello y Ramírez Castillo veían a los humedales artificiales de flujo subsuperficial como tratamientos capaces de remoción de contaminantes en cual el 90% la lleva a cabo el medio de soporte, mientras que el 10% la vegetación y los microorganismos. Se ha demostrado también que diferentes medios de soportes tienen efecto diferente sobre la absorción y la porosidad como lo declara García Ocaña *et al*., (2019) al evaluar medios diferentes de soporte: grava de canto redondo y grava de brecha sedimentaria. Por este motivo es importante seleccionar los medios de soporte y la vegetación adecuada para que se lleve a cabo esta remoción. De acuerdo con Marín Muñiz, (2017), aunque en México ya existen estudios que han demostrado la eficiencia de los HA, se requiere aún un mayor esfuerzo e investigación para poder resolver las dificultades de contaminación del agua. Para diciembre del 2019 en el país existían 3661 plantas de tratamiento de aguas, 2642 en operación de las cuales, solo 77 trabajan con tecnología de HA, 6 de ellas se localizan en el estado. (CONAGUA 2019), pero el esfuerzo de ellas no es suficiente.

Los HA recomendado por CONAGUA traen consigo problemas de operación de los mismo, que van desde costo elevados por traslados, mortandad o mala adopción de la especie, ya que se utiliza vegetación y medios de soportes que no pertenecen a la región, razón por la cual se continua evaluando materiales pétreos que puedan servir como medio de soporte así como vegetación regional que sea resulte en fácil adaptación y tenga eficiencia de absorción por arriba del 60% similares a la vegetación recomendada, aunado a esto se evaluara la cinética de degradación de contaminantes y acumulación de metales que puedan ejercer las especies vegetales estudias en HAFL y HAFS bajo las condiciones del clima del estado de Tabasco.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

1.3. Antecedentes

Numerosas han sido las investigaciones que se han realizado a nivel internacional (Tabla 1), nacional (Tabla 2) y local (Tabla 3) sobre el actuar de los humedales artificiales de las cuales presentamos los principales aportes.

Tabla 1. Antecedentes a nivel internacional

Autor	Año	Sitio	Condiciones	Objetivo	Resultados
Jaramillo *et al.*	2015	Antioquia, Colombia	HAFS-Horizontal con *Typha domingensis*	Mejorar la eficiencia en la remoción de los contaminantes de en las aguas residuales provenientes de la floricultura	Demanda química de oxígeno, 56,9% sólidos totales y 117,2% solidos suspendidos totales
Khairalla *et al.*	2016	universidad Nanjing de China	HAFS-Horizontal, espinaca de agua, apio chino y berro.	Usar HA como tratamiento terciario para mejorar la calidad de las aguas residuales	DQO: 52%, NH4 +: 64.7%,TN: 58.2% y TP: 72.8%
Soler *et al.*.	2018	Argentina	Sistema a escala piloto, HAFL, con dos coberturas de plantas flotantes y dos tiempos de residencia hidráulica, trabajando con flujo laminar continuo	Evaluar el comportamiento de HA con macrófitas acuáticas, en la concentración de contaminantes de efluentes urbanos.	A menor cobertura de plantas y mayor tiempo de residencia, aumenta el rendimiento del HA para DQO y DBO. No tienen influencia sobre Nitrógeno total y solidos suspendidos El Fosforo total se remueve mejor a menor cobertura de plantas no siendo significativo el tiempo de retención para su eliminación, Caso contrario de los coliformes totales.
Polo *et al.*.	2018	Perú	Biodigestor y HA con Cola de Caballo y Cartucho	Evaluar la eficiencia de una UBS empleando HA con especies nativas de la zona	Biodigestor DBO 82% DQO) 81%, Cartucho: DBO y DQO 68%. Cola de caballo DBO y DQO 58%;
Corzo y Sanabria	2019	Bogotá, Colombia	HA con portadores artificiales para el crecimiento bacteriano como medio de soporte	Evaluar la capacidad de adaptación de tres especies de plantas (*Cyperus alternifolius, Heliconia burleana y Zantedeschia aethiopica*)	*Cyperus alternifolius* se adapta mejor a este tipo de HA

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Tabla 2 Antecedentes a nivel nacional

Autor	Año	Sitio	Tipo y condiciones	Objetivo	resultados
Amabilis *et al.*	2015	México	HA de 39 cm y 20 cm, con roca volcánica, inoculados con cepas tolerantes a metales pesados, con *Phragmites australis* (Carrizo) 51 días de operación	Evaluar el desempeño de HA inoculados, en la remoción de mercurio, plomo y cromo en solución durante 151 días de operación	HA inoculados removieron 50% de Hg, 57% de Pb y 45% de Cr., HA no inoculados bajaron la eficiencia conforme aumentaban los días de operación.
Tejeda *et al.*.	2015	Jalisco México	Tres sistemas de humedales híbridos con dos etapas de tratamiento, humedales subsuperficiales de flujo horizontal, humedales subsuperficiales de flujo vertical y lagunas de estabilización sembradas con *Zantedeschia aethiopica, Iris sibirica* y *Thypha latifolia*.	Evaluar la eficiencia de remoción másica de carbamazepina	Los humedales subsuperficiales de flujo horizontal presentaron mejores eficiencias de remoción
Amabilis *et al.*	2016	México	HA de 39 cm y 20 cm, con roca volcánica, inoculados con cepas tolerantes a metales pesados, sembrados con *Phragmites australis* (Carrizo) 304 días de operación	Evaluar la acumulación y distribución de mercurio en los HA	Carrizo y bacterias metalotolerantes, removieron el 73 % Hg Total. Carrizo sin bacterias 66 % del metal. los testigos removieron el 33 %
Márquez *et al.*	2020	Nuevo León México	HA: tanque rectangular con dimensiones de 85 × 44 × 13 cm (largo x ancho x alto), con una pendiente del 2% y grava como sustrato (5 cm de profundidad), TRH 2 .4 días	Evaluar el efecto sinérgico en la acumulación simultánea de Pb y Cr (VI) en berro.	.La mayor concentración de ambos metales fue en raíz (Pb > Cr). Al incrementarse la presencia de Cr (VI) en solución, la planta absorbe más metal y en combinación con Pb el índice de tolerancia se aumenta y el factor de translocación disminuye. Dentro del humedal construido el porcentaje de remoción de Pb y Cr total fue del >99.9% (100 mg L^{-1}) y 95% (28.5 mg L^{-1}), respectivamente.

Universidad Juárez Autónoma de México. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Tabla 3. Antecedentes a nivel local

Autor	Año	Sitio	Tipo y condiciones	Objetivo	resultados
Solís *et al.*	2016	Tabasco	HAFL operando con *Typha domingensis* (espadaño) y *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua), y HAFS trabajado con *Paspalum paniculatum* (camalote) y *Cyperus articulatus* L (chintul),	Evaluar de HAFL Y HAFS en la eliminación de contaminantes de aguas residuales	El mejor tratamiento fue el HAFL con T. domingensis, con eficiencias de remoción de turbiedad, color, DQO, DBO5, NT, PT y SST de 97,1; 83,4; 97,8; 97,5; 97,2; 91,1 y 97,7% respectivamente
Jiménez *et al.*	2017	Tabasco	HAFL y HAFS. Con especies nativas *Paspalum paniculatum* y *Thalia geniculata*	Evaluar especies nativas para su uso en HA	La DBO la DQO, los sólidos suspendidos totales, el nitrógeno y el fósforo totales se encontró en el rango de 79 % –94%. De eficiencia de eliminación, se demostraron que la vegetación nativa actual es satisfactoria para el territorio mexicano.
López *et al.*	2018	Tabasco	HAFS a escala piloto usando *Thalia geniculata* como vegetación, con un gasto de 204±66 L/día utilizando grava como medio inerte con una porosidad y densidad de n= 56.3 ± 3.5 y1666.7 ± 119.3 kg/m3, respectivamente.	Evaluar él HA	Eficiencias de remoción del 85% de DBO. Con una k de .43 dias^{-1}. pH de 7.5±0.1 en el reactor, Una temperatura de 30.44 a 28.32°C, conductividad eléctrica de 4010 a 2922 µS/cm, la turbiedad 144 a 17 UTN, y la biomasa bacteriana 30000 a 2646 mg/kg disminuyendo sustancialmente de la entrada a la salida del reactor.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

1.4. Hipótesis

Hipótesis 1

Ho: Los HAFL y HAFS operados con especies nativas del estado de Tabasco pueden alcanzar altas eficiencias de remoción de DQO (<80%).

Ha: Los HAFL y HAFS operados con especies nativas del estado de Tabasco no alcanzan altas eficiencias de remoción de DQO (>80%).

Hipótesis 2

Ho: No existen diferencias entre las especies nativas del trópico húmedo en la acumulación de metales pesados en su sistema.

Ha: Existen diferencias entre las especies nativas del trópico húmedo en la acumulación de metales pesados en su sistema.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Evaluar la cinética de degradación de materia orgánica y la asimilación de metales pesados en humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial con diferentes especies del trópico húmedo.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Evaluar la eficiencia de remoción de parámetros de control (pH, temperatura, oxígeno disuelto, potencial oxido reducción, conductividad eléctrica, solidos disueltos totales, turbiedad, color, DQO) en humedales artificiales con de flujo libre y subsuperficial con especies *Sagitaria latifolia, Thalia geniculata* y *Pontederia cordata*.

- Verificar la acumulación de metales (Al, Cu, Cr Fe, Mn, Ni, y Zn) en las especies vegetales, los sedimentos, medio de soporte y columna de agua dentro de los humedales artificiales

- Determinar el coeficiente cinético de degradación (turbiedad, color, DQO) en los mejores tratamientos (libres y subsuperficiales).

- Verificar el cumplimiento ambiental de los diferentes tratamientos.

1.6. Referencias

Amabilis Sosa, Leonel E., Siebe, Christina, Moeller-Chávez, Gabriela, Durán- Domínguez-De-Bazúa, María del Carmen. (2015). Remoción de mercurio, cromo y plomo por humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes. Tecnología y ciencias del agua, 6(2), 21-34

Amabilis Sosa, Leonel Ernesto, Siebe, Christina, Moeller-Chávez, Gabriela, & Durán-Domínguez-de-Bazúa, María del Carmen. (2016). Removal of mercury by Phragmites australis used as biological barrier in constructed wetlans inoculated with heavy metal-tolerant strains. Revista internacional de contaminación ambiental, 32(1), 47-53.Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018849992016000100047&lng=es&tlng=en.

Arias Hernández, I., Sulbarán Rangel, B. (2017). Modelado de humedales artificiales empleando parámetros de calidad de agua. Tecnogestión, 14(1).

Arteaga Cortez, Viviana. Quevedo Nolasco, Abel. Del Valle Paniagua, David H. Castro Popoca, Martiniano. Bravo Vinajas, Ángel. Ramírez Zierold, Jorge A., (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo / State of art: A current review of the mechanisms that make the artificial wetlands for the removal of nitrogen and phosphorus. Tecnología y ciencias del

agua, [S.l.], 10, (5), 319- 342. DOI: 10.24850/j-tyca-2019-05-12

Asia Fadhile, A, Mushrifah,I., Siti Rozaimah S. A.y Nurina A. (2015). Phytoremediation of contaminated soils containing gasoline using Ludwigi octovalvis (Jacq.) in greenhouse pots. Environmental Science and Pollution Research, 24(13). DOI 10.1007/s11356-015-5261-5

Carvajal Rowan, A., Zapattini Irala, C., Quintero Zamora, C. (2018). Humedales Artificiales, una alternativa para la depuración de Aguas Residuales en el Municipio de Mizque, Bolivia. Diseño y Tecnología para el Desarrollo, 0(5), 88-108. Recuperado de http://polired.upm.es/index.php/distecd/article/view/3744/3830

Chan Quijano, J.G., Rivera Gúzman Nadia Elizabeth. (2017) Contribución al inventario de la vegetación acuática y ribereña de Tabasco, México. Desde el Herbario CICY 9: 98–104 ISSN: 2395-8790

Chung A K C, Wu Y, Tam N F Y, Wong M H. 2008. Nitrogen and phosphate mass balance in a sub-surface flow constructed wetland for treating municipal wastewater. Ecological Engineering (32): 81-89.

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

Comparán Sánchez L.E., López Ocaña G., Estrada Pérez N., García Ramírez F.Y. (2020). Tratamiento de aguas sanitarias con humedales artificiales plantados con Cladium jamaicense, Academia Journals, 12 (4)

CONABIO (2021). Onagraceae. Ludwigia octovalvis (Jacq.) Raven http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/onagraceae/ludwigia-octovalvis/fichas/ficha.htm

CONAGUA. (2018). Atlas del agua en México 2018. México: Conagua/Semarnat.

CONAGUA. (2019). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación, México: Conagua

Corzo Angélica, Sanabria Otoniel. (2019). Adaptation of vegetation in high rate constructed wetland using artificial carriers for bacterial growth: Assessment using phytopathological indicators. Journal of Water Process Engineering, 32. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.100974

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

Granados Laudino, D., Montes de Oca Hernández, A., y Moctezuma Pérez, S. (2019). Humedales artificiales para el desarrollo comunitario: el caso de una comunidad Mazahua de México. Ciencia, Ambiente y Clima, 2(1), 35-43

González Roche, Yaribey Mayusca, Pérez Villar, Maira María, Martínez Nodal, Pastora de la C., Pedrozo-Alfonso, Julio César. (2019). Subsurface wetland performance in the purification of oily waters. Kinetics of DQO removal. Revista Cubana de Química, 31(3), 452-462. Recuperado de: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212019000300452&lng=es&tlng=en.

Hecht, Jory S., Lacombe, Guillaume., Arias, Mauricio E., Dang, Thanh D., Piman, Thanapon.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

(2019). Hydropower dams of the Mekong River basin: A review of their hydrological impacts. Journal of Hydrology, 568, 285-300. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.045

Hernández Almeida, M. F., Estrada Pérez, N., López Ocaña, G. (2021). Tratamiento de Agua Residual Doméstica en una Institución Educativa vía Humedales Artificiales. Memoria del congreso internacional de investigación, Academia Journals, 26 al 28 mayo 2021, Vol.13 No.3, ISSN 1946-5352

INEGI (2015) Anuario estadístico y Geográfico del Estado de Tabasco. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. https://tabasco.gob.mx/sites/all/files/vol/ceieg.tabasco.gob.mx/fi/Anuario%20estad%C3%ADstico%20y%20geogr%C3%A1fico%20de%202015_0.pdf

Jaramillo Gallego ML, Agudelo Cadavid RM, Peñuela Mesa GA, (2015). Optimización del tratamiento de aguas residuales de cultivos de flores usando humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal. Facultad Nacional de Salud Pública, 32(1), 20-29. DOI: 10.22206/CAC. 2019.V2I1.PP35-43

Jiménez López, E. C. López Ocaña, G. Bautista Margulis, R. G. Castelán Estrada, M. Guerrero Peña, A. Hernández Barajas, J. R. Torres Balcázar, C. A. De La Cruz Luna, E. Romellón-Cerino, M. J. Solís-Sílvan, R. (2017) Wastewater treatment by constructed wetlands with Thalia geniculata and Paspalum paniculatum in a tropical system of Mexico. International Journal of Sustainable Development and Planning. 12(1), 42-50 DOI: 10.2495/SDP-V12-N1-42-50 DOI: 10.2495 / SDP-V12-N1-42-50

Khairalla, A, Xiwu, L, Ladu, J y Wenbo, Z. (2016). Performance Analysis of The Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland Under Different Hydraulic Loading Rates for Rural Domestic Wastewater Treatment. Environment Protection ingineering., 42 (4), 102-121. DOI: 10.5277/epe160409

López, G., Torres, C. A., Bautista, R. G., Hernández, J. R., Cruz, E. y Ferrer, M. I. (2014). Diseño de sistemas experimentales de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial. En Contreras SWM (ed). Perspectiva Científica desde la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Primera Edición. Tabasco México. pp: 133-146.

López Ocaña, Gaspar. Bautista Margulis, Raúl Germán. Ramos Herrera, Sergio.Torres Balcazar, Carlos Alberto. López Vidal, Rocío. Pampillón González, Liliana. (2018). Phytoremediation of wastewater with thalia geniculata in constructed wetlands: Basic pollutants distribution. WIT Transactions on Ecology and the Environment. 228, 53-63

Luna Pabello, Víctor Manuel; Ramírez Carrillo, Héctor Faustino (2004) Medios de soporte alternativos para la remoción de fósforo en humedales artificiales. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 20 (1) 31-38, https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37020104

Marín-Muñiz, J. L. (2017). Humedales construidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reúso del agua. Agroproductividad, 10(5).

Márquez-Reyes Julia Mariana, Valdés-González, García-Gómez Celestino, Rodríguez-Fuentes Humberto, Gamboa- Delgado Julián, Luna-Olvera Hugo, (2020) Evaluación de los efectos sinérgicos de cromo y plomo durante el proceso de fitorremediación con berro (Nasturtium officinale) en un humedal artificial with watercress (Nasturtium officinale) in an artificial wetland. Biotecnia, 22 (2). DOI: 10.18633/biotecnia.v22i2.1259

Pazmiño, P y Jaramillo,T (2019) Sistema de siembra utilizando el cultivo de banano (Musa

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

paradisiaca, en la hacienda la Gema del cantón Baba UTB, 2019). http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/6025

Polo Salazar Rosario Adriana, Huamán Carranza Martín Miguel, Flores Albornoz Judith Isabel, Carlos Borromeo y Dávila Paredes César Manuel. (2018). Eficiencia de la Unidad Básica de Saneamiento empleando humedales artificiales con especies nativas para la depuración de aguas residuales en el centro experimental Tuyu Ruri – Marcara, Aporte Santiaguino. 11(2), 2018: 237- 250. DOI: doi.org/10.32911/as.2018.v11.n2.578

Rivera, P., Chávez, R., y Rivera-Salinas, F. (2018). Avances y limitantes en el tratamiento del agua residual del estado de Zacatecas. Tecnología y Ciencias del Agua, 9(1), 113-123, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-08

Rodríguez-Miranda, J. P., Gómez, E., Garavito, L., & López, F. (2010). Estudio de comparación del tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lentejas y buchón de agua en humedales artificiales. Tecnologia y Ciencias del Agua, 59-68.

Soler, C., Crespi, R., Soler, E., Pugliese, M. (2018). Performance of free water surface flow constructed wetland with floating aquatic macrophytes. Ingeniería del agua, 22(2), 69-78. DOI: 10.4995/ia.2018.8596

Solís Silván, R., López Ocaña, G., Bautista Margulis, R. G., Hernández Barajas, J. R., y Romellón Cerino, M. J. (2016). Nota de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de contaminantes de aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación macrófita. Interciencia, 41 (1), 40-47. ISSN: 0378-1844. Recuperado de: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=339/33943362007

Tejeda, A., López, Z., Rojas, D., Reyna, M. Z., Barrera, A., y Zurita, F. (2015). Eficiencia de tres sistemas de humedales híbridos para la remoción de carbamazepina. Tecnología y ciencias del agua, 6(6), 19-31. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000600019&lng=es&tlng=es.

Terán, L. V. (2014). Principio de Arquímedes. Vida Científica Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 4, 2(3).

Upadhyay, A., Bankoti, N., Rai, U. (2016). Studies on sustainability of simulated constructed wetland system for treatment of urban waste: Design and operation. Journal of Environmental Management. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.0

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

Capítulo 2. Aguas residuales domésticas tratadas con *Sagittaria latifolia* en humedales artificiales

2.1. Resumen

Los humedales artificiales son alternativas viables de fácil operación y mantenimiento con remoción de múltiples contaminantes. Se evaluó el desempeño de *Sagittaria latifolia* en humedales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de contaminantes básicos en aguas domésticas. Se establecieron 12 humedales, tres libres con especie y tres sin especies, tres subsuperficial con especie y tres sin especies, con tiempos de retención de 6.7 días para los libres y de 3.5 días para los subsuperficiales. Se determinaron parámetros de control. Los subsuperficiales con especie presentaron en el efluente turbiedad de 4.4±0.8 UNT, color de 143.9±27.4 UC y 33.9±25.7 mg/L de DQO, mientras que los libres con especie presentaron turbiedad de 10.1±2.8 UNT, color de 346.3±87.0 UC y 74.7±30.0 mg/L de DQO. El humedal con mejor rendimiento fue el subsuperficial con especie, removiendo turbiedad, color y DQO en 95.9, 89.4, 95.7% respectivamente.

Palabras clave: contaminantes básicos, eficiencia de remoción, humedales artificiales de flujo libre, humedales artificiales de flujo subsuperficial, macrófitas.

2.2. Introducción

Los humedales artificiales (HA) se han utilizado en el tratamiento de efluentes domésticos, industriales, agrícolas, lixiviados, hospitalarios, aguas pluviales, entre otros (Van de Moortel *et al*. 2008, Marín-Muñiz 2016, Dires *et al.* 2018); son efectivos en tratamientos de aguas residuales con bajos costos de construcción y operación en comparación con sistemas convencionales debido a su bajo requerimiento de energía y mano de obra, siendo una buena alternativa de tratamiento (Kadlec y Wallace 2009, Snyder 2019). Los HA trabajan con la interacción de vegetación macrófita, microorganismos y medios de soporte, estos últimos pueden ser arcillas o piedra quebrada entre otros materiales, aunque se recomienda utilizar materiales pétreos de la región donde se pretenda instalar (García-Ocaña *et al*. 2019). Los medios de soporte dentro de los HA son colonizados por grandes poblaciones microbianas, las que, al alimentarse, remueven de las aguas residuales sólidos suspendidos, sólidos disueltos, nutrientes, compuestos inorgánicos, compuestos orgánicos putrescibles y sintéticos (Rehmana *et al*. 2018; Wanga *et al*. 2019).

El interés en los HA fue incrementado en las últimas décadas debido a que tienen una rica diversidad de diseños y características operativas que se pueden personalizar para el tratamiento de diversos efluentes, utilizando varios tipos de humedales como los de flujo libre (HAFL), flujo subsuperficial horizontal (HAFS), flujo vertical (HAFV) o diversos tipos de especies (*Phragmites australis, Cyperus difformis, Dracaena sanderiana, Cyperus papyrus, Echinodorus cordifolius, Ludwigia adscendes, Typha augustifolia, Typha latifolia*), enfocados en la remoción de contaminantes (Arivoli y Mohanraj 2013; Saeed *et al*. 2014, Mustapha *et al*. 2018). Las plantas desempeñan un papel estructural y funcional importante, oxigenan el medio para los microorganismos, eliminan

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

contaminantes y nutrientes, proporcionan alimento y hábitats para organismos, entre otros más, pero la cinética de degradación sigue siendo bastante desconocida para cada especie con el tipo de HA utilizado (Pétémanagnan *et al*. 2009). La fitorremediación es la utilización de plantas y árboles para limpiar agua y suelos contraminados, es una técnica pasiva donde en un suelo o agua se cultivan y cosechan plantas para remover contaminantes (metales, plaguicidas, solventes, explosivos, petróleo crudo, hidrocarburos poliaromáticos, lixiviados y contaminantes del agua) aprovechando la energía solar y algunos métodos de limpieza mecánicos (Rock y Jackson 1997, USEPA 1999).

En Perú se evaluó la eficiencia de remoción de contaminantes de 2 humedales artificiales operados con *Shoenoplectus californicus* (totora) y Nasturtion officinale (berros) en efluentes de una granja de cerdos en Huancavelica, teniendo como variable de repuesta demanda química de oxígeno (DQO) y oxígeno disuelto (OD). Obteniendo una remoción del 78.88 % para el humedal operado con totora y 78.91% para el operado con bledos. (Sánchez-Araujo *et al*. 2021). En Canadá se estudiaron las especies *Typha sp*. y *Lemna sp*., en la remoción de fósforo total (PT) y fósforo reactivo soluble (SRP) en un HAFL (durante 5 años) que trataba aguas residuales de la industria láctea (agua de lavado de leche y estiércol líquido), concluyendo que en el humedal influye negativamente el caudal máximo extraordinario y la remoción de PT y SRP fue de 53.7 y 52.7% respectivamente, con TRH se prolongados se pueden remover altas tasas de nutrientes (Wood *et al*. 2008).

En Karnataka, India, las especies *Pennisetum pedicellatum* y *Cyperus rotundus* se evaluaron en HAFS y HAFV a escala piloto, como tratamiento terciario con TRH de 12 h y 24 h, reportando que las eficiencias de eliminación promedio para HAFS y HAFV fueron DBO, 77 y 83%; DQO, 60 y 65%; NH_4^+ –N como amonio, 67 y 84.47%; NO_3 – N como amonio, 69 y 66.75%; y PO_4 – P como fósforo, 85 y 90%, respectivamente, siendo superior el HAFV en un 7.14% (Talla *et al*. 2019).

En Tabasco, México, HA a escala piloto alimentados con agua residual doméstica, operaron con diferentes especies (*Thypa latifolia*, *Paspalum paniculatum*, *E. crassipes* y *C. articulatus*) y tipo de humedal (HAFL y HAFS), observándose que cada especie tiene su propia capacidad de fitorremediación (Solís *et al.* 2016), por lo que es importante evaluar/estimar el potencial de *Sagittaria latifolia* para su uso en el saneamiento de aguas residuales. En el sureste de México hay información disponible sobre abundancia y distribución de especies que se encuentran establecidas en humedales naturales y que pueden ser aprovechadas en el tratamiento de aguas residuales, particularmente en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla (Bueno, Álvarez y Santiago, 2005). *Sagittaria latifolia* en particular presenta pocos estudios en el tratamiento de aguas residuales y se ha evaluado en HAFS como tratamiento terciario (Zachritz y Fuller, 1993), en la remoción de nutrientes (Lenhart, Hunt, y Burchell, 2012) y en HAFL como tratamiento secundario (Gallegos *et al.* 2018), por ello se plantea la posibilidad de aplicar e instalar unidades de HA para familias en comunidades descentralizadas como la situación particular de Centla, Tabasco, que carece de este servicio vital vertiendo aguas residuales a cuerpos

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México.

de agua sin tratamiento alguno. Al implementar *Sagittaria latifolia* que es una planta pequeña de fácil manejo y transporte se pueden disminuir costos de construcción, operación y mantenimiento en unidades familiares. Por lo anteriormente expuesto, en este artículo se evaluó a *Sagittaria latifolia* en la remoción de contaminantes básicos del agua residual doméstica (pH, temperatura, sólidos disueltos totales, color, turbiedad, oxígeno disuelto y demanda química de oxígeno), comparando su eficacia y adaptación en HAFL y HAFS a escala piloto.

2.3. Materiales y Métodos

Selección, colecta y siembra de la especie. La especie se extrajo de humedales naturales de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla (18° 18.952' latitud norte y 92° 32.376' longitud oeste). Se colectaron 40 ejemplares jóvenes de *Sagittaria latifolia (*Cola de golondrina) por cada humedal, siendo tres HAFL y tres HAFS instalados en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol-UJAT) (17° 59.466' latitud norte y 92° 58.438' longitud oeste). Se cuidó de no estropear las especies en el traslado y en la siembra bajo recomendaciones de Crites y Tchobanouglus (2004) y CONAGUA (2015ª). De los 40 ejemplares colectados sólo fueron sembrados 15 en cada HA (los de mayor tamaño y buena salud) siendo colocados en cinco filas con tres plantas. En los HA se colocó una masa total de plantas (promedio ± DE) de 24.3±1.6 kg, las 90 plantas del estudio presentaron altura del tallo de 114.5±0.8 cm, ancho de hoja 20.67± 2.3 cm, largo de hoja 23.10±8.4 cm y humedad de 61±5%. Los ejemplares se colocaron dentro de los HA para su adaptación durante 25 días suministrándoles agua residual doméstica de DACBiol-UJAT, observando sobrevivencia y adaptación a las nuevas condiciones que fue expuesta monitoreando pH, temperatura, SDT, Color, Turbiedad y DQO. La fase de estabilización duró aproximadamente tres meses, hasta que la especie inició su reproducción. Las plantas muertas y hojarascas que terminan su ciclo de vida son retiradas del HA para evitar la liberación de contaminantes removidos, estas plantas retiradas son renovadas por nuevas que nacen dentro del HA, también se quitan hojas que se ven dañadas evitando la propagación de plagas.

Operación de los HA. Los HA del experimento fueron construidos bajo criterios de López *et al*. (2014), son acero al carbón calibre 10, con dimensiones de 1.2 m de ancho, 2.5 m de largo, 1 m de alto, con capacidad de tratamiento de 200 L/día, el exterior e interior está cubierto por esmalte alquidálico anticorrosivo y en el interior está protegido con impermeabilizante elastomérico, con cinco capas de fibra textil. Todos están equipados con tubería hidráulica de PVC (0.05 m), para distribuir el flujo del agua residual. Los HAFL operaron con un tirante de grava de 0.1 m y los HAFS de 0.5 m, que funciona como soporte de las plantas. La grava mixta (roca de río de canto redondo triturada), presentó un diámetro de 19.5±6.8 mm, densidad de 1480±60 $kg.m^{-3}$ y porosidad (n) de 0.53±0.01. La fuente de agua residual proviene de sanitarios y cafeterías de la DACBIOL-UJAT. El caudal del agua residual fue suministrado del cárcamo-cisterna (unidad de pretratamiento que remueve sólidos sedimentables y suspendidos de mayor tamaño) hasta los dos tanques de distribución de 0.2 m^3 con dos

bombas centrífugas de 1 HP, mediante tubería, válvulas de esfera y adaptadores (pichancha, uniones roscas, codos, uniones T) de PVC de 1" tipo hidráulico. Los tanques tenían la función de distribuir el agua residual a los HA, siendo llenados tres veces al día (8, 14 y 24 horas). Se verificó y corrigió la tubería para un paso del agua en flujo laminar verificando que la alimentación correspondiera a 0.14 L/ min, donde el número de Reynolds fue ≤ 2300 (Briones y García 2014).

Aforo y muestreo. El aforo del agua residual tratada se realizó al año de operación durante cuatro semanas de lunes a viernes por ser días donde hay carga orgánica por la fuente (alumnado) (del 20 de agosto al 14 de septiembre del 2018), midiéndose cuatro veces por día, en horarios de 8, 12, 16 y 20 h, el método utilizado fue aforo directo Volumen-Tiempo (Briones y García 2014). El muestreo de calidad del agua se realizó de lunes a viernes a las 11:00 h, bajo lineamientos de la NMX-AA-003 Aguas Residuales-Muestreo. Se tomó una muestra simple de cada punto de muestreo, es decir, en los tanques de distribución (TC1 y TC2), en el efluente de tres HAFL-SL con *Sagittaria latifolia*, en el efluente de tres HAFS-SL con *Sagittaria latifolia* y sus respectivos blancos (tres HAFL-B sin especies y tres HAFS-B sin especies), colectando un total de 14 muestras simples diarias por cuatro semanas, siendo un total de 280 muestras que fueron analizadas en Laboratorio de Tecnología del Agua DACBiol-UJAT, preservándolas conforme a las normas.

Determinación analítica. La determinación de los parámetros de control como la temperatura (°C), turbiedad (UNT), color (UC), oxígeno disuelto (OD, mg/L potencial de hidrógeno (pH), sólidos disueltos totales (SDT, mg/L) y demanda química de oxígeno (DQO; mg/L), fue mediante los métodos SM 2550, SM 2130 B, APHA 2120, SM 4500 OG, SM 9040 B, SM 2540 y USEPA 410.4 respectivamente. Para obtener la temperatura, SDT y pH se utilizó el multiparamétrico HANNA Waterproof Tester modelo HI 98129, para el OD se empleó un HANNA HI 98193, para color un fotómetro LaMotte SMART3, para turbiedad un turbidímetro HANNA HI 98703 y para la DQO un fotómetro HI 83099.

Diseño experimental y análisis estadístico. En esta investigación sólo se buscó ver el desempeño de la planta en el humedal y se planteó un diseño experimental de un factor y dos niveles para analizar los sistemas de tratamiento (tipo de flujo con especie) y sus controles (tipo de flujo sin especie), evaluando las variables temperatura, turbiedad, color, pH, SDT, OD y DQO, de las cuales todas las variables de respuesta resultaron ser datos no paramétricos por no cumplir con los postulados de normalidad y homocedasticidad, ya que el sesgo estandarizado y/o la curtosis estandarizada se encontró fuera del rango de -2 a +2 para los Tratamientos en las variables analizadas. Esto indica algo de no normalidad significativa en los datos, lo cual viola el supuesto de que los datos provienen de distribuciones normales, por lo que se utilizó análisis no paramétrico para encontrar diferencias estadísticas mediante Kruskal-Wallis y el contraste de medianas de Mann-Whitney. Los datos fueron analizados con el software STATGRAPHICS versión 16.1. Se realizaron tres repeticiones por cada tratamiento (Figura 1).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

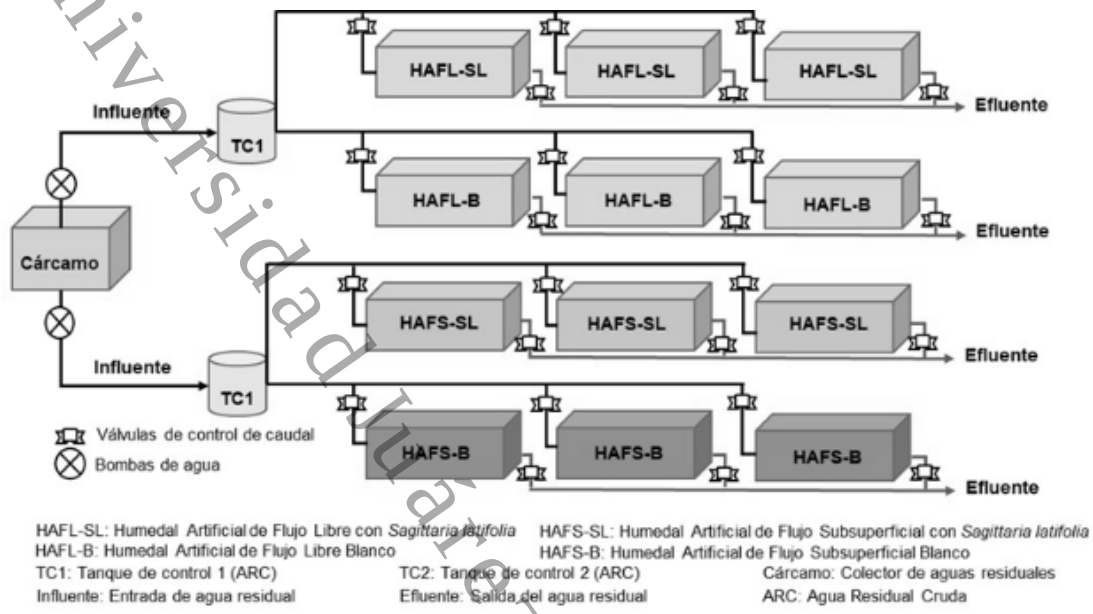


Figura 1. Arreglo de humedales artificiales (HA) en el experimento.

Eficiencia de remoción. La eficiencia de remoción de contaminantes básicos en el tratamiento de aguas residuales se evaluó mediante la medición de los parámetros de respuesta en la entrada y salida de cada unidad experimental, de acuerdo con la ecuación siguiente (García-Ocaña *et al*. 2019):

$$\eta = \left(\frac{C_e - C_s}{C_e} \right) x100$$

Dónde: η = remoción en porcentaje, Ce = concentración promedio de entrada de agua residual, Cs = concentración promedio de salida del agua residual tratada.

Estimación de la constante de degradación cinética "k". El comportamiento del agua residual obedece a una reacción cinética de primer orden (Crites y Tchobanoglous, 2000), se considerará un flujo pistón para ambos tipos de humedales manejados, ya que de acuerdo con Rodríguez-Miranda et. al, (2010) los HAFL se pueden comportar mejor como un reactor de flujo pistón en términos de remoción de materia orgánica de acuerdo con el TRH que se utiliza similar al que se desea utilizar en esta investigación

$$C_e = C_0 e^{-kt}$$

Donde:

t: tiempo de retención para la remoción de DQO (d); C_e: Concentración de DQO en el efluente del reactor (mg/L); C_0: Concentración en el influente; k: Constante de degradación (días^{-1}).

2.4. Resultados

En los HAFL el gasto de operación durante los días hábiles fue de 199.5±2.1 L/día

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

(*promedio ± desviación estándar*), presentándose un valor mínimo de 195.8 L/día y un máximo de 203.8 L/día. Para los HAFS el gasto de operación fue de 201.1±2.1 L/día, presentándose un valor mínimo de 197.3 L/día y un máximo de 204.5 L/día, por lo que el TRH para los HAFL (0.1 m de soporte) fue de 6.7 días y para los HAFS (0.5 m de soporte) fue de 3.5 días. Para el fin de semana (sábados y domingos) el gasto tiende a cero. A continuación, en la Figura 2 se presenta el comportamiento del gasto durante la semana para ambos tipos de HA. La caracterización fisicoquímica obtenida en los tratamientos evaluados y sus controles (TC1: tanque de control 1 agua residual cruda, HAFL-B: humedal de flujo libre con blanco; HAFL-SL: humedal artificial de flujo libre con *Sagittaria latifolia*; TC2: tanque de control 2 agua residual cruda, HAFS-B: humedal de flujo subsuperficial con blanco; HAFS-SL: humedal artificial subsuperficial con *Sagittaria latifolia*), fue comparada entre todos con la finalidad de verificar las concentraciones de influente-efluente y que tratamientos presentaron mayor remoción de contaminantes.

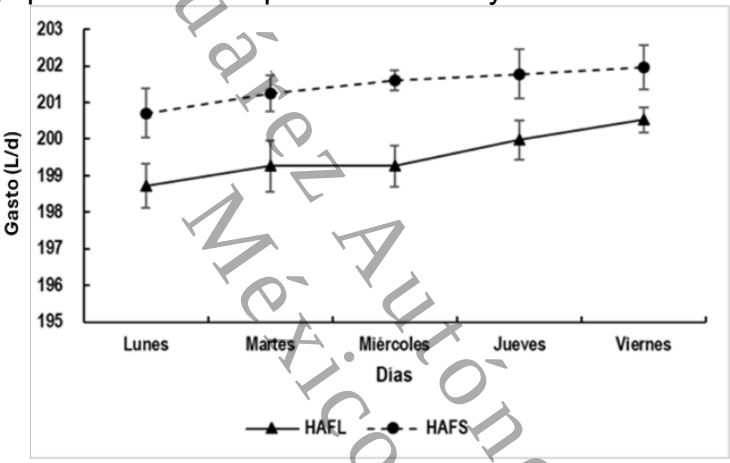


Figura 2. Gasto de operación promedio (X) ± error estándar (ES) en los humedales artificiales de flujo libre HAFL y humedales artificiales de flujo HAFS (N=20).

La característica general del agua residual que abasteció los experimentos presentó una temperatura de 27.3±0.8 °C, turbiedad de 103.3±27.1 UNT, color de 1,349.3± 225.2 UC, OD de 0.6±0.3 mg/L, pH de 8.3±0.2, SDT de 699.5± 85.9 mg/L y DQO de 755.7±198.5 mg/L. En la Tabla 4 se presentan los valores por tanque de control y efluentes de los HAFS y HAFL con sus respectivos blancos.

Tabla 4. Valores promedio ± DE de las unidades experimentales: agua residual cruda, HA con especies y sin especies.

Parámetro	Unidad	Tanque de control 1		HAFL-SL		HAFL-B	
		X	***±DE***	***X***	***±DE***	***X***	***±DE***
T. Agua	° C	27.4	0.5	24.7	0.9	24.3	0.6
Turbiedad	UTN	99.3	14.2	10.1	2.8	67.7	14.7
Color	UC	1341.9	120.8	346.3	87	1,370.40	260.9
OD	Mg/L	0.6	0.2	4.5	0.7	6.8	2.2
pH	UpH	8.3	0.1	8.1	0.1	8.4	0
CE	µS/cm	1407.8	117.5	878.6	118	960	209.7

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

SDT	Mg/L	706.7	58.2	442.7	54.1	481.7	103.4
DQO	Mg/L	725.3	174.7	74.7	30	521.1	266

Parámetro	Unidad	Tanque de control 2		HAFS-SL		HAFS-B	
		X	***±DE***	***X***	***±DE***	***X***	***±DE***
T. Agua	° C	27.3	0.6	27	0.4	27.1	0.4
Turbiedad	UTN	107.2	14.1	4.4	0.8	13.1	10.5
Color	UC	1356.8	162.4	143.9	27.4	227.9	65.3
OD	Mg/L	0.6	0.1	4.3	1	3.1	1.3
pH	UpH	8.4	0	7.9	0.1	8	0.1
CE	µS/cm	1389.5	137.2	985.1	121	988.4	127.9
SDT	Mg/L	693.8	72.4	493.1	60.4	496.5	67.1
DQO	Mg/L	786	220.1	33.9	25.7	102.2	58.1

Los resultados del análisis estadístico del experimento nos muestran que en la temperatura se encontró una diferencia estadística significativa entre las medianas ($p<0.05$). El tratamiento HAFL-B presentó el valor mediano más bajo con 24.65 °C, seguido del HAFL-SL con 24.7 °C, mientras que el valor más alto fue TC2 con 27.0 °C (Figura 3).

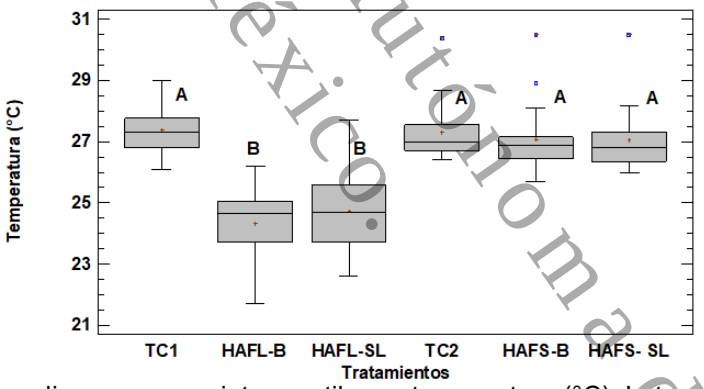


Figura 3. Valores medianos ± rango intercuartil para temperatura (°C). Letras diferentes indican diferencias significativas (Kruskal-Wallis; $p<0,05$) con un 95% de confianza estadísticamente significativas entre los tratamientos.

En el pH ($p<0.05$), el tratamiento HAFS- SL presentó el valor mediano más bajo con 7.9, seguido del HAFS-B con 8, mientras que el valor más alto es el tratamiento HAFL-B un pH de 8.48 (Figura 4).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

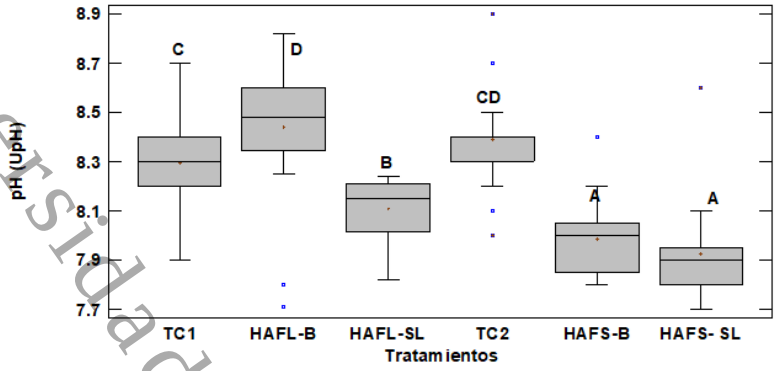


Figura 4. Valores medianos ± rango intercuartil para pH (UpH). Letras diferentes indican diferencias significativas (Kruskal-Wallis; p<0,05) con un 95% de confianza estadísticamente significativas

En los SDT (p<0.05), el tratamiento HAFL-SL presentó el valor mediano más bajo con 460.0 mg/L, seguido del HAFS-B con un valor mediano de 486.5 mg/L, mientras que el valor más alto es TC1 con 690.5 mg/L (Figura 5).

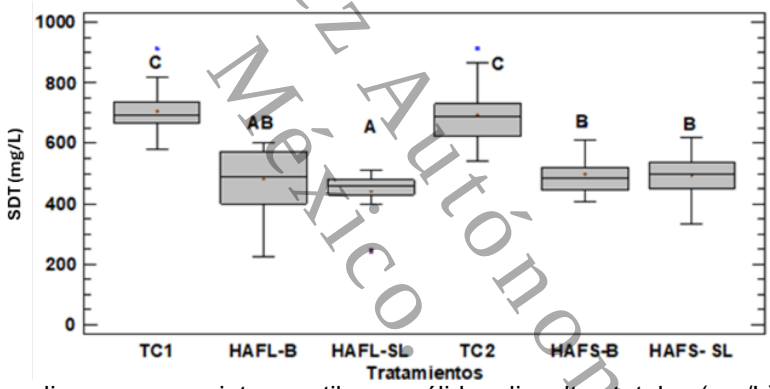


Figura 5. Valores medianos ± rango intercuartil para sólidos disueltos totales (mg/L). Letras diferentes indican diferencias significativas (Kruskal-Wallis; p<0,05) con un 95% de confianza estadísticamente significativas entre los tratamientos.

La turbiedad y color también presentaron una diferencia estadística (p<0.05). El tratamiento HAFS-SL presentó el valor mediano más bajo de turbiedad con 3.15 UNT, seguido del HAFS-B con 7.35 UNT, mientras que el valor más alto es el tratamiento TC2 con 102.0 UNT (Figura 6).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

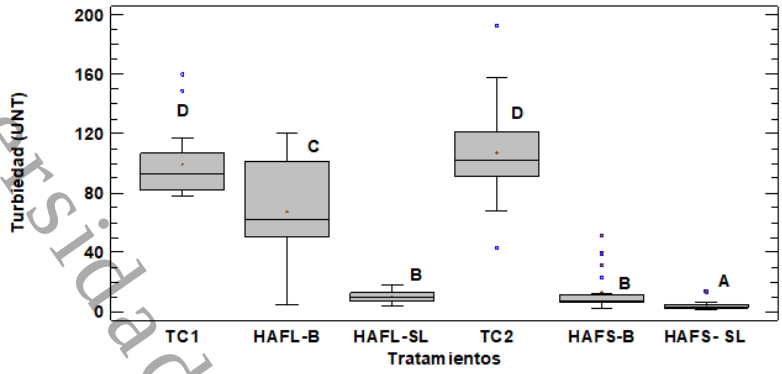


Figura 6. Valores medianos ± rango intercuartil para turbiedad (UNT). Letras diferentes indican diferencias significativas (Kruskal-Wallis; p<0,05) con un 95% de confianza estadísticamente significativas entre los tratamientos.

El tratamiento HAFS-SL presentó el valor mediano más bajo de color con 116.0 UC, seguido del HAFS-B con 196.0 UC, mientras que el valor más alto es el tratamiento TC2 con 1345.5 UC (Figura 7).

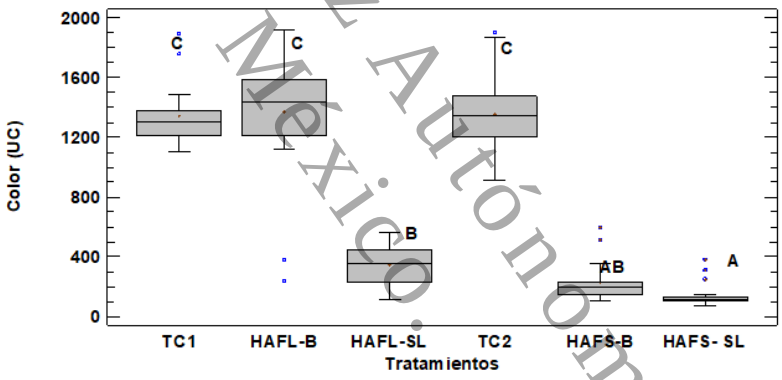


Figura 7. Valores medianos ± rango intercuartil para color (UC). Letras diferentes indican diferencias significativas (Kruskal-Wallis; p<0,05) con un 95% de confianza estadísticamente significativas entre los tratamientos.

El OD (p<0.05), reveló que el tratamiento HAFL-B presentó el valor mediano más alto con 6.55 mg/L, seguido del HAFS-SL con 4.2 mg/L, mientras que el valor más bajo es TC2 y TC1 con 0.6 mg/L (Figura 8).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

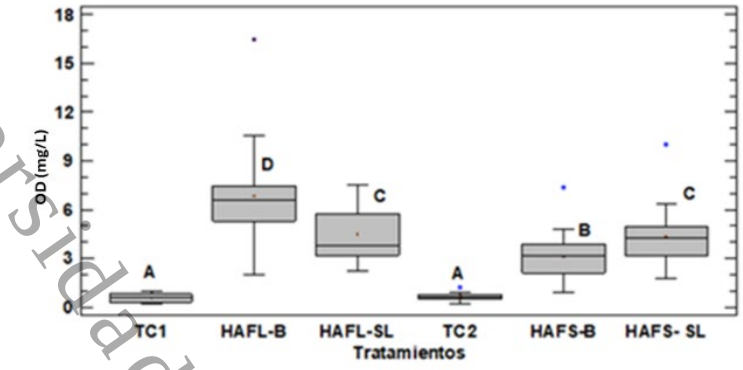


Figura 8. Valores medianos ± rango intercuartil para oxígeno disuelto (mg/L). Letras diferentes indican diferencias significativas (Kruskal-Wallis; p<0,05) con un 95% de confianza estadísticamente significativas entre los tratamientos.

Finalmente, para el parámetro DQO (p<0.05) se encontró que el valor mediano más bajo fue en el tratamiento HAFS-SL con 24.5 mg/L, seguido del tratamiento HAFL-SL con 72.5 mg/L, con el tratamiento HAFS-B con 82.0 mg/L. El tratamiento con mayor valor fue el TC2 con 769 mg/L (Figura 9).

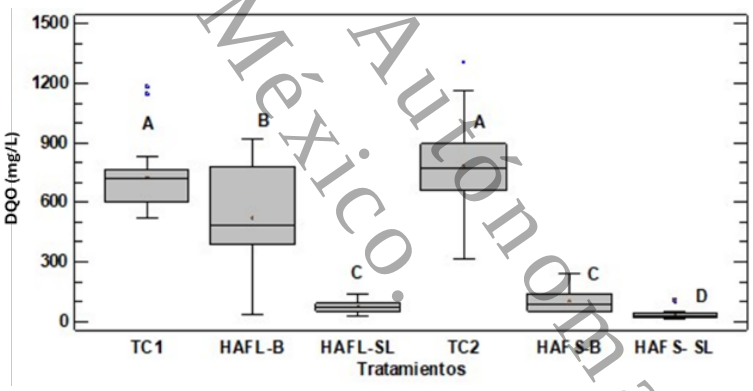


Figura 9. Valores medianos ± rango intercuartil para la demanda química de oxígeno (mg/L). Letras diferentes indican diferencias significativas (Kruskal-Wallis; p<0,05) con un 95% de confianza estadísticamente significativas entre los tratamientos.

La eficiencia de remoción de turbiedad y color en los HAFL es alta en los humedales con especie (HAFL-SL) siendo 89.8 y 74.4% respectivamente. Los HAFL-B alcanzaron 31% en turbiedad y se incrementó el color el efluente por la presencia de algas siendo la eficiencia negativa de -2.1%. La remoción de turbiedad y color en los HAFS fue mayor en los humedales con especie (HAFS-SL) siendo 95.9 y 89.4% respectivamente. Los HAFS-B alcanzaron 87.8% en turbiedad y 83.2% en color. En cuanto a la DQO, se reporta mayor remoción en HAFS-SL con 95.7%, seguido del HAFL-SL con 89.7% y en el caso de los blancos el HAFS-B alcanzó 87% y el HAFL-B sólo 28.1%. Los demás parámetros evaluados en los HA se presentan en la Tabla 5 observándose que la remoción de contaminantes es mayor en los HAFS, con excepción del parámetro OD que es mayor en el HAFL-B pues fue favorecido por la presencia de algas.

Tabla 5. Eficiencia de remoción en humedales artificiales de flujo libre (HAFL) y humedales artificiales

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

de flujo subsuperficial (HAFS) con y sin Sagittaria latifolia. Valores promedio (N=20).

Parámetro	ER (%) HAFL-SL	ER (%) HAFL-B	ER (%) HAFS-SL	ER (%) HAFS-B
T. Agua	9.6	11.1	1.1	1
Turbiedad	89.8	31.8	95.9	87.8
Color	74.2	-2.1	89.4	83.2
OD	-704.1	-1123.4	-595.2	-403.5
pH	2.2	-1.8	5.3	4.7
SDT	37.4	31.8	28.9	28.4
DQO	89.7	28.1	95.7	87

Constantes cinéticas

Las constantes cinéticas de remoción se encuentran en la tabla 6, donde se puede observar que el mejor comportamiento cinético para las variables color, turbiedad y DQO se presenta en los humedales de flujo subsuperficial, los cuales observan un comportamiento de flujo pistón

Tabla 6. Constantes cinéticas de remoción en humedales artificiales de flujo libre (HAFL) y humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFS) con y sin Sagittaria latifolia.

		Color	Turbiedad	DQO
	TRH, días	k, días^{-1}	k, días^{-1}	k, días^{-1}
HAFL-SI	6.7	0.2	0.34	0.34
HAFS-SI	3.52	0.64	0.91	0.89
HAFL-T	6.7	-0.003	0.06	0.05
HAFS-T	3.52	0.51	1.49	1.45

2.5. Discusión

Para evaluar el desempeño en sistemas de tratamiento de aguas residuales se estima la eficiencia de remoción (García-Ocaña *et al*. 2019), si la eficiencia se reporta negativa (-), significa que la concentración del contaminante es mayor en el efluente (salida) que en el influente (entrada), lo cual es favorable en el OD, pues significa que las macrófitas han suministrado oxigeno favoreciendo la degradación, incrementando la concentración de OD en el humedal (Delgadillo *et al.* 2010), pero en otros parámetros representa problemas y el fenómeno es conocido como “corto circuito” e involucra un descontrol del proceso (incrementando de caudal, velocidad de arrastre o concentración) debiendo corregirse para que la concentración en el efluente sea menor al de entrada como se prevé en su diseño (CONAGUA 2015[b]). Wang *et al*., (2021) asegura que estos problemas son causados por factores como la carga orgánica y la porosidad del sustrato.

La temperatura del agua residual del influente fue de 27.3±0.8 ° C, presentando en los HAFL-SL y HAFL-B 24.7±0.9 y 24.3±0.6 °C, mientras que los HAFS-SL y HAFL-B presentó 27.0±0.4 y 27.1±0.4 °C respectivamente. Estos valores son ideales para eliminar materia orgánica soluble y suspendida (Crites y Tchobanoglous 2004) ya que la temperatura influyes favorablemente en los procesos favorecidos por microorganismos

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

como los humedales artificiales (Mora *et al.* 2020), se favorece el crecimiento de organismos mesófilos, los cuales tienen un desarrollo metabólico adecuado a esa temperatura realizando muchas funciones biogeoquímicas como nitrificación, desnitrificación y asimilación de P (Vymazal 2007; Fan *et al*. 2016). De esta manera la temperatura cumplió con el límite máximo permisible (LMP) en su descarga a cuerpos receptores la cual es de 40 °C según se establece en la NOM-001-SEMARNAT-2021 (SEMARNAT 2022).

Los HAFS con *Sagittaria latifolia* presentaron los valores más bajos de efluentes de color y turbiedad de hasta 143.9±27.4 UC y 4.4±0.8 NTU, mientras que los HAFL con especie presentaron 346±87 UC y 10.1±2.8 UNT. Los HAFS-B por los microrganismos fijados al medio de soporte alcanzaron una remoción alta con 232±65 UC y 13.1±10.5 UNT en su efluente. El color y la turbiedad se relacionan con sólidos en suspensión en el agua residual, en tal sentido, el medio de soporte cumple una función filtrante de estos sólidos reteniéndolos por adhesión por la formación de biopelícula (López *et al*. 2019), mientras que el mismo flujo por su baja velocidad permite la sedimentación, lo que favorece a los HAFS para tener un rendimiento de 95.9% para turbiedad y 89.4% para color, en el caso de los HAFL se incrementó el color y turbiedad como consecuencia del crecimiento de algas en el sistema (USEPA 1998). La turbiedad y color son parámetros no regulados por la NOM-001-SEMSARNAT-2021 (SEMARNAT 2022), sin embargo, son necesarios en el control de una planta de tratamiento (Crites y Tchobanoglous 2004).

Las macrófitas están adaptadas a crecer en medios saturados por agua o en el agua debido a que tienen desarrollado un sistema de grandes espacios aéreos internos, estos suministran aire desde la atmósfera hacia las raíces y rizomas, proveen buenas condiciones para la filtración física y una superficie grande para el crecimiento microbiano adjunto, favoreciendo la transferencia de oxígeno a la rizósfera, aunque las estimaciones sobre la cantidad de esta transferencia de oxígeno varían en un amplio rango por especies (Delgadillo *et al.* 2010). Favorecen el proceso de purificación del agua, participando en el ciclo de asimilación de nutrientes, producción de gas y control de enfermedades (Thomaz, S.M. 2021). Niha *et al*., (2022) sugiere que estos efectos son debido a la influencia de las macrófitas sobre las comunidades microbianas.

El OD establece el ambiente microbiano, siendo anaerobio a concentraciones bajas (0 y 2.5 mg/L) como en el agua de entrada a los HA (TC1 0.6±0.2 mg/L y TC2 0.6±0.2 mg/L) (Saeed y Sun, 2011), los HAFL-SL y HAFL-B presentaron de 4.5±0.7 mg/L y 6.8±2.2 mg/L respectivamente, mientras que los HAFS-SL y HAFS-B presentaron concentraciones de 4.3±1.0 mg/L y 3.1±1.3 mg/L. Los resultados de OD obtenidos son mayores a los reportados por Saeed *et al*. (2014), quienes trataron agua residual municipal en HAFV, humedales artificiales flujo horizontal (HAFH) y humedales de flujo flotante superficial (FLOT) con vegetación combinada (*Phragmites australis, Cyperus difformis, Dracaena sanderiana, Cyperus papyrus, Echinodorus cordifolius* y *Ludwigia adscendes*) y TRH de 4 d, 8 d y 6.8 d, respectivamente, obteniendo 0.1, 0.13 y 0.17 mg/L de OD en los efluentes de los HA respectivos.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México. Derechos Reservados.

El pH es responsable del desarrollo de microorganismos, biota y asociado a estos la degradación de los contaminantes y pueden verse afectados por cambios ácidos o alcalinos. En este estudio los efluentes de HA presentaron valores de 7.9 a 8.4 cumpliendo con LMP de la NOM-001-SEMARNAT-2021 que establece un intervalo de 6.5 a 10 para descarga en bienes nacionales (SEMARNAT 2022). Los HA presentaron influentes alcalinos (TC1 con pH de 8.3 y TC2 con pH de 8.4) y los efluentes de los tratamientos tienden a la neutralidad y son considerados como ligeramente alcalinos (HAFL-SL 8.1±0.1 y HAFS-SL 7.9±0.1), estos valores no mostraron un efecto negativo en la adaptabilidad de los HA, pues las plantas no presentaron mortandad y continuaron su reproducción (Hadad *et al*. 2006). Los resultados de este estudio comparados con los de Winanti *et al*. (2017), son muy similares, ya que ellos evaluaron un HAFS con *Canna Sp.*, obteniendo valores de neutros de 7.0 con agua inicial de 8.15 y proponen este valor estándar en el tratamiento de aguas residuales en universidades o colegios en Indonesia.

En cuanto los SDT el influente presentó valores más altos que los HAFL, siendo estos los que alcanzaron mayor remoción, pues el HAFL-SL removió 37.4% respectivamente, el HAFL-B removió 31.8%. En cuanto a los HAFS-SL presentaron menor remoción con 28.9% para SDT, siendo las remociones más bajas en el HAFS-B con 28.4% para SDT. Estos valores que lograron disminuir son sales inorgánicas disueltas (Hadad *et al*. 2006) y no puede ser mayor la remoción debido a que los HA no cuentan con TRH prolongados para favorecer la eliminación de iones o nutrientes combinados con el efecto temperatura (Mietto *et al*. 2015). Los valores de SDT en los efluentes de nuestro estudio están dentro de lo permitido para descarga en riego (440 a 500 mg/L), ya que la concentración de SDT que no tiene efectos nocivos en ningún cultivo es de 500 mg/L (DOF 1989).

Se ha reportado que en HAFS la eliminación de DQO es alta llegando hasta del 90%, principalmente por procesos de sedimentación y degradación de materia orgánica degradable y biodegradable tanto en agua como en la superficie del sustrato (Delgadillo *et al*. 2010). La DQO se encuentra propuesta en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 (SEMARNAT 2021), donde el valor más estricto para este parámetro es de 60 mg/L para riego de áreas verdes, valor que se cumple satisfactoriamente en el tratamiento HAFS-SL con 33.9±25.7 mg/L, mientras que el HAFL-SL alcanzó 74.7±30.0 mg/L, cumpliendo con el límite permisible en los otros cuerpos receptores. Bedoya *et al*. (2014) trató agua residual doméstica de una escuela superior en Colombia, en dos HAFS con *Typha latifolia* y *Cyperus papyrus*, operando con 9 d de TRH, un gasto de 15 L/d y carga orgánica inicial de 305.4 mg/L de DQO para el caso del humedal con *T. latifolia* y 293.2 mg/L para el humedal con *C. papirus,* obteniendo una remoción de DQO de 53.9% con *T. latifolia* y de 47.9% con *C. papyrus*. Si comparamos otras especies utilizadas en HA en el sureste de México, Solís *et al*. (2016) evaluó el desempeño de *Thypa latifolia* en HAFL, *Paspalum paniculatum* en HAFS, *E. crassipes* en HAFL y *C. articulatus* en HAFS, cuyos TRH para los HAFL fueron de 7.5 d y de 5.5 d para los HAFS. Las eficiencias de remoción y valores medianos (±DE) en el efluente para turbiedad fueron 97.1% (4.1±1.7 UTN), 95.8% (6.0±1.7 UTN), 94.7% (7.6±1.0 UTN) y 85.4% (20.9±2.7

UTN) respectivamente; en el caso de la eficiencia de remoción y valores medianos (±DE) para color los valores fueron 83.4% (236.0±29.4 UC), 84.1% (226.0±69.9 UC), 79.6% (291.0±62.2 UC) y 71.6% (404.5±71.21 UC) respectivamente. Para DQO presentó 97.5% (9.9±48 mg/L), 95.3% (18.9±5.3 mg/L), 93.1% (27.3±8.5 mg/L) y 86% (55,9±9,7 mg/L) respectivamente. En ese sentido la *Sagittaria latifolia* en el mejor tratamiento que es el HAFS-SL presentó rendimientos similares a *Thypa latifolia* pues alcanza 95.9% (3.15 UTN) de remoción turbiedad, 89.4% (116.0 UC) y para DQO 95.7% (33.9±25.7 mg/L).

2.6. Conclusiones

Podemos concluir que la especie *Sagittaria latifolia* es factible de implementar en HA para el tratamiento de aguas residuales en comunidades descentralizadas como las presentes en la RBPC y el sureste de México. Es una especie con buena abundancia en la zona que puede disminuir costos de operación y mantenimiento por su disponibilidad, tamaño y manejo. Los parámetros de control de procesos permiten que el tratamiento sea monitoreado con menor costo y ahorro en el tiempo de análisis permitiendo conocer el desempeño y calidad del agua tratada el mismo día del monitoreo. Él mejor rendimiento fue en el HAFS-SL con *Sagittaria latifolia*, con remociones de turbiedad, color y DQO de 95.9, 89.4 y 95.7% respectivamente, los HAFL-SL alcanzaron remociones de 98.8, 74.2 y 89.7% respectivamente. *Sagittaria latifolia* favorece la oxigenación del medio en los HA, pues las concentraciones de OD fueron hasta de 4.3 mg mg/L en el agua tratada y como consecuencia presentó buen desempeño en la remoción los contaminantes básicos. Finalmente *S. latifolia* presenta un mejor manejo por su tamaño que favorece su operación y mantenimiento a diferencia la especie *T. latifolia* que es la más utilizada en la región.

2.7. Referencias

Arivoli A, Mohanraj R (2013) Efficacy of Typha augustifolia based vertical flow constructed wetland system in pollutant reduction of domestic wastewater. International Journal of Environmental Sciences 3: 1497-1508.

Bedoya PJC, Ardila AAN, Reyes CJ (2014) Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la institución universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 30(3): 275-283.

Bueno J, Álvarez F, Santiago S (2005) Biodiversidad del Estado de Tabasco. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Universidad Nacional Autónoma de México.

Briones Sánchez G, García Casillas I (2014) Aforo del agua en canales y tuberías. Tercera Edición. Editorial Trillas. México. 100p.

CONAGUA (2015a) Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales artificiales 30. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. México. 134p.

CONAGUA (2015b) Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Pretratamiento y tratamiento primario 46. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

82p.
Crites R, Tchobanoglous G (2004) Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. McGraw-Hill Interamericana, S.A. Bogotá, Colombia. 776p.
Delgadillo O, Camacho A, Pérez L, Andrade M (2010) Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Cochabamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA). Cochabamba, Bolivia.105p.
Dires S, Birhanuc T, Ambelud A, Sahilua G (2018) Antibiotic resistant bacteria removal of subsurface flow constructed wetlands from hospital wastewater. Journal of Environmental Chemical Engineering 6: 4265–4272.
DOF (1989) Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Aguas CE-CCA-001/89. Diario Oficial de la Federación, miércoles 13 de diciembre de 1989. Semarnap, Comisión Nacional del Agua, con base en: Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología.
Fan J, Zhang J, Ngoc HH, Guo W, Yin X (2016) Improving low-temperature performance of surface flow constructed wetlands using Potamogeton crispus L. plant. Bioresource Technology 218: 1257-1260.
García OJA, López OG, Torres BCA (2019) Evaluación de medios de soporte en humedales artificiales con vegetación Sagittaria latifolia en la remoción de contaminantes básicos. CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias 8: 16 - 51.
Gallegos RJ, López OG, Bautista MRG, Torres BCA (2018) Evaluation of free flow constructed wetlands with Sagittaria latifolia and Sagittaria lancifolia in domestic wastewater treatment. Ingeniería Agrícola y Biosistemas, 10(2), 49–65.
Hadad HR, Maine MA, Bonetto CA (2006) Macrophyte growth in a pilot scale constructued wetland for industrial wastewater treatment. Chemosphere 63: 1744-1753.
Kadlec RH, Wallace SD (2009) Treatment wetlands, 2nd ed. CRC Press, USA. 336p.
Lenhart HA, Hunt WF, Burchell MR (2012) Harvestable nitrogen accumulation for five storm water wetland plant species: trigger for storm water control measure maintenance Journal of Environmental Engineering-Asce, 138(9), 972-978.
López OG, Torres BCA, Bautista MRG, Hernández BJR, Gutiérrez BJJ, de la Cruz LE, Ferrer SMI (2014) Diseño de sistemas experimentales de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial. En Contreras SWM (ed). Perspectiva Científica desde la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Primera Edición. Tabasco México. pp: 133-146.
López OG, Bautista MRG, Valdés MA, Torres BCA, López RV, Pérez SE, Pampillón GL (2019) Spatial distribution behavior of basic pollutants in a subsurface-flow wetland with Thalia geniculata. International Journal of Environmental Impacts. 2(2): 145-160.
Marín-Muñiz JL (2016) Remoción de contaminantes de aguas residuales por medio de humedales artificiales establecidos en el municipio de Actopan, Veracruz, México. Revista Mexicana de Ingeniería Química 15: 553-563.
Mietto A, Politeo M, Breschigliaro S, Borin M (2015) Temperature influence on nitrogen removal in a hybrid constructed wetland system in northern Italy. Ecological Engineering 75: 291-302.
Mora O CDL, Saucedo T RA, González A IJ, Gómez RS, Flores LHE. (2020). Efecto de la

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

temperatura del agua sobre la constante de velocidad de reacción de los contaminantes en un humedal construido para el tratamiento de aguas residuales porcícolas. Revista mexicana de ciencias pecuarias, 11(Supl. 2), 1-17. Epub 30 de junio de 2020.https://doi.org/10.22319/rmcp.v11s2.4681

Mustapha HI, van Bruggen JJA, Lens PNL (2018) Optimization of petroleum refinery wastewater treatment by vertical flow constructed wetlands under tropical conditions: Plant species selection and polishing by a horizontal flow constructed wetland. Water Air Soil Pollution 229: 137-154.

Niha Mohan Kulshreshtha, Vishesh Verma, Abhishek Soti, Urmila Brighu, Akhilendra Bhushan Gupta. (2022). Exploring the contribution of plant species in the performance of constructed wetlands for domestic wastewater treatment. Bioresource Technology Reports, 18. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101038

Pétémanagnan OJM, Lacina C, Tiho S, Gourène G (2009) Comparison of macrofauna communities in sediments of the beds of vertical flow constructed wetlands planted with Panicum maximum (Jacq.) treating domestic wastewater. Ecological Engineering 35: 1237-1242.

Rehmana K, Imrana A, Amina I, Afzal M (2018) Inoculation with bacteria in floating treatment wetlands positively modulates the phytoremediation of oil field wastewater. Journal of Hazardous Materials 349: 242–251.

Rock S, Jackson L (1997) Phytoremediation of organics Action Team. EPA 542-F-97-014.

Saeed T, Al- Muyeed A, Afrin R, Rahman H, Sun G (2014) Pollutant removal from municipal wastewater employing baffled subsurface flow and integrated surface flow-floating treatment wetlands. Journal of Enviromental Sciences 26: 726–736.

Saeed T, Sun G (2011) The removal of nitrogen and organics in vertical flow wetland reactors: Predictive models. Bioresource Technology 102: 1205–1213.

SEMARNAT (2022) Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 5 de enero de 2022. México. 15p.

Sánchez Araujo , V. G., Palomino Pastrana , P. A., & Malpartida Yapias , R. J. (2021). Eficiencia de humedales artificiales de totora y berros sobre efluentes de granja porcícola, Perú. Revista Alfa, 5(14), 192–203. https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i14.110

Solís SR; López OG; Bautista MRG; Hernández BJR; Romellón CMJ (2016) Evaluación de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de contaminantes de aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación macrófita. Interciencia, 41, 1: 40-47.

Snyder BF (2019) The inclusion of ecosystem service valuations in bioenergy cost analysis: A case study of constructed wetlands in the neotropics. Ecological Economics 156: 196–201.

Thalla AK, Devatha CP, Anagh K, Sony E (2019) Performance evaluation of horizontal and vertical flow constructed wetlands as tertiary treatment option for secondary effluents. Applied Water Science 9: 1-9

Thomaz, S.M. (2021). Ecosystem services provided by freshwater macrophytes.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Hydrobiologia. https://doi.org/10.1007/s10750-021-04739-y

USEPA (1998) Design Manual. Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal water treatment. EPA/625/1-88/022. United States Environmental Protection Agency Office of Research and Development. USA. 92p.

USEPA (1999) Phytoremediation Resource Guide. EPA 542-B-99-003. U.S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation Office Washington, DC 20460. 56p.

Van de Moortel AMK, Rousseau DPL, Tack FMG, De Pauwc N (2008) A comparative study of surface and subsurface flow constructed wetlands for treatment of combined sewer overflows: A greenhuose experiment. Ecological Engineering 35:175-183.

Vymazal J (2007) Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. Science of the Total Environment 380: 48–65.

Wang, H., Sheng, L., & Xu, J. (2021). Clogging mechanisms of constructed wetlands: A critical review. Journal of Cleaner Production, 295, 126455. https://doi:10.1016/j.jclepro.2021.126455

Wanga R, Zhaoa X, Liub H, Wua H (2019) Elucidating the impact of influent pollutant loadings on pollutants removal in agricultural waste-based constructed wetlands treating low C/N wastewater. Bioresource Technology 273: 529–537.

Winanti ET, Rahmadyanti E, Fajarwati IN (2018) Ecological approach of campus wastewater treatment using constructed wetland. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 288: 01-09.

Wood JD, Gordon R, Madani A, Stratton GW (2008) A long term assessment of phosphorus treatment by a constructed wetland receiving dairy wastewater. Wetlands 28: 715–723.

Zachritz WH, Fuller JW (1993) Performance of an artificial wetlands filter treating facultative lagoon effluent at Carville, Louisiana. Water Environment Research, 65(1), 46- 52.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Capítulo 3. Comportamiento cinético y modelación de la distribución espacial de contaminantes básicos en un humedal artificial de flujo subsuperficial con *Pontederia cordata*

3.1. Resumen

La contaminación del agua es uno de los problemas ambientales más graves en la actualidad, por lo que es de vital importancia estudiar mejoras en el sistema de tratamiento de aguas residuales. En este trabajo se evaluó la cinética de degradación experimental de contaminantes básicos, así como el comportamiento de su distribución espacial, dentro de un humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFS) con *Pontederia cordata*. Para lograrlo se realizó un diseño factorial con cinco tratamientos a diferentes distancias de siembra dentro del HA (0, 0.42, 1.25, 2.08 y 2.4 m) con tres repeticiones y nueve puntos de muestreo. Los reactores experimentales mostraron un tiempo de retención hidráulica de 4,5 días, tratando 185,1±58,6 L/día de agua residual, con grava de río como medio soporte con un volumen de 0,66±0,05 m^3, porosidad n=56±3,5%, densidad de 2670±19,3. kg/m^3, permitiendo un volumen de agua de 0,1±0,05 m^3. En la fase de evaluación se obtuvo una k de -0,37 días^{-1}, removiendo el 81,8% de DBO_5 y el 70% de turbidez. Con el modelado de la distribución espacial se demostró que la biomasa (microorganismos) adherida al medio de soporte, así como la DBO_5, tienen una disminución significativa relacionada con la distancia dentro del HAFS a lo largo del reactor. La eficiencia de eliminación de contaminantes se presenta desde la distancia de 2,08 a 2,4 m de longitud dentro del humedal experimental.

Palabras claves: BOD_5, Fitorremediación, Aguas residuales, Sistemas de tratamiento, Macrófitas.

3.2. Introducción

Existe una creciente necesidad de mejorar e implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales. Sistemas que sean económicos, fáciles de operar, adaptables a las condiciones climáticas de la zona y que además sean ambientalmente sostenibles. Los humedales artificiales (HA) son sistemas de fitodepuración de aguas residuales, el sistema consiste en el desarrollo de cultivos de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava. La acción de las macrófitas posibilita una serie de reacciones físicas, químicas y biológicas complejas a través de las cuales las aguas residuales afluentes son progresiva y lentamente depuradas (Delgadillo *et al*., 2010).

Si bien la tecnología de HA no es nueva a nivel mundial ya que se han estudiado especies de plantas que eliminan patógenos (Calheiros *et al*., 2017), contaminantes de aguas residuales domésticas (Gallegos *et al.,* 2018; Tran *et al.,* 2019), nitrógeno (Quintero *et al*., 2021) e incluso variantes en los diseños constructivos (García, López y Torres 2019). Destacando entre estos la importancia de determinar la cinética en este tipo de sistemas para conocer a priori la concentración de materia orgánica en el efluente para situaciones de interés. Algunos criterios de diseño y operación del HA establecen que la especie requiere de dos o tres temporadas de crecimiento para alcanzar la máxima eficiencia y

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

la remoción de contaminantes depende del material de soporte y del tiempo de retención hidráulica (TRH), además los HA puede verse influenciados por factores hidrometeorológicos (CONAGUA, 2019).

Romellón *et al*., (2022) evaluaron el efecto de la poda de macrófitos sobre los microorganismos adheridos al medio de soporte y la remoción de DBO_5 en tres humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFS) experimentales con especies de *Phragmites australis* (HAFS -Carrizo), *Pontederia sagittata* (HAFS -Tule) y grava como control (HAFS -Grava). Las unidades experimentales operaron con 3.1 días de retención hidráulica, el mejor tratamiento fue HAFS -Tule: antes de la poda, la biomasa de microorganismos presentó valores medianos (N = 12) de 42931.6 mg/kg (Q1 = 40259.7; Q3 = 54478.4) y después poda 33444.6 mg/kg (Q1 = 31210.9; Q3 = 36581.8), la biomasa vegetal removida en poda fue de 40.85 ± 2.58 kg, se eliminó el 95.44% de DBO_5 con un k = 1.004 días^{-1} (27.6°C), lo que permitió cumplir con NOM-001-SEMARNAT-1996.

Alasino *et al*., (2015), evaluaron un HAFS horizontal con *Cortadeira Selloana* para tratar las aguas residuales generadas por un departamento de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, se estimó la cinética de remoción de DBO_5 asumiendo una reacción de primer orden, utilizaron un tiempo de retención promedio de 11.7 días, del promedio de los k calculados para los meses 18, 21 y 23 obtuvieron un k=0.115 días^{-1} para la remoción de DBO_5. Marín *et al*., (2016), realizaron un estudio con HAFS evaluando dos especies de plantas: *Pontederia cordat*a y *Phragmites australis,* los HAFS fueron alimentados con aguas residuales domésticas, logrando TRH de 7 días. El mejor tratamiento fue el HAFS con *Potenderia cordata* que obtuvo eficiencias de remoción de DBO_5 (95 %), DQO (95 %), NT (94 %), PT (81 %) y SST (94.09 %). Marín-Muñiz, (2016) evaluó 12 microcosmos con *Typha sp*, seis con tepezil (ST) y seis con piedra porosa de río (RPS) de cada uno hubo tres sin plantas que fueron testigo, no se observó efecto significativo en cuanto al tipo de sustrato (P>0.05), las remociones promedio de N-NO3, P-PO4 y DBO_5 fueron (60.3, 55.4 y 80.1) % respectivamente.

México cuenta con 230 sistemas de humedales artificiales (HA) documentados en todo el país, 11 de ellos en el estado de Tabasco (CONAGUA, 2021). Existe una baja cobertura en tratamiento de agua en nuestro estado, pues existe un marcado predominio de la importancia de las tecnologías convencionales y de tratamiento primario cuya eficiencia y costos no han dado los resultados esperados. Los HA, construidos en Tabasco son sistemas combinados de humedales artificiales de flujo libre (HAFL) y humedales artificiales de flujo superficial (HAFS (CONAGUA, 2019). Por esta razón, es necesario buscar sistemas de tratamiento alternativos que sean económicos, fáciles de operar y adecuados a las condiciones climáticas y recursos naturales del estado. Por lo tanto, el propósito de esta investigación fue evaluar el potencial de fitorremediación de aguas residuales utilizando la especie *Pontederia cordata* en HA, analizando su comportamiento en la remoción de contaminantes básicos mediante un modelado físico de la distribución espacial y la determinación de la cinética de degradación en relación con la DBO_5.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México. D.R.

3.3. Materiales y métodos

Unidad experimental. El sistema de tratamiento estuvo conformado por un tanque receptor de aguas residuales con una capacidad de 200 L, más la unidad de tratamiento que es un HAFS. Las unidades fueron construidas en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Los HAFS fueron fabricados con lámina de acero al carbono con un espesor de 0,5 cm, con unas dimensiones de 2,5 m de largo x 1,2 m de ancho x 1,0 m de profundidad, operando con 0,5 m (columna de agua y grava) de largo. Para este diseño se consideró el área mínima necesaria para eliminar DBO, según los criterios de diseño de López *et al*., (2014). En la entrada y salida, se instaló una válvula de flujo para controlar el caudal y para el muestreo de agua durante todo el experimento. El medio de soporte consiste en grava de río con tamaño de grano ~21 mm de diámetro a una profundidad de 50 cm, porosidad de n=56±3.5%, densidad de 2670±19.3 kg/m3, con un volumen de 0.66±0.05 m3, permitiendo un volumen de agua de 0,1±0,05 m^3. La especie vegetal instalada en el HAFS fue *Pontederia cordata*, se plantaron 24 organismos por humedal experimental, los tallos tuvieron 10 cm de altura y la raíz se plantó a cinco cm bajo la superficie del medio de soporte. La especie fue estabilizada en las unidades experimentales por un período de tres meses (desde la siembra hasta el primer ciclo de reproducción). Al finalizar los procesos de tratamiento, las aguas tratadas fueron descargadas a un humedal natural adyacente al sitio, asegurando que cumplan con los límites máximos permisibles para descargas de aguas residuales, En la autorización de derechos de descarga por parte de la CONAGUA, TAB-L-0080-12 -03-13 (CONAGUA, 2013).

Colecta siembra y estabilización de la especie. Las plantas fueron colectadas de una zona de inundación ubicada en las coordenadas 17° 59.219´ N y 92° 57.588´O en Villahermosa, Tabasco, correspondientes a plantas jóvenes completas, incluyendo flores y frutos. Para evitar el estrés de los ejemplares colectados, estos fueron lavados con agua del ambiente natural por un período de 10 días, y luego fueron trasplantados al HAFS. El período de estabilización implicó la siembra de 15 individuos, manteniendo el agua a 0.5 m. Valles y Alarcón (2014), señala que este período puede durar alrededor de tres meses después del cual se forma una película bacteriana en la rizosfera y medio de soporte. La evaluación de la remoción de contaminantes se realiza después de 300 días de operación, especialmente cuando se desea remover metales pesados. Varios autores han reportado que la mejor eficiencia en humedales se logra entre el primer y segundo año (Amabilis *et al*., 2016; Torres *et al*., 2017). El período de experimentación (estabilización y operación) del HAFS comprendió dos años a partir de marzo de 2016. Seguido de una fase de evaluación realizada en mayo de 2018. Por esta razón, recomendamos el análisis después de aproximadamente un año de operación.

Las plantas fueron medidas y pesadas al inicio y al final del experimento, tomando en cuenta hoja, raíz y tallo, esto para comprobar la correcta estabilización y la absorción de nutrientes por parte de la planta.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

Caracterización fisicoquímica. La fase de caracterización del agua (NMX-AA-003-1980) se inició evaluando variables con su respectiva metodología como temperaturas SM 2550 B, turbidez SM 2130 B, CE SM 2510, pH SM 4500 H+, color SM 2120 B, DBO SM 5210 B. La caracterización del medio de soporte se realizó en los puntos de muestreo indicados en la Figura 10. La biomasa presente en las rocas se determinó mediante gravimetría (materia volátil), adaptando el método de sólidos volátiles totales (SVT) (NMX-AA-034- SCFI-2001) a una muestra de roca. La densidad de la partícula y la porosidad del medio soporte se determinaron con base en la NOM-021-RECNAT-2000. El caudal se estimó por el método directo volumen en el tiempo (Briones y García, 2014), monitoreando 10 días durante el horario de operación (5:00 a.m. a 7:00 p.m.).

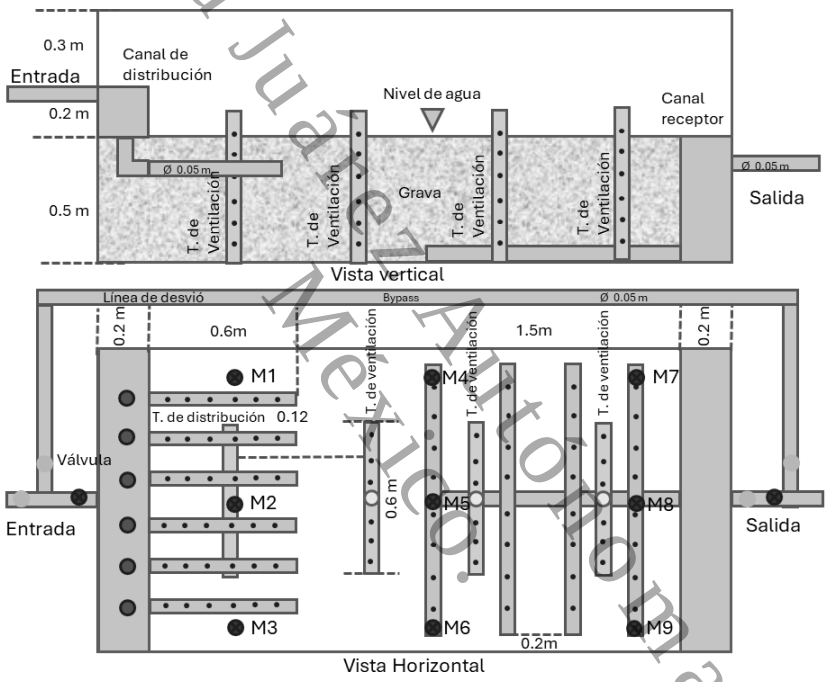


Figura 10. Los puntos de M1 a M9 indican el punto de muestreo en el HAFS. También se midieron los puntos de entrada y salida. Diseño López *et al*., (2014).

Eficiencia de remoción de los contaminantes básicos. Con base en los datos obtenidos, se calculó la eficiencia de remoción en los tratamientos, expresada como porcentaje de remoción, para cada variable observada (García *et al*., 2019), utilizando la Ec. (1):

$$\eta = \left(\frac{C_i - C_o}{C_o} \right) x100$$

Donde: η=remoción (%), Ci=Concentración de entrada del agua residual (mg/L), Co=Concentración de salida del agua residual (mg/L).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Diseño experimental. En este trabajo se realizó un diseño experimental de un factor HAFS con Pontederia cordata, con cinco tratamientos a diferentes distancias (0, 0.42, 1.25, 2.08 y 2.4) m con tres unidades réplica en cada punto como se muestra en la figura 10. Se realizó un análisis estadístico para encontrar diferencias entre tratamientos, mediante una prueba de Kruskal wallis seguida de un contraste de medianas U de Mann-Whitney para las variables de pH, color, turbidez y biomasa vegetal. Para los datos paramétricos de temperatura y CE, se realizó un ANOVA simple seguido de un contraste de Tukey múltiple. Los datos fueron analizados en el paquete estadístico STATGRAPHICS 7.0^{MR}.

Cinética de degradación. Por otro lado, los criterios aplicados en los diseños teóricos de humedales artificiales para el tiempo de eliminación de DBO_5, dependen del tipo de flujo. La importancia de calcular el tiempo TRH de las aguas residuales en base a la DBO_5 es que de esta forma se estima el tiempo de degradación de la materia orgánica. En este trabajo, la cinética de degradación se calculó considerando que existe un comportamiento de primer orden (Crites y Tchobanoglous, 2000; Romellón *et al*., 2021), utilizando la Ec. (2):

$$C_e = C_i e^{-kt}$$

Donde:
t= Tiempo de retención para la eliminación de DBO_5 (días), Ce= Concentración de DBO_5 a la salida del reactor n de la seria (mg/L), Ci= Concentración a la entrada (mg/L), *k*= Constante de degradación(días^{-1}).

3.4. Resultados y Discusión

Estabilización de la especie vegetal. La estabilización de las plantas se puede ver en el Tabla 7, donde se pueden observar las condiciones de las especies antes de la siembra y al final de la experimentación (un año después de la fase de estabilización), las plantas presentaron casi el doble de su tamaño, desde planta joven. a planta adulta, presentando mayor crecimiento en la parte vegetativa que en las raíces, sin embargo, las raíces fueron las que ganaron mayor masa. La masa inicial por planta (15 individuos) fue de 1.82±0.38 kg y al final de dos años (47 individuos) presentó 2.17±0.33 kg, lo que demuestra que su biomasa aumenta cuatro veces una vez estabilizada.

Tabla 7. Datos de crecimiento de *Pontederia cordata*

	Parámetro	Inicial	Final
Hoja	Largo (cm)	22.8±1.1	49.4±1.1
	Ancho (cm)	12.9±1.1	24.6±1.0
	Cantidad	7.4±0.5	7.8±1.9
	Peso Humedo (gr)	0.02±0.0	0.15±0.0
	Peso seco (gr)	0.01±0.0	0.06±0.0
	Humedad (%)	56.9±1.3	56.0±1.4

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Tallo	Largo (cm)	68±2.91	112.7±1.0
	Diámetro cm)	1.0±0.1	2.42±.0.1
	Cantidad	9±0.7	10.8±2.7
	Peso Humedo (gr)	0.09±0.0	1.3±0.11
	Peso seco (gr)	0.03±0.00	0.5±0.0
	Humedad (%)	59.8±1.2	58.2±0.2
Raíz	Ancho(cm)	17.4±1.1	15.6±3.2
	Largo m)	12.1±1.1	35.6±11.4
	Peso Humedo (gr)	1.9±0.07	1.6388±0.1
	Peso seco (gr)	0.6±0.0	0.5±0.06
	Humedad (%)	68.6±0.8	66.8±3.2

Caudal y tiempo de retención hidráulica. El HAFS fue diseñado para operar con 200 L/día, sin embargo, al realizar las mediciones correspondientes y su volumetría se pudo establecer que el TRH es de 4.2 días. El costo operativo medio de HA es de 185,1±58,6 L/día, el mínimo 86±10 L/día y el máximo 260±26 L/día.

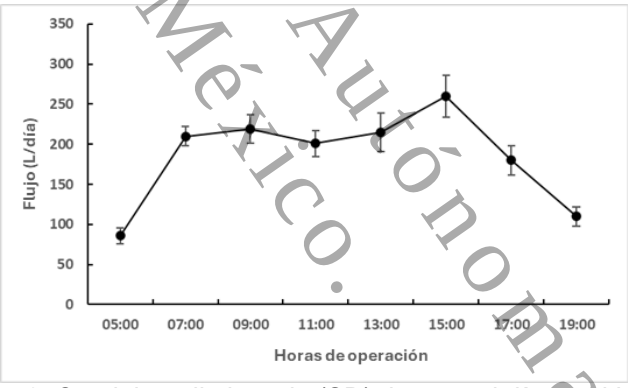


Figure 2. Caudal medio horario (SD) durante el día en el HAFS

Caracterización fisicoquímica del agua. La caracterización fisicoquímica del tanque de control y del HAFS se muestran en la Tabla 8 respectivamente, donde se puede observar que el tratamiento con *P. cordata* presentó resultados por debajo del límite máximo permisible según la NOM-001-SEMARNAT-2021 para los parámetros temperatura, pH. Estos valores se utilizaron para calcular las eficiencias de remoción correspondientes al muestreo de mayo a junio de 2018 al final de dos años de operación, se tomaron dos muestras simples de entrada y salida por día, por lo que la muestra total para el periodo es de 40 muestras simples. La distribución espacial monitoreada corresponde a 11 días de mayo a julio de 2017, tomando una muestra por punto de muestreo por día, con un total de 121 muestras. El tiempo de retención hidráulica en esta fase fue de 4,14 días, un día más al utilizado por Marín-Muñiz, (2016).

Tabla 8. Eficiencia de remoción promedio del HAFS con *Pontederia cordata* (N=11).

parámetros	**Unidades**	**Tanque de distribución**	***HAFS Pontederia Cordata***

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

		Promedio	DE (±)	Promedio	DE (±)	RE %
Temperatura	° C	26.54	1.90	25.23	1.55	5.0
Turbiedad	UNT	19.79	4.25	5.89	2.06	70.2
Color	UC	1038.67	208.17	189.20	25.34	81.0
pH	UpH	8.93	0.46	8.41	0.34	5.9
CE	µS/cm	1765.43	208.68	1044.51	649.40	40.8
BOD_5	mg/L	348.55	69.86	63.49	8.50	81.8

Eficiencia de remoción de contaminantes básicos y análisis estadístico de los principales parámetros del HAFS.

pH

Para esta variable se registran eficiencias de neutralización (RE) bajas debido al rango de pH que no permite ver una eficiencia alta, sin embargo, el 5.9% de RE muestra la disminución de la basicidad acercándose a la neutralidad. La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de pH (UpH) dentro de cada uno de los cinco niveles de Distancia (m) son iguales. Dado que el valor de P es inferior a 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel de confianza del 95,0%. La diferencia se muestra entre la distancia 0 y 0.42 m, ya que de la distancia 1.25 a 2.4 m no hay diferencia entre los tratamientos. Esto significa que el agua se estabiliza a partir de 1,25 m (Figura 11). En los tratamientos que evaluó Marín-Muñiz (2016) el pH se mantuvo entre 6.5 y 7.4 valor inferior al registrado por nosotros, pero se encuentra dentro del rango permisible de la NOM-001-SEMARNAT-2021 que establece de cinco a nueve unidades de pH.

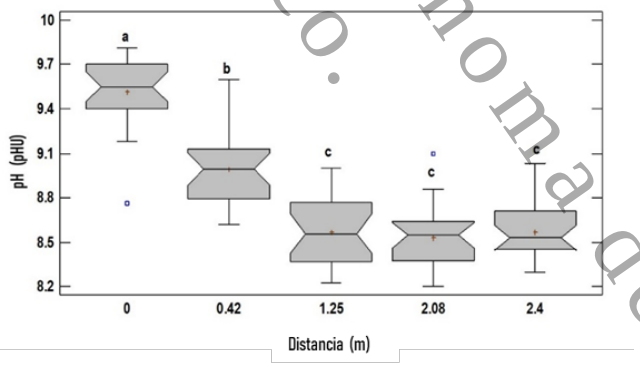


Figura 11. Valores medianos (±DE) de la variable pH de los diferentes tratamientos del HC evaluados (N=11). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos.

Temperatura

La disminución de la temperatura mostrada con una eficiencia del 5% muestra cómo la cubierta vegetal ayuda a reducir este parámetro. Al realizar la prueba múltiple de rangos para temperatura (°C) por distancia (m). Para ello se aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. No existen diferencias estadísticamente significativas entre los niveles de 0,42 a 2,4 m. Dado que el valor P de la prueba de Fisher (F) es menor que 0,05, existe una

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

diferencia estadísticamente significativa entre la temperatura promedio (°C) entre un nivel de distancia (m) y otro, con un nivel de confianza del 95,0% (Figura 12). La temperatura al finalizar el tratamiento cumple con lo establecido por la NOM-001-SEMARNAT-2021, valor apropiado para el desarrollo de microorganismos mesófilos.

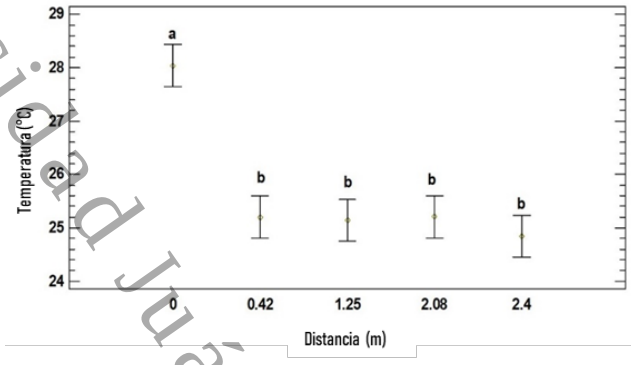


Figura 12. Valores promedio (±DE) de la variable Temperatura de los diferentes tratamientos del HA evaluado (N=11). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos.

Turbiedad

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de turbidez (UNT) dentro de cada uno de los cinco niveles de distancia (m) son iguales. Dado que el valor de P es inferior a 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel de confianza del 95,0% (Figura 13). Marín *et al*., (2016), muestran valores de turbidez más altos (10.97 y 23.34 NTU) para las especies Tule y Carrizo respectivamente, lo que resulta en nuestro tratamiento más eficiente (5.89±2.06 UNT, 70.2% RE). En cuanto a la eficiencia de remoción de ER, lograron disminuir 91.65% con su mejor tratamiento, aunque obtuvimos valores más bajos en este parámetro, esto se debe a que la calidad del agua del afluente de ellos se encontró con mayor turbiedad que el nuestro.

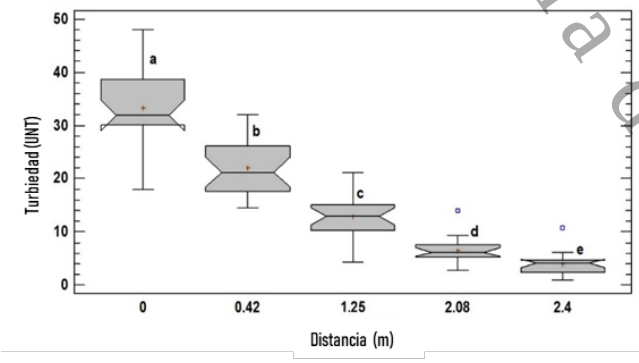


Figura 13. Valores medianos (±DE) de la variable Turbidez de los diferentes tratamientos del AC evaluados (N=11). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos.

Conductividad eléctrica (CE)

En el análisis ANOVA el valor de P es menor a 0.05, por lo que existe diferencia estadísticamente significativa entre la CE media (µS/cm) entre un nivel de distancia (m)

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

y otro, con un nivel de confianza del 95.0%. En la Figura 14 se puede observar la notable disminución de la CE entre cada distancia, sin embargo, la estadística muestra que no existe diferencia significativa entre el rodal y la distancia 0.42 m. Charris y Caselles (2016) evaluaron HAFS a escala piloto, sembrado con *Cyperus ligularis* y *Echinochloa colomun,* obteniendo eficiencias de 34.8% y 24.4%. Sugieren que puede haber una diferencia en este parámetro debido al tipo de macrófito y las condiciones climáticas, dado que la alta evapotranspiración concentra sales disueltas. Por nuestra parte, la eficiencia en nuestro HA fue del 40,8%, superior a lo presentado anteriormente por los autores antes mencionados.

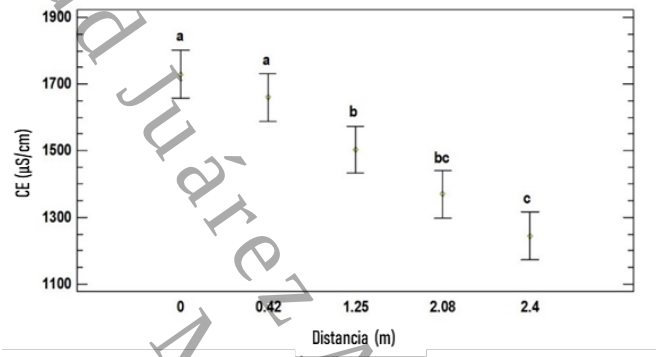


Figura 14. Valores promedio (±DE) de la variable CE de los diferentes tratamientos del HA evaluados (N=11). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos.

Color

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de color (UC) dentro de cada uno de los cinco niveles de distancia (m). Dado que el valor de P es inferior a 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre todas las medianas con un nivel de confianza del 95,0% (Figura 15). Bedoya *et al*. (2014) evaluaron un HA a escala laboratorio con una TRH de nueve días, utilizando Typha latifolia y Cyperus papirus donde para esta variable encontraron eficiencias de 90,9% y 92,2% respectivamente. Por nuestra parte se obtuvo una eficiencia menor (81,8%) en comparación con la evaluada por Bedoya *et al.* (2014). Estas diferencias pueden deberse al tiempo de retención del sistema, ya que en este experimento el TRH fue cercano a la mitad (4,14 días) del descrito en el experimento explicado anteriormente (Arias-Martínez *et al.,* 2010).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

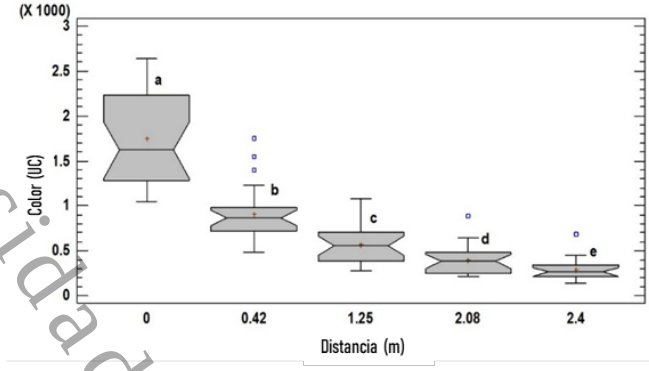


Figura 15. Valores medianos (±DE) de la variable Color de los diferentes tratamientos del HA evaluados (N=11). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos.

BOD_5

Marín *et al*., (2016), obtuvieron mejores eficiencias (95%) que las presentadas en este trabajo con un 81,8% para la variable DBO_5, en cuanto a los TP (81,8%) la eficiencia que presentan es casi la misma que la encontrada con 81.1% dentro de nuestro HA, mientras que para NT encontró eficiencias del 95%, superando las encontradas en este trabajo (81.88%). Marín-Muñiz, (2016), con Typha reporta eliminaciones similares de DBO_5 (80,1%). Estas similitudes están relacionadas con la temperatura y al ciclo estacional. Así, no existe diferencia con respecto al período seco y lluvioso, operando su HA a una temperatura cercana a los 26 °C, temperatura similar a la presentada en nuestro período de monitoreo.

Zamora *et al*., (2018), reportaron los efectos de *Pontederia sagittata* en HA para el tratamiento de aguas residuales de comunidades rurales, utilizando medios porosos de tepezyl y gravas de río porosas, en un periodo de 12 meses, presentan remoción de DBO_5 de 82.6% en tepezyl y 83,9 en gravas de río. Aunque esta investigación se reportó en diferentes condiciones (microescala), los resultados fueron similares a los encontrados en nuestra investigación.

Ajuste de modelos matemáticos y distribución espacial de contaminantes básicos en HAFS. Se presentan los valores promedio normalizados y el ajuste del modelo al que se relacionan los resultados. Para neutralizar el pH (Figura 16), se observa una mayor disminución en el punto 2.08 m (R^2=0.98) debido a que en el punto de salida (2.4 m), el colector de efluentes toma agua a 1.6 m de la entrada. Con respecto a la temperatura, el comportamiento es similar al pH (Figura 17). El agua que está más cerca de la superficie tiene temperaturas más altas (>26°C) que el agua muestreada de la columna. Existe una disminución de temperatura en todo el sistema, dicho comportamiento permite que las bacterias mesófilas operen bajo un rango óptimo de 25-40°C, lo que promueve una mejora en la eliminación de contaminantes.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

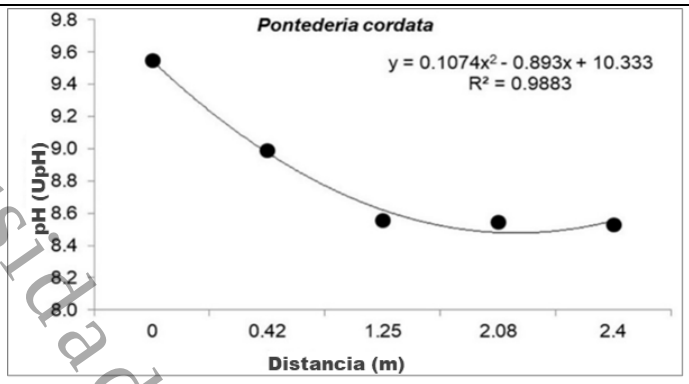


Figura 16. Modelo ajustado al parâmetro pH(N=11).

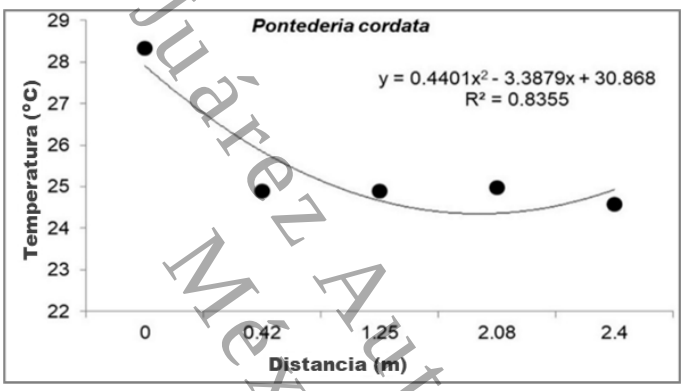


Figura 17. Modelo ajustado al parámetro de temperatura**(**N=11).

La CE (Figura 18) presenta un ajuste R^2=0,95 y una disminución con tendencia lineal en la concentración debido a que está ligada a las concentraciones de sólidos disueltos. La disminución de esta propiedad (CE) está relacionada con la ausencia de sólidos. La presencia de estos sólidos está influenciada por la acción de todo el sistema que está formado por el medio de soporte, las raíces de la planta y las bacterias adheridas a ellas. Dado que la lectura de CE está directamente relacionada con los iones presentes en la solución, como cloruro, nitrato, sulfato, fosfato, sodio, magnesio y calcio. Goyenola (2007). La interacción entre plantas, medios filtrantes, microorganismos y la atmósfera, ayuda a eliminar sólidos por sedimentación, filtración y biodegradación.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

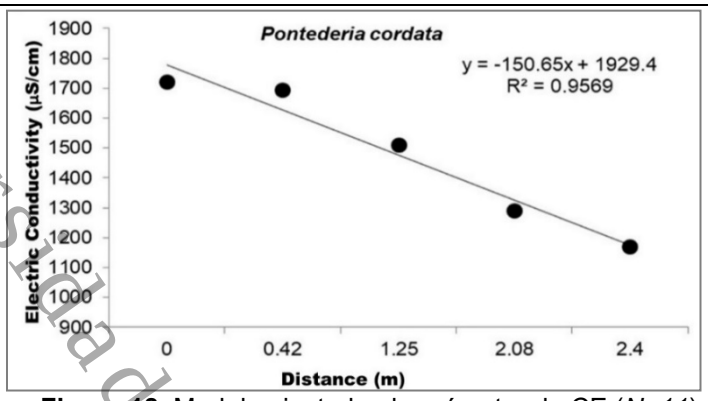


Figura 18. Modelo ajustado al parámetro de CE (*N=11*).

El color (Figura 19) muestra valores de UC que se van reduciendo a lo largo del humedal mostrando una disminución exponencial de 1038.67 UC a 189.20 UC con un R^2=0.98. La turbiedad mostró la misma tendencia (R^2=0.99) (Figura 20), mostrando los valores más bajos a la salida del humedal con una RE de 70.2%.

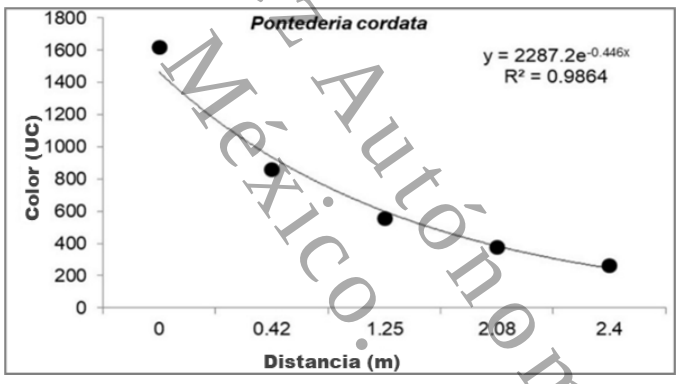


Figura 19. Modelo ajustado al parametro de Color(*N=11*).

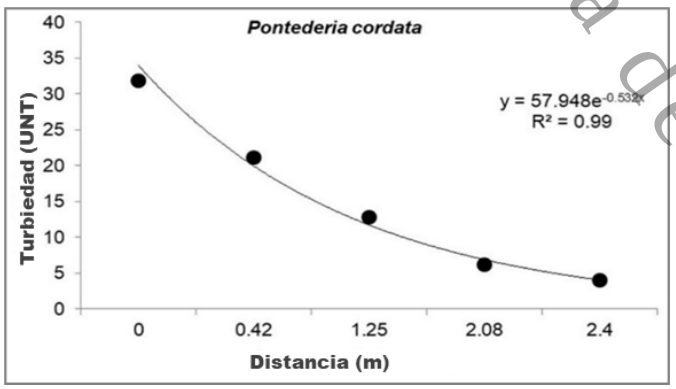


Figura 20. Modelo ajustado al parámetro de Turbiedad (N=11).

La DBO_5 (Figura 21) se comporta como una función decreciente con un ajuste de R^2=0,98 donde la mayor tasa de reducción se observa entre la entrada y el tercer punto de muestreo. Sin embargo, no se aprecia el punto máximo de reducción, por lo que el

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

reactor podría diseñarse para un tiempo de retención mayor. El valor de DBO_5 está relacionado con la cantidad de materia orgánica biodegradable, como se muestra en la fig. 21 a la salida del reactor hay menos materia orgánica ya que en su paso por el humedal los microorganismos del sistema la degradan, con una disminución de 330 mg/L a 110 mg/L.

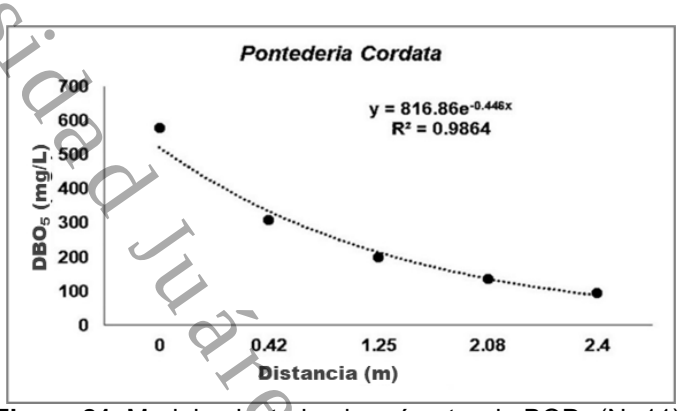


Figura 21. Modelo ajustado al parámetro de BOD_5 (N=11).

La distribución espacial de los microorganismos adheridos al medio de soporte (Figura 22) presenta una disminución gradual hacia el efluente desde 50.000 mg/kg hasta 4.000 mg/kg. Este comportamiento se debe a que los microorganismos dependen de la cantidad de alimento, de modo que a mayor cantidad de alimento mayor presencia de microorganismos. Estos resultados se pueden comparar con el estudio realizado por López-Ocaña *et al.,* (2019) que evaluó un HAFS de las mismas dimensiones utilizando *Thalia geniculata*, donde logró reducir de 33.000 a 2.000 mg/kg de biomasa bacteriana adherida al medio de soporte.

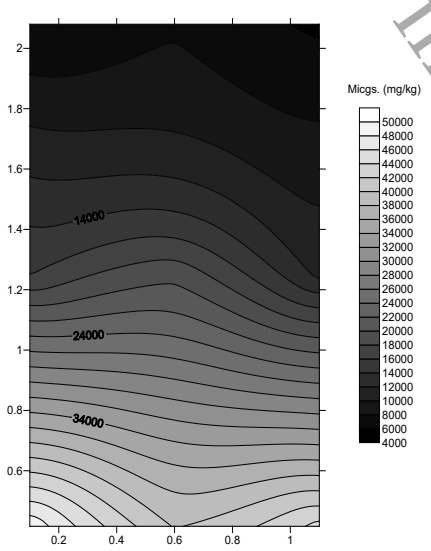


Figura 22. Distribución espacial de microorganismos (N=11).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Cinética de degradación en HAFS. En la Figura 23 se muestra el comportamiento cinético durante la fase de evaluación a dos años de iniciado el humedal, se observa que el HAFS tiene un k=-0.37 días^{-1}, el cual es un valor mayor al obtenido por Alasino *et al.,* (2015) donde los k a los 18, 21 y 23 meses, reportaron valores promedio de 0,115 días^{-1}. Comparado con estos resultados, el presente trabajo reporta una mejor eficiencia de remoción de DBO_5 con respecto al tiempo de retención, ya que se redujo a 52.2 mg/L DBO5 en 4.5 días, cumpliendo con el criterio de descarga establecido por la CONAGUA que es 70 mg/L. La Figura 23 muestra el tiempo estimado que se tendría que seguir cumpliendo con el límite máximo permisible para la protección de la vida acuática (30 mg/L) establecido por la NOM-001-SEMARNAT-1996, el cual es de siete días, aclarando que el actual La norma NOM-001-SEMARNAT-2021 no incluye este parámetro (DBO_5) dentro de sus contaminantes básicos.

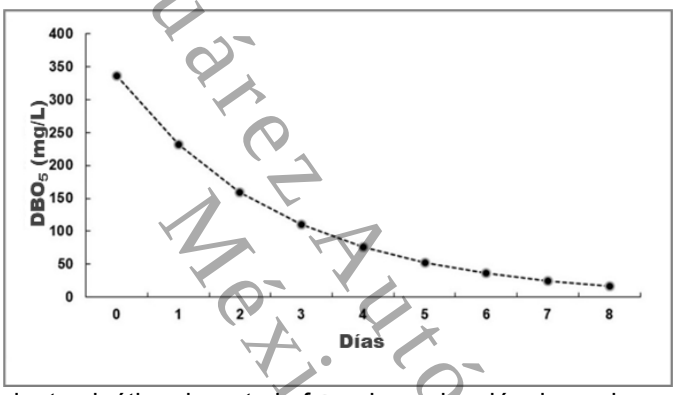


Figura 23. Comportamiento cinético durante la fase de evaluación, la cual se evaluó después de dos años de operación (n=1, k=-0.37 días-^{1}).

3.5. Conclusiones

La macrófita *Pontederia cordata* tiene una buena adaptación ya que las plantas desarrollan casi 4 veces su biomasa en su adaptación, son de fácil manejo para su recolección, siembra y cosecha en la operación.

Luego de dos años de operación, el HAFS obtuvo un k=-0.37 días^{-1}, logrando una remoción de turbidez de 70.2% y de DBO de 81.8%, con un tiempo de retención hidráulica de 4.54 días, lo que le permite cumplir con los límites permisibles para estos contaminantes establecidos en el derecho de vertido.

El modelado de distribución espacial longitudinal muestra que los parámetros de turbidez (R^2=0,99) y DBO (R^2=0,98) a 2,08 m de distancia dentro del reactor se eliminan significativamente, siendo inverso el comportamiento de los microorganismos, que se encuentran en mayor concentración en las primeras secciones. de HA, debido a la presencia de carga orgánica.

Pontederia cordata puede ser una buena alternativa para la fitorremediación de aguas residuales en el trópico húmedo de México.

3.6. Referencias

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Alasino, N., Nadal, F., Primo, L., Bollo, P., & Larrosa, N. (2015). Comportamiento cinético e hidráulico de un humedal construido a escala real. Disponible en: www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000300007. ISSN: 2007-2422.

Arias -Martínez S.A., Betancur-Toro F. M., Gómez-Rojas G., Salazar-Giraldo J. P., Hernández-Ángel M. L. (2010). Phytoremediation with artificial wetlands for the treatment of swine wastewater. Informador Técnico (Colombia) V. 74, 12-22 https://hdl.handle.net/11404/3250

Bedoya Pérez, J. C., Ardila Arias, A. N., Reyes Calle, J. (2014). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia. Disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37031522004. ISSN: 0188-4999.

Briones Sánchez G, García Casillas I. Aforo del agua en canales y tuberías. Editorial Trillas. 100 p. (2014). ISBN: 9789682474880

Calheiros CS, Ferreira V, Magalhaes R, Teixeira P, Castro PM. (2017). Presence of microbial pathogens and genetic diversity of Listeria monocytogenes in a constructed wetland system. Ecol. Eng. 102:344-351.

Charris, J. C. y Caselles-Osorio, A. (2016). Eficiencias de eliminación de contaminantes de agua residual doméstica con humedales construidos experimentales plantados con *Cyperus ligularis (Cyperaceae)* y *Echino chloacolonum (Poaceae)*. Tecnología y Ciencias del Agua. 7, 93-103.

CONAGUA. (2013). Permiso de descarga de aguas residuales, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Título 11TAB150418/30ERDL13, No. Expediente TAB-L-008012-03-13, Resolución B00.E.65.1.-0511.

CONAGUA. (2019). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 30. Diseño de PTARM: Humedales Artificiales. Disponible en: (https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf).

Crites, R.W. y G. Tchobanoglous, (2000). Small and decentralized wastewater management systems, McGraw Hill Co. New York, NY.

CONAGUA. (2021). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y tratamiento de aguas residuales en operación. México D. F. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/759492/Inventario_2021.pdf

Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F. y Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Cochabamba Bolivia: centro A.G.U.A. ISBN: 978-99954-766-2-5.

García, O. J.A., López, O. G., Torres, B. C. A. (2019). Evaluación de medios de soporte en humedales artificiales con vegetación *Sagittaria latifolia* en la remoción de contaminantes básicos. CIBA. Vol. 8, Núm. 15. DOI: 10.23913/ciba.v8i15.82

Gallegos-Rodríguez, J., López-Ocaña, G., Bautista-Margulis, R. G., & Torres-Balcázar, C. A. (2018). Evaluation of free flow constructed wetlands with *Sagittaria latifolia* and *Sagittaria lancifolia* in domestic wastewater treatment. Ingeniería Agrícola y Biosistemas, 10(2), 49–65. doi: 10.5154/r.inagbi.2017.03.005

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Goyenola, G. (2007). Red de monitoreo ambiental participativo de sistemas acuáticos. In Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos (RED MAPSA). Grupo de Investigación en Ecología Básica y Aplicada de la Asociación Civil sin Fines de Lucro Investigación y Desarrollo

López O, G., Torres B, C. A., Bautista M, R. G., Hernández B, J. R., Gutiérrez V, J. J., De La Cruz L, E., & Ferrer S, M. I. (2014). Diseño De Sistemas Experimentales De Humedales Artificiales De Flujo Libre Y Subsuperficial. Compilación De Investigaciones Científicas. Universidad Juárez Autónoma De Tabasco.

López-Ocaña, G., Bautista-Margulis, R. G., Valdez-Manzanilla, A., Torres-Balcazar, C. A., López-Vidal, R., Pérez-Sánchez, E. y Pampillón-González, L. (2019).Spatial Distribution Behavior Of Basic Pollutants In A Subsurface-Flow Wetland With *Thalia geniculata.* Int. J. Environ. Impacts. 2, 145-160. DOI:10.2495/EI-V2-N2-145-160. ISSN: 2398-2659

Marín A. C., Solís S. R., López O, G., Bautista M. R. G. y Romellón C. M. J. (2016). Tratamiento De Aguas Residuales Por Humedales Artificiales Tropicales En Tabasco, México. CIBA, Vol. 5, Núm. 10.

Marín-Muñiz, J.L. (2016). Remoción De Contaminantes De Aguas Residuales Por Medio De Humedales Artificiales Establecidos En El Municipio De Actopan, Veracruz, México. Revista Mexicana de Ingeniería Química Vol. 15, No. 2 (2016) 553-563. Disponible en: http://rmiq.org/iqfvp/Pdfs/Vol.%2015,%20No.%202/IA1/IA1.html

Norma Mexicana NMX-AA-003-1980 Aguas Residuales - Muestreo. Declaratoria De Vigencia Publicada en el Diario Oficial de la Federación El 25 de marzo De 1980.

Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis De Agua –Medición de sólidos y Sales Disueltas En Aguas Naturales, Residuales Y Residuales Tratadas - Método De Prueba. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de abril de 2016.

Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos, estudios, muestreos y análisis.

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, Norma Oficial Mexicana Que Establece Los Límites Máximos Permisibles De Contaminantes En Las Descargas De Aguas Residuales En Aguas Y Bienes Nacionales.

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Norma Oficial Mexicana Que Establece Los Límites Máximos Permisibles De Contaminantes En Las Descargas De Aguas Residuales En Aguas Y Bienes Nacionales.

Quintero, K.; Rodríguez, D.; González, M. y Arroyave, J. (2021). Evaluación de la remoción de nitrógeno y materia orgánica a través de humedales artificiales de flujo subsuperficial, acoplados a reactores de lecho fijo con microalgas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Revista Ingeniería y Región Vol. 25, 82-94. DOI: 10.25054/22161325.2921

Ramos, E.M.G., Rodríguez, S.L.M. y Martínez C.P. (2007). Uso De Macrófitos Acuáticas En El Tratamiento De Aguas Para El Cultivo De Maíz Y Sorgo. Hidrobiológica 17 (1 Suplemento): 7-15.

Romellón-Cerino, M.J., Estrada-Pérez, N. y López-Ocaña, G. (2022). Remoción y cinética de contaminantes básicos en humedales artificiales en serie. Renewable Energy, Biomass & Sustainability (REB&S), Vol. 3, No. 1, 24-34.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México.

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. CIBA Revista Iberoamericana De Las Ciencias Biológicas Y Agropecuarias, 11(21), 1 - 33. https://doi.org/10.23913/ciba.v11i21.111

Tran H.D., Vi H.M.T., Dang H.T.T., Narbaitz R.M. (2019). Pollutant removal by Canna Generalis in tropical constructed wetlands for domestic wastewater treatment. Global J. Environ. Sci. Manage. 5(3): 331-344, DOI: 10.22034/gjesm.2019.03.06

Valles-Aragón, María C. y Alarcón-Herrera, María Teresa. (2014). Retención De Arsénico En Humedales Construidos Con *Eleochari s Macrostachya* Y *Schoenoplectus* Americanus. Disponible en: https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/45416. ISSN: 0188-4999

Zamora-Castro, S. A., Marín-Muñiz, J. L., Sandoval, L., Vidal-Álvarez, M., & Carrión-Delgado, J. M. (2019). Effect of Ornamental Plants, Seasonality, and Filter Media Material in Fill-and-Drain Constructed Wetlands Treating Rural Community Wastewater. Sustainability, 11(8), 2350. MDPI AG. Retrieved from http://dx.doi.org/10.3390/su11082350.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Capítulo 4. Distribución de metales pesados en humedales en serie de flujo libre con especies, *Sagittaria latifolia, Thalia geniculata y Pontederia cordata*

4.1. Resumen

Generalmente HA en serie o como planta d tratamiento, son utilizadas para tratar aguas residuales domesticas sin tomar en cuenta que estas pueden contener metales que pudiesen quedar acumulados o bioacumulados en alguna de los componentes del humedal, trayendo problemas en el futuro cuando estos son desorbidos al ambiente. Es por eso por lo que se estudió la distribución de estos metales a lo largo de un HA en serie de flujo libre operados con especies Sagittaria latifolia, *Thalia geniculata* y *Pontederia cordata*, para ello se analizaron los metales, en agua, sedimentos y plantas, encontrándose que las concentraciones de Cr y Cu se reducen de 18 y 22 mg/L respectivamente hasta 0.0 y 0.3 mg/L *Thalia geniculata* es la mayor acumuladora de Aluminio y Hierro con 0.33 y 29.08 mg/g, (mg de metal por gramos de materia seca) respectivamente, y Sagittaria latifolia la mayor acumuladora de cromo y cobre con 0.30 y 0.13 mg/g respectivamente, la mayor acumulación de metales a los largo del humedal es encuentra en los sedimentos, seguido del raíz, tallo y hojas. Mientas que el medio de soporte utilizado no acumula metales pesado en su interior.

4.2. Introducción

Cuando los sistemas de tratamientos de aguas convencionales son construidos y operados provocan daños ambientales, en cambio aquellos que se basan en comportamientos habituales de la naturaleza como los HA, tienen la posibilidad de reducir esos daños (Brunhoferova *et al.,* 2024) De acuerdo con Arteaga-Cortez *et al*., (2020), los humedales artificiales o construidos se han utilizado como una tecnología verde para tratar las aguas residuales, gracias a la facilidad de reproducir los privilegios ecosistémicos que nos regalan los humedales naturales, siendo la mejor opción en la lucha contra contaminantes diversos del agua.

Esta aplicación de los humedales artificiales resulta sumamente útil ya que, de acuerdo con el Programa De Las Naciones Unidad Para El Desarrollo, PNUD (2024) en el mundo se han perdido más del 70% de zonas húmedas y el 80% de las aguas residuales es vertido a vías fluviales sin tratamiento adecuado. Arrojando con ella toda la composición y contaminación de típica de las aguas residuales, incluyendo materia orgánica y metales.

Si bien algunos metales son aprovechados por los seres vivos en cantidades pequeñas, (bario, berilio, boro, cromo, cobalto, cobre, hierro, magnesio, manganeso, molibdeno, níquel, selenio, azufre y zinc) cuando estos se encuentran en altas concentraciones pueden llegar a ser tóxicos, metales como arsénico, cadmio, plomo, mercurio y plata no tienen función conocida en el metabolismo pueden alcanzar toxicidad a pequeñas concentraciones por lo que es necesario removerlos (Alarcón *et al.* 2018) No obstante la coexistía de metales pesados y sustancias orgánicas en las aguas residuales, hacen más complicada la eliminación de estos para cualquier método incluso avanzado.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

(Ajiboye et al., 2021).

Los metales pesados presentes en el agua provocan dureza y representan un problema a nivel mundial debido a su toxicidad, sin embargo, el método de absorción ha sido el más utilizado para eliminarlos de los afluentes. (Tamiru y Bekele, 2020) Y gracias a que los HA trabajan en sinergia con la vegetación, sedimentos y microorganismos (Semenov *et al*. 2020), incluyen estos procesos de absorción por medio de la vegetación, aunado a reacciones de sinergia como floculación, sedimentación, precipitación, intercambios de cationes y aniones, reducción y oxidación que si bien no eliminan completamente los metales modifican sus propiedades. (Batool *et al.* 2019).

En esta ocasión se evaluó la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales vía humedales artificiales de la división académica de ciencias biológicas de la universidad Juárez autónoma de Tabasco. Ubicada en la carretera Villahermosa cárdenas kilómetro 0.5 entronque a bosques de Saloya. (Contaminantes básicos, Al, Cu, Cr Fe, Mn, Ni, y Zn).

Esta planta comenzó sus operaciones en el 2018 (López *et al.* 2018) como alternativa a el tratamiento físico químico, la planta estuvo conformada por 2 trenes gemelos que incluían 3 humedales cada uno (2 humedales de flujo superficial y 1 de flujo libre) con una capacidad de tratamiento para 60 m³ de agua residual al día,
Desde esa fecha el sistema ha sufrido algunas modificaciones, cambiando la configuración de los flujos y la vegetación tratante, sin embargo, el sustrato ha permanecido desde su fecha de arranque con los mantenimientos correspondientes a cada cambio de configuración.

Así por ejemplo 2020 la configuración usada fue de 1 humedal de flujo subsuperficial y seguidos de 2 humedales de flujo libre (Romellón et al. 2022). En el 2022 se llevó a cabo la última configuración. Quedando el sistema conformado por un cárcamo concertador, un cárcamo cisterna, y 2 trenes de humedales artificiales de flujo libre conectados en serie; cada tren de tratamiento está formado de 3 reactores, estando sembrados los reactores 1 de ambos trenes, con la especie *Pontederia cordata*, para el caso de los reactores 2, el tren uno estás sembrado con *Thalia geniculata y el tren 2 consta de Pontederia cordata finalmente los reactores 3 de ambos trenes están trabajando con Sagittaria lancifolia*. (Figura 24) permaneciendo el sustrato inicial.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

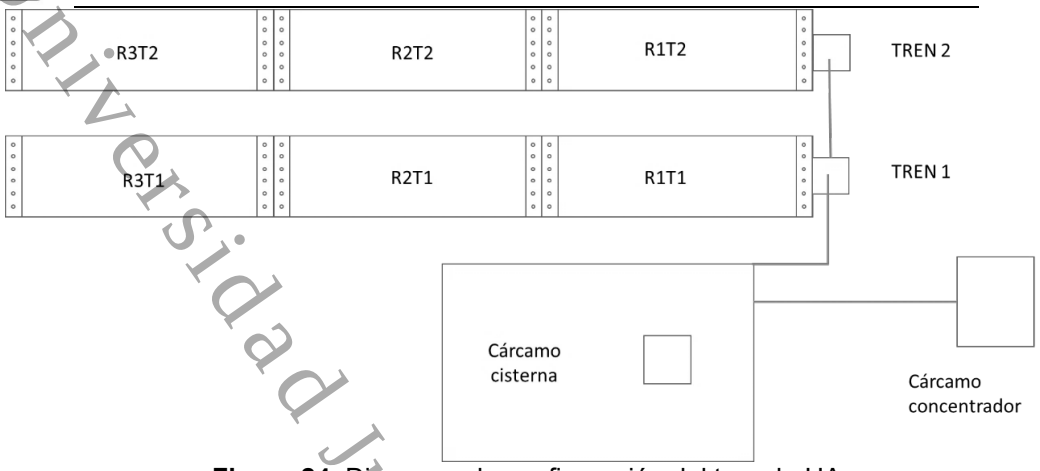


Figura 24. Diagrama de configuración del tren de HA.

El humedal trabaja bajo los criterios de Conagua (CONAGUA, 2016). Teniendo dimensiones de 25.0 m de largo con 2.5 m de ancho y 1.0 m de altura, con tirante operativo de 0.25 m de grava de rio de ¾ de pulgadas con 49.6±3.8 porosidad.

El agua por tratar proviene de las actividades propias de la división, baños laboratorios y demás actividades de académicas, se tomaron muestras diarias del agua cruda es decir cárcamo concentrador, cisterna, así como en cada una de las salidas de los reactores.

4.3. Materiales y métodos

Caracterización del agua residual. Se evaluó la remoción del sistema y los parámetros de operación tomando en cuenta incrementos de temperaturas, carga y gasto. En dos etapas del año, (época de seca, y época de lluvia) Las variables de control son la temperatura, Turbiedad, Color, Oxígeno Disuelto (OD), potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (SDT), mediante los métodos SM 2550, SM 2130 B, APHA 2120, SM 4500 OG, SM 9040 B, SM 1250 B Y SM 2540 respectivamente. Para 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 Oxigen modelo HI 98193, el color se estimó con un fotómetro LaMotte SMART3 y la turbidez se determinará con un turbidímetro HANNA HI 98703. La DQO se determinó basado en la adaptación del método EPA 410.4 utilizando un medidor de DQO y fotómetro multiparamétrico HI 83099 y un calentador de probetas DQO con capacidad para 25 viales HI839800 ambos de Hanna instrumentos con el fin de evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes para las descargas de aguas y que cumpla con los límites máximos permisibles como lo refiere la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Se determinó y cuantificó metales pesados metales pesados adaptando el método propuesto para el medidor de DQO y fotómetro multiparamétrico HI 83099 de Hanna instruments (Al, Cu, Cr Fe, Mn, Ni, y Zn). Una vez realizada la cuantificación fue comparada con los límites máximos permisibles de las legislaciones vigentes.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

La vegetación ya estaba establecida en el humedal al momento de su monitoreo razón por lo que hay especies en etapa terminal, adulta, jóvenes y plántulas en crecimiento, ya que solo se realizaba poda de mantenimiento (Retiro de las hojas secas y vegetación rota).

Eficiencia de remoción. La eficiencia de remoción de contaminantes para los parámetros de calidad del agua, así como para metales pesados se calculó en porcentajes de remoción de cada variable analizada, de acuerdo con la ecuación 1 (Chung, Wu, Tam y Wong, 2008):

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

Dónde: η = remoción en porcentaje, C_e = concentración de entrada de agua residual, C_s= concentración de salida del agua residual tratada. Esta se calculó para cada reactor y como para el sistema completo.

Cinética de degradación. La cinética de degradación se calculó considerando que se tiene un comportamiento de primer orden por ser un reactor biológico (Crites y Tchobanoglous, 2000). Mediante la ecuación 2

$$C_e = C_0 e^{-kt}$$

Donde: t: tiempo de retención para la remoción de DQO (d),C_e: Concentración de DQO en el efluente del reactor (mg/L), C_0: Concentración en el influente, k: Constante de degradación (días^{-1}).

Diseño Experimental. Se empleo un diseño aleatorio de un factor con tres niveles (tipo de vegetación), Los tratamientos evaluados correspondieron a los siguientes: cisterna, cárcamo, reactor uno del tren uno (R1T1), reactor 2 del tren uno (R2T1), reactor 3 del tren uno (R3T1), reactor uno del tren 2 (R1T2), reactor 2 del tren 2 (R2T2), reactor 3 del tren 2 (R3T2), se evaluaron las variables de respuesta: Temperatura, Turbiedad, Color, pH, sólidos disueltos totales (SDT) , oxígeno disuelto (OD), DQO y metales (Al, Cu, Cr Fe, Mn, Ni, y Zn). Se uso prueba de Kruskal- Wallis y el contraste de medianas de Mann-Whitney para datos no paramétricos, y la prueba de Kruskal- Wallis y el contraste de medianas de Mann-Whitney para datos paramétricos realizando un ANOVA simple en el software STAGRAPHICS CENTURION™ v 18.0 con un nivel de significancia de p=0.05 El número de repeticiones será de tres por cada tratamiento

Acumulación de metales en especies vegetales y sedimentos. Para el caso de los sedimentos se tomaron muestras de los diferentes puntos de muestreo del humedal homogenizándolas para obtener 1 muestra representativa por cada reactor. Estas muestras se llevaron a sequedad hasta peso constante.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Para el caso de las especies vegetales estas fueron cosechadas, tomando 5 elementos al azar de cada especie, se lavaron y se separó en Hoja, tallo y raíz, una vez limpias y separadas fueron secadas estufa a 60°C hasta peso contante, con humedal residual de 8% aproximándote.

Una vez seca las muestras tanto de sedimentos como las especies separadas, se llevaron 2 gramos de muestra a digestión con ácido nítrico concentrado, una vez procesado se filtró y se llevó a aforo a 100ml, posteriormente fue analizado de acuerdo con el método oficial 999.10 de la AOAC, y una adaptación de la NMX-AA-051-SCFI-2001, por espectrofotometría de absorción atómica de llama. (Al, Cu, Cr Fe, Mn, Ni, y Zn) utilizando iCE 3000 Series AA Spectrometers.

Acumulación de metales en rocas. Se tomaron rocas al azar de cada uno de los reactores, fueron procesadas llevándolas a sequedad y separadas en lascas para posteriormente llevarlas al análisis en el microscopio electrónico de barrido (SEM), para realizar el análisis morfológico las muestras fueron montadas sobre cinta conductora de carbono de doble cara en un porta muestras de aluminio, para ser observadas en el SEM, JEOL JSM-6010LA ,posterior a ellos para fortalecer este estudio se le realizo un análisis semi cualitativo en espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS) acoplado a SEM.

4.4. Resultados

Aforo. Los humedales operaron con un Qmed de 5.2 m^3/día, un Qmin de 4.1 m^3/día y un Qmaxinst de 6.7 m^3/día para el tren 1 y un Qmed de 5.05 m^3/día, un Qmin de 4.04 m^3/día y un Qmaxinst de 6.4 m^3/día para el tren 2 (Figura 25), siendo el gasto de operación similar en los dos trenes debido al buen control de las válvulas globo de control de 3” de Ø en la entrada de los trenes.

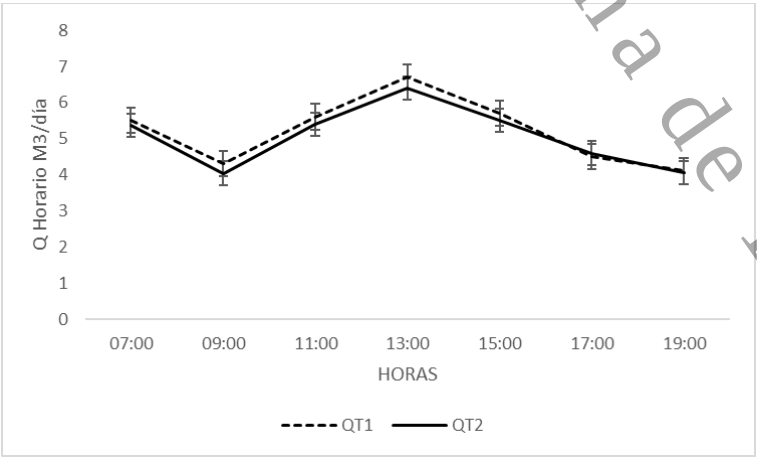


Figura 25. Gasto promedio diario, de los trenes de HA por días de operación (*N= 240*).

Caracterización del agua residual. En la tabla 9 se observan la mediana y el rango intercuartil de cada una de las unidades del tren de tratamiento. Se puede observar diferencias visuales entre el tren 1 y el tren dos, viéndose aún más marcada esta

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

diferencia en los reactores 2, muy probablemente debido al tipo de vegetación con el que trabaja cada uno, el agua cruda presente en el cárcamo presenta pH de 8.877, temperatura de 25.5° C, conductividad eléctrica 992.5 µS/cm, sólidos disueltos 519.45 mg/L, turbiedad 18.67 UTN, color 1795.5 CU, oxígeno disuelto 2.98 mg/L, potencial de óxido reducción -186 mV, DQO 997 mg/L, observándose un aumento de estos parámetros en el siguiente módulo (cisterna) por lo que podemos hablar de arrastre y acumulación de lodos, debido al tiempo que ha estado funcionando el cárcamo cisterna sin desazolve.

Tabla 9. Contaminantes (mediana ± RI) de entrada y salida en los tratamientos de HA (N=240).

Parámetros	Unidades	Cárcamo		Cisterna		R1T1		R2T1		R3T1	
		Me	±RIQ	Me	±RIQ	Me	±RIQ	Me	±RIQ	Me	±RIQ
pH	UpH	8.9	0.51	8.9	0.36	8.6	0.28	8.6	0.35	8.6	0.23
T	° C	25.5	3.58	24.9	4.13	24.4	4.35	24.9	3.10	24.2	2.70
CE	µS/cm	992.2	225.5	1238.0	422.2	846.0	1020.8	894.9	982.5	828.2	900.8
SDT	ppm	519.5	112.8	631.5	215.8	428.9	476.8	404.6	470.3	368.0	448.8
Turbiedad	UTN	18.6	5.2	10.9	7.3	5.2	3.0	11.6	17.0	9.4	13.0
Color	CU	1795.5	825.7	1283.0	309.7	609.5	482.2	668.0	415.0	677.5	351.5
OD	ppm	2.98	0.90	2.09	1.01	1.69	0.85	1.60	0.77	1.68	2.08
POR	ORP	-186.0	145.2	-255.0	38.2	-234.0	175.2	-153.5	205.5	-76.5	191.5
DQO	mg/L	997.0	1340.0	385.5	1718.0	43.0	78.0	18.0	46.0	38.0	62.0
Parámetros	**Unidades**	**Cárcamo**		**Cisterna**		**R1T2**		**R2T2**		**R3T2**	
		Me	**±RIQ**	**Me**	**±RIQ**	**Me**	**±RIQ**	**Me**	**±RIQ**	**Me**	**±RIQ**
pH	UpH	8.87	0.51	8.92	0.36	8.37	0.28	8.37	0.22	8.42	0.31
T	° C	25.50	3.58	24.95	4.13	24.50	2.80	24.75	3.20	24.60	2.85
CE	µS/cm	992.1	225.5	1238.0	422.2	1089.0	962.2	1024.0	636.0	1013.5	291.7
SDT	ppm	519.4	112.7	631.5	215.7	597.1	377.0	512.0	257.6	506.6	157.2
Turbiedad	UTN	18.67	5.20	10.94	7.35	11.65	8.68	12.90	17.2	9.50	7.01
Color	CU	1795.5	825.7	1283.0	309.7	713.0	338.5	834.5	723.2	576.0	296.7
OD	ppm	2.98	0.90	2.09	1.01	1.41	0.62	1.26	0.58	1.96	2.59
POR	ORP	-186.0	145.2	-255.0	38.2	-214.0	117.5	-225.0	35.2	-222.5	136.7
DQO	mg/L	997.0	1340.0	385.5	1718.0	117.0	79.0	64.0	72.0	18.5	39.0

De igual forma en la tabla 10 se observan las medianas más el rango intercuartil del comportamiento de metales a lo largo a lo largo del tren de humedales, se puede constatar que Zn, Ni y Mn son los elementos con menor presencia en el humedal. Y se observa que la retención de metales no es uniforme a lo largo del humedal.

Tabla 10. Concentración promedio (±DE) de entrada y salida de los tratamientos de metales (N=240).

Parámetros	Unidades	Cárcamo		Cisterna		R1T1		R2T1		R3T1	
		Me	±RIQ	Me	±RIQ	Me	±RIQ	Me	±RIQ	Me	±RIQ

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

AL	mg/L	0.03	0.08	0.03	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04
Fe	mg/L	2.13	2.93	1.28	6.86	1.78	15.94	2.21	7.66	2.59	8.57
Cr	mg/L	18.00	55.00	28.50	47.00	8.00	27.00	8.50	36.00	0.00	23.00
Cu	mg/L	0.22	72.00	0.00	0.29	0.05	79.00	0.00	1.48	0.03	16.00
Zn	mg/L	0.00	0.25	0.04	0.13	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.28
Mn	mg/L	57.65	219.98	71.51	217.00	10.15	158.90	10.10	162.90	103.45	280.00
Ni	mg/L	0.01	0.03	0.00	0.00	0.04	0.13	0.04	0.11	0.00	0.10

Parámetros	Unidades	Cárcamo		Cisterna		R1-T2		R2-T2		R3-T2	
		Me	±RIQ	Me	±RIQ	Me	±RIQ	Me	±RIQ	Me	±RIQ
AL	mg/L	0.03	0.08	0.03	0.06	0.05	0.04	0.05	0.02	0.03	0.01
Fe	mg/L	2.13	2.93	1.28	6.86	2.18	10.93	2.04	7.31	3.52	4.60
Cr	mg/L	18.00	55.00	28.50	47.00	1.00	14.00	0.00	3.00	3.50	11.00
Cu	mg/L	0.22	72.00	0.00	0.29	0.04	53.00	0.00	53.00	0.05	0.50
Zn	mg/L	0.00	0.25	0.04	0.13	0.05	0.16	0.00	0.15	0.00	0.00
Mn	mg/L	57.65	219.98	71.51	217.00	102.65	230.00	89.30	220.00	63.05	250.00
Ni	mg/L	0.01	0.03	0.00	0.00	0.05	0.10	0.03	0.07	0.01	0.10

Una vez realizados los análisis todos los parámetros fueron comparados a la normatividad aplicable para cada una (Tabla 11) se observa que el HA no está cumpliendo con los parámetros de Turbiedad, Color, Fe, Cr y Mn para verter a cuerpo receptor.

Tabla 11. Cumplimiento ambiental.

Parámetro	Referencia	Unidad	Limite	T1	Cumple	T2	cumple
pH	A	UpH	6-9	8.55	si	8.42	si
T	A	° C	35	24.20	si	24.60	si
CE	B	µS/cm	1000	828.15	si	1013.50	no
SDT	C	mg/L	1000	368.00	si	506.65	si
Turbiedad	C	UTN	5	9.47	no	9.50	no
Color	C	CU	15	677.50	no	576.00	no
OD	B	ppm	2.1	1.68	si	1.96	si
DQO	A	mg/L	150	38.00	si	18.50	si
AL	C	mg/L	0.2	0.04	si	0.03	si
Fe	C	mg/L	0.3	2.59	no	3.52	no
Cr	A	mg/L	0.5	0.00	si	3.50	no
Cu	A	mg/L	4	0.03	si	0.05	si
Zn	A	mg/L	10	0.00	si	0.00	si
Mn	C	mg/L	0.15	103.45	no	63.05	no
Ni	A	mg/L	2	0.00	si	0.01	si

Nota: A: NOM-001-SEMARNAT-2021; B: CE-CCA-001/89; C: NADF-003-AGUA-2002.

Análisis estadístico. El pH del agua cruda (cárcamo) tuvo un valor mediano de 8.86 ± 0.52 UpH La prueba de Kruskal-Wallis para el contraste de medianas indicó que existen diferencias altamente significativas entre los tratamientos evaluados ($p<0.005$) con un 95% de confianza (Figura 26 a). El valor mediano más bajo de pH se encontró en R1T2

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

con 8.36 ± 0.3 el valor mediano más alto se encontró en cisterna con 8.91 ± 10.39. se puede observar los valores medios de pH presentando valores de agua alcalina.

La temperatura del agua cruda fue de 25.5°C ± 3.6. La prueba de Kruskal-Wallis para el contraste de medianas indicó que existen diferencias estadísticas entre los tratamientos evaluados ($p<0.05$) con un 95% de confianza. Encontrándose el valor mediano más bajo en R3T1 con 24.2°C ± 2.7, siendo el valor más alto el encontrado en el cárcamo (Fig. 26 b).

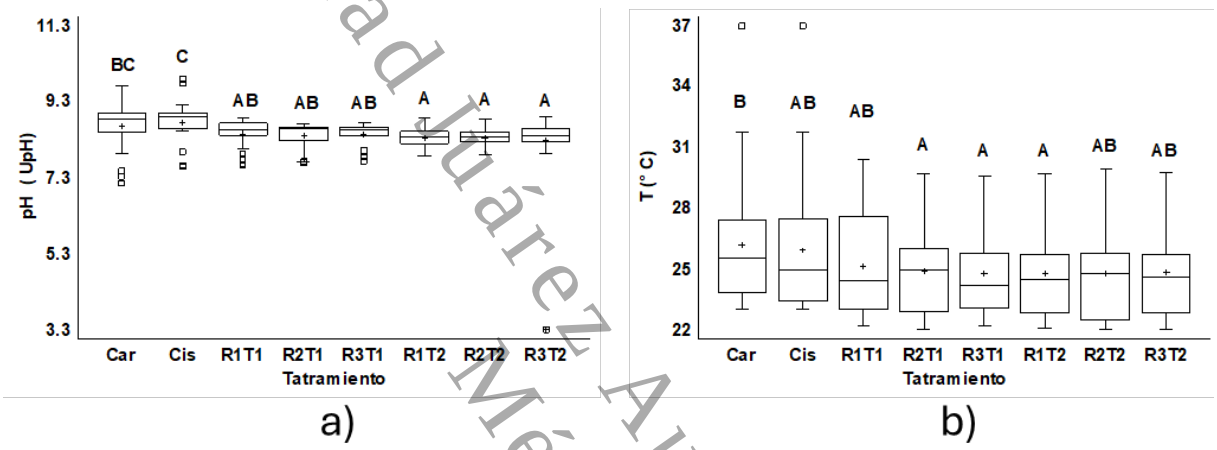


Figura 26. Valores medianos ± rango intercuartil de pH y Temperatura en HA. Letras diferentes indican diferencias ($p<0.05$) con un nivel de confianza del 95%. (N=240).

Los valores CE del agua cruda fue de 992.15 ± 226 µS/cm, La prueba de Kruskal-Wallis para el contraste de medianas indicó que existen diferencias altamente significativas entre los tratamientos evaluados ($p<0.005$) con un 95% de confianza, el valor más bajo de conductividad eléctrica se encontró en R3T1 con 828.15 ±903 µS/cm, siendo el valor más alto el reportado en el tanque cisterna con 1238 ± 424 µS/cm (Figura 27 a).

Los SDT del agua cruda fueron de 519.45 ± 113 mg/L, La prueba de Kruskal-Wallis para el contraste de medianas indicó existen diferencias altamente significativas en entre los tratamientos evaluados ($p<0.005$) con un 95% de confianza, presentado R3T1 el valor de SDT más bajo con 368 ± 450 mg/L, el valor mediano más alto lo reporto la cisterna con 631.5 ± 221 mg/L (Figura 27 b).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

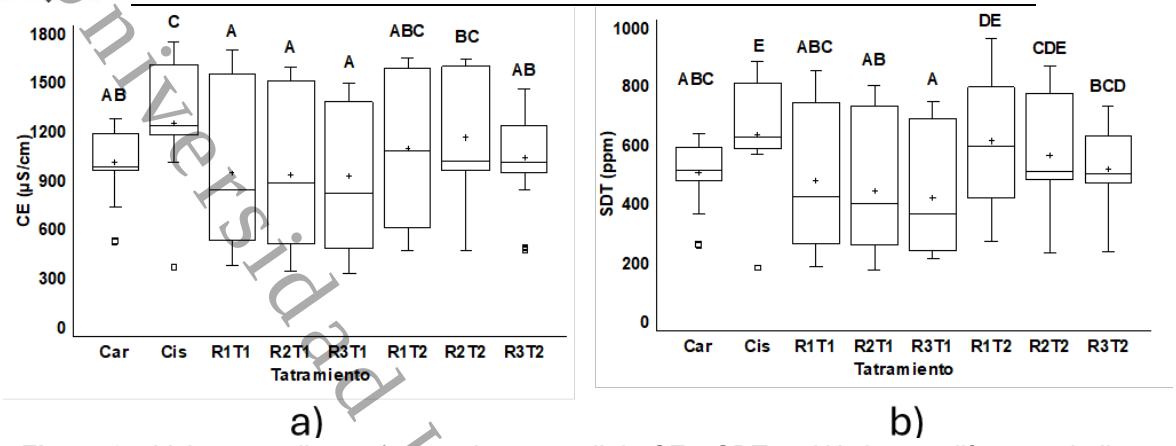


Figura 27. Valores medianos ± rango Inter cuartil de CE y SDT en HA. Letras diferentes indican diferencias ($p<0.05$) con un nivel de confianza del 95%. (N=240).

El oxígeno disuelto del agua cruda en el cárcamo fue de 2.95±0.56 ppm, en el tanque cisterna fue de 2.97± 1.4 ppm, La prueba de Kruskal-Wallis para el contraste de medianas indicó que existen diferencias altamente significativas ($p<0.005$) entre los tratamientos evaluados con un 95% de confianza. El valor mediano más bajo de oxígeno disuelto se reportó en el R2T2 con 1.26±1.8 ppm siendo el valor más alto el encontrado en el cárcamo (Figura 28 a).

El potencial de oxido reducción del agua cruda en el cárcamo fue de -186±90.47 mV, en el tanque cisterna fue de -255± 73.82 mV, La prueba de Kruskal-Wallis para el contraste de medianas indicó que existen diferencias altamente significativas ($p<0.005$) entre los tratamientos evaluados con un 95% de confianza. El valor mediano más bajo de POR se reportó en el tanque cisterna siendo el valor más alto el reportado para R3T1 con -76±97.93 mV (Figura 28 b).

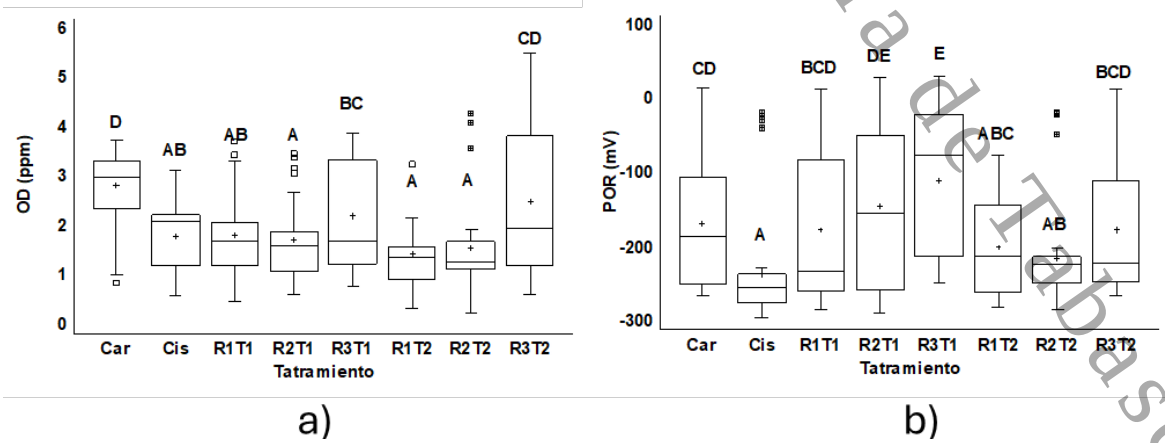


Figura 28. Valores medianos ± rango Inter cuartil de OD y ORP en HA Letras diferentes indican diferencias ($p<0.05$) con un nivel de confianza del 95%. (N=240).

La turbiedad del agua en el cárcamo fue de 18.65 ± 5.3 UTN La prueba de Kruskal-Wallis

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

para el contraste de medianas indicó que existen diferencias altamente significativas entre tratamientos (p<0.005) con un 95% de confianza (Figura 8). El valor mediano más bajo de turbiedad se encontró en R1T1 con 5.25 UTN ± 31 encontrándose el valor más alto en el cárcamo (Figura 29 a).

El color mediano del agua en el cárcamo fue de 1795.5 UC ± 852 La prueba de Kruskal-Wallis para el contraste de medianas indicó que existen diferencias altamente significativas entre tratamientos (p<0.005) con un 95% de confianza (Figura 8). El valor mediano más bajo de color se reportó en R3T2 con 576 UC ± 305 encontrándose el valor más alto en el cárcamo (Figura 28 b).

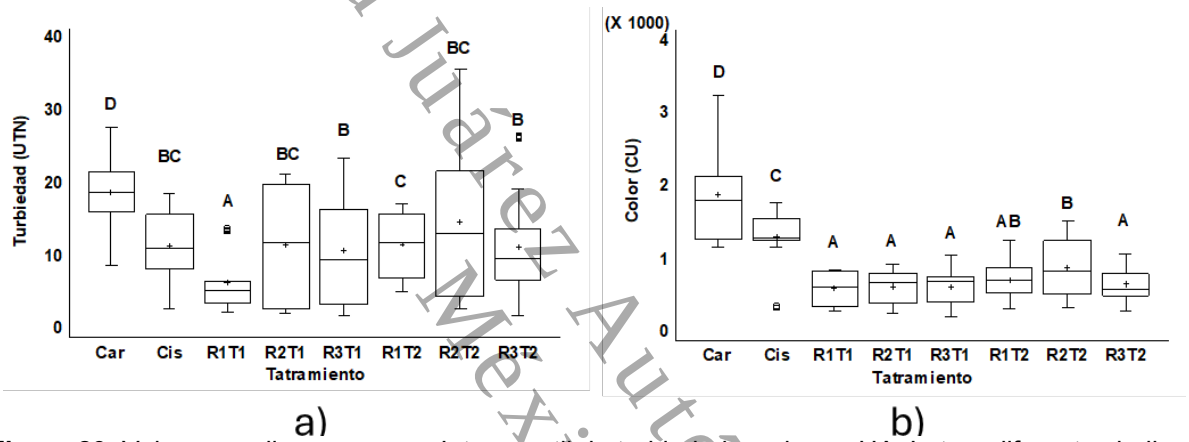


Figura 29. Valores medianos ± rango Inter cuartil de turbiedad y color en HA. Letras diferentes indican diferencias (p<0.05) con un nivel de confianza del 95%. N=240).

La DQO del agua cruda en el cárcamo fue de 997±1340 mg/L, en el tanque cisterna fue de 385.5± 1718 mg/L, La prueba de Kruskal-Wallis para el contraste de medianas indicó que existen diferencias altamente significativas (p<0.005) entre los tratamientos evaluados con un 95% de confianza. El valor mediano más bajo de DQO se detectó en el R3T1 con 0±15 mg/L siendo el valor más alto el que presenta el tanque cisterna. (Figura 30).

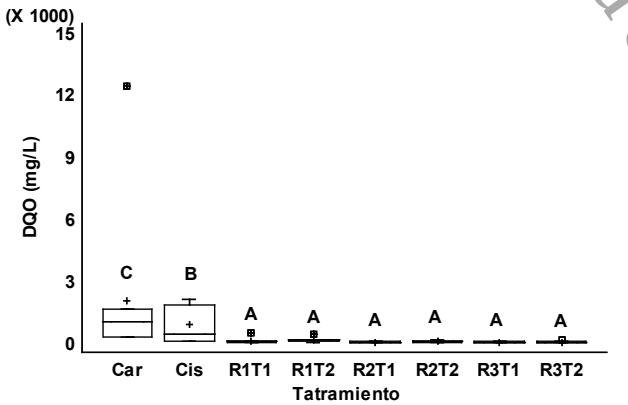


Figura 30. Valores medianos ± rango Inter cuartil de DQO en HA. Letras diferentes indican diferencias (p<0.05) con un nivel de confianza del 95%. (N=240).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

La concentración de aluminio en el agua del cárcamo fue de 0.25±0.08 mg/L, mientras que en el tanque cisterna fue de 0.25±0.05mg/L, La prueba de Kruskal-Wallis para el contraste de medianas indicó que existen una diferencia estadística ($p<0.05$) entre la cisterna y el R2T1 evaluados con un 95% de confianza. El valor medio más bajo se encontró en el tanque cisterna, y el valor más alto se presentó en R3T2 con 0.03±0.01 mg/L. (Figura 31 a). La concentración de hierro en el agua del cárcamo fue de 2.12±2.93mg/L, mientras que en el tanque cisterna fue de 1.25±6.86mg/L, La prueba de Kruskal-Wallis para el contraste de medianas indicó que no existen diferencias entre los tratamientos evaluados un 95% de confianza. (Figura 31 b).

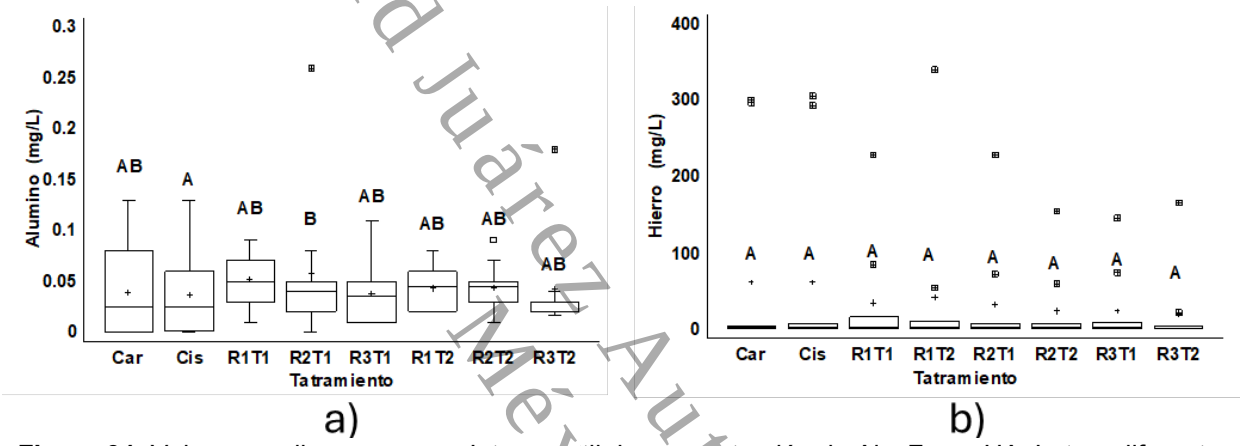


Figura 31. Valores medianos ± rango Inter cuartil de concentración de Al y Fe en HA. Letras diferentes indican diferencias ($p<0.05$) con un nivel de confianza del 95%. (N=240).

La concentración de cobre en el cárcamo fue de 0.22 mg/L ± 172 La prueba de Kruskal-Wallis para el contraste de medianas indicó que no existen diferencias estadísticas entre los tratamientos evaluados con un 95% de confianza (Figura 32 b)

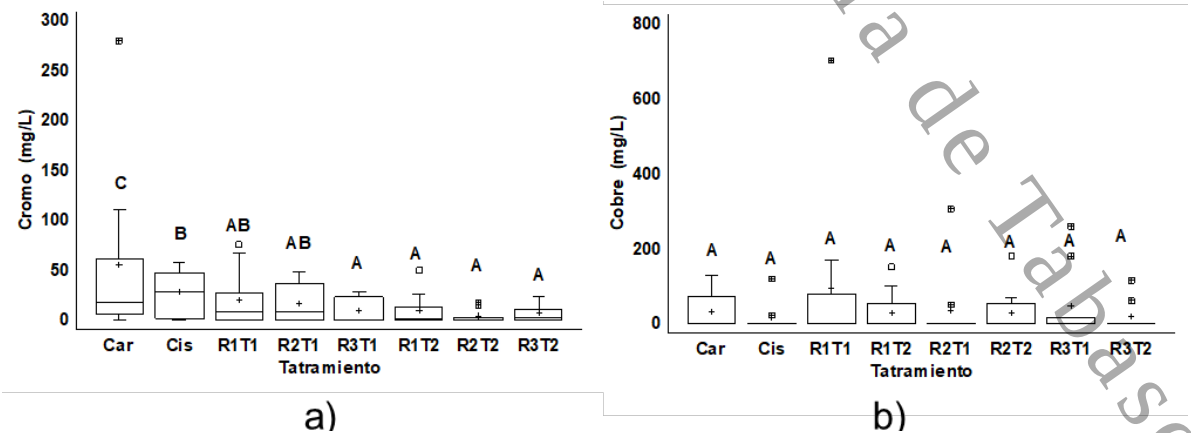


Figura 32. Valores medianos ± rango Inter cuartil de concentración de Cr y Cu en HA. Letras diferentes indican diferencias ($p<0.05$) con un nivel de confianza del 95%. (*N=240*)

La concentración de Mn en el cárcamo fue de 0.057mg/L ± 0.21 La prueba de Kruskal-Wallis para el contraste de medianas indicó que no existe diferencia estadística ($p>0.05$)

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

entre los tratamientos evaluados con un 95% de confianza (Figura 33 a)

El cromo en el cárcamo fue de 18mg/L ± 55 La prueba de Kruskal-Wallis para el contraste de medianas indicó que existen diferencias altamente significativas entre tratamientos ($p<0.005$) con un 95% de confianza (Figura 32 a). Siendo la concentración más alta la presentada por el cárcamo y la más baja la presentada por R2T2 con 3mg/L ± 3.47. (Figura 14).

La concentración de Ni en el cárcamo fue de 0.01mg/L ± 0.03 La prueba de Kruskal-Wallis para el contraste de medianas indicó que existen diferencias altamente significativas($p<0.005$) entre los tratamientos evaluados con un 95% de confianza, reportando el valor mediano más alto en R1T1 Con 0.04 mg/L ±0.13 y la concentración mediana más baja en R3T2 con 0.005 mg/L ± 0.1. (Figura 33 b)

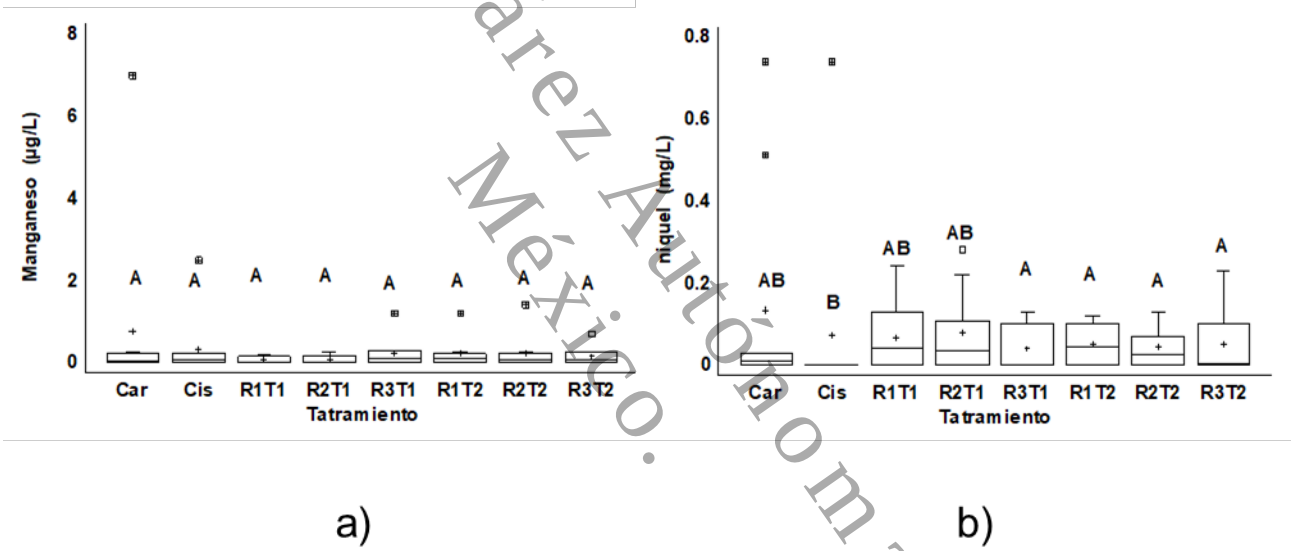


Figura 33. *Valores medianos ± rango Inter cuartil de concentración de Mn y Ni en HA. Letras diferentes indican diferencias ($p<0.05$) con un nivel de confianza del 95%. (N=240).*

La concentración de Zn en el cárcamo fue de 0.0mg/L ± 0.25 La prueba de Kruskal-Wallis para el contraste de medianas indicó que existe una diferencia estadística ($p<0.05$) (entre los tratamientos evaluados con un 95% de confianza (Figura 34).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

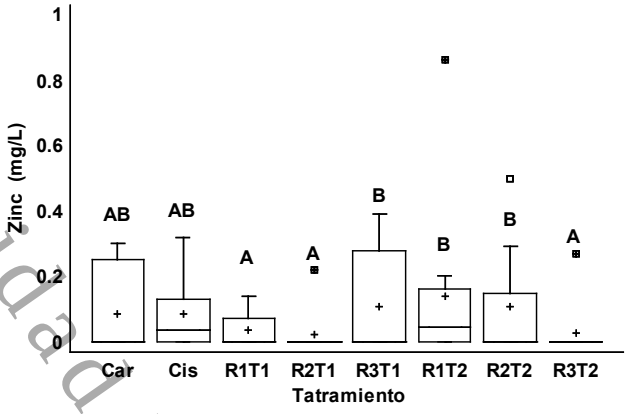


Figura 34. Valores medianos ± rango Inter cuartil de concentración de Zn en HA Letras diferentes indican diferencias ($p<0.05$) con un nivel de confianza del 95%. (*N=240*).

Eficiencias de remoción de parámetros básicos y metales. En la tabla 12 se aprecian las eficiencias de remoción de los parámetros básico, los valores negativos significan concentraciones de salida mayor a los de entrada, en ese sentido, se puede apreciar un mal comportamiento del humedal, sobre todo en color y turbiedad, que se ven marcados en los reactores 2.

Tabla 12. Eficiencias de remoción de los parámetros básicos en HA.

Parámetro	Total T1	Car-Cis	Cis-R1T1	R1T1-R2T1	R2T1-R3T1
pH	3.61	-0.56	3.93	-0.23	0.47
T	5.10	2.16	2.00	-2.04	3.01
CE	16.53	-24.78	31.66	-5.78	7.46
SDT	29.16	-21.57	32.07	5.66	9.06
Turbiedad	49.28	41.40	52.01	-121.90	18.71
Color	62.27	28.54	52.49	-9.60	-1.42
OD	43.70	29.75	19.14	5.33	-4.69
P0R	58.87	-37.10	8.24	34.40	50.16
DQO	96.19	61.33	88.85	58.14	-111.11

Parámetro	Total T2	Car-Cis	Cis-R1T2	R1T2-R2T2	R2T2-R3T2
pH	5.02	-0.56	6.17	-0.06	-0.60
T	3.53	2.16	1.80	-1.02	0.61
CE	-2.15	-24.78	12.04	5.97	1.03
SDT	2.46	-21.57	5.45	14.25	1.04
Turbiedad	49.12	41.40	-6.49	-10.73	26.36
Color	67.92	28.54	44.43	-17.04	30.98
OD	34.12	29.75	32.54	10.64	-55.56
P0R	-19.62	-37.10	16.08	-5.14	1.11
DQO	98.14	61.33	69.65	45.30	71.09

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

En la remoción de metales de igual manera se aprecia zonas muertas o de corto circuito, sin embargo, de acuerdo con el análisis estadístico, únicamente hierro y cromo tienen significancia estadística. (Tabla 13).

Tabla 13. Eficiencias de remoción de metales en HA.

Parámetro	Total T1	Car-Cis	Cis-R1T1	R1T1-R2T1	R2T1-R3T3
Aluminio	-40.00	0.00	-100.00	20.00	12.50
Hierro	-21.65	40.00	-39.61	-24.16	-16.97
Cromo	100.00	-58.33	71.93	-6.25	100.00
Cobre	86.36	100.00	0.00	100.00	0.00
Zinc	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00
Manganeso	-79.44	-24.04	85.81	0.49	-924.26
Níquel	100.00	100.00	0.00	0.00	100.00
Parámetro	**Total T2**	**Car-Cis**	**Cis-R1T1**	**R1T1-R2T1**	**R2T1-R3T3**
Aluminio	-20.00	0.00	-80.00	0.00	33.33
Hierro	-65.65	40.00	-70.98	6.42	-72.55
Cromo	80.56	-58.33	96.49	100.00	0.00
Cobre	79.55	100.00	0.00	100.00	0.00
Zinc	0.00	0.00	-28.57	100.00	0.00
Manganeso	-9.37	-24.04	-43.55	13.01	29.40
Níquel	50.00	100.00	0.00	44.44	80.00

Cinéticas de remoción. Las cinéticas de remoción se presentan en la tabla 14 dónde se puede observar que la planta de tratamiento está teniendo un mal funcionamiento ya sea por zona muerta o por cortocircuito, se observa buen funcionamiento de los reactores uno deteriorándose a lo largo del humedal y recuperándose únicamente en el reactor 3 del tren 2. Se estimo un TRH promedio de 0.22 días para el tren 1 y .23 días para el tren2, se puede observar que los mejores comportamientos cinéticos para color y turbiedad, se encuentran en los reactores números 1 de cada uno de los trenes, sin embargo el reactor 3 del tren 2 ha tenido buen comportamiento en los tres parámetros analizados, sin embargo este comportamiento cinético, pone en evidencia el mal comportamiento del humedal, y la atención inmediata, ya que podemos observar comportamientos cinéticos negativos.

Tabla 14. Constantes cinéticas de remoción en HA.

		Color	Turbiedad	DQO
	TRH, días	k, dias^{-1}	k, dias^{-1}	k, dias^{-1}
R1T1	0.22	3.36	3.31	9.89
R2T1	0.22	-0.41	-3.59	3.93
R3T1	0.22	-0.06	0.93	-3.37
R1T2	0.23	2.57	-0.28	5.22
R2T2	0.23	-0.69	-0.45	2.64
R3T2	0.23	1.62	1.87	5.43

Acumulación de metales en especies vegetales y sedimentos. La mayor

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

acumulación de aluminio en los trenes de tratamiento se encuentra en los reactores 3, sembrados con *Sagittaria latifolia* con una acumulación total de 0.72 mg de Aluminio por gramo de especie o sedimento seco, el segundo lugar de acumalación de este elemento se aprecia en los reactores 1 sembrados con *Pontederia cordata*, donde la acumulación total fue de punto 64 miligramos de aluminio por gramos de especie o sedimento seco, y por último tendremos una acumulación de 0.63 mg/g en los reactores 2 *Thalia geniculata.*

De los tres reactores que conforman los trenes de tratamiento la mayor acumulación de aluminio en los sedimentos se observa en los reactores 1, (R1sed), seguido de reactor 2 (R2Sed) y el reactor 3 (R3Sed). Con una acumulación de 0.36, 0.30 y 0.11 mg miligramos de aluminio por gramo de sedimento seco respectivamente.

Para el caso de las especies vegetal, la mayor acumuladora fue la especie sembrada en los reactores numero 2 *Thalia geniculata.*, con 0.33 mg/g, seguido de la especie del *Pontederia cordata*, con 27 mg/g y por ultimo *Sagittaria latifolia* con 0.10 mg/g.

Pontederia cordata, presenta la mayor acumulación de aluminio en la raíz (R1R) con una acumulación de 0.24mg/g que representa el 86.34% del total acumulado en la planta, la cantidad de Aluminio en su tallo (R1T) no fue cuantificable para el equipo, y por último en sus hojas se reportó acumulación de aluminio de 0.04 mg/g que representa el 13.66%.

La mayor acumalación de alumino en *Thalia geniculata* fue en su raíz (R2R) con 0.32 mg/g 97.7% del total acumulado en la planta, las hojas acumularon 0.01 mg/g, 2.23% y en los tallos (R2T) la cantidad fue indetectable para el equipo. (Figura 35).

Sagittaria latifolia acumulo en sus raices (R3R) 0.08 mg/g de aluminio, 81.72% del total acumaldo en ella, en su tallo (R3T) 0.02 mg/g, siendo la acumulación en hojas (R3H) indetectable para el equipo.

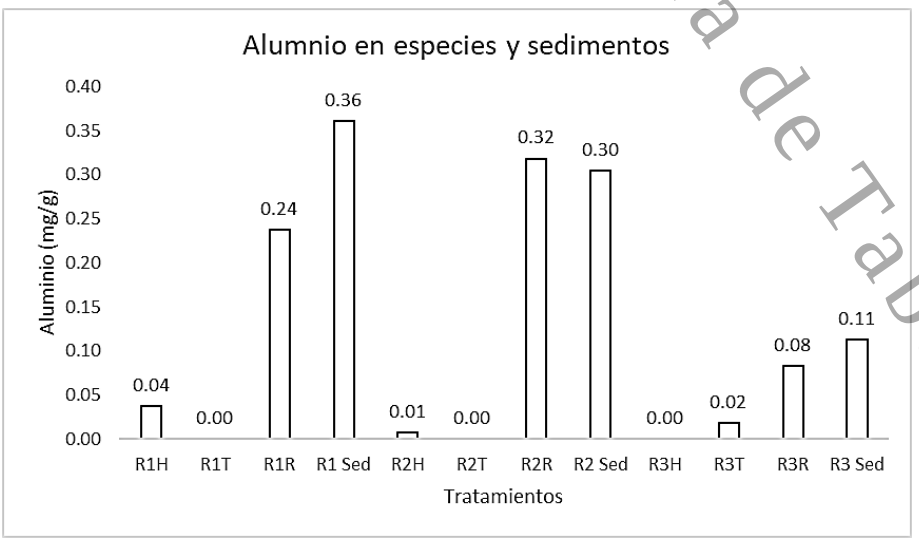


Figura 35. Acumulación de Aluminio en especies y sedimentos.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

Para el caso del hierro la mayor acumulación la presento el R3 con 38.45 mg/g, seguido de R2 con 35.03 mg/g y por último R1 con 14,91 mg/g. Los sedimentos que más hierro acumulados fueron los de R1, seguidos de R2 y R3 con 7.38, 5,95 y 2.05 mg/g respectivamente (Figura 36). Para *Pontederia cordata* la mayor acumulación se fue en la raíz, seguidos de tallos y hojas, con 6.97, 0.48 y 0.08 mg/g lo que representa el 92.64, 6.35 y 1.01 % del total de hierro acumulado en la planta respectivamente. *Thalia geniculata* acumulo mayor cantidad de hierro en, seguido de hojas y raíz, con 28.86, 0.17 y 0.05 mg/g respectivamente, representado 99.23, 0.59 y 18 % del total de hierro acumulado en la planta. Para *Sagittaria latifolia* las raices (R3R) fueron las mayores acumuladoras de hierro con 2.88 mg/g, en segundo lugar los tallos (R3T) con 0.60 mg/g y R3H acumularon 0.17 mg/g. Estos 78.82, 16.41, 7 4.77% del total de acumulación de hierro en la planta respectivamente

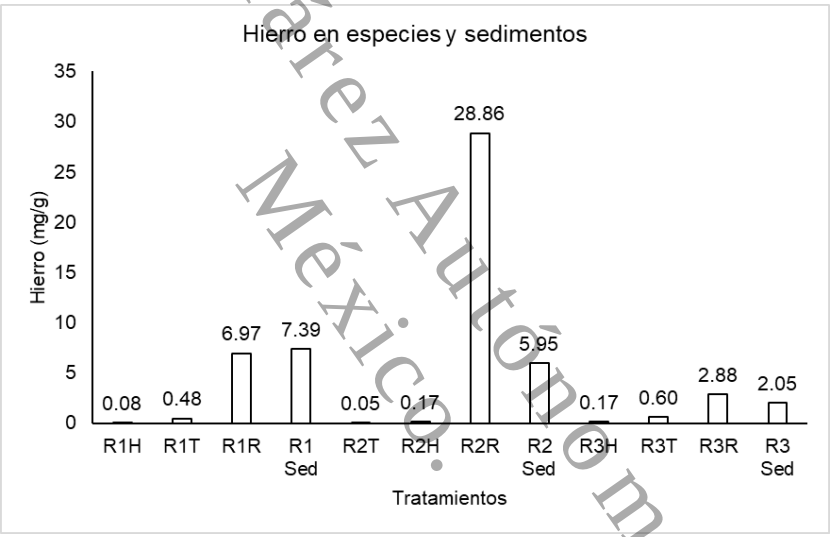


Figura 36. Acumulación de Hierro en especies y sedimentos.

El cromo se acumuló en mayor cantidad en los reactores 3 con una concentración total de 0.045 mg de cromo por gramo de material seco, de los cuales el 48.94 % (0.022 mg/g) corresponden a R3R, el 14.96 % (0.007 mg/g) a R3 sed, 2.29% (0.001 mg/g) a R3H y el 2.06 % (0.001 mg/g) corresponde a R3T. (Figura 37). El siguiente reactor en acumulación de cromo es el R1, donde se acumulan 0.035 mg/g de cromo, siendo la mayor acumulación en los sedimentos 58.78 % (0.21 mg/g) en R1R se acula el 26.78% (0.010 mg/g), en R1H 7.84 % (0.003 mg/g) y por último en el R2 se acumulan 0.025 miligramos de cromo por cada gramo de materia seca, de los cuales el 60.48 (0.16 mg/g) se acumulan en los sedimentos, en las raíces el 21.65% (0.006 mg/g),las hojas se acumula el 10.98 5 (0.003 mg/g) y por ultimo los tallos acumulan únicamente el 6.89% lo que equivale a 0.002 mg/g.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

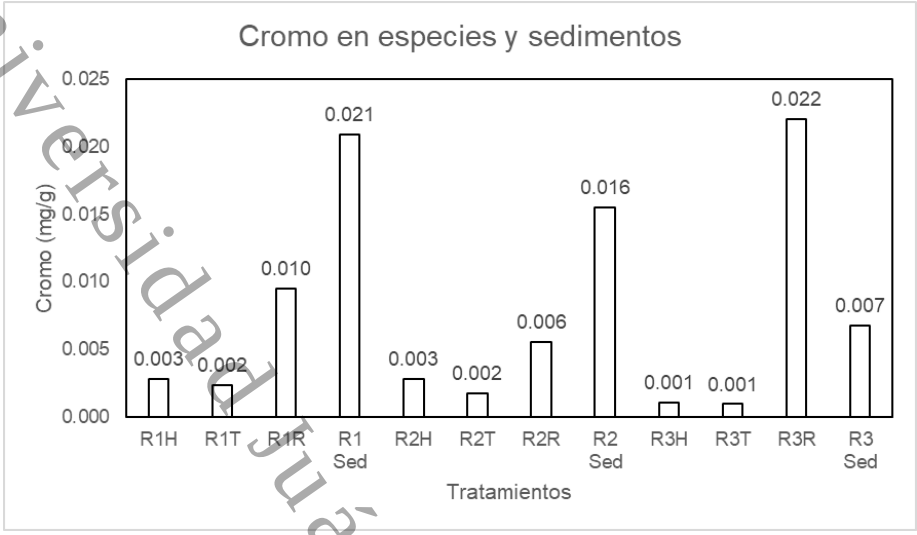


Figura 37. Acumulación de Hierro en especies y sedimentos

El cobre se encontró con mayor concentración en los reactores ubicados al final de los trenes de tratamientos con una concentración de 0.18 miligramos de cobre por gramo de materia seca, encontrándose el mayor porcentaje de concentración en las raíces de las especies con el 38.35 % (0.07 mg/g), en las hojas se encontró el 17.83% de la concentración total (0.03 mg/g) el 16.98% de concentración se acumuló en los tallos (0.03 mg/g) siendo los sedimentos de este reactor quienes acumularon el menos porcentaje 5.96 % (0.1 mg/g). Los segundos reactores en acumular cobre fueron los R1 donde se acumularon 0.9 mg de cobre por g de materia seca, encontrándose que fueron en las raíces donde se acumuló la mayor cantidad de cobre, 42.37 % (0.04 mg/g), seguido del 41.91 % (0.04 mg/g) acumulado en los sedimentos, 8.42 % (0.01 mg/g) en las hojas siendo los tallos quienes menos acumulan 7,29% (0.01 mg/g). Por último, en los R2 se aculo 0.05 gramos de cobre por gramo de materia seca, encontrándose la mayor acumulación en los sedimentos, y siendo las hojas quienes menos cobre acumulan (Figura 38).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

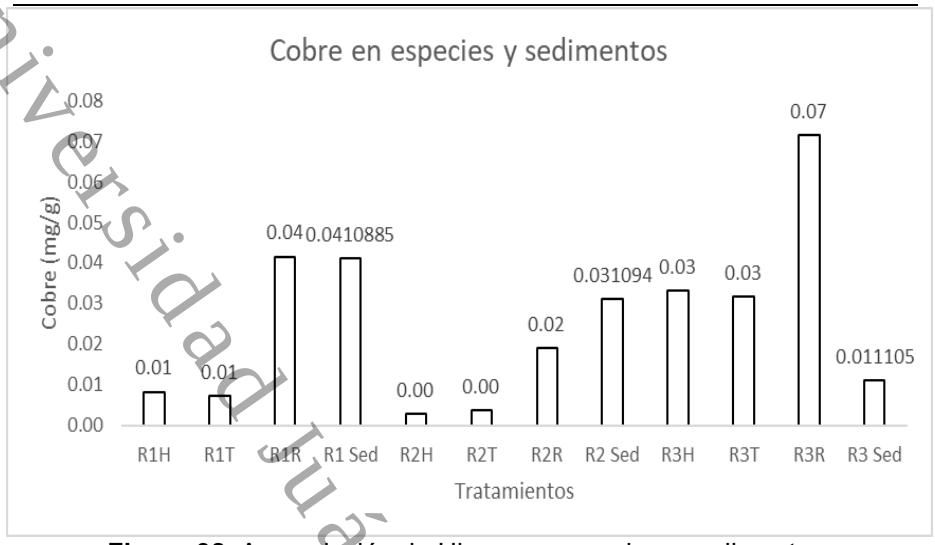


Figura 38. Acumulación de Hierro en especies y sedimentos.

}

Acumulación de metales en rocas. El análisis en SEM arrojo que las rocas no presentan poros dentro su morfología, solo algunas pequeñas fracturas muy probablemente por daño mecánico, lo que se observó en los acercamientos que se realizó con el material. Siendo esta morfología constante para las rocas en todos los reactores, esto se aprecia en las imágenes de 39- 44, que muestran las rocas en cada uno de los reactores.

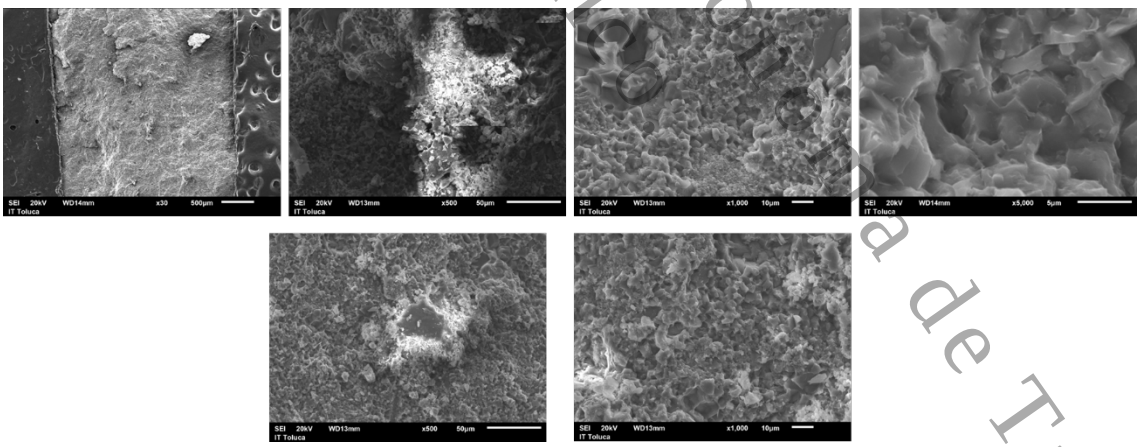


Figura 39. Micrografías de SEM de rocas en R1T1.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

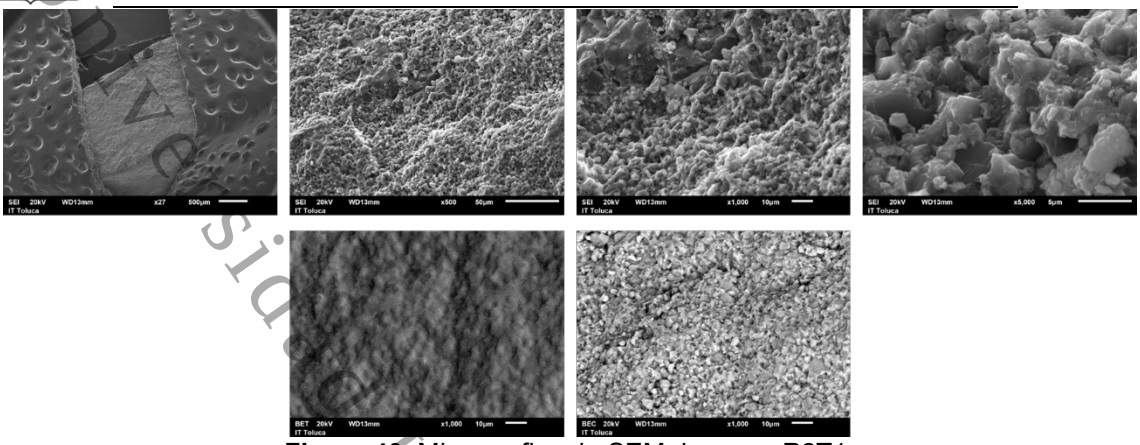


Figura 40. Micrografias de SEM de rocas R2T1.

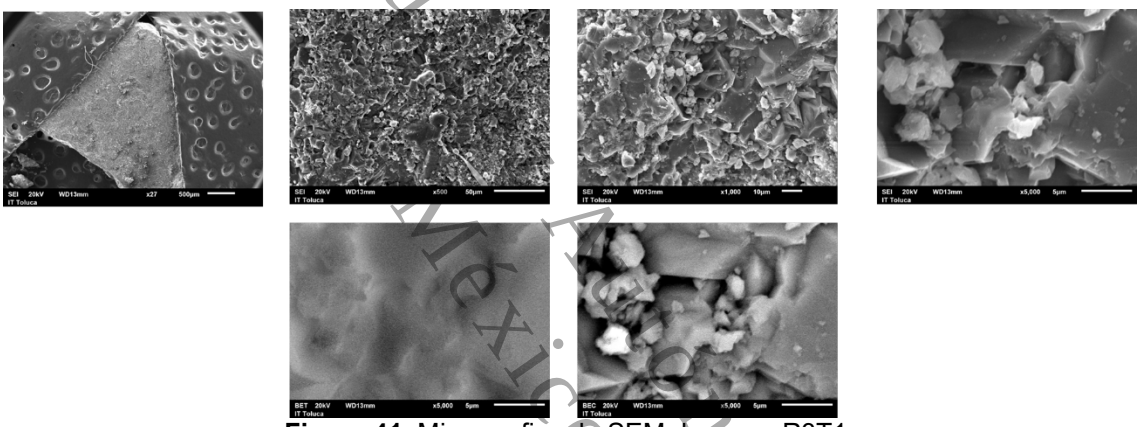


Figura 41. Micrografias de SEM de rocas R3T1.

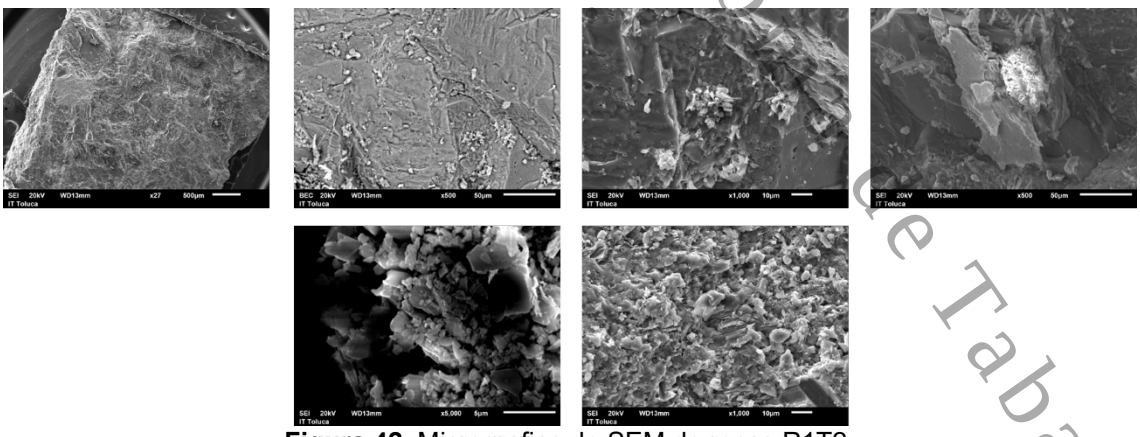


Figura 42. Micrografias de SEM de rocas R1T2.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

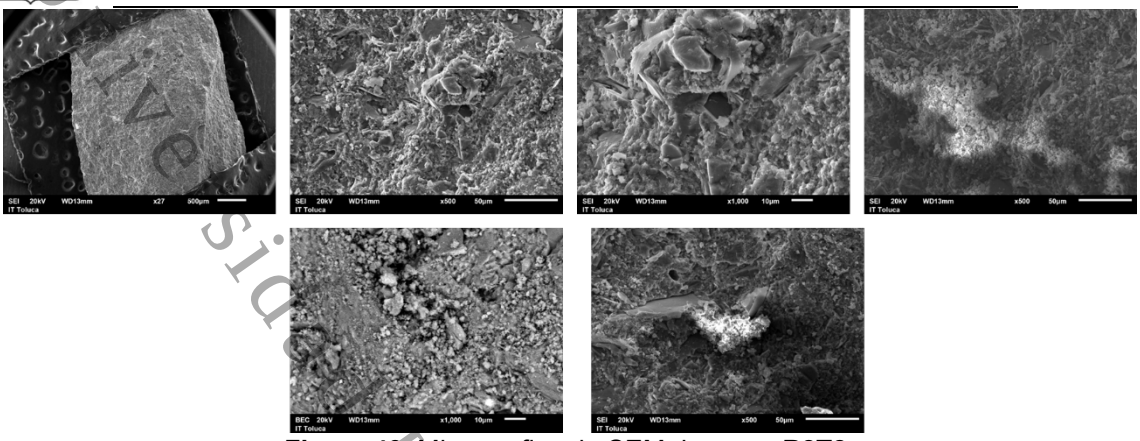


Figura 43. Micrografias de SEM de rocas R2T2.

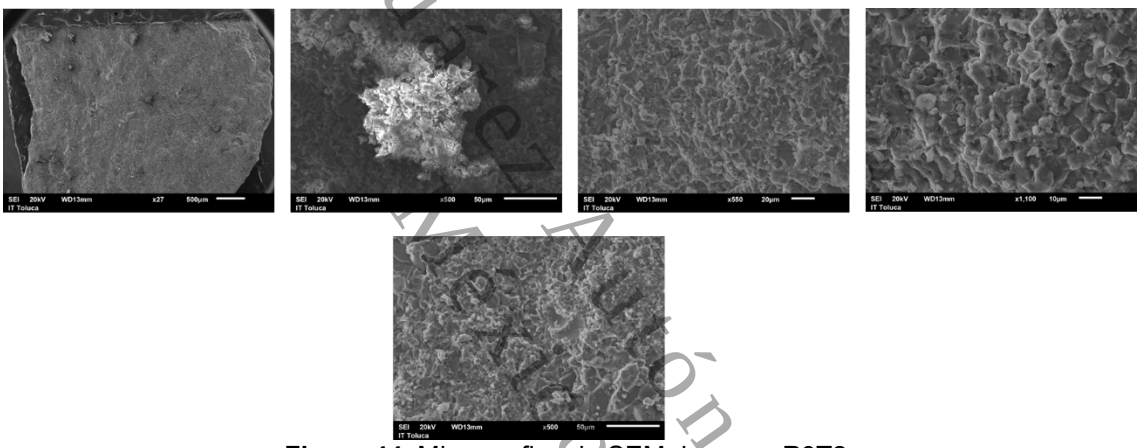
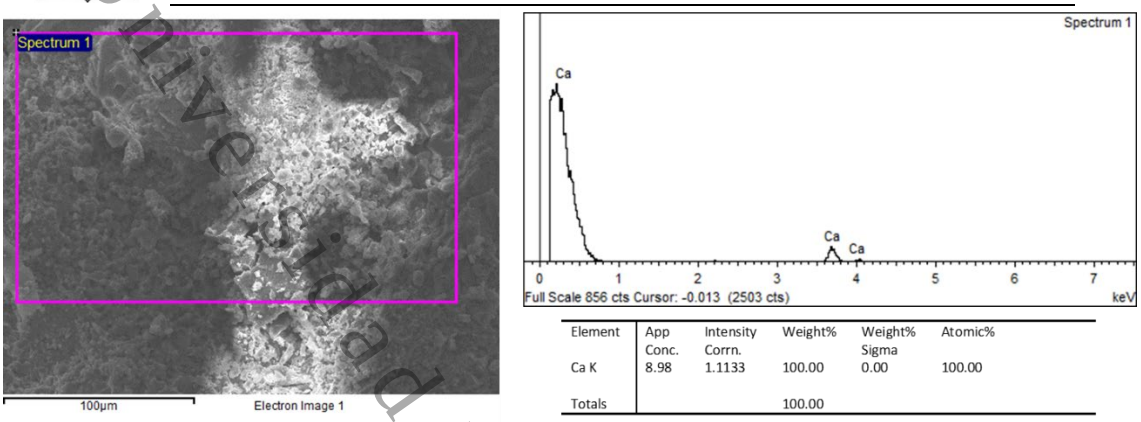


Figura 44. Micrografias de SEM de rocas R3T2.

El estudio elemental en EDS sobre las lascas de roscas se obtuvo denos espectros de rayos X al hacer el barrido de electrones en lugares específicos (puntuales) de las micrografías, principalmente aquellos que se notaban con morfologías diferentes al resto del plano de la micrografía, el equipo grafica la cantidad de rayos x recibidos y procesados por el detector de energía de los niveles atómicos de los elementos detectados. Lo que dio como resultado que la composición principal de las rocas es Calcio y potasio.

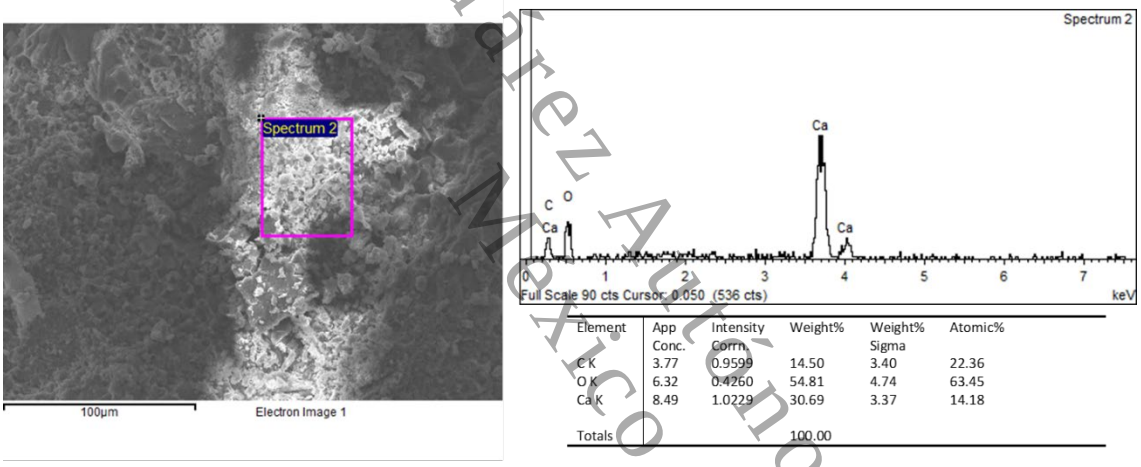
Así en una micrografía R1-T1 a 100 se µm de magnitud, se observa en varios partes puntuales, en la Figura 45 se observa el espectro de las partes con mayor superficie en la roca, la cual está compuesta por Ca y K, en la Figura 46 en esa misma micrografía se observó un espectro con morfología diferente presentando la apariencia de un relieve en la superficie de la roca teniendo como elemento diferente, Calcio y oxígeno.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Versión.



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
Ca K	8.98	1.1133	100.00	0.00	100.00
Totals			100.00		

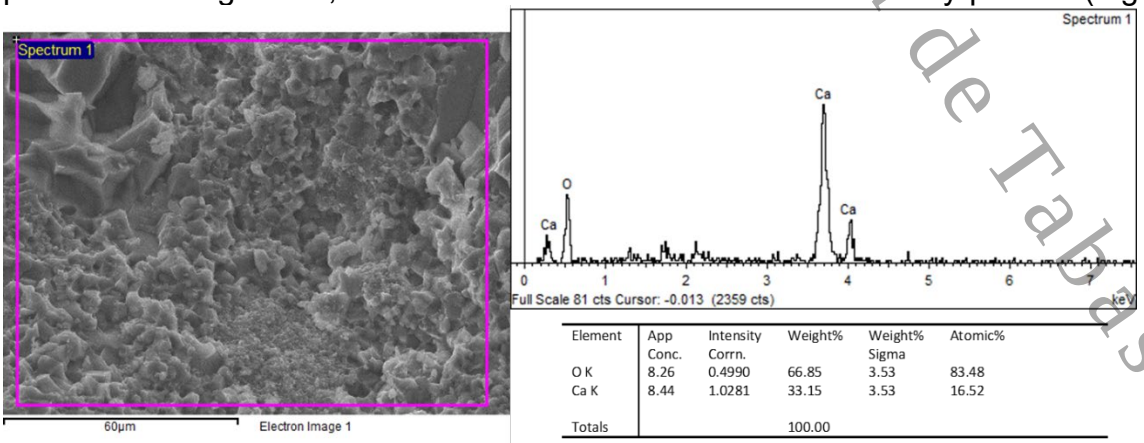
Figura 45. Primer hallazgo en R1T1 a 100 µm.



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
C K	3.77	0.9599	14.50	3.40	22.36
O K	6.32	0.4260	54.81	4.74	63.45
Ca K	8.49	1.0229	30.69	3.37	14.18
Totals			100.00		

Figura 46. Segundo hallazgo de R1-T1 100 µm.

Una superficie aparentemente homogénea en R1T1 a 60 µm da un espectro muy parecido a la figura 45, siendo constantes en estas rocas Calcio y potasio (Figura 47).



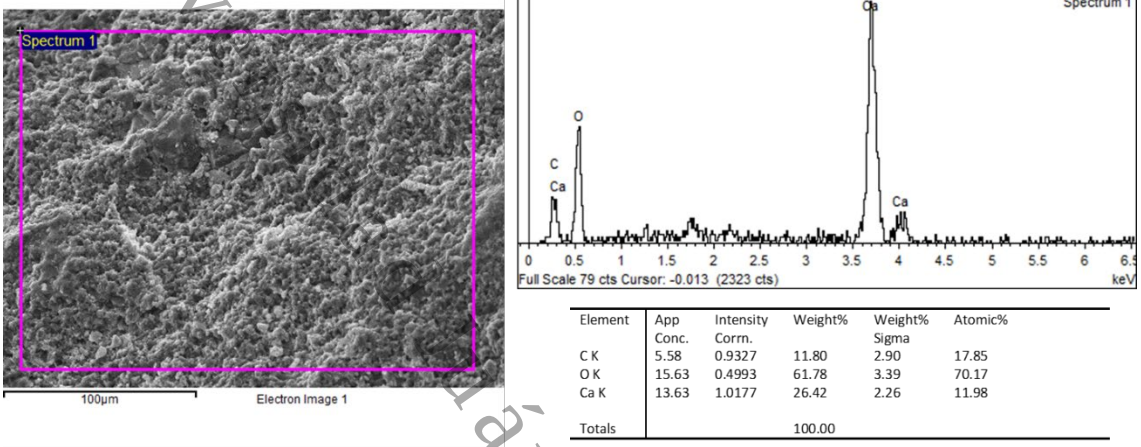
Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	8.26	0.4990	66.85	3.53	83.48
Ca K	8.44	1.0281	33.15	3.53	16.52
Totals			100.00		

Figura 47. Superfície homogenia de R1T1 a 60 µm.

En R2-T1 La superficie de la roca en R2- T1 se muestra homogénea la composición es muy

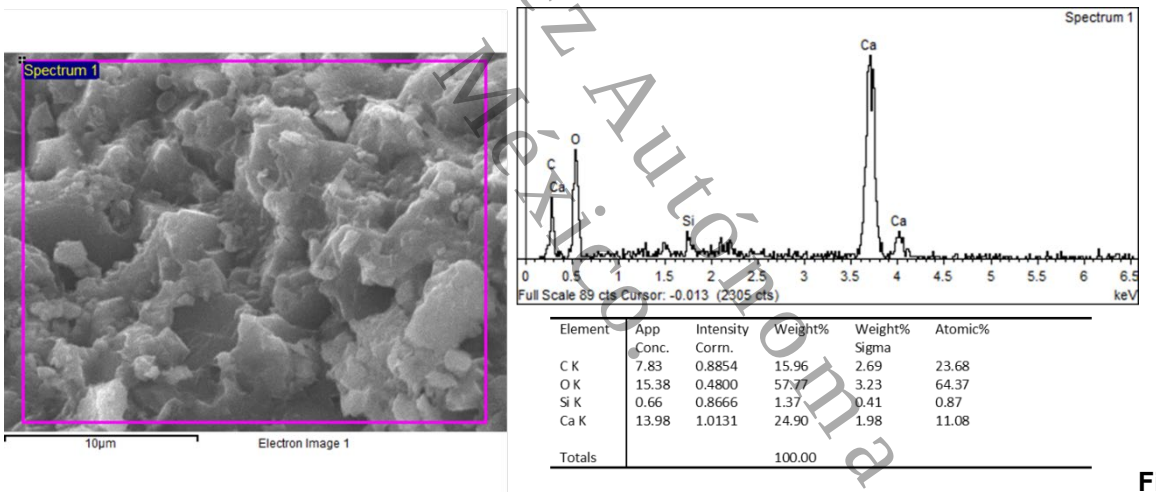
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

parecida a la encontrada para las rocas de R1-T1 (Figura 48) hay presencias también de pequeñas trazas de silicio (Figura 49).



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
C K	5.58	0.9327	11.80	2.90	17.85
O K	15.63	0.4993	61.78	3.39	70.17
Ca K	13.63	1.0177	26.42	2.26	11.98
Totals			100.00		

Figura 48. Primer hallazgo en rocas de R2T1

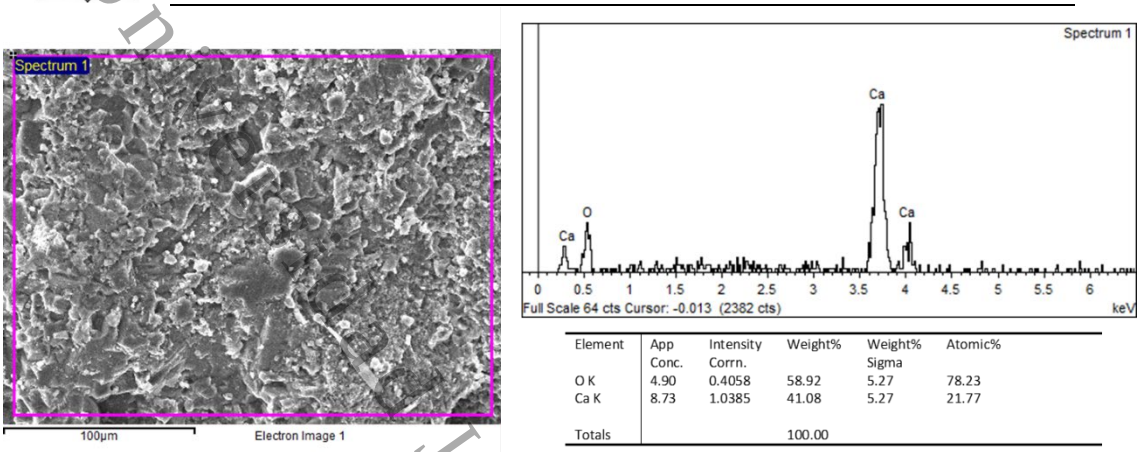


Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
C K	7.83	0.8854	15.96	2.69	23.68
O K	15.38	0.4800	57.77	3.23	64.37
Si K	0.66	0.8666	1.37	0.41	0.87
Ca K	13.98	1.0131	24.90	1.98	11.08
Totals			100.00		

Figura 49. Segundo hallazgo en rocas de R2T1 a 10µm.

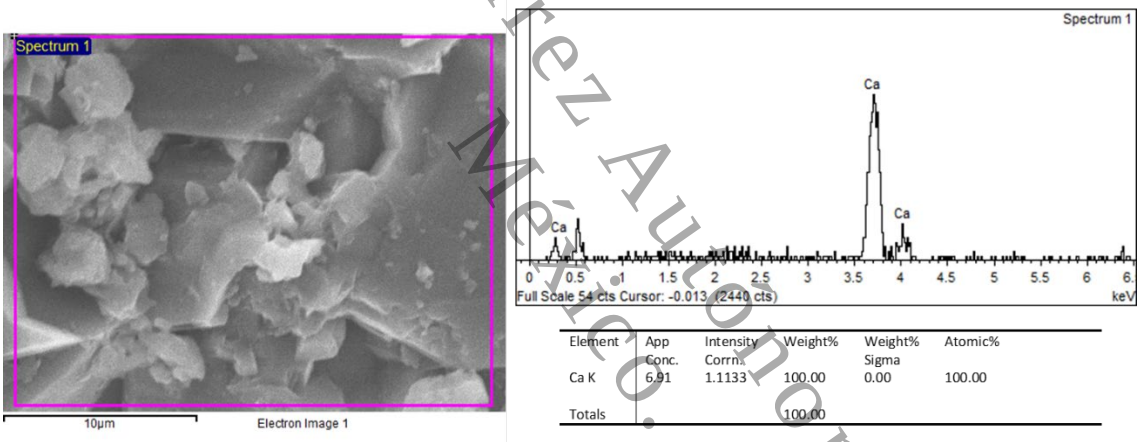
Las rocas en R3-T1 en la superficie homogénea, presenta composición parecida a la de las rocas de los reactores ya presentados. Lo que se refleja en la figura 50 y 51 magnificadas a 100 y 10 µm respectivamente.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	4.90	0.4058	58.92	5.27	78.23
Ca K	8.73	1.0385	41.08	5.27	21.77
Totals			100.00		

Figura 50. Primer hallazgo en rocas de R3T1 a 100 *µm.*

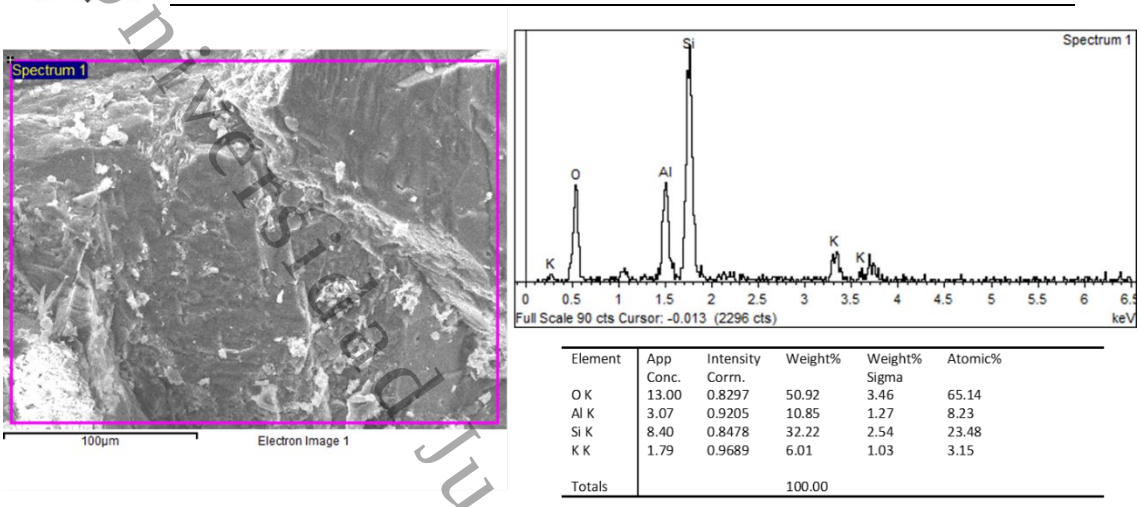


Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
Ca K	6.91	1.1133	100.00	0.00	100.00
Totals			100.00		

Figura 51. Segundo hallazgo en rocas de R3T1 a 10 µm.

En algunas rocas de R1-T2 se observaron pequeños bultos de características muy diferentes a la periferia al observarlo a 100 µm se encontró con Aluminio y Silicio en cantidades de trazas, y al observar la fotografía se observan pequeñas fracturas, por lo que podrían representar retenciones por las mismas (Figura 52).

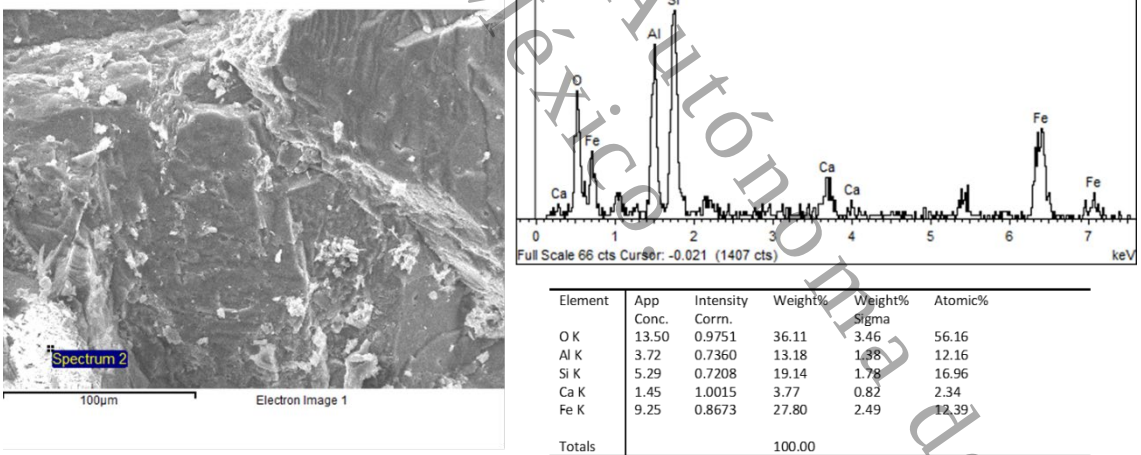
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	13.00	0.8297	50.92	3.46	65.14
Al K	3.07	0.9205	10.85	1.27	8.23
Si K	8.40	0.8478	32.22	2.54	23.48
K K	1.79	0.9689	6.01	1.03	3.15
Totals			100.00		

Figura 52. Primer hallazgo en rocas de R1T2 a 100 µm.

En otra magnificación a otra forma parecida a acumulaciones se encontró a demás los elementos encontrados en la figura 48, pequeñas trazas de aluminio, nuevamente en una fractura de la roca (Figura 53).

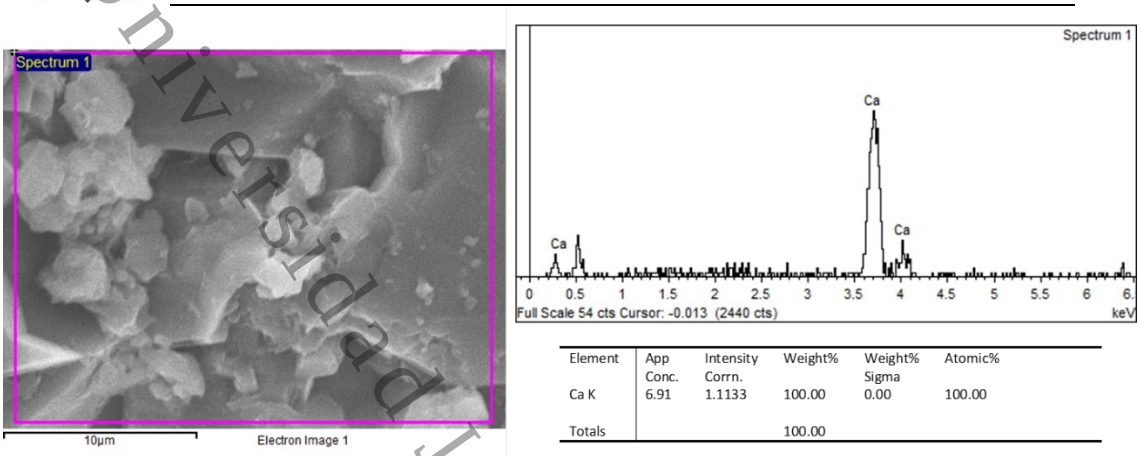


Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	13.50	0.9751	36.11	3.46	56.16
Al K	3.72	0.7360	13.18	1.38	12.16
Si K	5.29	0.7208	19.14	1.78	16.96
Ca K	1.45	1.0015	3.77	0.82	2.34
Fe K	9.25	0.8673	27.80	2.49	12.39
Totals			100.00		

Figura 44. Segundo hallazgo en rocas de R1T2 a 100 µm.

La superficie más homogénea de las rocas en R1- T2 presentan la misma composición que la encontrada anteriormente en las rocas de todos los reactores. lo que se puede ver en la figura 54 magnificada a 10 µm.

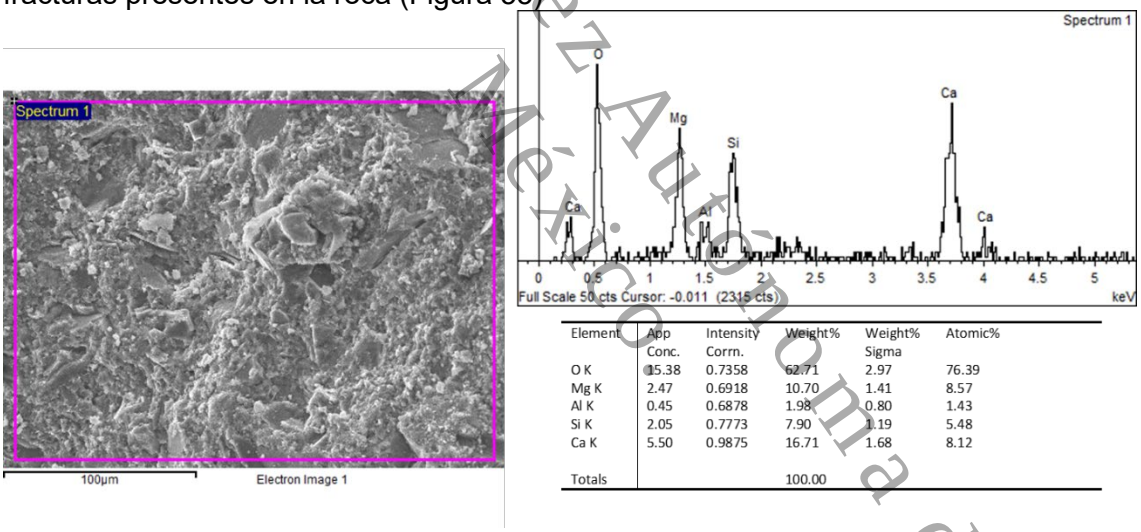
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
Ca K	6.91	1.1133	100.00	0.00	100.00
Totals			100.00		

Figura 54. Magnificación de la superficie de R1T2 a 10 µm.

Para el segundo reactor del tren 2 se observan pequeñas trazas de Mg y Al en algunas fracturas presentes en la roca (Figura 55)

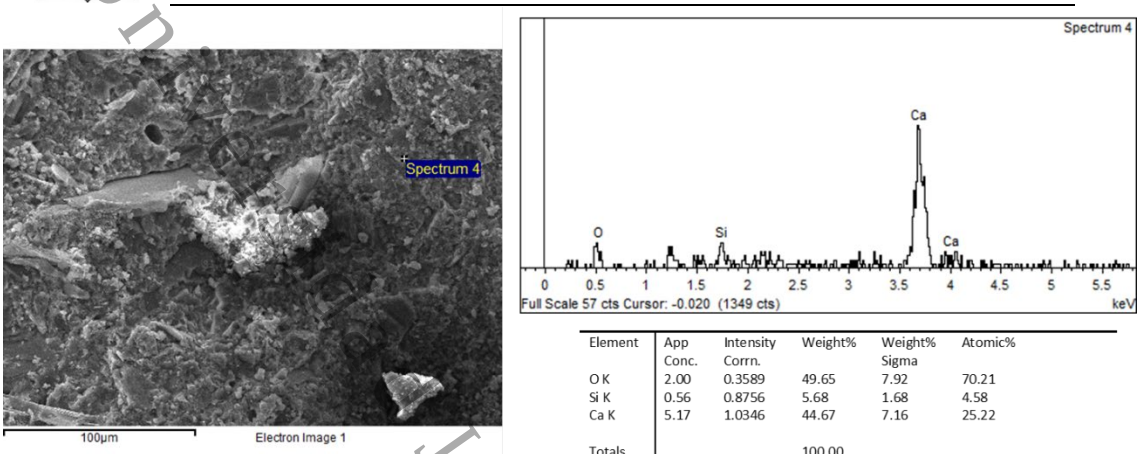


Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	15.38	0.7358	62.71	2.97	76.39
Mg K	2.47	0.6918	10.70	1.41	8.57
Al K	0.45	0.6878	1.98	0.80	1.43
Si K	2.05	0.7773	7.90	1.19	5.48
Ca K	5.50	0.9875	16.71	1.68	8.12
Totals			100.00		

Figura 55. Primer hallazgo en rocas de R2-T2 a 100 µm.

Se observa la misma composición de rocas formadas principalmente por Ca y K. (Figura 56.)

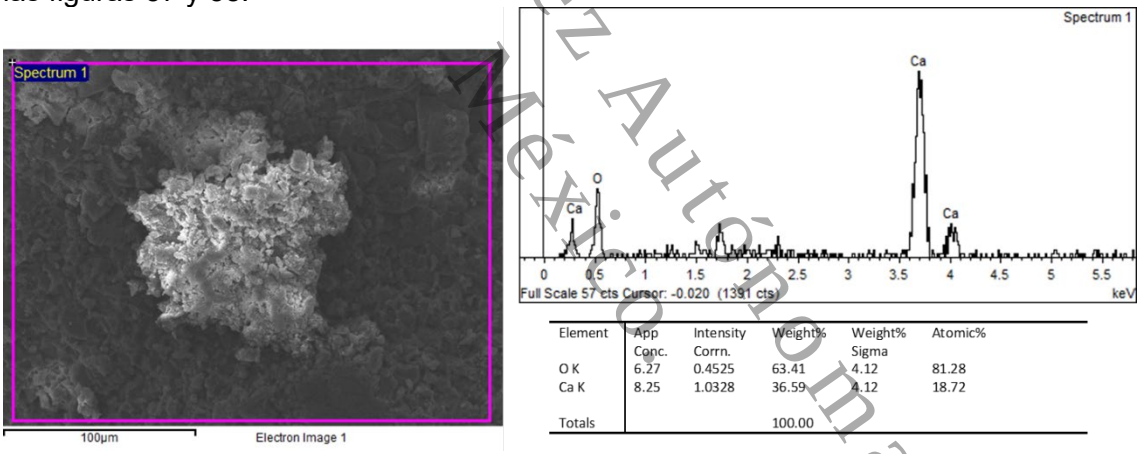
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	2.00	0.3589	49.65	7.92	70.21
Si K	0.56	0.8756	5.68	1.68	4.58
Ca K	5.17	1.0346	44.67	7.16	25.22
Totals			100.00		

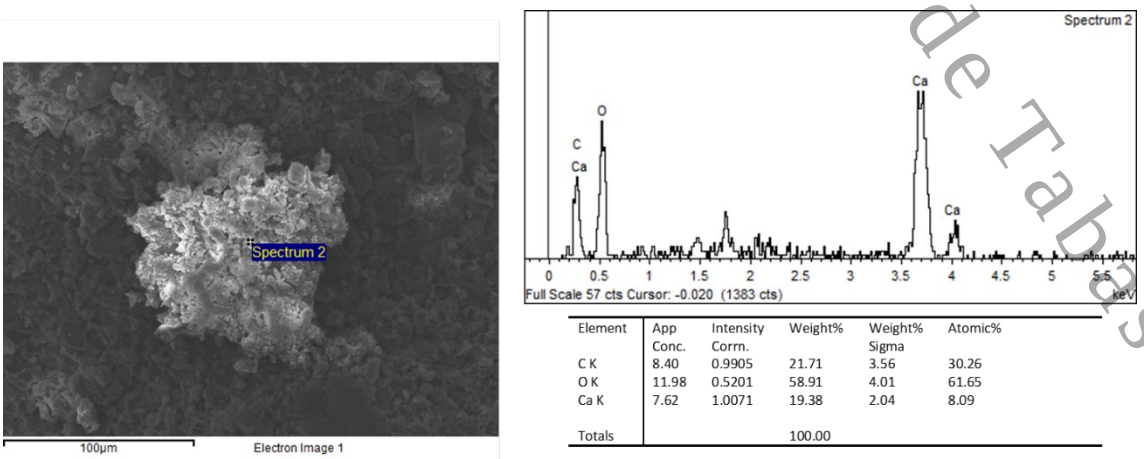
Figura 56. Segundo hallazgo en rocas de R2T2 a 100 µm

Esta composición se repite para las rocas del reactor 3 de tren 2 lo que se puede observar en las figuras 57 y 58.



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	6.27	0.4525	63.41	4.12	81.28
Ca K	8.25	1.0328	36.59	4.12	18.72
Totals			100.00		

Figura 57. Primer hallazgo en rocas de R3T2 a 100 µm.



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
C K	8.40	0.9905	21.71	3.56	30.26
O K	11.98	0.5201	58.91	4.01	61.65
Ca K	7.62	1.0071	19.38	2.04	8.09
Totals			100.00		

Figura 58. Segundo hallazgo en rocas de R3T2 a 100 µm.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México.

4.5 Discusiones

Los parámetros como color y turbiedad presentan alteraciones a lo largo del tren de tratamiento, el tren con mejor eficiencia de DQO es el tren2, siendo el reactor 1 con la especie *Pontendaria cordata* el que mejor realiza la depuración de DQO o materia orgánica, de igual forma se observa que a razón de DQO existe una eficiencia negativa en el en el último reactor del tren 2 y aunado en los segundo reactores de los dos trenes, existen eficiencias negativas, sobre todo marcado en los parámetros de color y turbiedad, lo que me habla de un mal funcionamiento de los reactores

Las eficiencias de color, turbiedad y DQO totales para el tren 1 de 62.27%, 49.28%y 96.19% y para el tren 2, 67.92%, 49.12% y 98.14% superando en porcentaje de remoción de DQO a los valores reportadas por Romellón *et. al.* en el 2022, con la configuración de un humedal de flujo subsuperficial con *Pontederia cordata*, un humedal artificial de flujo libre con *Thalia geniculata* y un humedal artificial de flujo libre con *Sagittaria lancifolia,* en el mismo tren de humedales, pero siendo la remoción de color más baja, ya que Romellón reporto 48.8 % de eficiencias de color para el tren 1 y 81 de DQO y para el tren 2, 58.3 de color y 73 de DQO. Así como para las reportadas por Romellón *et al*. 2023, del periodo en 2020 donde se reportaron eficiencias de DQO. Color *y* turbiedad de 78.65%, 62.2% y 61.4% en estas condiciones el mejor resultado lo dio *Sagittaria lancifolia.*

López y colaboradores reportaron en el 2023, una configuración de tren de tratamiento que consto de un HAFL con *Thalia geniculata*, seguido un HAFS con S*agittaria latifolia* y un HAFL con *Eichhornia crassipes* y *Pontederia cordata*, esta configuración removió el 89.2% de la DQO, y el 71.2% de color, lo que nuevamente es superior en color y turbiedad pero no así para las eficiencias de DQO, Esto me está indicando que el tren de tratamientos estudiado tienen condiciones óptimas para remover materia orgánica sin embargo, algunos componentes propios del sistema como metales, solidos en suspensión, y colorantes propios de las descomposición de las plantas pueden estar proporcionando color y turbiedad, lo que se puede constatar con las resultados de los parámetros de control, SDT, CE y el las concentraciones de metales en el agua.

Aunado a lo anterior todas estas inconsistencias en el humedal pueden deberse a varios motivos, uno de ellos se debe al cambio de configuración del humedal, que, al pasar de flujo subsuperficial a flujo, perdió gran cantidad de medio filtrante lo que hace que la capacidad de retención de sólidos se vea reducida, y tipo de flujo ya no se ideal, generalmente causadas por fenómenos de corto circuito, zonas muertas y recirculación interna debido a corrientes cinéticas o cambios de densidad (Pérez et. al. 2008) esto se ve reflejado en los últimos reactores, los cuales permanecen con alta cantidad de solidos suspendidos.

Por otro lado, la eficiencia de los HA va a depender muchos factores, tales como la carga hidráulica, el pH, el oxígeno disuelto, la temperatura (Varma *et al*. 2021), la variación de oxígeno disuelto se puede ver a lo largo del tren de tratamiento y fueron altamente

significas, de acuerdo con Yu *et al*., 2024 estas variaciones limitan las eficiencias de remoción de nutrientes, al desestabilizar los procesos de bioconversión del nitrógeno en los HA.

Otro de los factores de las inconsistencias o los cortos circuitos del HA puede deberse a la solvatación del medio de soporte ya que, este medio no ha sido cambiado desde que el humedal comenzó a funcionar, por lo que la acumulación de lodos alrededor del medio hace que este pierda porosidad. Y si esta acumulación se desprende trae consigo incremento de los parámetros básicos. De acuerdo con Gao *et al*. (2018), las deficiencias y obstrucciones en los humedales generalmente son causadas por el medio de soporte usado. Y de acuerdo con Xiang *et al*., 2021 Los HA se saturan después de un largo periodo de vida, debilitando la capacidad de adsorción, interceptación y transformación de contaminantes, e inclusive contaminando de manera endógena los sedimentos.

Las plantas al mantener sus partes vegetativas en contacto directo con el agua y no ser flotantes ni hidrofóbicas, tienden a la descomposición, lo que provoca aumento de color y desorción de iones metálicos en el agua, lo que es visible al realizar el análisis de metales.

El ciclo de vida de las plantas puede llegar afectar, y ayudar a la presencia de cortos circuitos en el humedal, ya que, si bien las plantas fueron llevadas al humedal en condiciones iguales, estas comienzan a multiplicarse generando plantas nuevas que demandan nutrientes, y a su vez, plantas de gran tamaño en estado terminal que se descomponen y liberan nutrientes al agua. Aunado a esto si el crecimiento de las plantas no es controlado, el crecimiento excesivo puede provocar acumulación de nutrientes en los sedimentos (Zhu *et al*. 2023)

En el caso de los metales encontrados en el agua se observa, que metales como el zinc o el aluminio no se encuentran en el agua de entrada, pero van apareciendo a lo largo del tren del tren de tratamiento, sin embargo este comportamiento no es exclusivo de nuestro tren ya que Pérez *et al*. 2023 encontraron comportamientos parecidos en las aguas del HAFS en El Dorado en República Dominicana quienes encontraron porcentajes de remoción negativas para níquel y manganeso, y disminución de cobre y cromo sin embargo al igual que este caso todas as concentraciones incluso en el afluente se encontraron por debajo de lo límites máximos permisibles por la legislación aplicable.

Al igual que en el caso de la materia orgánica para los metales también se observan aumento en metales Cr, Mn en los reactores números dos, que como mencionamos pudieran deberse a descomposición de la materia vegetal.

Estos datos de eficiencia aunados a las pruebas estadísticas, indica malas condiciones hidráulicas, ya que la aparición de zonas muertas y cortos circuitos disminuyen el rendimiento hidráulico del humedal. (Shih y Wang, 2020), razón por la cual conviene una nueva evaluación.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Las tres especies estudiadas presentan la mayor acumulación de metales en las raíces seguidos del tallo y por ultimo las hojas, esto es muy similar a lo encontrado por Mustapha *et al*. 2017 quien trabajo con *T. latifolia, Cyperus alternifolius* y *Cynodon dactylon* en un humedal de flujo subsuperficial vertical a escala piloto para la eliminación de metales de aguas residuales de refinería encontrando acumulación en plantas de Cu, Cr, Zn, Pb, Cd.

En el mismo tenor, al analizar los metales en los sedimentos, se encontró que la cantidad de metales analizados, supera con creces a los encontrados en la vegetación, hemos de recordar que estos sedimentos se han acumulado desde el 2016, comportamiento parecido al encontrado por Xion *et al.,* en el 2024, quienes de hecho mencionan a los sedimentos como el sumidero de metales del humedal, que ellos estudiaron un HA de 14 años de antigüedad. Y es que, de acuerdo con Alarcón *et al*., 2018 el pH contenido en los sedimentos es de vital importancia para que se lleven a cabo las reacciones químicas de transformación y biotransformación de los metales, ofreciendo las condiciones para la redox de los metales presentes en el humedal.

Si bien gracias al análisis SEM se constató que las rocas no cuentan con porosidad, la acumulación de estas brinda porosidad al medio, y al no tener mantenimiento adecuado esta porosidad se pierde, obstruyendo el paso del agua y por ende dificultando los procesos de absorción propios del humedal

Por otro lado, se puede observar en algunos parámetros mayor concentración en la cisterna que en el Cárcamo, esto también puede deberse a la gran cantidad de lodos en el fonde de esta, ya que no ha tenido una limpieza adecuada, y al llegar la carga de agua, esta golpea el fondo de la cisterna creando turbulencia provocando que los sólidos sean resuspendidos.

4.6. Conclusiones

Hemos llegado a la conclusión que la configuración usada en el tren de tratamiento de HA de flujo libre con 25 cm de medio de soporte es adecuada para trabajar DQO, pero no así color y turbiedad, los reactores 2 trabajado con Thalia Geniculata requiere rectificación ya que no está trabajando de manera adecuada, y este hace que la eficiencia general baje. Y por tanto no cumpla con la normativa ambiental vigente sobre los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

EL PTAR es adecuado para la remoción de Cr y Cu, en el agua que redujeron sus concentraciones de 18 y 22 mg/L respectivamente hasta 0.0 y 0.3 mg/L, no así para remoción de Mn ya que esta fue de 57.65 mg/L hasta 103 mg/L.

La mayor acumulación de metales se encontró en el sedimento, raíz, tallo y hojas en

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

orden descendente, siendo *Thalia geniculata* la mayor acumuladora de Aluminio y Hierro con 0.33 y 29.08 mg/g, (mg de metal por gramos de materia seca) respectivamente, y S*agittaria latifolia* la mayor acumuladora de cromo y cobre con 0.30 y 0.13 mg/g respectivamente, los demás metales estuvieron por abajo del límite de detección del equipo. El medio de soporte utilizado no acumula metales pesado en su interior.

Por lo que se sugiere, como primero punto, realizar el desazolve del cárcamo cisterna, retirar y cambiar el medio de soporte por uno de mayor tamaño para alargar la vida útil del mismo, y por último reconfigurar el humedal, trabajando con 2 reactores de flujo superficial, y uno de flujo libre colocado al final del tren que sirva como pulimento. Si tomando como ejemplo el humedal de flujo subsuperficial reportado por Lavrnic´ *et al.* en el 2019 al norte de Italia, el cual trata agua de desecho agrícola el cual llevaba 17 años funcionando en ese momento, podemos pensar en la configuración subsuperficial como una configuración de larga duración.

4.7. Referencias

Alarcón, M., Zurita, F., Lara, J., Vidal, Gladys. (2018). Humedales de tratamiento: Alternativas de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.

Ajiboye, T. O., Oyewo, O. A., & Onwudiwe, D. C. (2021). Simultaneous removal of organics and heavy metals from industrial wastewater: A review. Chemosphere, 262, 128379. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.12

Arteaga-Cortez, Viviana M., Quevedo-Nolasco, Abel, Valle-Paniagua, David H. del, Castro-Popoca, Martiniano, Bravo-Vinaja, Ángel, & Ramírez-Zierold, Jorge A. (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. Tecnología y ciencias del agua, 10(5), 319-343. Epub 15 de febrero de 2020. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-12

Batool, Ammara; Saleh, Tawfik A. (2019). Eliminación de metales tóxicos de las aguas residuales en humedales artificiales como tecnología verde; Papel catalizador de sustratos y quelantes. Ecotoxicología y Seguridad Ambiental, (189), 109924. https:// doi:10.1016/j.ecoenv.2019.109924

Brunhoferova Hana, Venditti Silvia, Hansen Joachim, Gallagher John, (2024)Life cycle performance and associated environmental risks of constructed wetlands used for micropollutant removal from municipal wastewater effluent,Cleaner Environmental Systems,12,100162,ISSN 2666-7894, https://doi.org/10.1016/j.cesys.2023.100162.

Gao, Y., Zhang, W., Gao, B., Jia, W., Miao, A., Xiao, L., & Yang, L. (2018). Highly efficient removal of nitrogen and phosphorus in an electrolysis-integrated horizontal subsurface-flow constructed wetland amended with biochar. Water Research, 139, 301–310. doi:10.1016/j.watres.2018.04.007

Lavrnić, S., Alagna, V., Iovino, M., Anconelli, S., Solimando, D., & Toscano, A. (2019). Hydrological and hydraulic behaviour of a surface flow constructed wetland treating agricultural drainage water in northern Italy. Science of The Total Environment, 134795.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

López Ocaña, Gaspar. Bautista Margulis, Raúl Germán. Ramos Herrera, Sergio.Torres Balcazar, Carlos Alberto. López Vidal, Rocío. Pampillón González, Liliana. (2018). Phytoremediation of wastewater with thalia geniculata in constructed wetlands: Basic pollutants distribution. WIT Transactions on Ecology and the Environment. 228, 53-63

Luna Pabello, Víctor Manuel; Ramírez Carrillo, Héctor Faustino (2004) Medios de soporte alternativos para la remoción de fósforo en humedales artificiales. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 20 (1) 31-38, https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37020104

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. https://doi.org/10.23913/ciba.v12i24.122

Mustapha, HI, van Bruggen, JJA y Lens, PNL (2017). Destino de los metales pesados en humedales artificiales de flujo subterráneo vertical que tratan aguas residuales de refinerías de petróleo con tratamiento secundario en Kaduna, Nigeria. Revista internacional de fitorremediación, 20 (1), 44–53 http://dx.doi.org/10.1080/15226514.2017.1337062

Pérez, A., & Torres, P. (2008). Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, (45), 27-40.

Pérez Yvelisse, Vargas Enmanuel, García-Cortés Daniel, Hernández William, Checo Humberto, Jáuregui-Haza Ulises, (2023) Efficiency and effectiveness of systems for the treatment of domestic wastewater based on subsurface flow constructed wetlands in Jarabacoa, Dominican Republic, Water Science and Engineering ISSN 1674-2370 https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.08.004.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2024, https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals/agua-limpia-saneamiento

Romellón Cerino, M. J., Cocoletzi 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. https://doi.org/10.5281/zenodo.7843244

Romellón-Cerino, M. J., Estrada-Pérez, N., & López-Ocaña, G. (2022). Remoción y cinética de contaminantes básicos en humedales artificiales en serie. Renewable Energy, Biomass & Sustainability (REB&S), 3(1), 24-34.

Semenov, Mikhail V.; Krasnov, George S.; Rybka, Ksenia Y.; Kharitonov, Sergey L.; Zavgorodnyaya, Yulia A.; Yudina, Anna V.; Shchegolkova, Nataliya M. (2020). Spatial Changes in Microbial Communities along Different Functional Zones of a Free-Water Surface Wetland. Microorganisms, 8(10), 1-23; https://doi.org/10.3390/microorganisms8101604

Shih, S.-S., & Wang, H.-C. (2020). Flow uniformity metrics for quantifying the hydraulic and treatment performance of constructed wetlands. Ecological Engineering, 155, 105942. doi:10.1016/j.ecoleng.2020.105942

Universidad Autónoma de Tabasco.

Varma, Mahesh; Gupta, Ashok Kumar; Ghosal, Partha Sarathi; Majumder, Abhradeep (2021). A review on performance of constructed wetlands in tropical and cold climate: Insights of mechanism, role of influencing factors, and system modification in low temperature. Science of The Total Environment,755, 142540. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142540

Tamiru M, Bekele G (2020) Various Absorbents and Parameters Affecting Removal of Water Hardness from Wastewater: Review. Int J Water Wastewater Treat 6(3): dx.doi.org/10.16966/2381-5299.173

Xiang Chen, Pei Luo, Feng Liu, Shunan Zhang, Hongfang Li, Runlin Xiao, Jinshui Wu (2021) Cold temperature increases nitrate accumulation in pilot-scale surface flow constructed wetlands with high rates of nitrogen removal, Agriculture, Ecosystems & Environment, 308,107250, ISSN 0167-8809, https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107250.

Xiong Rongwei, Li Yong, Gao, Xue Xiufang Yan, Huang Jinquan, Li Na, Chen Cheng, Chen Ming, (2024) Distribution and migration of heavy metals in the sediment-plant system: Case study of a large-scale constructed wetland for sewage treatmen. Journal of Environmental Management,349. 119428, ISSN 0301-4797, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119428

Yu Guanlong, Chen Huifang, Chen Jundan Chen, Si, Long Yuannan, Huang Jiajun, Wang Yongqi, He Songcheng (2024) Enhanced nitrogen removal through aerobic denitrifying bacteria in horizontal subsurface flow constructed wetlands: Influencing factors and microbial community structure,Chemical Engineering Journal, 481, 148654, ISSN 1385-8947, https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148654.

Zhu Liqin, Zhang Haikuo, Li Yiping, Cheng Guanghuan, Zhu Yimeng, Song Congqing, Wang Ling, Du Guanchao, (2023) Long-term variation characteristics of nutrients in the water and sediments of a surface flow constructed wetland with micro-polluted water sources, Ecological Engineering, 187, 106848, ISSN 0925-8574, https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106848

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Capítulo 5. Conclusiones generales

La primera parte de esa experimentación fue la etapa de adaptación de las especies en las cuales se lograron adaptar *Sagitaria latifolia* y *Pontendaria cordata* a humedales de flujo libre y superficial, teniendo mayores efectividades cuando se trabajan en HA de flujo subsuperficial.

Las mejores eficiencias de remoción de contaminantes fueron presentadas por *Sagitaria latifolia* y *Pontendaria cordata* en humedales de flujo subsuperficial presentando sagitaria porcentajes de remoción de turbiedad, color y DQO en 95.9, 89.4, 95.7% respectivamente, y un coeficiente cinético de DQO 0.89 días^{-1}, seguido de *P. cordata* que presento remociones de DQO y turbiedad del 80 y 70% respectivamente.

En la segunda fase se comprobó esta eficiencia en un tren de tratamientos dentro de una planta de HA puesta en marcha, verificándose que las 3 especies sembradas en este tren de tratamiento tienen capacitad de acumulación de metales.

Los HA en el trópico húmedo necesitan mantenimiento, que incluyen cosecha y poda de los humedales para que estos mantengan un óptimo funcionamiento, contrario a lo que predican los manuales de funcionamiento de los HA que no sugieren mantenimiento, ya que las plantas en fase terminal, liberan sus nutrientes en el lugar de destino final, y si esto sucede en los HA se presenta fenómenos de corto circuito, situación que empeora en época de lluvia, ya que las lluvias torrenciales remueven los sedimentos.

Las especies al pasar de una unidad experimental a una PTAR cambian las eficiencias debido a la carga y las condiciones no controladas a las que son sometidos, sin embargo, en este caso conservaron las eficiencias de DQO.

Los capítulos 2 y 3 estuvieron enfocados en responder sobre la capacidad de remoción de los parámetros de control (pH, temperatura, oxígeno disuelto, potencial oxido reducción, conductividad eléctrica, solidos disueltos totales, turbiedad, color, DQO) las especies y tipos de HA, así como la obtención de su coeficiente cinético de degradación y su cumplimiento ambiental.

Dentro del capítulo 2 se presentan los resultados del HA de flujo libre y superficial de *Sagittaria latifolia*, que presenta un coeficiente de degradación de DQO de 0.34 días^{-1},Turbiedad 0.34 días^{-1} y color de 0.2 días^{-1} para HA de flujo libre, siendo las contantes cinéticas para flujo superficial de DQO de 0.89 días^{-1},turbiedad 0.91 días^{-1} y color de 0.64 días^{-1}, con un THR de 6.7 días para flujo libre y 3.52 días para el fujo superficial.

Finalmente, el capítulo 4 da respuesta a la distribución de metales en los componentes del HA

Siendo *Thalia geniculata* la especie que presenta la mayor acumulación de aluminio y

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

hierro, siendo la raíz la parte que presenta mayor acumulación. *Sagittaria latifolia* es la especie con mayor acumulación de cromo y cobre, siendo de nueva cuenta la raíz la parte con mayor acumulación de estos elementos, a pesar de esto las 3 especies estudiadas presentan capacidad de acumulación de metales. Las especies vegetales no son el único lugar donde se acumulan los metales, los sedimentos de igual manera presentan acumulación con mayor presencia en los primeros reactores y disminuyendo a lo largo del humedal.

Se acepta la Ho ya que los HA operados con especies nativas alcanzaron eficiencias de remoción de DQO (>80%).

Para la hipótesis 2, se descarta la Ho y se aceptan Ha ya que de acuerdo con el capítulo 4, diferentes especies, acumulan de manera diferente los metales a lo largo de su sistema

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Anexo A. Publicaciones del proyecto

Magaña Flores A., Hernández Trejo H., Valdés Manzanilla A., Bautista Margulis R. G., López Ocaña G. (2021). *Ludwigia octovalvis* en la Remoción de Color y Turbiedad en Humedales Artificiales. Memoria del congreso internacional de investigación, Academia Journals Tabasco, Vol.13 No.8, 306-311. ISSN 1946-5351.
https://static1.squarespace.com/static/55564587e4b0d1d3fb1eda6b/t/615a64025dff477714ecd45d/1633313799271/Tomo+03+-+Art%C3%ADculos+del+Congreso+Academia+Journals+Tabasco+2021.pdf

Magaña Flores A., López Ocaña G. (2022). *Gimnocoronis sessilis* en el tratamiento de aguas residuales domésticas con humedales artificiales. Memoria del congreso internacional de investigación, Academia Journals Chetumal, Vol.14 No.3, 359-364. ISSN 1946-5351.
https://static1.squarespace.com/static/55564587e4b0d1d3fb1eda6b/t/629b85f65ddcdf4491df01a8/1654359549098/Tomo+04+-+Art%C3%ADculos+del+Congreso+AJ+Chetumal+2022.pdf

Magaña Flores A., López Ocaña G., Palma Ávalos S. (2023). Remoción de Color y Turbiedad con Asclepias curassavica y Justicia comata l. Lam en Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial. Memoria del congreso internacional de investigación, Academia Journals Fresnillo 2023, Vol.15 No.3, 7100-7104. ISSN 1946-5351.
https://static1.squarespace.com/static/55564587e4b0d1d3fb1eda6b/t/644ffb45fa140230d8e50833/1682963279860/Tomo+07+-+Ingenier%C3%ADas+-+Congreso+Academia+Journals+Fresnillo+2023.pdf

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 (REB&S), Vol. 4, No. 1, 1-13. DOI: https://doi.org/10.56845/rebs.v4i1.64

Magaña-Flores, A. and López-Ocaña, G. (2023). Domestic wastewater treated with Sagittaria latifolia in constructed wetlands. DYNA, 90(226), pp. 27-35, April - June, DOI: https://doi.org/10.15446/dyna.v90n226.105263 .

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Anexo B. Memoria fotográfica

Reactores experimentales antes del mantenimiento.

Reactor experimental de flujo libre con mantenimiento terminado

Reactor experimental de flujo subsuperficial con mantenimiento terminado

Ludwigia Octovalvis en HAFL

Ludwigia Octovalvis en HAFs

Gymnocoronis sessilis en HA de flujo libre y superficial

Poda y mantenimiento de tren de HA

Tallaje de la especie

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

Separación de la especie en hoja tallo y raíz

Toma de muestra

Análisis de laboratorio

Muestras de agua

Demostración de uso de equipo

Demostración de análisis de agua

Recorrido de alumnos por la planta

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Anexo C. Perspectivas y lecciones aprendidas

Trabajar con HA es un proceso complejo, ya que el propio sistema es un sistema dinámico, donde interactúa todas y cada una de las partes, cada actor tiene un papel primordial en su funcionamiento, desde el agua residual, pasando por el medio de soporte, la especie vegetal, los microorganismos, los factores ambientales entre otros. Así que pensar en estudiar un solo participante, resultaría en un estudio un estudio incompleto, razón por la cual, el análisis de metales se llevó a cabo no solo en el agua, sino también en la especie vegetal, los sedimentos y en las rocas que conformaron el medio de soporte.

Si bien es cierto que las investigaciones y publicaciones sobre HA han ido en aumento, la mayoría de estos ha trabajo en apego a los establecido por manuales como la EPA o CONAGUA en México, esto con vegetaciones ya probadas como lo son junco, caña o tule, normalmente en climas templados o fríos que tienen el inconveniente de no adaptarse a las condiciones climáticas de la región. Por lo que el trabajar con vegetación propia del estado del estado, represento un reto, ya que no se tenía la información suficiente para su implementación, y de la mayoría de ellas se desconocía totalmente su ciclo biológico.

Trabajar con aguas proveniente de las actividades de una institución como es la UJAT, también tuvo ciertos inconvenientes. Ya que los recesos de actividades o los picos de mucha actividad provocan condiciones variantes en las aguas, que no permitan que los equipos analizaran correctamente, en este mismo tenor, cuando los laboratorios o cuidan sus procesos, llegan cargas de sustancias nocivas que repercuten la toxicidad del HA. Lo que muchas veces llevo a muerte de especies vegetales y replantear el experimento.

La gran mayoría de manuales de operación de HA los menciona como plantas de bajo mantenimiento, lo que pudimos comprobar, que al menos en nuestra región y con especies que crecen rápidamente, los mantenimientos deben ser constantes para que la materia orgánica proveniente de la especie vegetal no obstruya el sistema hidráulico del HA.

Una de las bases para poder llevar a cabo este proyecto son las relaciones con otras instituciones de investigación, lo cual me permitió realizar determinaciones como la de los metales en rocas, sedimentos y materia vegetal de la no se cuenta con el equipo adecuado dentro de la institución.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Anexo D. Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Título de la tesis: Degradación de contaminantes y acumulación de metales en humedales artificiales.

Autor(a) de la tesis: Anel Magaña Flores

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8087-0775

Resumen de la tesis

Las aguas residuales representan un problema grave de contaminación ambiental, pues el mundo entero entro en la crisis del agua ella ahora es indispensable tratarla e integrarla al ciclo urbano del agua. Esto ha hecho que se desarrollen tecnologías de tratamiento para recuperar y aprovechar el agua después de diversos usos en la sociedad. Entre los tratamientos que han presentado mayor aceptación a nivel mundial son los humedales artificiales (HA), que son alternativas ecológicamente viables. Sin embargo, aunque esta tecnología se emplea en el tratamiento de diversas aguas residuales, con HA de flujo libre y subsuperficial, todavía es necesario conocer el comportamiento cinético por tipo de humedal y especie utilizada, pues pueden alcanzar diferentes velocidades de degradación y se desconoce la bioacumulación de metales en su sistema por lo que es importante conocer los efectos a largo plazo que estos pueden provocar y es necesario conocerlos para recomendar un manejo adecuado. En este trabajo se estudió la degradación de contaminantes y acumulación de metales en humedales artificiales, y se presenta en el capítulo 1 el Protocolo de Tesis, en capítulo 2, aguas residuales domésticas tratadas con *Sagittaria latifolia*, en el capítulo 3, comportamiento cinético y modelación de la distribución espacial de contaminantes básicos en un humedal artificial de flujo subsuperficial con *Pontederia cordata*, en el capítulo 4, distribución de metales pesados en humedales en serie de flujo libre con especies, *Sagittaria latifolia*, *Thalia geniculata* y *Pontederia cordata*. Finalmente, el capítulo 5 presenta las conclusiones y recomendaciones.

De manera general al evaluar el desempeño de *S. latifolia* y *P. cordata* en HA experimentales de flujo libre y flujo subsuperficial, en la remoción de contaminantes básicos, las mejores eficiencias de remoción de contaminantes se presentaron en HA de flujo subsuperficial. *S. latifolia* obtuvo porcentajes de remoción de turbiedad, color y DQO en 95.9%, 89.4% y 95.7% respectivamente, y un coeficiente cinético de DQO 0.89 días^{-1}. *P. cordata* presentó remociones de DQO y turbiedad del 80 y 70% respectivamente. En

cuanto a metales pesados la mayor acumulación presentada en HA en serie (tres de flujo libre) se encontró en los sedimentos, seguido del raíz, tallo y hojas. *T. geniculata* es la mayor acumuladora de Aluminio y Hierro con 0.33 y 29.08 mg/g, (mg de metal por gramos de materia seca) respectivamente y *S. latifolia* es la mayor acumuladora de cromo y cobre con 0.30 y 0.13 mg/g respectivamente. En el medio de soporte no se encontró acumulado algún metal pesado. Los HA operados con estas especies nativas alcanzaron eficiencias de remoción de DQO (>80%). La acumulación de metales pesados varia conforme a la especie. Los HA confirman ser una alternativa viable para el tratamiento de efluentes de las comunidades del sureste de México y garantizan la protección de cuerpos receptores con la remoción de carga orgánica e inorgánica siendo eficientes en la remoción de metales. Esta información es importante para el sector científico-académico y para los organismos reguladores y responsables del tratamiento de las aguas residuales en México y la región.

Palabras clave: Cinética de degradación, metales, remoción, humedales artificiales.

Referencias citadas

Alarcón, M., Zurita, F., Lara, J., Vidal, Gladys. (2018). Humedales de tratamiento: Alternativas de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.

Ajiboye, T. O., Oyewo, O. A., & Onwudiwe, D. C. (2021). Simultaneous removal of organics and heavy metals from industrial wastewater: A review. Chemosphere, 262, 128379. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.12

Arteaga-Cortez, Viviana M., Quevedo-Nolasco, Abel, Valle-Paniagua, David H. del, Castro-Popoca, Martiniano, Bravo-Vinaja, Ángel, & Ramírez-Zierold, Jorge A. (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. Tecnología y ciencias del agua, 10(5), 319-343. Epub 15 de febrero de 2020. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-12

Batool, Ammara; Saleh, Tawfik A. (2019). Eliminación de metales tóxicos de las aguas residuales en humedales artificiales como tecnología verde; Papel catalizador de sustratos y quelantes. Ecotoxicología y Seguridad Ambiental, (189), 109924. https://doi:10.1016/j.ecoenv.2019.109924

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.