



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO



DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

**EFICIENCIA DE *SAGITTARIA LATIFOLIA* Y *PONTEDERIA SAGITTATA*
EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE SERVICIOS
COSMÉTICOS VÍA HUMEDALES ARTIFICIALES**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO DE CIENCIAS AMBIENTALES**

PRESENTA:

ING. AMB. MONSERRAT GUADALUPE BARCO MENDEZ.

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

**EN CODIRECCIÓN DE:
DR. DAVID GUERRERO ZARATE.**

VILLAHERMOSA, TABASCO, SEPTIEMBRE DE 2026



Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, el día 14 del mes septiembre del año 2026, el que suscribe **C. Monserrat Guadalupe Barco Mendez** alumna(o) del Programa de **Maestría en Ciencias Ambientales** con número de matrícula **242G25006**, adscrito a la **División de Ciencias Biológicas** de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor(a) (es) de la Tesis de Maestría titulada "**EFICIENCIA DE SAGITTARIA LATIFOLIA Y PONTEDERIA SAGITTATA EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES COSMÉTICOS VÍA HUMEDALES ARTIFICIALES**" dirigida por el Dr. Gaspar López Ocaña y Dr. David Guerrero Zarate.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la **LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR** (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita. Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 14 de septiembre 2026

Monserrat Guadalupe Barco Mendez

Firma



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2026
año de
Margarita
Maza

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

SEPTIEMBRE 04 DE 2026

**C. MONSERRAT GUADALUPE BARCO MENDEZ
PAS. DE LA MAESTRIA EN CIENCIAS AMBIENTALES
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 74 al 77 del Cap. IV del Reglamento General de Estudios de Posgrado de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales titulado: **"EFICIENCIA DE SAGITTARIA LATIFOLIA Y PONTEDERIA SAGITTATA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE SERVICIOS COSMÉTICOS VÍA HUMEDALES ARTIFICIALES"**, asesorado por el Dr. Gaspar López Ocaña y Dr. David Guerrero Zárate, sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado integrado por el Dr. Humberto Hernández Trejo, Dra. Melina del Carmen Uribe López, Dr. Gaspar López Ocaña, Dr. David Guerrero Zárate y M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar

ATENTAMENTE
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE


DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

DIRECCIÓN

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



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

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



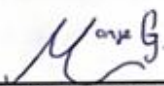
Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 14 de septiembre de 2026

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 "EFICIENCIA DE SAGITTARIA LATIFOLIA Y PONTEDERIA SAGITTATA EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES COSMÉTICOS VÍA 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 periodo de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

COLABORADORES


MONSERRAT GUADALUPE BARCO MENDEZ
ALUMNA EGRESADA


DR. GASPAR LÓPEZ OCANA
DIRECTOR DE TESIS


DR. DAVID GUERERO ZARATE
CODIRECTOR DE TESIS

TESTIGOS


MI. NANCY ESTRADA PEREZ


ING. PEDRO LUIS GARCÍA MARTÍNEZ



UJAT
UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



2026
Año de
Margarita
Maza

• División Académica de Ciencias Biológicas
DIRECCIÓN

Villahermosa, Tabasco a 04 de septiembre de 2026

C. MONSERRAT GUADALUPE BARCO MENDEZ
EGRESADA DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES
PRESENTE

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad, y por instrucciones de la Dirección de Posgrado, se implementó la revisión de los trabajos recepcionales (tesis), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación que se desarrollan 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 registrados en el SNP de la SECIHTI.

Por este conducto, hago de su conocimiento que, 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: ***Eficiencia de *Sagittaria latifolia* y *Pontederia sagittata* en el tratamiento de aguas residuales de servicios cosméticos vía humedales artificiales.***

OBSERVACIONES:

1. **El índice de similitud general obtenido fue de 06%**, 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. Aun que el índice de similitud obtenido indica coincidencias con 16 fuentes de consulta (las cuales corresponden con fuentes de internet y con publicaciones), éstas se detectaron en el Capítulo de Protocolo de tesis y se refieren a frases en las secciones de Marco Teórico y Metodología, lo que no demerita el documento de tesis, pero se recomienda a la sustentante, y sus directores de tesis, revisar las oraciones identificadas



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



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

www.ujat.mx



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ciencias Ambientales



UJAT

UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2026
año de
Margarita
Maza

División Académica de Ciencias Biológicas
DIRECCIÓN

con similitud y ajustarlas a una redacción propia en la medida de lo posible, e incluir las citas y referencias bibliográficas pertinentes conforme al formato APA vigente.

3. **Se adjunta el informe de originalidad de la tesis** obtenido a través de la herramienta Turnitin iThenticate.
4. Finalmente, se le solicita a la C. MONSERRAT GUADALUPE BARCO MENDEZ, integrar en la versión final de tesis, este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate de acuerdo con lo señalado en los Lineamientos institucionales para la elaboración de tesis de posgrado.

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

ATENTAMENTE

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR



DIRECCIÓN

C.C.P. Dr. Gaspar López Ocaña - Director de tesis.
Dr. David Guerrero Zárate - Codirector de tesis
Archivo



KM 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
VILLAHERMOSA, CENTRO, TABASCO, MEX.

Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 e-mail: direccion.dacbiol@ujat.mx



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

www.ujat.mx



✓ iThenticate Página 1 de 128 - Portada

Identificador de la entrega trn:oid::3117:619666157

Montserrat Guadalupe Barco Mendez

Eficiencia de *Sagittaria latifolia* y *Pontederia sagittata* en el tratamiento de aguas residuales de servicios cosméticos vía h...

• Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:619666157

124 páginas

Fecha de entrega

2 sep 2026, 11:52 a.m. GMT-6

42.053 palabras

Fecha de descarga

4 sep 2026, 9:07 a.m. GMT-6

227.890 caracteres

Nombre del archivo

TESIS MCA_Monserrat Guadalupe Barco Mendez_2026.pdf

Tamaño del archivo

3.9 MB

✓ iThenticate Página 1 de 128 - Portada

Identificador de la entrega trn:oid::3117:619666157



✓ iThenticate

Página 2 de 128 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega: trn:oid::3117:619666157

6% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 14 palabras)

Exclusiones

- ▶ N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 6% Fuentes de Internet
- 0% Publicaciones
- 2% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

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

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

✓ iThenticate

Página 2 de 128 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega: trn:oid::3117:619666157



✓ iThenticate

Página 3 de 128 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega: trn:oid::3117:619666157

Fuentes principales

6% Fuentes de Internet
0% Publicaciones
2% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

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

1	Internet	
ri.ujat.mx		3%
2	Internet	
static1.squarespace.com		2%
3	Trabajos entregados	
ujatposgrado on 2025-08-20		<1%
4	Internet	
ciba.org.mx		<1%
5	Internet	
aldeser.org		<1%
6	Internet	
www.scielo.org.mx		<1%
7	Internet	
www.aprendemas.com		<1%
8	Internet	
www.coursehero.com		<1%
9	Trabajos entregados	
ujatposgrado on 2025-08-19		<1%
10	Internet	
bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083		<1%
11	Internet	
repository.uamerica.edu.co		<1%

✓ iThenticate

Página 3 de 128 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega: trn:oid::3117:619666157



✓ iThenticate

Página 4 de 128 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::3117:619666157

12

Internet

www.ciba.org.mx

<1%

13

Internet

docplayer.es

<1%

14

Internet

congresorebiza.mx

<1%

15

Internet

ejeutap.edu.co

<1%

16

Internet

laboratorioclinico1.blogspot.com

<1%

✓ iThenticate

Página 4 de 128 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::3117:619666157



DEDICATORIA

A Dios por darme vida, salud y fortaleza para culminar mi maestría.

A mis padres, Silvia y Cirilo, por su apoyo, paciencia y sabiduría, por creer en mí en cada etapa de mi vida y brindarme un hogar lleno de amor.

A mis hermanas Diana y Ariana, quienes me han acompañado siempre y me han brindado de cariño, alegría y motivación para no rendirme.

Todo es por y para ustedes.



AGRADECIMIENTOS

A la División Académica de Ciencias Biológicas de la UJAT por permitirme ser parte de su institución y abrirme las puertas para desarrollar mi trabajo y a mis docentes por compartir una parte de su conocimiento y experiencias conmigo, por sembrar en mí el interés por la ciencia y ser un ejemplo para abrir mis horizontes a nuevas metas.

A mi asesor Dr. Gaspar López Ocaña, por su apoyo y confianza al brindarme la oportunidad de formar parte su grupo de alumnos de investigación, así como también por su constante y valiosa dirección en esta investigación.

A mis compañeros y amigos por las risas en los momentos de estrés, las desveladas compartidas y por brindarme de su confianza y su amistad. Gracias a Nazareth, Nancy, Selma, David, Enoc, Pedro, Daniel, Keyla, Rosa, Jatziri, Itzel, Néstor, Chema, y a todos aquellos que estuvieron presentes durante estos dos años en el laboratorio, los llevaré a todos en mi corazón para siempre.

A la futura Dra. Nancy Estrada Pérez, por su paciencia en enseñarme y ayudarme desde el primer día, por ser una inspiración para mí como profesional y como persona.

A mi comité sinodal, el Dr. Humberto Hernández Trejo, Dra. Melina Uribe López, Dr. Gaspar López Ocaña, Dr. David Guerrero Zarate y MC. Carlos Alberto Torres Balcázar por el tiempo que me dedicaron para asesorarme y aconsejarme en cada revisión de este trabajo.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por otórgame una beca con mi CV 203699, la cual me ayudo a lo largo de mi maestría y poder concluirla.



ÍNDICE

Resumen	18
Abstract.....	20
Capítulo 1. Protocolo de Tesis	22
1.1 Introducción	22
1.2 Antecedentes	24
1.3 Justificación	26
1.4 Pregunta de Investigación.....	27
1.5 Hipótesis	27
1.6 Objetivos	28
1.6.1 Objetivo General	28
1.6.2 Objetivos específicos	28
1.8 Costos del proyecto	34
1.9 Cronograma de actividades.....	36
1.10 Referencias.....	37
Capítulo 2. Inventario y Caracterización de Aguas Residuales de Servicios Cosméticos en Villahermosa, Tabasco	40
2.1 Resumen	40
2.2 Introducción	41
2.3 Materiales y métodos	41
2.4 Resultados.....	45
2.5 Discusión	47
2.6 Conclusiones	49
2.7 Referencias.....	50
Capítulo 3. Tratamiento de Aguas Residuales de Servicios Cosméticos en Humedales Artificiales con <i>Sagittaria latifolia</i>.....	52
3.2 Introducción	53
3.3 Materiales y métodos	54
3.4. Resultados	57
3.5. Discusión	60
3.6 Discusiones.....	67
3.7. Referencias.....	71
Capítulo 4. Tratamiento de aguas residuales de servicios cosméticos en humedales artificiales con <i>Pontederia sagittata</i>	75
4.2. Introducción	76



4.3. Materiales y métodos	77
4.4. Resultados	82
4.5 Resultados	87
4.6 Discusiones	105
4.7 Conclusión.	107
4.8. Referencias.....	108
Capítulo 5. Remoción de microorganismos en aguas residuales domésticas y de servicios cosméticos tratadas vía humedales artificiales con <i>Pontederia sagittata</i>.	112
5.2. Introducción	113
5.3. Materiales y métodos	113
5.4 Resultados y discusiones	119
5.5 Conclusión	124
5.6 Referencias.....	126
Capítulo 6. Conclusiones generales	128
Anexo A. Catálogo de especies presentes en los Humedales Artificiales.....	130
Anexo B. Productos adicionales del proyecto	133
Anexo C. Memoria fotográfica.....	134
Anexo D. Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	138

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Antecedentes a nivel internacional	24
Tabla 2. Antecedentes a nivel nacional.....	25
Tabla 3. Antecedentes a nivel local.....	25
Tabla 4. Lista de productos utilizados en los servicios cosméticos en la actualidad	26
Tabla 5. Equipos y metodologías empleadas en la determinación analítica de calidad del agua	31
Tabla 6. Presupuesto utilizado en el proyecto	34
Tabla 7. Costos por partida.....	35
Tabla 8. Cronograma de actividades.....	36
Tabla 9. Establecimientos de servicios cosméticos registrados en Villahermosa Tabasco.....	42
Tabla 10. Resumen de resultados de las encuestas	45
Tabla 11. Cantidad de aguas residuales generadas por tipo de estética.....	46
Tabla 12. Ingredientes que componen el agua residual cosmética	46
Tabla 13. Calidad del agua por tipo de servicio cosmético (promedio $\pm$ desviación estándar)....	47
Tabla 14. Valores promedios (+DE) de la calidad del agua de las muestras compuestas provenientes de servicios cosméticos con mayor demanda en Villahermosa.....	47
Tabla 15. Productos del agua residual sintética de servicios cosméticos	55
Tabla 16. Factores del diseño experimental.....	56
Tabla 17. Valores promedios ($\pm$ DE) de las características de <i>Sagittaria latifolia</i> en el HA de flujo subsuperficial (N=12).....	58
Tabla 18. Valores promedios ($\pm$ DE) de las características de <i>Sagittaria latifolia</i> en el HA de flujo	



libre (N=15).....	58
Tabla 19. Valores promedios ($\pm$ DE) de la calidad del agua de los tratamientos evaluados-etapa de estabilización	58
Tabla 20. Eficiencias (%) de los tratamientos evaluados en la etapa de estabilización con agua sintética.....	59
Tabla 21. Productos del agua residual sintética de servicios cosméticos	78
Tabla 22. Horarios y Volumen de las muestras durante el monitoreo de 24 horas	81
Tabla 23. Valores promedios ($\pm$ DE) de las características de <i>Pontederia sagittata</i> en la etapa inicial y final del experimento con aireación con HA de flujo subsuperficial (N=12)	82
Tabla 24. Valores promedios ($\pm$ DE) de las características de <i>Pontederia sagittata</i> en la etapa inicial y final del experimento con aireación en HA de flujo libre (N=12).....	83
Tabla 25. Valores promedios ($\pm$ DE) de los parámetros básicos de la calidad del agua del primer experimento <i>Pontederia sagittata</i>	83
Tabla 26. Eficiencias totales (%) de los tratamientos evaluados del agua reconstituida cosmética con <i>Pontederia sagittata</i> utilizando aireación y sedimentación.	84
Tabla 27. Valores promedios ($\pm$ DE) de las características de <i>Pontederia sagittata</i> en la etapa inicial y final del experimento con sedimentación en un HA de flujo subsuperficial (N=12).....	85
Tabla 28. Valores promedios ($\pm$ DE) de las características de <i>Pontederia sagittata</i> en la etapa inicial y final del experimento con sedimentación en un HA de flujo libre (N=12).	85
Tabla 29. Valores promedios ($\pm$ DE) de la calidad del agua en el segundo experimento (sedimentación) con <i>Pontederia sagittata</i> (N=12).....	86
Tabla 30. Eficiencias (%) totales de los tratamientos evaluados del agua reconstituida cosmética con <i>Pontederia Sagittata</i> con la sedimentación.....	86
Tabla 31. Determinación de NMP/100 ml de E. Coli en aguas residuales domesticas con prueba confirmativa	119
Tabla 32. Determinación de NMP/100 ml de E. Coli en aguas residuales domesticas con prueba Indol.....	119
Tabla 33. Determinación de NMP/100 ml de Estreptococos en Aguas residuales domesticas...119	119
Tabla 34. Determinación de NMP/100 ml de E. Coli en aguas residuales de servicios cosméticos con prueba confirmativa.....	121
Tabla 35. Determinación de NMP/100 ml de E. Coli en aguas residuales de servicios cosméticos con prueba Indol.....	121
Tabla 36. Determinación de NMP/100 ml de Estreptococos en Aguas residuales domesticas...122	122
Tabla 37. Tipo de bacterias encontradas en los tratamientos evaluados de aguas residuales domésticas	124
Tabla 38. Tipo de bacterias encontradas en los tratamientos evaluados de aguas residuales cosméticas	124



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sitio de colecta de <i>Pontederia sagittata</i> . Fraccionamiento Los Naranjos en Nacajuca, Tabasco. Coordenadas 506387.99 m E, 1995661.60 m N. Fuente: Google Earth Pro	30
Figura 2. Ubicación de las estéticas formales de Villahermosa. Fuente: Google Earth.	44
Figura 3. Diagrama del diseño experimental de los HA con <i>Sagittaria latifolia</i> .	56
Figura 4. Valores medianos ($\pm$ RI) para la variable pH (UpH).	61
Figura 5. Valores medianos ($\pm$ RI) para la variable T ($^{\circ}$ C).	61
Figura 6. Valores medianos ($\pm$ RI) para SDT (mg/L).	62
Figura 7. Valores medianos ($\pm$ RI) para CE (μ S/cm).	62
Figura 8. Valores medianos ($\pm$ RI) para Turbiedad (UNT).	63
Figura 9. Valores medianos ($\pm$ RI) para Color (UC).	63
Figura 10. Valores medianos ($\pm$ RI) para DQO (mg/L).	64
Figura 11. Valores medianos ($\pm$ RI) para OD (mg/L).	64
Figura 12. Valores promedios ($\pm$ DE) para Aluminio (mg/L).	64
Figura 13. Valores medianos ($\pm$ RI) de Bromo (mg/L).	64
Figura 14. Valores medianos ($\pm$ RI) para Cromo VI (mg/L).	65
Figura 15. Valores medianos ($\pm$ RI) de Cobre (mg/L).	65
Figura 16. Valores medianos ($\pm$ RI) para Hierro (mg/L).	66
Figura 17. Valores medianos ($\pm$ RI) para Manganeseo (μ g/L).	66
Figura 18. Valores medianos ($\pm$ RI) para Níquel (mg/L).	66
Figura 19. Valores medianos ($\pm$ RI) para Nitrato (mg/L).	66
Figura 20. Valores medianos ($\pm$ RI) para Fósforo (mg/L).	67
Figura 21. Valores medianos ($\pm$ RI) para Zinc (mg/L).	67
Figura 22. Factores del diseño experimental. Fuente: Elaboración propia.	79
Figura 23. Esquema del primer experimento en el tratamiento de agua residual reconstituida de servicios cosméticos en humedales de flujo libre (HAFL) y subsuperficial (HAFSS) con <i>Pontederia sagittata</i> . Fuente: Elaboración propia.	80
Figura 24. Esquema del segundo experimento en el tratamiento de agua residual reconstituida de servicios cosméticos en humedales de flujo libre (HAFL) y subsuperficial (HAFSS) con <i>Pontederia sagittata</i> . Fuente: Elaboración propia.	81
Figura 25. Valores medianos ($\pm$ RI) para pH (UpH) con aireación.	88
Figura 26. Valores medianos ($\pm$ RI) para pH (UpH) con sedimentación.	88
Figura 27. Valores medianos ($\pm$ RI) para Temperatura ($^{\circ}$ C) con aireación.	89
Figura 28. Valores medianos ($\pm$ RI) para Temperatura ($^{\circ}$ C) con sedimentación.	89
Figura 29. Valores medianos ($\pm$ RI) para CE (μ S/cm) con aireación.	90
Figura 30. Valores medianos ($\pm$ RI) para CE (μ S/cm) con sedimentación.	90
Figura 31. Valores medianos ($\pm$ RI) para SDT (mg/L) con aireación.	91
Figura 32. Valores medianos ($\pm$ RI) para SDT (mg/L) con sedimentación.	91
Figura 33. Valores medianos ($\pm$ RI) para Turbiedad (UNT) con aireación.	92
Figura 34. Valores medianos ($\pm$ RI) para Turbiedad (UNT) con sedimentación.	92
Figura 35. Valores medianos ($\pm$ RI) para Color (UC) con aireación.	93
Figura 36. Valores medianos ($\pm$ RI) para Color (UC) con sedimentación.	93
Figura 37. Valores medianos ($\pm$ RI) para Oxígeno Disuelto (mg/L) con aireación.	93
Figura 38. Valores medianos ($\pm$ RI) para Oxígeno Disuelto (mg/L) con sedimentación.	93
Figura 39. Valores medianos ($\pm$ RI) para DQO (mg/L) con aireación.	94
Figura 40. Valores medianos ($\pm$ RI) para DQO (mg/L) con sedimentación.	94
Figura 41. Valores medianos ($\pm$ RI) para Aluminio (mg/L) con aireación.	95
Figura 42. Valores medianos ($\pm$ RI) para Aluminio (mg/L) con sedimentación.	95
Figura 43. Valores medianos ($\pm$ RI) para Bromo (mg/L) con aireación.	96
Figura 44. Valores medianos ($\pm$ RI) para Bromo (mg/L) con sedimentación.	96



Figura 45. Valores medianos ($\pm$ RI) para Cromo VI (mg/L) con aireación.01	97
Figura 46. Valores medianos ($\pm$ RI) para Cromo VI (mg/L) con sedimentación.	97
Figura 47. Valores medianos ($\pm$ RI) para Cobre (mg/L) con aireación.	98
Figura 48. Valores medianos ($\pm$ RI) para Cobre (mg/L) con sedimentación.	98
Figura 49. Valores medianos ($\pm$ RI) para Hierro (mg/L) con aireación.	99
Figura 50. Valores medianos ($\pm$ RI) para Hierro (mg/L) con sedimentación.	99
Figura 51. Valores medianos (Q1, Q3) para Manganeso (mg/L) con aireación.	100
Figura 52. Valores medianos (Q1, Q3) para Manganeso (mg/L) con sedimentación.	100
Figura 53. Valores medianos ($\pm$ RI) para Níquel (mg/L) con aireación.	101
Figura 54. Valores medianos ($\pm$ RI) para Níquel (mg/L) con sedimentación.	101
Figura 55. Valores medianos ($\pm$ RI) para Nitrato (mg/L) con aireación.	102
Figura 56. Valores medianos ($\pm$ RI) para Nitrato (mg/L) con sedimentación.	102
Figura 57. Valores medianos ($\pm$ RI) para Fósforo (mg/L) con aireación.	103
Figura 58. Valores medianos ($\pm$ RI) para Fósforo (mg/L) con sedimentación.	103
Figura 59. Valores medianos ($\pm$ RI) para Zinc (mg/L) con aireación.	104
Figura 60. Valores medianos ($\pm$ RI) para Zinc (mg/L) con sedimentación.	104
Figura 61. Valores medianos ($\pm$ RI) para Cianuro (mg/L) con aireación.	104
Figura 62. Valores medianos ($\pm$ RI) para Cianuro (mg/L) con sedimentación.	104
Figura 63. Valores medianos ($\pm$ RI) para Amonio (mg/L) con aireación.	105
Figura 64. Valores medianos ($\pm$ RI) para Amonio (mg/L) con sedimentación.	105
Figura 65. Esquema del sistema de tratamiento en el primer experimento de agua residual domestica de flujo libre (HAFL) y subsuperficial (HAFSS) con <i>Pontederia sagittata</i> . Fuente: Elaboración propia.	114
Figura 66. Esquema del sistema de tratamiento en el segundo experimento de agua residual de servicios cosméticos de flujo libre (HAFL) y subsuperficial (HAFSS) con <i>Pontederia sagittata</i> . Fuente: Elaboración propia.	114
Figura 67. Valores NMP/100 ml de E. Coli de aguas residuales en la entrada y salida de los tratamientos evaluados. Fuente: Elaboración propia	120
Figura 68. Valores NMP/100 ml de Estreptococos de aguas residuales en la entrada y salida de los tratamientos evaluados. Fuente: Elaboración propia	121
Figura 69. Valores NMP/100 ml de E. Coli de aguas residuales en la entrada y salida de los tratamientos evaluados. Fuente: Elaboración propia	123
Figura 70. Valores NMP/100 ml de Estreptococos de aguas residuales en la entrada y salida de los tratamientos evaluados.	123
Figura 71. Bacterias Gram positivas (Estreptococos fecales) en aguas residuales cosméticas (1-Carcamo, 2-Tanque séptico, 3- HAFL-Ps, 4- HAFSS-Ps)	124
Figura 72. Bacterias Gram positivas (Estreptococos fecales) en aguas residuales cosméticas (1-Carcamo, 2-Tanque séptico, 3-Tanque de Reacción (ARR), 4- HAFL-Ps, 5- HAFSS-Ps).	124

TABLA DE ECUACIONES

(Ecuación 1) Densidad aparente	32
(Ecuación 2) Densidad real	33
(Ecuación 3) Porosidad	33
(Ecuación 4)Volumen de grava de HA	33
(Ecuación 5) Volumen de agua presente en el HA	33
(Ecuación 6) Eficiencia de remocion	33
(Ecuación 7) Intepretacion de eficiencias	57
(Ecuación 8) Eficiencia de remoción.....	82
(Ecuación 9) NMP/100 ml de microorganismos con datos de tabla	118
(Ecuación 10) NMP/100 ml de microorganismos sin datos de tabla	119



Resumen

Las aguas residuales de servicios cosméticos representan un grave problema de contaminación ambiental debido a su alta demanda química de oxígeno (DQO) y un crecimiento en su generación, lo que ha impulsado el desarrollo de tecnologías de tratamiento que garanticen descargas de estos efluentes alineadas con la normativa vigente. Entre los tratamientos que han presentado mayor aceptación son los humedales artificiales (HA), que son alternativas ecológicamente viables, de fácil manejo y bajo costo. Sin embargo, aunque esta tecnología se emplea en el tratamiento de aguas residuales domésticas, aún existe la necesidad de ver el comportamiento de estos sistemas en aguas residuales de índole cosmética utilizando diferentes especies nativas de la región, así como analizar la presencia de microorganismos.

En este trabajo se estudió la eficiencia de los humedales artificiales en la depuración de los contaminantes, reducción de metales pesados, nutrientes y microorganismos presentes en las aguas residuales de servicios cosméticos. En el capítulo 1 se presenta el protocolo de tesis, en el capítulo 2 el inventario y caracterización de las aguas residuales de servicios cosméticos en Villahermosa, Tabasco, en el capítulo 3 el tratamiento de aguas residuales de servicios cosméticos en humedales artificiales con *Sagittaria latifolia*, en el capítulo 4 el tratamiento de estos efluentes en Humedales Artificiales con *Pontederia sagittata*, en el capítulo 5 la remoción de microorganismos en aguas residuales domésticas y de servicios cosméticos tratadas vía humedales artificiales con *Pontederia sagittata*. Finalmente, el capítulo 6 presenta las conclusiones y recomendaciones.

Se estimó la generación de aguas residuales de Villahermosa por tipo de servicio resultando una aportación de 22 L/cliente/d. Los servicios con mayor contaminación son los tintes y decoloración capilar, las aguas residuales generadas presentan concentraciones de color de 4720.75 ± 2938.27 UC, turbiedad de 199.13 ± 47.78 UNT y DQO de 5404.75 ± 2236.37 mg/L.



De manera general al evaluar el desempeño de *S. latifolia* en HA experimentales de flujo libre y flujo subsuperficial las mejores eficiencias en la remoción de contaminantes básicos se presentaron en el HAFL-SL, con un 94% de remoción de turbiedad 92.6% de color y 88.8 % de DQO. En cuanto a la especie *P. sagittata*, el primer experimento se obtuvieron las mejores eficiencias en el tratamiento HAFSS-Ps-A, con remociones totales de turbiedad, color y DQO de 94.8%, 94.2% y 98.8% respectivamente, en el segundo experimento se obtuvieron las mejores eficiencias en el tratamiento HAFSS.Ps-S con remociones de turbiedad, color y DQO de 85%, 76% y 94% respectivamente. De manera general, el experimento con aireación y sedimentación presenta los mejores resultados en el tratamiento de los efluentes cosméticos en HA. Los HA operados con estas especies nativas alcanzaron eficiencias de remoción de DQO (>70%).

En la remoción de los microorganismos, se obtuvo la mejor eficiencia en el tratamiento HAFSS-Ps, con un 99.7% de remoción de *E. Coli* (1130 a <3 NMP/100 ml) y 97.9% de *Estreptococos* (>11,000 a 230 NMP/100 ml) en el primer experimento con aguas residuales domésticas. En cuanto al segundo experimento con aguas residuales cosméticas el HAFSS-Ps-A presentó las mejores eficiencias con un 72% de remoción de *E. Coli* (11 a 3 NMP/100 ml) y 80.9% de *Estreptococos* (>1,100 a 210 NMP/100 ml), lo que indica que la *E. Coli* se elimina mayormente en el tanque de reacción con efluentes cosméticos antes de llegar a los humedales y los estreptococos son más persistentes en un HA de flujo libre.

Palabras clave: Aguas residuales, humedales artificiales, microorganismos, *Pontederia sagittata*, *Sagittaria latifolia*, servicios cosméticos.



Abstract

Wastewater from cosmetic services represents a serious environmental pollution problem due to its high chemical oxygen demand (COD) and increasing generation, which has driven the development of treatment technologies to ensure that these effluents are discharged in accordance with current regulations. Among the treatments that have gained the most acceptance are constructed wetlands (CW), which are ecologically viable, easy to manage, and low-cost alternatives. However, although this technology is used in the treatment of domestic wastewater, there is still a need to study the performance of these systems in cosmetic wastewater using different native species from the region, as well as to analyze the presence of microorganisms.

This study examined the efficiency of constructed wetlands in purifying pollutants, reducing heavy metals, nutrients, and microorganisms present in wastewater from cosmetic services. Chapter 1 presents the thesis protocol; Chapter 2 describes the inventory and characterization of wastewater from cosmetic services in Villahermosa, Tabasco; Chapter 3 describes the treatment of wastewater from cosmetic services in constructed wetlands with *Sagittaria latifolia*; Chapter 4 describes the treatment of these effluents in constructed wetlands with *Pontederia sagittata*; and Chapter 5 describes the removal of microorganisms from domestic and cosmetic service wastewater treated via constructed wetlands with *Pontederia sagittata*. Finally, Chapter 6 presents the conclusions and recommendations.

Wastewater generation in Villahermosa was estimated by service type, resulting in a contribution of 22 L/customer/day. The services with the highest levels of contamination are hair dyeing and bleaching. The resulting wastewater has color concentrations of 4720.75 ± 2938.27 UC, turbidity of 199.13 ± 47.78 NTU, and COD of 5404.75 ± 2236.37 mg/L.

Generally, when evaluating the performance of *S. latifolia* in experimental free-flow and subsurface-flow water treatment systems, the best efficiencies in the removal of basic



contaminants were observed in the free-flow, subsurface-flow system, with 94% turbidity removal, 92.6% color removal, and 88.8% COD removal. Regarding the species *P. sagittata*, the first experiment yielded the best efficiencies in the HAFSS-Ps-A treatment, with total turbidity, color, and COD removals of 94.8%, 94.2%, and 98.8%, respectively. In the second experiment, the best efficiencies were obtained in the HAFSS-Ps-S treatment, with turbidity, color, and COD removals of 85%, 76%, and 94%, respectively. Overall, the experiment with aeration and sedimentation shows the best results in the treatment of cosmetic effluents in CW. The CW operated with these native species achieved COD removal efficiencies of >70%.

In the removal of microorganisms, the HAFSS-Ps treatment showed the best efficiency, with 99.7% removal of *E. coli* (1130 to <3 MPN/100 ml) and 97.9% removal of *Streptococcus* (>11,000 to 230 MPN/100 ml) in the first experiment with domestic wastewater. In the second experiment with cosmetic wastewater, HAFSS-Ps-A showed the best efficiencies with 72% removal of *E. coli* (11 to 3 MPN/100 ml) and 80.9% removal of *Streptococcus* (>1,100 to 210 MPN/100 ml). This indicates that *E. coli* is mostly eliminated in the reaction tank with cosmetic effluents before reaching the wetlands, and that *Streptococcus* is more persistent in a free-flowing CW system.

Keywords: Wastewater, constructed wetlands, microorganisms, *Pontederia Sagittata*, *Sagittaria latifolia*, cosmetic services.



Capítulo 1. Protocolo de Tesis

1.1 Introducción

El sector cosmético experimenta una continua evolución impulsada por el crecimiento y por los factores ambientales, políticos, económicos y técnicos que influyen en él (Kwon, 2023). Sin embargo, este avance trae consigo preocupaciones ambientales, especialmente debido al inadecuado tratamiento y disposición de aguas residuales que contaminan los cuerpos de agua receptores (Sánchez, 2023).

México es actualmente el decimotercer mercado mundial en la industria de la cosmética, y el crecimiento de este sector ha aumentado tanto el volumen como la complejidad de las aguas residuales generadas, las cuales contienen sólidos en suspensión, una alta demanda química de oxígeno (DQO), grasas, aceites, detergentes y compuestos orgánicos volátiles (Statista, 2023). Los componentes básicos en los productos cosméticos, como conservantes, emulgentes, bactericidas, antioxidantes y gelificantes, contribuyen a la toxicidad de estos residuos (Marín et al., 2023). Además, se ha detectado la presencia de metales pesados como plomo, cadmio y arsénico, que son especialmente dañinos para los ecosistemas acuáticos.

Las aguas residuales de la industria cosmética, con altos niveles de DQO y DBO, presentan riesgos significativos para el medio ambiente y la salud pública, debido al consumo de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua, la generación de olores desagradables derivados de la eutrofización, y la acumulación de compuestos persistentes perjudiciales para diferentes tipos de organismos (Fernández, 2024).

A pesar del crecimiento del mercado, existen pocos estudios sobre el tratamiento y la reutilización de estos efluentes, aunque gestionar los desechos industriales adecuadamente es fundamental para minimizar el impacto ambiental. Reutilizar los efluentes después de un tratamiento adecuado puede ser viable económicamente, ya que los costos de implementación y mantenimiento suelen ser más bajos en comparación con tecnologías convencionales (Sánchez, 2023).



En este contexto, resulta crucial investigar y emplear sistemas de tratamiento naturales, de diseño y operación simples, como los humedales artificiales. En 2021, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) reportó que, de las 2,872 plantas de tratamiento en operación en México, 230 eran humedales artificiales, una tecnología eficiente para eliminar contaminantes básicos en aguas residuales domésticas (Marín et al., 2023).

El uso de *Sagittaria latifolia*, una planta pequeña y de fácil manejo y transporte, podría reducir los costos de operación y mantenimiento en comunidades pequeñas. En base a lo expuesto, este estudio propone el estudio de *Sagittaria latifolia* y *Pontederia sagittata* para remover contaminantes básicos de aguas residuales provenientes de servicios cosméticos, evaluando su adaptación y estabilización en humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial a escala piloto.



1.2 Marco teórico

Aplicaciones de la especie. Diversas han sido las investigaciones que se han realizado a nivel internacional (Tabla 1), nacional (Tabla 2) y local (Tabla 3) sobre el potencial de *Sagittaria latifolia*, otras especies vegetales y su uso en los humedales artificiales.

Tabla 1. Antecedentes a nivel internacional del uso de especies y tipo de humedales artificiales.

Autor	Año	Sitio	Condiciones	Objetivo	Resultados
Demarco et al.,	2021	Sur de Brasil	Fitorremediación de metales pesados y nutrientes en un arroyo contaminado antropogénicamente	Estudiar el comportamiento de especies de plantas con potencial para la fitorremediación y su posible aplicación a aguas contaminadas en Brasil	<i>Sagittaria montevidensis</i> (familia de alismatáceas) presentó potencial de biorremediación para potasio y calcio (recomendando así su uso para fitoextracción) y para aluminio, fósforo, hierro, magnesio, azufre y sodio, junto con metales pesados (recomendado para rizo filtración).
Corzo y Sanabria	2021	Bogotá, Colombia	HA con portadores artificiales para el crecimiento bacteriano como medio de soporte	Evaluar la capacidad de adaptación de tres especies de plantas	Buena adaptación de plantas en los HA para el crecimiento microbiano
Alayne et al.,	2021	Estados Unidos	Sistema de contenedores de suelo arenoso con especies de plantas de humedales en la remoción de pesticidas en aguas urbanas.	Evaluar la eficiencia de tres especies de plantas <i>Sagittaria latifolia</i> , <i>Juncus effusus</i> y <i>Pontederia cordata</i> en la fitorremediación de imidacloprid	<i>S. latifolia</i> redujo más imidacloprid (reducción del 79,3 % en comparación con los recipientes sin plantas) a los 56 días después de plantarse.



Tabla 2. Antecedentes a nivel nacional del uso de especies y tipo de humedales artificiales.

Autor	Año	Sitio	Condiciones	Objetivo	Resultados
Márquez <i>et al.</i> ,	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 pH 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.
Morales <i>et al.</i> ,	2021	Texcoco	Tratamiento de desinfección de las ciénegas del Río Lerma	Evalúa el acondicionamiento de <i>Sagittaria macrophylla</i> Zucc.	El acondicionamiento de las plantas madre de <i>Sagittaria</i> es favorable en condiciones de invernadero

Tabla 3. Antecedentes a nivel local del uso de especies y tipo de humedales artificiales.

Autor	Año	Sitio	Condiciones	Objetivo	Resultados
Gallegos <i>et al.</i> ,	2021	Centro, Tab.	Tres humedales con cola de golondrina (HAFL-S- Lat), tratando aguas residuales sanitarias de la DACBIOL	Mejorar la eficiencia en la remoción de los contaminantes de las aguas residuales de la Institución Universitaria	Las eficiencias de remoción alcanzadas con Cola de golondrina para SST, DBO ₅ , DQO y Coliformes fecales (CF) fue de 94, 97, 96 y 99 % respectivamente
Magaña Flores	2023	Centro, Tab.	Doce 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	Evaluar el desempeño de <i>Sagittaria latifolia</i> en humedales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de aguas domésticas.	El humedal con mejor rendimiento fue subsuperficial con especie, removiendo turbiedad, color y DQO en 95.9, 89.4, 95.7% respectivamente, obteniendo un coeficiente cinético de DQO de 0.34 (flujo libre) y 0.89 días-(subsuperficial)



Composición de las aguas residuales de servicios cosméticos

En la tabla 4 se enlistan los productos que son utilizados en servicios cosméticos con mayor demanda nacional y los compuestos principales que integran cada uno de ellos.

Tabla 4. Lista de productos utilizados en los servicios cosméticos y los compuestos que los integran.

Producto	Ingredientes principales (INCI)
Loción neutralizante	Agua, peróxido de hidrogeno, ácido fosfórico, lauril sulfato de sodio, perfume, aceite de ricino hidrogenado, estireno, ácido salicílico y disodio EDTA
Loción ondulante	Agua, tioglicolato de amonio, hidróxido de amonio, perfume, aceite de ricino hidrogenado, autil sulfato de sodio, Copolímero VP
Removedor de cutícula	Agua, hidróxido de sodio, copolímero de estireno, acrilatos y polietilenglicol (PEG-45)
Shampoo matizador de canas	Agua, lauril sulfato de sodio, cocamidopropil
Tinte para cabello	Agua, alcohol láurico, hidróxido de amonio, propilenglicol, ascorbato de sodio, acrilamida, aceite mineral, bisulfito de amonio y fragancia
Tratamiento capilar revitalizante en crema	Agua, alcohol, aceite mineral, perfume, ácido cítrico, aceite, queratina hidrolizada y cloruro de cetrimonio
Ampolleta capilar	Propilenglicol, cloruro de cetrimonio, pantenol, Polisorbato-20, Quaternium-22, Aminoácidos.
Decolorante en polvo	Agua, propilenglicol, fragancia, Quaternium-22, polisorbato-20, cloruro de cetrimonio, silicona Quaternium-22, pantenol, succinato, copolímero de estireno, urea diazolidinil, PCA de sodio, lactato de sodio, EDTA tetrasódico, arginina, benzofenona-4, ácido ascórbico y PCA

Fuente: Elaboración propia

1.3 Justificación

Los humedales naturales desempeñan un papel crucial al ofrecer diversos servicios ecosistémicos, tales como el provisión de agua dulce, la recarga de acuíferos subterráneos, el control de inundaciones y la purificación del agua mediante la retención de nutrientes, sedimentos y contaminantes (Díaz et al., 2020). A pesar de esto, la degradación de estos ecosistemas ha sido alarmante; se calcula que desde 1900 se ha perdido alrededor del 64% de los humedales naturales a nivel global, impulsado principalmente por la expansión urbana, la agricultura intensiva y el cambio climático (Ramsar, 2021).

A raíz de esta situación, han surgido humedales artificiales como una alternativa viable y económica para el tratamiento de aguas residuales. Estos sistemas tienen el objetivo de imitar la función de los humedales naturales, permitiendo la eliminación de



contaminantes como nutrientes, metales pesados y compuestos orgánicos mediante procesos físicos, químicos y biológicos, lo que los convierte en una opción muy eficiente para el tratamiento de aguas residuales. Además de sus bajos costos de inversión, operación y mantenimiento, los humedales artificiales se integran en el paisaje y pueden fomentar la biodiversidad local, proporcionando hábitats para diversas especies (Vymazal, 2020). En México, los humedales artificiales representan una herramienta prometedora para mejorar la cobertura de tratamiento de aguas residuales. De acuerdo con el informe de CONAGUA (2021), en 2017 solo el 63% del agua recolectada en sistemas de alcantarillado fue tratada. Esto implica que la implementación de humedales artificiales podría contribuir significativamente a aumentar dicha cifra, especialmente en áreas rurales o comunidades pequeñas donde se requiere una infraestructura de bajo costo y fácil mantenimiento.

El éxito de los humedales artificiales se ha documentado en diversas partes del mundo, logrando eficiencias de hasta el 95% en la remoción de contaminantes cuando estos sistemas están bien diseñados y operados adecuadamente (Wug et al., 2020). En los últimos años, se ha intensificado el estudio de humedales artificiales para el tratamiento de efluentes industriales, incluidos contaminantes farmacéuticos, subproductos químicos de la industria y metales pesados (Saeed, 2021). En Tabasco, existen condiciones óptimas para la proliferación de especies nativas de plantas acuáticas como *Sagittaria latifolia*. Estas plantas tienen el potencial de usarse en humedales artificiales, aprovechando su capacidad para remover contaminantes. Generar información sobre esta especie resulta relevante, ya que podría permitir su aplicación en humedales artificiales, beneficiando tanto al ambiente como a las comunidades locales mediante soluciones sostenibles (Martínez et al., 2022).

1.4 Pregunta de Investigación

¿Tendrá un efecto significativo *Sagittaria latifolia* y *Pontederia sagittata* en la fitorremediación de efluentes de servicios cosméticos vía humedales artificiales?

1.5 Hipótesis



Ho: *Sagittaria latifolia* y *Pontederia sagittata* vía humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial puede alcanzar altas eficiencias de remoción de DQO en efluentes cosméticos (<70%).

Ha: *Sagittaria latifolia* y *Pontederia sagittata* vía humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial no alcanzan altas eficiencias de remoción de DQO en efluentes cosméticos

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Evaluar la degradación y eficiencia de remoción de contaminantes básicos de efluentes de servicios cosméticos con *Sagittaria latifolia* y *Pontederia sagittata* vía humedales artificiales.

1.6.2 Objetivos específicos

- Sembrar y estabilizar la especie *Sagittaria latifolia* y *Pontederia sagittata* en Humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial.
- Caracterizar la vegetación en el ciclo de operación monitoreando: largo máximo de hojas, ancho máximo de hojas, numero de hojas por planta, total de plantas por surco, densidad y biomasa vegetal.
- Caracterizar el afluente y efluente de las unidades experimentales en el tratamiento de contaminantes básicos: DQO, turbiedad, color aparente, pH, temperatura, CE, SDT, OD, ORP, nutrientes (N, P) y metales pesados (Al, Br, Cr VI, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn).
- Evaluar la calidad del agua tratada conforme a la normativa aplicable de las descargas de agua residual vigente.

1.7 Metodología

Operación de las Unidades Experimentales.



Etapas de operación de los Humedales Artificiales. Esta constó de 22 meses en total (de agosto de 2024 a junio de 2026), que se dividió en dos experimentos (uno con *Sagittaria latifolia* y otro con *Pontederia sagittata*). Cada uno contó con 3 etapas clave:

Etapas de arranque. En esta etapa se realizó la evaluación de la adaptación, crecimiento y desarrollo de la vegetación en el agua residual.

Etapas de estabilización. Se evalúan los gastos de operación, la densidad y porosidad del medio de soporte, la caracterización fisicoquímica de la calidad del agua y las eficiencias de remoción de cada uno ya que es la etapa donde el humedal alcanza su madurez biológica.

Etapas de evaluación. Se implementó una campaña de monitoreo de 24 horas (toma de muestra de los humedales cada 4 horas) para el análisis de los parámetros en los

Se utilizaron humedales artificiales a escala piloto contruidos anteriormente por López et al., (2014) cuyas dimensiones son de 2.5 m de largo x 1.2 m de ancho y 1 m de tirante. Los reactores se estructuraron con lámina de acero al carbón de calibre 10. A cada unidad se le aplicó un esmalte anticorrosivo para proteger la parte interna y externa, posteriormente se aplicó solo en la parte interna cinco capas de pellón con impermeabilizante reducir su deterioro. El suministro del influente hacia las unidades se programó mediante un sistema de tuberías de PVC hidráulico de 1" de diámetro.

La entrada del agua residual se colocó a 0.5 m a través de una canaleta que distribuía uniformemente el agua residual a través del humedal por medio de tubos perforados de PVC. Adicionalmente se colocarán 9 puntos internos en cada humedal artificial, los cuales son tubos de PVC de 2" de diámetro y 60 cm de longitud, perforados por toda el área lateral.

Los tanques de polietileno fueron instalados a una altura de 1.2 m sobre una losa de concreto, ubicándose a un nivel superior de las unidades de tratamiento, lo que permitió alimentar los HA por gravedad por medio de tuberías de PVC y válvulas de control con un caudal de 0.2 m³/día por humedal. Asimismo, se verificó de manera constante que el agua cubriera toda la superficie del lecho para garantizar una distribución uniforme, evitar obstrucciones en las rutas de flujo y prevenir zonas de estancamiento; de detectarse alguna restricción, la zona afectada se despejaba de inmediato.

Actividades de campo

Colecta de la especie. La primera vegetación utilizada en esta investigación fue *Sagittaria latifolia* (Cola de golondrina) extraída del tiradero a cielo abierto Loma de Caballo de Centro, Tabasco, el cual se encuentra a 10 km de la ciudad de Villahermosa, en la ranchería Lázaro Cárdenas 1ª Sección (17°59'58.2"N 93°00'03.4"W).



Figura 1. Sitio de colecta de *Sagittaria latifolia* en el del tiradero a cielo abierto Loma de Caballo de Centro, Tabasco. Ranchería Lázaro Cárdenas 1ª Sección. Fuente: Google Earth Pro

La segunda especie colectada fue *Pontederia sagittata*, en el Fraccionamiento Los Naranjos en Nacajuca, Tabasco (506387.99 m E, 1995661.60 m N)

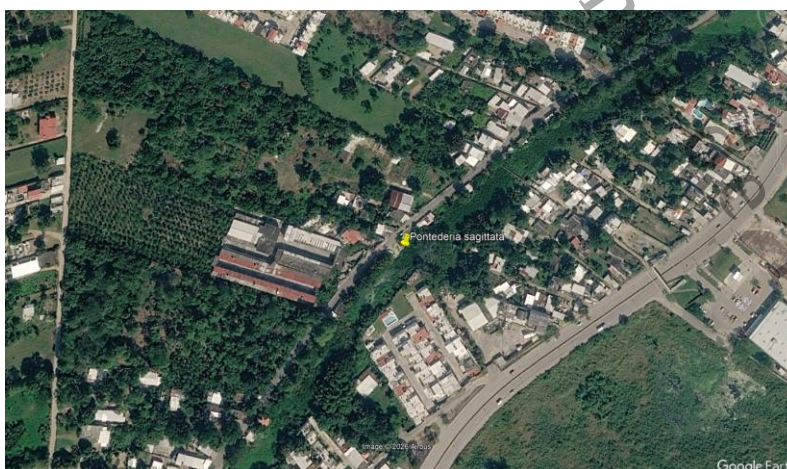


Figura 1. Sitio de colecta de *Pontederia sagittata*. Fraccionamiento Los Naranjos en Nacajuca, Tabasco. Coordenadas 506387.99 m E, 1995661.60 m N. Fuente: Google Earth Pro

Se cuidó de no estropear las especies en el traslado y en la siembra, la distancia que se



dejó entre las plantas fue dada por el espacio que la especie requiera al llegar a su adultez. (Comisión Nacional Forestal, 2010). Este método ayudó a que el agua tenga una mejor distribución dentro del humedal. Se distribuyeron los 12 individuos en los HA, sembrando mediante el método de “tres bolillos” para formar triángulos equiláteros a una profundidad de 20 centímetros por debajo de la superficie del medio de soporte (grava de río) para que de esta manera se logre una distribución homogénea de la vegetación en el humedal artificial. Los ejemplares se colocaron en los humedales artificiales (HA) durante un periodo de aclimatación de 60 días, utilizando agua residual doméstica de la DACBiol-UJAT. Durante esta fase se evaluó su sobrevivencia y adaptación a las nuevas condiciones ambientales. La fase de estabilización duró aproximadamente tres meses, hasta que la especie inició su reproducción. Las plantas que completan su ciclo de vida y la hojarasca se retiran periódicamente del humedal artificial (HA) para evitar la liberación de los contaminantes acumulados (Saeed y Sun, 2012). Esta biomasa extraída es reemplazada de manera natural por nuevos brotes dentro del sistema; asimismo, se podan las hojas dañadas para prevenir la propagación de plagas.

Caracterización de la vegetación. Después de la colecta de cada especie se registró las características en su estado salvaje. La evaluación su comportamiento se realizó según Machado (2011) y Escutia et al., (2010) para lo cual se determinarán características: altura, largo máximo de hojas, ancho máximo de hojas, número de hojas por planta, total de hojas y tallos.

Actividades de Laboratorio

Determinación analítica de calidad del agua. La siguiente tabla 5 y 6 muestran los equipos y la metodología empleada para en análisis de cada parámetro de calidad del agua.

Tabla 5. Equipos y metodologías empleadas en la determinación analítica de calidad del agua.

Parámetro	Equipo	Método
pH	HANNA multiparamétrico HI 98130	SM 9040 B
Temperatura	HANNA multiparamétrico HI 98130	SM 2550
Color	LaMotte TC-3000we Trimeters	APHA 2120
Turbiedad	LaMotte TC-3000we Trimeters	SM 2130 B
Oxígeno disuelto (OD)	Medidor OD, RCYAGO	SM 4500-OG
Conductividad eléctrica (CE)	HANNA multiparamétrico HI 98130	SM 2510 B
Sólidos disueltos totales (SDT)	HANNA multiparamétrico HI 98130	SM 2540
Potencial de oxidación y reducción (ORP)	HANNA HI 98121	N/A



Demanda química de oxígeno (DQO)	USEPA 410.4
Cromo VI (Cr VI)	ASTM D1687-92
Níquel (Ni)	Fotométrico
Zinc (Zn)	SM 3500-Zn
Cobre (Cu)	SM 3500-Cu
Aluminio (Al)	SM 3500-Al
Hierro (Fe)	EPA 315B
Manganeso (Mn)	SM 3500-Mn

Tabla 6. Equipos utilizados en el análisis de calidad del agua.

Equipo	Descripción
	LaMotte TC 300. Es un dispositivo basado en el principio de espectrofotometría, permite medir el color y la turbiedad de las muestras. El proceso comienza con la calibración del equipo usando una solución blanco (agua destilada): se vierten 10 ml en un vial limpio y seco dentro de la cámara de medición y se fija el cero de referencia (0 NTU/0 UC). Posteriormente se analiza la muestra colocando 10 ml de otro vial.
	HANNA HI 98130. Medidor de bolsillo profesional, impermeable y de alta precisión, diseñado para medir cuatro parámetros esenciales en un solo equipo: pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT) y temperatura.
	HANNA HI 98121. Dispositivo de bolsillo impermeable orientado a la desinfección y calidad del agua. Mide el pH y ORP (Potencial de Óxido-Reducción), además de temperatura. Se sumerge la punta del sensor en la muestra de agua y se espera hasta que se estabilice para confirmar la lectura.
	HANNA HI 83099. Fotómetro multiparamétrico de mesa diseñado para un análisis exhaustivo. Mide la demanda química de oxígeno, nutrientes y metales pesados, se utilizan viales de reactivos líquidos o en polvo específicos.
	OD, RCYAGO. Medidor portátil para uso exclusivo en campo, utiliza un sensor polar ideal para monitoreos preventivos en los niveles de oxígeno disuelto en aguas dulces o saladas

Fuente: Elaboración propia

Caracterización del medio de soporte. El tipo de medio de soporte se mantuvo constante a lo largo de todas las unidades experimentales (grava de río de 3/4 pulgada), del cual se determinó el volumen, densidad aparente, densidad real y la porosidad del mismo.

Densidad aparente: Mediante el método AS-03 de la norma NOM-021 RECNAT-2000 (Ecuación 1), se midió la densidad aparente al relacionar el peso del medio de soporte con su volumen total. Dicho volumen comprende tanto las partículas sólidas como los espacios porosos.

$$DA \text{ (kg/m}^3\text{)} = \text{Masa de suelo (kg)}/V \text{ (m}^3\text{)} \quad (\text{Ecuación 1})$$



Densidad real: Con base en la metodología propuesta por Solís (2018), el volumen del medio de soporte se midió aplicando el principio de Arquímedes (volumen de líquido desplazado). Posteriormente, a partir de los datos de masa y volumen del material granular, se determinó la densidad mediante la ecuación 2.

$$DR \text{ (gr/cm}^3\text{)} = \text{Masa del sólido (g)} / \text{Vol. sólido (cm}^3\text{)} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Porosidad: El porcentaje de porosidad se calculó mediante la ecuación 3 según lo establecido por Hernández et al., 2013 la cual establece una relación entre las densidades aparente y real del medio de soporte:

$$\text{Porosidad (\%)} = (1 - (DA/DR)) * 10 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Se puede calcular el volumen de la grava y del agua en cada una de las unidades experimentales mediante la ecuación 4 y 5:

$$Vg = L * A * h \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$Va = Vg * n * VI \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

Vg=Volumen de la grava presente (m³)

L=Largo del humedal (m)

A=Ancho del humedal (m)

H=Profundidad del medio soporte (m)

Va=Volumen del agua total dentro de la unidad experimental (m³)

VI=Volumen de agua libre dentro del humedal (m³)

Actividades de Gabinete

Interpretación de los resultados. La forma más usual de expresar el desempeño de un HA es el porcentaje de eficiencia (%) en la remoción de contaminantes. En este proyecto, se realiza la comparación de los resultados en base a los parámetros de influente y efluente (entrada y salida del tratamiento). Por su parte, el porcentaje de remoción de cada variable se calculó mediante la ecuación 6 (García et al., 2019).

$$ER (\%) = \left[\frac{Ce - Cs}{Ce} \right] * 100 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:



ER=Eficiencia de remoción

Ce=Concentración del contaminante "x" a la entrada (afluente)

Cs=Concentración del contaminante "x" a la salida (efluente)

1.8 Costos del proyecto

En la tabla 7 se presenta el presupuesto de los materiales utilizados en la adecuación de los HA, herramientas de campo, materiales y análisis de laboratorio en el periodo de los 2 años que duró el proyecto, el cual se dividió en unidades, precios unitarios y precios subtotales. En la tabla 8 se encuentra un resumen presupuestal por cada partida y el precio total del estudio.

Tabla 7. Presupuesto utilizado en el proyecto.

Concepto	No. partida	Unidad	Precio Unitario	Precio total
Materiales para la adecuación de los HA				
Tubo de PVC sanitario 7 metros	1 ^a	4	\$129.00	\$516.00
Válvulas ½	1 ^b	6	\$20.00	\$120.00
PVC Codos	1 ^c	8	\$5.00	\$40.00
Pegamento para tuberías de PVC 240 ml	1 ^d	2	\$104.00	\$208.00
Membrana de refuerzo impermeabilizante	1 ^e	2	\$360	\$720
Cubeta de impermeabilizante fibrado	1 ^f	1	\$1300	\$1300
Tanque de plástico 200 litros	1 ^g	2	\$870	\$1740
Motor eléctrico monofásico de 1 HP	1 ^h	2	\$1750.00	\$3500.00
Reductor de velocidad para motor	1 ⁱ	2	\$350.00	\$700.00
Cable dúplex calibre 12 de 1 metro	1 ^j	2	\$40	\$80
Clavija de uso rudo	1 ^k	2	\$50	\$100
			SUBTOTAL	\$9,024.00
Herramientas de campo				
Pala de cuchara	2 ^a	1	\$327.00	\$327.00
Pala plana	2 ^b	1	\$250.00	\$250.00
Bascula grande uso rudo	2 ^c	1	\$1500.00	\$1500.00
Segueta	2 ^d	1	\$128.00	\$128.00
Tijeras de jardín	2 ^e	1	\$150.00	\$150.00
Carretilla	2 ^f	1	\$1,200.00	\$1,200.00
Guantes de carnaza	2 ^g	1 par	\$100.00	\$100.00
Escoba	2 ^h	1	\$120.00	\$120.00
			SUBTOTAL	\$3,775.00
Equipo de protección personal				
Guantes de látex (cajas)	3 ^a	2	\$150.00	\$300.00



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ciencias Ambientales



Botas	3 ^b	1	\$290.00	\$290.00
Lentes de seguridad	3 ^c	1	\$230.00	\$230.00
Guantes de nitrilo	3 ^d	1	\$200.00	\$200.00
Cubrebocas c/100	3 ^e	1	\$150.00	\$150.00
Bata de laboratorio	3 ^f	1	\$370.00	\$370.00
			SUBTOTAL	\$1,540.00
Materiales de laboratorio				
Bailer	4 ^a	4	\$200.00	\$800.00
Botes de 1L para muestra	4 ^b	200	\$20.00	\$4,000.00
Vaso de precipitado 50 ml	4 ^c	50	\$70.00	\$3,500.00
			SUBTOTAL	\$8,300.00
Análisis de laboratorio				
*Análisis de pH	5 ^a	100	\$50.00	\$5,000.00
*Análisis de Temperatura	5 ^b	100	\$50.00	\$5,000.00
*Análisis de CE	5 ^c	100	\$50.00	\$5,000.00
*Análisis de SDT	5 ^d	100	\$50.00	\$5,000.00
*Análisis de color	5 ^e	100	\$80.00	\$8,000.00
*Análisis de Turbiedad	5 ^f	100	\$80.00	\$8,000.00
*Análisis de DQO	5 ^g	10	\$100.00	\$1,000.00
Reactivos de metales	5 ^h	10	\$500.00	\$5,000.00
Viales para DQO rango bajo HI23754C-25	5 ⁱ	3	\$1,125.00	\$3,375.00
Viales para DQO rango alto HI23754C-25	5 ^j	3	\$1,125.00	\$3,375.00
Viales para DQO rango alto HI23754C-25	5 ^k	3	\$1,125.00	\$3,375.00
			SUBTOTAL	\$52,125.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Resumen presupuestal de partidas.

No. de partida	Precio
1	\$9,024.00
2	\$3,775.00
3	\$1,540.00
4	\$8,300.00
5	\$52,125.00
TOTAL	\$74,764.00



1.9 Cronograma de actividades

En la tabla 9 se presenta el cronograma completo de las actividades que se plantearon durante el proyecto, permitiendo visualizar la distribución de las fases operativas, de control y evaluación a lo largo de los 4 semestres que duró el estudio.

Tabla 9. Cronograma de actividades.

Actividades	Semestre			
	1	2	3	4
Revisión bibliográfica				
Selección y colecta de la vegetación				
Siembra de la vegetación en los HA				
Estabilización de la vegetación con agua doméstica				
Caracterización del agua residual inicial doméstica				
Encuestas a los establecimientos de servicios cosméticos				
Realización del agua residual reconstituida cosmética				
Estabilización de los HA con ARR				
Etapas de operación de HA con agua sintética				
Campañas de monitoreo de HA con <i>Sagittaria latifolia</i>				
Campañas de monitoreo de HA con <i>Pontederia sagittata</i>				
Análisis de calidad del agua				
Publicación de artículo				
Participación en capítulos de libro electrónico				
Redacción y envío de capítulo de libro				
Interpretación de resultados finales				
Pruebas microbiológicas del agua residual doméstica				
Pruebas microbiológicas del agua residual cosmética				
Cosecha de la vegetación y limpieza del HA				
Redacción de discusiones y conclusiones				

Fuente: Elaboración propia



1.10 Referencias

- Lebube. (2022). The beauty industry's water footprint & sustainable solutions. <https://www.lebube.com>
- Lim, H. Y., & Kwon, K. H. (2023). Sustainable assessment of the environmental activities of major cosmetics and personal care companies. *Sustainability*, 15(18), 13286. <https://doi.org/10.3390/su151813286>
- Marin, E., & et al., (2023). Evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales en México: Un enfoque en humedales artificiales. *Journal of Environmental Management*, 312, 110985. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.110985>
- Magaña-Flores, A. and López-Ocaña, G., Domestic wastewater treated with *Sagittaria latifolia* in constructed wetlands. *DYNA*, 90(226), pp. 27-35, April - June, 2023. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532023000200027
- Statista. (2023). Global cosmetics market growth and environmental challenges. Recuperado de https://www.statista.com/statistics/1447701/leading-factors-beauty-product-sustainable-worldwide/?srsltid=AfmBOorJB0I7z4HLZOH6p_MErrXfRzIjvY-Ktm4EubOR61yMrlAYkNyx
- CONAGUA. (2021). Informe de sostenibilidad del agua en México 2021. Comisión Nacional del Agua, México. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM%202021.pdf>
- Díaz, S., Settele, J., & Brondízio, E. (2020). The Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). https://files.ipbes.net/ipbes-web-prod-public-files/2020-02/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers_en.pdf
- Martínez-Almira, D., Vázquez-Villegas, P., & Jiménez-Sierra, C. (2022). Aprovechamiento de plantas macrófitas para el tratamiento de aguas residuales en humedales artificiales. *Revista de Ciencia Ambiental*, 18(2), 45-56.



https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972007000400002

- Ramsar. (2021). Global Wetland Outlook: State of the World's Wetlands and their Services to People. Ramsar Convention on Wetlands. https://medwet.org/wp-content/uploads/2021/12/RamsarGWO_SpecialEdition2021%E2%80%9393ENGLISH_WEB.pdf
- Saeed, T., & Sun, G. (2021). A review on nitrarene and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Influence of design and operational parameters. *Science of The Total Environment*, 757, 143982. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143982>
- Vymazal, J. (2020). Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience. *Environmental Science and Technology*, 54(19), 11892–11907. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20795704/>
- Wen, Y., Cheng, S., Wang, X., & Chen, H. (2019). The use of constructed wetlands for treating industrial wastewater. *Ecological Engineering*, 138, 33-44.
- Wu, H., Fan, J., & Zhang, Z. (2020). Constructed wetlands for sustainable wastewater treatment. *Water*, 12(2), 402. <https://doi.org/10.3390/w12020402> .
- Reynolds, K. A. (2021). Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica. *Latinoamérica*, 2001, 4849. <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2007/10/Tratamiento-aguas-residuales-Latinoamerica.pdf>
- Pire Sierra, M. C., Rodríguez Sargent, K., Fuenmayor Reyes, M., Fuenmayor, Y., Acevedo, H., Carrasquero Ferrer, S., & Díaz Montiel, A. (2021). Biodegradabilidad de las diferentes fracciones de agua residual producidas en una tenería. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 21(2), 5-19. *Ecological Engineering*, 61(1), 282-291- DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.09.014
- López-Ocaña. G., Bautista M. R. G., Valdes M. A., Torres B, C, A., López V, R., Pérez S, E., y Pampillón G.L. (2019) Spatial distribution behavior of basic Pollutants in a subsurface-flow wetland with *Thalia geniculata*. *Int. J. Environ. Impacts*, 2 (2), 145-160. DOI: 10.2495/EI-V2- 145-160.
- NMX-AA-034-SCFI-2001-Análisis de agua. Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba



<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf> .

- Llanos-Lizcano, A., Barranza, E., Narvaez, A., Varela, L., y Caelles-Osorio, A. (2019). Efficiency of pilot-scale horizontal subsurface Flow constructed wetlands and microbial community composition operating under tropical conditions. *International Journal of Phytoremediation*, 30(8), 1-9. DOI: 10.1080/15226514.2018.1523874
- Garcia O, J. A., López O, G., y Torres B, C. (2019) evaluación de los medios de soporte en humedales artificiales con vegetación *Sagittaria latifolia* en la remoción de contaminantes básicos. *Revista Iberoamericana de las Ciencias biológicas y Agropecuarias*, 8 (15), 16-31, DOI: 10.23913/cibav8i15.82.
- Castañeda V, A. A., y Flores L, H. E. (2020). Tratamiento de aguas residuales domesticas mediante plastas macrófitas típicas en Los Altos de Jalisco, México. *PAAKAT: Revista de Tecnología y Sociedad*, 5(3), 1-13. <http://www.udgvirtual.udg.mx/paakat/index.php/paakat/article/view/208/298>
- Bharagava, R.N. (2020). Emerging Eco-friendly Green Technologies for Wastewater Treatment, *Microorganisms for Sustainability*. Springer, 18, 311-327. DOI: 10.1007/978-981-15-1390-9_14.
- Demarco, C. F., Alfonso, T. F., Pieniz, S., Quadro, M. S., Camargo, F. A. de O., & Andreadza, R. (2019). Phytoremediation of heavy metals and nutrients by the *Sagittaria montevidensis* into an anthropogenic contaminated site at Southern of Brazil. *International Journal of Phytoremediation*, 21(11), 1145–1152. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1612843>
- McKnight, A. M., Gannon, T. W., & Yelverton, F. (2021). Phytoremediation of azoxystrobin and imidacloprid by wetland plant species *Juncus effusus*, *Pontederia cordata* and *Sagittaria latifolia*. *International Journal of Phytoremediation*, 24(2), 196–204.
- Saeed, T., & Sun, G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. *Journal of Environmental Management*, 112, 429-448. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.011>



Capítulo 2. Inventario y Caracterización de Aguas Residuales de Servicios Cosméticos en Villahermosa, Tabasco

Autores:

Ing. Monserrat Guadalupe Barco Méndez¹, Dr. Gaspar López Ocaña¹, Dr. David Guerrero Zarate², Dr. Humberto Hernández Trejo¹, Dra. Melina del Carmen Uribe¹, M.C. Carlos Alberto Torres Balcázar¹.

2.1 Resumen

Entre las aguas residuales que presentan mayor toxicidad para su tratamiento destacan los efluentes de la industria cosmética. Por ello, se realizó un inventario de establecimientos dedicados a estos servicios en la ciudad de Villahermosa, con el objetivo de determinar los volúmenes y las características fisicoquímicas de sus descargas para proponer alternativas viables de tratamiento. A partir de un censo de 67 establecimientos identificados, se encuestó a 20 de ellos y se seleccionaron 12 locales específicos que ofrecen servicios de pedicura, decoloración y tinte capilar para llevar a cabo la evaluación detallada de sus aguas residuales. Se estimó la generación de aguas residuales por tipo de servicio resultando una aportación de 22 L/cliente/d. Los servicios con mayor contaminación son los tintes y decoloración capilar, las aguas residuales generadas presentan concentraciones de color de 4720.75 ± 2938.27 UC, turbiedad de 199.13 ± 47.78 UNT y DQO de 5404.75 ± 2236.37 mg/L, cayendo en la categoría de aguas tóxicas, las cuales son descargadas sin tratamiento en diversos cuerpos receptores de la ciudad.

Palabras clave. Servicios cosméticos, aguas residuales, caracterización, color, turbiedad.

Institución de adscripción de cada autor:

¹ División Académica de Ciencias Biológicas Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

² División Académica Multidisciplinaria de Jalpa de Méndez Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Publicado en: Libro electrónico de Investigación Academia Journals

Fecha de publicación: 23 de mayo de 2025



2.2 Introducción

Los establecimientos de servicios cosméticos y salones de belleza hoy en día desempeñan un papel crucial al ofrecer asesoramiento, productos y servicios personalizados a todo tipo de consumidores (Ponce, 2020). Los cosméticos demandados son los productos depilatorios, maquillajes, tratamientos corporales y capilares (Mordor, 2021). Los componentes básicos en los productos cosméticos, como conservantes, emulgentes, bactericidas, antioxidantes y gelificantes generan una alta demanda química de oxígeno (DQO), grasas, aceites, detergentes y compuestos orgánicos volátiles y metales que contribuyen a la toxicidad de estos (Marin, 2023). Estos se descargan de manera continua en ecosistemas acuáticos, lo que genera impactos ecológicos asociados con la bioactividad, la toxicidad y la de bioacumulación entre diversas especies (Kalman, 2020). Con este contexto, México durante el 2023 se convirtió en el decimotercer mercado en la industria de servicios cosméticos, registrando un crecimiento del 11% respecto a 2020, lo que intensificó el volumen y la complejidad de las aguas residuales generadas (Statista, 2023).

Ante la exigencia de la normativa ambiental, se han evaluado diversas tecnologías de tratamiento tanto físicas (adsorción y ultrafiltración), químicas (procesos de oxidación avanzada) y biológicas, los cuales incluyen sistemas anaerobios con reactores UASB (Tenorio, 2021) y sistemas aerobios con reactores SBR (Romero, 2022), en donde se han obtenido rendimientos óptimos de eliminación de materia orgánica. Por lo anterior expuesto, en esta investigación se elaboró un inventario de los establecimientos de servicios cosméticos y sus insumos en la ciudad de Villahermosa, evaluando la generación y composición fisicoquímica de sus aguas residuales. Con ello se buscan establecer las alternativas más viables para el tratamiento de dichos efluentes tomando como base el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente.

2.3 Materiales y métodos

Área de estudio. El inventario se realizó en la Ciudad de Villahermosa, Tabasco y sus alrededores, contemplando 6 zonas principales: Indeco-Pomoca, Paseo Usumacinta, Nueva Villahermosa, Primero de Mayo, Atasta y Ocuiltzapotlán (Fig.4). Del mismo modo en cuanto a la caracterización se realizó en el Laboratorio de Tecnología del Agua en la



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol).

Inventario de estéticas en la Ciudad. Para identificar y caracterizar los establecimientos formales de servicios cosméticos, se consultó el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (INEGI, 2025), además de herramientas geoespaciales como Google Earth (2025) y Google Maps (2025), y perfiles comerciales en Facebook e Instagram. A partir de estas fuentes se recabó información general de cada local, resumida en una base de datos por denominación social, dirección, coordenadas, oferta de servicios que ofrece, insumos y el volumen de agua residual generado por actividad, datos que posteriormente se categorizaron por zona urbana conforme se detalla en la Tabla 10.

Tabla 10. Establecimientos de servicios cosméticos registrados en Villahermosa Tabasco.

Zona	Establecimiento	Categoría	Ubicación	
			X	Y
Indeco-Pomoca	1	B	18.02159231	-92.90411053
	2	D	18.02137588	-92.90219875
	3	C	18.02281247	-92.89975453
	4	C	18.02312088	-92.90080137
	5	D	18.02289493	-92.90034723
	6	D	18.0276217	-92.9017716
	7	E	18.02920445	-92.89959016
	8	D	18.02916466	-92.90336863
	9	D	18.03336851	-92.91595014
	10	E	18.03415037	-92.91781146
	11	D	18.03555174	-92.91420153
	12	B	18.04593168	-92.91719473
	13	D	18.04997189	-92.91807887
	14	C	18.05115988	-92.91682969
	15	D	18.02547423	-92.91393008
	16	A	18.02584661	-92.91405346
Paseo Usumacinta	17	D	18.02581335	-92.91400625
	18	D	18.02553712	-92.9139218
	19	D	18.02338945	-92.91469992
	20	C	18.02155049	-92.91710047
	21	D	18.02161161	-92.92040945
	22	D	18.0237236	-92.91960445
	23	D	18.02343794	-92.9254624
	24	D	18.01544162	-92.9194048
	25	C	18.0096899	-92.92216547
	26	C	17.99541104	-92.93417439
	27	D	18.00568396	-92.94095953



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ciencias Ambientales



Nueva Villahermosa	28	D	17.99707221	-92.91590541
	29	A	17.99880891	-92.94549279
	30	C	17.99535619	92.94361778
	31	C	18.00067649	-92.95392022
	32	A	18.00210091	-92.95365336
	33	B	18.004074	-92.94841104
	34	A	18.0026455	-92.9578095
	35	C	18.00440701	-92.93847443
	36	B	18.00464924	-92.9399854
	37	A	18.00596293	-92.94324696
	38	A	17.99424395	-92.94460358
	39	A	17.99475926	-92.94632798
	40	C	17.99392507	-92.9153332
	41	C	17.99116891	-92.91880271
	42	B	17.99057666	-92.92698702
	43	C	17.99278221	-92.93683379
	44	C	17.99597353	-92.92957574
	45	A	17.98648282	-92.93371379
	46	C	17.98493866	-92.9302392
	47	E	17.98981381	-92.92501797
Primero de Mayo	48	A	17.9782305	-92.93846411
	49	E	17.98134005	-92.93925432
	50	E	17.98052151	-92.93979944
	51	A	17.97922374	-92.94644295
	52	B	17.98695555	-92.95336694
	53	A	17.98363651	-92.95245498
Atasta	54	A	17.98392224	-92.95357078
	55	C	17.97184737	-92.95914602
	56	D	17.96947695	-92.95757467
	57	B	17.96857887	-92.95817543
	58	D	17.97590375	-92.96602964
Ocuilzapotlán	59	B	18.14048995	-92.8600644
	60	D	18.13872285	-92.86641823
	61	E	18.13944546	-92.87905084
	62	E	18.1225816	-92.85914643
	63	E	18.12223862	-92.86073428
	64	E	18.11418212	-92.8543213
	65	E	18.10945512	-92.86471115
	66	E	18.10996079	-92.86669135
	67	C	18.1193421	-92.87333672

Nota: A (Spa), B (Salón de uñas), C (Salón capilar), D (Unisex) y E (Barbería)

Tabla 11. Clasificación de los establecimientos de servicios cosméticos según el tipo de servicio que cada uno ofrece.

Categoría	Servicios	Cantidad
-----------	-----------	----------

A	Exfoliaciones, tratamientos corporales, faciales, maquillajes profesionales y masajes.	11
B	Manicura y Pedicura.	8
C	Tratamientos capilares, ampolletas y decoloraciones	16
D	Amplio menú de servicios para hombres y mujeres	20
E	Corte de pelo, depilación y barbería	12
Total		67

Nota: A (Spa), B (Salón de uñas), C (Salón capilar), D (Unisex) y E (Barbería)

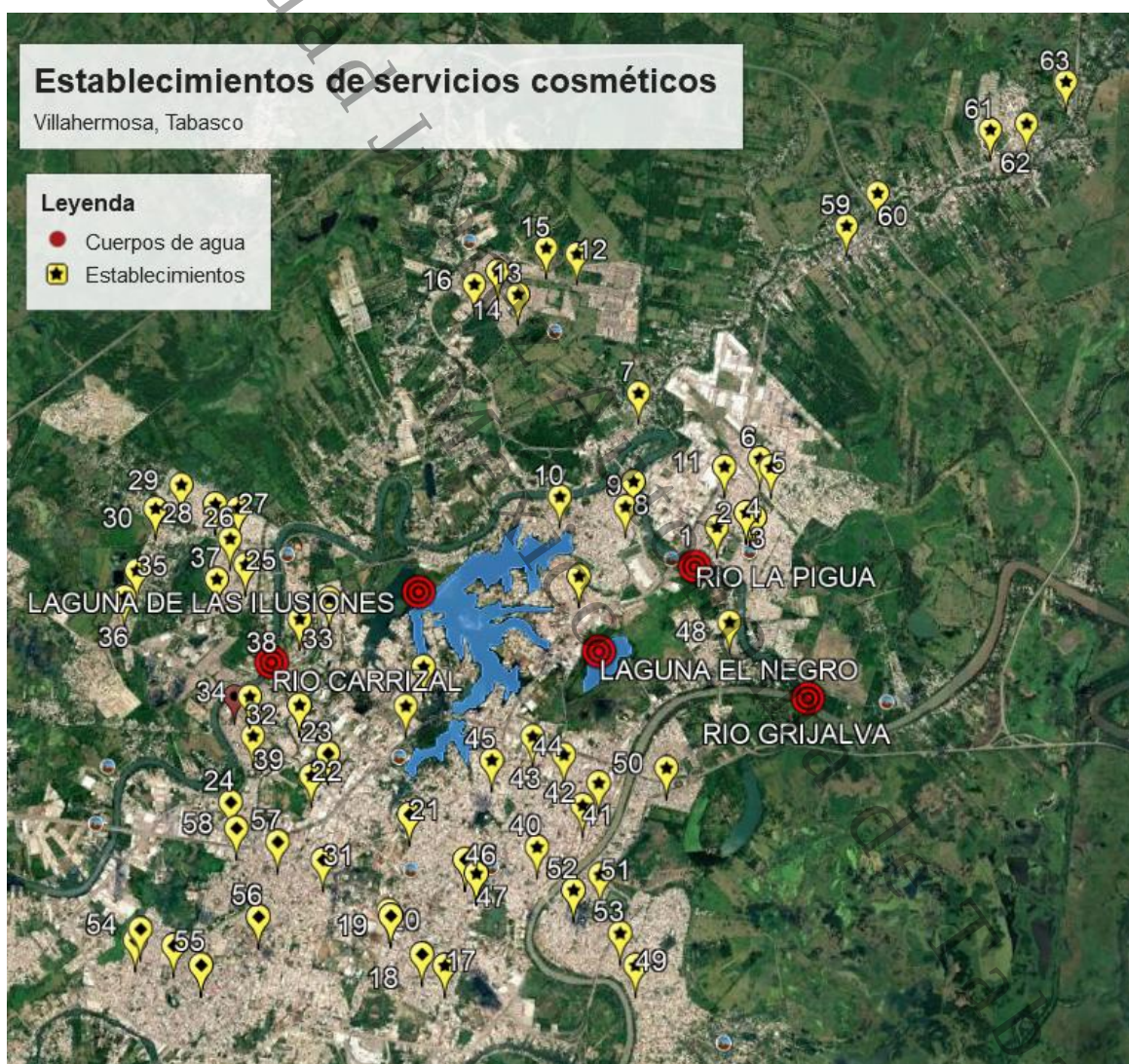


Figura 2. Ubicación de las estéticas formales de Villahermosa. Fuente: Google Earth.

Caracterización volumétrica de aguas residuales por tipo de servicio. A partir de los datos recopilados mediante encuestas y visitas, los establecimientos se clasificaron en 5 categorías de establecimiento por tipo de servicio, según el catálogo de servicios



cosméticos que ofrecen al público y se cuantificaron en 12 establecimientos las aguas cosméticas generada al día, por tipo de servicio, por cliente y posteriormente el total de aguas residuales.

Toma de muestra y caracterización fisicoquímica del agua cosmética. Se recolectó una muestra compuesta (día de operación) en tres establecimientos por tipo de servicio (tinte, decoloración, pedicura y varios), tomándose esta en un bidón de 5 L. Se procedió a transportar el agua al laboratorio para su correspondiente caracterización resguardándose a una temperatura de 4°C para su conservación.

2.4 Resultados

Inventario de estéticas en la Ciudad. De las 6 zonas principales se encontraron, para este periodo de estudio, un total de 66 establecimientos, Indeco-Pomoca (15), Paseo Usumacinta (18), Nueva Villahermosa (8), Primero de Mayo (6), Atasta (9) y Ocuiltzapotlán (10), del mismo modo se encontró que los volúmenes de agua por servicio (L/cliente/día) fueron: Maquillaje profesional (1), Manicura (1.5), Facial (10), Pedicura (4), Diseño de uñas (1.5), Permanente (30), Tinte (30), Decoloración capilar (30), Alaciado (15), Queratina Brasileña (15) y Tratamiento capilar (20). Llegando a generarse hasta 158 L/cliente/día si alguna persona cumpliera con el total de servicios.

Productos y marcas más utilizados en servicios cosméticos. Por medio de las encuestas se obtuvieron los productos y marcas utilizadas con mayor frecuencia en los servicios cosméticos (Tabla 12).

Tabla 12. Resumen de resultados de las encuestas.

Servicio	Productos y marcas más utilizadas según la encuesta	
	Productos	Marcas
Tratamiento capilar	Tratamiento revitalizante, ampollitas intensivas y mascarilla capilar	Wella, Kuul, y Nefertiti
Manicura	Removedor de cutícula, acetona pura y exfoliante	Xiomarc, Loquay y OPI
Masajes corporales	Aceite de eucalipto y aceite de almendras	Jaloma, Rusens y Cocoa Butter
Decoloración	Peróxido de 20 VOL	Xio mara, Kuul y Anven
Tinte	Tinte	Loquay, Anven y Keractive
Alaciado con Queratina	Queratina Brasileña y acondicionador	Keramax, Keraliss y Kativa
Permanente	Loción neutralizante y loción ondulante	OPI, Nefertiti y Loquay



Caracterización volumétrica de aguas residuales. La estética de tipo UNISEX es la que se encuentra con mayor frecuencia en la ciudad, la cual se caracteriza por ofrecer servicios tanto para hombres como para mujeres, esta es la que genera la mayor cantidad de aguas residuales al día. A continuación, se enlistan las categorías obtenidas y la estimación de las aguas residuales generadas (Tabla 13).

Tabla 13. Cantidad de aguas residuales generadas por tipo de estética.

Tipo	Servicio	NE	Clientes/día	No. de empleados	AC (L/d)	ARD (L/d)	TAR (L/d)	Tasa L/hab/d
A	Enfocado a exfoliaciones, tratamientos corporales, faciales y masajes	11	5	5	31	96	127	12.7
B	Enfocados a servicios para manos y pies	8	6	4	42	108	150	15
C	Enfocados a todo servicio para el cabello	16	7	8	140	120	260	17.3
D	Estéticas UNISEX (menú amplio de servicios)	20	15	5	158	96	254	12.7
E	Exclusivas de corte de pelo y barbería	12	10	3	10	144	154	11.8
	Total	67	43	25	381	564	945	37.8

Nota: Agua cosmética generada (AC), Agua residual doméstica (ARD), Total de agua residual (TAR), Numero de establecimientos (NE).

Composición de aguas residuales de servicios cosméticos. Se obtuvieron un total de 12 muestras (3 muestras de cada servicio cosmético). En la composición de cada una de las aguas residuales se utilizaron los insumos enlistados. (Tabla 14).

Tabla 14. Ingredientes que componen el agua residual cosmética.

Ingredientes presentes	Servicio
Removedor de cutícula marca LOQUAY Acetona marca XIOMARC Sal de baño aromatizada marca DR. TEALS Exfoliante marca SI IVES Jabón y loción marca DOVE Crema y aceite hidratante marca JALOMA	Pedicura
Peróxido de hidrogeno Vol. 20 marca KUUL Activador en polvo (azul) marca NEKANNE Acondicionador capilar marca NEFERTITI Shampoo marca NEFERTITI	Decoloración
Tinte de cabello marca ANVEN Matizador de canas marca KUUL	Tinte
Sal de baño aromatizada marca DR. TEALS Removedor de cutícula marca LOQUAY Peróxido de hidrogeno Vol 20 marca KUUL	Variados



Activador en polvo (azul) marca NEKANNE
Matizador de canas marca KUUL
Shampoo marca NEFERTITI

Caracterización fisicoquímica del agua cosmética. Los resultados en la tabla 15, son contaminantes básicos, no hay se puede observar que el agua proveniente de la decoloración de cabello es la que reportó los valores más altos en DQO y turbiedad, mientras que el agua proveniente de los tintes obtuvo el valor más alto en color. En la tabla 16 se muestran los valores promedio ($\pm$ DE) de las muestras compuestas provenientes de todos los servicios cosméticos evaluados.

Tabla 15. Calidad del agua por tipo de servicio cosmético (promedio $\pm$ desviación estándar).

Parámetro	Decoloración		Pedicura		Tintes		Servicios variados	
	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE
pH (UpH)	11.2	0.1	10.6	0.0	10.6	0.0	10.1	0.1
T (°C)	24.7	0.1	24.3	0.1	24.9	0.1	24.4	0.1
CE (μ S/cm)	2376.7	17.8	3114.7	16.8	1199.0	2.6	3192.7	4.9
SDT (mg/L)	1187.7	7.0	1555.7	6.4	599.0	1.0	1597.0	2.6
Col (UC)	5442.7	104.5	1530.7	7.6	8943.7	240.1	2966.0	11.8
Turbiedad (UNT)	232.6	0.1	120.3	0.4	222.3	0.3	221.4	0.1
OD (mg/L)	12.3	0.4	2.6	0.5	6.7	0.1	21.4	0.2
ORP (mV)	-7.7	0.6	-8.0	1.0	-6.0	1.0	125.0	1.7
DQO (mg/L)	8316.0		2898.0		5488.0		4917.0	

Tabla 16. Valores promedios ($\pm$ DE) de la calidad del agua de las muestras compuestas provenientes de servicios cosméticos con mayor demanda en Villahermosa.

Parámetro	Aguas Cosméticas	
	X	DE
pH (UpH)	10.63	0.40
T (°C)	24.57	0.23
CE (μ S/cm)	2470.75	835.97
SDT (mg/L)	1234.83	418.01
Color (UC)	4720.75	2938.27
Turbiedad (UNT)	199.13	47.78
OD (mg/L)	10.74	7.37
ORP (mV)	25.83	59.81
DQO (mg/L)	5404.75	2236.37

2.5 Discusión

La temperatura de las aguas residuales de servicios cosméticos fue de $24.57 \pm 0.23^\circ\text{C}$, estos valores son óptimos en el cumplimiento con el límite máximo permisible (LMP) en



su descarga a cuerpos receptores, establecido por la NOM-001-SEMARNAT-2021 (SEMARNAT, 2022). Sin embargo, los valores de pH son altos (10.63 ± 0.40 UpH) incumpliendo el intervalo de 6.5 a 9 para descargas en bienes nacionales. Las concentraciones de sólidos disueltos totales obtenidas (1234.83 ± 418.01 mg/L) rebasan su límite máximo permisible de 500 mg/L establecido por los CE-CCA-001/89 y la conductividad eléctrica reportó valores fuera de rango (2470.75 ± 835.97 μ S/cm) en comparación con su LMP que es de 1000 μ S/cm.

La concentración de color más alta fue reportada en el servicio del tinte (8943.7 ± 240.1 UC) seguido de la decoloración capilar (5442.7 ± 104.5 UC) y la menor se registró en la pedicura (1530.7 ± 7.6 UC). Al comparar las concentraciones con el límite permisible de acuerdo a la Ley Federal de Derechos en Materia de Aguas Nacionales, el cual es de 75 UC (CONAGUA, 2019), se observó que se encuentran fuera del rango, mientras los valores de turbiedad más altos fueron reportados en la decoloración capilar (232.6 ± 0.1 UNT), seguido del tinte (222.3 ± 0.3 UNT) y la menor se registró en la pedicura (120.3 ± 0.4 UNT), todos fuera del rango establecido por Ley Federal de Derechos en Materia de Aguas Nacionales (CONAGUA, 2019), el cual es de 10 UNT. Las aguas presentan una alta demanda química de oxígeno (5404.75 ± 2236.37 mg/L) al compararlo con el límite permisible establecido por la NOM-001-SEMARNAT-2021 (SEMARNAT, 2022) el cual es de 60 mg/L. Najul (2020) obtuvo buenos resultados en el tratamiento de aguas residuales de la industria cosmética aplicando coagulantes (sulfato de aluminio-20 mg/l) y floculantes (polímeros aniónicos-15 mg/l) bajo condiciones de agitación rápida y lenta con remociones de DQO del 77% y del 80% por medio de flotación con aire disuelto. Mulford (2023) reportó eficiencias de remoción entre el 70-90% de turbiedad en el tratamiento con lodos activados con un alto rendimiento en la degradación de materia orgánica. Sin embargo, es válido revisar y proponer pruebas de tratamiento para verificar si la remoción de contaminantes, metales pesados y toxicidad de este tipo de aguas es exitosa mediante alternativas naturales como los humedales artificiales donde Pérez (2025) ha obtenido eficiencias de DQO del 96% en aguas residuales domésticas utilizando *S. latifolia* en sistemas de flujo libre.



2.6 Conclusiones

Para este periodo se encuentran 67 estéticas formales con un amplio catálogo de servicios cosméticos, destacando los tratamientos capilares por generar la mayor cantidad de aguas residuales por cliente al día. La caracterización de las muestras obtenidas de los servicios cosméticos con mayor demanda en la ciudad (tinte, decoloración capilar y pedicura) mostraron que todas rebasan los límites máximos permisibles establecidos por la normativa ambiental para descarga a bienes nacionales. La decoloración es el servicio cosmético con la mayor concentración de DQO (8316.0 mg/L), reportando valores altos de color (8943.7 ± 240.1 UC) y turbiedad (222.3 ± 0.3 UNT)



2.7 Referencias

- CONAGUA. (2021). Informe de sostenibilidad del agua en México 2021. Comisión Nacional del Agua, México <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM%202021.pdf>
- Chaves Tenorio, J. E. (2021). Tratamiento de aguas residuales de la industria cosmética mediante electrocoagulación (Doctoral dissertation Universidad Nacional de Colombia). <https://repositorio.unal.edu.co/items/29f6c3f1-d1e0-4a3e-a231-47cdf143f443>
- Federación, D. O. (1989). Acuerdo por el que se establecen los criterios ecológicos de calidad del agua. CE-CCA-001-89. México.
- Encuesta: (<https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSenozJnI1pwsWhCQ8wflxtuqthltgSCQTfh8rnKSWyD8rkSPg/viewform?usp=header>).
- Heredia, D. R. (2021). Intoxicación ocupacional por metales pesados. MediSan, 21(12), 7003-7016. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1029-30192017001200012
- INEGI (2024). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx>
- Kalman, J. (2020). Biodisponibilidad, bioacumulación y toxicidad de metales en organismos marinos (Doctoral dissertation, Universidad de Cádiz). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=51746>
- Lebube. (2022). The beauty industry's water footprint & sustainable solutions. <https://www.lebube.com>
- Lim, H. Y., & Kwon, K. H. (2023). Sustainable assessment of the environmental activities of major cosmetics and personal care companies. Sustainability, 15(18), 13286. <https://doi.org/10.3390/su151813286>
- Marin, E., & et al., (2023). Evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales en México: Un enfoque en humedales artificiales. Journal of Environmental Management, 312, 110985. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.110985>
- Mulford López, J. C. (2023). Revisión de métodos para el tratamiento de aguas



- residuales de la industria cosmética. Revista America. Recuperado de <https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/fb0718ca-f8e1-4106-a0ac-bb96ccbefd0f/content>
- Najul, M. V (2020) Tratabilidad de efluentes líquidos de industrias de cosméticos. Facultad de ingeniería UVC. <https://www.ing.ucv.ve/jifi2018/documentos/ambiente/AIS065.pdf>
- Pérez, N. E., Ocaña, G. L., Solís-Silván, R., Bautista-Margulis, R. G., & Balcázar, C. A. T. (2025). Remoción de nutrientes de aguas residuales domésticas con *Sagittaria latifolia* y *Sagittaria lancifolia* en humedales artificiales de flujo libre. CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias, 14(27). <https://www.ciba.org.mx/index.php/CIBA/article/view/128>
- Ponce Valenzuela, G. (2020). Análisis de la estructura y desempeño de la industria cosmética en México. Tiempo económico, 3(10), 57-70. <https://www.revistascientificasuvamerica.org.mx/revistas/anthropolisenerojunio2024.pdf>
- Romero Aroca, K. D. (2022). Dimensionamiento y operación de una planta de tratamiento de aguas residuales industriales para una empresa cosmética a cargo de la empresa INGEPROL SAS. https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDISTRITA2_642d3cdbee6d26fa2084580a3016559a
- 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. https://paot.org.mx/centro/normas_a/2022/2022_03_11_MAT_semarnat.pdf
- Statista. (2023). Global cosmetics market growth and environmental challenges. Recuperado de https://www.statista.com/statistics/1447701/leading-factors-beauty-product-sustainable-worldwide/?srsltid=AfmBOorJB0I7z4HLZOH6p_MErrXfRzIjvY-Ktm4EubOR61yMrlAYkNyx



Capítulo 3. Tratamiento de Aguas Residuales de Servicios Cosméticos en Humedales Artificiales con *Sagittaria latifolia*

Autores:

Ing. Monserrat Guadalupe Barco Méndez¹, Dr. Gaspar López Ocaña¹, Dr. David Guerrero Zarate², Dra. Melina del Carmen Uribe¹, M.C. Carlos Alberto Torres Balcázar¹.

3.1 Resumen

Se evaluó la especie *Sagittaria latifolia* (cola de golondrina) en la remoción de contaminantes aguas residuales de servicios cosméticos por medio de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial con dimensiones de 2.5 m de largo x 1.2 m de ancho x 1 m de tirante con tiempos de retención de 7 días y 3.5 días respectivamente. Se evaluaron 4 tratamientos: HAFL-T (humedal artificial de flujo libre testigo), HAFL-SL (humedal artificial de flujo libre con *Sagittaria latifolia*), HAFSS-T (humedal artificial de flujo subsuperficial testigo) y HAFSS-SL (humedal artificial de flujo subsuperficial con *Sagittaria latifolia*). Cada tratamiento se corrió por triplicado, tratando 200 L/día de aguas residuales cosméticas. Se realizó la caracterización de calidad del agua (entrada y salida). La calidad del agua de entrada presenta una turbiedad promedio turbiedad de 70.8 ± 15.4 UNT, color de 3094.58 ± 49.75 UC y DQO de 1692.4 ± 241.5 mg/L. En los experimentos se obtuvieron las eficiencias de remoción más altas en el HAFL-SL, con un 94% de remoción de turbiedad (de 70.8 UNT a 4.0 UNT), 92.6% de color (de 3094.58 UC a 305.8 UC) y 88.8 % de DQO (de 1692.4 mg/L a 190 mg/L).

Palabras clave: humedales artificiales, contaminantes, *Sagittaria latifolia*, aguas residuales, industria cosmética.

Institución de adscripción de cada autor:

¹ División Académica de Ciencias Biológicas Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

² División Académica Multidisciplinaria de Jalpa de Méndez de la UJAT

Publicado en: Revista Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad

Fecha de publicación: 24 de diciembre de 2025



3.2 Introducción

Las aguas residuales de origen industrial y comercial suelen incorporar metales pesados, los cuales son contaminantes altamente peligrosos para los cauces hídricos. Debido a su persistencia química, caracterizada por una baja biodegradabilidad y a sus elevados niveles de toxicidad, su liberación al entorno genera graves riesgos ecológicos en los ecosistemas receptores (Gao & Meng, 2021). En 2023, México se consolidó como el decimotercer mercado mundial en la industria de servicios cosméticos, registrando un incremento del 11% en comparación con 2020, lo que a su vez elevó el volumen y la complejidad de las aguas residuales generadas en este sector (Sánchez, 2023). La industria cosmética comprende una gran variedad de artículos, tales como productos depilatorios, de maquillaje y tratamientos corporales o capilares. Los insumos habituales de este sector (incluyendo conservantes, emulgentes, bactericidas, antioxidantes y agentes gelificantes) dan lugar a efluentes caracterizados por elevados valores de demanda química de oxígeno (DQO), presencia de grasas y aceites, detergentes, compuestos orgánicos volátiles y metales pesados (Mulford, 2023). El vertido continuo de estas aguas en los ecosistemas acuáticos desencadena graves repercusiones ecológicas asociadas a la toxicidad, la bioactividad y la bioacumulación en las distintas especies biológicas (Rosas et al., 2020). Ante esta problemática, resulta imperativo desarrollar alternativas de depuración económicas y de baja complejidad operativa que optimicen la gestión sostenible de los recursos hídricos. Los HA se han consolidado como una tecnología eficiente para la depuración de contaminantes esenciales en aguas residuales, conforme indican Witthayaphirom et al. (2020) estos sistemas replican los procesos propios de los humedales naturales mediante el cultivo de macrófitas (emergentes, flotantes o sumergidas) sobre un sustrato de soporte, en combinación con la actividad microbiana concentrada en la rizosfera. Ante la creciente difusión de esta tecnología, Benny y Chakraborty (2020) subrayan la necesidad de profundizar en la investigación sobre la capacidad de fitorremediación que poseen las especies vegetales autóctonas.

El sureste mexicano, y de forma particular el estado de Tabasco, cuenta con una amplia diversidad de flora palustre idónea para su estudio en la depuración de aguas residuales (Martínez et al., 2023). En este escenario, la presente investigación se enfoca en *Sagittaria*



latifolia, una macrófita nativa, de tamaño reducido y de fácil transporte y manejo, con el propósito de analizar su adaptabilidad en humedales artificiales de flujo libre a escala piloto. Asimismo, se evalúa su potencial para disminuir la turbidez del agua (un indicador indirecto de la concentración de sólidos suspendidos) lo que implica que al reducir este parámetro también se disminuye la demanda química de oxígeno (DQO). Para la depuración de aguas residuales de la industria cosmética, Najul et al. (2024) alcanzaron remociones de DQO del 77% y 80% mediante flotación con aire disuelto utilizando coagulantes (sulfato de aluminio a 20 mg/L) y floculantes (polímeros aniónicos a 15 mg/L). Asimismo, Mulford (2023) documentó eficiencias de remoción de turbiedad entre el 70% y 90% utilizando lodos activados, los cuales mostraron un elevado rendimiento en la degradación de materia orgánica. No obstante, resulta pertinente plantear y analizar ensayos de tratabilidad para corroborar la eficacia de tecnologías naturales, como los humedales artificiales, en la remoción de contaminantes, metales pesados y sustancias tóxicas en estos efluentes. En esta línea, Valero et al. (2020) emplearon *Phragmites australis* en un sistema horizontal de flujo subsuperficial con un tiempo de retención de 3 días para tratar aguas residuales agrícolas, logrando eficiencias de remoción del 78% para fósforo y de hasta el 36% para metales pesados como el cromo.

Por tal motivo, el objetivo de este proyecto fue evaluar la capacidad de remoción de contaminantes básicos, (pH, temperatura, sólidos disueltos totales, turbidez, color, DQO), nutrientes (nitrito y fosforo) y metales pesados (Al, Br, Cr VI, Cu, Fe, Mn, Ni y Zn), en un sistema compuesto por humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial que y trato aguas residuales reconstituidas de servicios cosméticos. La especie utilizada en este sistema fue *Sagittaria latifolia*, típica del trópico húmedo. La implementación de una tecnología de tratamiento como esta en el campus universitario contribuye a la reducción del consumo de energía, los costos de operación y mantenimiento preventivo.

3.3 Materiales y métodos

Área de estudio. Este trabajo fue llevado en la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL) Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), en el área de planta piloto del Laboratorio de Tecnología del agua.



Colecta y siembra de la especie. La colecta de *Sagittaria latifolia* se llevó a cabo en el tiradero a cielo abierto Loma de Caballo ubicado en la Ranchería Lázaro Cárdenas, Centro, Tabasco, 17°59'26" N, 92°58'16" O y 17°59'17" N, 92°58'37" O debido a que es una especie nativa de la región, es capaz de crecer con abundancia y es de fácil transportación. Se procedió a transportarla a la División de Ciencias Biológicas en donde se encuentran las unidades experimentales y fueron sembrados 12 individuos a una profundidad de 20 centímetros por debajo de la superficie del medio de soporte (grava de río) en cada HA.

Creación del agua sintética. Se generó una lista de productos y marcas utilizadas con mayor frecuencia en la ciudad de Villahermosa Tabasco por medio de encuestas a los trabajadores de los salones de belleza. En base a lo anterior, se determinaron los productos y cantidades para la preparación de un tanque de 200 L de agua residual sintética de servicios cosméticos, los cuales se presentan en la tabla 17.

Tabla 17. Productos del agua residual sintética de servicios cosméticos.

Insumos	Cantidad
Tratamiento revitalizante de residuos y pH marca NEFERTITI	120.00 ml
Mascarilla de sistema capilar marca KUUL	90.00 ml
Removedor de cutícula marca Loquay	80.00 ml
Crema Alaciante con Keratina marca LISE	120.00 ml
Revelador en crema (peróxido) marca KUUL	50.00 ml
Loción neutralizante marca NEFERTITI	80.00 ml
Loción Ondulante marca NEFERTITI	80.00 ml
Shampoo matizador marca NEFERTITI	100.00 ml
Decolorante en polvo para mechas marca ANVE	50.00 ml
Tinte marca KUUL	50.00 ml
Ampolleta Intensiva marca N	30.00 ml
Total	850.00 ml

Diseño experimental. Se empleó un diseño completamente aleatorizado de un factor (tipo de flujo) con 2 niveles para cuatro tratamientos: 1 (humedal artificial de flujo libre testigo) 2 (humedal artificial de flujo libre con *Sagittaria latifolia*), 3 (humedal artificial de flujo subsuperficial testigo) y 4 (humedal artificial de flujo subsuperficial con *Sagittaria latifolia*) (Tabla 18). Analizando como variables dependientes: pH, la temperatura, conductividad eléctrica, sólidos suspendidos totales, color aparente, turbiedad y DQO. Todos los

tratamientos fueron alimentados de un mismo afluente de agua residual y mismas condiciones de operación, por triplicado. Se verificó la independencia, normalidad y homocedasticidad de los datos. Se empleó un análisis de varianza de Kruskal – Wallis para los datos no paramétricos y un contraste de medianas de Mann – Withney para determinar diferencias estadísticamente significativas, todos los análisis estadísticos se realizaron empleando el software STAGRAPHSICS CENTURION™ v 19.0 con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$.

Cada unidad experimental consistió en humedales artificiales con dimensiones de 2.5 m de largo x 1.2 m de ancho y 1 m de tirante, con un tiempo de retención de 6.55 días para flujo libre y 3.9 días para flujo subsuperficial, un medio de soporte (grava de río) con 52% de porosidad y caudal de operación de 0.2 m³/d (Figura 5).

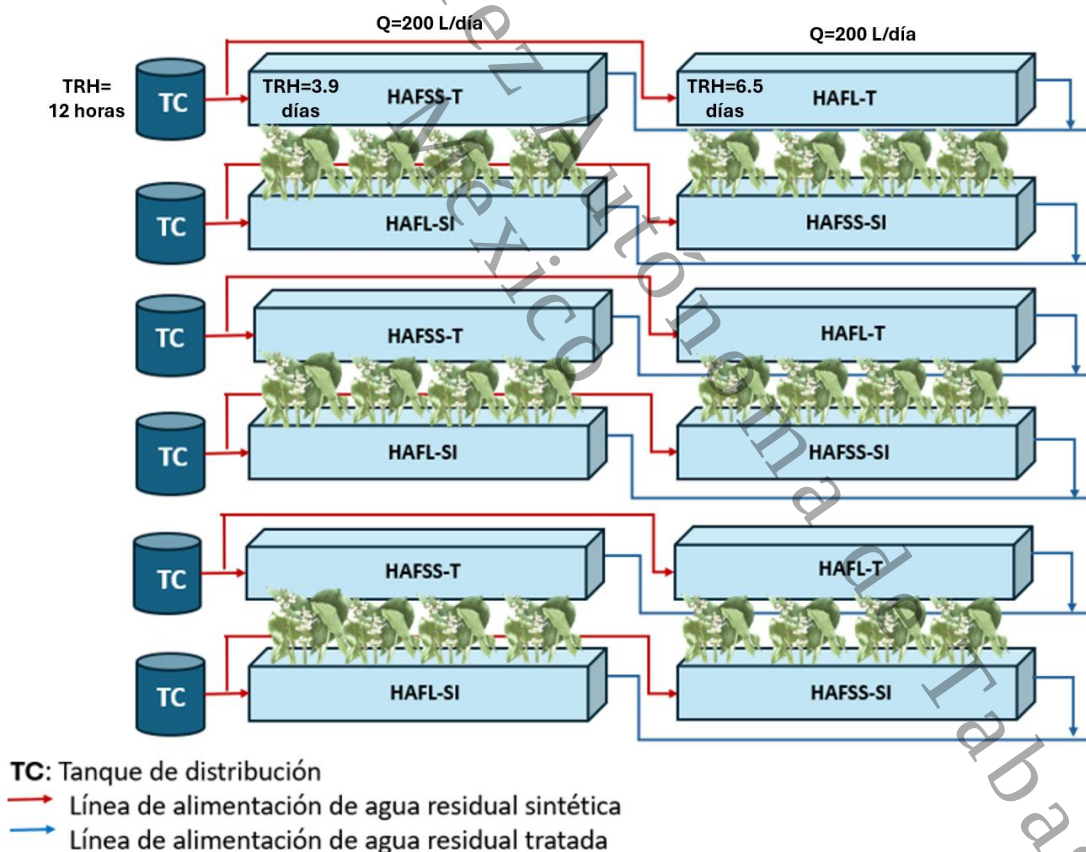


Figura 3. Diagrama del diseño experimental de los HA con *Sagittaria latifolia*.

Tabla 18. Factores del diseño experimental.

Factor	Nivel	Vegetación	Tratamiento
--------	-------	------------	-------------



Tipo de flujo	Libre	HAFL-T
		HAFL-SI
	Subsuperficial	HAFSS-T
		HAFSS-SI

Caracterización fisicoquímica del agua. Se recolectó una muestra de la entrada y la salida de cada una de las 12 unidades experimentales, tomándose en un recipiente de 1 L. Posteriormente se transportó el agua al Laboratorio de Tecnología del Agua para su correspondiente caracterización resguardándose a una temperatura de 4°C para su conservación. Se determinó la turbidez y color mediante un turbidímetro marca LaMotte modelo TC-3000we Trimeters. Para el pH, temperatura, conductividad (CE) y sólidos disueltos totales (SDT) se utilizó el equipo HI98130 HANNA. Para el oxígeno disuelto (OD) se utilizó el equipo RCYAGO y para el cálculo de DQO se utilizó el equipo HI839150 HANNA.

Se determinaron los siguientes métodos para medir los parámetros: Temperatura (SM 2550), Turbiedad (SM 2130 B), Color (APHA 2120), Potencial de hidrógeno (SM 9040 B), Conductividad Eléctrica (SM 2510 B), Sólidos disueltos totales (SM 2540), OD (SM 4500-OG) y DQO (USEPA 410.4).

Eficiencia de remoción. La eficiencia de remoción del color aparente y la turbiedad de cada tratamiento se calculó con base a la Ecuación 1 (García et al., 2019).

$$ER(\%) = \frac{C_e - C_s}{C_e} \times 100 \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

ER=Eficiencia de remoción

Ce=Concentración del contaminante “x” a la entrada (afluente)

Cs=Concentración del contaminante “x” a la salida (efluente)

3.4. Resultados

Evaluación del crecimiento y comportamiento de la vegetación



Las plantas colectadas de *Sagittaria latifolia* fueron caracterizadas en la etapa inicial y final del tratamiento con humedales artificiales. Las características determinadas se muestran en la tabla 19 y 20.

Tabla 19. Valores promedios ($\pm$ DE) de las características de *Sagittaria latifolia* en HA de flujo subsuperficial ($N=12$).

Variable de planta medida	HAFSS-SI	
	Etapa inicial	Etapa final
Peso total de la planta (kg)	0.36 $\pm$ 0.18	1.98 $\pm$ 0.33
Largo de la planta (m)	0.95 $\pm$ 0.18	2.69 $\pm$ 0.18
Número de tallos por planta	5.44 $\pm$ 1.86	8.71 $\pm$ 0.76
Número de hojas por planta	1.88 $\pm$ 1.54	4.71 $\pm$ 0.49
Diámetro de tallo (cm)	2 $\pm$ 0.1	2.14 $\pm$ 0.34
Largo del tallo (m)	0.51 $\pm$ 0.22	1.74 $\pm$ 0.08
Largo de la hoja (cm)	19.7 $\pm$ 3.3	31.94 $\pm$ 3.12
Ancho de la hoja (cm)	12.4 $\pm$ 2.9	25.73 $\pm$ 4.56

Tabla 20. Valores promedios ($\pm$ DE) de las características de *Sagittaria latifolia* en el HA de flujo libre ($N=12$).

Variable de planta medida	HAFL-SI	
	Etapa inicial	Etapa final
Peso total de la planta (kg)	0.30 $\pm$ 0.11	2.17 $\pm$ 0.28
Largo de la planta (m)	0.73 $\pm$ 0.25	2.86 $\pm$ 0.32
Número de tallos por planta	5.50 $\pm$ 1.90	7.86 $\pm$ 1.21
Número de hojas por planta	1.88 $\pm$ 1.82	5.29 $\pm$ 1.38
Diámetro de tallo (cm)	3 $\pm$ 0.1	4.16 $\pm$ 0.34
Largo del tallo (m)	0.53 $\pm$ 0.15	2.35 $\pm$ 0.19
Largo de la hoja (cm)	22 $\pm$ 4.6	41.57 $\pm$ 4.12
Ancho de la hoja (cm)	15.5 $\pm$ 3.6	30.24 $\pm$ 3.72

Caracterización del agua residual en los tratamientos. En la tabla 21, se presentan los parámetros evaluados de aguas residuales domésticas tratadas por los 4 tratamientos. El agua residual de servicios cosméticos del tanque de distribución presenta un pH de 8.1 $\pm$ 0.2 UpH, temperatura de 27.00 $\pm$ 0.6 °C, SDT de 726.7 $\pm$ 27.7 mg/L, turbiedad de 70.8 $\pm$ 15.4 UNT, color de 3094.58 $\pm$ 49.75 UC y DQO de 1692.4 $\pm$ 241.5 mg/L.

Tabla 21. Valores promedios ($\pm$ DE) de la calidad del agua de los tratamientos evaluados-etapa de estabilización.

Parámetros	TC (ARR)		HAFL-SL		HAFSS-SL		HAFSS-T		HAFL-T		LMP	
	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE	Valor	Ref.
pH (UpH)	8.1	0.2	7.1	0.2	7.4	0.2	8.3	0.4	8.4	0.4	6-9	A
T (°C)	27.0	0.6	24.3	2.0	26.2	0.8	26.1	1.5	25.9	1.5	35	A
CE (μ S/cm)	1612.3	72.1	710.3	27.3	906.0	45.0	798.7	44.7	601.3	29.0	1000	B



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ciencias Ambientales



SDT (mg/L)	726.7	27.7	316.0	19.2	403.3	23.2	362.0	19.0	270.0	10.7	500.0	B
Color (UC)	4143.8	2181.8	305.8	210.2	398.3	174.1	338.27	78.40	351.3	91.1	75.0	B
Turbiedad (UNT)	70.8	15.4	4.0	2.9	8.7	3.1	4.4	1.2	5.5	3.3	15.0	B
OD (mg/L)	1.6	0.3	1.8	0.2	2.0	0.4	1.6	0.1	2.0	0.4	+5	B
POR (mV)	-177.6	58.9	-64.0	44.9	-61.5	34.2	-53.9	15.9	-51.8	17.5	NA	NA
DQO (mg/L)	1692.4	241.5	190.0	22.0	190.6	13.8	172.2	27.7	201.6	40.3	60	A
Aluminio (mg/l)	0.028	0.0121	0.01	0.0101	0.02	0.0137	0.02	0.0101	0.02	0.014	0.2	B
Bromo (mg/l)	3.7	3.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.0	B
Cromo VI (mg/l)	431.2	314.6	20.8	43.1	11.2	19.3	14.6	30.2	21.8	20.2	1.0	A
Cobre (mg/l)	3	1.4	108.4	85.1	77.6	56.0	1.8	3.7	41.2	41.4	4.0	A
Hierro (mg/l)	2.7	1.6	1.1	1.8	1.9	1.2	0.4	0.3	0.0	0.0	1.0	B
Manganeso (ppm)	11.0	7.7	2.6	3.0	1.6	1.0	209.6	99.0	60.0	124.2	20.0	
Níquel (mg/l)	2.1	2.6	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	2.0	A
Nitrato (mg/l)	32.8	15.7	1.1	1.7	9.7	8.3	2.2	3.0	1.8	1.6	5.0	B
Fosforo (mg/l)	54.0	6.3	41.0	6.9	28.6	7.5	34.1	16.7	31.3	17.5	15	A
Zinc (mg/l)	1.13	1.13	1.4	2.5	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	10	A

En la tabla 22 se muestran las eficiencias de remoción de los parámetros evaluados en los tratamientos durante la etapa final del experimento con agua residual reconstituida de servicios cosméticos.

Tabla 22. Eficiencias (%) de los tratamientos evaluados con agua residual cosmética.

Parámetro	HAFL-SL (%)	HAFSS-SL (%)	HAFSS-T (%)	HAFL-T (%)
pH (upH)	12.3	9.1	-1.6	-3.8
T (°C)	10.2	3.1	3.3	4.3
CE (µS/cm)	55.9	43.8	50.5	62.7
SDT (mg/L)	56.5	44.5	50.2	62.8
Color (UC)	92.6	90.4	91.8	91.5
Turbiedad (UNT)	94.4	87.7	93.8	92.2
OD (mg/L)	-12.2	-23.2	0.8	-20.3
POR (mV)	64.0	65.4	69.7	70.8
DQO (mg/L)	88.8	88.7	89.8	88.1
Aluminio (mg/l)	71.4	35.7	35.7	21.4
Bromo (mg/l)	100.0	100.0	100.0	100.0
Cromo VI	95.2	97.4	96.6	94.9
Cobre (mg/l)	-3077.0	-2174.3	47.2	-1107.5
Hierro (mg/l)	57.6	29.8	85.2	99.4
Manganeso (ppm)	76.4	85.1	-1802.0	-444.5
Níquel (mg/l)	97.5	97.3	98.4	94.8



Nitrato (mg/l)	96.6	70.4	93.4	94.6
Fosforo (mg/l)	24.0	47.0	36.9	42.0
Zinc (mg/l)	-26.7	82.5	69.9	72.7

3.5. Discusión

Potencial de hidrógeno y Temperatura

El pH es crucial en el desarrollo de microorganismos, asociados a la degradación de los contaminantes y pueden verse afectados por cambios ácidos o alcalinos (Javier et al., 2024). En el análisis de pH la prueba de Kruskal-Wallis reportó que el valor mediano más bajo corresponde al tratamiento HAFSS-SL con $9.14 \pm (Q_1=9.1, Q_3=9.30)$ UpH, seguido del tratamiento HAFL-SL con $9.15 \pm (Q_1=9.02, Q_3=9.28)$ UpH y el valor mediano más alto se presenta en el tratamiento HASS-T con $9.32 \pm (Q_1=9.23, Q_3=9.48)$ UpH. El agua que ingresa a los humedales artificiales presenta características altamente alcalinas, pero tiende a neutralizarse en los tratamientos al utilizarse *Sagittaria latifolia*, lo que favorece el establecimiento de las bacterias (Rincón, 2023). Los tratamientos cumplen con un rango adecuado para conservar la vida acuática dentro de los cuerpos receptores y se favorecen los procesos de nitrificación y desnitrificación (Giaveno & Gatti, 2022). En cuanto a la temperatura, el análisis de varianza (ANOVA) revela que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. El valor más bajo fue el tratamiento HASS-T $\pm (Q_1=22.64, Q_3=1.32)$ °C seguido del HASS-SL $\pm (Q_1=22.8, Q_3=1.35)$ °C y el valor más alto es el HAFL-S $\pm (Q_1=22.8, Q_3=1.20)$ °C. Estas temperaturas son adecuadas para la eliminación de materia orgánica suspendida, ya que influyen positivamente en los procesos microbianos que tienen lugar en los humedales artificiales (Mora et al., 2020). Además, promueven el desarrollo de organismos mesófilos, encargados de llevar a cabo funciones biogeoquímicas. La temperatura observada se considera óptima, ya que se mantiene por debajo del umbral de 50 °C, punto en el cual se detienen procesos como la nitrificación bacteriana (Sánchez et al., 2021)

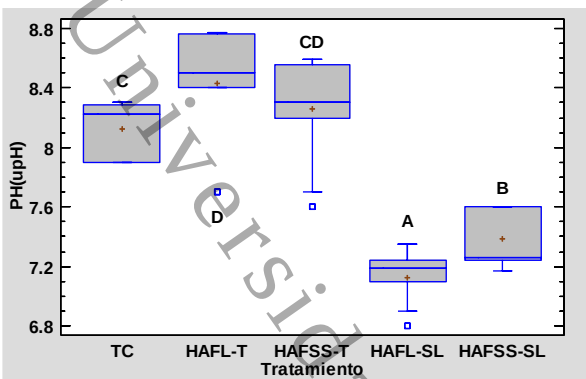


Figura 4. Valores medianos ($\pm RI$) para la variable pH (UpH).

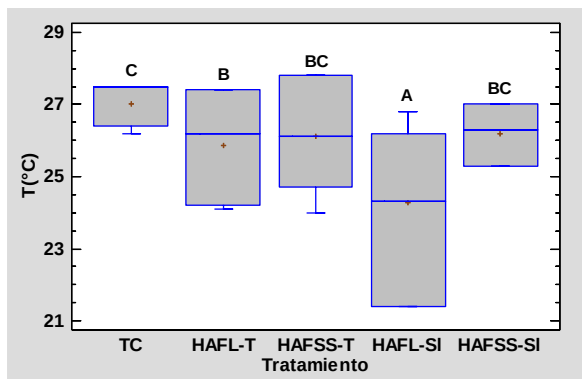


Figura 5. Valores medianos ($\pm RI$) para la variable T (°C).

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

Sólidos Disueltos Totales y Conductividad Eléctrica

La prueba de Kruskal-Wallis para SDT indica que el valor más bajo se encontró en el tratamiento HAFSS-T con $287.0 \pm (Q_1=254.85, Q_3=300.82)$ mg/L seguido del HAFL-SL con $316.0 \pm (Q_1=292.71, Q_3=376.77)$ mg/L y finalmente el valor más alto es el tratamiento HAFSS-SL con $452.0 \pm (Q_1=439.35, Q_3=460.82)$ mg/L. Los SDT son el material soluble constituido por materia inorgánica y orgánica, las concentraciones de sólidos disueltos totales en los tratamientos son óptimos en comparación con el rango de referencia (500 mg/L) establecido por los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua 1989 para cuerpos receptores. En cuanto a la conductividad eléctrica, permite determinar el contenido de sales disueltas, es proporcional a la concentración de cationes y aniones del medio y esta aumenta con la temperatura (Ituri et al., 2022). El valor más bajo se encontró en el tratamiento HAFSS-T con $74.0 \pm (Q_1=510.88, Q_3=602.287)$ $\mu S/cm$ seguido del HAFL-SL con $632.0 \pm (Q_1=589.53, Q_3=753.55)$ $\mu S/cm$ y finalmente el valor más alto es el tratamiento HAFSS-SL con $899.0 \pm (Q_1=877.71, Q_3=934.15)$ $\mu S/cm$, se alcanzan concentraciones óptimas ($>800 \mu S/cm$) que indica que no hay un efecto fitotóxico para las especies (Muñante et al., 2022).

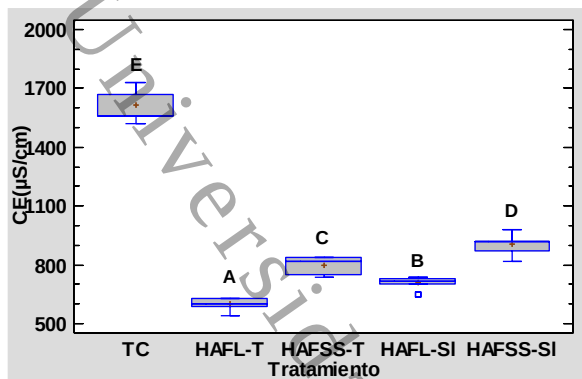


Figura 6. Valores medianos ($\pm R/I$) para SDT (mg/L).

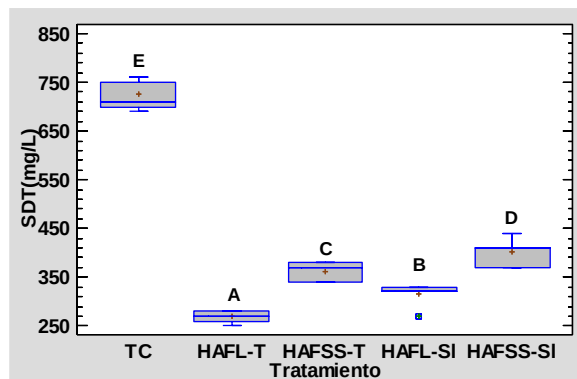


Figura 7. Valores medianos ($\pm R/I$) para CE ($\mu S/cm$).

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

Turbiedad y Color

Para la turbiedad la prueba de Kruskal-Wallis reportó que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95% de confianza. El valor mediano más bajo se encontró en el tratamiento HASS-T con $4.2 \pm (Q_1=2.52, Q_3=10.26)$ UNT, lo cual refleja la capacidad del medio de soporte para filtrar sólidos suspendidos y formar biopelícula (Ernestina, 2024), seguido del HAFL-T con un valor de $4.2 \pm (Q_1=3.06, Q_3=6.01)$ UNT. En contraste, el valor mediano más alto se obtuvo en el HAFSS-SL con $9.3 \pm (Q_1=4.34, Q_3=12.04)$ UNT en donde se observó un aumento debido al crecimiento de algas. La turbiedad es la materia en suspensión y coloidal, finamente dividida, plancton y otros organismos microscópicos; son cofactores de incremento de este parámetro fisicoquímico que se asocia con una menor eliminación de patógenos (Rivera et al., 2021). Las macrófitas no solo mejoran la filtración y el crecimiento microbiano, sino que también facilitan la transferencia de oxígeno a la rizosfera, contribuyendo al ciclo de nutrientes, la producción de gases y el control de enfermedades (Thomaz, 2021).

Los tratamientos se encuentran dentro del rango establecido por Ley Federal de Derechos en Materia de Aguas Nacionales (CONAGUA, 2024), el cual es de 10 UNT. En cuanto al color, la prueba de Kruskal-Wallis indica que el valor más bajo se encuentra en el tratamiento HAFL-T con $220.0 \pm (Q_1=207.07, Q_3=381.61)$ UC seguido del HAFL-SL con $231.0 \pm (Q_1=150.88, Q_3=635.04)$ UC y finalmente el valor mediano más alto está en el

tratamiento HAFSS-SL $531.0 \pm$ ($Q_1=222.88$, $Q_3=627.54$) UC con eficiencias del 92% con respecto al agua inicial.

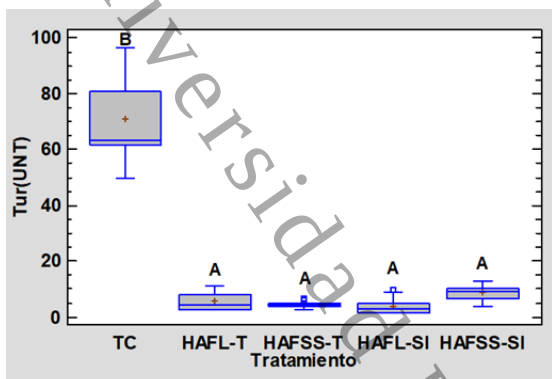


Figura 8. Valores medianos ($\pm R/I$) para Turbiedad (UNT).

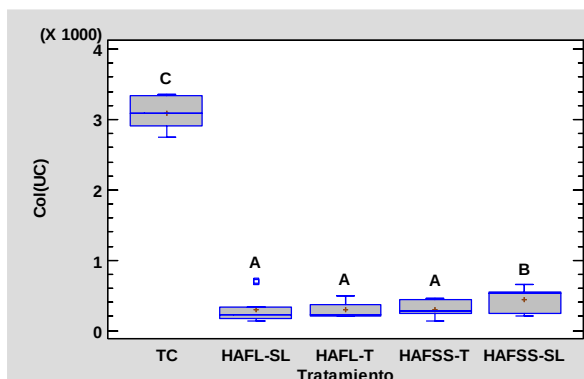


Figura 9. Valores medianos ($\pm R/I$) para Color (UC).

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

OD y DQO

Para la variable OD el análisis de varianza (ANOVA) indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. El tratamiento con el valor más bajo fue el HAFSS-SL con $2.9 \pm$ ($Q_1=2.8$, $Q_3=11.83$) mg/L, seguido del HAFL-SL con $3.4 \pm$ ($Q_1=2.09$, $Q_3=9.93$) mg/L y el valor más alto se obtuvo en el HAFL-T con $7.2 \pm$ ($Q_1=2.12$, $Q_3=7.58$) mg/L. Finalmente, para la DQO. El valor más bajo fue en el tratamiento HAFL-T con $179 \pm$ ($Q_1=139.60$, $Q_3=200.75$) mg/L y el valor más alto se obtuvo en el HAFSS-T con $201.0 \pm$ ($Q_1=157.81$, $Q_3=256.95$) mg/L.

La DQO es importante para oxidar químicamente los materiales orgánicos e inorgánicos en el agua produciendo la degradación de estos compuestos (Crespo et al., 2024), en este caso se obtuvo una disminución de 172.2 mg/L, es decir se removió el 90% con respecto al agua inicial. En otra investigación realizada por Donoso et al., (2024) evaluaron los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con Schoenoplectus, el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea, logrando eficiencias de remoción de DQO de 51.06% con medición a los 15 días.

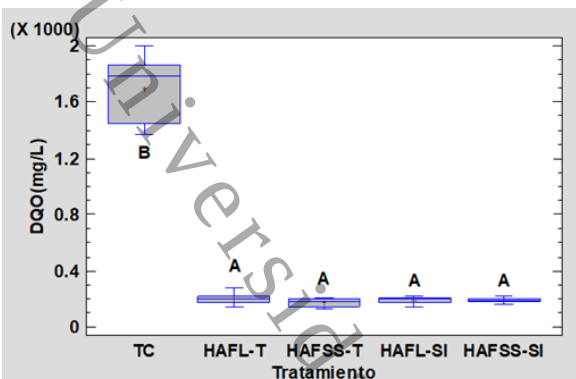


Figura 10. Valores medianos ($\pm R$) para DQO (mg/L).

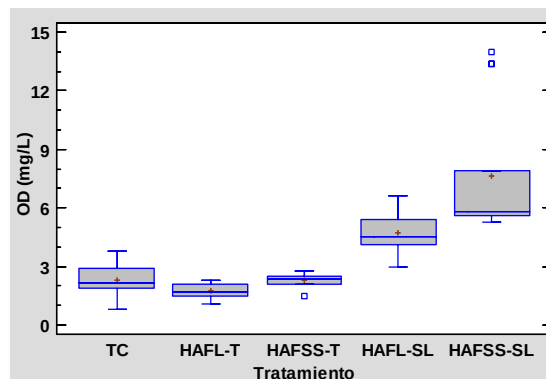


Figura 11. Valores medianos ($\pm R$) para OD (mg/L).

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

Aluminio y Bromo

En el análisis de pH la prueba de ANOVA reportó que el valor más bajo corresponde al HAFL-SI con $0.08 (\pm 0.01)$ UpH, seguido de HAFSS-SI $0.18 (\pm 0.013)$ UpH mientras que el valor más alto se presenta en el TC $0.28 (\pm 0.01)$ UpH. En el análisis de Bromo de Kruskal-Wallis reportó que el valor mediano más bajo corresponde a los humedales artificiales (0 mg/L) mientras que el valor mediano más alto se presenta en el TC con $2.07 \pm (Q_1=1.98, Q_3=6.08)$ mg/L.

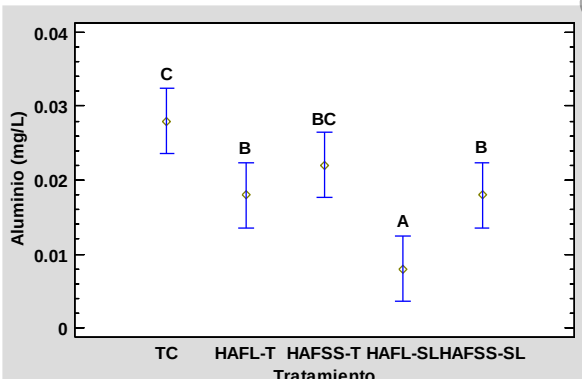


Figura 12. Valores promedios ($\pm DE$) para Aluminio (mg/L).

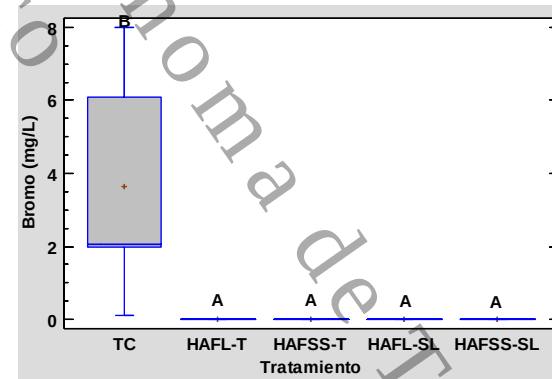


Figura 13. Valores medianos ($\pm R$) de Bromo (mg/L).

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

Cromo VI y Cobre

En el análisis de Cromo VI de Kruskal-Wallis que evalúa la hipótesis de que las medianas dentro de cada uno de los niveles de Tratamientos son iguales, reportó que el valor mediano más bajo corresponde al HAFSS-SI y HAFL-SI (0 mg/L), seguido de HAFSS-T

con $25 \pm (Q_1=0.0, Q_3=47.14)$ mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el Tanque de Control con $346 \pm (Q_1=227.0, Q_3=446.0)$ mg/L. En cuanto al cobre, el valor mediano más bajo corresponde al HAFL-T con 0 mg/L, seguido de HAFSS-T con $41 \pm (Q_1=0, Q_3=58)$ mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el HAFSS-SL con $83 \pm (54.0, 84.0)$ mg/L.

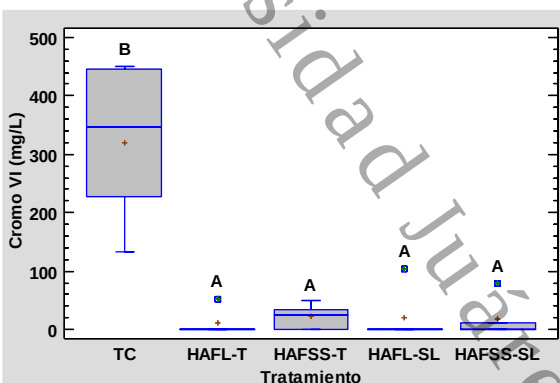


Figura 14. Valores medianos ($\pm RI$) para Cromo VI (mg/L).

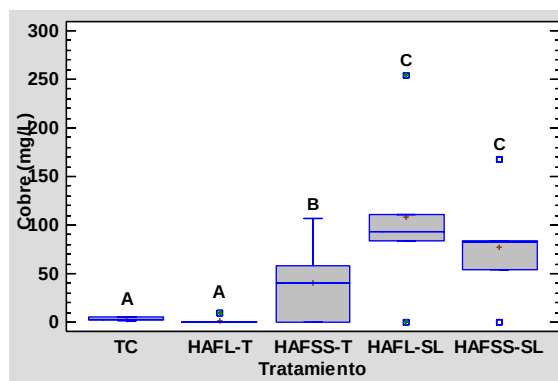


Figura 15. Valores medianos ($\pm RI$) de Cobre (mg/L).

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

Hierro y Manganeseo

En el análisis de Hierro de Kruskal-Wallis que evalúa la hipótesis de que las medianas dentro de cada uno de los niveles de Tratamientos son iguales. El valor mediano $\pm (Q_1, Q_3)$ más bajo corresponde al HAFL-SL con $0.24 \pm (Q_1=1.45, Q_3=2.22)$ mg/L, seguido de HAFSL-T con $.29 \pm (Q_1=0.25, Q_3=0.61)$ mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el HAFSS-SL con $1.96 \pm (Q_1=1.45, Q_3=2.22)$ mg/L. En cuanto al Manganeseo la prueba de Kruskal-Wallis reportó que el valor mediano más bajo corresponde al HAFL-SL con $0 \pm (0, 1.3)$ $\mu\text{g/L}$, seguido de HAFL-T con $0 \pm (Q_1=0, Q_3=3.5)$ $\mu\text{g/L}$ mientras que el valor mediano más alto se presenta en el Tanque de control con $24.5 \pm (Q_1=24.0, Q_3=38.0)$ $\mu\text{g/L}$.

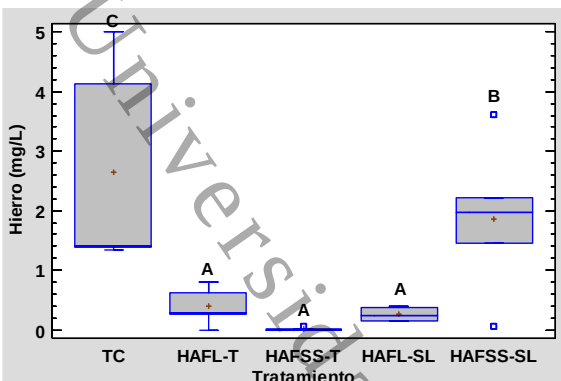


Figura 16. Valores medianos ($\pm R/I$) para Hierro (mg/L).

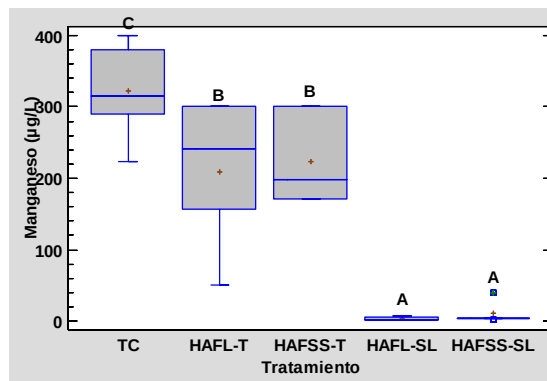


Figura 17. Valores medianos ($\pm R/I$) para Manganeso ($\mu\text{g/L}$).

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

Níquel y Nitrato

En el análisis de Níquel de Kruskal-Wallis que evalúa la hipótesis de que las medianas dentro de cada uno de los niveles de Tratamientos son iguales. El valor mediano más bajo corresponde al HAFL-SL con $0.06 \pm (Q_1=0.03, Q_3=0.07)$ mg/L, seguido de HAFSS-SL con $0.06 \pm (Q_1=0.05, Q_3=0.06)$ mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el Tanque de control con $0.7 \pm (Q_1=0.69, Q_3=0.71)$ mg/L. En el análisis de Nitrato de Kruskal-Wallis reportó que el valor mediano más bajo corresponde al HAFL-SL con $0 \pm (Q_1=0, Q_3=1.3)$ mg/L, seguido de HAFL-T con $0 \pm (Q_1=0.0, Q_3=3.5)$ mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el Tanque de control con $24.5 \pm (Q_1=24.0, Q_3=38.0)$ mg/L.

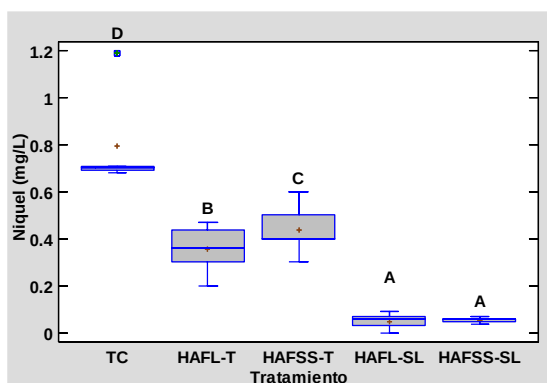


Figura 18. Valores medianos ($\pm R/I$) para Níquel (mg/L).

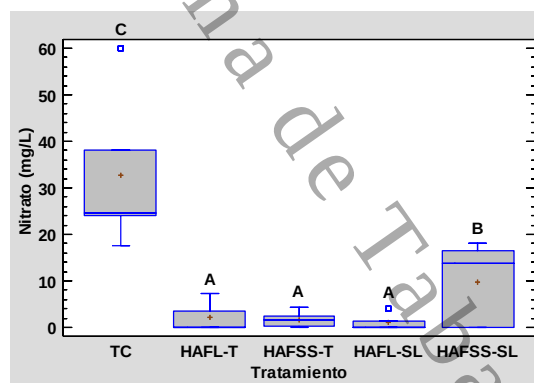


Figura 19. Valores medianos ($\pm R/I$) para Nitrato (mg/L).

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia

Fósforo y Zinc

En el análisis de Fósforo de Kruskal-Wallis que evalúa la hipótesis de que las medianas dentro de cada uno de los niveles de Tratamientos son iguales. El valor mediano $\pm$ (Q1, Q3) más bajo corresponde al HAFL-SL con $0 \pm$ (Q1=0, Q3=1.3) mg/L, seguido de HAFL-T con $0 \pm$ (Q1=0, Q3=3.5) mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el Tanque de control con $24.5 \pm$ (Q1=24.0, Q3=38.0) mg/L. En cuanto al Fosforo, la prueba de Kruskal-Wallis reportó que el valor mediano más bajo corresponde al HAFL-SL con $0.23 \pm$ (Q1=0.2, Q3=0.55) mg/L, seguido de HAFSS-SL con $2.23 \pm$ (Q1=2.1, Q3=2.6) mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el Tanque de control con $18.7 \pm$ (Q1=16.17, Q3=19.0) mg/L.

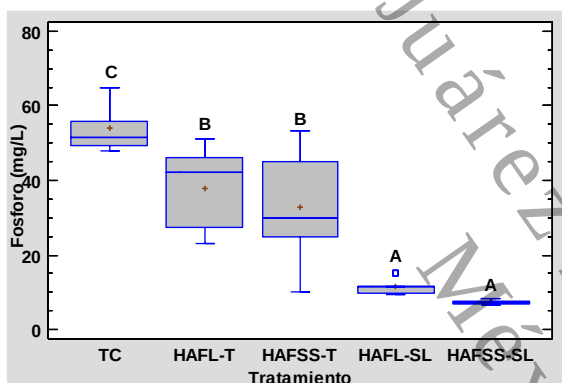


Figura 20. Valores medianos ($\pm$ RI) para Fósforo (mg/L).

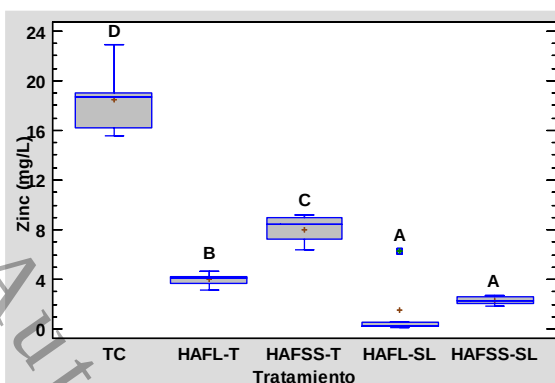


Figura 21. Valores medianos ($\pm$ RI) para Zinc (mg/L).

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

3.6 Discusiones

En cuanto a las eficiencias negativas (-) en su valores, se debe a que la concentración del efluente en esta unidad es mayor que la del influente y este fenómeno es conocido como corto circuito (Romellón et al., 2022). La temperatura presente en el agua de salida de los HA muestra valores que favorecen el crecimiento y la estabilización de microorganismos mesófilos, los cuales pueden establecer colonias favorables para la degradación de contaminantes y tener un desarrollo metabólico adecuado en un rango de 20 a 45°C (Kadlec, 2009). Del mismo modo los tratamientos cumplen con lo establecido al umbral de referencia de la NOM-001-SEMARNAT-2021 que es de 35°C para su descarga a cuerpos receptores. La conductividad eléctrica representa la



concentración de sales solubles en el agua residual, relacionados con la cantidad de iones disueltos (++) , está en concentraciones bajas (<800 $\mu\text{S}/\text{cm}$) no es fitotóxica para los organismos (Solís et al., 2018). Los sólidos disueltos totales con rango de 500-800 mg/L en el agua previene los procesos de corrosión de equipos industriales, protege los cultivos agrícolas sensibles y no afectan las características organolépticas del agua (Crites y Tchobanoglous, 2004). Tomando como referencia los Criterios ecológicos de calidad del agua de 1989 (CE-CCA-001/89) que tiene como concentración optima 500 mg/L, los tratamientos de este estudio cumplen con este parámetro.

Por otra parte, la turbiedad en el agua se origina de la presencia de partículas coloidales que dispersan la luz (Montoya, 2021), los tratamientos con *Sagittaria latifolia* cumplen con el límite de referencia que indica la Ley Federal de Derechos en Materia de Aguas Nacionales (CONAGUA, 2024) que es de 15 UNT. En cuanto al color, este está relacionado con las sustancias disueltas y las partículas en suspensión, en tal sentido el medio de soporte, en este caso grava de río, cumplió un rol como filtrante de los sólidos reteniéndolos por adhesión (López et al., 2019) mientras que el sistema de humedales permite la sedimentación por su baja velocidad en el flujo, lo cual favorece al HA de flujo subsuperficial con vegetación que obtuvo el mejor rendimiento de 90% para turbiedad y 77% de color.

El tratamiento HAFL-SI reportó la mejor remoción de aluminio con 71.4%, todos los tratamientos tienen valores óptimos por debajo de 5.0 mg/L según los CE-CCA-001/89, las concentraciones elevadas de aluminio soluble en cuerpos de agua receptores dañan la fauna acuática, especialmente peces, al alterar sus branquias. En el Cromo VI, las mejores eficiencias se obtuvieron en el HAFSS-SI (97%) con 11.2 mg/L, sin embargo no cumple con el límite máximo permisible de 1.5 mg/L según los CE-CCA-001/89. Kerur et al., (2021) reporta el cromo como un elemento tóxico que afecta negativamente el metabolismo de las plantas, dificulta el crecimiento y el rendimiento de los cultivos. Además la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) lo describe como el carcinógeno más potente. El Cobre en altas concentraciones puede causar intoxicación a organismos inferiores y cultivos, los iones se almacenan en las raíces de las plantas, lo que impide que los cultivos absorban nutrientes y afecta gravemente su crecimiento (Quispe, 2025). El HAFSS-SI es el tratamiento que cumple



satisfactoriamente con el valor óptimo de 5.0 mg/L establecido por la NOM-001-SEMARNAT- 2021 siendo el único con una eficiencia de remoción positiva del 47.2%.

En el caso del hierro, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) advierte que los sedimentos de este pueden contener trazas de impurezas o albergar bacterias que pueden ser perjudiciales. El tratamiento HAFL-SI es el que presenta la concentración más óptima con 0.24 mg/L, todos los tratamientos están muy por debajo de 10 mg/L, que es el valor de referencia de los CE-CCA-001/89. El níquel conlleva un impacto en la absorción de nutrientes, la fotosíntesis, el estrés oxidativo, la actividad de las enzimas antioxidantes y la producción de biomasa por lo que es esencial mantener valores óptimos (0.2 mg/L según la los CE-CCA-001/89) en los HA, en este caso los tratamientos HAFSS-SI y HAFL-SI cumplen, ambos con una concentración de 0.1 mg/L.

Los sistemas de tratamiento han puesto un especial interés en la remoción de nutrientes, principalmente el nitrógeno debido a que en exceso puede causar un aumento en la acidez, eutrofización y toxicidad en los cuerpos de agua. Según Lucia y Andrés (2023), el nitrato (NO_3^-) es el producto final de la nitrificación, muy nocivo en los humanos. La NOM-001-SEMARNAT- 2021 establece un LMP de 15 mg/L para descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación y los tratamientos con vegetación presentaron concentraciones en el efluente de 1.1 mg/L para flujo libre y 9.7 mg/L para flujo subsuperficial, cumpliendo con lo establecido. En cuanto al fósforo se ha demostrado que los procesos biológicos como los humedales artificiales dependen de la actividad microbiana para descomponer los compuestos orgánicos y facilitar su eliminación (Al-Sadoon et al., 2022), la NOM-001-SEMARNAT- 2021 establece para este un LMP de 15 mg/L, el tratamiento HAFSS-SI reportó la eficiencia de remoción más alta (47.0%) con una concentración de 28.6 mg/L, sin embargo, ninguno cumple con la normativa ambiental. Por último el Zinc, el cual provoca junto con efectos tóxicos directos, la capacidad de acumularse en organismos acuáticos, así como también efectos embriotóxicos, genotóxicos, citotóxicos y carcinogénicos a largo plazo en los organismos (Acosta, 2021). Las concentraciones en los tratamientos se encuentran por debajo de los valores máximos establecidos por la NOM-001-SEMARNAT- 2021 (10 mg/L) con la mejor eficiencia de remoción en el HAFSS-SI (82.5%) y una concentración de 0.2 mg/L.



Conclusión

El presente estudio concluye que la especie *Sagittaria latifolia* fue factible de implementar en la tecnología de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales de servicios cosméticos en su etapa de arranque y estabilización durante un periodo total de 1 año, sin embargo empezó a presentar mortandad a los 3 meses siguientes del monitoreo de evaluación. El uso de una especie nativa y de alta abundancia permite disminuir costos por su disponibilidad y fácil transportación. La comparación de las concentraciones del agua al final del tratamiento con el agua residual cruda evidencia disminuciones considerables de los tratamientos en los parámetros de calidad del agua. El HAFL-SI presentó las mejores remociones de turbiedad, color y DQO de 94, 92% y 88.8% respectivamente, mientras que el HAFSS-SI presenta los mejores resultados para metales pesados y nutrientes. *Sagittaria latifolia* favorece la oxigenación del medio en los HA, pues las concentraciones de OD fueron hasta de 4.0 mg/L en el agua después del tratamiento. Finalmente la especie presentó el mayor crecimiento en el largo de las plantas, tamaño de hojas y diámetro de los tallos en el tratamiento HAFL-SI.



3.7. Referencias

- Acosta-Humánez, M.; Montes-Vides, L.; Almanza-Montero, O. (2021). Síntesis sol-gel de nanopartículas de óxido de zinc a tres temperaturas diferentes y su caracterización mediante XRD, IR y EPR. *Dyna* 2016, 83, 224–228. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n195.50833>
- Al-Sadoon, A., Salman, E., & Mohammed, M. (2022). A critical review of organic pollutants in Refinery wastewater by advanced oxidation processes. *Journal Of University Of Anbar For Pure Science*, 16(2), 46-57. <https://doi.org/10.37652/juaps.2022.176467>
- Benny, C., & Chakraborty, S. (2020). Continuous removals of phenol, organics, thiocyanate and nitrogen in horizontal subsurface flow constructed wetland. *Journal of Water Process Engineering*, 33, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101099>
- De La Mora-Orozco, C., Saucedo-Terán, R. A., González-Acuña, I. J., Gómez-Rosales, S., & Flores-López, H. E. (2020). Efecto de la 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, 1–17. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11s2.4681>
- Derco, J., Gotvajn, A. Ž., Guľašová, P., Kassai, A., & Šoltýsová, N. (2024). Nutrient Removal and Recovery from Municipal Wastewater. *Processes*, 12(5), 894. <https://doi.org/10.3390/pr12050894>
- Donoso, L. J. G., León, C. E. D., Lazo, J. A. I., & Guamán, E. G. P. (2024). Depuración de aguas residuales de una industria láctea por medio de humedales artificiales de totora. *Polo del Conocimiento*, 9(5), 1005-1019. <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/7178>
- Gao, X., & Meng, X. (2021). Photocatalysis for Heavy metal Treatment: a review. *Processes*, 9(10), 1729. <https://doi.org/10.3390/pr9101729>
- Ituri, A., Zubillaga, M. S., Gutiérrez Boem, F. H., & Álvarez, C. R. (2022). ¿Qué medimos cuando analizamos la conductividad eléctrica de aguas y suelos? *Notas Agrícolas*



- Pampeanas, 6, 17–22.
https://www.agro.unlpam.edu.ar/images/NAP_6%20Septiembre%202022.pdf
- Kerur, S., Bandekar, S., Hanagadakar, M. S., Nandi, S. S., Ratnamala, G., & Hegde, P. G. (2021). Removal of hexavalent Chromium-Industry treated water and Wastewater: A review. *Materials Today Proceedings*, 42, 1112–1121.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.492>
- Lucia, C. C. G., & Andrés, S. o. I. (2023). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-71072013000100007
- Martínez, J. M. A., & Meraz, E. D. A. (2023). Estimación de gases de efecto invernadero generados por el tratamiento y descarga de aguas residuales domésticas: caso de estudio Tabasco.: Estimación de gases de efecto invernadero. *Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability*, 7(1), 19-28.
- Mulford, L. J. C. (2023) Revisión de métodos para el tratamiento de aguas residuales de la industria cosmética. [Trabajo de grado, Fundación Universidad de América] Repositorio Institucional Lumieres. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/9323>
- Muñante Carrillo, K. A., Perca Machaca, D. del R., Nina, R. J., Quispe Sucasaca, J. C., Alarcón Maquera, G. E., & Tirado Rebaza, L. U. M. (2022). Aprovechamiento de estiércol vacuno y pasto seco en la vermiestabilización de lodos residuales de la ptar (planta de tratamiento de aguas residuales) magollo. *Revista De Ciencia, Tecnología E Innovación*, 20(26), 163–178.
<https://doi.org/10.56469/rcti.v20i26.712>
- Najul, M. V., Blanco, H., Mata, A., Alberdi, R., Arcaya, J., Rivero, R., ... & Sucic, G. (2024) tratabilidad de efluentes líquidos de industrias de cosméticos. *Encuentro Académico Industrial Jornadas de Investigación*.
- Naz, M., Dai, Z., Hussain, S., Tariq, M., Danish, S., Khan, I. U., Qi, S., & Du, D. (2022). The soil pH and heavy metals revealed their impact on soil microbial community.



- Journal of Environmental Management, 321, 115770.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115770>
- Quispe Paye, J. R. (2025). Efecto del cobre en los parámetros microbiológicos en aguas residuales Puno 2025. <https://repositorio.uancv.edu.pe/items/9aa4406a-cd97-4405-9eb3-cae57a2fac66>
- Rincón, A. (2023). Diseño de humedales construidos para tratamiento de aguas residuales domésticas y aguas ricas en metales. Manizales, Caldas, Colombia: Universidad Católica de Manizales. <https://repositorio.ucm.edu.co/entities/publication/16e726c4-6a29-463b-803a-7ea4d076fa07>
- Rosas, J., Iannacone, J., Rosas, J., & Iannacone, J. (2020). Bioacumulación de elementos potencialmente tóxicos (ept) por sarcocornia neei en un humedal costero del Perú. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S185020672020000200343&script=sci_arttext&tlng=en
- Sánchez Esteban, S. (2023). Análisis de mercado del sector de cosméticos en México: detección de oportunidades en el subsector de productos dermocosméticos de la categoría cuidado personal para la hidratación de la piel. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/63809>
- Sánchez, V. G., Palomino Pastrana, P. A., y Malpartida Yapias, R. J. (2021). Eficiencia de humedales artificiales de totora y berros sobre efluentes de granja porcícola, Perú: Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria, 5(14), 192-203. Epub 31 de agosto de 2021. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i14.110>
- Valero, J. A. G., Martínez, S. M., Terrero, M. A., Cano, Á. F., Díaz, M. M., Garrido, M. G., & Avilés, J. A. A. (2020). Fitorremediación de aguas residuales industriales mediante humedales artificiales para uso agrícola. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8145329>



Velasco-Jiménez, A., Castellanos-Hernández, O., Acevedo-Hernández, G., Aarland, R. C., & Rodríguez-Sahagún, A. (2020). Bacterias rizosféricas con beneficios potenciales en la agricultura. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.470>

Witthayaphirom, C., Chiemchaisri, C., Chiemchaisri, W., Ogata, Y., Ebie, Y., & Ishigaki, T. (2020). Organic micro-pollutant removals from landfill leachate in horizontal subsurface flow constructed wetland operated in the tropical climate. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101581. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101581>



Capítulo 4. Tratamiento de aguas residuales de servicios cosméticos en humedales artificiales con *Pontederia sagittata*

Autores:

Ing. Monserrat Guadalupe Barco Méndez¹, Dr. Gaspar López Ocaña¹, Dr. David Guerrero Zarate², Dr. Humberto Hernández Trejo¹, Dra. Melina del Carmen Uribe¹, M.C. Carlos Alberto Torres Balcázar¹.

4.1 Resumen

Se evaluó la especie *Pontederia sagittata* (platanillo) en la remoción de contaminantes aguas residuales reconstituidas de servicios cosméticos por medio de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial con dimensiones de 2.5 m de largo x 1.2 m de ancho x 1 m de tirante. Se evaluaron 4 tratamientos: HAFL-PS-A (humedal artificial de flujo libre con *Pontederia sagittata* con agitador) HAFL-PS-S (humedal artificial de flujo libre con *Pontederia sagittata* sin agitador), HAFSS-PS-A (humedal artificial de flujo subsuperficial con *Pontederia sagittata* con agitación) y HAFSS-PS-S (humedal artificial de flujo subsuperficial con *Pontederia sagittata* sin agitación). Cada unidad experimental trató 200 L/día de aguas residuales cosméticas. Se realizó la caracterización de calidad del agua del efluente y afluente de cada unidad experimental. En el primer experimento se obtuvieron las mejores eficiencias en el tratamiento HAFSS-Ps-A, con remociones totales de turbiedad, color y DQO de 94.8%, 94.2% y 98.8% respectivamente. En el segundo experimento se obtuvieron las mejores eficiencias en el tratamiento HAFSS.Ps-S con remociones de turbiedad, color y DQO de 85%, 76% y 94% respectivamente. De manera general, el experimento con aireación y sedimentación presenta los mejores resultados en el tratamiento de los efluentes cosméticos en HA.

Palabras clave. Aguas residuales, contaminantes, humedales artificiales, servicios cosméticos, *Pontederia sagittata*.

Institución de adscripción de cada autor:

¹ División Académica de Ciencias Biológicas Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

² División Académica Multidisciplinaria de Jalpa de Méndez Universidad Juárez Autónoma de Tabasco



4.2. Introducción

Los cosméticos contienen diversos químicos dañinos que reaccionan de manera compleja, lo que resulta en efectos perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente (Mariela, 2026). Durante los últimos años la vanidad, la preocupación por verse bien y el cuidado personal se han vuelto temas con mayor relevancia en la sociedad, sin importar el género de las personas, la mayoría están preocupados por esto. Es por esta razón, que la industria cosmética ha tomado tanta fuerza en el mercado y esto ha generado un aumento de la producción, lo que desafortunadamente ha causado un gran impacto ambiental, ya que muchas empresas no cuentan con un plan de desarrollo sostenible y técnicas de producción más limpias, dicho esto, se tiene el reto de ser menos contaminante ya que los consumidores cada vez son más conscientes y si esto no cambia es una industria que está destinada a desaparecer con los años (Abad, 2021).

La contaminación por metales pesados en ambientes acuáticos proviene de diversas fuentes, siendo las aguas residuales industriales uno de los contribuyentes más importantes (Nguyen et al., 2026). Debido a su persistencia en el ambiente, estos metales generan alteraciones nocivas para la biota de los ecosistemas afectados. En consecuencia, surge la necesidad de implementar alternativas de depuración eficientes, económicas y de fácil operación que impulsen la gestión sostenible del recurso hídrico. Al respecto, los humedales artificiales (HA) integran sustrato, vegetación y microorganismos; mediante la interacción cooperativa de procesos físicos, químicos y biológicos, estos sistemas logran remover eficazmente una amplia variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en las aguas residuales (Yu et al., 2021).

Marchand et al., (2010) establece que la eliminación de metales pesados en humedales contruidos no depende de un solo proceso; sino que es una acción combinada que operan simultáneamente. Más específicamente se divide en tres categorías: los mecanismos físicos (filtración, sedimentación y la adhesión superficial), los mecanismos químicos (adsorción e intercambio iónico, precipitación, complejación y las reacciones de oxidación-reducción) y los mecanismos biológicos (absorción por parte de las plantas, la biosorción y la biotransformación).

Entre las principales ventajas de la biorremediación para el tratamiento de aguas residuales tóxicas se encuentra su rentabilidad económica, debido a que evita el uso de



reactivos químicos costosos que demandan estrictos protocolos de seguridad. Además, destaca por ser una alternativa accesible y de operación sencilla, prescindiendo de personal altamente especializado para su supervisión (Martínez, 2022). Específicamente en el sureste de México, y de manera notable en Tabasco, la alta diversidad de flora típica de ecosistemas pantanosos representa un potencial importante para su evaluación en sistemas de tratamiento de aguas (Martínez & Meraz, 2023). Entre estas especies destaca *Pontederia sagittata*, una planta nativa de humedales tropicales que presenta características morfológicas y fisiológicas favorables para su implementación en humedales artificiales, tales como su capacidad de adaptación a ambientes inundados, su rápido crecimiento y el desarrollo de sistemas radiculares que favorecen la retención de sólidos y la actividad microbiana. En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo evaluar la adaptación de *Pontederia sagittata* en humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales provenientes de servicios cosméticos. Esta es una especie que ha sido evaluada por Olguín EJ et al., (2014) para el tratamiento de lagos urbanos contaminados en Veracruz, México mediante el uso de humedales flotantes de tratamiento, en donde después de tres meses de estabilización se obtuvieron remociones de 71.72% en DQO y 27.27% en nitrógeno, se reporta que la especie se adaptó de manera favorable a las condiciones del efluente y se observó un alto crecimiento después de 60 días.

A diferencia del capítulo anterior, en esta nueva etapa del estudio se incorpora un tanque de aireación por agitación mecánica y un proceso de sedimentación para el pretratamiento de las aguas residuales provenientes de servicios cosméticos. Esto con el propósito principal mitigar la alta carga orgánica y la presencia de sólidos suspendidos, una característica típica de este tipo de efluentes derivados de emulsiones y aceites, lo cual optimizará la eficiencia operativa de los humedales y prevendrá la colmatación prematura del medio soporte.

4.3. Materiales y métodos

Colecta y siembra de la especie. La colecta de *Pontederia sagittata* se llevó a cabo en el Fraccionamiento Los Naranjos en Nacajuca, Tabasco (506387.99 m E,



1995661.60 m N). Se procedió a transportarla a la División de Ciencias Biológicas, y fueron sembrados 12 individuos a una profundidad de 20 centímetros por debajo de la superficie del medio de soporte (grava de río) en cada HA.

Creación del agua reconstituida cosmética. Como continuación al primer tratamiento, se redujo la concentración de los ingredientes en la preparación del agua reconstituida, por lo que se utilizó el 50% de cada producto para este tratamiento (Tabla 23).

Tabla 23. Productos del agua residual sintética de servicios cosméticos.

Insumos	Cantidad
Tratamiento revitalizante de residuos y pH marca NEFERTITI	60.00 ml
Mascarilla de sistema capilar marca KUUL	45.00 ml
Removedor de cutícula marca Loquay	40.00 ml
Crema Alaciante con Keratina marca LISE	60.00 ml
Revelador en crema (peróxido) marca KUUL	25.00 ml
Loción neutralizante marca NEFERTITI	40.00 ml
Loción Ondulante marca NEFERTITI	40.00 ml
Shampoo matizador marca NEFERTITI	50.00 ml
Decolorante en polvo para mechas marca ANVE	25.00 ml
Tinte marca KUUL	25.00 ml
Ampolleta Intensiva marca N	15.00 ml
Total	425.00 ml

Diseño experimental. Se realizaron dos experimentos. Cada uno con un diseño completamente aleatorizado de un factor (tipo de flujo) con 2 niveles para dos tratamientos. El primer experimento con: HAFL-Ps-A (humedal artificial de flujo libre con *Pontederia sagittata* con aireación y sedimentación) y HAFSS-Ps-A (humedal artificial de flujo subsuperficial con *Pontederia sagittata* con aireación y sedimentación).

El segundo experimento con: HAFSS-Ps-S (humedal artificial de flujo subsuperficial con *Pontederia sagittata* con sedimentación) y HAFL-Ps-S (humedal artificial de flujo libre con *Pontederia sagittata* con sedimentación) En la figura 24 se muestran los factores del diseño experimental.

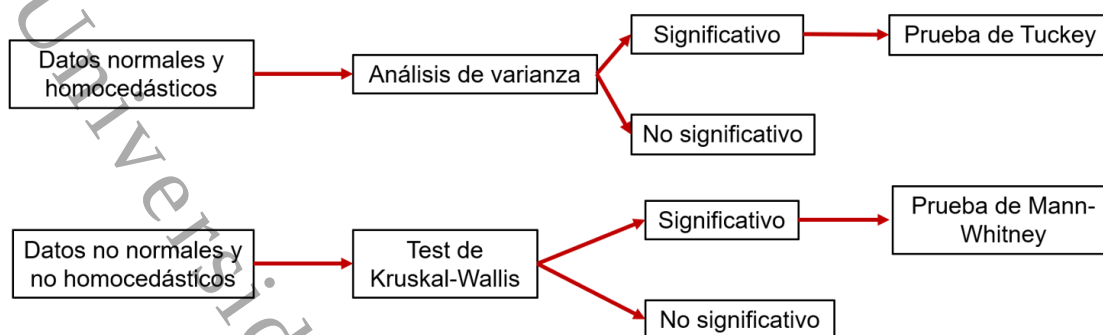


Figura 22. Factores del diseño experimental. Fuente: Elaboración propia.

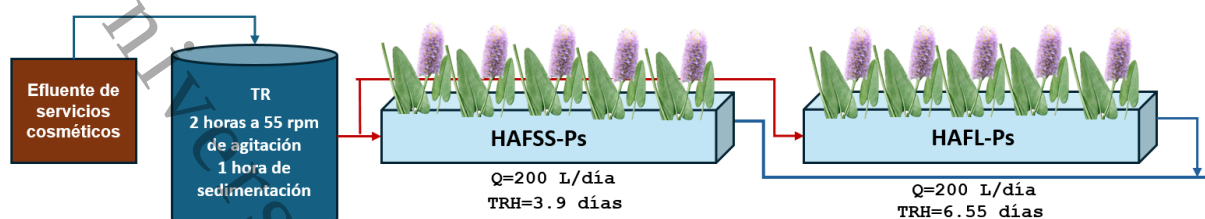
Analizando como variables dependientes: pH, la temperatura, conductividad eléctrica, sólidos suspendidos totales, color aparente, turbiedad, DQO, metales pesados y nutrientes. Todos los tratamientos fueron alimentados de un mismo afluente de agua residual y mismas condiciones de operación. Se verificó la independencia, normalidad y homocedasticidad de los datos. Se empleó un análisis de varianza de Kruskal – Wallis para los datos no paramétricos y un contraste de medianas de Mann – Withney para determinar diferencias estadísticamente significativas, todos los análisis estadísticos se realizaron empleando el software STAGRAPHS CENTURION™ v 19.0 con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$.

Unidades experimentales: Cada unidad experimental consistió en humedales artificiales con dimensiones de 2.5 m de largo x 1.2 m de ancho y 1 m de tirante, con un tiempo de retención de 6.55 días para flujo libre y 3.9 días para flujo subsuperficial (Figura 26 y 27) un medio de soporte (grava de río) con 52% de porosidad y un caudal de operación de 0.2 m³/d en cada humedal.

Experimentos

Primer experimento: Aireación y sedimentación. El primer experimento constó de aireación y sedimentación del agua residual reconstituida de servicios cosméticos (tanque de reacción) como pretratamiento antes de llegar a los humedales artificiales. Esta se llevó a cabo mediante un agitador mecánico operado por un motor de 1 caballo de fuerza conectado a un variador de velocidad para crear una agitación de 155 revoluciones por minuto durante 2 horas. Seguido a esto la agitación se detuvo y se dejó sedimentar por 1

hora (Figura 25).



TR: Tanque de reacción con agua residual reconstituida de Agitación+Sedimentación

→ Línea de alimentación de agua residual reconstituida

→ Línea de alimentación de agua residual tratada

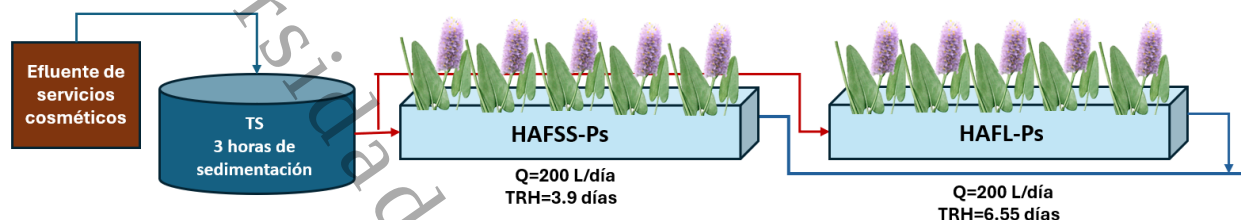
HAFSS-Ps = Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial *Pontederia Sagittata*

HAFL-Ps= Humedal Artificial de Flujo Libre *Pontederia Sagittata*

Figura 23. Esquema del primer experimento en el tratamiento de agua residual reconstituida de servicios cosméticos en humedales de flujo libre (HAFL) y subsuperficial (HAFSS) con *Pontederia Sagittata*.

Fuente: Elaboración propia.

Segundo experimento: Sedimentación. El segundo experimento consistió de un periodo de 3 horas de sedimentación del agua residual reconstituida de servicios cosméticos (tanque de sedimentación) como pretratamiento antes de llegar a los humedales artificiales (Figura 26).



TS: Tanque de sedimentación con agua residual reconstituida

→ Línea de alimentación de agua residual reconstituida

→ Línea de alimentación de agua residual tratada

HAFSS-Ps = Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial *Pontederia Sagittata*

HAFL-Ps= Humedal Artificial de Flujo Libre *Pontederia Sagittata*

Figura 24. Esquema del segundo experimento en el tratamiento de agua residual reconstituida de servicios cosméticos en humedales de flujo libre (HAFL) y subsuperficial (HAFSS) con *Pontederia Sagittata*. Fuente: Elaboración propia.

Monitoreo de 24 horas. Durante un periodo de tres semanas se realizaron campañas de monitoreo los martes y jueves de cada semana, los cuales consistieron en recolectar 1 muestra simple (166.6 ml) de cada una de las unidades experimentales cada 4 horas (7:00 am, 11:00 am, 3 pm, 7 pm, 11 pm y 3 am) teniendo al final del monitoreo (3 am) un total de 6 muestras simples que crearon una muestra compuesta en un recipiente de 1 L almacenado a 4°C para analizar los parámetros de calidad del agua, determinando los parámetros de temperatura y oxígeno disuelto in situ. En la tabla 24 se presentan los horarios y el volumen recolectado en las tomas de muestra durante las campañas de monitoreo.

Tabla 24. Horarios y Volumen de las muestras durante el monitoreo de 24 horas.

Horario de toma de muestra	Cantidad de agua recolectada en el frasco
07:00 a. m.	166.6 ml
11:00 a. m.	333.3 ml
03:00 p. m.	500 ml
07:00 p. m.	666.6 ml
11:00 p. m.	833.3 ml
03:00 a. m.	1000 ml



Caracterización fisicoquímica del agua. La muestra compuesta se recolectó en un recipiente de 1L en el Laboratorio de Tecnología del Agua para su correspondiente caracterización resguardándose a una temperatura de 4°C para su conservación.

Se determinó la turbidez y color mediante un turbidímetro marca LaMotte modelo TC-3000we Trimeters. Para el pH, temperatura, conductividad (CE) y sólidos disueltos totales (SDT) se utilizó el equipo HI98130 HANNA. Para el oxígeno disuelto (OD) se utilizó el equipo RCYAGO y para el cálculo de DQO se utilizó el equipo HI839150 HANNA.

Se determinaron los siguientes métodos para medir los parámetros: Temperatura (SM 2550), Turbiedad (SM 2130 B), Color (APHA 2120), Potencial de hidrógeno (SM 9040 B), Conductividad Eléctrica (SM 2510 B), Sólidos disueltos totales (SM 2540), OD (SM 4500-OG), DQO, nutrientes y metales pesados (USEPA 410.4).

Eficiencia de remoción. La eficiencia de remoción del color aparente y la turbiedad de cada tratamiento se calculó con base a la siguiente ecuación (Ec. 8).

$$ER(\%) = \frac{C_e - C_s}{C_e} \times 100 \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

ER=Eficiencia de remoción

C_e=Concentración del contaminante "x" a la entrada (afluente)

C_s=Concentración del contaminante "x" a la salida (efluente)

4.4. Resultados

Primer experimento: Aireación + Sedimentación + HA

Evaluación del crecimiento y comportamiento de la vegetación. Las variables de crecimiento de la especie *Pontederia sagittata* fueron evaluadas al inicio y al final del periodo de operación en los HA de flujo libre y subsuperficial se muestran en las tablas 25 y 26.

Tabla 25. Valores promedios (±DE) de las características de *Pontederia sagittata* en la etapa inicial y final



del experimento con aireación con HA de flujo subsuperficial (N=12).

Variable de planta medida	HAFSS-Ps-A	
	Etapla inicial	Etapla final
Peso total de la planta (kg)	0.22±0.16	2.73±0.44
Largo de la planta (m)	0.54±0.11	2.65±0.45
Número de tallos por planta	6.70±1.20	10.4±2.1
Número de hojas por planta	1.22±1.7	7.3±3.5
Diámetro de tallo (cm)	1±0.5	7.9±2.3
Largo del tallo (m)	0.51±0.19	2.35±.65
Largo de la hoja (cm)	15.3±2.4	36.9±6.6
Ancho de la hoja (cm)	11.7±1.9	34.44±5.0

Tabla 26. Valores promedios (±DE) de las características de *Pontederia sagittata* en la etapa inicial y final del experimento con aireación en HA de flujo libre (N=12).

Variable de planta medida	HAFL-Ps-A	
	Etapla inicial	Etapla final
Peso total de la planta (kg)	0.26±0.12	3.08±0.39
Largo de la planta (m)	0.56±0.14	3.22±0.21
Número de tallos por planta	4.22±1.24	12.5±3.7
Número de hojas por planta	3.21±1.4	7.9±2.7
Diámetro de tallo (cm)	2.1±0.3	8.3±.98
Largo del tallo (m)	0.47±0.7	2.90±0.12
Largo de la hoja (cm)	17.5±1.1	41.6±2.1
Ancho de la hoja (cm)	12.3±0.8	36.7±4.9

Caracterización del agua residual reconstituida en el tratamiento. En la tabla 27 se presentan los parámetros evaluados de aguas residuales de servicios cosméticos en el tren de tratamiento del primer experimento.

Tabla 27. Valores promedios (±DE) de los parámetros básicos de la calidad del agua del primer experimento *Pontederia sagittata*.

Experimento 1: Ortopoda sagittata.												
Parámetros	TR										LMP	Ref
	Tanque séptico		ARR		Aireación + Sed		HAFL-Ps-A		HAFSS-Ps-A			
	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE		
pH (UpH)	8.4	0.1	9.2	0.5	8.2	0.06	7.83	0.15	7.92	0.12	6 - 9	A
T(°C)	21.2	0.5	22.9	1.6	20.7	0.24	20.57	0.37	20.67	0.21	35	A
CE (µS/cm)	1421.3	75.8	1490.8	124.1	1602.0	57.22	1118.33	81.86	775.67	54.80	1000	B
SDT (mg/L)	733.7	3.6	754.7	42.0	797.3	27.49	574.67	16.55	385.67	27.63	500.0	B
Color (UC)	1273.3	271.6	3366.8	76.6	1903.3	71.50	196.67	11.18	245.50	6.38	75.0	B
Turb (UNT)	27.2	6.5	77.8	36.0	53.0	5.80	1.30	0.32	4.37	1.35	15.0	B
OD (mg/L)	0.9	0.4	0.5	0.3	0.3	0.00	3.07	0.10	3.20	0.00	5 o mas	B
ORP (mV)	-251.3	12.6	-165.7	78.3	-119.3	97.06	-79.67	18.42	-54.67	47.35	NA	NA
DQO (mg/L)	534.7	175.9	1615.3	263.8	966.00	35.41	23.33	10.48	45.67	6.28	60	A
Aluminio	0.46	0.01	1.42	0.22	1.17	0.15	0.055	0.04	0.04	0.02	0.2	B
Bromo	1.145	0.04	2.09	0.03	1.67	0.09	0.065	0.09	0.12	0.08	0.0	B



Parámetros	Tanque séptico		ARR		TR		Aireación + Sed		HAFL-Ps-A		HAFSS-Ps-A		LMP	Ref
	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE		
Cromo VI	218.5	1.64	415.33	53.71	358.5	8.7	139	1.41	48.50	13.44	1.0		A	
Cobre	0.77	0.01	2.55	0.26	0.205	0.11	0.09	0.03	0.08	0.04	4.0		A	
Hierro	0.62	0.03	7.00	1.29	6.45	0.22	1.645	0.04	0.33	0.13	1.0		B	
Manganeso	9.5	0.55	150.50	6.44	24	1.9	1.41	0.27	3.75	1.06	20.0			
Níquel	0.59	0.03	0.86	0.26	2.3	0.35	0.685	0.76	0.43	0.30	2.0		A	
Nitrato	25.67	0.52	33.33	7.23	19.85	3.21	2.6	1.13	0.27	0.37	5.0		B	
Fósforo	8.1	0.93	54.50	2.32	30	3.33	21.3	3.25	17.90	6.79	15.0		A	
Zinc	0	0.00	15.77	0.31	1.165	0.12	0.1	0.14	0.15	0.21	10.0		A	
Cianuro	0	0.00	1.00	0.00	1	0	1	0.00	1.50	0.71	1.0		A	
Amonio	0	0.00	56.67	2.58	52.2	2.01	29.26	0.48	24.84	5.60	2.0		B	

A=NOM-001-SEMARNAT - 2021, B=CRITERIOS-ECOLOGICOS DEL AGUA 1989

En la tabla 28 se muestran las eficiencias totales de los parámetros evaluados en los tratamientos evaluados durante el primer experimento con *Pontederia Sagittata* (con aireación y sedimentación).

Tabla 28. Eficiencias totales (%) de los tratamientos evaluados del agua reconstituida cosmética con *Pontederia Sagittata* utilizando aireación y sedimentación.

Parámetro	HAFSS-Ps-A	HAFL-Ps-A
	(%)	(%)
pH (UpH)	15.0	14.0
Temperatura(°C)	10.1	9.7
Conductividad Eléctrica (µS/cm)	25.0	48.0
Solidos Disueltos Totales (mg/L)	23.9	48.9
Color (UC)	94.2	88.2
Turbiedad (UNT)	94.1	91.0
OD (mg/L)	-557.1	-585.7
ORP (mV)	51.9	67.0
DQO (mg/L)	98.5	95.8
Aluminio (mg/L)	96.1	97.5
Bromo (mg/L)	96.9	94.5
Cromo VI (µg/L)	66.5	88.3
Cobre (mg/L)	96.5	96.9
Hierro (mg/L)	76.5	95.3
Manganeso (ppm)	99.1	97.5
Níquel (mg/L)	20.0	50.4



Parámetro	HAFSS-Ps-A	HAFL-Ps-A
	(%)	(%)
Nitrato (mg/L)	92.2	99.2
Fosforo (mg/L)	60.9	67.2
Zinc (mg/L)	99.4	99.0
Cianuro (mg/L)	0.0	-50.0
Amonio (mg/L)	48.4	56.2

Segundo experimento: Sedimentación + HA

Evaluación del crecimiento y comportamiento de la vegetación. En las tablas 29 y 30 se resumen las variables de crecimiento de la especie *Pontederia sagittata* al inicio y al final del periodo de operación en los HA de flujo libre y subsuperficial del segundo experimento.

Tabla 29. Valores promedios ($\pm$ DE) de las características de *Pontederia Sagittata* en la etapa inicial y final del experimento con sedimentación en un HA de flujo subsuperficial ($N=12$).

Variable de planta medida	HAFSS-Ps-S	
	Etapla inicial	Etapla final
Peso total de la planta (kg)	0.22 $\pm$ 0.16	2.50 $\pm$ 0.28
Largo de la planta (m)	0.54 $\pm$ 0.11	2.35 $\pm$ 0.22
Número de tallos por planta	6.70 $\pm$ 1.20	8.3 $\pm$ 2.1
Número de hojas por planta	1.22 $\pm$ 1.7	5.1 $\pm$ 1.1
Diámetro de tallo (cm)	1 $\pm$ 0.5	5.8 $\pm$ 1.5
Largo del tallo (m)	0.51 $\pm$ 0.19	1.88 $\pm$ 0.24
Largo de la hoja (cm)	15.3 $\pm$ 2.4	29.5 $\pm$ 2.9
Ancho de la hoja (cm)	11.7 $\pm$ 1.9	27.3 $\pm$ 3.3

Tabla 30. Valores promedios ($\pm$ DE) de las características de *Pontederia Sagittata* en la etapa inicial y final del experimento con sedimentación en un HA de flujo libre ($N=12$).

Variable de planta medida	HAFSL-Ps-S	
	Etapla inicial	Etapla final
Peso total de la planta (kg)	0.26 $\pm$ 0.12	2.69 $\pm$ 0.33
Largo de la planta (m)	0.56 $\pm$ 0.14	2.57 $\pm$ 0.19
Número de tallos por planta	4.22 $\pm$ 1.24	9.4 $\pm$ 2.9
Número de hojas por planta	3.21 $\pm$ 1.4	7.2 $\pm$ 1.9
Diámetro de tallo (cm)	2.1 $\pm$ 0.3	6.3 $\pm$ 0.45
Largo del tallo (m)	0.47 $\pm$ 0.7	1.98 $\pm$ 0.11
Largo de la hoja (cm)	17.5 $\pm$ 1.1	33.6 $\pm$ 2.4
Ancho de la hoja (cm)	12.3 $\pm$ 0.8	31.7 $\pm$ 2.6

Caracterización del agua residual reconstituida en el tratamiento. En la tabla 31 se presentan los parámetros evaluados de aguas residuales de servicios cosméticos en el tren de tratamiento del segundo experimento.



Tabla 31. Valores promedios ($\pm$ DE) de la calidad del agua en el segundo experimento (sedimentación) con *Pontederia sagittata* (N=12).

Parámetros	TS										LPM	Ref
	Tanque séptico		ARR		Sedimentación		HAFL-Ps-S		HAFSS-Ps-S			
	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE	X	±DE		
pH (UpH)	8.4	0.08	9.2	0.50	7.38	0.23	7.54	0.05	7.60	0.06	6 - 9	A
T(°C)	21.2	0.54	22.9	1.61	22.47	0.49	20.20	2.65	19.65	1.73	35	A
CE (µS/cm)	1421.3	75.82	1490.8	124.13	1754.67	47.12	848.50	77.99	1112.67	28.01	1000	B
SDT (mg/L)	733.7	3.61	754.7	41.97	869.33	35.54	422.33	39.01	561.50	19.24	500.0	B
Color (UC)	1273.3	271.60	3366.8	76.62	2803.33	171.67	506.67	31.92	277.67	65.20	75.0	B
Turb (UNT)	27.2	6.49	91.0	40.39	76.30	1.16	20.38	0.61	23.50	1.34	15.0	B
OD (mg/L)	-251.3	12.56	0.5	0.27	0.28	0.04	3.23	0.62	2.83	0.41	5 o mas	B
ORP (mV)	-251.3	12.56	-165.7	78.27	-182.00	51.06	-33.33	43.39	-25.33	54.74	NA	NA
DQO (mg/L)	534.7	175.90	1615.3	263.76	858.83	38.85	47.83	12.19	49.17	7.55	60	A
Aluminio	0.46	0.01	1.42	0.22	1.16	0.01	0.01	0.01	0.46	0.63	0.2	B
Bromo	1.15	0.04	2.09	0.03	1.67	0.03	0.24	0.21	0.33	0.15	0.0	B
Cromo VI	218.50	1.64	415.33	53.71	358.50	7.12	95.00	22.63	98.00	53.74	1.0	A
Cobre	0.77	0.01	2.55	0.26	1.21	0.02	0.08	0.11	0.16	0.17	4.0	A
Hierro	0.62	0.03	7.00	1.29	6.45	0.60	0.10	0.01	0.27	0.20	1.0	B
Manganeso	9.50	0.55	150.50	6.44	124.00	2.19	21.60	3.25	12.00	0.00	20.0	
Níquel	0.59	0.03	0.86	0.26	2.30	0.22	0.40	0.17	0.47	0.47	2.0	A
Nitrato	25.67	0.52	33.33	7.23	19.85	3.34	0.60	0.71	0.10	0.00	5.0	B
Fósforo	8.10	0.93	54.50	2.32	43.50	0.55	16.75	4.17	17.10	0.14	15.0	A
Zinc	0.00	0.00	15.77	0.31	1.17	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	10.0	A
Cianuro	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.50	0.71	1.00	0.00	1.0	A
Amonio	0.00	0.00	56.67	2.58	52.20	3.07	35.50	1.27	36.58	4.21	2.0	B
A=NOM-001-SEMARNAT - 2021, B=CRITERIOS-ECOLOGICOS DEL AGUA 1989												

En la tabla 32 se muestran las eficiencias totales de los parámetros evaluados en los tratamientos evaluados durante el segundo experimento con *Pontederia sagittata* (solo con sedimentación).

Tabla 32. Eficiencias (%) totales de los tratamientos evaluados del agua reconstituida cosmética con *Pontederia sagittata* con la sedimentación.

Parámetro	HAFL-Ps-S	HAFSS-Ps-S
	(%)	(%)
pH (UpH)	18.2	17.5
Temperatura(°C)	11.7	14.1
Conductividad Eléctrica (μ S/cm)	43.1	25.4



Parámetro	HAFL-Ps-S	HAFSS-Ps-S
	(%)	(%)
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	44.0	25.6
Color (UC)	85.0	88.5
Turbiedad (UNT)	76.2	84.4
OD (mg/L)	-592.9	-507.1
ORP (mV)	79.9	84.7
DQO (mg/L)	94.9	96.5
Aluminio (mg/L)	99.3	67.9
Bromo (mg/L)	88.5	84.4
Cromo VI (µg/L)	77.1	76.4
Cobre (mg/L)	96.9	93.7
Hierro (mg/L)	98.6	96.1
Manganeso (ppm)	85.6	92.0
Níquel (mg/L)	53.3	45.1
Nitrato (mg/L)	98.2	99.7
Fosforo (mg/L)	69.3	68.6
Zinc (mg/L)	100.0	100.0
Cianuro (mg/L)	0.0	0.0
Amonio (mg/L)	37.4	35.4

4.5 Resultados

Potencial de hidrógeno (pH)

Primer experimento. En el análisis de pH la prueba de Kruskal-Wallis reportó que el valor mediano más bajo corresponde al tratamiento TC 1 con $8.2 \pm (Q_1=8.14, Q_3=8.28)$ UpH, seguido del HAFSS-Ps-A con $7.8 \pm (Q_1=7.68, Q_3=8.01)$ UpH y el valor mediano más alto se presenta en el tratamiento ARR con $9.37 \pm (Q_1=9.28, Q_3=9.5)$ UpH.

Segundo experimento. En el análisis de pH la prueba de Kruskal-Wallis reportó que el valor mediano más bajo corresponde al tratamiento TC 2 con $7.53 \pm (Q_1=7.09, Q_3=87.53)$ UpH, seguido del HAFL-Ps-S con $7.52 \pm (Q_1=7.52, Q_3=7.53)$ UpH y el valor mediano más alto se presenta en el tratamiento ARR con $9.37 \pm (Q_1=9.28, Q_3=9.5)$ UpH.

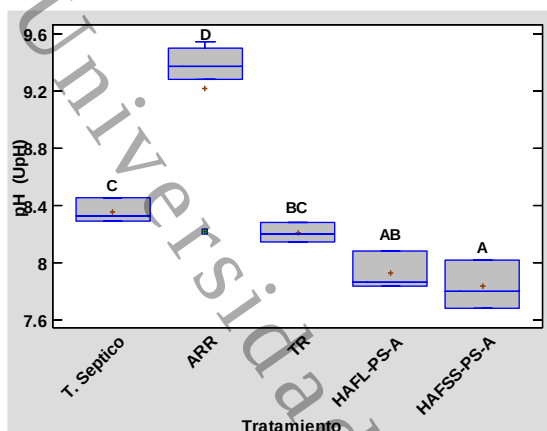


Figura 25. Valores medianos ($\pm R/I$) para pH (UpH) con aireación.

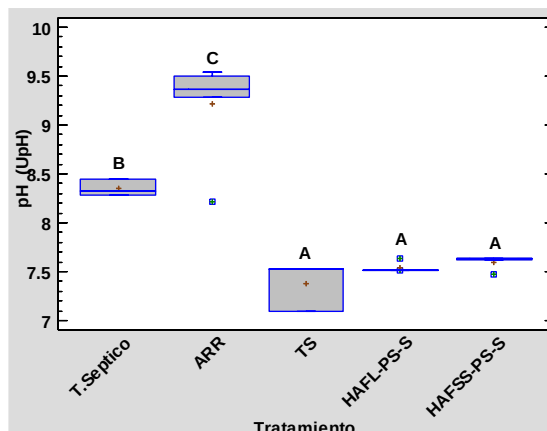


Figura 26. Valores medianos ($\pm R/I$) para pH (UpH) con sedimentación.

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

Temperatura (°C)

Primer experimento. En el análisis de temperatura la prueba de Kruskal-Wallis reportó que el valor mediano más bajo corresponde al tratamiento Tanque séptico con $20.9 \pm$ ($Q_1=20.8$, $Q_3=21.9$) °C seguido del HAFSS-Ps-A con $20.7 \pm$ ($Q_1=20.1$, $Q_3=20.9$) °C y el valor mediano más alto se presenta en el tratamiento ARR con $23.05 \pm$ ($Q_1=22.0$, $Q_3=24.3$) °C.

Segundo experimento. En el análisis de temperatura la prueba de Kruskal-Wallis reportó que el valor mediano más bajo corresponde al tratamiento HAFLS-Ps-S con $18.5 \pm$ ($Q_1=18.5$, $Q_3=23.2$) °C seguido del HAFSS-Ps-S con $18.7 \pm$ ($Q_1=18.7$, $Q_3=20.1$) °C y el valor mediano más alto se presenta en el tratamiento ARR con $23.05 \pm$ ($Q_1=22.0$, $Q_3=24.3$) °C.

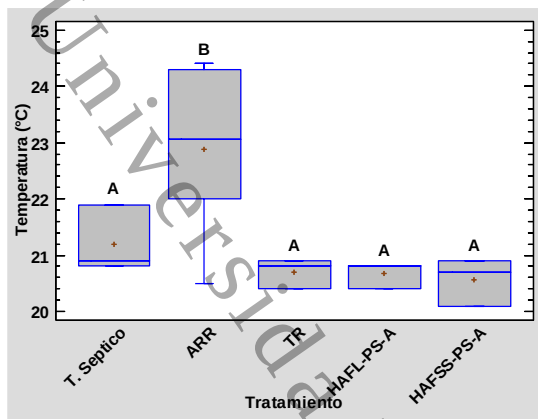


Figura 27. Valores medianos ($\pm I$) para Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) con aireación.

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

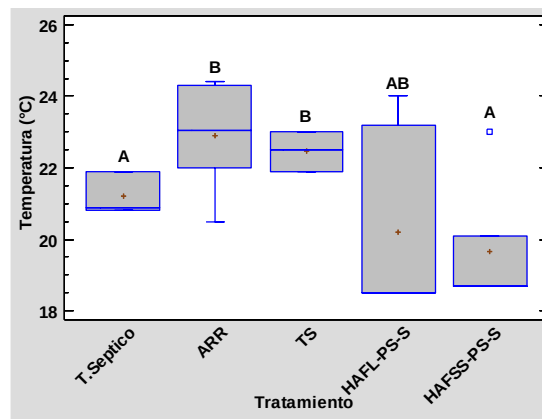


Figura 28. Valores medianos ($\pm I$) para Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) con sedimentación.

Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

Primer experimento. En el análisis de Conductividad Eléctrica la prueba de Kruskal-Wallis reportó que el valor más bajo se encontró en el tratamiento HAFL-PS-A con $808.0 \pm (Q_1=705.0, Q_3=814.0)$ $\mu\text{S}/\text{cm}$, seguido del HAFSS-PS-S con $1143.0 \pm (Q_1=1099, Q_3=1129.0)$ $\mu\text{S}/\text{cm}$ y finalmente el valor más alto es el TC 1 con $1593.0 \pm (Q_1=1543.0, Q_3=1670.0)$ $\mu\text{S}/\text{cm}$, solo el tratamiento HAFL-PS-A se encuentra en una concentración optima (>800 $\mu\text{S}/\text{cm}$) que indica que no hay un efecto fitotóxico para las especies (Muñante Carrillo, et al., 2022).

Segundo tratamiento. En el análisis de Conductividad Eléctrica la prueba de Kruskal-Wallis reportó que el valor más bajo se encontró en el tratamiento HAFL-PS-S con $832.0 \pm (Q_1=832.0, Q_3=814.0)$ $\mu\text{S}/\text{cm}$, seguido del HAFSS-PS-S con $1143.0 \pm (Q_1=1099, Q_3=1129.0)$ $\mu\text{S}/\text{cm}$ y finalmente el valor más alto es el TC 1 con $1593.0 \pm (Q_1=1543.0, Q_3=1670.0)$ $\mu\text{S}/\text{cm}$, solo el tratamiento HAFL-PS-S se encuentra en una concentración optima (>800 $\mu\text{S}/\text{cm}$) que indica que no hay un efecto fitotóxico para las especies (Muñante Carrillo, et al., 2022).

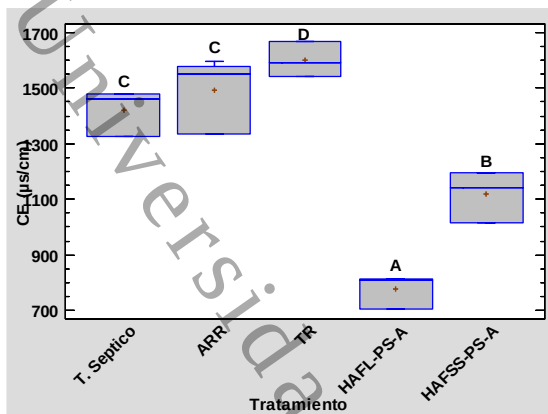


Figura 29. Valores medianos ($\pm R$) para CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) con aireación.

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

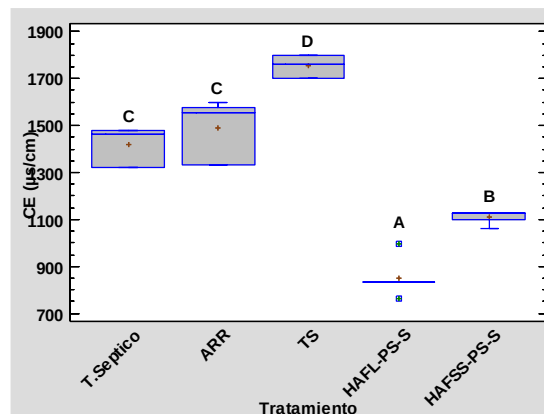


Figura 30. Valores medianos ($\pm R$) para CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) con sedimentación.

Sólidos Disueltos Totales (mg/L)

Primer experimento. La prueba de Kruskal-Wallis para SDT indica que el valor más bajo se encontró en el tratamiento HAFL-PS-A con $403.0 \pm (Q_1=350.0, Q_3=404.0)$ mg/L seguido del HAFSS-PS-A con $575.0 \pm (Q_1=556.0, Q_3=593.0)$ mg/L y finalmente el valor más alto es el T2 con $869.0 \pm (Q_1=848.0, Q_3=905.0)$ mg/L. El tratamiento HAFL-PS-A es óptimo en comparación con el rango de referencia (500 mg/L) establecido por los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua 1989 para cuerpos receptores.

Segundo experimento. La prueba de Kruskal-Wallis para SDT indica que el valor más bajo se encontró en el tratamiento HAFL-PS-S con $415.0 \pm (Q_1=415.0, Q_3=415.0)$ mg/L seguido del HAFSS-PS-S con $573.0 \pm (Q_1=550.0, Q_3=573.0)$ mg/L y finalmente el valor más alto es el T2 con $869.0 \pm (Q_1=848.0, Q_3=905.0)$ mg/L. El tratamiento HAFL-PS-S es óptimo en comparación con el rango de referencia (500 mg/L) establecido por los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua 1989 para cuerpos receptores.

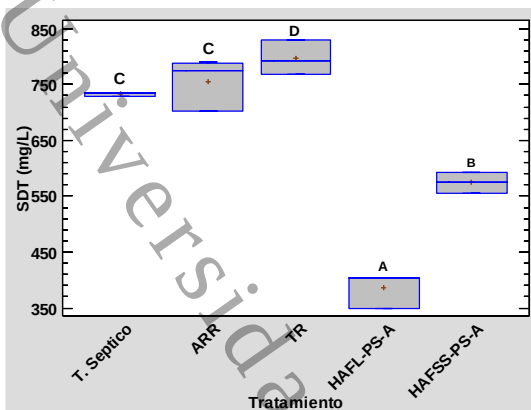


Figura 31. Valores medianos ($\pm R/I$) para SDT (mg/L) con aireación.

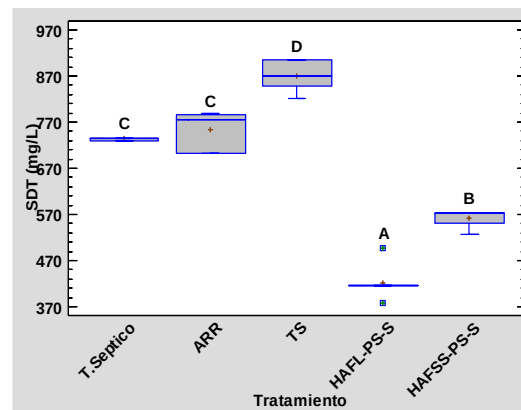


Figura 32. Valores medianos ($\pm R/I$) para SDT (mg/L) con sedimentación.

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

Turbiedad (UNT)

Primer experimento. Para la turbiedad la prueba de Kruskal-Wallis reportó que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95% de confianza. El valor mediano más bajo se encontró en el tratamiento HAFL-PS-A con $1.2 \pm (Q_1=1.0, Q_3=1.7)$ UNT, seguido del HAFSS-PS-A con $4.5 \pm (Q_1=2.8, Q_3=5.8)$ UNT. En contraste, el valor mediano más alto se obtuvo en el ARR con $93.5 \pm (Q_1=61.5, Q_3=97.8)$ UNT.

Segundo experimento. Para la turbiedad la prueba de Kruskal-Wallis reportó que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95% de confianza. El valor mediano más bajo se encontró en el tratamiento HAFL-PS-S con $1.6 \pm (Q_1=1.3, Q_3=1.8)$ UNT, seguido del HAFSS-PS-S con $3.2 \pm (Q_1=1.7, Q_3=3.4)$ UNT. En contraste, el valor mediano más alto se obtuvo en el ARR con $93.5 \pm (Q_1=61.5, Q_3=97.8)$ UNT.

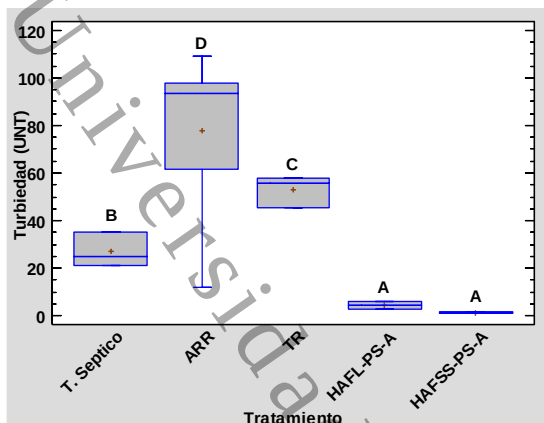


Figura 33. Valores medianos ($\pm R/I$) para Turbiedad (UNT) con aireación.

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

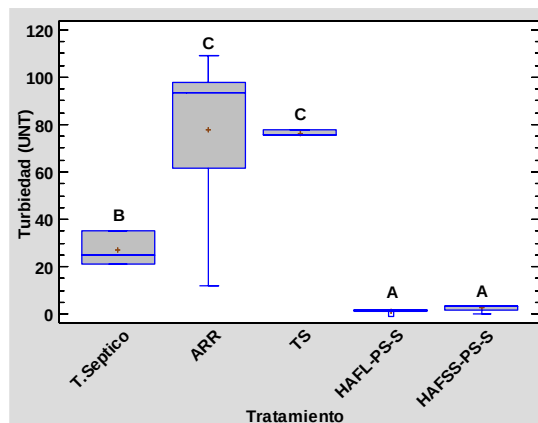


Figura 34. Valores medianos ($\pm R/I$) para Turbiedad (UNT) con sedimentación.

Color (UC)

Primer experimento. La prueba de Kruskal-Wallis para Color indica que el valor más bajo se encuentra en el tratamiento HAFSS-PS-A con $191.0 \pm (Q_1=188.0, Q_3=211.0)$ UC seguido del HAFL-PS-A con $244.0 \pm (Q_1=242.0, Q_3=249.0)$ UC y finalmente el valor mediano más alto está en el tratamiento ARR $3367.0 \pm (Q_1=349.0, Q_3=390.0)$ UC con eficiencias del 90% con respecto al agua inicial.

Segundo experimento. La prueba de Kruskal-Wallis para Color indica que el valor más bajo se encuentra en el tratamiento HAFSS-PS-S con $369.5 \pm (Q_1=349.0, Q_3=390.0)$ UC con eficiencias del 90% con respecto al agua inicial, seguido del HAFL-PS-S con $505.0 \pm (Q_1=479.0, Q_3=526.0)$ UC y valor mediano más alto está en el tratamiento ARR $3367.0 \pm (Q_1=349.0, Q_3=390.0)$ UC.

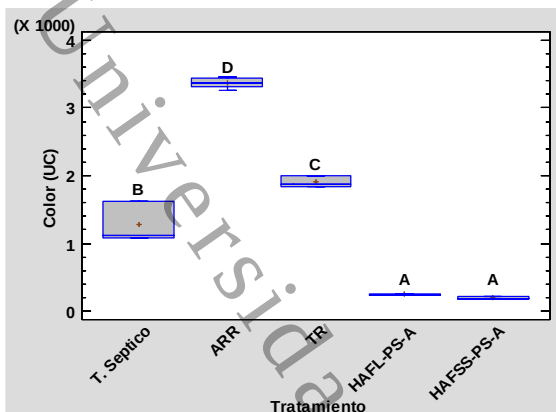


Figura 35. Valores medianos ($\pm R/I$) para Color (UC) con aireación.

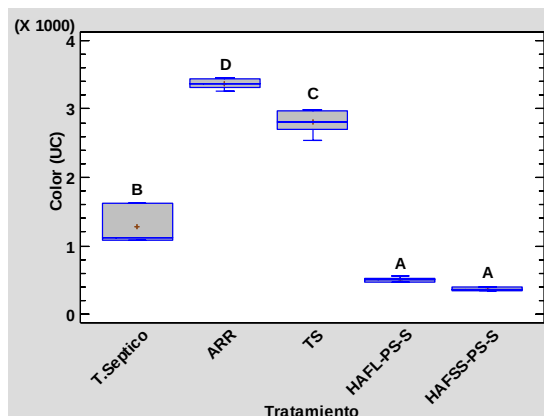


Figura 36. Valores medianos ($\pm R/I$) para Color (UC) con sedimentación.

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

Oxígeno Disuelto (mg/L)

Primer experimento. Para el OD la prueba de Kruskal-Wallis reportó que el valor mediano más bajo fue en el ARR con $0.45 \pm$ ($Q_1=0.2$, $Q_3=0.7$) mg/L y el valor más alto se obtuvo en el HAFL-Ps-A con $3.2 \pm$ ($Q_1=3.1$, $Q_3=3.6$) mg/L.

Segundo experimento. Para el OD la prueba de Kruskal-Wallis reportó que el valor mediano más bajo fue en el ARR con $0.45 \pm$ ($Q_1=0.2$, $Q_3=0.7$) mg/L y el valor más alto se obtuvo en el HAFL-Ps-S con $3.6 \pm$ ($Q_1=2.0$, $Q_3=9.36$) mg/L.

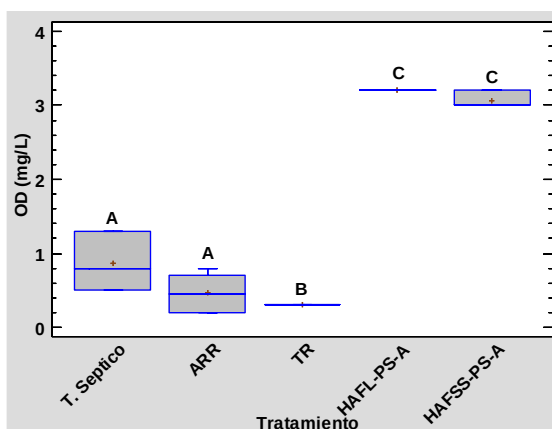


Figura 37. Valores medianos ($\pm R/I$) para Oxígeno Disuelto (mg/L) con aireación.

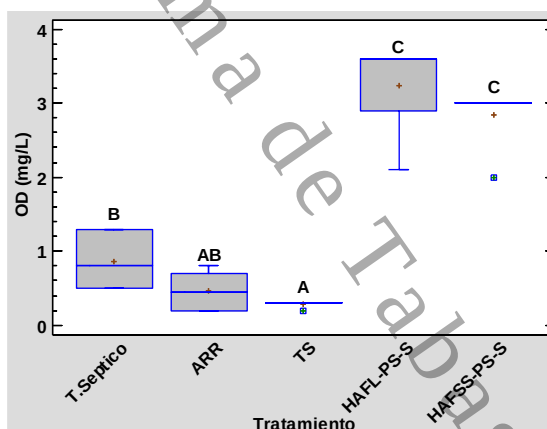


Figura 38. Valores medianos ($\pm R/I$) para Oxígeno Disuelto (mg/L) con sedimentación.

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.1

Demanda Química de Oxígeno (mg/L)

Primer experimento. Para la DQO la prueba de Kruskal-Wallis reportó que el valor mediano más bajo fue en el tratamiento HAFSS-PS-A con $28.0 \pm (Q_1=10.0, Q_3=32.0)$ mg/L y el valor más alto se obtuvo en el ARR con $1619.0 \pm (Q_1=1382.0, Q_3=1856.0)$.

Segundo experimento. Para la DQO la prueba de Kruskal-Wallis reportó que el valor mediano más bajo fue en el tratamiento HAFL-PS-S con $53.0 \pm (Q_1=35.0, Q_3=58.0)$ mg/L y el valor más alto se obtuvo en el ARR con $1619.0 \pm (Q_1=1382.0, Q_3=1856.0)$.

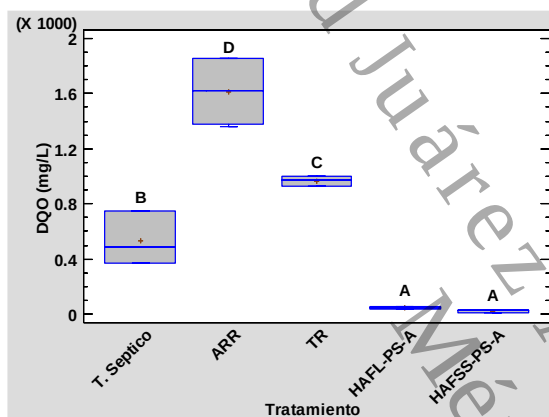


Figura 39. Valores medianos ($\pm R/I$) para DQO (mg/L) con aireación.

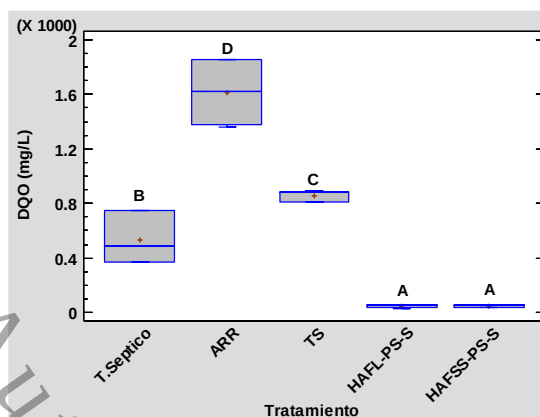


Figura 40. Valores medianos ($\pm R/I$) para DQO (mg/L) con sedimentación.

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.1

Aluminio (mg/L)

Primer experimento. En el análisis de Aluminio la prueba de Kruskal-Wallis reportó que el valor más bajo corresponde al HAFL-PS-A con $0.035 \pm (Q_1=0.02, Q_3=0.05)$ UpH, seguido de HAFSS-PS-A con $0.055 \pm (Q_1=0.03, Q_3=0.08)$ UpH mientras que el valor más alto se presenta en la ARR con $1.4 \pm (Q_1=1.2, Q_3=1.5)$ UpH.

Segundo experimento. En el análisis de pH la prueba de Kruskal-Wallis reportó que el valor más bajo corresponde al HAFL-PS-S con $0.01 \pm (Q_1=0, Q_3=0.2)$ UpH, seguido de HAFSS-PS-A con $0.455 \pm (Q_1=0.1, Q_3=0.9)$ UpH mientras que el valor más alto se presenta en la ARR con $1.4 \pm (Q_1=1.2, Q_3=1.5)$ UpH.

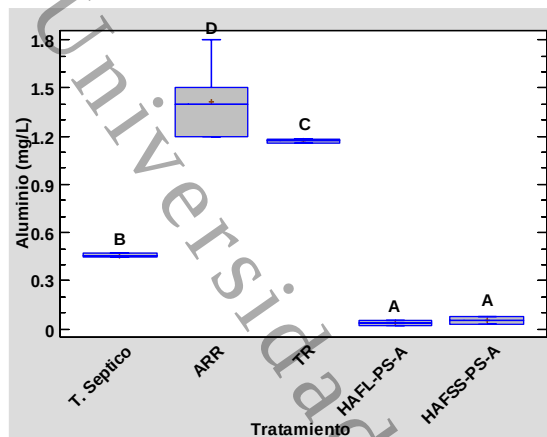


Figura 41. Valores medianos ($\pm RI$) para Aluminio (mg/L) con aireación.

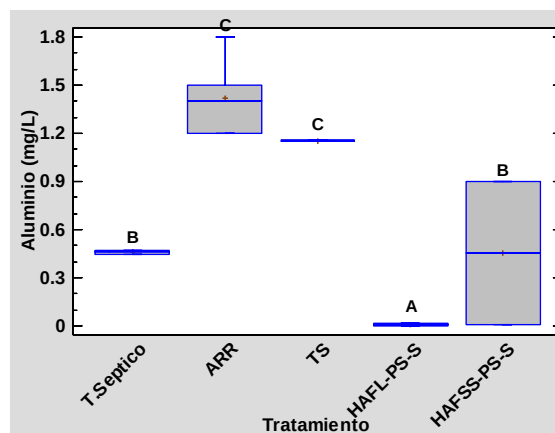


Figura 42. Valores medianos ($\pm RI$) para Aluminio (mg/L) con sedimentación.

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.¹

Bromo (mg/L)

Primer experimento. En el análisis de Bromo la prueba de Kruskal-Wallis se reportó que el valor mediano más bajo corresponde al tratamiento HAFSS-PS-A con $0.065 \pm$ ($Q_1=0$, $Q_3=0.13$) mg/L, seguido del tratamiento HAFL-PS-A con $0.115 \pm$ ($Q_1=0.06$, $Q_3=0.17$) mg/L, mientras que el valor mediano más alto se presenta en el ARR con $2.07 \pm$ ($Q_1=1.98$, $Q_3=6.08$) mg/L.

Segundo experimento. En el análisis de Bromo de Kruskal-Wallis se reportó que el valor mediano más bajo corresponde al tratamiento HAFL-PS-S con $0.24 \pm$ ($Q_1=0.09$, $Q_3=0.39$) mg/L, seguido del tratamiento HAFSS-PS-S con $0.325 \pm$ ($Q_1=0.22$, $Q_3=0.43$) mg/L, mientras que el valor mediano más alto se presenta en el ARR con $2.07 \pm$ ($Q_1=1.98$, $Q_3=6.08$) mg/L.

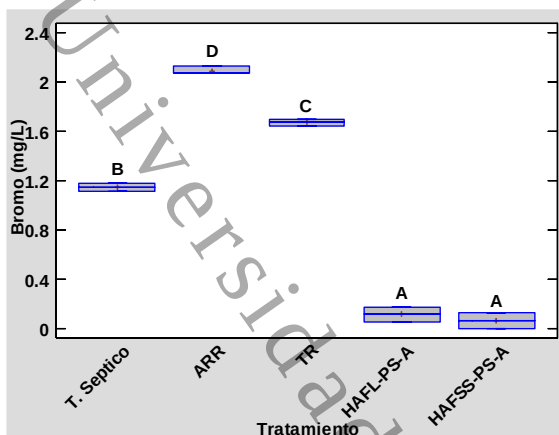


Figura 43. Valores medianos ($\pm RI$) para Bromo (mg/L) con aireación.

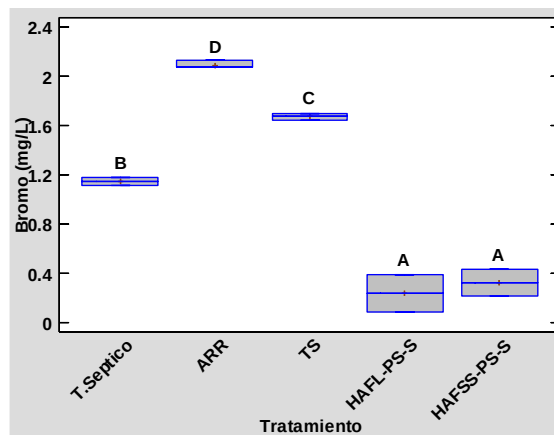


Figura 44. Valores medianos ($\pm RI$) para Bromo (mg/L) con sedimentación.

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.111

Cromo VI (mg/L)

Primer experimento. En el análisis de Cromo VI de Kruskal-Wallis se reportó que el valor mediano más bajo corresponde al tratamiento HAFL-PS-A con $48.5 \pm (Q_1=39.0, Q_3=58.0)$ mg/L, seguido de HAFSS-PS-A con $139.0 \pm (138.0, 140.0)$ mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el ARR con $450.0 \pm (346.0, 450.0)$ mg/L.

Segundo experimento. En el análisis de Cromo VI de Kruskal-Wallis se reportó que el valor mediano más bajo corresponde al tratamiento HAFL-PS-S con $95.0 \pm (Q_1=39.0, Q_3=58.0)$ mg/L, seguido de HAFSS-PS-S con $98.0 \pm (Q_1=60.0, Q_3=136.0)$ mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el ARR con $450.0 \pm (Q_1=346.0, Q_3=450.0)$ mg/L.

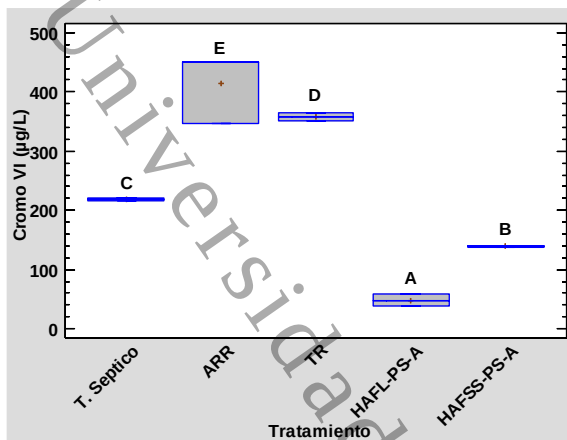


Figura 45. Valores medianos ($\pm RI$) para Cromo VI (mg/L) con aireación.01

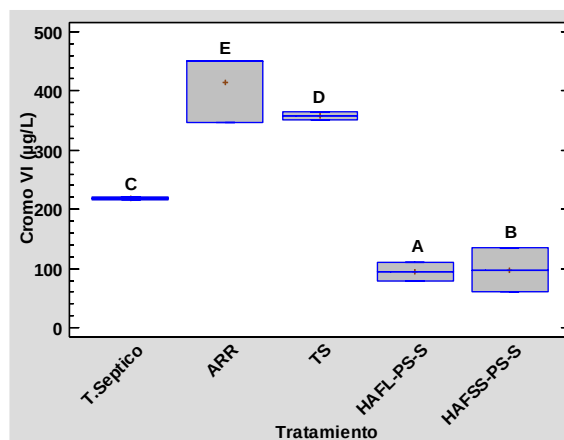


Figura 46. Valores medianos ($\pm RI$) para Cromo VI (mg/L) con sedimentación.

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

Cobre (mg/L)

Primer experimento. En el análisis de Cobre de Kruskal-Wallis reportó que el valor mediano más bajo corresponde al HAFL-Ps-A con 0.08 ($Q_1=0.5$, $Q_3=0.11$) mg/L, seguido de HAFSS-Ps-A con $0.09 \pm$ ($Q_1=0.7$, $Q_3=0.11$) mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el ARR con $2.72 \pm$ ($Q_1=2.21$, $Q_3=2.72$) mg/L.

Segundo experimento. En el análisis de Cobre de Kruskal-Wallis reportó que el valor mediano más bajo corresponde al HAFL-Ps-S con 0.08 ($Q_1=0.0$, $Q_3=0.16$) mg/L, seguido de HAFSS-Ps-S con $0.16 \pm$ ($Q_1=0.04$, $Q_3=0.28$) mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el ARR con $2.72 \pm$ ($Q_1=2.21$, $Q_3=2.72$) mg/L.

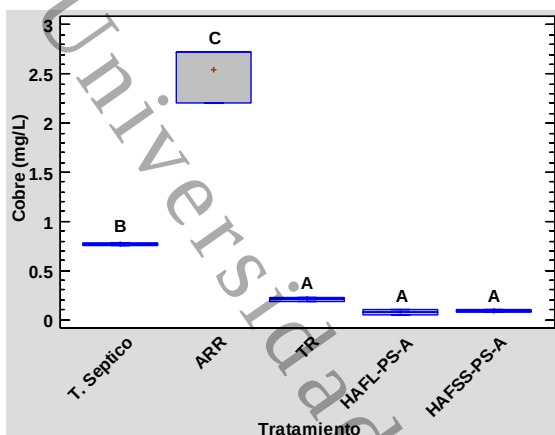


Figura 47. Valores medianos ($\pm RI$) para Cobre (mg/L) con aireación.

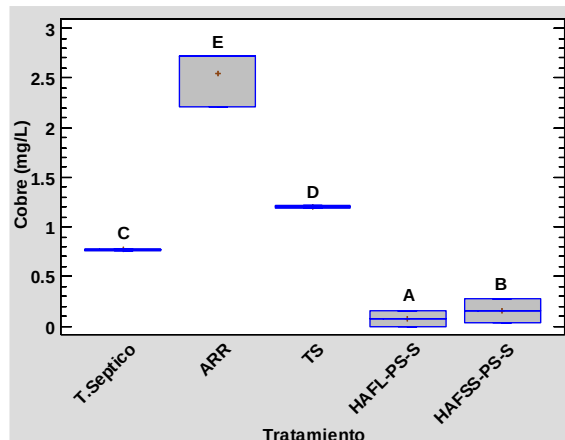


Figura 48. Valores medianos ($\pm RI$) para Cobre (mg/L) con sedimentación.

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

Hierro (mg/L)

Primer experimento. En el análisis de Hierro de Kruskal-Wallis reporto que el valor mediano más bajo corresponde al HAFL-PS-A con $0.33 \pm (Q_1=0.24, Q_3=0.42)$ mg/L, seguido de HAFSS-PS-A con $1.64 \pm (Q_1=1.62, Q_3=1.67)$ mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el ARR con $7.4 \pm (Q_1=5.4, Q_3=8.2)$ mg/L.

Segundo experimento. Primer tratamiento. En el análisis de Hierro de Kruskal-Wallis reporto que el valor mediano más bajo corresponde al HAFL-PS-S con $0.095 \pm (Q_1=0.09, Q_3=0.1)$ mg/L, seguido de HAFSS-PS-S con $0.27 \pm (Q_1=0.13, Q_3=0.41)$ mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el ARR con $7.4 \pm (Q_1=5.4, Q_3=8.2)$ mg/L.

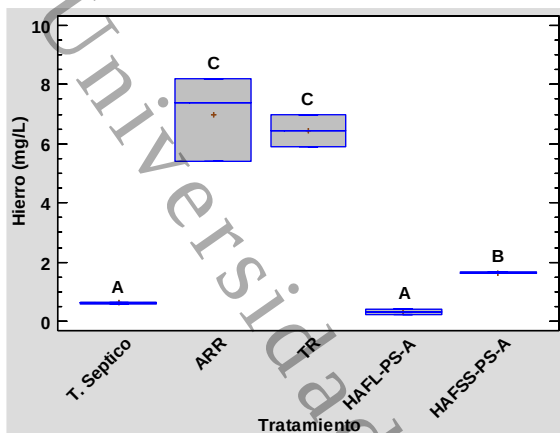


Figura 49. Valores medianos ($\pm RI$) para Hierro (mg/L) con aireación.

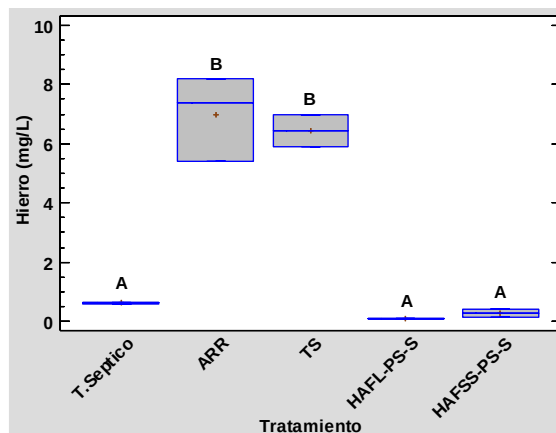


Figura 50. Valores medianos ($\pm RI$) para Hierro (mg/L) con sedimentación.

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

Manganeso ($\mu\text{g/L}$)

Primer experimento. En el análisis de Manganeso de Kruskal-Wallis se reportó que el valor mediano más bajo corresponde al HAFSS-PS-A con $1.41 \pm (Q_1=1.22, Q_3=1.6) \mu\text{g/L}$, seguido de HAFL-PS-A con $3.75 \pm (Q_1=3.0, Q_3=4.5) \mu\text{g/L}$ mientras que el valor mediano más alto se presenta en el ARR con $151.0 \pm (Q_1=144.0, Q_3=156.0) \mu\text{g/L}$.

Segundo experimento. En el análisis de Manganeso de Kruskal-Wallis se reportó que el valor mediano más bajo corresponde al HAFSS-PS-S con $12.0 \pm (Q_1=12.0, Q_3=12.0) \mu\text{g/L}$, seguido de HAFL-PS-S con $21.6 \pm (Q_1=19.3, Q_3=23.9) \mu\text{g/L}$ mientras que el valor mediano más alto se presenta en el ARR con $151.0 \pm (Q_1=144.0, Q_3=156.0) \mu\text{g/L}$.

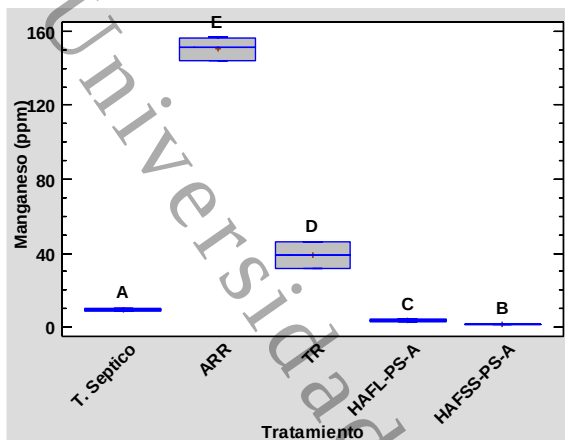


Figura 51. Valores medianos (Q1, Q3) para Manganese (mg/L) con aireación.

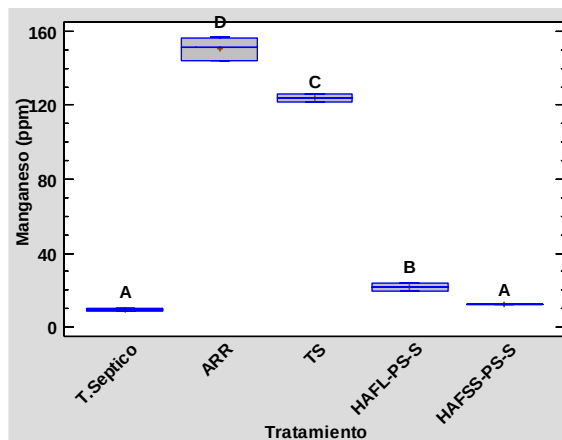


Figura 52. Valores medianos (Q1, Q3) para Manganese (mg/L) con sedimentación.

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

Níquel (mg/L)

Primer experimento. En el análisis de Níquel de Kruskal-Wallis reporto que el valor mediano más bajo corresponde al tratamiento HAFL-Ps-A con $0.42 \pm (Q_1=0.21, Q_3=0.64)$ mg/L, seguido de HAFSS-Ps-A con $0.685 \pm (Q_1=0.15, Q_3=1.22)$ mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el Tanque de Reacción con $2.3 \pm (Q_1=2.0, Q_3=2.5)$ mg/L.

Segundo experimento. En el análisis de Níquel de Kruskal-Wallis reporto que el valor mediano más bajo corresponde al tratamiento HAFL-Ps-S con $0.4 \pm (Q_1=0.28, Q_3=0.52)$ mg/L, seguido de HAFSS-Ps-S con $0.47 \pm (Q_1=0.14, Q_3=0.8)$ mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el Tanque de sedimentación con $2.5 \pm (Q_1=2.1, Q_3=2.6)$ mg/L.

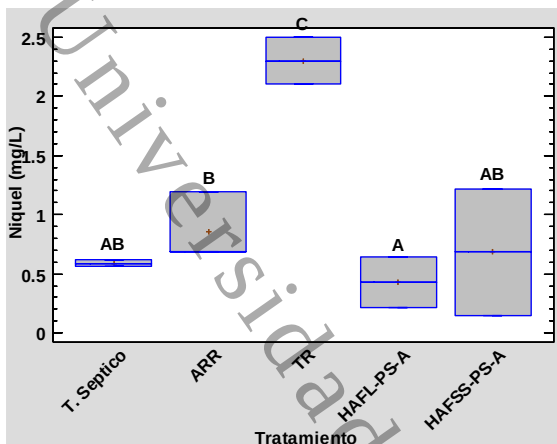


Figura 53. Valores medianos ($\pm R/I$) para Níquel (mg/L) con aireación.

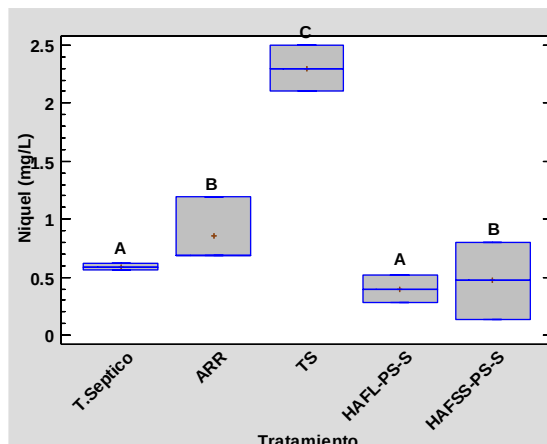


Figura 54. Valores medianos ($\pm R/I$) para Níquel (mg/L) con sedimentación.

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

Nitrato (mg/L)

Primer experimento. En el análisis de Nitrato de Kruskal-Wallis reportó que el valor mediano más bajo corresponde al HAFSS-Ps-A con $2.6 \pm (Q_1=0.1, Q_3=0.1)$ mg/L, seguido de HAFL-Ps-A con $0.265 \pm (Q_1=0, Q_3=3.5)$ mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el ARR con $38.0 \pm (Q_1=24.0, Q_3=38.0)$ mg/L.

Segundo experimento. En el análisis de Nitrato de Kruskal-Wallis reportó que el valor mediano más bajo corresponde al HAFSS-Ps-S con $0.1 \pm (Q_1=0.1, Q_3=0.1)$ mg/L, seguido de HAFL-Ps-S con $0.6 \pm (Q_1=0.1, Q_3=1.1)$ mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el ARR con $38.0 \pm (Q_1=24.0, Q_3=38.0)$ mg/L.

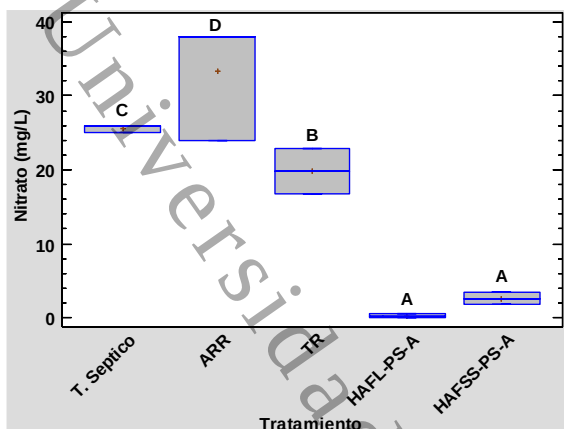


Figura 55. Valores medianos ($\pm R/I$) para Nitrato (mg/L) con aireación.

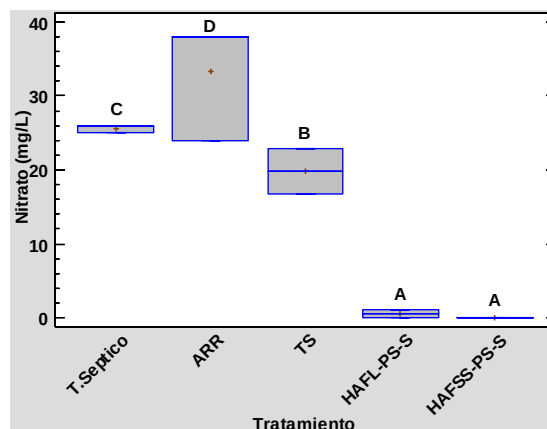


Figura 56. Valores medianos ($\pm R/I$) para Nitrato (mg/L) con sedimentación.

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

Fósforo (mg/L)

Primer experimento. En el análisis de Fósforo de Kruskal-Wallis se reportó que el valor mediano más bajo corresponde al HAFL-PS-A con $56.0 \pm (Q_1=13.1, Q_3=56.0)$ mg/L, seguido de HAFSS-Ps-A con $21.3 \pm (Q_1=19.0, Q_3=23.6)$ mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el ARR con $56.0 \pm (Q_1=51.5, Q_3=56.0)$ mg/L.

Segundo experimento. En el análisis de Fósforo de Kruskal-Wallis se reportó que el valor mediano más bajo corresponde al HAFL-Ps-S con $16.75 \pm (Q_1=13.8, Q_3=19.7)$ mg/L, seguido de HAFSS-Ps-S con $17.1 \pm (Q_1=17.0, Q_3=17.2)$ mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el ARR con $56.0 \pm (Q_1=51.5, Q_3=56.0)$ mg/L.

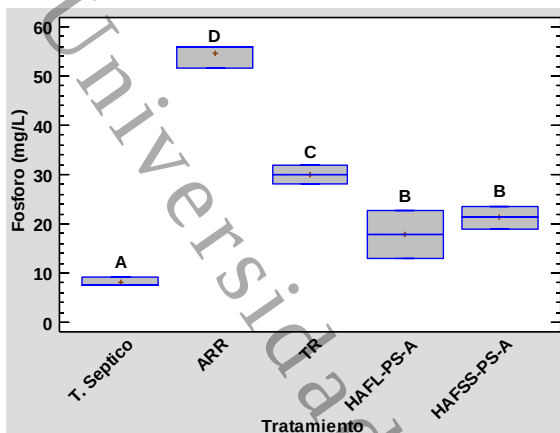


Figura 57. Valores medianos ($\pm R/I$) para Fósforo (mg/L) con aireación.

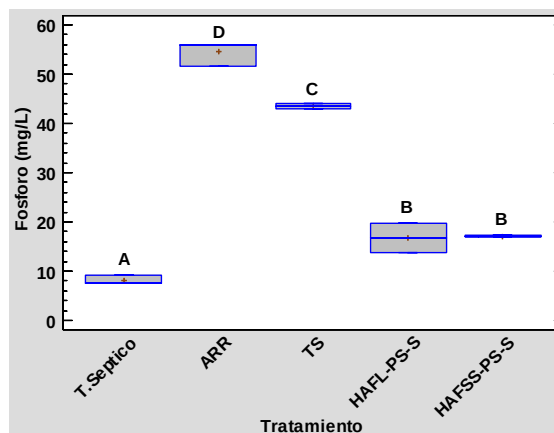


Figura 58. Valores medianos ($\pm R/I$) para Fósforo (mg/L) con sedimentación.

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

Zinc (mg/L)

Primer experimento. En el análisis de Zinc de Kruskal-Wallis se reportó que el valor mediano más bajo corresponde al Tanque Séptico con $0.0 \pm (Q_1=0.0, Q_3=0.0)$ mg/L, seguido de HAFSS-PS-A con $0.1 \pm (Q_1=0.0, Q_3=0.2)$ mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el ARR con $15.57 \pm (Q_1=15.57, Q_3=16.17)$ mg/L.

Segundo experimento. En el análisis de Zinc de Kruskal-Wallis se reportó que el valor mediano más bajo corresponde al Tanque Séptico con $0.0 \pm (Q_1=0.0, Q_3=0.0)$ mg/L, seguido de HAFSS-PS-S con $0.0 \pm (Q_1=0.0, Q_3=0.0)$ mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el ARR con $15.57 \pm (Q_1=15.57, Q_3=16.17)$ mg/L.

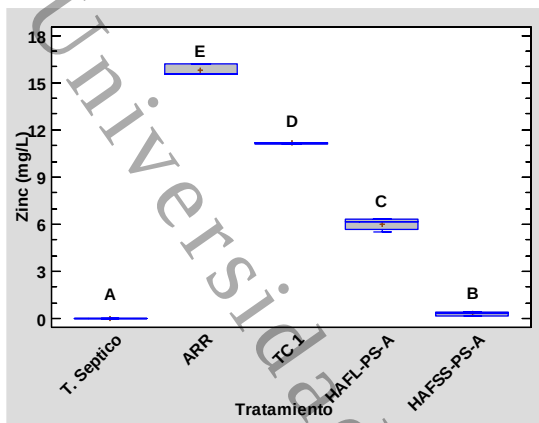


Figura 59. Valores medianos ($\pm R/I$) para Zinc (mg/L) con aireación.

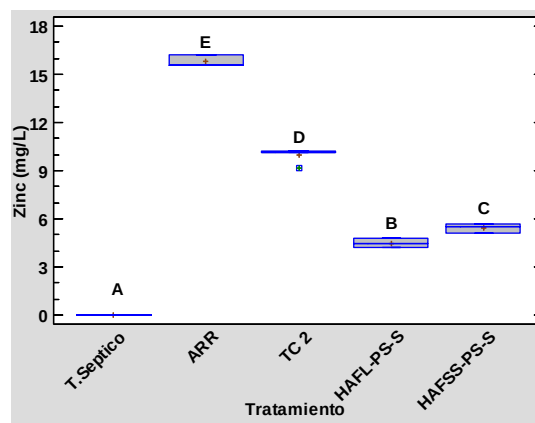


Figura 60. Valores medianos ($\pm R/I$) para Zinc (mg/L) con sedimentación.

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

Cianuro (mg/L)

Primer experimento. En el análisis de Cianuro de Kruskal-Wallis se reportó que el valor mediano más bajo corresponde al Tanque Séptico con $0 \pm (Q_1=0.0, Q_3=0.0)$ mg/L, seguido de los tratamientos de humedales artificiales con $1.0 \pm (Q_1=1.0, Q_3=1.0)$ mg/L.

Segundo experimento. En el análisis de Cianuro de Kruskal-Wallis se reportó que el valor mediano más bajo corresponde al Tanque Séptico con $0 \pm (Q_1=0.0, Q_3=0.0)$ mg/L, seguido de los tratamientos de humedales artificiales con $1.0 \pm (Q_1=1.0, Q_3=1.0)$ mg/L.

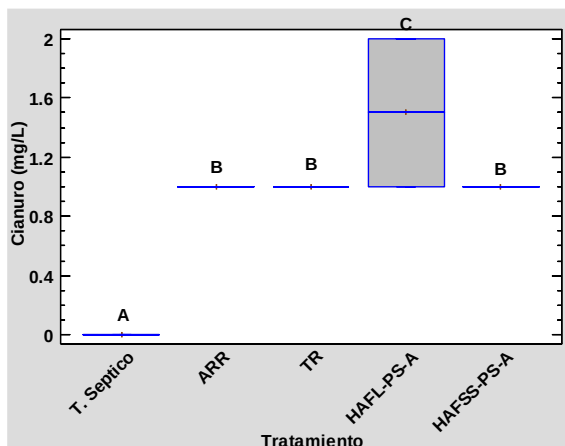


Figura 61. Valores medianos ($\pm R/I$) para Cianuro (mg/L) con aireación.

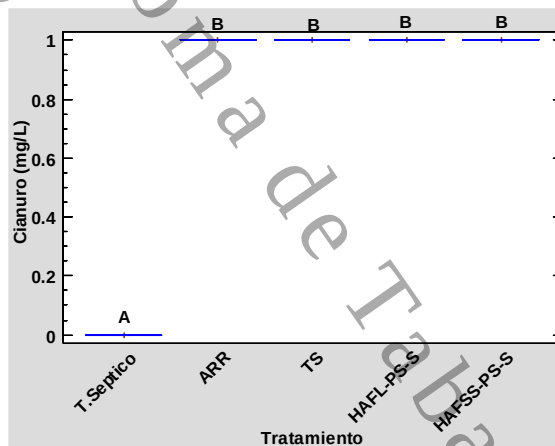


Figura 62. Valores medianos ($\pm R/I$) para Cianuro (mg/L) con sedimentación.

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

Amonio (mg/L)



Primer experimento. En el análisis de Amonio de Kruskal-Wallis se reportó que el valor mediano más bajo corresponde al HAFL-Ps-A con $24.84 \pm (Q_1=20.88, Q_3=28.8)$ mg/L, seguido de HAFSS-Ps-A con $29.26 \pm (Q_1=28.92, Q_3=29.6)$ mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el ARR con $55.0 \pm (Q_1=55.0, Q_3=60.0)$ mg/L

Segundo experimento. En el análisis de Amonio de Kruskal-Wallis se reportó que el valor mediano más bajo corresponde al HAFL-Ps-S con $35.5 \pm (Q_1=34.6, Q_3=36.4)$ mg/L, seguido de HAFSS-Ps-S con $36.58 \pm (Q_1=33.6, Q_3=39.56)$ mg/L mientras que el valor mediano más alto se presenta en el ARR con $55.0 \pm (Q_1=55.0, Q_3=60.0)$ mg/L

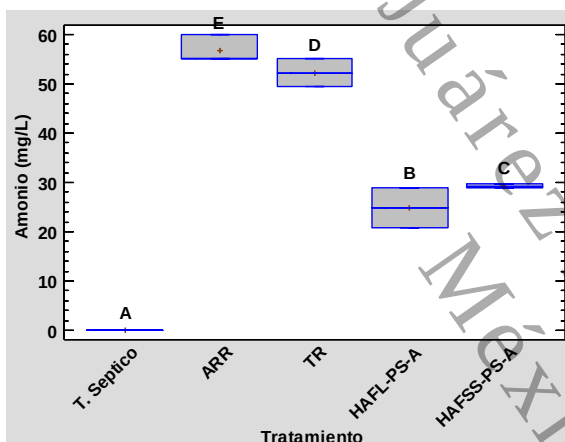


Figura 63. Valores medianos ($\pm R/I$) para Amonio (mg/L) con aireación.

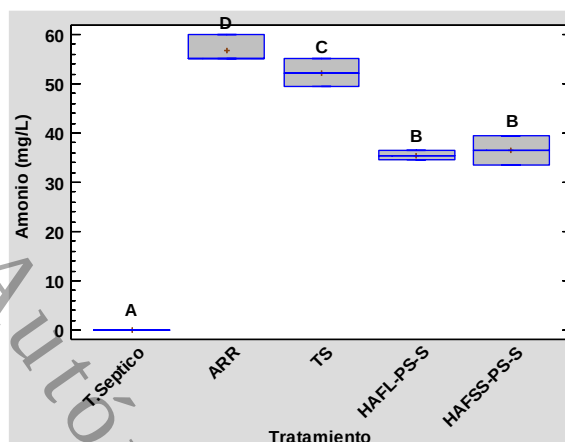


Figura 64. Valores medianos ($\pm R/I$) para Amonio (mg/L) con sedimentación.

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza. Fuente: Elaboración propia.

4.6 Discusiones

Para evaluar el desempeño en un sistema de tratamiento de humedales residuales se estima la eficiencia de remoción. En cuanto a las eficiencias negativas (-) en su valores, se debe a que la concentración del efluente en esta unidad es mayor que la del influente y este fenómeno es conocido como corto circuito (Vázquez-González y López-Ocaña, 2011). El pH entra al sistema de humedales artificiales con características alcalinas, cuyos valores en el agua de entrada fueron de 9.2 ± 0.50 UpH y los valores más óptimos se encontraron en el HAFL-Ps-S con 7.54 ± 0.02 . En tal sentido, estas concentraciones permiten el establecimiento de bacterias que promueven la degradación de los contaminantes. Las temperaturas registradas en los tratamientos con especies son



óptimas para una buena remoción de contaminantes básicos teniendo en cuenta que las temperaturas no se acercan a los 50 °C donde los procesos de digestión aerobia y nitrificación bacteriana se detienen (Sánchez et al., 2021). Asimismo, se encuentran concentraciones favorables en el OD en la salida del tratamiento, lo que demuestra que la vegetación ha suministrado oxígeno que ayuda a la degradación en los humedales artificiales (Pérez-Álvarez et al., 2023).

En el tratamiento de aguas, Wang et al., (2021) ha utilizado procesos basados en materiales de carbonato de calcio logrando remociones de 95% de hierro y 86% de manganeso, mientras que en los presentes experimentos los HA alcanzaron eficiencias de 96.1% (de 7 a 0.27 mg/L) en hierro y 92.0% (de 150 a 12.0) en manganeso en el tratamiento HAFSS-Ps-S, cumpliendo ambos con los LMP para descargas de aguas (20 mg/L de Fe y 2.0 mg/L de Mn según la NOM.001-SEMARNAT-2021). En la remoción del Cromo VI y el Zinc, Moya (2023) reportó una eficiencia de remoción de 93% (25.3 a 1.3 mg/L) y 96% (26.1 a 1.1 mg/L) respectivamente en un sistema piloto de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal con *Cyperus odoratus* L. para tratar aguas residuales sintéticas de origen industrial. Mientras que en comparación con el presente estudio se reportaron las eficiencias más altas en el HAFL-Ps-A con 88.3% en cromo (de 415 a 119 mg/L) y 99% en zinc (de 15.77 a 0.1 mg/L). La NOM.001-SEMARNAT-2021 indica 1.5 mg/L para cromo VI y 10.0 mg/L, en este caso todos los tratamientos reportan valores óptimos para zinc, pero ninguno se encuentra dentro del umbral de referencia para el Cr VI.

Por otra parte, anteriores investigaciones han demostrado que el tratamiento por biorremediación hace que el cianuro se transforme en otras sustancias químicas más estables y con menor toxicidad mediante diversos procesos físicos, químicos y biológicos. Por ejemplo, Martínez (2022) reportó eficiencias del 98% de cianuro en un proceso que incluyó un pretratamiento por lixiviación (lechada) seguido de un tratamiento biológico en lagunas aireadas utilizando los microorganismos liofilizados (conservados en seco). En comparación, el presente estudio mantuvo estable una concentración de 1.0 mg/L en los tratamientos con *Potenderia Sagittata* (cumpliendo con el valor óptimo



de 1.0 mg/L según la NOM-001-SEMARNAT-2021), mientras que en los HA testigo esta concentración aumento con respecto al agua inicial. Por último, el amonio, un componente principal en los productos de servicios cosméticos, es un indicador de contaminación orgánica y la descomposición de desechos industriales en el agua residual, un exceso de este puede provocar problemas como la eutrofización y una alteración en el ecosistema al que tiene contacto (Fernández, 2023). La mejor eficiencia se encontró en el tratamiento HAFL-Ps-A con 56.2% (56.6 a 29.26 mg/L), los CE-CCA-001/89 establecen como valor referencia una concentración de 2.0 mg/L, lo que los tratamientos no cumplen con este.

4.7 Conclusión.

El presente estudio concluye que la especie *Potenderia Sagittata* es factible de implementar y adaptar en la tecnología de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales de servicios cosméticos. El uso de esta especie tuvo un mejor desempeño a lo largo del tiempo en comparación a *Sagittaria latifolia*. El análisis de los resultados finales con las características del agua residual cosmética cruda evidencia disminuciones considerables de los tratamientos en los parámetros de calidad del agua, mayormente cuando se implementa una agitación y sedimentación previa a los humedales artificiales. El mejor rendimiento fue en el HAFSS-Ps-A, con remociones de turbiedad, color y DQO de 86.8%, 94.2% y 98.8% respectivamente mientras que el HAFL-Ps-A tuvo el mejor rendimiento en la remoción de metales pesados como Zinc (99%), Aluminio (97%), Manganeso (97.5%) y Hierro (95.3%) los cuales logran concentraciones ideales para la NOM-001-SEMARNAT-2021. Sin embargo el Amonio y Cromo VI, a pesar de presentar remociones en la salida del tratamiento, las concentraciones siguen siendo superiores a las establecidas por la normativa ambiental. Finalmente, el tratamiento HAFL-Ps-A presentó la vegetación con mayor crecimiento en el largo de las plantas, el ancho de los tallos y reproducción de individuos.



4.8. Referencias

- Castro-Silva, A., & Ramirez-Garcia, M. A. (2020). Análisis de la internacionalización del subsector de los cosméticos a partir de la dinámica comercial en Colombia y el caso de éxito de la empresa Belcorp. <https://repositorio.uniagustiniana.edu.co/items/1266d980-0bf2-45e6-b6c8-b9590605efab>
- CONAGUA (2024). Ley Federal de Derechos 2024. gob.mx. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/ley-federal-de-derechos-2024>
- De Moya Sánchez, A, Casierra-Martínez, H, Vargas-Ramírez, X y Caselles-Ororio, A. (2023). Remoción de cromo y zinc de aguas residuales sintéticas en un humedal construido plantado con *Cyperus odoratus* L. vol. 19, p. 119-130. (Núm. 2, Año 2023 : (Julio-Diciembre). Universidad de la Costa. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11323/12325>
- Donoso, L. J. G., León, C. E. D., Lazo, J. A. I., & Guamán, E. G. P. (2024). Depuración de aguas residuales de una industria láctea por medio de humedales artificiales de totora. Polo del Conocimiento, 9(5), 1005-1019. <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/7178>
- Fernández, A. M. A., Arrieta, D. P., & Martínez, N. G. (2023). Biorremediación en Aguas Residuales Acuícolas: Una Revisión. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 7(4), 8538-8568. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7577
- https://www.agro.unlpam.edu.ar/images/NAP_6%20Septiembre%202022.pdf
- Marchand, L., Mench, M., Jacob, D., & Otte, M. (2020). Metal and metalloid removal in constructed wetlands, with emphasis on the importance of plants and standardized measurements: A review. Environmental Pollution, 158(12), 3447–3461. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.08.018>
- Martínez, A. D. Tratamiento de desechos del cianuro por biorremediación. Revista Tecnología En Marcha, 25(2), 61. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i2.317>
- Martínez, J. M. A., & Meraz, E. D. A. (2023). Estimación de gases de efecto invernadero generados por el tratamiento y descarga de aguas residuales domésticas: caso



- de estudio Tabasco.: Estimación de gases de efecto invernadero. *Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability*, 7(1), 19-28.
- Mora O CDL, Saucedo T RA, González A IJ, Gómez RS, Flores LHE. (2020). Efecto de la 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.v11s2.468>
- Mulford, L. J. C. (2023) Revisión de métodos para el tratamiento de aguas residuales de la industria cosmética. [Trabajo de grado, Fundación Universidad de América] Repositorio Institucional Lumieres. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/9323>
- Najul, M. V., Blanco, H., Mata, A., Alberdi, R., Arcaya, J., Rivero, R., ... & Sucic, G. (2020) TRATABILIDAD DE EFLUENTES LÍQUIDOS DE INDUSTRIAS DE COSMÉTICOS. Encuentro Académico Industrial Jornadas de Investigación.
- Nguyen, T. T., Soda, S., & Jamal, N. (2026). Constructed wetlands as a Nature-Based solution for sustainable heavy metal remediation. In *IntechOpen eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1016833>
- Okolodkov, Y. B., Bastida-Zavala, R., Ibañez, A. L., Chapman, J. W., Suárez-Morales, E., Pedroche, F., & Gutiérrez-Mendieta, F. J. (2007). Especies acuáticas no indígenas en México. *Ciencia y Mar*, 11(32), 29-67.
- Olgún EJ, Sánchez-Galván G, González-Portela RE et al (2014) El uso de humedales flotantes con *Cyperus papyrus* y *Pontederia sagittata* para el tratamiento de un lago urbano contaminado. En: Rivas HA (ed) *Memorias de la Segunda Conferencia Panamericana en Sistemas de Humedales para el Manejo, Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua*. IMTA, Morelia, págs. 45–47. Disponible en: <http://bit.ly/imta-pub-2014>
- PCC Group. (2025, 18 marzo). Ingredientes cosméticos. PCC Group Product Portal. <https://www.products.pcc.eu/es/blog/ingredientes-cosmeticos>
- Pérez-Álvarez, P., Torres-Balcázar, C. A., & López-Ocaña, G. (2023). *Typha domingensis* en humedales construidos de un sistema de tratamiento de aguas residuales, en periodo de contingencia COVID-19 en Tabasco, México.



<https://aldeser.org/journals/index.php/TERYS/article/view/269>

Ponce, J. M. P., R, L. M., M, S. G., B, G. B., García, O., V., P, G. B., & S, J. P. (2022). Disminución de cromo y cobre en aguas residuales utilizando cáscaras (naranja y banano) como bioadsorbente. Información analítica, 10(2), 37–63.
<https://doi.org/10.26807/ia.v10i2.234>

Rincón, A. (2023). Diseño de humedales construidos para tratamiento de aguas residuales domésticas y aguas ricas en metales. Manizales, Caldas, Colombia: Universidad Católica de Manizales.
<https://repositorio.ucm.edu.co/entities/publication/16e726c4-6a29-463b-803a-7ea4d076fa07>

Rivera, M. A. O., Barahona, W. E. C., Costales, J. H. N., Lalvay, X. A. L., & Guachichulca, E. J. R. (2021). La calidad de las aguas residuales domésticas. Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional, 6(3), 228-245.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7926905>

Romellón-Cerino, M. J., Estrada-Pérez, N., & López-Ocaña, G. (2022). Remoción y cinética de contaminantes básicos en humedales artificiales en serie. Tendencias En energías Renovables Y Sustentabilidad, 1(1), 108–118.
<https://doi.org/10.56845/terys.v1i1.123>

Rosas, J., Iannacone, J., Rosas, J., & Iannacone, J. (2020.). Bioacumulación de elementos potencialmente tóxicos (ept) por sarcocornia neei en un humedal costero del Perú. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672020000200343&script=sci_arttext&tlng=en

Sánchez Esteban, S. (2023). Análisis de mercado del sector de cosméticos en México: detección de oportunidades en el subsector de productos dermocosméticos de la categoría cuidado personal para la hidratación de la piel.
<https://uvadoc.uva.es/handle/10324/63809>

Sánchez, V. G., Palomino Pastrana, P. A., y Malpartida Yapias, R. J. (2021). Eficiencia de humedales artificiales de totora y berros sobre efluentes de granja porcícola, Perú: Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria, 5(14), 192-203. Epub 31 de agosto de 2021.



<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i14.110>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2022) NOM-001-SEMARNAT-2021, Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México D.F. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gs.tab=0

Valero, J. A. G., Martínez, S. M., Terrero, M. A., Cano, Á. F., Díaz, M. M., Garrido, M. G., & Avilés, J. A. A. (2020). Fitorremediación de aguas residuales industriales mediante humedales artificiales para uso agrícola. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8145329>

Wang, Y., Pleasant, S., Jain, P., Powell, J., & Townsend, T. (2021). Calcium carbonate based permeable reactive barriers for iron and manganese groundwater remediation at landfills. Waste Management, 53, 128-135. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.02.018>

Withayaphirom, C., Chiemchaisri, C., Chiemchaisri, W., Ogata, Y., Ebie, Y., & Ishigaki, T. (2020). Organic micro-pollutant removals from landfill leachate in horizontal subsurface flow constructed wetland operated in the tropical climate. Journal of Water Process Engineering, 38, 101581. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101581>

Yu GRAMO., Li PAG., Wang GRAMO., Wang J., Zhang Y., Wang S., Yang K., Du DO. & Chen H. (2021) Revisión sobre la eliminación de metales pesados y metaloides mediante humedales artificiales: bibliometría, vías de eliminación y factores clave. Revista Mundial de Microbiología y Biotecnología, 37(9), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11274-021-03123-1>

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 (Switzerland), 11(8), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su11082350>



Capítulo 5. Remoción de Microorganismos en Aguas Residuales Domésticas y de Servicios Cosméticos Tratadas Vía Humedales Artificiales con *Pontederia sagittata*.

Autores:

Ing. Monserrat Guadalupe Barco Méndez¹, Dr. Gaspar López Ocaña¹, Dr. David Guerrero Zarate², Dr. Humberto Hernández Trejo¹, Dra. Melina del Carmen Uribe¹, M.C. Carlos Alberto Torres Balcázar¹.

5.1 Resumen

Se evaluaron humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial con *Pontederia sagittata* en la remoción de microorganismos (*E. Coli* y *Estreptococos*) en aguas residuales mediante dos experimentos; el primero con agua residual doméstica y el segundo con agua residual reconstituida de servicios cosméticos, este último con un proceso de aireación y sedimentación como pretratamiento. Los humedales se dividieron en: HAFL-Ps (humedal artificial de flujo libre con *Pontederia sagittata*) y HAFSS-Ps (humedal artificial de flujo subsuperficial con *Pontederia sagittata*), con dimensiones de 2.5 m de largo x 1.2 m de ancho x 1 m de tirante con tiempos de retención de 7 días y 3.5 días respectivamente tratando 200 L/día de agua. Se realizó la caracterización microbiológica del agua (entrada y salida). En el primer experimento la entrada del tratamiento presentó 1130 NMP/100 ml de *E. Coli* y >11,000 NMP/100 ml de *Estreptococos*, se obtuvo la mejor eficiencia en el HAFSS-Ps, con un 99% de remoción de *E. Coli* (<3 NMP/100 ml) y 99% de *Estreptococos* (230 NMP/100 ml). En cuanto al segundo experimento la entrada del tratamiento presentó 460 NMP/100 ml de *E. Coli* y >1,100 NMP/100 ml de *Estreptococos*. Y se obtuvo la mejor eficiencia en el HAFSS-Ps, con un 98% de remoción de *E. Coli* y 99% de *Estreptococos* (3 NMP/100 ml y 210 NMP/100 ml respectivamente).

Palabras clave. *Escherichia coli*, *Estreptococos*, Calidad del agua, Aguas residuales, Servicios Cosméticos

Institución de adscripción de cada autor:

¹ División Académica de Ciencias Biológicas Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

² División Académica Multidisciplinaria de Jalpa de Méndez-UJAT



5.2. Introducción

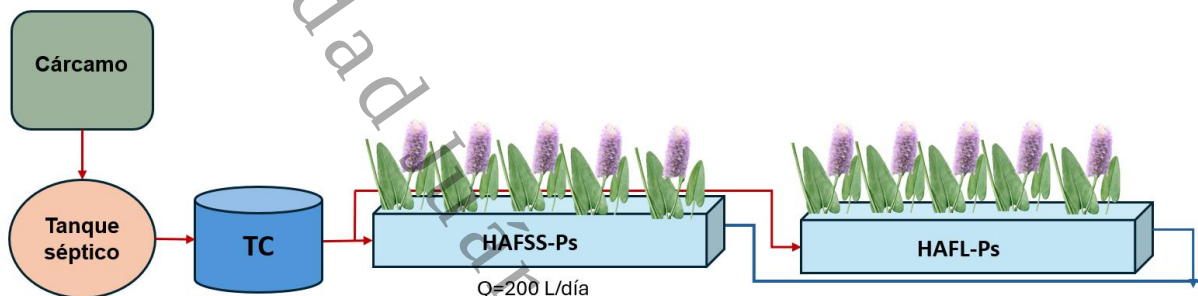
El crecimiento en la fabricación de productos cosméticos ha derivado en un reto ecológico primordial: la producción de volúmenes significativos de aguas residuales con una compleja matriz de compuestos químicos y biológicos. Dicha carga incluye sustancias como fragancias, agentes conservantes, colorantes y tensioactivos que amenazan de manera directa la integridad de los cuerpos de agua receptores ante la ausencia de un tratamiento apropiado (Lebube, 2022). A esto se suma una latente alerta sanitaria derivada de la proliferación de microorganismos patógenos, entre los que destacan *Escherichia coli* y estreptococos fecales. La detección de estos microorganismos funciona como un indicador de riesgo, sugiriendo la posible existencia de otros agentes infecciosos peligrosos para el ser humano. Por esta razón, el monitoreo microbiológico del agua procesada es un requisito indispensable para acatar las regulaciones ambientales vigentes (Statista, 2023). Ante esta problemática, diversas investigaciones señalan que los humedales artificiales son una alternativa altamente efectiva para disminuir la concentración de estas bacterias indicadoras de contaminación fecal. Su funcionamiento se basa en una combinación de procesos naturales, tales como: sedimentación, filtración física, adsorción, competencia biológica y depredación entre microorganismos. Cabe destacar que el rendimiento de dichos sistemas es dinámico y depende de variables estructurales, florísticas, operativas y de la composición del influente (Marín et al., 2023). En consecuencia, resulta indispensable monitorear la variación de las poblaciones bacterianas en cada fase del proceso depurativo. Dicho análisis permitirá determinar con precisión la capacidad de depuración de los humedales artificiales ante efluentes de origen cosmético, sentando las bases para optimizar alternativas sustentables orientadas a la conservación del agua.

5.3. Materiales y métodos

Área de estudio. El estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Microbiología ubicado en la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Actividades de Campo

Primer experimento (agua residual domestica): Recolección de muestras. Se tomó una muestra simple de cada punto del tratamiento (cárcamo, tanque séptico, tanque de control y humedales artificiales de flujo subsuperficial y libre con *Pontederia sagittata*) en recipientes estériles con tiosulfato de sodio de 50 ml para neutralizar el cloro. El muestreo se realizó evitando sedimentos, y se refrigeró a 3°C inmediatamente, se transportó al laboratorio de microbiología antes de las 24 horas. (Fig.65)



TC: Tanque de control

→ Línea de alimentación de agua residual doméstica

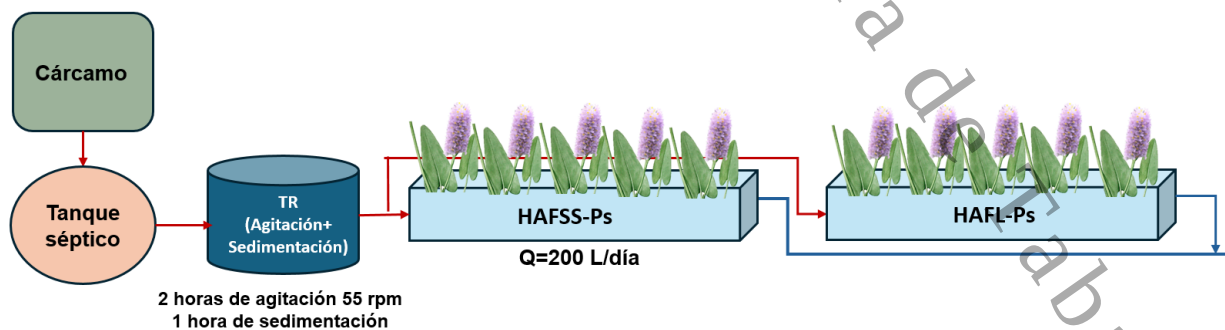
→ Línea de alimentación de agua residual doméstica

HAFSS-Ps = Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial *Pontederia Sagittata*

HAFL-Ps= Humedal Artificial de Flujo Libre *Pontederia Sagittata*

Figura 65. Esquema del sistema de tratamiento en el primer experimento de agua residual domestica de flujo libre (HAFL) y subsuperficial (HAFSS) con *Pontederia sagittata*. Fuente: Elaboración propia.

Segundo experimento (agua residual cosmética): Recolección de muestras Se tomó una muestra simple de cada punto del tratamiento (tanque de control con agua residual cosmética después de un proceso de aireación y sedimentación, y humedales artificiales de flujo subsuperficial y libre con *Pontederia sagittata*) (Fig. 66)



TR: Tanque de reacción con agua residual reconstituida (después de aireación y sedimentación)

→ Línea de alimentación de agua residual reconstituida

→ Línea de alimentación de agua residual tratada

HAFSS-Ps = Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial *Pontederia sagittata*

HAFL-Ps= Humedal Artificial de Flujo Libre *Pontederia sagittata*

Figura 66. Esquema del sistema de tratamiento en el segundo experimento de agua residual de servicios cosméticos de flujo libre (HAFL) y subsuperficial (HAFSS) con *Pontederia sagittata*. Fuente: Elaboración



propia.

Actividades de Laboratorio

Preparación de cultivos. Es un procedimiento estandarizado que garantiza los nutrientes necesarios y las condiciones fisicoquímicas óptimas para el aislamiento, crecimiento o recuento de microorganismos.

- **Difco EC.** Se pesaron y agregaron 37 gramos del cultivo en 1 L de agua esterilizada en un matraz de vidrio. Se calentó y removi6 de manera constante hasta disolver por completo el cultivo. Posteriormente se dejó enfriar a temperatura ambiente, esta se distribuy6 en 100 tubos de ensayo de 10 ml con una pipeta graduada, se le coloc6 a cada tubo una campana y se tap6 cada uno de ellos. Finalmente se esteriliz6 en autoclave por 12 minutos a una temperatura de 121°C y se incub6.
- **Caldo lactosado.** Se pesaron 13 gramos del cultivo y se disolvi6 en 1 L de agua esterilizada en un matraz de vidrio y se realiz6 el mismo procedimiento que el Difco EC.
- **Acida glucosa.** Se pesaron y agregaron 35 gramos del cultivo en 1 L de agua esterilizada en un matraz de vidrio. Se distribuy6 en tubos de ensayo sin campana
- **Peptona.** Se realiz6 una diluci6n al 0.1% y se distribuy6 en tubos de ensayo delgados con algod6n en donde se agregan 9 ml en cada uno de ellos.
- **Agua de Triptona.** Se pesaron y disolvieron 15 g de polvo deshidratado en 1 L de agua destilada o desionizada. Se calent6 suavemente en una parrilla el6ctrica hasta que se disuelva el polvo completamente, se distribuy6 en tubos y se esteriliz6 en autoclave a 121 °C durante 12 minutos.

Prueba presuntiva de coliformes fecales. Se limpi6 el 6rea con alcohol y se encendi6 el mechero en flama azul para no contaminar el medio. En los tubos de agua peptonada (con volumen de 9 ml) se formaron las diluciones: 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} y 10^{-5} con las muestras de agua residual dom6stica y agua residual industrial. Posteriormente en una gradilla se organizaron los tubos de caldo lactosado en filas y se agreg6 1 ml del tubo de agua con peptona correspondiente a cada uno de los tubos con ayuda de una pipeta y puntas



estériles. La Inoculación para agua residual domestica fue de 1 ml, 10^{-1} , 10^{-2} y 10^{-3} y la inoculación para agua residual industrial: fue de 10 ml, 1 ml, 10^{-1} , 10^{-2} y 10^{-3}

Preparación del Agar

- **Agar, eosina y azul de metileno.** Se suspendió 36 g del polvo deshidratado del agar en 1 L de agua destilada en un matraz, se dejó reposar 15 min, se hirvió con agitación por 1 min con ayuda de una parrilla eléctrica plana, se llevó a esterilizar a 121°C por 15 min y se dejó enfriar a $45-50^{\circ}\text{C}$. Por último, se vertió en cajas petri esterilizadas rápidamente (para evitar que solidifique) a un lado del mechero y se cerraron inmediatamente.
- **Agar KF (Kenner Fecal) para enterococos.** Se suspendió 74.6 g del polvo deshidratado del agar en 1 L de agua destilada en un matraz, se dejó reposar 15 min, se hirvió con agitación por 1 min con ayuda de una parrilla eléctrica plana, se llevó a esterilizar a 121°C por 15 min, se enfría a 50°C antes de añadir 10 ml de TTC al 1% para lograr un medio púrpura-lila, selectivo para estreptococos fecales. Posteriormente se vertió en cajas petri esterilizadas rápidamente (para evitar que solidifique) a un lado del mechero y se cerraron inmediatamente. Se etiquetaron y dejaron encubar a 37°C las cajas petri durante un mínimo de 24 horas.

Inoculación e incubación. Con ayuda de un marcador permanente y etiquetas se dividieron cada una de las cajas petri en 8 partes, para las diluciones de cada muestra que fueron positivas. El sembrado en caja Petri fue bajo condiciones asépticas (cerca de un mechero Bunsen). Se utilizó un asa bacteriológica estéril para estriar la muestra de los tubos sobre el agar sólido, buscando aislar colonias mediante la técnica de cuadrantes. Las placas se invirtieron y se inocularon a $35-37^{\circ}\text{C}$ de 18 a 24 horas.

Prueba para la identificación de Coliformes Totales. De acuerdo a lo establecido en la NMX-AA-042-SCFI-2015 11/24

- **Prueba Presuntiva (Caldo lactosado).** Se inoculó la muestra en tubos con caldo lactosado con campanas Durham. Se incubaron a 35°C por 24 horas y se registraron



los tubos positivos (aquellos tubos que después del sembrado e incubación presentan turbidez y gas). Los tubos negativos (aquellos que no presentan turbidez o gas) de la prueba presuntiva con caldo lactosado se separaron y se desecharon. Los tubos positivos se resembraron con un asa bacteriológica estéril a los tubos con el agua triptona. Estos se llevaron a baño maría a 44°C por 24 horas y finalmente se tomó registro de los tubos positivos.

- **Prueba Indol (Kovacs).** La bacteria se cultiva por 48 horas en un caldo de triptona con NaCl al 0,5%. En la posterior detección del indol se usa el reactivo de Kovacs. Transcurrido ese tiempo se añadió 1 a 2 gotas de reactivo Kovacs, resbalando por la pared del tubo sin agitar y se registran los resultados de los tubos positivos
- **Prueba de Lactosa (Cajas Petri).** En el agar McConkey, las bacterias Gram positivas ven inhibido su crecimiento debido a la presencia de sales biliares y cristal violeta, permitiendo el desarrollo exclusivo de enterobacterias. Entre ellas, las cepas capaces de fermentar la lactosa (coliformes) liberan productos ácidos que disminuyen el pH que se detecta mediante el indicador rojo neutro. Las colonias lactosa (+) adquieren un color rojo o violeta, contrastando con el tono amarillento de las colonias lactosa (-).

Tinción de Gram. El procedimiento se llevó a cabo en 7 pasos principales:

- **Preparación del frotis y fijación:** Se extendió la muestra en un portaobjetos, se deja secar al aire y se fija mediante calor (pasando la lámina por la llama) o metanol para asegurar la adhesión de las bacterias.
- **Tinción primaria (Cristal Violeta):** Se cubrió el frotis con cristal violeta durante 1 minuto para teñir todas las células de color morado/violeta y se lavó suavemente con agua.
- **Mordiente (Lugol):** Se añadió solución de yodo (Lugol) durante 1 minuto para formar un complejo insoluble con el cristal violeta que lo fija en la pared celular, posteriormente se lavó con agua.
- **Decoloración (Alcohol-Acetona):** Se aplicó alcohol-acetona durante 5 a 10 segundos permitiendo que las bacterias Gram negativas pierdan el colorante debido a su fina capa de peptidoglicano, mientras que las Gram positivas retienen el tono morado. Se



lavo de inmediato con agua para detener el proceso.

- **Contratinción (Safranina):** Se cubrió con safranina (o fucsina básica) durante 45 segundos a 1 minuto para teñir de rosa o rojo las células que perdieron el colorante inicial.
- **Lavado y Secado:** Se enjuago con agua para retirar el exceso y se deja secar el portaobjetos durante 24 horas.
- **Observación:** Se observó en el microscopio con aceite de inmersión (objetivo 100x).

Interpretación de resultados en el microscopio: Las bacterias Gram positivas se presentan de color morado/violeta (retienen el cristal violeta) y las bacterias Gram negativas se presentan de color rosa/rojo (se tiñen con la safranina tras perder el cristal violeta).

Actividades de Gabinete

Expresión de resultados. Con el número de tubos de las pruebas confirmativas que hayan dado reacciones positivas, se calculará el número más probable de organismos coliformes, organismos coliformes termo tolerantes y *E. coli* en 100 ml de muestra, refiriéndose a las tablas estadísticas del NMP (TABLAS DEL NUMERO MAS PROBABLE (NMP) en la NMX-AA-042-SCFI-2015 11/24). En caso de que en la prueba presuntiva no muestre turbidez y producción de gas reportar el valor mínimo expresado en tablas correspondiente al número de tubos empleados. Cuando se utilicen diluciones diferentes a las establecidas en las tablas, se aplicará la siguiente fórmula:

$$NMP/100\ ml = \frac{10}{V} \times F\ (NMP/100\ ml) \quad \text{(Ecuación 9)}$$

Dónde:

F= Valor de tablas NMP/ml, este se obtendrá de la combinación de tubos positivos y negativos donde se tengan todos los tubos positivos en una misma dilución y las 2 diluciones posteriores a esa combinación.

V= volumen mayor de muestra y 10= factor de dilución

Cuando la combinación de resultados obtenidos no se encuentre en tablas se aplicará la siguiente fórmula:



$$NMP/100 \text{ ml} = \frac{N^{\circ} \text{ de tubos positivos} * 100}{\sqrt{\text{ml de muestra de tubos negativos} * \text{ml de muestra de los tubos}}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

5.4 Resultados y discusiones

Primer experimento (Aguas residuales domésticas).

En las tablas 33 y 34 se presentan los tubos positivos en la prueba confirmativa con Difco EC e Indol, el valor de tabla correspondiente y el NMP/100 ml de *E. Coli* en aguas residuales domesticas en la entrada y salida de los tratamientos evaluados (Humedal artificial de flujo subsuperficial y flujo libre).

Tabla 33. Determinación de NMP/100 ml de *E. Coli* en aguas residuales domesticas con prueba confirmativa.

Tratamientos	Prueba confirmativa Difco EC				NMP/100 ml
	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	Valor de Tabla	
Cárcamo	1/3	1/3	1/3	11	1100
Tanque séptico	3/3	3/3	2/3	NA	3819
	1 ml	10 ⁻¹	10 ⁻²		
HAFL-Ps	3/3	3/3	0/3	NA	270
HAFSS-Ps	0/3	0/3	1/3	3	30

Tabla 34. Determinación de NMP/100 ml de *E. Coli* en aguas residuales domesticas con prueba Indol.

Tratamientos	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	Valor de Tabla	NMP/100 ml
Cárcamo	3/3	0/3	1/3	3	300
Tanque séptico	3/3	2/3	1/3	NA	1130
	1 ml	10 ⁻¹	10 ⁻²		
HAFL-Ps	2/3	2/3	0/3	NA	207
HAFSS-Ps	0/3	0/3	0/3	<3	

En la siguiente tabla se muestran los tubos positivos en la prueba, el valor de tabla correspondiente y el NMP/100 ml de *Estreptococos* en aguas residuales domésticas en la entrada y salida de los tratamientos evaluados (Tabla 35).

Tabla 35. Determinación de NMP/100 ml de *Estreptococos* en Aguas residuales domésticas.

Tratamientos	Estreptococos				NMP/100 ml
	1 ml	10 ⁻¹	10 ⁻²	Valor de Tabla	
Cárcamo	3/3	3/3	3/3	>1,100	>11,000
Tanque séptico	3/3	3/3	3/3	>1,100	>11,000



HAFL-Ps	3/3	3/3	3/3	>1,100	>11,000
HAFSS-Ps	3/3	0/3	0/3	23	230

Escherichia coli. El valor más bajo fue el tratamiento HAFSS-Ps (<3 NMP/100 ml) seguido del HAFL-Ps (207 NMP/100 ml) y el valor más alto se encontró en el Tanque Séptico (1130 NMP/100 ml), esto se debe a que, al llegar al tanque séptico, gran parte de estas bacterias se asientan junto con la materia fecal en la capa de lodos (Inglisch, 2026). Los valores de los tratamientos con humedales artificiales son óptimos, ya que se mantienen en el umbral de referencia de 250 NMP/100 ml que establece la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas de aguas a cuerpos receptores para *E. coli*. Los patógenos se remueven en los HA principalmente mediante la filtración física, la sedimentación, depredación de microorganismos y sustancias antibacterianas que son liberadas a la rizosfera por las raíces de las plantas (Salgado-Bernal et al., 2022).

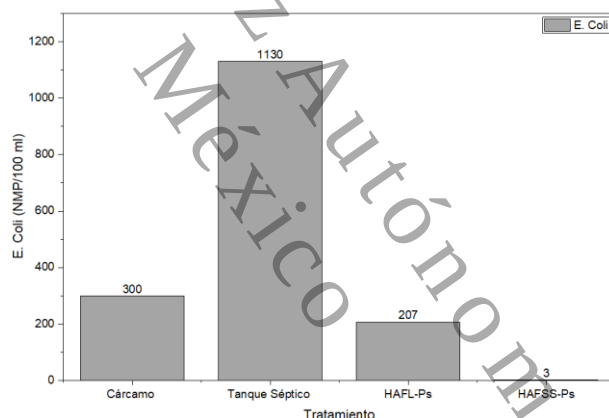


Figura 67. Valores NMP/100 ml de *E. Coli* de aguas residuales en la entrada y salida de los tratamientos evaluados. Fuente: Elaboración propia

Estreptococos. El valor más bajo fue el tratamiento HAFSS-Ps (230 NMP/100 ml) seguido y el valor más alto se encontró en el Cárcamo, Tanque Séptico y HAFL-Ps (>11,000 NMP/100 ml). Los estreptococos muestran una mayor capacidad de adaptación al estrés por falta de oxígeno, variaciones de pH y temperaturas fuera del cuerpo humano. Por esta razón, consiguen persistir durante las etapas de pretratamiento, a diferencia de otros grupos bacterianos que perecen con mayor rapidez (Rubiano, 2022). Sin embargo, el valor del tratamiento HAFSS-Ps si es óptimo, ya que se mantiene dentro del umbral de referencia de 250 NMP/100 ml que establece la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas de aguas a cuerpos receptores para *Estreptococos*, esto se debe a que los



humedales de flujo subsuperficial funcionan como un filtro biológico masivo (Nava, 2023), por lo que los estreptococos (que suelen viajar agrupados en cadenas o adheridos a micropartículas de materia orgánica) quedan físicamente atrapados por filtración, sedimentación intersticial y adsorción en las películas biológicas adheridas a la grava.

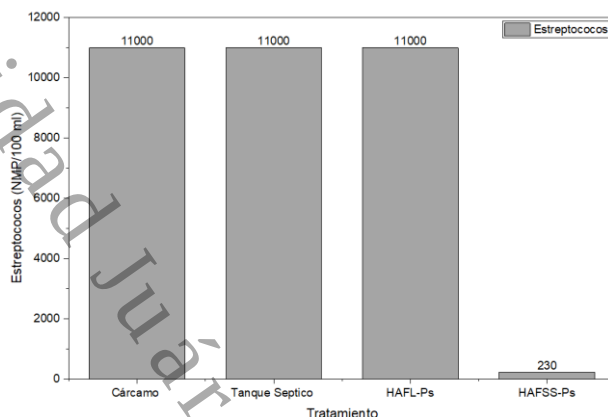


Figura 68. Valores NMP/100 ml de Estreptococos de aguas residuales en la entrada y salida de los tratamientos evaluados. Fuente: Elaboración propia

Segundo experimento (Aguas residuales de servicios cosméticos).

En las tablas 36 y 37 se presentan los tubos positivos en la prueba confirmativa con Difco EC e Indol con el valor de tabla correspondiente y el NMP/100 ml de *E. Coli* en aguas residuales de servicios cosméticos en la entrada y salida de los tratamientos evaluados (Humedal artificial de flujo subsuperficial y flujo libre).

Tabla 36. Determinación de NMP/100 ml de *E. Coli* en aguas residuales de servicios cosméticos con prueba confirmativa.

Tratamientos	Prueba confirmativa Difco EC					NMP/100 ml
	10 ml	1 ml	10 ⁻¹	10 ⁻²	Valor de Tabla	
Cárcamo	2/3	2/3	1/3	1/3	28	28
T. séptico	3/3	3/3	3/3	1/3	>2400	>2400
Tanque de Reacción (ARR)	1/3	1/3	1/3	0/3	11	11
HAFL-Ps-A	1/3	1/3	1/3	0/3	11	11
HAFSS-Ps-A	2/3	2/3	1/3	0/3	28	28

Tabla 37. Determinación de NMP/100 ml de *E. Coli* en aguas residuales de servicios cosméticos con prueba Indol.

Tratamientos	10 ml	1 ml	10 ⁻¹	10 ⁻²	Valor de Tabla	NMP/100 ml
Cárcamo	1/3	1/3	0/3	0/3	7	7
T. séptico	3/3	3/3	1/3	0/3	460	460



Tanque de Reacción (ARR)	1/3	1/3	1/3	0/3	11	11
HAFL-Ps-A	0/3	0/3	1/3	0/3	3	15
HAFSS-Ps-A	2/3	1/3	0/3	0/3	15	3

A continuación se presentan los tubos positivos en la prueba, el valor de tabla correspondiente y el NMP/100 ml de *Estreptococos* en aguas residuales domesticas en la entrada y salida de los tratamientos evaluados (Tabla 38).

Tabla 38. Determinación de NMP/100 ml de *Estreptococos* en Aguas residuales domesticas

Tratamientos	Estreptococos				
	10 ml	1 ml	10 ⁻¹	10 ⁻²	NMP/100 ml
Cárcamo	3/3	3/3	3/3	3/3	<1100
T. séptico	3/3	3/3	3/3	3/3	<1100
Tanque de Reacción (ARR)	3/3	3/3	3/3	3/3	<1100
HAFL-Ps-A	3/3	2/3	2/3	0/3	240
HAFSS-Ps-A	3/3	3/3	0/3	0/3	210

***Escherichia coli*.** El valor más bajo fue el tratamiento HAFSS-Ps (<3 NMP/100 ml) seguido del HAFL-Ps (207 NMP/100 ml) y el valor más alto se encontró en el Tanque Séptico (1130 NMP/100 ml). Los valores de los tratamientos con humedales artificiales son óptimos, ya que se mantienen en el umbral de referencia de 250 NMP/100 ml que establece la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas de aguas a cuerpos receptores para *E. coli*. Es importante recalcar que, al llegar al tanque de reacción con agua residual cosmética, la población de *E. coli* disminuye drásticamente, Esto ocurre porque, a pesar de tratarse una bacteria Gram-negativa, los tensioactivos presentes en el efluente actúan como agentes anfifílicos que solubilizan los lípidos de dicha estructura, mientras que los parabenos inhiben la síntesis de ácidos grasos esenciales para su integridad, comprometiendo de manera irreversible su viabilidad celular (Aguirre, 2022).

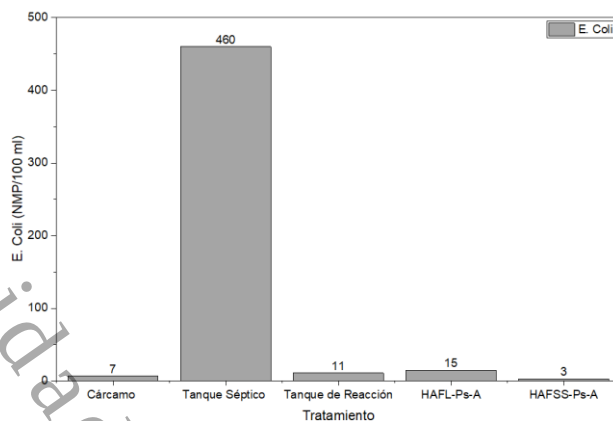


Figura 69. Valores NMP/100 ml de *E. Coli* de aguas residuales en la entrada y salida de los tratamientos evaluados. Fuente: Elaboración propia

Estreptococos. El valor más bajo fue el tratamiento HAFSS-Ps (230 NMP/100 ml) seguido y el valor más alto se encontró en el Cárcamo, Tanque Séptico y HAFL-Ps (>11,000 NMP/100 ml). Los estreptococos a diferencia de la *E. Coli* carecen de una membrana externa delgada de lípidos y azúcares; en su lugar, están envueltos por una capa de peptidoglicano considerablemente gruesa, rígida y reticulada, esta estructura actúa como un escudo físico que dificulta que los tensioactivos y ciertos conservantes presentes en el agua cosmética penetren rápidamente hacia el interior de la célula (Quevedo, 2022). El valor del tratamiento HAFSS-Ps es óptimo, ya que se mantiene dentro del umbral de referencia de 250 NMP/100 ml que establece la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas de aguas a cuerpos receptores para *Estreptococos*.

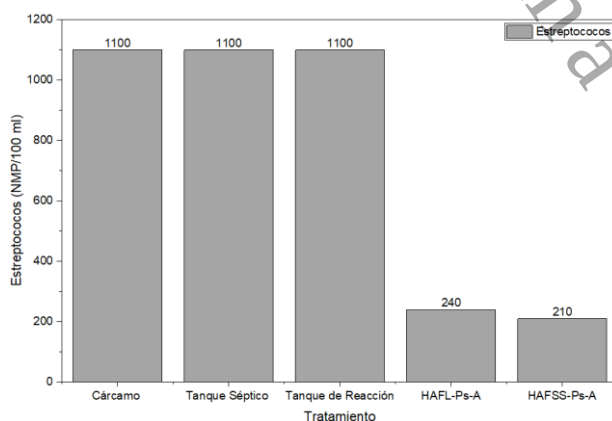


Figura 70. Valores NMP/100 ml de *Estreptococos* de aguas residuales en la entrada y salida de los tratamientos evaluados.

Presencia de *Estreptococos* mediante la Tinción de Gram. Las tablas 39 y 40 presentan el tipo de bacterias encontradas en los tratamientos evaluados con humedales

artificiales durante los dos experimentos utilizando un microscopio con objetivo de inmersión de 100x. Los estreptococos fecales (o enterococos) encontrados son bacterias Gram positivas que se distinguieron por su característico color morado.

Tabla 39. Tipo de bacterias encontradas en los tratamientos evaluados de aguas residuales domésticas

Tratamiento	Tipo de bacteria
Cárcamo	Gram positiva
Tanque séptico	Gram positiva
HAFL-Ps	Gram positiva
HAFSS-Ps	Gram positiva

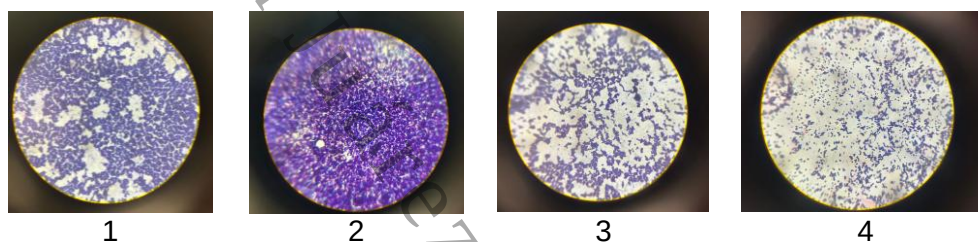


Figura 71. Bacterias Gram positivas (Streptococos fecales) en aguas residuales cosméticas (1- Cárcamo, 2-Tanque séptico, 3- HAFL-Ps, 4- HAFSS-Ps)

Tabla 40. Tipo de bacterias encontradas en los tratamientos evaluados de aguas residuales cosméticas

Tratamiento	Tipo de bacteria
Cárcamo	Gram positiva
Tanque Séptico	Gram positiva
Tanque de Reacción (ARR)	Gram positiva
HAFL-Ps-A	Gram positiva
HAFSS-Ps-A	Gram positiva

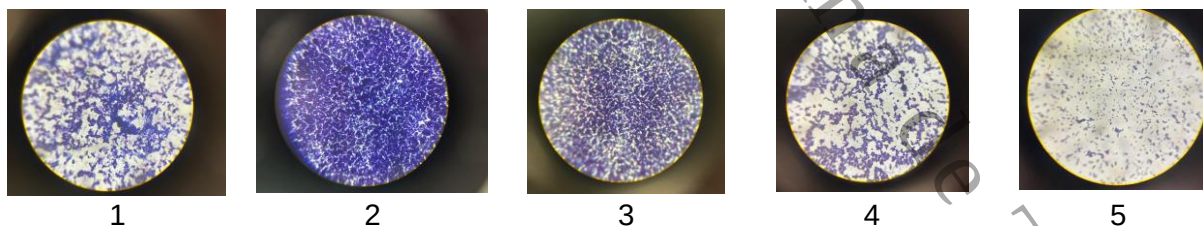


Figura 72. Bacterias Gram positivas (Streptococos fecales) en aguas residuales cosméticas (1- Cárcamo, 2-Tanque séptico, 3-Tanque de Reacción (ARR), 4- HAFL-Ps, 5- HAFSS-Ps).

5.5 Conclusión

Los humedales artificiales son eficientes en la reducción de la carga microbiológica de aguas residuales de origen doméstico e industrial. A través del análisis realizado de las muestras recolectadas, se determinó que existe una disminución significativa en las poblaciones de *Escherichia coli* y *Streptococos* en los tratamientos con relación al agua



residual cruda. El mejor tratamiento se obtuvo en el HAFSS-Ps (humedal artificial de flujo subsuperficial con *Pontederia sagittata*) logrando niveles de depuración superiores a los demás (460 a 3 NMP/100 ml de *E. Coli* y de 1100 a 240 NMP/100 ml de *Streptococos* fecales). Esta efectividad se atribuye a la interacción entre el sustrato, la vegetación y los microorganismos presentes en los reactores. La filtración, sedimentación y la competencia biológica dentro del humedal optimizan el tiempo de retención hidráulica, garantizando que el agua tratada cumpla con la normativa ambiental vigente. Una alta tasa de remoción de indicadores fecales es un indicador de excelente desempeño sanitario del humedal artificial, lo cual demuestra que el sistema cuenta con condiciones biológicas activas.

Los tratamientos evaluados con *Pontederia sagittata* cumplieron satisfactoriamente con los LMP que establece la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas de aguas a cuerpos receptores (250 NMP/100 ml para *Streptococos* fecales y 250 NMP/100 ml para *Escherichia coli*). Además, se encontraron poca presencia de cadenas de cocos Gram positivos mediante la Tinción de Gram en los tratamientos de humedales con flujo subsuperficial. Los *Streptococos* no disminuyen significativamente en el flujo libre con agua residual doméstica, lo que puede indicar contaminación ambiental, de suelos y presencia de materia orgánica animal, común en sistemas como los humedales artificiales.



5.6 Referencias

- Aguirre, J. D. (2022). La Química y los Cosméticos. *Revista de Química*, 36(2), 4-12.
<https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/25928>
- Ignacio English, K. T., Wallace-Morales, L. D., Ebanks Mongalo, B. F., & James Abraham, W. M. (2026). Calidad del agua para consumo humano en la comunidad indígena de Kara, Nicaragua. *Wani*, 83(16). <http://repositorio.bicu.edu.ni/1476/>
- Lebube. (2022). The beauty industry's water footprint & sustainable solutions.
<https://www.lebube.com>
- Marin, E., & et al., (2023). Evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales en México: Un enfoque en humedales artificiales. *Journal of Environmental Management*, 312, 110985. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.110985>
- Quevedo, CH, Basilio, VA y Santa Cruz, AG (2022). Presencia de *Escherichia coli* en la playa Pucusana, Lima, y su potencial efecto en la salud pública. *Acta Médica Peruana*, 39 (1), 31-39. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8446982>
- Rubiano Diaz, G. A., & Ortega Patiño, B. (2022). Análisis de los lineamientos y parámetros para el diseño de un prototipo de un tanque séptico con fafa para el tratamiento de aguas residuales en la escuela ubicada en la vereda Manuel sur–Ricaurte Cundinamarca. <https://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/11982>
- Salgado-Bernal, I., Durán-Domínguez, C., Cruz-Arias, M., Carballo-Valdés, M. E., & Martínez-Sardiñas, A. (2022). Bacterias rizosféricas con potencialidades fisiológicas para eliminar materia orgánica de aguas residuales. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000100002
- Secretaría de Economía (2015) NMX-AA-042-SCFI-2015. Análisis de agua - Enumeración de organismos Coliformes Totales, organismos Coliformes Fecales (Termotolerantes) y *Escherichia coli* – Método del número mas probable en tubos múltiples. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166147/nmx-aa-042-scfi-2015.pdf>



- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2022) NOM-001-SEMARNAT-2021, Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México D.F. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gs_c.tab=0
- Statista. (2023). Global cosmetics market growth and environmental challenges. Recuperado de <https://www.statista.com>
- Valero, J. A. G., Martínez, S. M., Terrero, M. A., Cano, Á. F., Díaz, M. M., Garrido, M. G., & Avilés, J. A. A. (2020). Fitorremediación de aguas residuales industriales mediante humedales artificiales para uso agrícola. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8145329>
- Vymazal, J. (2020). Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience. *Environmental Science and Technology*, 54(19), 11892–11907.



Capítulo 6. Conclusiones generales

El segundo capítulo se centra en el inventario y en la caracterización de las aguas residuales de servicios cosméticos en Villahermosa, en el cual se obtuvo que los servicios con mayor demanda son el tinte y los tratamientos capilares, los cuales constituyen descargas de agua residual domestica de 120 L/día aproximadamente. La decoloración es el servicio cosmético con la mayor concentración de DQO (8316.0 mg/L), reportando valores altos de color (8943.7 ± 240.1 UC) y turbiedad (222.3 ± 0.3 UNT) respectivamente en su agua cruda.

El tercer capítulo se centró en la etapa de adaptación de *Sagittaria latifolia* en las aguas residuales reconstituidas de servicios cosméticos a humedales de flujo subsuperficial y libre con vegetación y sin vegetación (testigo), teniendo mayor efectividad cuando se trabaja en HA de flujo subsuperficial. Las remociones más altas se obtuvieron las eficiencias de remoción más altas en el HAFL-SL, con un 94% de remoción de turbiedad (de 70.8 UNT a 4.0 UNT), 92.6% de color (de 3094.58 UC a 305.8 UC) y 88.8 % de DQO (de 1692.4 mg/L a 190 mg/L). Durante la fase los HA necesitan mantenimiento, que incluye la cosecha de la biomasa y la poda sanitaria periódica de los humedales para que estos se mantengan en un funcionamiento óptimo. Esto es esencial ya que sin un control las plantas en su fase terminal liberan sus nutrientes en el lugar de destino final, y provoca un fenómeno de corto circuito, situación que puede empeorar en época de lluvias.

La especie *Pontendaria sagittata* se logró estabilizar con agua residual doméstica y empezó a presentar mortandad en los HA 6 meses después de dosificar con las aguas residuales de servicios cosméticos con alta carga contaminante.

El capítulo 4 estuvo enfocado en el cambio de especie en los HA, la implementación de un pretratamiento y la disminución de la carga contaminante en el ARR para obtener una mejor adaptación, estabilización y mejores resultados en el tratamiento a largo plazo. El mejor tratamiento se obtuvo en el HAFSS-Ps-A (Flujo subsuperficial con agitación previa) en parámetros como color, turbiedad y DQO con 94%, 86% y 98% de eficiencias respectivamente. Sin embargo, en el HAFL-Ps-A (Flujo libre con agitación previa) se



obtuvieron los mejores resultados en la eliminación de metales como Hierro con 96%, Níquel con 50% y Cromo VI con 88%, así como de nitrato con 99%. Además, los tallos de la vegetación *Pontederia sagittata* son notablemente más grandes, anchos, altos y una mayor reproducción en el flujo libre, que, en el subsuperficial, estas crecen con mayor tamaño y son más resistentes a vientos.

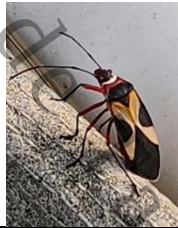
El en capítulo 5 se demostró que los HA son un tratamiento eficiente en la eliminación de patógenos. Existe una mayor disminución de colonias bacterianas como *E. Coli* y *Streptococos* en los HA de flujo subsuperficial que en flujo libre. Las mejores eficiencias se obtuvieron en el HAFSS-Ps-A (Flujo subsuperficial con agitación previa) con una disminución de 460 a 15 NMP/100 ml de *E. Coli* y de 1100 a 210 NMP/100 ml de *Streptococos*.

Finalmente, en el anexo A se hace un registro de los organismos presentes en los HA durante el tiempo de operación y evaluación en todos los tratamientos evaluados confirmando que los bioindicadores de la calidad del agua son una herramienta complementaria de gran importancia para evaluar la eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales junto a la caracterización fisicoquímica y cuantificación microbiana. Los HA como un hábitat para una diversa cantidad de insectos y anfibios, así como son fuente importante de alimento y refugio para aves y reptiles. En este experimento se encontraron una mayor cantidad de insectos y arácnidos en la etapa de estabilización y una mayor cantidad de avistamiento de reptiles, anfibios y aves en la etapa de operación y evaluación. En el anexo B se presenta la memoria fotográfica del proyecto dividido por cada una de las etapas: acondicionamiento de las unidades experimentales, colecta y siembra de la vegetación, preparación del agua residual reconstituida, estabilización de los HA, análisis de calidad del agua, pruebas microbiológicas y actividades de gabinete.

Se acepta la Hipótesis planteada al inicio ya que los HA operados con especies nativas alcanzaron eficiencias de remoción de DQO (>80%) en efluentes de servicios cosméticos.



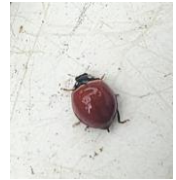
Anexo A. Catálogo de especies presentes en los Humedales Artificiales en el periodo del proyecto.

Clase	Nombre	Taxonomía	Observaciones	Fotografía	Humedal
Insectos	<i>Selatosomus aeneus</i> (Escarabaj o saltarin)	Filo: Artrópodo Orden: Coleópteros Suborden: Polifaga Familia: Elateridae	Son animales nocturnos, suelen alimentarse de caracoles, gusanos y babosas. Tienen un tamaño de 2.2 cm		HAFL-SL
Arácnidos	<i>Olios argelasius</i> (Araña cazadora)	Filo: Artrópodos Orden: Araneae Suborden: Araneomorfas Familia: Espárasidos	Color marrón y amarillo. Tiene un tamaño de 1.5 cm		HAFSS-SL
Insectos	<i>B. cinnara</i> (Carpeta de hoja de arroz)	Filo: Artrópodos Orden: Lepidópteros (Mariposas y polillas) Suborden: Papilionoidea: Mariposas diurnas Familia: Hespéridae (saltarinas)	Se alimentan del néctar de las flores Son menos activos durante climas fríos, lluviosos o extremadamente ventosos		HAFSS-SL y HAFL-SL
Insectos	<i>Scaeva pyrastris</i> (Mosca de las flores)	Filo: Artrópodos Orden: Diptera Suborden: Brachycera Familia: Syrphidae	Su temporada es el verano, son importantes polinizadores en su adultez.		HAFSS-SL
Insectos	<i>Dysdercus concinnus</i> (Chinche del algodón)	Filo: Artrópodos Orden: Hemiptera Suborden: Heteroptera Familia: Pyrrhocoridae	Son color castaño con la porción terminal del cuerpo de color oscuro; las ninfas son rojizas		HAFSS-SL
Anfibios	<i>D. femoralis</i> (Rana Arborescente)	Filo: Chordata Orden: Anura Familia: Hylidae	Sus mejores avistamientos son al amanecer. Se alimenta de otros insectos. Este tipo de ranas son bioindicadores muy sensibles a la calidad ambiental		HAFL-SL



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ciencias Ambientales



Reptil	<i>Ctenosaura similis</i> (Iguana negra de cola espinosa)	Filo: Cordados Orden: Lagartijas Suborden: Iguanas y parientes	Los individuos más jóvenes tienden a ser insectívoros, y los adultos herbívoros. Son lagartos diurnos y de rápido movimiento.		HAFSS-SL y HASS-PS
Insectos	<i>Cycloneda sanguinea</i> (Catarina sin manchas)	Orden: Escarabajos Suborden: Catarinas Familia: Mariquitas	Un tamaño de 6.0 mm. Es un control biológico de plagas. Su fuente de alimento son los áfidos.		HAFSS-SL y HAFL-SL
Arácnidos	<i>Leucauge venusta</i> (Araña de huerto)	Filo: Artrópodos Orden: Araneae Suborden: Araneomorphae Familia: Tetragnathidae	Son inofensivas para los humanos y actúan como un excelente control biológico, alimentándose de pequeñas plagas como moscas y chinches.		HAFSS-PS
Anfibio	<i>Leptodactylus melanonotus</i> (Rana de hojarasca)	Filo: Chordata Orden: Anura Familia: Leptodactylidae	Es de color café oscuro. Una especie de hábitos nocturnos, se reproduce en cuerpos de agua		HAFL-PS
Anfibio	<i>Smilisca baudinii</i> (Rana arbórea mexicana)	Filo: Chordata Orden: Anura Familia: Hylidae Género: Smilisca	Tiene manchas oscuras de color café. Es un anfibio nocturno, es una controladora biológica de plagas		HAFL-PS
Insecto	<i>Telebasis salva</i> (caballito del diablo)	Orden: Odonata Suborden: Zygoptera Familia: Coenagrionidae	La cabeza, tórax y abdomen son de color rojo brillante. Son más activos en días cálidos y soleados		HAFL-PS
Insecto	<i>Anartia fatima</i> (pavo real con bandas blancas)	Filo: Artrópodos Orden: Lepidópteros Familia: Nymphalidae	Es una mariposa diurna que prefiere lugares sombreados. Es de color marrón dorado con una banda blanca en las alas y manchas rojas internas.		HAFL-PS



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Biológicas
Maestría en Ciencias Ambientales



Insecto	<i>Hydrometra stagnorum</i> (Chinche de agua)	Filo: Artrópodos Orden: Hemiptera Suborden: Heteroptera Familia: Hydrometridae	Su cuerpo y patas son finos y largos. Vive en aguas no contaminadas. Depredan a larvas y mosquitos		HAFL-PS
Ave	<i>Pitangus sulphuratus</i> (Benteveo común)	Filo: Chordata Orden: Passeriformes Familia: Tyrannidae	Es un ave pacífica y se alimenta de larvas, insectos o lombrices		HAFSS-PS y HAFL-PS
Insecto	<i>Condylostylus patibulatus</i> (mosca de patas largas)	Filo: Artrópodos Orden: Diptera Familia: Dolichopodidae	Es un controlador biológico de la población de plagas		HAFSS-PS
Insecto	<i>Antigonus erosus</i> (Saltarina alas de espuela negra)	Filo: Artrópodos Orden: Lepidoptera Familia: Hesperidae	Se caracteriza por un vuelo rápido y un mecanismo de defensa ágil.		HAFSS-SL y HAFSS-PS



Anexo B. Productos adicionales del proyecto

Capítulo de libro electrónico publicados

- Barco Méndez M. G., López Ocaña G., Guerrero Zarate D. (2024). *Sagittaria latifolia* en la Remoción de Color y Turbiedad de Aguas Residuales Domésticas Vía Humedal Artificial de Flujo Libre. En Academia Journals, Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo y el PYSEIP (Eds); Memorias del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals (Tolcayuca, Hgo. México; Volumen 16, no. 10, tomo 6 ingenierías; pp 6.68-6.72). eLibro online con ISSN: 1946-5351. <https://static1.squarespace.com/static/55564587e4b0d1d3fb1eda6b/t/6785fc887084e314f326f8b7/1736834191768/Tomo+06.1+-+Ingenieras+-+Academia+Journals+Hidalgo+2024.pdf>
- Barco Méndez M. G., López Ocaña G., Guerrero Zarate D. (2025). Inventario y Caracterización de Aguas Residuales de Servicios Cosméticos en Villahermosa, Tabasco. En Academia Journals, Instituto Tecnológico de Chetumal; Memorias del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals (Chetumal México; Volumen 17, no. 03, tomo 6 ingenierías; pp 6.31-6.35). eLibro online con ISSN: 1946-5351. <https://static1.squarespace.com/static/55564587e4b0d1d3fb1eda6b/t/6852d0c9b1aa590c975bf623/1750257890726/Parte+1+-+Tomo+06+-+Ingenier%C3%ADas+Art%C3%ADculos+del+Congreso+Academia+Journals+Chetumal+2025.pdf>

Artículo Científico publicado

- Barco-Méndez, M. G., López-Ocaña, G., Guerrero-Zarate, D., Torrez Balcázar, C. A., & Uribe López, M. del C. (2025). Tratamiento de Aguas Residuales de Servicios Cosméticos en Humedales Artificiales con *Sagittaria latifolia*. Tendencias En energías Renovables Y Sustentabilidad, 4(3), 115–122. <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.492>



Anexo C. Memoria fotográfica

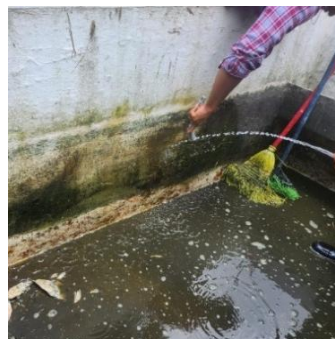
Acondicionamiento de las unidades experimentales



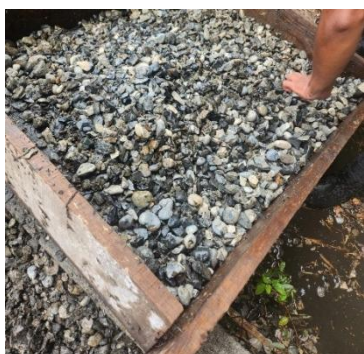
Planta piloto de tratamiento de HA



Laboratorio de Tecnología del Agua



Lavado de los reactores



Lavado y tamizado de la grava (medio de soporte)



Llenado de los reactores con grava



Vaciado de reactores

Colecta y siembra de la vegetación



Medición de datos biométricos de la vegetación evaluada en HA



Preparación del medio de soporte



Siembra de la vegetación en los HA

Preparación del agua residual cosmética



Productos utilizados en la preparación del agua residual reconstituida



Instalación del agitador en la parte superior del tanque de distribución



Agitador en funcionamiento en el tanque de distribución de los HA



Agua residual reconstituida de servicios



Formación de espuma en el ARR en el tanque de reacción



Agua residual reconstituida de servicios cosméticos después de la agitación

Crecimiento y estabilización de la vegetación



Evaluación del crecimiento de la vegetación sembrada en el HAFSS



Sagittaria latifolia



Crecimiento de *Sagittaria latifolia*



Etapas de estabilización de la especie *Sagittaria latifolia* en los HA

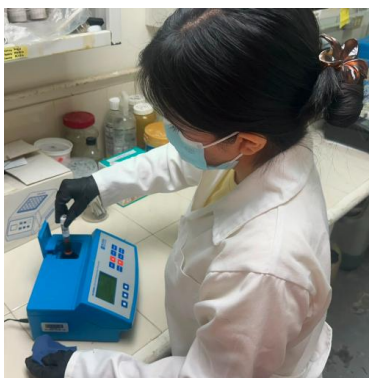


Crecimiento de la vegetación en la etapa de operación y evaluación



Siembra de *Pontederia sagittata* en los HA

Análisis de calidad del agua



Determinación de metales, nutrientes y DQO

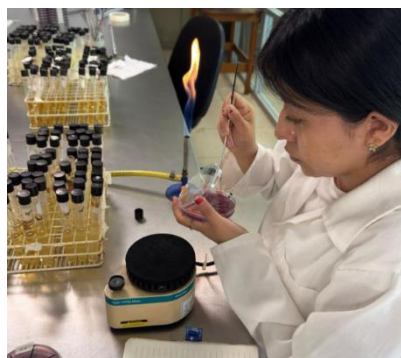


Determinación de color y turbiedad



Determinación de parámetros de control

Pruebas microbiológicas del agua residual



Estrado en cajas petri en la prueba de *Streptococos*



Verificación de tubos positivos en la prueba de *E. Coli*



Inoculación en tubos positivos para la prueba confirmativa.



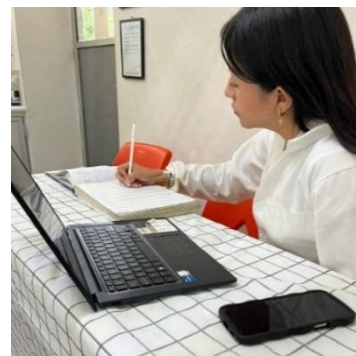
Actividades de gabinete



Interpretación de resultados en microscopio



Análisis estadístico de datos



Toma de datos durante campañas de monitoreo (manual y digital)



Anexo D. Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional

Título de la tesis:	Eficiencia de <i>Sagittaria latifolia</i> y <i>Pontederia sagittata</i> en el tratamiento de efluentes cosméticos vía humedales artificiales
Autor(a) de la tesis:	Monserrat Guadalupe Barco Méndez
ORCID:	https://orcid.org/0009-0006-6001-4537
Resumen de la tesis	Las aguas residuales de servicios cosméticos representan un grave problema de contaminación ambiental debido a su alta demanda química de oxígeno (DQO) y un crecimiento en su generación, lo que ha impulsado el desarrollo de tecnologías de tratamiento que garanticen descargas de estos efluentes alineadas con la normativa vigente. Entre los tratamientos que han presentado mayor aceptación son los humedales artificiales (HA), que son alternativas ecológicamente viables, de fácil manejo y bajo costo. Sin embargo, aunque esta tecnología se emplea en el tratamiento de aguas residuales domésticas, aún existe la necesidad de ver el comportamiento de estos sistemas en aguas residuales de índole cosmética utilizando diferentes especies nativas de la región, así como analizar la presencia de microorganismos. En este trabajo se estudió la eficiencia de los humedales artificiales en la depuración de los contaminantes, reducción de metales pesados, nutrientes y microorganismos presentes en las aguas residuales de servicios cosméticos. En el capítulo 1 se presenta el protocolo de tesis, en el capítulo 2 el inventario y caracterización de las aguas residuales de servicios cosméticos en Villahermosa, Tabasco, en el capítulo 3 el tratamiento de aguas residuales de servicios cosméticos en humedales artificiales con <i>Sagittaria latifolia</i>, en el capítulo 4 el tratamiento de estos efluentes en Humedales Artificiales con <i>Pontederia sagittata</i>, en el capítulo 5 la remoción de microorganismos en aguas residuales domésticas y de servicios cosméticos tratadas vía humedales artificiales con <i>Pontederia sagittata</i>. Finalmente, el capítulo 6 presenta las conclusiones y recomendaciones. Se estimó la generación de aguas residuales de Villahermosa por tipo de servicio resultando una aportación de 22 L/cliente/d. Los servicios con mayor contaminación son los tintes y decoloración capilar, las aguas residuales generadas presentan concentraciones de color de 4720.75 ± 2938.27 UC, turbiedad de 199.13 ± 47.78 UNT y DQO de 5404.75 ± 2236.37 mg/L. De manera general al evaluar el desempeño de <i>S. latifolia</i> en HA experimentales de flujo libre y flujo subsuperficial las mejores eficiencias en la remoción de contaminantes básicos se presentaron en el HAFL-SL, con un 94% de remoción de turbiedad 92.6% de color y 88.8 % de DQO. En cuanto a la especie <i>P. sagittata</i>, el primer experimento se obtuvieron las mejores eficiencias en el tratamiento HAFSS-Ps-A, con remociones totales de turbiedad, color y DQO de 94.8%, 94.2% y 98.8% respectivamente, en el segundo experimento se obtuvieron las mejores eficiencias en el tratamiento HAFSS.Ps-S con remociones de turbiedad, color y DQO de 85%, 76% y 94% respectivamente. De manera general, el experimento con aireación y sedimentación presenta los mejores resultados en el tratamiento de los efluentes cosméticos en HA. Los HA operados con estas especies nativas alcanzaron eficiencias de remoción de DQO (>70%). En la remoción de los microorganismos, se obtuvo la mejor eficiencia en el tratamiento HAFSS-Ps, con un 99.7% de remoción de <i>E. Coli</i> (1130 a <3 NMP/100 ml) y 97.9% de <i>Estreptococos</i> (>11,000 a 230 NMP/100 ml) en el primer experimento con aguas residuales domésticas. En cuanto al segundo experimento con aguas residuales cosméticas el HAFSS-Ps-A presentó las mejores eficiencias con un 72% de remoción de <i>E. Coli</i> (11 a 3 NMP/100 ml) y 80.9% de <i>Estreptococos</i> (>1,100 a 210 NMP/100 ml), lo que indica que la <i>E. Coli</i> se elimina mayormente



	en el tanque de reacción con efluentes cosméticos antes de llegar a los humedales y los estreptococos son más persistentes en un HA de flujo libre.
Palabras clave	Aguas residuales, humedales artificiales, microorganismos, <i>Pontederia sagittata</i> , <i>Sagittaria latifolia</i> , servicios cosmeticos.
Referencias citadas	Lebube. (2022). The beauty industry's water footprint & sustainable solutions. https://www.lebube.com Lim, H. Y., & Kwon, K. H. (2023). Sustainable assessment of the environmental activities of major cosmetics and personal care companies. Sustainability, 15(18), 13286. https://doi.org/10.3390/su151813286 Marin, E., & et al., (2023). Evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales en México: Un enfoque en humedales artificiales. Journal of Environmental Management, 312, 110985. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.110985 Magaña-Flores, A. and López-Ocaña, G., Domestic wastewater treated with <i>Sagittaria latifolia</i> in constructed wetlands. DYNA, 90(226), pp. 27-35, April - June, 2023. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532023000200027 Statista. (2023). Global cosmetics market growth and environmental challenges. Recuperado de https://www.statista.com/statistics/1447701/leading-factors-beauty-product-sustainable-worldwide/?srsltid=AfmBOorJB0I7z4HLZOH6p_MERrXfRzIjvY-Ktm4EubOR61yMfAYkNyx CONAGUA. (2021). Informe de sostenibilidad del agua en México 2021. Comisión Nacional del Agua, México. https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM%202021.pdf Díaz, S., Settele, J., & Brondízio, E. (2020). The Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). https://files.ipbes.net/ipbes-web-prod-public-files/2020-02/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers_en.pdf Martínez-Almira, D., Vázquez-Villegas, P., & Jiménez-Sierra, C. (2022). Aprovechamiento de plantas macrófitas para el tratamiento de aguas residuales en humedales artificiales. Revista de Ciencia Ambiental, 18(2), 45-56. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972007000400002 Ramsar. (2021). Global Wetland Outlook: State of the World's Wetlands and their Services to People. Ramsar Convention on Wetlands. https://medwet.org/wp-content/uploads/2021/12/RamsarGWO_SpecialEdition2021%E2%80%9393ENGLISHWEB.pdf Saeed, T., & Sun, G. (2021). A review on nitrarene and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Influence of design and operational parameters. Science of The Total Environment, 757, 143982. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143982 Vymazal, J. (2020). Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience. Environmental Science and Technology, 54(19), 11892–11907. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20795704/ Wen, Y., Cheng, S., Wang, X., & Chen, H. (2019). The use of constructed wetlands for treating industrial wastewater. Ecological Engineering, 138, 33-44. Wu, H., Fan, J., & Zhang, Z. (2020). Constructed wetlands for sustainable wastewater treatment. Water, 12(2), 402. https://doi.org/10.3390/w12020402 Reynolds, K. A. (2021). Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica. Latinoamérica, 2001, 4849. https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2007/10/Tratamiento-aguas-residuales-Latinoamerica.pdf Pire Sierra, M. C., Rodríguez Sargent, K., Fuenmayor Reyes, M., Fuenmayor, Y., Acevedo, H., Carrasquero Ferrer, S., & Díaz Montiel, A. (2021). Biodegradabilidad de las diferentes fracciones de agua residual producidas en una tenería. Ciencia e Ingeniería



	Neogranadina, 21(2), https://revistas.umng.edu.co/index.php/rcin/article/view/257 Ecological Engineering, 61(1), 282-291- DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.09.014 López-Ocaña. G., Bautista M. R. G., Valdes M. A., Torres B, C, A., López V, R., Pérez S, E., y Pampillón G.L. (2019) Spatial distribution behavior of basic Pollutants in a subsurface-flow wetland with <i>Thalia geniculata</i> . Int. J. Environ. Impacts, 2 (2), 145- 160. DOI: 10.2495/EI-V2- 145-160. NMX-AA-034-SCFI-2001-Analisis de agua. Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf . Llanos-Lizcano, A., Barranza, E., Narvaez, A., Varela, L., y Caelles-Orsorio, A. (2019). Efficiency of pilot-scale horizontal subsurface Flow constructed wetlands and microbial community composition operating under tropical conditions. International Journal of Phytoremediation, 30(8), 1-9.DOI: 10.1080/15226514.2018.1523874 García O, J. A., López O, G., y Torres B, C. (2019) evaluación de los medios de soporte en humedales artificiales con vegetación <i>Sagittaria latifolia</i> en la remoción de contaminantes básicos. Revista Iberoamericana de las Ciencias biológicas y Agropecuarias, 8 (15), 16-31, DOI: 10.23913/cibav8i15.82. Castañeda V, A. A., y Flores L, H. E. (2020). Tratamiento de aguas residuales domesticas mediante plastas macrófitas típicas en Los Altos de Jalisco, México. PAAKAT: Revista de Tecnología y Sociedad, 5(3), 1-13. http://www.udgvirtual.udg.mx/paakat/index.php/paakat/article/view/208/298 Bharagava, R.N. (2020). Emerging Eco-friendly Green Technologies for Wastewater Treatment, Microorganisms for Sustainability. Springer, 18, 311-327. DOI: 10.1007/978-981-15-1390-9_14. Demarco, C. F., Alfonso, T. F., Pieniz, S., Quadro, M. S., Camargo, F. A. de O., & Andreazza, R. (2019). Phytoremediation of heavy metals and nutrients by the <i>Sagittaria montevideensis</i> into an anthropogenic contaminated site at Southern of Brazil. International Journal of Phytoremediation, 21(11), 1145–1152. https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1612843 McKnight, A. M., Gannon, T. W., & Yelverton, F. (2021). Phytoremediation of azoxystrobin and imidacloprid by wetland plant species <i>Juncus effusus</i> , <i>Pontederia cordata</i> and <i>Sagittaria latifolia</i> . International Journal of Phytoremediation, 24(2), 196–204.	5-19.
--	---	-------