



**UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO**  
**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

---

---



***Cyperus odoratus en el tratamiento de agua residual  
doméstica en un humedal de flujo subsuperficial***

**Tesis de Licenciatura**

Que para obtener el título de:  
**Ingeniero Ambiental**

Presenta:

**Libni Mahli Javier Rodríguez**

Director:

**Dr. Gaspar López Ocaña**

Co-Director

**Dra. Liliana Pampillón González**

**Centro, Tabasco, a 25 de septiembre de 2020**

# Cyperus odoratus en el tratamiento de agua residual doméstica en un humedal de flujo subsuperficial

Por Libni Mahli Javier Rodríguez

---

CANTIDAD DE PALABRAS 18628

HORA DE ENTREGA

01-JUL-2025 03:08 P. M.

NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO

117019428

# Cyperus odoratus en el tratamiento de agua residual doméstica en un humedal de flujo subsuperficial

INFORME DE ORIGINALIDAD

20%

ÍNDICE DE SIMILITUD

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://docplayer.es">docplayer.es</a> Internet	659 palabras — 4%
2	<a href="http://www.conabio.gob.mx">www.conabio.gob.mx</a> Internet	314 palabras — 2%
3	<a href="http://www.archivos.ujat.mx">www.archivos.ujat.mx</a> Internet	299 palabras — 2%
4	<a href="http://es.scribd.com">es.scribd.com</a> Internet	232 palabras — 1%
5	<a href="http://ia601207.us.archive.org">ia601207.us.archive.org</a> Internet	159 palabras — 1%
6	<a href="http://aldeser.org">aldeser.org</a> Internet	145 palabras — 1%
7	<a href="http://www.ciba.org.mx">www.ciba.org.mx</a> Internet	132 palabras — 1%
8	<a href="http://dspace.ucuenca.edu.ec">dspace.ucuenca.edu.ec</a> Internet	104 palabras — 1%
9	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Internet	102 palabras — 1%
10	<a href="http://ri.ujat.mx">ri.ujat.mx</a> Internet	101 palabras — 1%

11	<a href="http://epdf.pub">epdf.pub</a> Internet	96 palabras — 1 %
12	<a href="http://www.slideshare.net">www.slideshare.net</a> Internet	61 palabras — < 1 %
13	<a href="http://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a> Internet	56 palabras — < 1 %
14	<a href="http://repositorio.pascualbravo.edu.co">repositorio.pascualbravo.edu.co</a> Internet	47 palabras — < 1 %
15	<a href="http://repositorio.una.ac.cr">repositorio.una.ac.cr</a> Internet	45 palabras — < 1 %
16	<a href="http://www.ptolomeo.unam.mx:8080">www.ptolomeo.unam.mx:8080</a> Internet	39 palabras — < 1 %
17	<a href="http://www.scribd.com">www.scribd.com</a> Internet	37 palabras — < 1 %
18	<a href="http://www.invemar.org.co">www.invemar.org.co</a> Internet	36 palabras — < 1 %
19	<a href="http://up-rid.up.ac.pa">up-rid.up.ac.pa</a> Internet	35 palabras — < 1 %
20	<a href="http://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co">expeditiorepositorio.utadeo.edu.co</a> Internet	31 palabras — < 1 %
21	<a href="http://produccioncientifica.ucm.es">produccioncientifica.ucm.es</a> Internet	29 palabras — < 1 %
22	<a href="http://www.cahiersagricultures.fr">www.cahiersagricultures.fr</a> Internet	28 palabras — < 1 %
23	<a href="http://repositorio.unica.edu.pe">repositorio.unica.edu.pe</a> Internet	27 palabras — < 1 %

24	<a href="https://tesis.ipn.mx">tesis.ipn.mx</a> Internet	27 palabras — < 1%
25	<a href="https://repository.udistrital.edu.co">repository.udistrital.edu.co</a> Internet	26 palabras — < 1%
26	<a href="https://dspace.esPOCH.edu.ec">dspace.esPOCH.edu.ec</a> Internet	25 palabras — < 1%
27	<a href="https://repositorio.ucundinamarca.edu.co">repositorio.ucundinamarca.edu.co</a> Internet	24 palabras — < 1%
28	<a href="https://repositorio.uta.edu.ec">repositorio.uta.edu.ec</a> Internet	24 palabras — < 1%
29	<a href="https://repositorio.ug.edu.ec">repositorio.ug.edu.ec</a> Internet	23 palabras — < 1%
30	<a href="https://api-repositorio.unia.edu.pe">api-repositorio.unia.edu.pe</a> Internet	22 palabras — < 1%
31	<a href="https://saludurbanaorg.files.wordpress.com">saludurbanaorg.files.wordpress.com</a> Internet	21 palabras — < 1%
32	<a href="https://rraae.cedia.edu.ec">rraae.cedia.edu.ec</a> Internet	20 palabras — < 1%
33	<a href="https://www.doccity.com">www.doccity.com</a> Internet	19 palabras — < 1%
34	<a href="https://repositorio.uaaan.mx">repositorio.uaaan.mx</a> Internet	16 palabras — < 1%
35	<a href="https://www.cram.com">www.cram.com</a> Internet	16 palabras — < 1%
36	<a href="https://edoc.pub">edoc.pub</a> Internet	14 palabras — < 1%

37	<a href="https://repositorio.umsa.bo">repositorio.umsa.bo</a> Internet	14 palabras — < 1%
38	Dagoberto Durán Hernández, Olivia Tzintzun Camacho, Onécimo Grimaldo-Juárez, Daniel González-Mendoza et al. "Compendio Científico en Ciencias Agrícolas y Biotecnología (Vol 2)", Omnia Publisher SL, 2019 Crossref	13 palabras — < 1%
39	<a href="https://es.slideshare.net">es.slideshare.net</a> Internet	13 palabras — < 1%
40	<a href="http://www.sinembargo.mx">www.sinembargo.mx</a> Internet	13 palabras — < 1%
41	Javier Cruz Gómez, Margarita Chávez Martínez, Igor Brilla, Ramón Salazar Velasco et al. "Compendio de Ciencias Aplicadas 2018", Universidad Nacional Autonoma de Mexico, 2018 Crossref	12 palabras — < 1%
42	<a href="http://aidisnet.org">aidisnet.org</a> Internet	12 palabras — < 1%
43	<a href="http://rinacional.tecnm.mx">rinacional.tecnm.mx</a> Internet	12 palabras — < 1%
44	<a href="http://www.oaxaca.gob.mx">www.oaxaca.gob.mx</a> Internet	12 palabras — < 1%
45	<a href="http://core.ac.uk">core.ac.uk</a> Internet	11 palabras — < 1%
46	<a href="http://dokumen.tips">dokumen.tips</a> Internet	11 palabras — < 1%
47	<a href="http://eprints.uanl.mx">eprints.uanl.mx</a> Internet	11 palabras — < 1%

48	<a href="http://google.redalyc.org">google.redalyc.org</a> Internet	11 palabras — < 1%
49	<a href="http://repositorio.usanpedro.edu.pe">repositorio.usanpedro.edu.pe</a> Internet	11 palabras — < 1%
50	<a href="http://repositorio.xoc.uam.mx">repositorio.xoc.uam.mx</a> Internet	11 palabras — < 1%
51	<a href="http://www.estudiosecologistas.org">www.estudiosecologistas.org</a> Internet	11 palabras — < 1%
52	<a href="http://www.mayoclinic.org">www.mayoclinic.org</a> Internet	11 palabras — < 1%
53	<a href="http://catalonica.bnc.cat">catalonica.bnc.cat</a> Internet	10 palabras — < 1%
54	<a href="http://colposdigital.colpos.mx:8080">colposdigital.colpos.mx:8080</a> Internet	10 palabras — < 1%
55	<a href="http://pcientificas.ujat.mx">pcientificas.ujat.mx</a> Internet	10 palabras — < 1%
56	<a href="http://publications.iom.int">publications.iom.int</a> Internet	10 palabras — < 1%
57	<a href="http://rcmarinas.ens.uabc.mx">rcmarinas.ens.uabc.mx</a> Internet	10 palabras — < 1%
58	<a href="http://repositorio.ucv.edu.pe">repositorio.ucv.edu.pe</a> Internet	10 palabras — < 1%
59	<a href="http://repositorio.unbosque.edu.co">repositorio.unbosque.edu.co</a> Internet	10 palabras — < 1%
60	<a href="http://repositorio.uns.edu.pe">repositorio.uns.edu.pe</a> Internet	10 palabras — < 1%

61	<a href="http://repositorio.upsin.edu.mx">repositorio.upsin.edu.mx</a> Internet	10 palabras — < 1%
62	<a href="http://repositorioinstitucional.uaslp.mx">repositorioinstitucional.uaslp.mx</a> Internet	10 palabras — < 1%
63	<a href="http://ri.uaemex.mx">ri.uaemex.mx</a> Internet	10 palabras — < 1%
64	<a href="http://www.aguazul.gov.co">www.aguazul.gov.co</a> Internet	10 palabras — < 1%
65	<a href="http://www.crautonomia.gov.co">www.crautonomia.gov.co</a> Internet	10 palabras — < 1%
66	<a href="http://www.zaragoza.unam.mx">www.zaragoza.unam.mx</a> Internet	10 palabras — < 1%

EXCLUIR CITAS

ACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

DESACTIVADO

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS < 10 PALABRAS

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco  
México



## Liberación de impresión



UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN



2020  
LEONA VICARIO  
PROFESORA EN JEFE DE LA ESCUELA

SEPTIEMBRE 30 DE 2020

**C. LIBNI MAHLI JAVIER RODRÍGUEZ  
PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL  
PRESENTE**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se les autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: **"CYPERUS ODORATUS EN EL TRAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA EN UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL"**, asesorado por el Dr. Gaspar López Ocaña y Dra. Liliana Pampillón González sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por el Dr. Arturo Valdés Manzanilla, Dr. Raúl German Bautista Margulis, Dr. Gaspar López Ocaña Dr. Gaspar López Ocaña, M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar y MIPA. Rocío López Vidal.

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

  
**DR. ARTURO GARRIDO MORA  
DIRECTOR**

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



## Carta de autorización

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de Licenciatura denominado: **"CYPERUS ODORATUS EN EL TRAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA EN UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL"**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en éste documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el Día 30 de Septiembre de Dos Mil Veinte.

AUTORIZO

LIBNI MAHLI JAVIER RODRÍGUEZ



## Dedicatorias y agradecimientos

### A DIOS Y LA VIDA

Por poner en mi camino a cada una de las personas que fueron de ayuda e hicieron más soportable esta travesía y por favorecer las circunstancias y darme fuerza para continuar.

### A MIS PADRES

Por inculcarme valor y valentía para enfrentar la vida a pesar de las adversidades, por darme la educación y por estar en cada una de las etapas de mi formación personal y profesional.

### AGRADECIMIENTOS

Al doctor Gaspar López Ocaña por abrirme las puertas del laboratorio, por guiarme y orientarme durante el transcurso de mi investigación y sobre todo por brindarme su tiempo durante esta etapa. Sin usted nada de esto se hubiera podido lograr. Estaré eternamente agradecida.

A mis profesores, por formarme profesionalmente y darme las herramientas para ser un buen ingeniero ambiental y a mi alma mater por brindarme las aulas, equipo y herramientas para mi formación.

A mi codirectora la Dr. Liliana Pampillon y a mis sinodales por darse el tiempo de revisar mi trabajo, por ser pacientes conmigo y por su disponibilidad para instruirme durante mi investigación.

A los amigos que hice durante la carrera: Elías, Selene, Luz, Valentina, Eneida, Wendy, Absuyra por brindarme su apoyo incondicional y por estar en las buenas y las malas. Siempre los llevaré en mi corazón.

Al laboratorio de tecnología del agua: Mafer, Fátima, Luis, Reyna, Perla, Janeth, Martha, Nury, Karen, Elisa y residentes del Tecnológico, por enseñarme sobre el compañerismo y el apoyo mutuo, son todos personas excepcionales. Sin ustedes todo hubiera sido muy difícil.



## RESUMEN

Los humedales artificiales (HA) son alternativas viables por su fácil construcción, operación, mantenimiento y pueden remover contaminantes orgánicos e inorgánicos entre otros. En este estudio se evalúa el desempeño de *Cyperus odoratus* en humedales de flujo subsuperficial (HAFS) en la remoción de contaminantes básicos físicos. Se establecieron dos HA, uno subsuperficial sin especie (HAFS-B) y otro con especie (HAFS-Co); los cuales tenían dimensiones de 1.2 m ancho, 2.5m de largo y 0.5 m de tirante, con medio de soporte de con diámetro ( $\emptyset$ ) de partícula de  $2.2\pm 0.6$  cm, porosidad ( $\eta$ ) de  $48.7\pm 0.3$ , densidad aparente de  $1514.3\pm 3.2$  kg/m<sup>3</sup> y densidad real de  $2796.0\pm 31.1$  kg/m<sup>3</sup>. Durante la etapa de estabilización el gasto total que recibe el HAFS-Co presenta un Qmed de  $193.1\pm 14.8$  L/día, presentado un Qmín de 164.2 L/día y un Qmáx de 221.8 L/día. El HAFS-B operó con un Qmed de  $191.7\pm 15.2$  L/día, presentado un Qmín de 164.2 L/día y un Qmáx de 221.8 L/día. En el experimento se les determinó temperatura, pH, oxígeno disuelto (OD), sólidos disueltos totales (SDT), conductividad eléctrica (CE), color turbiedad y potencial oxido reducción (POR). Al final de la evaluación el HAFS-Co presentó el mejor tratamiento y los valores fueron pH  $8.0\pm 0.2$ , temperatura  $27.8\pm 2.5$  °C, CE  $1467.1\pm 79.5$   $\mu$ s/cm, SDT  $734.7\pm 36.0$  mg/L, color  $209.3\pm 86.5$  UC, turbiedad  $9.5\pm 5.5$  UTN, OD  $5.9\pm 0.7$  mg/L y POR  $73.4\pm 112.3$  mV. Los resultados obtenidos permiten concluir que el HAFS con *Cyperus odoratus* presentó un porcentaje de remoción de turbiedad y color durante la fase de arranque de 90.8% y 82.6% respectivamente, y a partir de la estabilización de 88.5% y 80.4% respectivamente.

Palabras claves: Contaminantes básicos, eficiencia de remoción, humedales artificiales de flujo subsuperficial, macrófitas.



## Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. JUSTIFICACIÓN .....	2
3. ANTECEDENTES .....	3
4. HIPÓTESIS .....	5
5. OBJETIVOS.....	5
5.1. Objetivo general .....	5
5.2. Objetivos específicos .....	5
6. ÁREA DE ESTUDIO .....	6
6.1. Ubicación geográfica .....	6
6.2. Características climáticas .....	7
7. MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
7.1 Generalidades sobre el proyecto .....	8
7.1.1. Análisis de costos de la unidad experimental.....	8
7.1.2. Unidades experimentales .....	9
7.1.3. Agua residual .....	10
7.2. ACTIVIDADES DE CAMPO .....	10
7.2.1. Adecuación de las unidades experimentales .....	10
7.2.2 Selección y adecuación del medio de soporte .....	11
7.2.3 Selección y colecta de la especie .....	11
7.2.4. Caracterización inicial y siembra de la especie .....	15
7.2.5. Arranque, estabilización y monitoreo de los reactores .....	16
7.3. ACTIVIDADES DE LABORATORIO .....	17
7.3.1. Caracterización del medio de soporte .....	17
7.3.2 Análisis de calidad del agua.....	19
7.4 ACTIVIDADES DE GABINETE .....	19
7.4.1 Análisis estadístico de datos.....	19
8. RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	20
8.1 Características del medio de soporte .....	20
8.2. Características de la especie .....	21
8.2.1. Crecimiento cualitativo .....	21



8.2.2. Crecimiento cuantitativo .....	22
8.2.3. Inflorescencias de la especie dentro del humedal .....	23
8.3. Comportamiento del gasto de operación.....	25
8.4. Calidad del agua del tratamiento del agua residual.....	27
8.5. Tendencias de la calidad del agua.....	28
8.6 Eficiencia de remoción de contaminantes básicos .....	36
9. DISCUSIONES.....	39
9.1. Crecimiento microbiano .....	39
9.2. Adaptación y desarrollo de la especie.....	39
9.3. Potencial de hidrógeno (pH).....	40
9.4. Temperatura .....	40
9.5. Conductividad eléctrica (CE).....	41
9.6 Sólidos disueltos totales (SDT) .....	41
9.7. Color .....	42
9.8. Turbiedad.....	42
9.9. Oxígeno disuelto (OD).....	42
9.10. Potencial de óxido reducción (ORP).....	43
9.11. Eficiencia de remoción (ER).....	43
9.11.1. Fase de arranque .....	43
9.11.2. Fase de estabilización .....	43
10. CONCLUSIONES.....	44
11. RECOMENDACIONES.....	44
12. REFERENCIAS .....	46
ANEXO 1. ANEXOS FOTOGRÁFICOS .....	51



INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Presupuesto de construcción de la unidad experimental.....	8
<b>Tabla 2.</b> Presupuesto de operación de los resultados de laboratorio. ....	8
<b>Tabla 3.</b> Información general de <i>Cyperus odoratus</i> .....	11
<b>Tabla 4.</b> Determinación de porosidad .....	18
<b>Tabla 5.</b> Métodos y equipos para análisis de calidad del agua .....	19
<b>Tabla 6.</b> Valores promedio $\pm$ DE de los medios de soporte utilizados en los reactores experimentales ( $\emptyset$ , N=310) ( $\eta$ , $\rho$ Aparente, $\rho$ Real, N=10).....	20
<b>Tabla 7.</b> Valores promedio $\pm$ DE de las plantas de <i>Cyperus odoratus</i> en el reactor experimental (N=25). ....	22
<b>Tabla 8.</b> Plantas totales por sección dentro del reactor experimental al inicio (arranque) y al final (estabilización) del periodo estudiado .....	22
<b>Tabla 9.</b> Material de desecho de <i>Cyperus odoratus</i> recolectado en las podas durante el periodo de estudio	24
<b>Tabla 10.</b> Variables utilizadas en la determinación del tiempo retención hidráulico (TRH). ....	27
<b>Tabla 11.</b> Valores promedio $\pm$ DE de las unidades de tratamiento en la fase de arranque (N=15). ....	27
<b>Tabla 12.</b> Valores promedio $\pm$ DE de las unidades de tratamiento en la fase de estabilización (N=15) .....	28
<b>Tabla 13.</b> Valores promedio de las eficiencias de remoción de contaminantes básicos en las unidades de tratamiento con <i>Cyperus odoratus</i> en la fase de arranque (N=15).....	37
<b>Tabla 14.</b> Valores promedio de las eficiencias de remoción de contaminantes básicos en las unidades de tratamiento blancos en la fase de arranque (N=15).....	37
<b>Tabla 15.</b> Valores promedio de las eficiencias de remoción de contaminantes básicos en las unidades de tratamiento con <i>Cyperus odoratus</i> en la fase de estabilización (N=15). ....	38
<b>Tabla 16.</b> Valores promedio de las eficiencias de remoción de contaminantes básicos en las unidades de tratamiento blanco en la fase de estabilización (N=15).....	38



## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Área de estudio. Fuente: GOOGLE EARTH, 2020	6
<b>Figura 2.</b> Diagrama general de actividades. Fuente: Elaboración propia	7
<b>Figura 3.</b> Largo, ancho y alto unidades experimentales (adaptado de López et al., 2014)	9
<b>Figura 4.</b> Representación gráfica del proyecto. Fuente: Elaboración propia	9
<b>Figura 5.</b> Adecuación de unidades experimentales. Fuente: Elaboración propia.	10
<b>Figura 6.</b> Morfología <i>Cyperus Odoratus</i> , pr. Balaguer, Lérída (MA 720065): a) Hábito; b) radio terminal de la inflorescencia; c) espiguilla; d) gluma, cara dorsal; e) gluma, cara ventral; f) porción de raquídeo con una gluma y estilo exerto; g) aquenio con estilo y filamento; h) aquenio; i) sección transversal de un aquenio, gluma y raquídeo.	13
<b>Figura 7.</b> Colecta de vegetación. Fuente: elaboración propia.	14
<b>Figura 8.</b> Método de siembra tresbolillo. Fuente: Elaboración propia.	15
<b>Figura 9.</b> Tendencia de la presencia de biomasa bacteriana (promedio $\pm$ DE) en los HAFS del experimento (N=30)	20
<b>Figura 10.</b> Crecimiento mensual de <i>Cyperus odoratus</i> en HAFS. Fuente: Elaboración propia	21
<b>Figura 11.</b> Distribución inicial de plantas por sección y pérdidas en el periodo de adaptación.	23
<b>Figura 12.</b> Distribución al final del periodo de estabilización	23
<b>Figura 13.</b> Crecimiento de la especie al final del estudio.	23
<b>Figura 14.</b> Espigas al primer mes de siembra	24
<b>Figura 15.</b> Espigas al 6to mes de siembra	24
<b>Figura 16.</b> Tendencia del gasto horario de operación (promedio $\pm$ DE) durante la fase de arranque (N=30).	25
<b>Figura 17.</b> Tendencia del gasto diario de operación (promedio $\pm$ DE) durante la fase de arranque (N=30).	25
<b>Figura 18.</b> Tendencia del gasto horario de operación (promedio $\pm$ DE) durante la fase de estabilización (N=30).	26
<b>Figura 19.</b> Tendencia del gasto diario de operación (promedio $\pm$ DE) durante la fase de estabilización (N=30).	26
<b>Figura 20.</b> Valores de medianas $\pm$ Q1, 3 de la variable pH en la fase de arranque. En todos los casos N=15. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p < 0.05$ ), al 95 % nivel de confianza	28
<b>Figura 21.</b> Valores de medianas $\pm$ Q1, 3 de la variable pH en la fase de estabilización. En todos los casos N=15. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p < 0.05$ ), al 95 % nivel de confianza.	29
<b>Figura 22.</b> Valores promedio $\pm$ DE de la variable Temperatura ( $^{\circ}$ C) en la fase de arranque. En todos los casos N=15. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p < 0.05$ ), al 95 % nivel de confianza.	29
<b>Figura 23.</b> Valores promedio $\pm$ DE de la variable Temperatura ( $^{\circ}$ C) en la fase de estabilización. En todos los casos N=15. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p < 0.05$ ), al 95 % nivel de confianza.	30
<b>Figura 24.</b> Valores de medianas $\pm$ Q1, 3 de la variable CE ( $\mu$ S/cm) en la fase de arranque. En todos los casos N=15. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p < 0.05$ ), al 95 % nivel de confianza.	30
<b>Figura 25.</b> Valores de medianas $\pm$ Q1, 3 de la variable CE ( $\mu$ S/cm) en la fase de estabilización. En todos los casos N=15. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p < 0.05$ ), al 95 % nivel de confianza.	31



**Figura 26.** Valores de medianas  $\pm Q1, 3$  de la variable SDT (mg/L) en la fase de arranque. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza. 31

**Figura 27.** Valores de medianas  $\pm Q1, 3$  de la variable SDT (mg/L) en la fase de estabilización. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza. 32

**Figura 28.** Valores de medianas  $\pm Q1, 3$  de la variable Color (UC) en la fase de arranque. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza. 32

**Figura 29.** Valores de medianas  $\pm Q1, 3$  de la variable Color (UC) en la fase de estabilización. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza. 33

**Figura 30.** Valores de medianas  $\pm Q1, 3$  de la variable Turbiedad (UNT) en la fase de estabilización. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza. 33

**Figura 31.** Valores de medianas  $\pm Q1, 3$  de la variable Turbiedad (UNT) en la fase de estabilización. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza. 34

**Figura 32.** Valores de medianas  $\pm Q1, 3$  de la variable OD (mg/L) en la fase de arranque. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza. 34

**Figura 33.** Valores promedio  $\pm DE$  de la variable OD (mg/L) en la fase de estabilización. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza. 35

**Figura 34.** Valores de medianas  $\pm Q1, 3$  de la variable POR (mV) en la fase de arranque. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza. 35

**Figura 35.** Valores de medianas  $\pm Q1, 3$  de la variable POR (mV) en la fase de estabilización. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza. 36

**Figura 36.** Plagas en *Cyperus odoratus* 45



## 1. INTRODUCCIÓN

---

El agua juega un papel vital en la supervivencia de la vida en la Tierra. Además de la necesidad de beber o preparar alimentos, muchos sectores económicos como la agricultura, ganadería, pesca, actividades industriales, etc. dependen de los recursos hídricos (Paca, Santos, Pires, Leitão, Boaventura, 2019). Debido a lo necesaria que es el agua para el ser humano y los diversos usos que se le dan, el agua adquiere características fisicoquímicas y biológicas diferentes a las adecuadas para el consumo humano, convirtiéndose así en agua residual (ONU-AGUA, 2017).

Las aguas residuales se definen por la NOM-001-SEMARNAT-1996 como “aquellas aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas”. Esta composición variada trae consigo efectos inmediatos y en algunos casos irreversibles, la ONU en su informe mundial sobre el desarrollo de los recursos hídricos (2017) menciona el deterioro de los ecosistemas acuáticos (hipereutroficación, sistemas anóxicos) y las enfermedades transmitidas por el agua que proviene de suministros de agua dulce contaminada como dos de los principales efectos del agua residual.

A causa de esto, el agua residual representa un riesgo potencial a la salud de los seres vivos y el ecosistema, por lo que debe ser tratada antes de ser vertida al medio ambiente y así no presentar riesgos a la salud. Sin embargo, López, Buitron, García y Cervantes (2017) expresan que no siempre existen adecuados sistemas de tratamiento. Especialmente en países en vías de desarrollo, en donde el saneamiento aún está muy lejos en comparación con el servicio de abastecimiento de agua.

Los humedales artificiales son sistemas similares a los naturales, para el tratamiento de aguas residuales capaces de eliminar tanto contaminantes como nutrientes sin una demanda adicional de energía (Maucieri, Barbera, Vymazal y Borin, 2017), es decir estos sistemas permiten remover contaminantes presentes en el agua residual a costos bajos y sin requerir personal especializado, dado que este tratamiento depende en gran medida de procesos biológicos en conjunto con condiciones climáticas (Wang, Zhang, Dong y Tan, 2017) y no de reactivos químicos y complejos procesos de tratamiento de agua.

El presente trabajo consiste en evaluar la capacidad de remoción y adaptación de la especie *Cyperus odoratus* para su uso como fitodepurador en el tratamiento de agua residual por medio de humedales artificiales de flujo sub- superficial. A partir del monitoreo y medición



de parámetros como: pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, color, turbiedad, oxígeno disuelto, ORP y biomasa.

## 2. JUSTIFICACIÓN

---

La región de América Latina y el Caribe es la más urbanizada del mundo. Se estima que los asentamientos urbanos de la región producen más de 30 km<sup>3</sup> de agua residual cada año. Estas aguas ricas en nutrientes serían suficientes para regar y fertilizar millones de hectáreas de cultivos, mejorando su productividad y liberando agua dulce para otros usos (FAO, 2017). Sin embargo, en todos los países, excepto los más desarrollados, la mayor parte de las aguas residuales se vierte directamente al medio ambiente sin un tratamiento adecuado. Provocando repercusiones negativas en la salud humana, la productividad económica, la calidad de los recursos de agua dulce ambiental y los ecosistemas. (ONU-AGUA 2017).

Debido a que actualmente, el tratamiento de aguas residuales por sistemas convencionales requiere altos costos de inversión, operación y mantenimiento para lo cual los fondos públicos suelen ser insuficientes; (Soler, 2019) Es necesario investigar alternativas para el tratamiento del agua residual (AR) que no supongan costos elevados y sean accesibles para los países menos desarrollados.

Los humedales artificiales (HA) son sistemas diseñados que simulan los procesos que ocurren en los humedales naturales y eliminan los contaminantes de las aguas residuales (Bakhshoodeh et al., 2020). Así mismo son sistemas sostenibles y de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales (de la Varga et al., 2020), por lo que su implementación e investigación son de vital importancia.

La finalidad al llevar a cabo esta investigación consiste en evaluar la capacidad de remoción y adaptación de la especie *Cyperus odoratus* para su uso como fitodepurador en el tratamiento de agua residual por medio de humedales artificiales de flujo sub- superficial. A partir del monitoreo y medición de parámetros como: pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, color, turbiedad, oxígeno disuelto, ORP y biomasa.



### 3. ANTECEDENTES

Los humedales artificiales se han utilizado para el tratamiento del agua desde principios de la década de 1950 (Hedin y Nairn, 1994 citado en Turekian & Holland, 2003, p.149-204). Actualmente y debido su efectividad en el tratamiento de aguas residuales, particularmente en entornos que requieren poca tecnología y bajo mantenimiento como restricciones operativas (Avellán, T., & Gremillion, 2019) se han realizado estudios que usan plantas acuáticas para el tratamiento de agua residual (AR), como una opción de bajos costos de operación y simplicidad en el manejo tecnológico, lo que se conoce como fitodepuración (Correa et al., 2015 citado en Mendoza, Pérez y Galindo, 2018).

El género *Cyperus* comprende alrededor de 600 especies, es el segundo genero más grande en las *cyperaceae* (Tucker, G. C., 1983) y la mayoría de las especies de este género crecen en sitios húmedos de bajas altitudes, pero otras especies ascienden hasta los 3,000 m; y pueden proliferar en diversos tipos de suelo (arenosos, salinos de dunas costeras, en zonas abiertas de selvas, bosques de pino y encino, pastizales, sabanas, matorrales y a menudo forman parte de la vegetación secundaria como ruderales y arvenses) (Diego Pérez, 2012). Debido a estas características se están realizando estudios con especies de *Cyperus* como fitorremediador de sitios contaminados (Diego Pérez, 2012).

El primer estudio reportado sobre el uso del género *Cyperus* como indicador ambiental fue realizado en 1974 por Agami, Litav y Waisel, en este se compararon los efectos de varios componentes de la contaminación del agua en el comportamiento de siete macrófitos acuáticos de los ríos costeros de Israel dentro del cual se incluyó la especie *Cyperus papyrus* L. El estudio consistió en siete especies de macrófitas acuáticas, con una distribución exclusiva en secciones limpias de dos ríos costeros en Israel y trasplantarlas a sitios contaminados en los mismos ríos, dando como resultado cinco especies que murieron poco después de la siembra, mientras que dos sobrevivieron ilesas, mientras que para el caso de *Cyperus papyrus* L, el 50% de la población tuvo un crecimiento exitoso y produjo inflorescencias tanto en el sitio limpio como el contaminado.

En 1985, el género fue estudiado como posible fitodepurador por Chale, F. M. M quien investigó la eficacia de un pantano de *Cyperus papyrus* para la eliminación de nutrientes de las aguas residuales domésticas. El estudio se realizó en un embalse artificial transformado en un pantano que recibía efluentes de aguas residuales descargados en una corriente. Los parámetros que se analizaron incluyeron la medición de nitrógeno y fósforo, la temperatura, el pH, la conductividad y el oxígeno disuelto. Los resultados demostraron que las características de calidad del agua de la entrada frente a la salida del pantano presentaban disminuciones significativas en la temperatura media y la conductividad en un 20 y 23%, respectivamente. El oxígeno disuelto se redujo en un 85%, el amonio en un 77% y el



ortofosfato en un 80% concluyendo que los pantanos de papiro eran eficientes en la eliminación de nutrientes para la renovación de aguas residuales domésticas.

Así mismo Hocking (1985), investigó las respuestas de *Cyperus involucratus* Rottb. a nitrógeno y fósforo, con referencia a la recuperación de aguas residuales debido al uso creciente de plantas acuáticas en biosistemas para mejorar las aguas residuales que había en ese momento y a las cualidades de la especie frente al tratamiento de agua. La especie se estudió en condiciones de invernadero y las ecuaciones de regresión lineal describieron mejor las relaciones entre la materia seca y el contenido reducido de N en raíces, tallos y hojas. Más del 60% del total de plantas N y P acumuladas en los órganos sobre el suelo, y las concentraciones de hasta 0,53% P y 3,4% N (en peso seco) se registraron en las hojas. Demostrando que *C. involucratus* es una planta adecuada para la recuperación de aguas residuales debido a su alta producción de materia seca, su capacidad para tolerar niveles hiper eutróficos de N y P, y la acumulación de la mayor parte del N y P en las partes cosechables de la planta.

En la actualidad, existen estudios sobre el género *Cyperus* enfocados particularmente al tratamiento de aguas residuales por humedales sub- superficiales han demostrado la eficiencia de diferentes especies al ser utilizadas en estos sistemas de tratamiento de agua. A continuación, se muestran algunos de ellos: En 2019 Pérez-Salazar et al, realizaron un estudio de caso en la costa del Pacífico Central de Costa Rica, donde se evaluó la eliminación de materia orgánica y nutrientes usando *Cyperus papyrus* y *Heliconia* en siete biojardines de tipo horizontal subsuperficial. El estudio arrojó que el sistema de tratamiento tenía una capacidad de remoción promedio del 95% para DBO, 84% para DQO, 82% para TSS, 85% para TKN y 76% para fósforo, así mismo los resultados mostraron la eliminación coherente y eficaz de la materia orgánica y los nutrientes del agua residual a lo largo de las diferentes estaciones y cargas contaminantes, verificando que este tipo de sistemas pueden ser utilizados en lugares descentralizados en el tratamiento de agua residual.

Análogamente García-Ávila et al., (2019), compararon la capacidad de purificación de las aguas residuales domésticas usando *Phragmites australis* y *Cyperus papyrus* sembradas en humedales subsuperficiales con flujo vertical construido a pequeña escala que recibió aguas residuales municipales con tratamiento primario. Los resultados obtenidos en las pruebas experimentales para las dos especies de plantas, indicaron que el *Cyperus papyrus* presentaba una mayor capacidad de eliminación de contaminantes como demanda bioquímica de oxígeno (80.69%), demanda química de oxígeno (69.87%), nitrógeno amoniacal (69.69%), fósforo total (50%), coliformes totales (98.08%) y coliformes fecales (95.61%). En el caso de *Phragmites Australis* retuvo más sólidos. Resultando la especie con mayor eficiencia en el tratamiento de aguas residuales municipales para el estudio *Cyperus Papyrus*.



#### 4. HIPÓTESIS

---

Por sus características y naturaleza la especie *Cyperus odoratus* es eficiente en el tratamiento de aguas residuales vía humedales artificiales, alcanzando eficiencias superiores a 80 % en la remoción de los principales constituyentes del agua residual.

#### 5. OBJETIVOS

---

##### 5.1. Objetivo general

Determinar la eficiencia de remoción de contaminantes básicos en el agua residual doméstica mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFS) utilizando la especie *Cyperus odoratus* como fitodepurador.

##### 5.2. Objetivos específicos

- ❖ Colectar, sembrar y estabilizar la especie *Cyperus odoratus* dentro de la unidad experimental (HAFS).
- ❖ Caracterizar el medio de soporte establecido en las unidades experimentales de tratamiento, (porosidad, densidad aparente, densidad real, diámetro de partícula y biomasa microbiana).
- ❖ Caracterizar fisicoquímica y volumétricamente el influente y efluente de las unidades experimentales (HAFS-Co y HAFS-B), (gasto, pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, color, turbiedad, oxígeno disuelto y ORP).
- ❖ Caracterizar la especie *Cyperus odoratus* dentro periodo de estudio (arranque y estabilización) determinando biomasa producida, longitud de tallo-planta, largo y ancho de hoja, diámetro de tallo, número y largo de espigas, plántulas nuevas, peso y longitud de raíz y humedad (%).
- ❖ Verificar el cumplimiento ambiental y eficiencia de remoción de contaminantes.



## 6. ÁREA DE ESTUDIO

### 6.1. Ubicación geográfica

El área donde se realizó la investigación se encuentra en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas, ubicada en Carretera Villahermosa-Cárdenas Km. 0.5 S/N, Entronque a Bosques de Saloya. Villahermosa, Tabasco, México. El desarrollo de la investigación contó con dos áreas, la primera es el área de campo y la segunda el área de laboratorios, donde se realizaron los análisis respectivos. Las coordenadas de los sitios son:  $17^{\circ}59'27.90''N$ ,  $92^{\circ}58'26.19''O$  y  $17^{\circ}59'27.99''N$ ,  $92^{\circ}58'26.19''O$ , respectivamente.

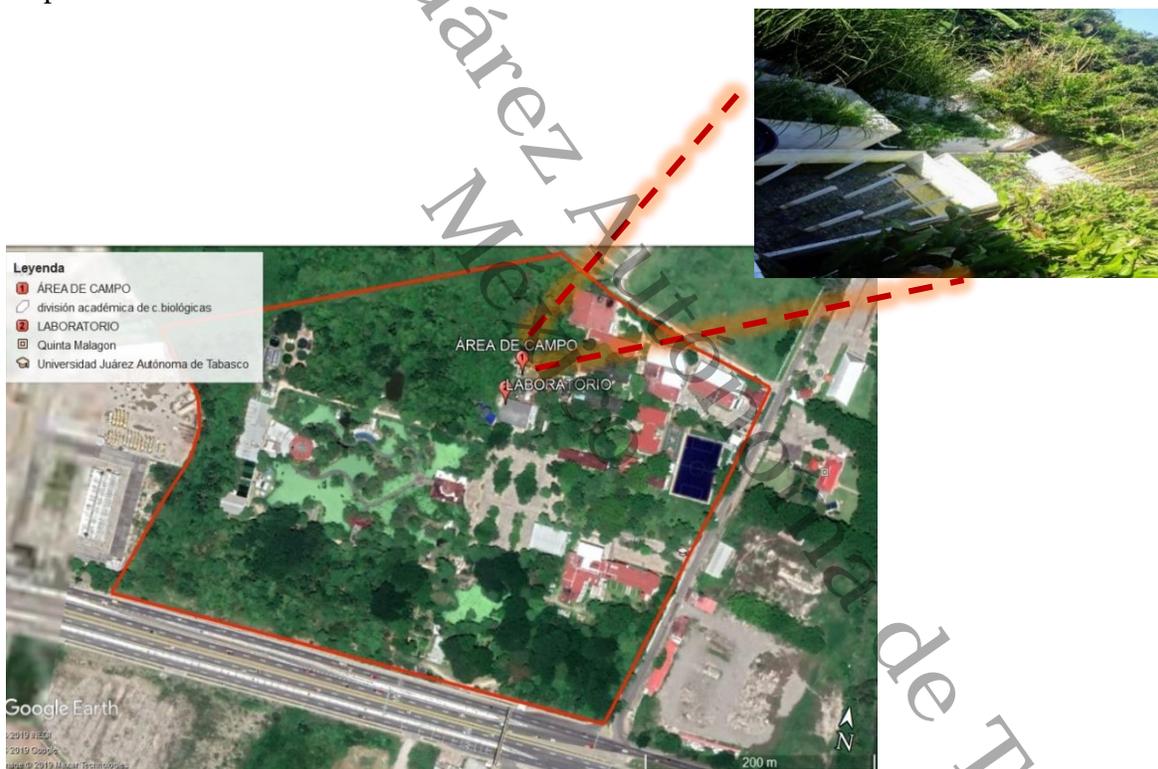


Figura 1. Área de estudio. Fuente: GOOGLE EARTH, 2020



## 6.2. Características climáticas

Debido a su ubicación geográfica en el estado de Tabasco predominan 3 tipos principales de climas: cálido húmedo con lluvias todo el año, cálido húmedo con abundantes lluvias todo el año y cálido subhúmedo con lluvias en verano, siendo el segundo quien ocupa un 75.97 del total de superficie en el estado (INEGI, 2015).

## 7. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la investigación se realizaron actividades de campo, actividades de laboratorio y actividades de gabinete. En la figura 2 se presenta el diagrama general de actividades.

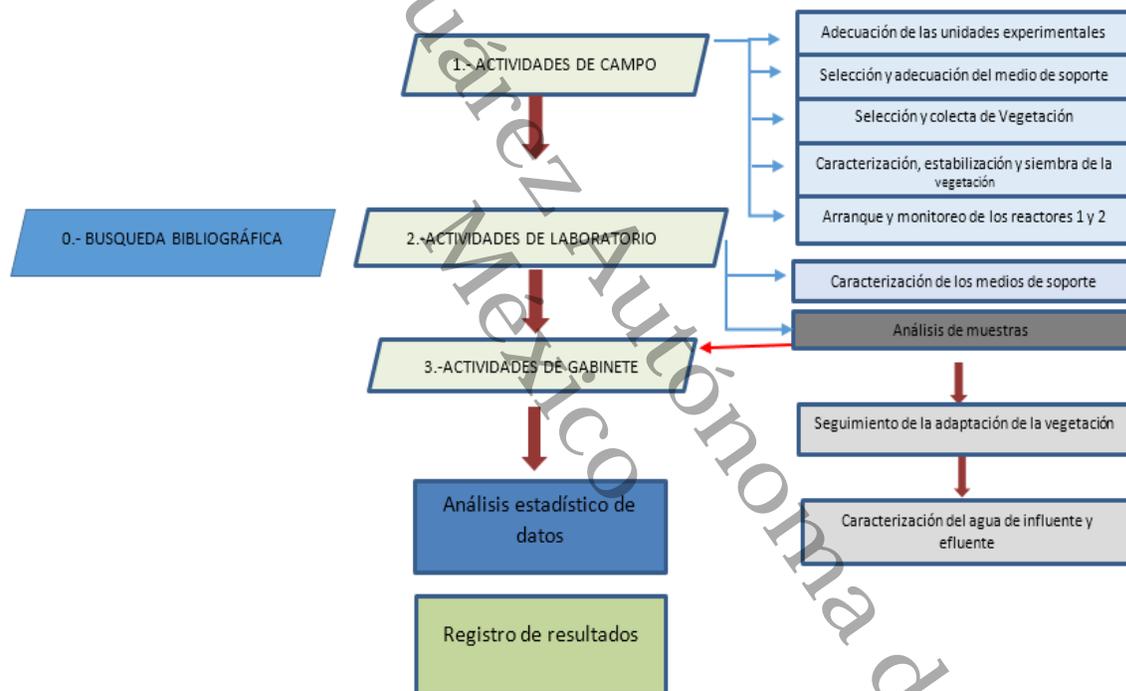


Figura 2. Diagrama general de actividades. Fuente: Elaboración propia



## 7.1 Generalidades sobre el proyecto

### 7.1.1. Análisis de costos de la unidad experimental

Los costos que se incluyen a continuación son únicamente de los materiales necesarios para la construcción e instalación de los 2 HAFS, tanque de control y análisis de laboratorio, no se consideran gastos de energía eléctrica, mano de obra y recursos previamente instalados que son servicios brindados por la Dirección de la DACBIOL. En la tabla 1 se desglosa el costo de cada uno de los materiales y en la tabla 2 se presenta los costos del laboratorio.

**Tabla 1.** *Presupuesto de construcción de la unidad experimental.*

Material	Características	Cantidad	P. U.	Costo total
Lámina de acero al carbón calibre 10	2.5 m x 1.2 m x 1m	2	\$14,400	\$28,800
Tanque receptor 200L	1	2	\$250	\$500
Tubería de PVC	20 m	2	\$280	\$560
Válvulas	6	2	\$240	\$480
Bomba eléctrica	1	1	\$2000	\$2000
Lija de agua C-99	3m	3	\$180	\$360
Primario anticorrosivo	2L	2	\$212	\$424
Membrana de refuerzo	70m	1	\$1140	\$2280
Impermeabilizante acrílico 20L	1	2	\$1000	\$2000
Grava	1.5 m <sup>3</sup>	2	1050	\$2100
<b>TOTAL</b>			<b>\$20,752</b>	<b>\$41,504</b>

Nota: \* Solo se requirió 1 bomba eléctrica para ambos HAFS

**Tabla 2.** *Presupuesto de operación de los resultados de laboratorio.*

Parámetros	PU	Cantidad	Total
pH	\$ 50.00	100	\$ 5,000.00
Temperatura	\$ 50.00	100	\$ 5,000.00
SDT	\$ 50.00	100	\$ 5,000.00
CE	\$ 50.00	100	\$ 5,000.00
POR	\$ 180.00	100	\$ 18,000.00
OD	\$ 250.00	100	\$ 25,000.00
Tur	\$ 250.00	100	\$ 25,000.00
Col	\$ 250.00	100	\$ 25,000.00
Muestreo	\$ 300.00	100	\$ 30,000.00
Corrida Analítica	\$ 300.00	100	\$ 30,000.00
		Subtotal	\$ 173,000.00
		IVA	\$ 27,680.00
		<b>Total</b>	<b>\$ 200,680.00</b>

Nota: El costo de esta partida fue absorbida por el Laboratorio de Tecnología del Agua de la DACBIOL-UJAT

### 7.1.2. Unidades experimentales

Las 2 unidades experimentales de HAFS se montaron con base en el diseño de López et al., (2014), para mejor identificación y control de la investigación las unidades experimentales se definieron como: HAFS-Co y HAFS-B, siendo HAFS-Co la unidad experimental con vegetación y HAFS-B la unidad blanco. Las unidades están hechas de acero al carbón calibre 10, tienen un largo de 2.5 m, ancho 1.2 m, alto 1m. y capacidad volumétrica individual de 1.5 m<sup>3</sup>, con tirante hidráulico de 0.5 m de profundidad y 0.5 m como bordo libre. En la Figura 3 se muestran las medidas de los reactores.

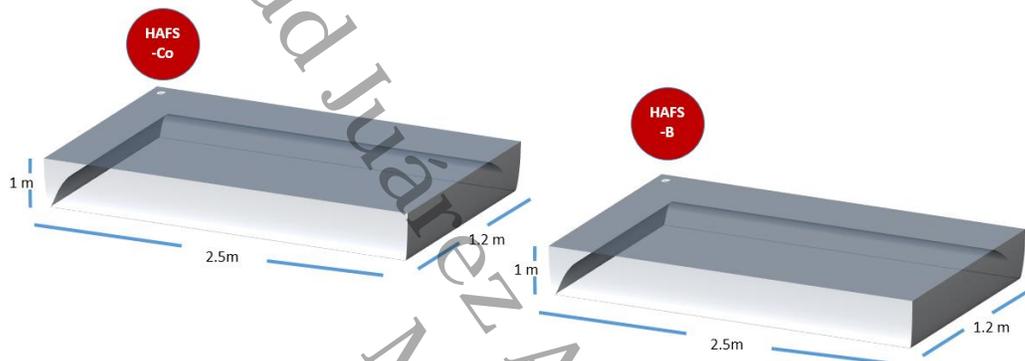


Figura 3. Largo, ancho y alto unidades experimentales (adaptado de López et al., 2014)

Cada unidad cuenta con 1 tanque de almacenamiento de agua residual con capacidad de 200L cada uno, la cual era transportada desde el cárcamo por medio de un sistema de bombeo de ½ de Hp.

Los tanques de almacenamiento se encuentran elevados a 1 metro de altura, lo que permitió al flujo distribuirse por gravedad a través de un sistema de tuberías de PVC de 1 pulgada, dichas tuberías contaban con válvulas mediante las cuales se regulaba el flujo. En la figura 4 se observa la representación gráfica de las unidades experimentales.

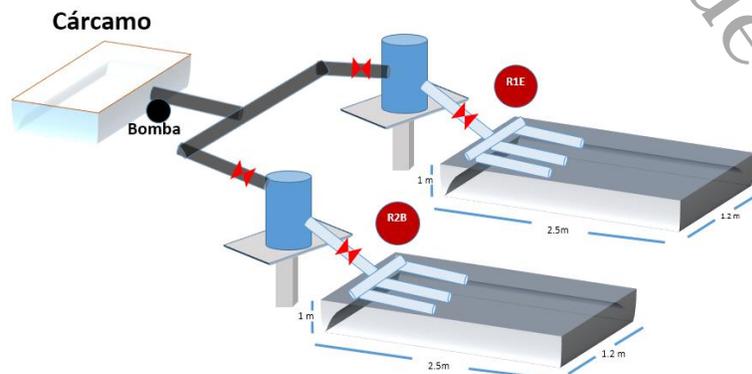


Figura 4. Representación gráfica del proyecto. Fuente: Elaboración propia



### 7.1.3. Agua residual

El agua residual analizada durante el periodo de estudio se obtuvo de los baños y cafetería proveniente de la división académica de ciencias biológicas, la cual era transportada por bombeo al cárcamo concentrador de la misma, y a su vez era distribuida a los tanques de almacenamiento de 200 litros de capacidad correspondientes a los HAFS.

## 7.2. ACTIVIDADES DE CAMPO

### 7.2.1. Adecuación de las unidades experimentales

Previo a iniciar la investigación ambas unidades fueron impermeabilizadas internamente, esto con el fin de evitar que el agua se filtre o contamine por corrosión en la unidad. Antes de impermeabilizar los HAFS-Co y HAFS-B se lijaron las superficies y se aplicó anticorrosivo, una vez seco se procedió a colocar el impermeabilizante y posteriormente se colocó membrana para reforzar, este procedimiento se repitió 3 veces hasta que la superficie fue totalmente cubierta. El área externa de las unidades se lijó y se aplicó anticorrosivo e impermeabilizante para evitar daños causados por intemperismo.

Una vez seco el impermeabilizante se colocó la tubería hidráulica (PVC) que distribuía el agua residual del cárcamo a los tanques de distribución o sedimentadores primarios y a su vez a los reactores. En la figura 5. se observa el proceso de adecuación en las unidades experimentales.



Figura 5. Adecuación de unidades experimentales. Fuente: Elaboración propia.



### 7.2.2 Selección y adecuación del medio de soporte

**Selección:** Debido a la disponibilidad del medio de soporte se usó grava de río, la cantidad requerida por unidad es de 50 cm.

**Lavado y secado:** Antes de colocar el medio de soporte (sustrato) dentro de las unidades, pasó por un proceso de lavado y secado para retirar cualquier impureza, el proceso de lavado se llevó a cabo seccionando el sustrato en pequeñas pilas las cuales eran depositadas en tinas de plástico con una capacidad de 50 litros donde las impurezas de menor densidad se removían por medio de un colador y posteriormente el medio de soporte era extendido sobre una lona donde se dejó secar con luz solar.

**Colocación del medio de soporte:** En esta etapa se depositó el medio de soporte dentro de las unidades experimentales (HAFS-Co y HAFS-B) hasta llegar a 50 cm, este quedó bien distribuido dentro de la unidad.

### 7.2.3 Selección y colecta de la especie

**Selección:** Debido a la facilidad para conseguir la planta y a su atractivo visual se eligió la especie *Cyperus odoratus* para el estudio, de igual manera se hizo la investigación correspondiente sobre factibilidad de la especie como recomienda CONAGUA (2015) en el manual 30 de agua potable, alcantarillado y saneamiento. En la tabla 3 se presentan los datos de la especie *Cyperus odoratus*

**Tabla 3.** Información general de *Cyperus odoratus*

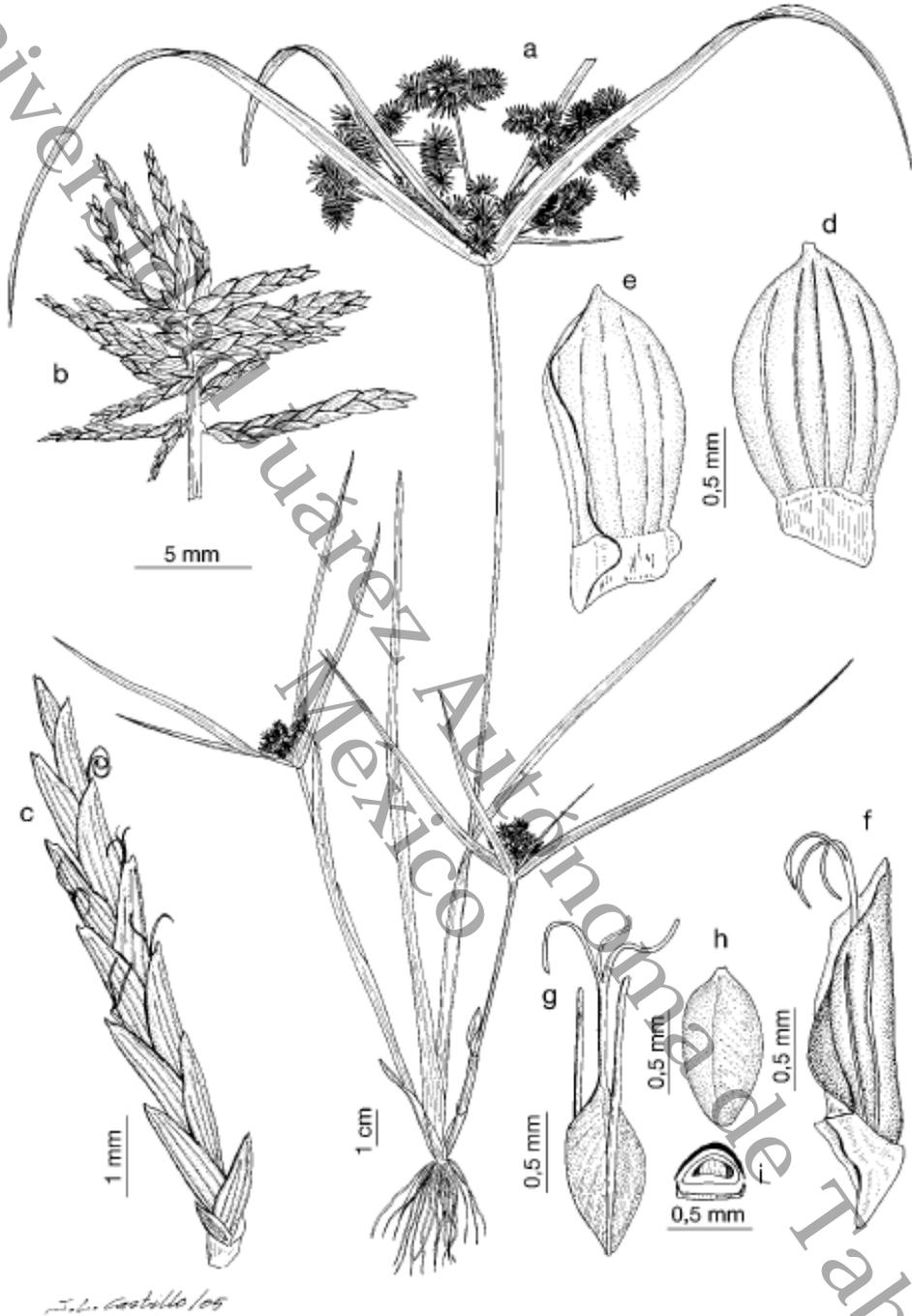
MONOCOTILEDONEAS	
Nombre científico	<i>Cyperus odoratus</i>
<b>Nombre común</b>	Cuentas de Santa Elena, tuxpata (Michoacán) (Martínez, 1979); coyolillo (El Salvador y probablemente en Guatemala) (Standley & Steyermark, 1958); totorilla (Argentina). <sup>1</sup> En el estado de Tabasco se le conoce como navajuela.
<b>Orden</b>	Glumiflorae <sup>2</sup>
<b>Familia</b>	Cyperaceae (Juncias) <sup>3</sup>
<b>Sinónimos</b>	La especie tiene diversos sinónimos alrededor del mundo, algunos de ellos son: <i>Cyperus eggersii</i> , <i>C. macrocephalus</i> (Tucker), <i>Cyperus ferax</i> Rich., <i>Torulinium ferax</i> (Rich.) Hamilt., <i>T. odoratum</i> (L.) Hooper.
<b>Tallos</b>	Trígonos, de 0.5-1.0 cm de ancho en la base, glabros.
<b>Hojas</b>	Hojas de 10-50 cm de largo, 4-10 mm de ancho, los márgenes escabriúsculos
<b>Flor</b>	Espiguillas (pequeña espiga) de 5 a 27 mm de longitud, de alrededor de 1 mm de ancho y de grueso, verdes, café a café-rojizas, más o menos divaricadas (que forma un ángulo abierto de 75 a 105°), por lo general subdísticas (colocadas en dos filas verticales en forma opuesta), pero cilíndricas (no aplanados), a veces densamente



agrupadas, desde 3, pero más común de 6 a 30 flores, raquilla (eje de la espiguilla) desarticulándose en la base de cada aquenio (fruto seco, simple y que no abre al madurar), engrosada y con tejido blanco esponjoso del lado estéril, en el lado fértil con dos alas hialinas (muy delgadas) o de color café, de 1 a 1.2 mm de longitud por 0.4 a 0.5 mm de ancho, que envuelve a la mitad inferior del aquenio, brácteola (hoja secundaria generalmente sobre el soporte de la flor) de alrededor de 1 mm de longitud por 0.2 a 0.3 mm de ancho en vista lateral, acuminada (con márgenes rectos o convexos que terminan en un ángulo menor de 45°), 5-7-nervias, perfilo secundario de 1.2 a 1.5 mm de longitud por 0.5 mm de ancho en vista lateral, obtuso; glumas (hojas localizadas frecuentemente en pares, en la base de la inflorescencia) de 2 a 3.5 mm de longitud por 0.7 a 1 mm de ancho en vista lateral, algo rígidas, con 7 a 9 nervaduras, con la quilla (conjunto de pétalos) de color verde y los lados lustrosos, de color café a rojizo; estambres 3, con filamentos de 2 a 2.5 mm, hialinos, y anteras de 0.4 a 0.8 mm de longitud.

<b>Raíz</b>	Fibrosas, a veces con rizoma (tallo modificado subterráneo y horizontal) corto.
<b>Distribución</b>	COSMOPOLITA. Estados Unidos, México (Baja California, Baja California Sur, Campeche, Chiapas, Chihuahua, Coahuila, Colima, Distrito Federal, Estado de México, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sonora, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán), América Central, Antillas y América del Sur.
<b>Crecimiento</b>	Hierbas anuales o perennes, solitarias o cespitosas, de 40-120 cm de alto, bulbosas en la base
<b>Época de floración</b>	Todo el año
<b>Hábitat</b>	Manglar, Zacatonal, acahual, pantanos sabana, potrero, orillas de ríos, vegetación ruderal y arvense en diferentes cultivos, especialmente de arroz y vegetación ruderal en los drenes de petróleo.
<b>Temperaturas</b>	Temperatura mínima 42°F o 5.5° C
<b>Luz</b>	Intolerante a la sombra
<b>Humedad</b>	Alta afinidad con zonas húmedas o extremadamente húmedas. No sobrevive a sitios con sequedad extrema o a inundaciones de más de 50 cm
<b>pH</b>	Mínimo 5.5 Máximo 8.3 Suelos de textura gruesa y media
<b>Suelo</b>	
<b>Relación C:N</b>	Media
<b>Uso en humedal</b>	La especie no ha sido estudiada en humedales artificiales
<b>Principal plaga</b>	
<b>Cuidado</b>	Debido a su alta tasa de crecimiento y reproducción la especie debe ser controlada.

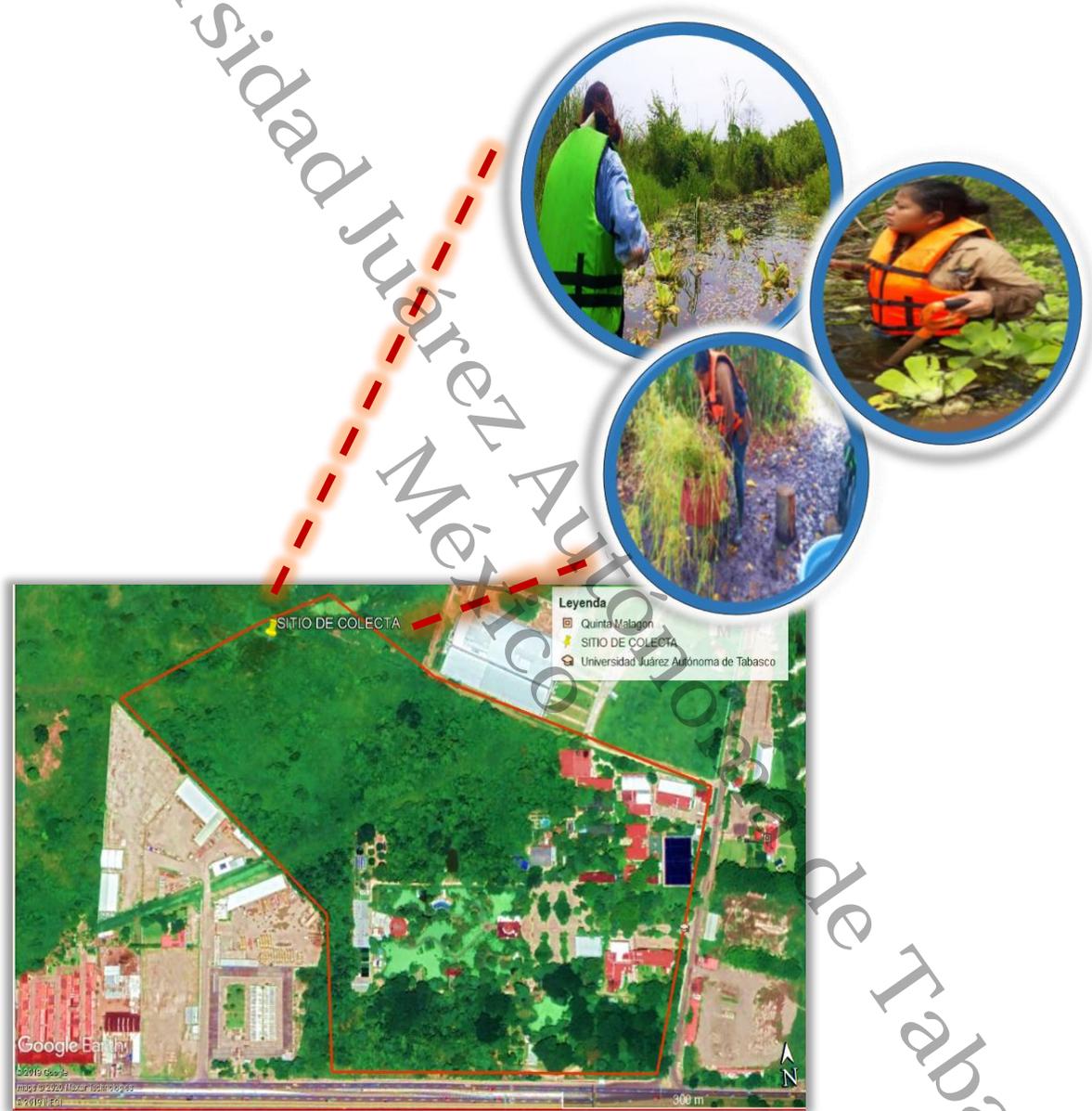
Nota: la información presentada es una recopilación de diversos autores sobre cyperaceas y *Cyperus odoratus*  
Fuente: CONABIO (2011); Araiza y Almarzan (2012); Fern (2014); Plants use (2016), Ramachandran & Soosairaj (2014)



**Figura 6.** Morfología *Cyperus Odoratus*, pr. Balaguer, Lérida (MA 720065): a) Hábito; b) radio terminal de la inflorescencia; c) espiguilla; d) gluma, cara dorsal; e) gluma, cara ventral; f) porción de raquídeo con una gluma y estilo exerto; g) aquenio con estilo y filamento; h) aquenio; i) sección transversal de un aquenio, gluma y raquídeo.



**Colecta:** La vegetación fue colectada en la División Académica de Ciencias Biológicas, en el área conocida como “el Tintal” dentro del cual se encuentran áreas inundables características de humedales naturales. Para colectar la vegetación fue necesario equipo de protección personal (EPP), palas rectas y tinas para trasladar la vegetación. Las coordenadas del sitio son: latitud 17°59'35.32"N y longitud 92°58'36.80"O (Anexo 1)





#### 7.2.4. Caracterización inicial y siembra de la especie

**Caracterización de las plantas:** Se realizó una caracterización inicial antes de sembrar las plantas y consistió en medir el largo del tallo, ancho de tallo, largo de raíz, ancho de raíz, número de tallos, número de espigas, largo de espigas y peso de la planta. La finalidad de realizar dicho procedimiento fue obtener los datos iniciales de las plantas a partir de ser colectadas y enumerarlas (1, 2, 3, 4...), si algunos tallos estuvieran quebrados se procedió primero a podar la planta y después a caracterizar (ANEXO 1).

**Siembra de las plantas:** Para la siembra de la vegetación se siguió el método recomendado por Pazmiño y Jaramillo (2019), conocido como la forma de triángulo equilátero o tres bolillo, debido a que con esta forma de siembra se logra tener una distribución uniforme (en el método de tres bolillo las plantas se distribuyen en cada uno de los vértices de un triángulo equilátero, guardando la misma distancia entre plantas y filas) (ANEXO 1).

Con la siguiente fórmula se determinó el número de plantas por superficie que debían plantarse por dicho método:

$$n = \frac{\text{Superficie}(m^2)}{d * d} * \text{Cos}(30) \quad \text{Ec. 1}$$

Donde n= número de plantas y d=distancia entre plantas (m). Al sustituir los valores se obtuvo que el número de plantas que debían sembrarse eran 25. En la figura 8 se muestra la manera en que las plantas fueron sembradas.

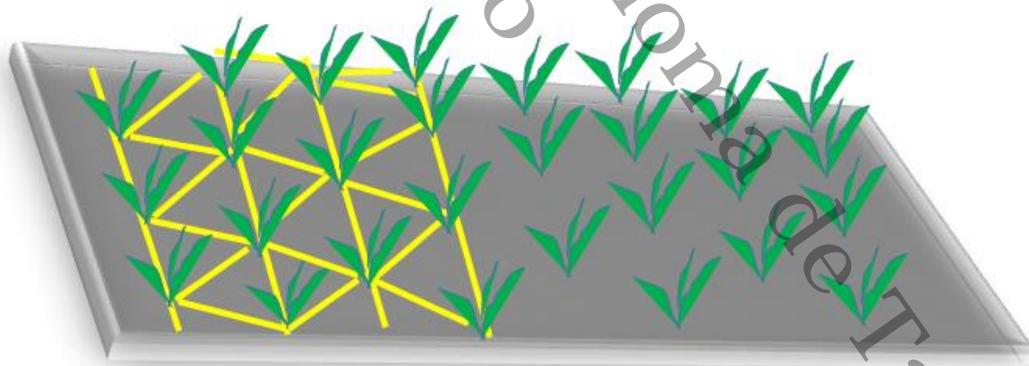


Figura 8. Método de siembra tresbolillo. Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenido el número de plantas necesarias para la investigación y colocado el sustrato (grava) se procedió a sembrar las plantas; para ello se realizaron orificios con profundidad de 5-10 cm y distancia entre plantas de 37 cm. Durante la siembra las plantas se sembraron en el orden en que fueron caracterizadas para llevar mejor control durante los monitoreos. •



### 7.2.5. Arranque, estabilización y monitoreo de los reactores

**Arranque:** Al establecer las unidades (colocación del sustrato y las plantas) se abrieron las válvulas de flujo y se conectó la bomba eléctrica encargada de trasladar el agua residual del cárcamo hacia los tanques de distribución y seguidamente a los reactores con agua. Posteriormente se reguló el flujo por medio de las válvulas para conseguir un caudal constante. Al término de 1 semana se realizó el primer monitoreo.

**Estabilización:** durante esta etapa se observó la respuesta de las plantas sembradas a las condiciones ambientales y el agua residual. Esta fase tuvo una duración de seis meses.

**Monitoreo de los reactores:** La fase de monitoreo de los reactores está dividida en 3 etapas: monitoreo de la vegetación, el monitoreo del agua residual (influyente y efluente) y aforos. A continuación, se desglosa cada una de las etapas (ANEXO 1):

- Monitoreo de la vegetación: el monitoreo de la vegetación se realizó semanalmente y las variables que se tomaron en cuenta son: largo del tallo, ancho de tallo, largo de raíz, ancho de raíz, número de tallos, número de espigas, largo de espigas y plantas nuevas. Para tener un mejor control durante el monitoreo y evitar el estrés de las plantas, estas fueron monitoreadas por medio de muestreo sistemático mediante el cual se determinó que del total de plantas sembradas dentro del HAFS-Co serían 13 las monitoreadas durante el periodo de estudio.
- Monitoreo del agua residual: el monitoreo del agua de influyente y efluente se hizo con base en la NOM-001-SEMARNAT-1996, Los puntos considerados durante el monitoreo fueron el cárcamo, los 2 tanques de almacenamiento de agua residual y el agua de efluente de ambos reactores, siendo un total de 5 muestras. La colecta del agua se realizó por medio de muestras simples como sugiere la norma y se vertió en frascos de plástico de 1 litro de capacidad previamente etiquetados. Los muestreos se realizaron con intervalos de tiempo de 4 horas 5 días hábiles a la semana, siendo el primer muestreo 8:00 am, 12:00pm y 4:00pm. El periodo de muestreo se realizó la primera semana después del arranque de los reactores (3-7 octubre del 2019) y el segundo la última semana del término de los 6 meses de estabilización (25-30 de marzo de 2020). Durante el periodo de estudio fueron analizadas 150 muestras en total, de las cuales 75 correspondieron al periodo de arranque y 75 al periodo de estabilización.



- Aforo del caudal: aunado a los monitoreos de agua residual, se caracterizó volumétricamente cada una de las entradas de los reactores, la determinación del caudal (Q) consistió en medir a tiempo constante el volumen de agua captada en un recipiente, la fórmula para calcular el caudal es la siguiente:

$$Q = \frac{V}{t} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

Q= Gasto (L)

V= Volumen (L/s)

t= Tiempo (s)

### 7.3. ACTIVIDADES DE LABORATORIO

#### 7.3.1. Caracterización del medio de soporte

La caracterización del medio de soporte (grava de río) se realizó al inicio de la fase de estabilización y a final de esta, con el fin de calcular la densidad aparente ( $\rho_a$ ), densidad real ( $\rho_r$ ), porosidad, diámetro de partícula y biomasa microbiana. A continuación, se presenta como se realizó cada uno de los procedimientos (ANEXO 1):

**Densidad aparente ( $\rho_a$ ):** La determinación de la densidad aparente se hará con base en la NOM-021-RECNAT 2000 (AS-03) la cual menciona lo siguiente: “La densidad aparente de una muestra de suelo es calculada a partir del conocimiento de dos parámetros: la masa del suelo y el volumen total, es decir el volumen de los sólidos y el volumen ocupado por el espacio poroso. En el caso de la masa, ésta se conoce pesando la muestra (terron) y en el caso del volumen, éste es determinado de manera indirecta recubriendo el terrón con una capa de parafina y pesándolo sumergido en un líquido (agua).” La densidad aparente se calculó a partir de la fórmula:

$$\rho_a = \frac{W_s}{V_{\text{probeta}}} \quad \text{Ec. 3}$$

donde:

$\rho_a$  = densidad aparente

W<sub>s</sub>= peso suelo

V<sub>probeta</sub>= volumen de probeta



**Densidad real (*pr*):** La densidad real se determinó mediante el método del picnómetro para la determinación de la densidad real de los suelos (NOM-021-RECNAT-2000 (AS-04) y el principio de Arquímedes el cual menciona que todo cuerpo sumergido dentro de un fluido experimenta una fuerza ascendente llamada empuje, equivalente al peso del fluido desalojado por el cuerpo (Teran, L 2014). La fórmula es la siguiente:

$$densidad\ real = \frac{Peso\ de\ grava\ (kg)}{Volumen\ de\ grava\ (m^3)} \quad \text{Ec. 4}$$

**Porosidad:** La porosidad se expresa en porcentajes y se calculó a partir de la densidad aparente y la densidad real usando la siguiente fórmula.

$$Porosidad\ (\%) = 1 - \frac{Densidad\ aparente}{Densidad\ real} \times 100 \quad \text{Ec. 5}$$

**Tabla 4.** *Determinación de porosidad*

Porosidad total (%)	Interpretación
<30	Muy baja
30-40	Baja
40-50	media
50-60	Alta
>60	Muy alta

Tomado de: Flores, D & Alcalá, M de: Manual de procedimientos analíticos (2010)

**Diámetro de partícula:** El diámetro de partícula se realizó tomando una muestra compuesta de los reactores y colocándola dentro en un recipiente de un litro. Las muestras colectadas dentro del recipiente fueron medidas con un Vernier instrumento de medición que nos permite tomar medidas de longitud mucho más precisas que un flexómetro.

**Biomasa microbiana:** La medición de biomasa microbiana se realizó al termino de los 6 meses de estabilización para ello se adaptó la NMX-AA-034-SCFI-2015 del método establecido para Sólidos Totales Volátiles (STV) establecido por la NMX-AA-034-SCFI-2001. Antes de colectar las muestras cada uno de los reactores se dividió longitudinalmente en 3 secciones (inicio, centro y final del reactor) las cuales indicaban la distancia a la que debía tomarse cada muestra, Se colectaron 3 muestras simples por sección (sección 1= 65cm, sección 2=130cm y sección 3= 195 cm) en cada reactor a nivel de 30 cm de profundidad. Una vez obtenidas las muestras simples se realizó una muestra compuesta por sección. El total de muestras analizadas fueron 6, es decir 3 muestras compuestas por unidad experimental. Para realizar el análisis se utilizaron los siguientes equipos: mufla modelo: FE-350 marca FELISA, horno de secado de flujo horizontal marca TERLAB, balanza analítica marca SETRA modelo: SI-200S El equipo requerido para este análisis fue proporcionado por la división académica de ciencias biológicas perteneciente a la UJAT.



### 7.3.2 Análisis de calidad del agua

Los parámetros analizados durante la investigación fueron pH (upH), Temperatura (°C), Conductividad Eléctrica ( $\mu$ S), Sólidos Disueltos Totales (mg/L), Color (UC), Turbiedad (UNT), Oxígeno Disuelto (mg/L) y Potencial Óxido Reducción (ORP, mV). Los análisis de las muestras del influente y el efluente, fueron determinados por medio de los siguientes métodos:

**Tabla 5.** *Métodos y equipos para análisis de calidad del agua*

Parámetro	Método	Equipo
Temperatura	SM 2550	
Conductividad eléctrica (CE)	SM 2510B	Multiparamétrico Hanna® HI 98130
Sólidos disueltos totales (SDT)	SM 2540C	
pH	SM 9040 B	
Potencial óxido reducción (POR)	ASTM D1498-00	ORP Y pH Hanna® HI 98121
Oxígeno disuelto (OD)	SM 4500-OG	Oxímetro Hanna® HI 98193
Turbiedad	EPA 180.1, TC-300e, ISO7027, TC-300i	Turbidímetro Hanna® HI 98703 con precisión de 0.01 UNT
Color	SM 2120B	Colorímetro Lamotte® con una precisión de 0.1 UC

## 7.4 ACTIVIDADES DE GABINETE

### 7.4.1 Análisis estadístico de datos

El análisis estadístico de datos se realizó por medio del software Statgraphics Centurion versión 18. Se realizó un ANOVA para los parámetros que cumplieron con los postulados de normalidad homocedasticidad, en el caso de los datos que no cumplieron con estos postulados se analizaron por el método no paramétrico de Kruskal Wallis.



## 8. RESULTADOS Y DISCUSIONES

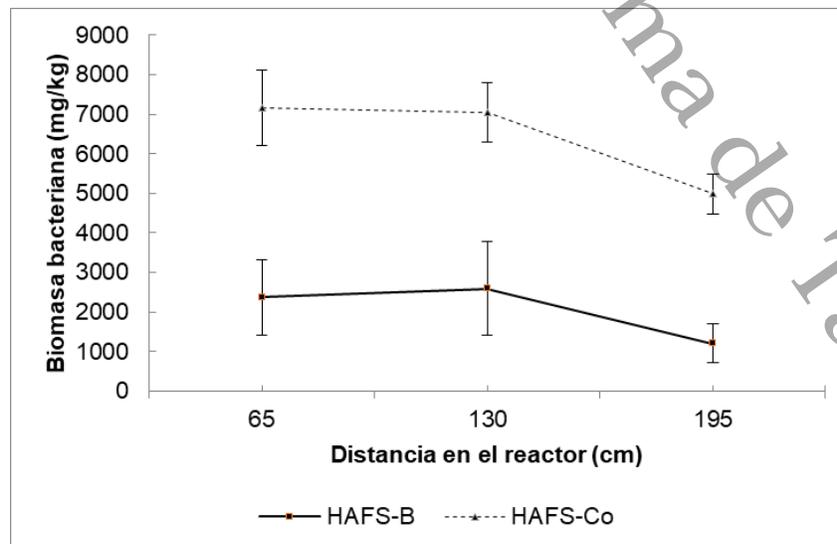
### 8.1 Características del medio de soporte

El medio de soporte que se presenta en la Tabla 6, fue utilizado en ambas unidades experimentales. Los resultados presentes fueron evaluados en el material antes de ser utilizado dentro de los humedales.

**Tabla 6.** Valores promedio  $\pm$ DE de los medios de soporte utilizados en los reactores experimentales ( $\emptyset$ ,  $N=310$ ) ( $\eta$ ,  $\rho$  Aparente,  $\rho$  Real,  $N=10$ ).

Parámetro	HAFS-Blanco		HAFS-Co	
	X	$\pm$ DE	X	$\pm$ DE
$\emptyset$	2.1	0.6	2.2	0.6
$\eta$	48.7	0.3	48.7	0.3
$\rho$ Aparente	1446.3	15.0	1514.3	3.2
$\rho$ Real	2638.4	29.2	2796.0	31.1

La biomasa bacteriana presente en el HAFS fue medida al final del experimento, de manera tal que en las colonias de bacterias presentes ya presentaron degradación de contaminantes básicos. A los 65 cm del HAFS-Co se cuantificó  $4795.8 \pm 955.7$  mg/kg, a los 130 cm  $4451.3 \pm 750.6$  mg/kg y a los 195 cm  $3771.7 \pm 510.8$  mg/kg. En el blanco (HAFS-B) se cuantificó a los 65 cm  $2374.3 \pm 958.3$  mg/kg, a los 130 cm  $2588.7 \pm 1181.5$  mg/kg y a los 195 cm  $1211.6 \pm 494.4$  mg/kg. En el HAFS con *Cyperus odoratus* hay alta presencia de biomasa bacteriana y en el HAFS-B baja la cantidad de microorganismos (Figura 9).



**Figura 9.** Tendencia de la presencia de biomasa bacteriana (promedio  $\pm$ DE) en los HAFS del experimento. ( $N=30$ )



## 8.2. Características de la especie

### 8.2.1. Crecimiento cualitativo

Durante el periodo de estudio se observó la adaptación que tuvo la especie *Cyperus odoratus* en un medio alterado como lo es un humedal artificial de flujo superficial, dado que no mostró afectaciones adversas al ser sometida a altas cargas contaminantes y empezó a crecer de forma exponencial a partir del primer mes de siembra dentro del HAFS-Co. En la figura 10 se observa el crecimiento de la especie durante los 6 meses del periodo estudiado.

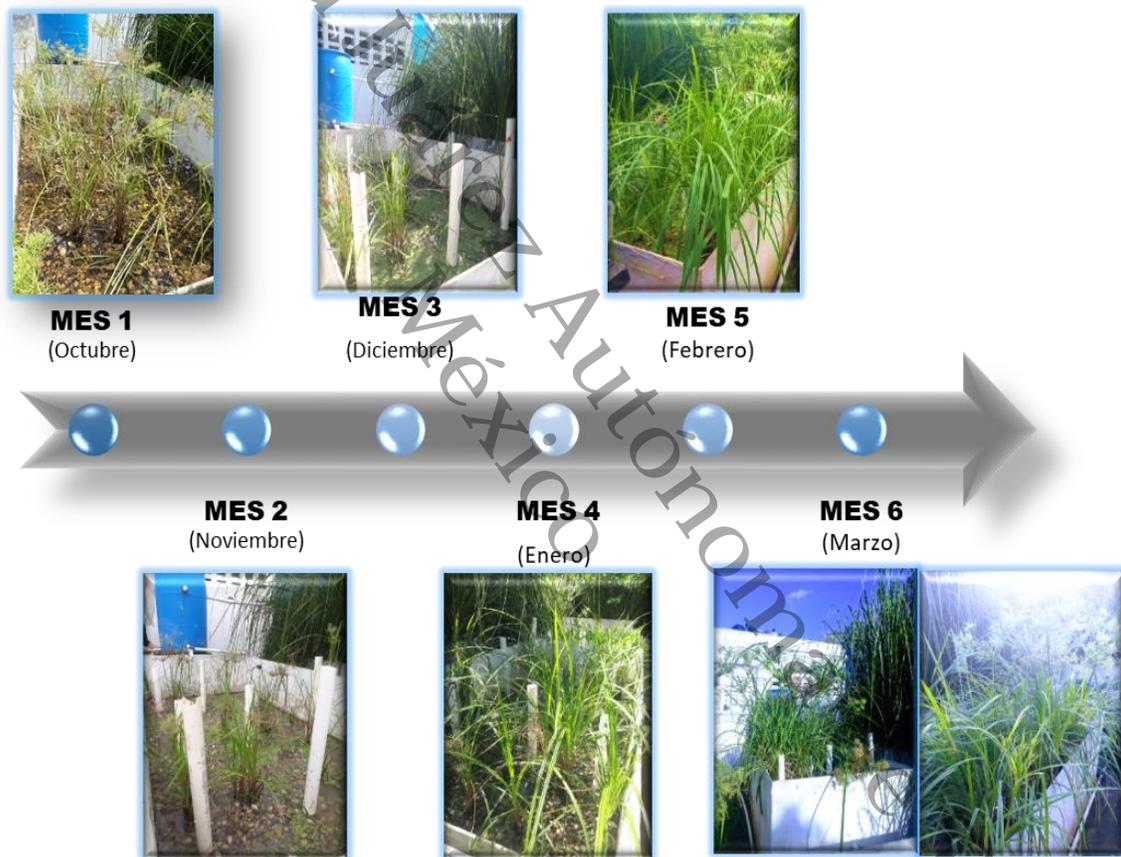


Figura 10. Crecimiento mensual de *Cyperus odoratus* en HAFS. Fuente: Elaboración propia



### 8.2.2. Crecimiento cuantitativo

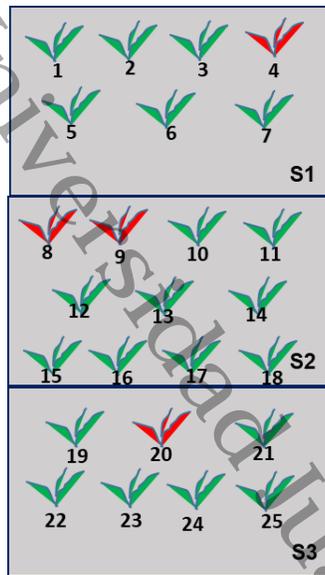
El desarrollo cuantitativo de la especie durante la investigación fue obtenido por medio del monitoreo semanal de cada una de las variables de la planta (largo de tallo, número de tallo, ancho de tallo, número de hojas, ancho de hojas, número de espigas, largo de espigas y plantas nuevas) a excepción del ancho y largo de raíz que fueron medidos únicamente al inicio y al final del estudio. En las tablas 7 y 8 y figuras 11, 12 y 13 puede observarse el cambio cuantitativo que tuvo la especie en cada una de las variables a partir de su comparación con el inicio del proyecto.

**Tabla 7.** Valores promedio  $\pm$ DE de las plantas de *Cyperus odoratus* en el reactor experimental (N=25).

Características morfométricas	Inicio de la fase		Final de la fase	
	X	$\pm$ DE	X	$\pm$ DE
Masa Planta (Kg)	508.8	291.0	709.2	460.1
No. Tallos	4.6	2.3	14.6	10.0
Largo de tallo (cm)	80.7	15.0	147.9	24.8
Diámetro de tallo (cm)	0.7	0.3	1.6	0.8
Largo de raíz (cm)	23.8	7.7	21.5	8.9
Diámetro de raíz (cm)	13.6	4.4	19.9	6.3
No. espigas	3.0	1.2	2.3	4.5
Largo de espigas (cm)	49.5	17.3	31.2	36.7
Ancho de hojas (cm)	0.7	0.3	1.4	0.6

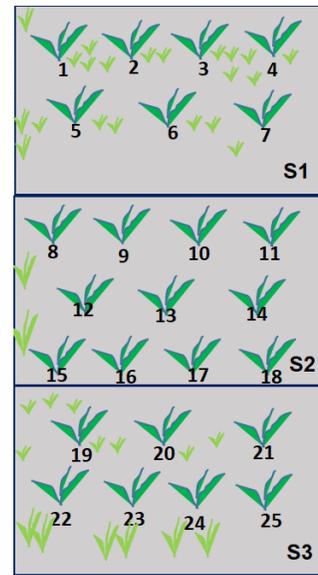
**Tabla 8.** Plantas totales por sección dentro del reactor experimental al inicio (arranque) y al final (estabilización) del periodo estudiado

Sección	Arranque		Estabilización	
	Adultas	Plántulas	Adultas	Plántulas
S1	7	0	7	21
S2	11	0	11	2
S3	7	0	7	14
Total=	25		62	



Plantas muertas  
 Plantas vivas

Figura 11. Distribución inicial de plantas por sección y pérdidas en el periodo de adaptación.



Plantas adultas  
 Plántulas

Figura 12. Distribución al final del periodo de estabilización



Figura 13. Crecimiento de la especie al final del estudio.

### 8.2.3. Inflorescencias de la especie dentro del humedal

Debido a que las plantas sembradas dentro del humedal eran adultas, desde el inicio del estudio (28 de septiembre) hubo inflorescencias (espigas) en cada una de las plantas, sin embargo, el color de cada una de ellas era café o pardo, lo que indicaba que no eran recientes. En la semana 1 y 2 del estudio se observó el crecimiento de nuevas espigas en diversas



plantas, estas eran de color verde. Al lapso de un mes no se observó ninguna inflorescencia nueva (28 de octubre) y el 26 de noviembre ninguna planta tenía inflorescencias. El crecimiento de inflorescencias se reanudó el 3 de febrero en manera exponencial, siendo el mes de marzo el mes con mayor productividad. En la figura 14 y 15 se observan las inflorescencias al inicio y al final del estudio.



Figura 14. Espigas al primer mes de siembra



Figura 15. Espigas al 6to mes de siembra

#### 8.2.4. Productividad de la especie

En los 6 meses de investigación se realizaron únicamente 8 podas dentro de la unidad experimental y se obtuvo un total de biomasa en peso seco de 2.20 kg de los cuales (poda 1 y 2) 700 g pertenecen a plantas que no se adaptaron en la primera semana de la fase de arranque. En la tabla 9 puede observarse la cantidad de biomasa obtenida en cada poda.

**Tabla 9.** Material de desecho de *Cyperus odoratus* recolectado en las podas durante el periodo de estudio

Poda	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	% Biomasa Seca	% Humedad
1	400.0	360.0	90.0	10.0
2	330.0	310.0	93.9	6.1
3	470.0	450.0	95.7	4.3
4	50.0	45.0	90.0	10.0
5	300.0	280.0	93.3	6.7
6	200.0	192.0	96.0	4.0
7	200.0	184.0	92.0	8.0
8	400.0	380.0	95.0	5.0
Suma	2350.0	2201.0		
X	293.8	275.1	93.3	6.7
±DE	137.3	129.9	2.4	2.4



### 8.3. Comportamiento del gasto de operación

**Fase de arranque.** El gasto total que recibe el HAFS-Co presenta un gasto medio de  $194.2 \pm 11.6$  L/día, presentado un gasto mínimo de 164.2 L/día y un máximo de 217.4 L/día (Figura 16). En el HAFS-B presenta un gasto medio de  $193.0 \pm 14.2$  L/día, presentado un gasto mínimo de 164.2 L/día y un máximo de 220.3 L/día (Figura 17).

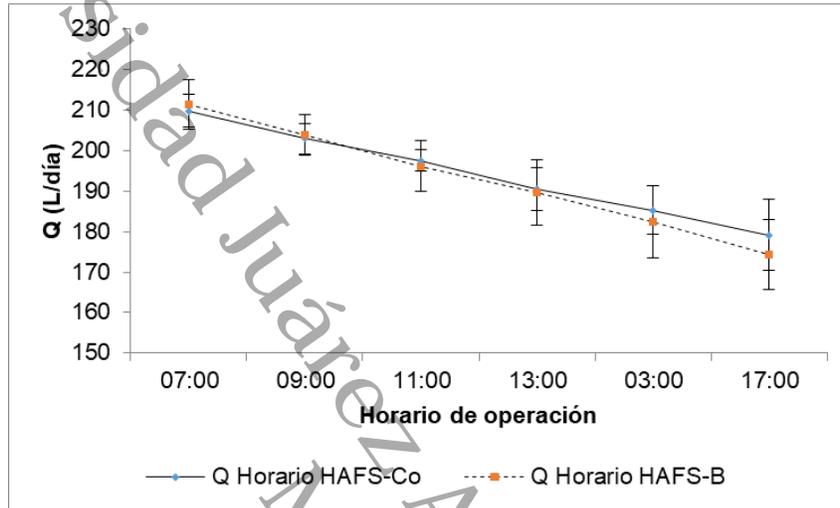


Figura 16. Tendencia del gasto horario de operación (promedio  $\pm$ DE) durante la fase de arranque (N=30).

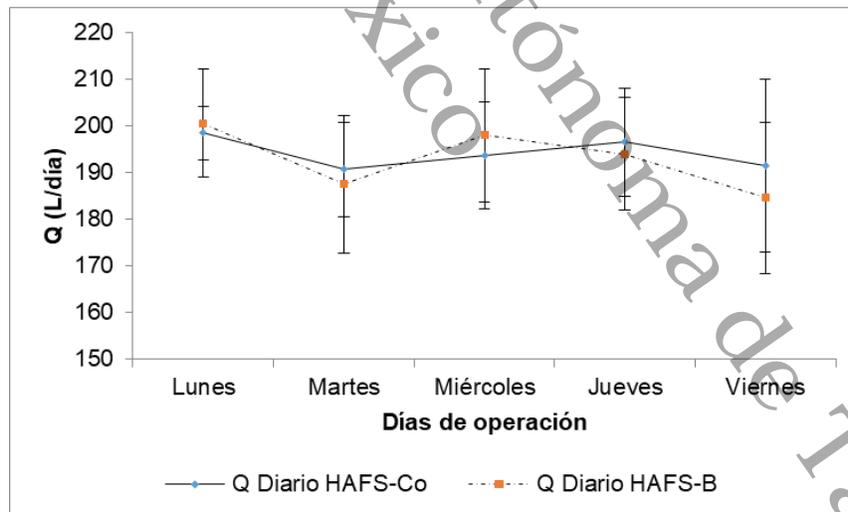


Figura 17. Tendencia del gasto diario de operación (promedio  $\pm$ DE) durante la fase de arranque (N=30).



**Fase de estabilización.** El gasto total que recibe el HAFS-Co presenta un gasto medio de  $193.1 \pm 14.8$  L/día, presentado un gasto mínimo de 164.2 L/día y un máximo de 221.8 L/día (Figura 18). En el HAFS-B presenta un gasto medio de  $191.7 \pm 15.2$  L/día, presentado un gasto mínimo de 164.2 L/día y un máximo de 221.8 L/día (Figura 19).

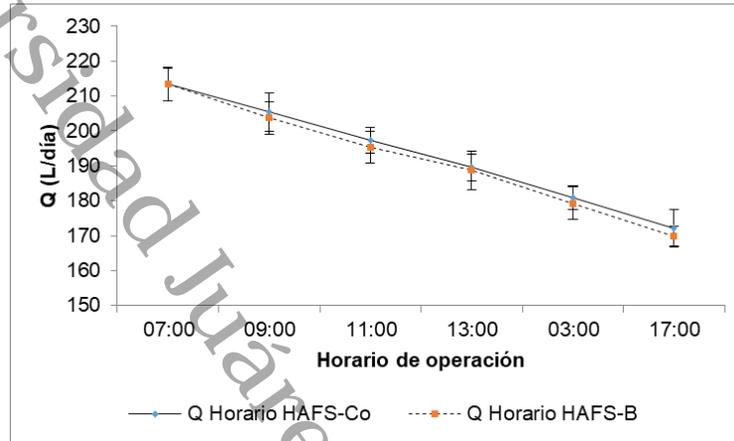


Figura 18. Tendencia del gasto horario de operación (promedio  $\pm$ DE) durante la fase de estabilización ( $N=30$ ).

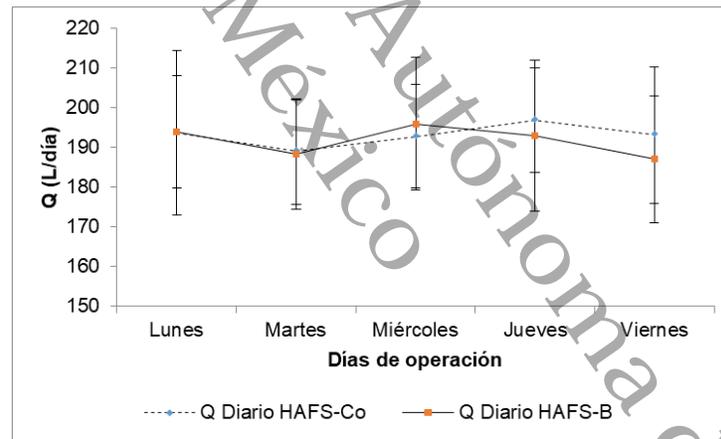


Figura 19. Tendencia del gasto diario de operación (promedio  $\pm$ DE) durante la fase de estabilización ( $N=30$ ).

Una vez obtenidos los gastos de operación se pudo determinar para el HAFS-Co que el tiempo de retención hidráulico (TRH) fue de 4.78 días y en el caso de los HAFS-B fue de 4.82 días. Las variables utilizadas de los humedales para realizar la evaluación hidráulica se presentan en la Tabla 10.



**Tabla 10.** Variables utilizadas en la determinación del tiempo retención hidráulico (TRH).

Parámetro	Unidad	HAFS
$\eta=$	%	48.7
Largo=	m	2.5
Ancho=	m	1.2
Tirante=	m	0.6
Tirante grava=	m	0.6
Vol. Neto=	m <sup>3</sup>	1.8
Vol. grava=	m <sup>3</sup>	0.9
Vol. Agua=	m <sup>3</sup>	0.9
TRH T1=	horas	4.78
TRH T2=	horas	4.82

#### 8.4. Calidad del agua del tratamiento del agua residual

En las Tablas 11 y 12, se presentan los valores promedio de las unidades de proceso que integran cada una de las unidades experimentales. Es importante hacer mención que las características del agua de entrada están dentro del rango media a alta según lo establece Metcalf y Eddy (2000).

Las variables analizadas corresponden a parámetros de evaluación de procesos y se puede observar en estos valores generales cambian desde su captación en el cárcamo hasta el Tanque control de alimentación, esto es debido en parte a que por el tipo de alimentación (bombeo) no se reparten gastos homogéneos en ambos tratamientos modificando las cargas de entrada lo que hace variar la concentración.

**Tabla 11.** Valores promedio  $\pm$ DE de las unidades de tratamiento en la fase de arranque (N=15).

Tratamientos	Cárcamo		TC-Co		HAFS-Co		TC-B		HAFS B	
	X	$\pm$ DE	X	$\pm$ DE	X	$\pm$ DE	X	$\pm$ DE	X	$\pm$ DE
pH (UpH)	8.3	0.3	8.2	0.2	7.7	0.1	8.2	0.2	7.8	0.2
T (°C)	26.5	0.7	26.4	1.6	25.3	1.4	27.6	1.9	25.2	1.0
CE ( $\mu$ s/cm)	1395.1	147.6	1355.4	195.0	512.3	112.3	1443.8	188.2	992.0	382.6
SDT (mg/L)	704.9	73.3	666.6	101.4	273.1	137.0	724.1	87.5	491.5	195.5
COLOR (UC)	1271.1	192.9	1317.0	138.1	221.6	33.9	1673.1	475.3	563.9	319.5
TURB (UNT)	92.3	13.1	96.2	21.2	8.5	2.7	113.3	35.4	41.7	30.4
OD (mg/L)	2.2	0.7	2.0	0.5	5.8	1.6	2.0	0.5	3.4	1.1
POR (mV)	-225.3	11.7	-227.7	28.7	43.9	21.0	-238.7	18.2	-131.9	57.6

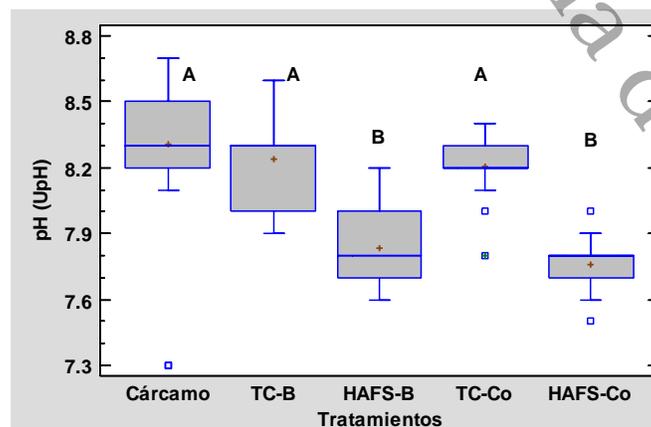


**Tabla 12.** Valores promedio  $\pm$ DE de las unidades de tratamiento en la fase de estabilización (N=15)

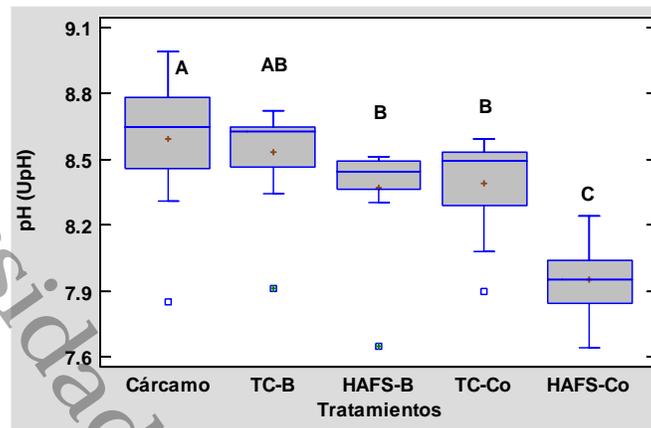
Tratamientos	Cárcamo		TC-Co		HAFS-Co		TC-B		HAFS_B	
	X	$\pm$ DE	X	$\pm$ DE	X	$\pm$ DE	X	$\pm$ DE	X	$\pm$ DE
pH (UpH)	8.6	0.3	8.4	0.2	8.0	0.2	8.5	0.2	8.4	0.2
T (°C)	27.7	1.0	28.4	2.4	27.8	2.5	29.6	2.9	26.9	1.4
CE ( $\mu$ s/cm)	1586.7	303.2	1739.1	177.3	1467.1	79.5	1660.3	246.8	1786.7	84.2
SDT (mg/L)	795.0	152.2	870.8	86.9	734.7	36.0	831.7	125.0	896.7	46.4
COLOR (UC)	1068.6	202.8	1135.3	137.3	209.3	86.5	1219.0	288.1	496.3	90.9
TURB (UNT)	82.8	10.1	119.0	64.5	9.5	5.5	97.2	21.0	37.5	14.9
OD (mg/L)	3.3	0.8	2.5	0.5	5.9	0.7	3.0	0.6	2.8	0.8
POR (mV)	-277.3	45.0	-291.6	39.7	73.4	112.3	-276.1	35.2	-258.0	70.1

### 8.5. Tendencias de la calidad del agua

**Potencial de hidrógeno.** En la fase de arranque la prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de pH (UpH) dentro de cada uno de los 5 niveles de Tratamientos. Puesto que el valor  $P < 0.05$ , existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor de la mediana ( $\pm Q_{1,3}$ ) más bajo, se presentó en los tratamientos HAFS-Co y HAFS-B con valor de pH de  $7.8 \pm (7.7, 7.8)$  y  $7.8 \pm (7.7, 8.0)$  respectivamente, seguido del tratamiento TC-Co con un pH de  $8.2 \pm (8.12, 8.3)$  y la mediana más alta en el tratamiento Cárcamo con un pH  $8.3 \pm (8.2, 8.5)$  (Figura 20). En la estabilización la mediana ( $\pm Q_{1,3}$ ) más bajo, se presentó en los tratamientos HAFS-Co con valor de pH de  $7.95 \pm (7.82, 8.16)$ , seguido del tratamiento HAFS-B con un pH de  $8.44 \pm (8.30, 8.51)$  y la mediana más alta en el tratamiento Cárcamo con un pH  $8.65 \pm (8.31, 8.85)$  (Figura 21).

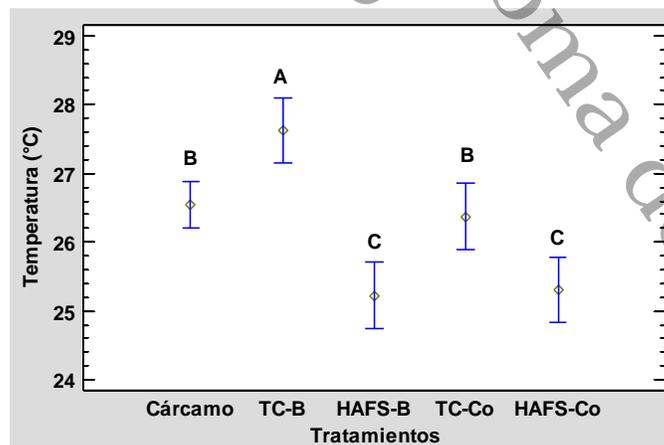


**Figura 20.** Valores de medianas  $\pm Q_{1,3}$  de la variable pH en la fase de arranque. En todos los casos N=15. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p < 0.05$ ), al 95 % nivel de confianza



**Figura 21.** Valores de medianas  $\pm Q1, 3$  de la variable pH en la fase de estabilización. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza.

**Temperatura.** En el arranque la prueba ANOVA de un factor al comparar los valores medios de Temperatura ( $^{\circ}C$ ) para los 5 diferentes niveles de tratamiento. Reportó un valor- $P<0.05$  de la prueba-F, mostrando una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Temperatura ( $^{\circ}C$ ) entre un nivel de tratamiento y otro. Durante esta fase el valor promedio ( $\pm DE$ ) más bajo de temperatura se presentó en el tratamiento HAFS-B con valor de  $25.22\pm 0.96$   $^{\circ}C$ , seguido del tratamiento HAFS-Co con valor de  $25.31\pm 1.44$   $^{\circ}C$  y el promedio más alto en el tratamiento TC-B con un  $27.62\pm 1.94$   $^{\circ}C$  (Figura 22). En la estabilización el promedio ( $\pm DE$ ) más bajo se presentó en los tratamientos HAFS-B con valor de temperatura de  $26.85\pm 1.44$   $^{\circ}C$ , seguido del tratamiento Cárcamo con una temperatura de  $27.7\pm 1.05$   $^{\circ}C$  y la media más alta en el tratamiento TC-B con temperatura de  $29.6\pm 2.86$  (Figura 23).



**Figura 22.** Valores promedio  $\pm DE$  de la variable Temperatura ( $^{\circ}C$ ) en la fase de arranque. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza.

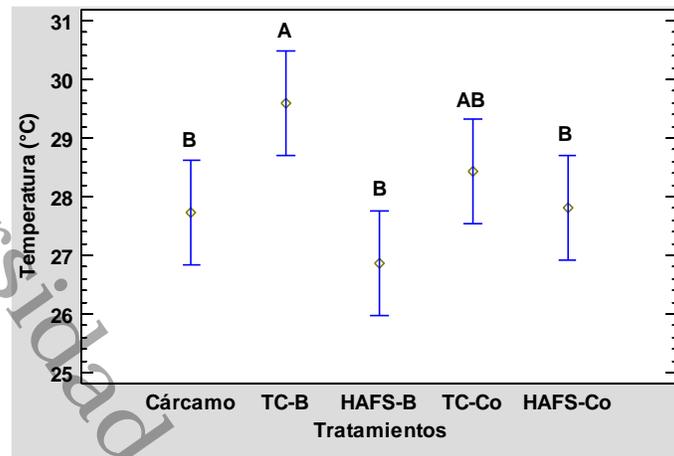


Figura 23. Valores promedio  $\pm$ DE de la variable Temperatura ( $^{\circ}$ C) en la fase de estabilización. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza.

**Conductividad eléctrica.** En la fase de arranque la prueba de Kruskal-Wallis de CE ( $\mu$ S/cm) encontró que el valor- $P<0.05$ , mostrando una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Durante esta fase el valor de la mediana ( $\pm Q_{1, 3}$ ) más bajo se presentó en los tratamientos HAFS-Co con valor de CE de  $521.0\pm(457.02, 591.05)$   $\mu$ S/cm, seguido del tratamiento HAFS-B con  $1085.0\pm(511.36, 1357.22)$   $\mu$ S/cm y la mediana más alta en el tratamiento TC-Co con  $1448.0\pm(1131.12, 1528.45)$   $\mu$ S/cm (Figura 24). Durante la fase de estabilización el valor de la mediana ( $\pm Q_{1, 3}$ ) más bajo se presentó en los tratamientos Cárcamo con valor de CE de  $1575.0\pm(1281.06, 1935.75)$   $\mu$ S/cm, seguido del tratamiento TC-B con  $1670.0\pm(1403.19, 1909.47)$   $\mu$ S/cm y la mediana más alta en el tratamiento HAFS-B con  $1785.0\pm(1701.06, 1884.68)$   $\mu$ S/cm (Figura 25).

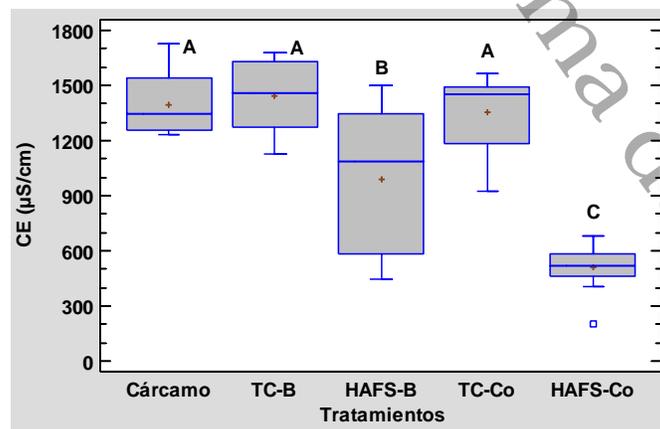


Figura 24. Valores de medianas  $\pm Q_{1, 3}$  de la variable CE ( $\mu$ S/cm) en la fase de arranque. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza.

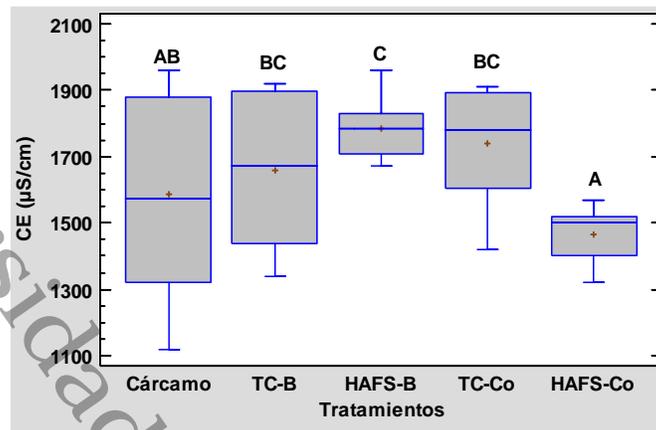


Figura 25. Valores de medianas  $\pm Q1, 3$  de la variable CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en la fase de estabilización. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza.

**Sólidos disueltos totales.** En la fase de arranque la prueba de Kruskal-Wallis de SDT (mg/L) encontró que el valor- $P<0.05$ , mostrando una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Durante esta fase el valor de la mediana ( $\pm Q1, 3$ ) más bajo se presentó en los tratamientos HAFS-Co con valor de SDT de  $248.8\pm(209.42, 277.67)$  mg/L, seguido del tratamiento HAFS-B con  $544.4\pm(254.72, 685.93)$  mg/L y la mediana más alta en el tratamiento TC-Co con  $722.7\pm(555.00, 757.39)$  mg/L (Figura 26). Durante la fase de estabilización el valor de la mediana ( $\pm Q1, 3$ ) más bajo se presentó en los tratamientos HAFS-Co con valor de SDT de  $745.0\pm(691.06, 776.80)$  mg/L, seguido del tratamiento Cárcamo con  $795.0\pm(640.0, 967.87)$  mg/L y la mediana más alta en el tratamiento TC-Co con  $895.0\pm(743.19, 950.0)$  mg/L (Figura 27).

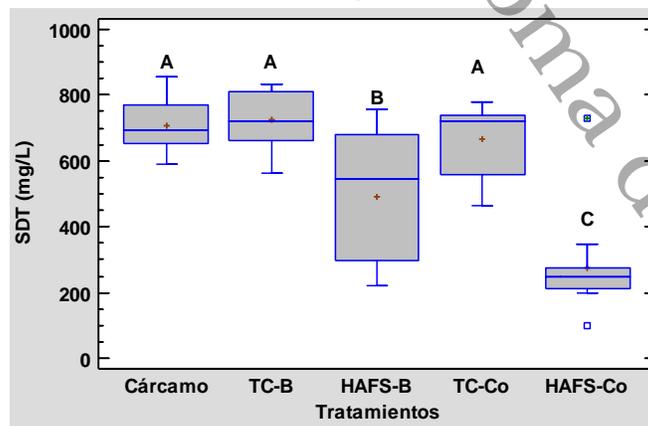
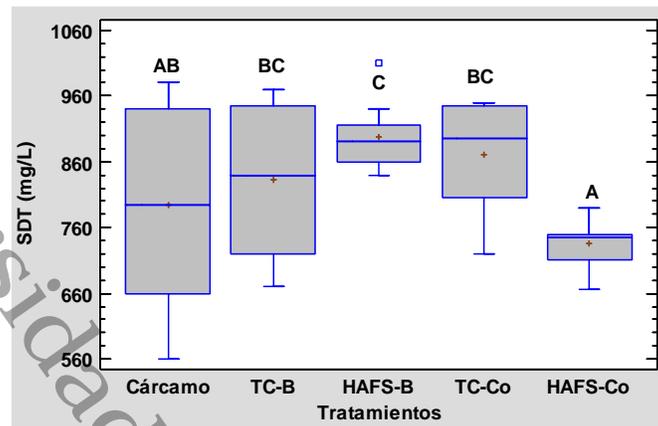
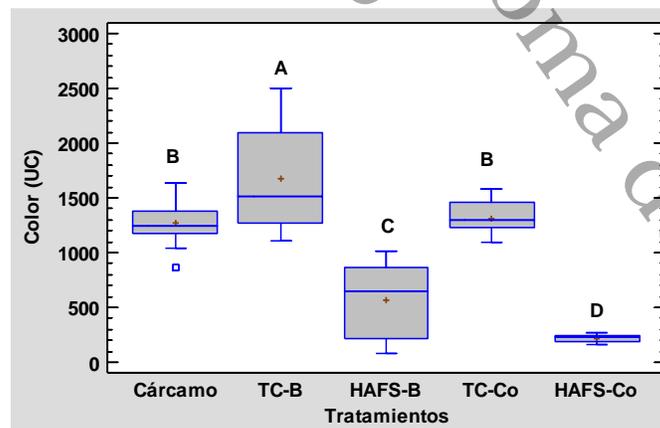


Figura 26. Valores de medianas  $\pm Q1, 3$  de la variable SDT (mg/L) en la fase de arranque. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza.



**Figura 27.** Valores de medianas  $\pm Q1, 3$  de la variable SDT (mg/L) en la fase de estabilización. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza.

**Color.** En la fase de arranque la prueba de Kruskal-Wallis para Color (UC) encontró un valor- $P<0.05$ , mostrando una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Durante esta fase el valor de la mediana ( $\pm Q1, 3$ ) más bajo se presentó en los tratamientos HAFS-Co con valor de Color de  $229.0\pm(183.89, 246.0)$  UC, seguido del tratamiento HAFS-B con  $655.0\pm(184.19, 902.33)$  UC y la mediana más alta en el tratamiento TC-B con  $1518.0\pm(1248.24, 2270.94)$  UC (Figura 28). Durante la fase de estabilización el valor de la mediana ( $\pm Q1, 3$ ) más bajo se presentó en los tratamientos HAFS-Co con valor de Color de  $206.5\pm(107.57, 317.83)$  UC, seguido del tratamiento HAFS-B con  $495.5\pm(376.76, 616.66)$  UC y la mediana más alta en el tratamiento TC-B con  $1260.0\pm(938.51, 1506.15)$  UC (Figura 29).



**Figura 28.** Valores de medianas  $\pm Q1, 3$  de la variable Color (UC) en la fase de arranque. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza.

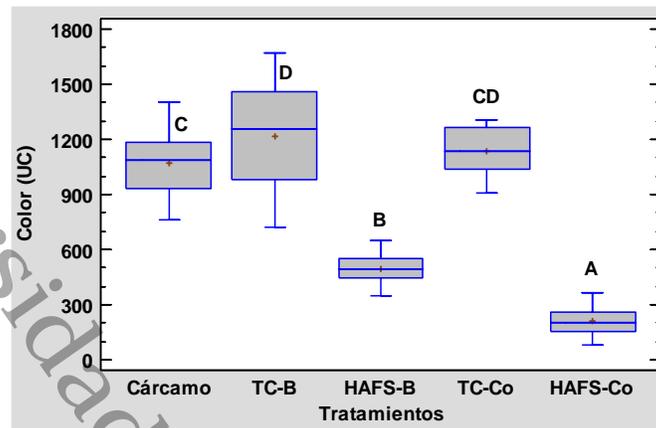


Figura 29. Valores de medianas  $\pm Q_{1,3}$  de la variable Color (UC) en la fase de estabilización. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza.

**Turbiedad.** En la fase de arranque la prueba de Kruskal-Wallis para Turbiedad (UNT) se encontró que el valor- $P<0.05$ , mostrando una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Durante esta fase el valor de la mediana ( $\pm Q_{1,3}$ ) más bajo se presentó en los tratamientos HAFS-Co con valor de Turbiedad de  $7.9\pm(6.60, 10.24)$  UNT, seguido del tratamiento HAFS-B con  $38.9\pm(5.32, 80.36)$  UNT y la mediana más alta en el tratamiento TC-B con  $109.0\pm(84.75, 143.11)$  UNT (Figura 30). Durante la fase de estabilización el valor de la mediana ( $\pm Q_{1,3}$ ) más bajo se presentó en los tratamientos HAFS-Co con valor de Turbiedad de  $9.435\pm(4.30, 14.56)$  UNT, seguido del tratamiento HAFS-B con  $42.2\pm(19.25, 56.50)$  UNT y la mediana más alta en el tratamiento TC-Co con  $97.7\pm(85.60, 184.84)$  UNT (Figura 31).

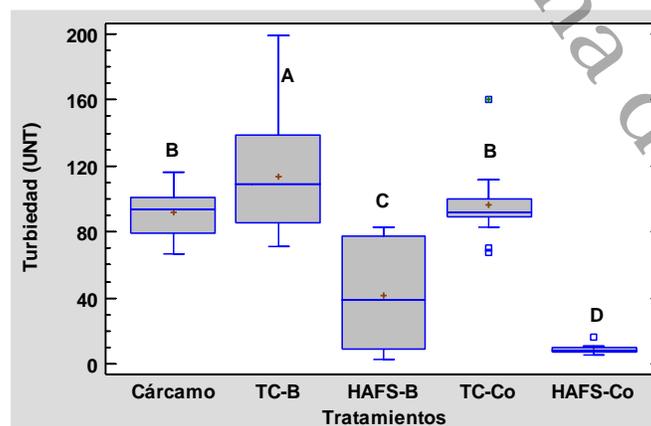
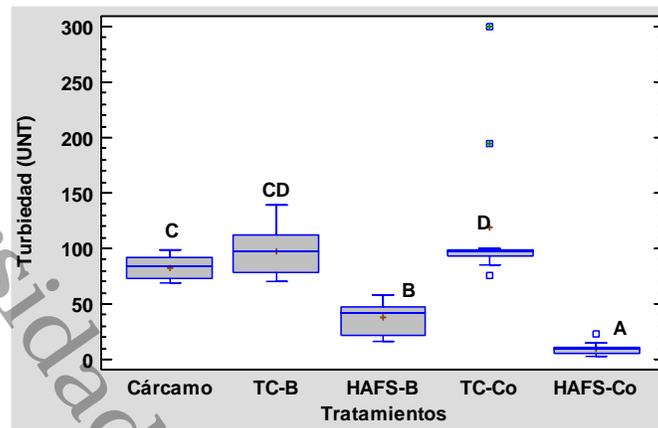
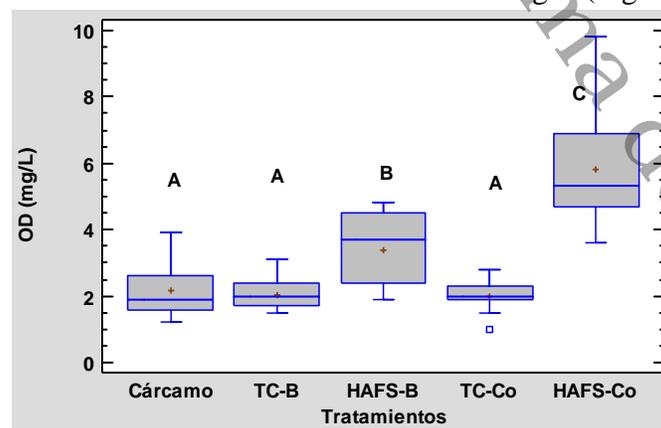


Figura 30. Valores de medianas  $\pm Q_{1,3}$  de la variable Turbiedad (UNT) en la fase de estabilización. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza.

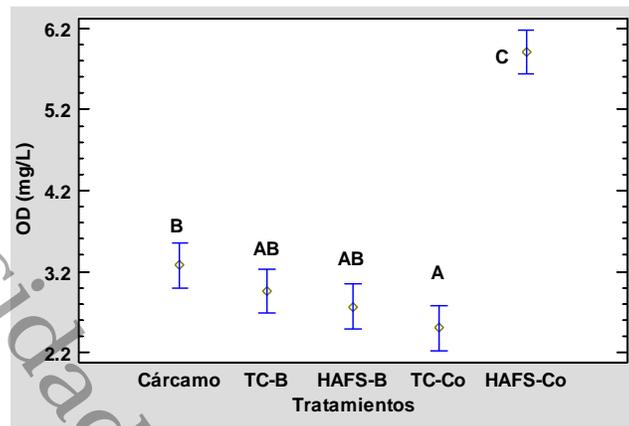


**Figura 31.** Valores de medianas  $\pm Q1, 3$  de la variable Turbiedad (UNT) en la fase de estabilización. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p < 0.05$ ), al 95 % nivel de confianza.

**Oxígeno disuelto.** En la fase de arranque la prueba de Kruskal-para OD (mg/L) encontró que el valor- $P < 0.05$ , existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Durante esta fase el valor de la mediana ( $\pm Q1, 3$ ) más bajo se presentó en los tratamientos TC-Co con valor de OD de  $2.0 \pm (1.57, 2.46)$  mg/L, seguido del tratamiento TC-B con  $2.0 \pm (1.62, 2.56)$  mg/L y la mediana más alta en el tratamiento HAFS-Co con  $5.3 \pm (4.62, 6.98)$  mg/L (Figura 32). En la estabilización el ANOVA encontró un valor- $P < 0.05$  de la prueba-F, mostrando una diferencia estadísticamente significativa entre la media de OD (mg/L) entre un nivel de Tratamientos y otro, con un nivel del 5% de significación. El valor promedio ( $\pm DE$ ) más bajo se presentó en los tratamientos TC-Co con valor de OD de  $2.50 \pm 0.45$  mg/L, seguido del tratamiento HAFS-B con  $2.76 \pm 0.76$  mg/L y la media más alta en el tratamiento HAFS-Co con  $5.91 \pm 0.69$  mg/L (Figura 33).

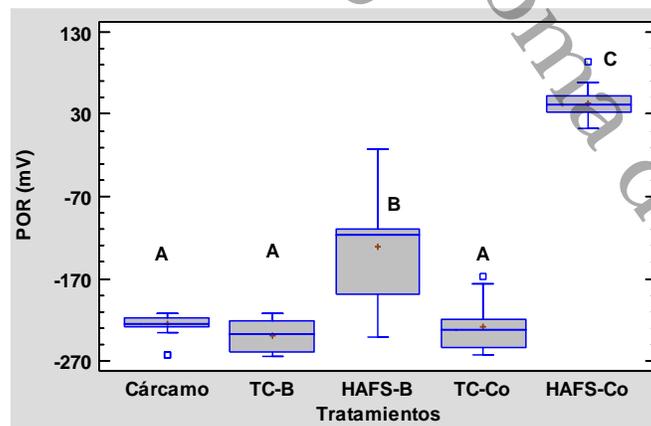


**Figura 32.** Valores de medianas  $\pm Q1, 3$  de la variable OD (mg/L) en la fase de arranque. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p < 0.05$ ), al 95 % nivel de confianza.



**Figura 33.** Valores promedio  $\pm$ DE de la variable OD (mg/L) en la fase de estabilización. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza.

**Potencial óxido reducción.** En la fase de arranque la prueba de Kruskal-Wallis para POR (mV) encontró que un valor- $P<0.05$ , mostrando una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Durante esta fase el valor de la mediana ( $\pm Q_{1,3}$ ) más bajo se presentó en los tratamientos TC-B con valor de POR de  $-238.0\pm(-260.64, -221.17)$  mV, seguido del tratamiento TC-Co con  $-232.0\pm(-260.64, -221.17)$  mV y la mediana más alta en el tratamiento HAFS-Co con  $42.0\pm(23.78, 63.68)$  Mv (figura 34). Durante la fase de estabilización el valor de la mediana ( $\pm Q_{1,3}$ ) más bajo se presentó en los tratamientos TC-Co con valor de POR de  $-290.0\pm(-340.76, -229.42)$  mV, seguido del tratamiento Cárcamo con  $-272.0\pm(-260.64, -221.17)$  mV y la mediana más alta en el tratamiento HAFS-Co con  $21.0\pm(12.31, 193.87)$  Mv (figura 35).



**Figura 34.** Valores de medianas  $\pm Q_{1,3}$  de la variable POR (mV) en la fase de arranque. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza.

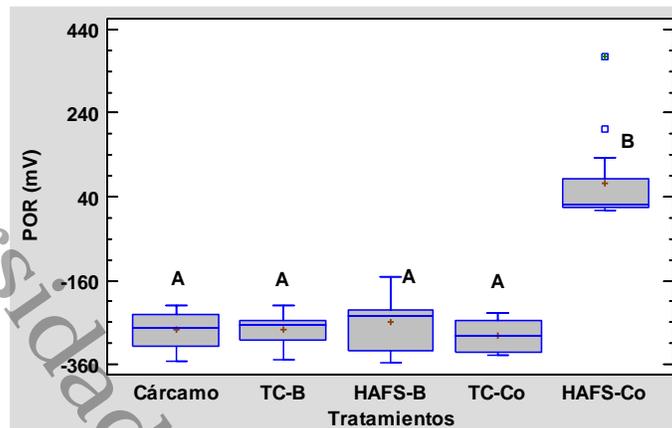


Figura 35. Valores de medianas  $\pm Q1, 3$  de la variable POR (mV) en la fase de estabilización. En todos los casos  $N=15$ . Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ( $p<0.05$ ), al 95 % nivel de confianza.

## 8.6 Eficiencia de remoción de contaminantes básicos

### Fase de arranque

Durante la fase de arranque los humedales en general presentan mayor desempeño indicando claramente que la remoción se atribuye a efectos de sedimentación y filtración, por lo que al estar vacío los medios de soporte no se presentan una fuerte actividad microbiana dentro de los humedales, pero el efecto sobre la remoción de constituyentes se debe en gran medida al cumplimiento de tiempos de retención hidráulica adecuada. Durante esta fase es significativa el incremento del OD, pues como eficiencia se manifiesta negativo, es decir, es mayor la concentración en efluente que en el influente lo cual es benéfico en este proceso para la degradación (Crites y Tchobanoglous 2004; Metcalf y Eddy 2000).



**Tabla 13.** Valores promedio de las eficiencias de remoción de contaminantes básicos en las unidades de tratamiento con *Cyperus odoratus* en la fase de arranque (N=15).

Tratamientos	Cárcamo	TC-Co	HAFS-Co		ETP (%)
	X	X	ER (%)	X	
pH (UpH)	8.3	8.2	1.1	7.7	6.6
T (°C)	26.5	26.4	0.6	25.3	4.6
CE (µs/cm)	1395.1	1355.4	2.8	512.3	63.3
SDT (mg/L)	704.9	666.6	5.4	273.1	61.3
COLOR (UC)	1271.1	1317.0	-3.6	221.6	82.6
TURB (UNT)	92.3	96.2	-4.2	8.5	90.8
OD (mg/L)	2.2	2.0	8.2	5.8	-166.5
POR (mV)	-225.3	-227.7	-1.1	43.9	119.5

En el caso particular de las unidades testigos o blancos, el comportamiento presenta poco desempeño pues, aunque filtra y sedimenta no se manifiesta el efecto de contar con una fitodepuradora que cumpla con la eliminación o absorción adsorción de iones medidos a través de los SDT y CE. Del mismo modo no se ha establecido la biomasa bacteriana como en el humedal con vegetación (Crites y Tchobanoglous 2004; Metcalf y Eddy 2000).

**Tabla 14.** Valores promedio de las eficiencias de remoción de contaminantes básicos en las unidades de tratamiento blancos en la fase de arranque (N=15)

Tratamientos	Cárcamo	TC-B	HAFS_B		ETP (%)
	X	X	ER (%)	X	
pH (UpH)	8.3	8.2	0.6	7.8	5.6
T (°C)	26.5	27.6	-4.1	25.2	4.9
CE (µs/cm)	1395.1	1443.8	-3.5	992.0	28.9
SDT (mg/L)	704.9	724.1	-2.7	491.5	30.3
COLOR (UC)	1271.1	1673.1	-31.6	563.9	55.6
TURB (UNT)	92.3	113.3	-22.7	41.7	54.8
OD (mg/L)	2.2	2.0	6.0	3.4	-55.9
POR (mV)	-225.3	-238.7	-6.0	-131.9	41.4

### Fase de estabilización

Conforme va pasando el periodo de estabilización en los humedales de flujo subsuperficial el medio de soporte va colmatándose, lo que significa que los tiempos de retención ya son menores a los que tenía en un principio. Este efecto hace que la remoción de los constituyentes en suspensión medidos indirectamente a través de la turbiedad y color puedan disminuir moderadamente el desempeño atribuido principalmente al efecto del medio de soporte y tiempo de retención (Crites y Tchobanoglous 2004; Metcalf y Eddy 2000).



**Tabla 15.** Valores promedio de las eficiencias de remoción de contaminantes básicos en las unidades de tratamiento con *Cyperus odoratus* en la fase de estabilización (N=15).

Tratamientos	Cárcamo	TC-Co	HAFS-Co		ETP (%)	
	X	X	ER (%)	X		
pH (UpH)	8.6	8.4	2.3	8.0	5.2	7.4
T (°C)	27.7	28.4	-2.5	27.8	2.2	-0.2
CE (µs/cm)	1586.7	1739.1	-9.6	1467.1	15.6	7.5
SDT (mg/L)	795.0	870.8	-9.5	734.7	15.6	7.6
COLOR (UC)	1068.6	1135.3	-6.2	209.3	81.6	80.4
TURB (UNT)	82.8	119.0	-43.6	9.5	92.0	88.5
OD (mg/L)	3.3	2.5	23.7	5.9	-136.2	-80.3
POR (mV)	-277.3	-291.6	-5.2	73.4	125.2	126.5

Una vez que el medio de soporte va cumpliendo con el proceso de filtración, se van reduciendo los espacios para la transferencia de oxígeno por lo que en esta fase el OD disminuye por lo que se presenta un proceso anaerobio completamente dentro del reactor, manifestando una baja eficiencia en los procesos de remoción asociado a los cambios de tiempos de retención. En esta fase ya se presenta liberación de iones asociados a los procesos de descomposición anaerobia (Crites y Tchobanoglous 2004; Metcalf y Eddy 2000).

**Tabla 16.** Valores promedio de las eficiencias de remoción de contaminantes básicos en las unidades de tratamiento blanco en la fase de estabilización (N=15)

Tratamientos	Cárcamo	TC-B	HAFS B		ETP (%)	
	X	X	ER (%)	X		
pH (UpH)	8.6	8.5	0.7	8.4	1.9	2.6
T (°C)	27.7	29.6	-6.7	26.9	9.3	3.2
CE (µs/cm)	1586.7	1660.3	-4.6	1786.7	-7.6	-12.6
SDT (mg/L)	795.0	831.7	-4.6	896.7	-7.8	-12.8
COLOR (UC)	1068.6	1219.0	-14.1	496.3	59.3	53.6
TURB (UNT)	82.8	97.2	-17.3	37.5	61.4	54.7
OD (mg/L)	3.3	3.0	9.8	2.8	6.6	15.7
POR (mV)	-277.3	-276.1	0.4	-258.0	6.6	6.9



## 9. DISCUSIONES

---

### 9.1. Crecimiento microbiano

Los resultados de biomasa adherida al medio de soporte indicaron que en cada una de las distancias analizadas dentro del HAFS-Co (Figura 9) la cantidad de microorganismos presentes en el sustrato fue casi el doble de la encontrada en el HAFS-B, esto se debe probablemente a dos razones:

- 1) La primera está determinada por la inundación del suelo durante periodos prolongados, lo que produce condiciones anaerobias dentro del sistema y provoca que la vegetación desarrolle diversas adaptaciones como consecuencia de la necesidad de  $O_2$ , (Cronk & Fenessy 2001, citado en Sánchez-Olivares, Marín-Muñiz y Hernández-Alarcón, 2019) tales como la modificación de la estructura de la raíz (Armstrong 1972, Keeley 1979, citado en Sánchez-Olivares, Marín-Muñiz y Hernández-Alarcón, 2019).
- 2) Como consecuencia directa del aumento de  $O_2$  en la raíz y al estar los reactivos necesarios (C, N, macro y micronutrientes) ocurren reacciones metabólicas que propician el crecimiento microbiano aerobio y anaerobio (Castañeda, 2019).

### 9.2. Adaptación y desarrollo de la especie

Al inicio de la investigación la especie presentó una mortalidad de 1% (4 plantas) debido a mal manejo por parte del investigador, sin embargo, en 2 especímenes brotaron plántulas de la raíz, que presentaron buena adaptación y se desarrollaron normalmente obteniendo así mortalidad de 0.5% dentro del HAFS-Co.

A partir del mes 3 (diciembre), la especie se desarrolló exponencialmente en cada una de sus variables dentro del HAFS-Co pero fue en el mes 4 (enero) donde se observó el mayor aumento de biomasa en la población, así como en el grosor de los tallos, las hojas, el alto de tallo, el largo y el ancho de las espigas, mayores a los reportados en diversas literaturas (tabla 2) lo que indicó una buena adaptación de la especie al agua residual (AR). Esto se debe a procesos físicos, químicos y biológicos provenientes de las interacciones del agua residual y los componentes vivos del sistema (microorganismos, hongos, algas, vegetación (plantas superiores) y fauna), los cuales propician la degradación de la materia orgánica y la transformación de minerales a formas asimilables para las plantas (Curt, 2014).

Las variables que mostraron mayor desarrollo durante el estudio fueron el alto de tallo que obtuvo un crecimiento promedio de 36.5% la masa de planta 34.8%, el número de tallos 67.16%, ancho de hoja 50% y ancho de tallo 50%, mientras que en las variables concernientes a las inflorescencias, estadísticamente se obtuvieron promedios de crecimiento menores a los iniciales, debido a la inestabilidad de este parámetro, no fue posible obtener



valores constantes de toda la muestra por lo que fue necesario analizar el parámetro de manera individual.

El desarrollo de las inflorescencias se vio afectado en los meses 3 y 4 (diciembre- enero) dentro de la unidad, dicho fenómeno pudo haber sido provocado por la intolerancia de la especie a bajas temperaturas (United States Department of Agricultura, s.f), similarmente la mitad de la población sufrió afectaciones en el crecimiento y desarrollo, desembocado de la intolerancia a la sombra ((United States Department of Agricultura, s.f) impidiendo que alcanzaran el desarrollo óptimo, que obtuvieron aquellas que recibieron luz solar total. Las plantas que estuvieron mayor tiempo a la sombra alcanzaron un alto total de 100cm-160cm y de 4-8 tallos, mientras las que recibieron luz solar sin interferencias alcanzaron un alto de 161cm – 200cm y de 15-36 tallos.

### 9.3. Potencial de hidrógeno (pH)

En la normatividad mexicana (PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017) se establecen límites máximos permisibles de 6.5 UpH – 8.5 UpH en los cuales el agua residual tratada puede ser vertida a cuerpos de agua o al suelo sin provocar daño al ecosistema.

El agua residual estudiada se obtuvo principalmente de los baños de la UJAT DACBIOL, la cual por su composición (mayormente urea) presentaba durante el periodo de investigación valores alcalinos de 8.2 UpH hasta 8.85 UpH. Durante la fase de arranque se obtuvieron medianas de 8.3 UpH para el cárcamo y 8.2 UpH para el TC-Co (tanque de control *Cyperus odoratus*) mientras que en los tratamientos HAFS-Co (humedal artificial de flujo subsuperficial- *Cyperus odoratus*) y HAFS-B (humedal artificial de flujo subsuperficial- Blanco) se observó disminución en el parámetro de 7.8 UpH. En la fase de estabilización las medianas más bajas se reflejaron en los tratamientos HAFS-Co con 7.95 UpH y HAFS-B con 8.44 UpH, mientras que el cárcamo obtuvo el valor de pH más elevado. Al ser comparados los valores de pH en cada tratamiento con la normatividad puede considerarse al tratamiento con *Cyperus odoratus* dentro de un rango aceptable de UpH para ser vertida al medio ambiente.

### 9.4. Temperatura

La temperatura del agua es de interés central en la ecología del medio acuático ya que ésta influye sobre los procesos físicos, químicos y biológicos que se producen y consecuentemente, sobre los organismos que en ellos desarrollan (Ribalaygua, Santiago, Pórtoles, Monjo, & Solana, 2014).

En México, los límites máximos permisibles para verter descargas en aguas y bienes nacionales están fijados en 35°C para cuerpos de agua dulce e infiltración y riego de áreas verdes por el PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017. En las fases analizadas no se exceden estos límites en ninguno de los tratamientos, puesto que en la fase de arranque se obtienen



valores máximos de temperatura (T) de 27.62°C y el más bajo de 25.22 °C mientras que en la fase de estabilización se obtuvieron valores máximos de 29.6°C y mínimos de 26.85°C .

### 9.5. Conductividad eléctrica (CE)

En la fase de arranque el valor promedio más bajo se obtuvo en los tratamientos HAFS-Co con CE de 521.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y el HAFS-B con 1085.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que el valor mayor se obtuvo en el tratamiento TC-Co con 1448.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Concerniente a la fase de estabilización el valor promedio menor se obtuvo en los tratamientos Cárcamo con valor de CE de 1575.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y TC-B con 1670.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

La CE debe presentar un valor máximo permitido de descarga en riego agrícola de 1011  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (CE-CCA-001/89), por lo que la especie *Cyperus odoratus*, no logra remover significativamente estos valores una vez estabilizada el humedal, por lo que será necesario ver qué tipos de cultivos pueden presentar tolerancias a estas concentraciones.

### 9.6 Sólidos disueltos totales (SDT)

Los niveles de sólidos totales que son demasiado altos o demasiado bajos pueden reducir la eficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales, así como afectar el equilibrio del agua en las células de los organismos acuáticos (APHA 1992, citado en EPA,2012).

Al inicio de la investigación (fase de arranque) el valor promedio más bajo en SDT se obtuvo en el HAFS-Co con 248ppm y seguidamente el HAFS-B con 544.4 ppm, la mediana más alta en el tratamiento TC-Co con 722.7. Durante la fase de estabilización el valor de la mediana más bajo se presentó en los tratamientos HAFS-Co con valor de SDT de 745.0 ppm, seguido del tratamiento Cárcamo con 795.0 ppm y la mediana más alta en el tratamiento TC-Co con 895.0 ppm.

A partir de la comparación de tratamientos puede observarse que en las dos etapas (arranque y estabilización) el tratamiento con *Cyperus odoratus* presentó los valores más bajos de SDT, en ambas fases los límites máximos permisibles estuvieron dentro del rango de 1000ppm estipulados en el PROY-NOM-127-SSA1-2017, que si bien, es una norma centrada en concentraciones establecidas para agua potable puede tomarse de referencia para aguas tratadas en el caso de SDT.

Los valores de SDT permitidos para descarga en riego agrícola son de 440 a 500 mg/L, ya que la concentración de SDT que no tienen efectos nocivos en ningún cultivo es de 500 mg/L (CE-CCA-001/89). Será necesario ver qué tipos de cultivos pueden presentar tolerancias a estas concentraciones.



### 9.7. Color

El color en las aguas residuales es causado por los sólidos en suspensión, material coloidal y sustancias en solución (Crites y Tchobanoglous, 2000) en ambas fases se obtuvieron valores promedio menores de color en la unidad experimental con vegetación (229.0 UC y 206.5 UC respectivamente) a diferencia de los demás tratamientos que presentaron valores elevados de este parámetro como el TC-B cuyo tratamiento presentó 1518 UC en la fase de arranque y 1260 UC en la fase de estabilización. Los valores obtenidos por los tratamientos con vegetación cumplen con el PROY-NOM-001-1996 el cual estipula que para el vertido de aguas residuales a bienes nacionales este debe cumplir con 15% de pureza.

### 9.8. Turbiedad

La turbidez se utiliza para indicar la calidad del agua y la eficiencia de la filtración para determinar si hay presencia de organismos que provocan enfermedades. Una alta turbidez suele asociarse a altos niveles de microorganismos como virus, parásitos y algunas bacterias. (DIGESA, 2015).

Durante la investigación se determinó que en ambas fases los tratamientos en humedales artificiales obtuvieron valores menores de turbiedad, mientras que los otros tratamientos mostraban valores elevados de hasta un 80% más. De igual manera se observó que en las HAFS (Co y B) el reactor con vegetación obtuvo valores menores en cada una de las fases. En México no se encuentra regulado este parámetro para descargas de aguas residuales en bienes nacionales, sin embargo, dentro de la normatividad internacional la organización mundial de la salud (OMS) estipula las concentraciones en agua para consumo humano en 5 NTU y la por lo que según los valores obtenidos en el HAFS-Co (7.9 UNT y 9.4 UNT) es aceptable el vertido a bienes nacionales.

### 9.9. Oxígeno disuelto (OD)

La vida, el crecimiento de microorganismos y el desarrollo de sus actividades metabólicas específicas, dependen de la disponibilidad de oxígeno molecular. Algunos procesos tienen lugar solamente bajo condiciones aerobias, otros en cambio, son estrictamente anaerobios (Instituto de investigaciones marinas y costeras, 2003).

La concentración en el nivel de oxígeno disuelto puede traer afectaciones directas al ecosistema, como anoxia o hipoxia. Generalmente los rangos aceptables para la vida acuática se encuentran en 5 – 8 mg/L (Gayenola, 2007).

Al final de la estabilización el humedal artificial con vegetación obtuvo un valor promedio de 5.91 mg/L mientras que el humedal artificial sin vegetación obtuvo 2.76 mg/L, en la fase de arranque se observaron comportamientos similares donde el HAFS-Co alcanzó 5.3 mg/L.



### 9.10. Potencial de óxido reducción (ORP)

Se ha estudiado que lecturas de POR menores de -100 mV indican condiciones anaerobias (Romero, 2005). Al obtener en promedio valores de POR entre -273.3 mV y 43 mV en los HA evaluados, claramente identificamos que el HA con valores negativos presentan condiciones anaerobias y el humedal con vegetación presenta valores positivos por el aporte de OD a través de las raíces, lo que explica las concentraciones bajas de OD de entre 0 y 2.50 mg/L, corroboran que HA presentan deficiencias de oxígeno (Saeed y Sun, 2012).

Finalmente sabemos que los microorganismos alteran las condiciones del potencial de óxido-reducción al ser los responsables de llevar a cabo las reacciones de óxido-reducción y transforman los contaminantes (compuestos de nitrógeno a través de la nitrificación) y los hacen asimilables para las plantas (CONAGUA, 2015).

### 9.11. Eficiencia de remoción (ER)

Para mayor interpretación de la información se dividió la discusión en dos partes, siendo fase de arranque y fase de estabilización.

#### 9.11.1. Fase de arranque

Durante la fase de arranque las unidades de tratamiento con *Cyperus odoratus* (TC-Co y HAFS-Co) registraron mayor eficiencia de remoción en los parámetros de ORP (119.5%), TURB (90.8%), COLOR (82.6%), SDT (61.3%) y CE (63.3%) mientras que para los valores de T y pH se obtuvieron eficiencias de 4.6% y 6.6% respectivamente.

En las unidades de tratamiento blancos (TC-B y HAFS-B) se obtuvieron valores por debajo de los obtenidos en los tratamientos con *Cyperus odoratus*, en algunos parámetros la diferencia fue de hasta un 50% más de ETP como el ORP. Los valores más altos registrados en la fase de arranque para el TC-B y HAFS-B fueron el COLOR (55.6%), TURB (54.8%), ORP (41.4), SDT (30.3%), CE (28.9%), los valores que obtuvieron menor porcentaje de ETP fueron T y pH con 4.9% y 5.6%

#### 9.11.2. Fase de estabilización

A partir del análisis realizado en la fase de estabilización se determinó que en los tratamientos con *Cyperus odoratus* los parámetros con mayor ETP fueron el ORP (126.5), TURB (88.5%) y COLOR (80.4%)



## 10. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten concluir que el HAFS con *Cyperus odoratus* operando con un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 4.78 días, presentó un porcentaje de remoción de turbiedad y color durante la fase de arranque 90.8 y 82.6% respectivamente y a partir de la estabilización fue de 88.5 y 80.4% respectivamente.

*Cyperus odoratus* favorece significativamente la oxigenación del medio en los HA, pues las concentraciones de OD son mayores a 5.8 mg/L en el agua tratada, siendo el HAFS-Co quien suministra más oxígeno en el efluente y como consecuencia presentó mejor oxigenación siendo de -190 y -136% en las fases de arranque y estabilización respectivamente.

Existe un alto potencial para que esta especie *Cyperus odoratus* pueda implementarse en HA en la región del sureste mexicano, lo cual permitiría disminuir los costos de construcción, operación y mantenimiento, pues los HA que operan en la región tienen como especie única *Thypha domiguensis*, y *Cyperus odoratus* es más fácil de manejar por su tamaño además es eficiente en la remoción de contaminantes básicos físicos.

## 11. RECOMENDACIONES

El manejo de la especie *Cyperus odoratus* no presentó complicaciones (muerte o inaptabilidad) que pusieran en riesgo su desarrollo durante el periodo de estudio, sin embargo y dado a que es una especie nueva en el tratamiento de agua residual es necesario dar a conocer algunos factores que de no controlarse podrían provocar problemas durante su uso como fitodepurador:

### Cosechas

Debido a su potencial como maleza y a su alto nivel de reproducción en zonas húmedas, es necesario moderar las semillas provenientes de las inflorescencias una vez estén secas, puesto que se dispersan fácilmente por medio del agua y animales (Brink, Jansen y Bosch, s.f) en contacto con el humedal por medio de sus patas, pico, alas, etc.

### Control de plagas y herbivorías

Se observó en las temporadas más cálidas del estudio la presencia de pulgón negro (*aphis phabae*) el cual según Bermejo (2011) se presenta en cultivos herbáceos y provoca “debilitamiento de la planta por succión de savia, reducción del crecimiento y rendimiento del cultivo. Además, segrega melaza y, a continuación, se instala el hongo negrilla que cubre las hojas, reduciendo la capacidad fotosintética y respiratoria de la planta y hormigas que aprovechan la melaza. Se recomienda monitorear constantemente el follaje de la vegetación para prevenir que la plaga se extienda. Para el control de plagas se recomienda rociar la vegetación con potásico (Bermejo, 2011).



Figura 36. Plagas en *Cyperus odoratus*

### Podas

Debido a lo cespitoso de la especie al inicio de las podas se quebraban las hojas lo cual provocaba aumento de biomasa muerta. Se recomienda podar mensualmente o no podar. En el caso de las inflorescencias deben ser retiradas para prevenir la sobrepoblación de la especie dentro del humedal y áreas de afluencia.



## 12. REFERENCIAS

- Agami, M., Litav, M., & Waisel, Y. (1976). The effects of various components of water pollution on the behaviour of some aquatic macrophytes of the coastal rivers of Israel. *Aquatic Botany*, 2, 203-213. doi:10.1016/0304-3770(76)90021-8
- Ariza y Almarzan-Merchan (2012) identificación y clasificación en biotipos de las malezas asociadas con el cultivo de la palma de aceite
- Avellán, T., & Gremillion, P. (2019). Constructed wetlands for resource recovery in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 99, 42-57. doi:10.1016/j.rser.2018.09.024
- Bakhshoodeh, R., Alavi, N., Oldham, C., Santos, RM, Babaei, AA, Vymazal, J., y Paydary, P. (2020). Humedales artificiales para el tratamiento de lixiviados de vertederos: una revisión. *Ingeniería Ecológica*, 146, 105725.
- Castañeda, M (2019) Estequiometría y cinética del crecimiento microbiano. Consultado el 28 de mayo de 2020 de: [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/89651/Apunte\\_de\\_c%C3%A1tedra.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/89651/Apunte_de_c%C3%A1tedra.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Chale, F. M. M. (1985). Effects of a cyperus papyrus L. swamp on domestic waste water. *Aquatic Botany*, 23(2), 185-189. doi:10.1016/0304-3770(85)90064-6
- CONABIO (2011) Catálogo de malezas de México (*Cyperus odoratus*) disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/cyperaceae/cyperus-odoratus/fichas/ficha.htm>
- CONAGUA (2015) Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales artificiales. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. México. 134p. Libro 30. Consultado el 10 de febrero de 2020 de: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas>
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas
- Curt, M., Beaoescochea, E., Muñoz E., (s.f). Manual de fito depuración, filtros de macrófitas en flotación, (pp 62-66). Madrid. Universidad politécnica de Madrid, Fundación Global Nature, Obra social Consultado el 29 de marzo de 2020 de: <https://www.fundacionglobalnature.org/macrophytes/documentacion/Cap%EDtulos%20Manual/Cap%EDtulos%205.pdf>
- De la Varga, D., Soto, M., Arias, CA, van Oirschot, D., Kilian, R., Pascual, A., y Álvarez, JA (2020). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales industriales y la eliminación de nutrientes. En *Gestión de residuos: conceptos, metodologías, herramientas y aplicaciones* (pp. 559-587). IGI global.
- Diego Pérez, N. (2012). Flora de Veracruz, Cyperaceae. 1st ed. [ebook] Xalapa: Gonzalo Castillo-Campos, p.93. Consultado el 1 enero de 2020 de:



- [http://www1.inecol.edu.mx/publicaciones/resumeness/FLOVER/157\\_Cyperaceae.pdf](http://www1.inecol.edu.mx/publicaciones/resumeness/FLOVER/157_Cyperaceae.pdf).
- DOF (1989) Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Aguas CE-CCA-001/89. Diario Oficial de la Federación, Miércoles 13 de diciembre de 1989. Semarnap, Comisión Nacional del Agua, con base en: Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Disponible en: [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989). Fecha de consulta: 29 de mayo de 2020.
- DOF (2018). PROYECTO de Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales para quedar como proyecto de modificación de la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.
- DOF. (2002). NOM-021-RECNAT-2000 Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.
- DOF. (2016) NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua-medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba (cancela a la nmx-aa-034-scfi-2001).
- EPA (2012) Agua, monitoreo y tratamiento. Sólidos totales, consultado el 8 de junio de 2020 de: <https://archive.epa.gov/water/archive/web/html/vms58.html>
- FAO (2017). Reutilización de aguas en la agricultura para America latina y el caribe. Consultado el 5 de enero de 2020 de: <http://www.fao.org/3/a-i7748s.pdf>
- Fern (2014) Plantas tropicales útiles, *Cyperus Odoratus*. Consultado el 02 de febrero de 2020 de: <http://tropical.theferns.info/viewtropical.php?id=Cyperus+odoratus>
- Flores, D & Alcalá, M (2010). Manual de procedimientos analíticos, laboratorio de física de suelos. Consultado el 29 de febrero de 2020 de: <http://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>
- García-Ávila, F., Patiño-Chávez, J., Zhinín-Chimbo, F., Donoso-Moscoso, S., del Pino, L. F., & Avilés-Añazco, A. (2019). Performance of *Phragmites Australis* and *Cyperus Papyrus* in the treatment of municipal wastewater by vertical flow subsurface constructed wetlands. International Soil and Water Conservation Research.
- Gayenola (2007) Guía para la utilización de las Valijas Viajeras Red de monitoreo ambiental participativo de sistemas acuáticos (RED MAPSA). Consultado el 5 de julio de 2020 de: [http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso\\_2007/cartillas/tematicas/OD.pdf](http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso_2007/cartillas/tematicas/OD.pdf)



- Hocking, P. J. (1985). Responses of cyperus involucratus rottb. to nitrogen and phosphorus, with reference to wastewater reclamation. *Water Research*, 19(11), 1379-1386. doi:10.1016/0043-1354(85)90304-5
- INEGI (2015) Anuario estadístico y Geográfico del Estado de Tabasco. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. [https://tabasco.gob.mx/sites/all/files/vol/ceieg.tabasco.gob.mx/fi/Anuario%20estad%20C3%ADstico%20y%20geogr%C3%A1fico%20de%202015\\_0.pdf](https://tabasco.gob.mx/sites/all/files/vol/ceieg.tabasco.gob.mx/fi/Anuario%20estad%20C3%ADstico%20y%20geogr%C3%A1fico%20de%202015_0.pdf)
- Instituto de investigaciones marinas y costeras (2003) Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos. Pp.71. Invemar.
- López Vázquez, C., Buitron Méndez, G., García, H y Cervantes Carrillo, F. (2017). Tratamiento biológico de aguas residuales: Principio, modelación y diseño. Consultado el 15 de diciembre de 2019 de: [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=lxNBDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=tratamiento+de+aguas+residuales&ots=ygmQ6Yc8vQ&sig=wL\\_NmZzAS9Y5S6Iw-Vud8sPcgd0#v=onepage&q=tratamiento%20de%20aguas%20residuales&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=lxNBDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=tratamiento+de+aguas+residuales&ots=ygmQ6Yc8vQ&sig=wL_NmZzAS9Y5S6Iw-Vud8sPcgd0#v=onepage&q=tratamiento%20de%20aguas%20residuales&f=false)
- López, G., Torres, C. A., Bautista, R. G., Hernández, J. R., Cruz, E. y Ferrer, M. I. (2014). Diseño de sistemas experimentales de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial. En Contreras SWM (ed). *Perspectiva Científica desde la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco*. Primera Edición. Tabasco México. pp: 133-146.
- Maucieri, C., Barbera, AC, Vymazal, J., y Borin, M. (2017). Una revisión sobre los principales factores que afectan la emisión de gases de efecto invernadero en los humedales artificiales. *Meteorología agrícola y forestal*, 236, 175-193.
- Mendoza, Y. I., I Pérez, J., & Galindo, A. A. (2018). Evaluación del aporte de las plantas acuáticas Pistia stratiotes y Eichhornia crassipes en el tratamiento de aguas residuales municipales. *Información tecnológica*, 29(2), 205-214.
- Metcalf y Eddy, Inc. 2000. *Wastewater Engineering—Treatment, Disposal, and Reuse*. 3rd ed. McGraw-Hill Publishing Company, New York, New York.
- ONU (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales el recurso no explotado. Consultado el 15 de diciembre de 2019 de: <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2017/03/247647S.pdf>
- Paca, F., Santos, F., Pires, J., Leitão A y Boaventurac, R. (2019). Evaluation of water quality for human consumption of the Kwanza, Dande and Bengo rivers (Angola) [Evaluación de la calidad del agua destinada al consumo humano de los ríos Kwanza, Dande y Bengo (Angola)]. *Environmental pollution*, 254 (113037), 2-3. doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113037



- Pazmiño, P & Jaramillo, T (2019). Sistemas de siembra utilizado en el cultivo de banano (Musa paradisiaca, en la hacienda la Gema del cantón Baba UTB, 2019). <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/6025>
- Pérez-Salazar, R., Mora-Aparicio, C., Alfaro-Chinchilla, C., Sasa-Marín, J., Scholz, C., & Rodríguez-Corrales, J. Á. (2019). Biogardens as constructed wetlands in tropical climate: A case study in the central pacific coast of costa rica. *Science of the Total Environment*, 658, 1023-1028. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.12.259
- Plants use (2016) *Cyperus odoratus* (PROSEA) consultado el 01 de febrero de 2020 de: [https://uses.plantnet-project.org/en/Cyperus\\_odoratus\\_\(PROSEA\)](https://uses.plantnet-project.org/en/Cyperus_odoratus_(PROSEA))
- Ramachandran, A. & Soosairaj, Sebastian. (2014). *Cyperus odoratus* L. (Cyperaceae) a newly recorded species in India. *International Journal of PharmTech Research*. 6. 518-520.
- Ribalaygua, J., Santiago, J. M., Pórtoles, J., Monjo, R., & Solana, J. (2014). Impactos del cambio climático sobre los ecosistemas fluviales en España y definición de medidas de adaptación para su protección. *Acta de las Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española*, 33(1).
- 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.
- Sánchez-Olivares, E., Marín-Muñoz, J. L., & Hernández-Alarcón, M. E. (2019). Liberación de oxígeno radial por las raíces de las plantas nativas de humedales tropicales costeros de Veracruz en respuesta a diferentes condiciones de inundación. *Botanical Sciences*, 97(2), 202-210
- Soler, C. (2019). Evaluación del desempeño de humedales artificiales con macrófitos flotantes (Lemnas) en el tratamiento de efluentes urbanos. *Int J Hydro*, 3 (2), 129-136.
- Tao, W. (2018). Microbial removal and plant uptake of nitrogen in constructed wetlands: Mesocosm tests on influencing factors. *Environmental Science and Pollution Research International*, 25(36), 36425-36437. doi:10.1007/s11356-018-3543-4
- Terán, L. V. (2014). Principio de Arquímedes. *Vida Científica Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 4*, 2(3).
- Tucker, G. C. (1983). *The taxonomy of cyperus [cyperaceae] in costa rica and panama*. Michigan: American Society of Plant Taxonomists.
- Turekian, K. K., & Holland, H. D. (2003). *Treatise on geochemistry* (1ra ed.). GB: Elsevier Science.
- United States Department of agricultura (USDA) (s.f) Natural resources conservation service, Plants dataBase. Consultado el 29 de mayo de 2020 de: <https://plants.usda.gov/core/profile?symbol=CYOD>



Wang, M., Zhang, DQ, Dong, JW y Tan, SK (2017). Artificial wetlands for the treatment of wastewater in cold climates: a review [Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en climas fríos: una revisión]. *Revista de Ciencias Ambientales*, 57, 293-311.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco  
México



## ANEXO 1. ANEXOS FOTOGRÁFICOS

### Colecta de vegetación

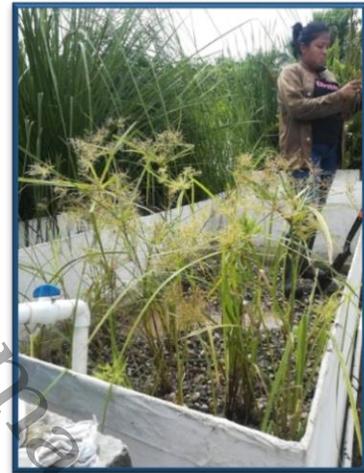




Caracterización de la vegetación



Siembra de las plantas





Monitoreo de los reactores

- Análisis fisicoquímicos



- Caracterización del medio de soporte y medición de SST

