

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS



Evaluación de parámetros fisicoquímicos de una celda de combustible microbiana acoplada a un humedal construido de flujo horizontal superficial con *Canna indica* durante el tratamiento de agua residual municipal.

Por:

IVONE ABIGAIL GARZA GONZALEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA

Saltillo, Coahuila

Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

Evaluación de parámetros fisicoquímicos de una celda de combustible microbiana
acoplada a un humedal construido de flujo horizontal superficial con *Canna indica*
durante el tratamiento de agua residual municipal.

Por:

IVONE ABIGAIL GARZA GONZALEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. José Antonio Rodríguez de la Garza
Asesor principal externo



Dra. Silvia Yudith Martínez Amador
Asesor principal interno



Dra. Aida Isabel Leal Robles
Coasesor



Dr. Pedro Pérez Rodríguez
Coasesor

Saltillo, Coahuila

Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

Evaluación de parámetros físicoquímicos de una celda de combustible microbiana acoplada a un humedal construido de flujo horizontal superficial con *Canna indica* durante el tratamiento de agua residual municipal.

Por:

IVONE ABIGAIL GARZA GONZALEZ

TESIS

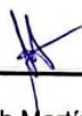
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Aprobada por el Jurado examinador:



Dr. Pedro Pérez Rodríguez
Presidente



Dra. Silvia Yudith Martínez Amador
Vocal



Dra. Aida Isabel Leal Robles
Vocal



M.C. Laura María González Méndez
Suplente





M.C. Sergio Sánchez Martínez
Coordinador De La División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila

Junio 2026

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o cita textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante



Ivone Abigail Garza Gonzalez

AGRADECIMIENTOS

A Dios, porque todo es por él y gracias a él.

A la Dra. Silvia Yudith por brindarme esta gran oportunidad para continuar creciendo académicamente, por compartirme de su amplio conocimiento y sobre todo por ayudarme a forjarme en la gran profesionista que soy, gracias por siempre estar para mí y alentarme a seguir adelante, por aconsejarme y ser mi guía a lo largo de este camino.

A la M.C. Brenda Verónica Borrego Limon, por todo su apoyo técnico durante la tesis, por brindarnos siempre su orientación y guía en absolutamente todo, por contribuirnos de su amplio conocimiento y experiencia lo cual es muy significativo para el desarrollo del presente trabajo de licenciatura, gracias por ser amiga en todo momento, porque su buen humor y pláticas que siempre me ayudaron a mejorar mi día incluso los más difíciles.

A mis maestros a lo largo de la carrera, en especial a la M.C. Carmen Julia, Dr. Marco Adán y Dr. Javier Montalvo; por siempre hacerme darme la oportunidad de explotar al máximo capacidades en mí que ni yo conocía en cada momento a lo largo de este camino.

A mi mayor acompañante de vida y carrera Isaac Zuñiga; porque más que compañía y cariño, siempre fue hombro, oído, apoyo, guía, jamás terminaría de describir todo lo que fue para mí en este trayecto porque a pesar de que fuera más pesado para uno o para otro nunca dejo de alentarme y creer en mí incluso cuando ni yo lo hacía. Por siempre mantener mi pancita llena y en mis días una sonrisa. Te amo.

Al equipo Fénix; Misael y Josué porque, aunque el trayecto ha sido corto nunca dejaron de alentarme y ver muchísima capacidad en mí como persona y profesionista, por escucharme y aconsejarme cada vez que fue necesario. Por sus grandes enseñanzas y amistad.

A pelos y güero; porque fueron mis acompañantes durante muchas madrugadas de desvelo, nunca me dejaron sola.

DEDICATORIA

A mis padres; Verónica y José Luis, porque dar orgullo a sus apellidos juntos fue mi motivación cada día. Por siempre alentarme y ser mi luz incluso en los días más oscuros de este largo camino. Por darme mis alas y fuerza para cada meta que hemos logrado.

A mis hermanos, Wendy, Ángela y Marcus, por siempre hacerme reír cuando más pesada era la carga, por escucharme y estar siempre que lo necesite, aunque solo fuera para escucharme. Y, sobre todo ser su mejor ejemplo a seguir.

A mis abuelitas; Alicia y Consuelo, porque siempre fueron mi mayor ejemplo a seguir, las mujeres más fuertes que conozco por siempre estarán en mi corazón y hacerlas sentir orgullosas no tiene precio.

A mi abuelo, José Luis porque estuvo presente en mi mente en cada paso que di, deseando grandemente que donde sea que este también sea orgulloso de este gran paso.

ÍNDICE GENERAL

Contenido

AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
INDICE DE GRAFICAS	ix
INDICE DE TABLAS	ix
RESUMEN.....	x
OBJETIVO GENERAL	3
HIPÓTESIS	3
REVISIÓN DE LITERATURA	4
1. Agua residual municipal	4
2. Celdas de combustible microbianas	5
3. Humedal.....	6
4. Humedal construido de flujo horizontal	8
5. Celda de combustible microbiana acoplada a un humedal de flujo horizontal	8
6. <i>Canna indica</i>	9
MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
Localización.....	11
Construcción de humedal artificial	11
Proceso del experimento.....	14
Análisis físicos	16
Análisis químicos	18
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
CONCLUSIÓN	26
LITERATURA CITADA	27

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Estructura de una celda de combustible microbiano: a) cámara anódica, b) cámara catódica, c) membrana de intercambio catiónico, d) circuito externo (Montenegro-Rosero <i>et al.</i> , 2019)	6
Ilustración 2. Tipos de humedales construidos: a) CW de flujo superficial, b) CW flujo horizontal subsuperficial, c) CW flujo vertical (Montenegro-Rosero, 2019)	8
Ilustración 3. <i>Canna indica</i> (The Royal Horticultural Society Diary, 2004)	9
Ilustración 4. Armado de reactor.....	11
Ilustración 5. Mezcla de tepojal 6mm y 9mm	12
Ilustración 6. Lavado de tepojal.....	12
Ilustración 7. Evaluación de ejemplares de <i>Canna indica</i>	12
Ilustración 8. Colocación final de ánodo y cátodo.	13
Ilustración 9. Evaluación para fugas.	13
Ilustración 10. Recolección de ARM en planta tratadora municipal.....	14
Ilustración 11. Reactores para desarrollo del experimento.....	14
Ilustración 12. Establecimiento en fotoperiodo y bomba.	15
Ilustración 13. Agua tratada.....	16
Ilustración 14. ARM cruda.....	16
Ilustración 15. Medición de voltaje.	17
Ilustración 16. Tubos HACH preparados con muestra.....	18
Ilustración 17. Tubos HACH preparados en digestor.....	18

INDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1. Comportamiento de pH.	19
Gráfica 2. Comportamiento de conductividad eléctrica.	20
Gráfica 3. Comportamiento ORP.....	21
Gráfica 4. Comportamiento de la salinidad.	22
Gráfica 5. Comportamiento del voltaje.	23
Gráfica 6. Comportamiento de la demanda química de oxígeno.	24

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tratamiento del experimento.	15
--	----

RESUMEN

El tratamiento de agua residual municipal, la cual abarca todas aquellas descargas domésticas, comerciales e industriales, se convirtió en un foco de interés tras la escasez de este recurso no renovable y la inmediata demanda que presenta la población día con día considerando como opción un sistema de tratamiento biológico y amigable con el ambiente en el que no intervengan o disminuya la implementación de químicos. En la presente investigación se evaluó un sistema de tratamiento de agua residual municipal consistente en una celda de combustible microbiana acoplada a un humedal construido de flujo horizontal superficial con ejemplares de *Canna indica* y tepojal como sustrato operado a tres tiempos de retención hidráulica (TRH) de 72 horas. Los parámetros monitoreados fueron la demanda química de oxígeno, el potencial de hidrógeno, la salinidad, la conductividad eléctrica, el potencial óxido reducción y el voltaje. De acuerdo con los resultados en el TRH de 72 h se obtuvieron los mejores resultados, una eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) promedio de 83%, una generación de corriente eléctrica promedio de 203 mV y parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica, ORP y salinidad) mostraron un comportamiento estable durante la operación del sistema.

Palabras clave: tratamiento de agua residual, agua residual municipal, celda de combustible microbiana, tiempo de retención hidráulica, humedal construido.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, de acuerdo con reportes de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2026), México enfrenta una problemática significativa de sequía, reflejada en la disminución de la superficie de agua disponible. A pesar de una temporada activa de lluvias durante 2025, los niveles se mantienen por debajo del 24% del promedio histórico. Por otra parte, datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2024) indican que aproximadamente el 80% de las viviendas del país dependen de sistemas locales de abastecimiento de agua, lo que evidencia que el acceso a este recurso no es universal ni equitativo.

En este contexto, la implementación de sistemas para el tratamiento y reutilización de aguas residuales se ha convertido en un área de creciente interés tanto en investigación como en aplicaciones prácticas, como una estrategia para mitigar la problemática hídrica actual. No obstante, en muchos casos estos sistemas implican altos costos de inversión y operación, así como un elevado grado de complejidad técnica, lo que limita su implementación en comunidades con recursos económicos restringidos.

Ante esta situación, han surgido diversas tecnologías enfocadas en la sostenibilidad y el fácil acceso. Entre ellas destacan los humedales construidos acoplados a celdas de combustible microbianas (HC-CCM), sistemas en los que se integran procesos de remoción de contaminantes con la generación de energía eléctrica, favoreciendo su sostenibilidad. Esta combinación representa una alternativa innovadora y viable para el tratamiento descentralizado de aguas residuales. Entre sus principales ventajas se encuentran su operación sencilla, baja demanda energética, potencial de implementación en zonas rurales y la capacidad de generar corriente eléctrica. Sin embargo, presentan limitaciones como la baja densidad de potencia producida, lo que constituye un área de oportunidad para su optimización y escalamiento (Corbella *et al.*, 2015).

El tiempo de retención hidráulica (TRH) es uno de los parámetros operativos más influyentes en el desempeño de los sistemas HC-CCM de flujo horizontal, ya que regula el tiempo de contacto entre el agua residual, el sustrato y el biofilm electroactivo. En este tipo de configuraciones, se han evaluado TRH en un rango de 24 a 96 horas, observándose que valores intermedios (48–72 h) ofrecen un balance adecuado entre la eficiencia de remoción de contaminantes y la producción de energía eléctrica (Oon *et al.*, 2016; Doherty *et al.*, 2015). En contraste, TRH inferiores a 24 horas limitan la remoción de contaminantes como la demanda química de oxígeno (DQO), debido a un tiempo insuficiente para el desarrollo de procesos microbiológicos y fisicoquímicos. Aunque en estas condiciones pueden registrarse incrementos momentáneos en el voltaje debido a altas cargas orgánicas, estos no suelen ser estables.

En sistemas de flujo horizontal superficial, el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos a distintos TRH está determinado por la interacción entre zonas aerobias y anaerobias a lo largo del humedal. De acuerdo con la literatura, a TRH de 48–72 horas se

pueden alcanzar eficiencias de remoción de DQO superiores al 80%, asociadas a una mayor actividad microbiana y al establecimiento de gradientes redox más definidos (Yadav *et al.*, 2021). Asimismo, parámetros como el pH y la conductividad eléctrica tienden a mantenerse relativamente estables. No obstante, TRH mayores a 96 horas pueden generar condiciones excesivamente reductoras que afectan la actividad electroquímica de la CCM, disminuyendo la eficiencia en la generación de corriente, lo que evidencia la necesidad de optimizar este parámetro operativo.

Por lo tanto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el efecto del tiempo de retención hidráulica en un sistema bioelectroquímico para el tratamiento de agua residual municipal, consistente en una celda de combustible microbiana acoplada a un humedal construido de flujo horizontal superficial, operado a un tiempo de retención hidráulica de 72 horas.

OBJETIVO GENERAL

Determinar parámetros fisicoquímicos como la demanda química de oxígeno, el potencial de hidrógeno, la salinidad, la conductividad eléctrica, el potencial óxido reducción y el voltaje generado por un sistema bioelectroquímico de tratamiento de agua residual municipal consistente en una celda de combustible microbiana acoplada a un humedal construido de flujo horizontal superficial.

HIPÓTESIS

El sistema bioelectroquímico tendrá mejores resultados conforme al aumento en el tiempo de retención hidráulica ya que se permitirá tener un mayor tiempo de contacto del agua con los componentes del sistema (microorganismos, plantas y sustrato)

REVISIÓN DE LITERATURA

1. Agua residual municipal

El agua residual se clasifica como todo aquel desecho que proviene de descargas domésticas e industriales que suelen presentar una alta carga microbiana y sólidos orgánicos suspendidos o disueltos (Ghate & Sonune, 2004).

En la actualidad, el tratamiento del agua tiene una gran importancia ambiental y sanitaria a nivel mundial debido al incremento en la demanda de este recurso natural no renovable para el desarrollo humano, industrial y agrícola. El nivel de agua dulce disponible representa una fracción limitada del total de agua en el planeta, y su calidad se ve afectada por la cantidad de descargas domésticas e industriales. De acuerdo con reportes de la Organización de las Naciones Unidas nos mencionan que el aumento poblacional, la urbanización acelerada y el cambio climático están aplicando una intensa explotación sobre los recursos hídricos, lo que hace de gran relevancia implementar las estrategias de tratamiento y cuidado de aguas residuales.

Por otra parte, la Organización Mundial de la Salud desde 2017 señala que el tratamiento inadecuado de aguas residuales representa un riesgo significativo para la salud pública debido a la presencia de patógenos y posibles compuestos orgánicos (OMS, 2017).

Por ello es que se señala el tratamiento de aguas residuales como el conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos destinados a remover contaminantes presentes en el agua, con el objetivo de cumplir los estándares normativos que permitan su descarga segura al ambiente o su posible reutilización (Metcalf & Eddy, 2014). Según la Comisión Nacional del Agua el tratamiento adecuado contribuye a la protección de cuerpos receptores, la conservación de ecosistemas acuáticos y la reducción de riesgos sanitarios (CONAGUA, 2022).

A lo largo del tiempo se han implementado diversas clasificaciones a los tratamientos que van desde un pretratamiento; constituye la primera fase en el cual se aplican tamices o mallas para eliminar residuos grandes o materia flotante.

- I. Tratamientos primarios; son procesos físicos de sedimentación en tanque, donde se remueven sólidos suspendidos sedimentables y parte de la materia orgánica.
- II. Tratamientos secundarios; aquellos conocidos como tratamientos biológicos donde se aprovechan al máximo los microorganismos presentes para descomponer la materia orgánica presente (reactores, lodos activados, etc).
- III. Tratamientos terciarios; también conocidos como tratamientos químicos o fisicoquímicos donde intervienen agentes desinfectantes que apoyen a la eliminación final de patógenos y definen según la normatividad aplicada su posible reúso.

En este contexto, la implementación de tecnologías amigables y de bajo costo con gran potencial ambiental destacan como una gran estrategia.

2. Celdas de combustible microbianas

Una celda de combustible microbiana (CCM) es un dispositivo bio-electroquímico utilizado para el tratamiento de agua residual y generación eléctrica simultánea por medio de la energía química de los compuestos orgánicos presentes a través la actividad metabólica de microorganismos que transfieren electrones desde la oxidación de materia orgánica hacia un electrodo anódico (Montenegro-Rosero *et al.*, 2019).

2.1 Componentes y funcionamiento de una celda de combustible microbiana

Generalmente consta de ánodo, cátodo; ambos de material conductivo que no afecte a los microorganismo productores de electricidad y cumpla con características como que sea resistente a la corrosión, alta porosidad, bajo costo y que no sea de fácil obstrucción por lo que se opta por materiales como; malla de acero inoxidable, carbono, grafito, fibras o fieltro de grafito (Logan *et al.*, 2006), una separación entre las membranas y un circuito externo para el flujo de electrones (Paucar & Sato, 2022). Paucar & Sato, 2022; mencionan que en algunos casos ante la necesidad de prever un cortocircuito entre las cámaras anódica y catódica es necesario agregar un sustrato entre ellas que a su vez permite la migración de protones.

El ánodo (terminal negativo) se encuentra en la parte inferior del sistema donde el ambiente anaerobio permitirá la oxidación electrónica de los contaminantes presentes y liberar protones y electrones con liberación de CO₂ (Montenegro-Rosero *et al.*, 2019).

El cátodo (terminal positivo) se encuentra en la parte superior del sistema donde en presencia de oxígeno actúa como aceptor de electrones formados y dará paso por medio de la reducción a iones de hidrógeno (Logan *et al.*, 2006).

Por su parte la membrana de intercambio catiónico o también conocida como membrana de intercambio protónico es indispensable para permitir el paso a los protones generados en el ánodo. Se ha reportado que entre las más estudiadas son de material nafion debido a su alta conductividad y estabilidad, sin embargo, su aplicación se ve frenada debido al alto costo del material al escalar, debido a ello se ha optado por estudiar con materiales naturales o biológicos aprovechando a su porosidad y gran disponibilidad, entre ellos destaca el tezontle o biopolímeros como son membranas de alginato o quitosano (Nugraha *et al.*, 2023).

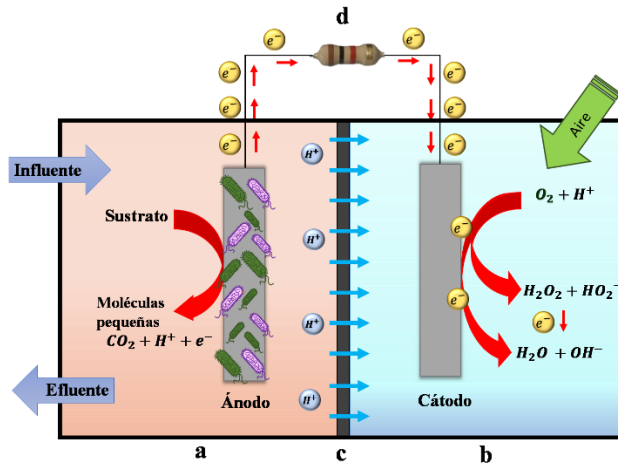


Ilustración 1. Estructura de una celda de combustible microbiano: a) cámara anódica, b) cámara catódica, c) membrana de intercambio catiónico, d) circuito externo. (Montenegro-Rosero et al, 2019)

2.2 Tepojal

El tepojal es un tipo de material derivado de la espuma durante las explosiones volcánicas, también llamado cacahuatillo es reconocido en la aplicación a sistemas de tratamiento de aguas residuales y especial uso en la jardinería por sus propiedades benéficas a los cultivos como lo son la retención de humedad y su porosidad que permite el anclaje de las raíces de las plantas al ser material natural y mineral, no contiene químicos por lo cual es considerado orgánico y usualmente utilizado en compost. (Servicio Geológico Mexicano, 2015).

3. Humedal

Un humedal es considerado un sistema híbrido pues se compone de un área terrestre temporal o permanentemente cubierta de agua, estancadas o corrientes, dulces o saladas. Para ser considerado un humedal debe mantener humedad hasta la proliferación de flora acuática (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2022).

3.1 Tipos de humedal

Se han clasificado alrededor de 5 tipos organizados por su tipo de corriente y si es agua dulce o salada entre los que encontramos (Ramsar, 2006):

- I. Marinos: humedales naturales de agua salada costeros, lagunas costeras, playas rocosas de arena o grava y arrecifes de coral.

- II. Estuarinos: de origen natural de agua salada que forman pantanos o áreas de manglares (caracterizados por vegetación leñosa que ronda hasta los 30 m de altura de una o varias especies) (CONABIO, 2021).
- III. Lacustres: lagos y lagunas de agua dulce.
- IV. Ribereños: encontrados de forma adyacente a ríos o arroyos.
- V. Palustres: de origen natural de agua dulce como bosques pantanosos, oasis, selvas inundables y pantanos permanentes o estacionales.
- VI. Artificiales: son aquellos creados por el humano diseñados generalmente como biofiltros para descargas de agua residual doméstica de escaso mantenimiento y alta eficiencia.

3.2 Humedal construido

El término humedal construido refiere a aquel sistema creado por el ser humano con un fin o propósito específico controlado donde de manera general se vuelve de gran interés al imitar el proceso natural que ya realiza y se emplean sustratos, plantas y microorganismos para degradar o eliminar contaminantes de manera sostenible sin involucrar químicos (Gobierno de México, 2022), es de bajo coste e implementación sencilla.

De acuerdo con la literatura esta aplicación remota a la antigüedad donde las antiguas civilizaciones realizaban sus descargas en lagos o ríos cercanos a sus comunidades (Brix, 1994), lo cual con el paso del tiempo se volvería foco de interés ante la gran explotación a los mantos acuíferos y la constante demanda de este recurso.

En sus componentes principales encontramos el sustrato; incluyendo sustratos orgánicos como lo son la grava, piedra o tierra los cuales deben permitir un buen anclaje a la raíz de las plantas a utilizar, vegetación; serán las encargadas de la depuración por medio de su raíz también conocidas como plantas macrófitas de las cuales se han implementado distintos ejemplares como *Canna indica*, *Typha latifolia* y *Phragmites australis*, dispositivos de entrada y salida hidráulica; generalmente utilizados tubos de material polimérico como encontramos tubos PVC, especialmente para su estos pueden ser de flujo horizontal o vertical (Gobierno de México, 2022).

De acuerdo con esta clasificación su principal diferencia será la dirección del flujo de agua que a su vez permitirá o limitará la interacción con los microorganismos presentes y las raíces de las plantas macrófitas de acuerdo con su diseño y el potencial redox que se desarrollará dentro del humedal. Por lo tanto definimos un humedal construido de flujo superficial o libre como aquel que permite la corriente de agua abierta poco profunda y con alto contacto en materia vegetal variada, flotante, sumergida y emergente presente mayormente relacionados con un humedal natural, de flujo subsuperficial son insaturados de alrededor de un metro de

profundidad rellenos de material poroso o filtrante donde el agua se distribuye uniformemente y tiene contacto con las raíces de las plantas y tiene una recolección en el fondo del lecho (Pérez-Zacarias *et al.*, 2025).

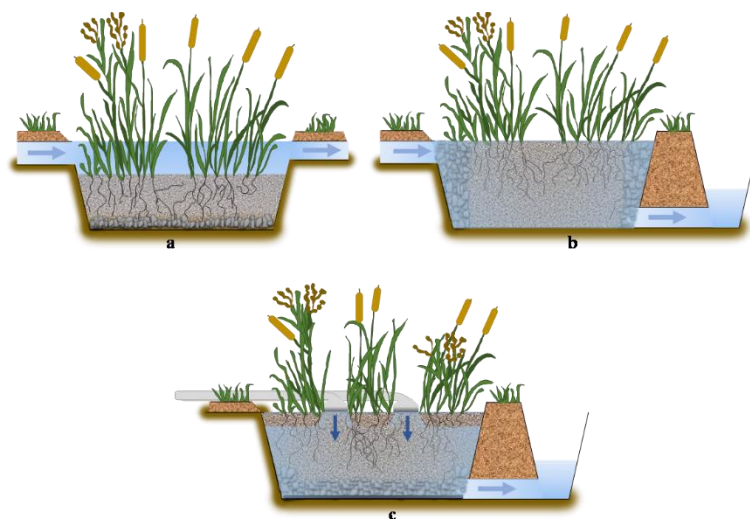


Ilustración 2. Tipos de humedales construidos: a) CW de flujo superficial, b) CW flujo horizontal subsuperficial, c) CW flujo vertical (Montengro-Rosero, 2019)

4. Humedal construido de flujo horizontal

Los humedales construidos de flujo horizontal son lechos poco profundos rellenos de material poroso o filtrante que cuenta con alta conductividad eléctrica lo que permite una adecuada adhesión (Marin-Muñiz *et al.*, 2023) para desarrollo de biofilm donde el flujo de agua entra en contacto con las raíces de las plantas presentes y tiene su salida de la parte inferior del sistema. Este tipo de flujo en un humedal tiene una capacidad mayor en transporte de oxígeno por lo que proporciona mejores condiciones para la nitrificación a comparación de un flujo vertical donde es baja o casi nula. (Pérez-Zacarias *et al.*, 2025).

5. Celda de combustible microbiana acoplada a un humedal de flujo horizontal

La celda de combustible microbiana al ser un sistema que utiliza bacterias electroactivas como catalizadores para oxidar la materia orgánica presente y generar energía por medio de su cámara anódica (anaerobia), catódica (aerobia), puente de separación y circuito externo tiene la posibilidad de combinarse con un humedal construido favoreciendo el gradiente de óxido reducción pues en el humedal encontramos el ambiente necesario para la CCM dependiendo del tipo de flujo y profundidad donde el gradiente se establece en la zona superior como ambiente anóxico e inferior donde suministra oxígeno por la rizosfera de las plantas presentes (Villaseñor *et al.*, 2013).

La literatura reporta mínimas contribuciones de sistemas HC-CCM convirtiéndose en una de las alternativas tecnológicas aún en investigación y desarrollo con alto potencial en generación de energía de acuerdo con la arquitectura de construcción, modo de operación y materiales que lo componen (Doherty *et al.*, 2015).

6. *Canna indica*

Canna indica es una planta de uso ornamental herbácea perenne encontrada principalmente en regiones tropicales se caracteriza por su alta adaptabilidad a ambientes húmedos y su capacidad para desarrollarse en suelos saturados o con presencia constante de agua. Presenta un sistema radicular rizomatoso robusto que favorece su propagación y estabilidad en condiciones de inundación, lo que la convierte en una especie adecuada para sistemas de tratamiento natural como los humedales construidos (Hanna-Alipin, 2005). Tiene un rápido crecimiento y alta producción de biomasa contribuyen a la absorción de nutrientes y a la oxigenación parcial de la rizosfera, generando condiciones favorables para la actividad microbiana presente en ella (Vymazal, 2011).

Desde el punto de vista fisiológico, *Canna indica* tiene la capacidad de tolerar concentraciones variables de contaminantes, incluyendo materia orgánica, nutrientes como nitrógeno y fósforo, e incluso algunos metales pesados. Esta tolerancia está asociada a mecanismos como la rizodegradación, en los cuales la planta no solo absorbe contaminantes, sino que también promueve su transformación mediante la interacción con microorganismos en la zona radicular lo que la clasifica como una planta macrófito (Calheiros *et al.*, 2009).



Ilustración 3. *Canna indica* (The Royal Horticultural Society Diary, 2004)

6.1 *Canna indica* en tratamiento de agua residual

El uso de *Canna indica* en sistemas de tratamiento de aguas residuales, en especial en humedales construidos de flujo horizontal superficial ha sido ampliamente estudiado debido a su eficiencia en la remoción de contaminantes y su resistencia a condiciones ambientales variables. Diversos estudios han reportado que sistemas con este ejemplar pueden alcanzar eficiencias de remoción superiores al 70% en demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos, así como reducciones significativas en nitrógeno total y fósforo, dependiendo de las condiciones de operación y el tiempo de retención hidráulica (Vymazal, 2011). Su sistema radicular favorece la formación de biofilms microbianos, los cuales desempeñan un papel clave en la degradación de materia orgánica (Brix, 1997).

Adicionalmente, en sistemas acoplados con celdas de combustible microbianas (CCM), *Canna indica* contribuye indirectamente a la generación de electricidad al mejorar las condiciones redox en la rizosfera, facilitando la transferencia de electrones hacia los electrodos. La liberación de oxígeno a través de las raíces crea microzonas aerobias que trabajan en sinergia con regiones anaerobias, promoviendo gradientes electroquímicos necesarios para el funcionamiento de este (Corbella *et al.*, 2015).

Por lo tanto, *Canna indica* representa una opción viable y eficiente para el tratamiento de aguas residuales en sistemas a pequeña escala y de bajo costo.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación fue realizada para la determinación de parámetros fisicoquímicos de un sistema de tratamiento de agua residual municipal celda de combustible microbiana-humedal construido de flujo horizontal superficial operado a un tiempo de retención hidráulica de 72 horas.

Localización

El estudio se llevó a cabo en el laboratorio de Biología del departamento de Botánica en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) ubicada en la Calzada Antonio Narro # 1923 Col. Buenavista en la ciudad de Saltillo, Coahuila, con coordenadas 25° 21' 17" de latitud Norte y 101° 01' 58" de longitud Oeste con respecto al meridiano de Greenwich a una altura de 1781 m s. n. m.

Construcción de humedal artificial

Para la construcción del humedal se utilizó un recipiente rectangular con medidas aproximadas de 30 cm x 17 cm y capacidad aproximada de 4 litros, al cual se le realizaron dos orificios para poder ensamblar una tubería de material PVC que servirían para la entrada de agua residual municipal sin tratamiento y salida de agua residual municipal tratada.



Ilustración 4. Armado de reactor.

Se recolectó tepojal de 9 mm y 6 mm el cual se mezcló para obtener un peso de 632.5 gr para 9 mm y 879.3 gr de 6 mm para conseguir un total de 1511.8 gr como mezcla de tepojal por reactor el cual después se lavó para eliminar la arenilla dentro de un recipiente tipo colador que permite la salida de agua bajo un abundante chorro de agua hasta observar el agua completamente clara y se dejó secar al ambiente.



Ilustración 5. Mezcla de tepojal 6 mm y 9 mm



Ilustración 6. Lavado de tepojal.

Posteriormente se seleccionaron cuidadosamente plantas saludables de *Canna indica*. Se pesaron 251.4 g de *Canna indica* (peso fresco) y se etiquetaron para su posterior adición al reactor.



Ilustración 7. Evaluación de ejemplares de *Canna indica*.

Por otra parte, se realizaron los cortes necesarios de fieltro de grafito que se usarían como electrodos para el ánodo y cátodo de forma que cubriera completamente el fondo sin excedentes y por la parte superior que cubriera perfectamente el recipiente y permitiera la salida del tallo de los ejemplares de *Canna indica* y no tuviera contacto con el tallo. Los electrodos fueron conectados externamente mediante un fragmento de alambre de titanio para poder medir la generación de voltaje durante el experimento.



Ilustración 8. Colocación final de ánodo y cátodo.

Finalmente, se realizaron pruebas para verificar que no hubiera presencia de fugas para su posterior operación.

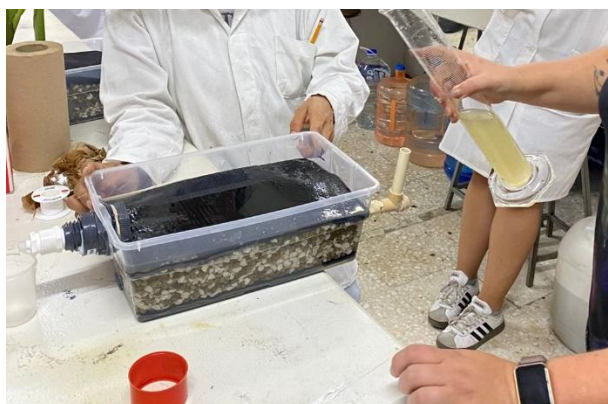


Ilustración 9. Evaluación para fugas.

Programación de fotoperiodo y tiempo de retención hidráulica

Una vez armado y sin presencia de fuga se procedió a instalar en un cuarto oscuro y se programó un fotoperiodo 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad para trabajar con el tiempo de retención hidráulica de 72 horas se utilizó una bomba dosificadora marca Jebao modelo DP-4 Auto Dosing Pump de 4 canales.

Obtención de agua residual municipal

El agua residual municipal fue colectada semanalmente de la planta tratadora municipal del estado de Saltillo, Coahuila ubicada en el Bosque Urbano Ejército Mexicano. Después de cada colecta se evaluaron los parámetros medidos en esta investigación.



Ilustración 10. Recolección de ARM en planta tratadora municipal

Proceso del experimento

Establecimiento

Se establecieron 2 reactores considerando un control sin material vegetal y con flujo horizontal, el otro igualmente de flujo horizontal añadiendo dos ejemplares de *Canna indica* con sustrato de tepojal (tabla 1).



Ilustración 11. Reactores para desarrollo del experimento.

Tabla 1. Tratamiento del experimento.

Tratamientos	Abreviatura	Descripción	Medida ánodo L*A CM	Medida cátodo área mm ²	Volumen de trabajo	Tepojal g	Peso fresco de plantas en g
HC	MFC- HSFCW	celda de combustible microbiana acoplada a un humedal construido de flujo horizontal superficial	28.4*15.7	529.413	2410	1511.87	251.4

Se programó la bomba para mantener un tiempo de retención hidráulica de 72 h y fotoperiodo 16 horas de luz 8 de oscuridad. Pasado este tiempo se recolectaba el agua tratada para los posteriores análisis fisicoquímicos.



Ilustración 12. Establecimiento en fotoperiodo y bomba.

Medición de parámetros

Se realizaban los análisis fisicoquímicos de acuerdo con influente y efluente respectivamente siendo ARM cruda influente y efluente una vez transcurrido el tiempo de retención hidráulica

de 72 horas la cual se recolectaba el agua tratada en recipientes lisos y herméticamente cerrados para realizar las pruebas de manera semanal.

Análisis físicos

Aplicado para evaluar características y propiedades que se cuenta cuando se recibió la muestra de agua residual municipal cruda y/o una vez tratada.



Ilustración 13. Agua tratada.



Ilustración 14. ARM cruda.

pH

El potencial de Hidrogeno (pH) es la medida fundamental para la determinación de la acidez de una muestra lo que representa la concentración de iones de hidrogeno lo que es de ayuda para comprender y previsualizar algún comportamiento químico (Mercalab, 2025).

Se midió por medio del método electrométrico (NMX-AA-008-SCFI-2018, 2018), los reactivos utilizados fueron Thermo Scientific Buffer pH 4.01 Orion application solution 910104, Thermo Scientific Buffer pH 7.00 Orion application solution 910110; el equipo utilizado fue Thermo Scientific Orion Star A215 pH/ Conductivity meter con electrodo Orion ROSS combination pH 8102BN.

Conductividad eléctrica

La medición de la conductividad eléctrica (CE) es la presencia de los iones de materia inorgánica que se disuelve en el agua lo que aumenta su capacidad de conducción lo cual lo vuelve un parámetro relevante con la salinidad (AQUAREAD, 2020).

Se midió por medio del método electrométrico (NMX-AA-093-SCFI-2000, 2000), los reactivos utilizados fueron Thermo Scientific Conductivity/TDS Standard (100microS/ cm - 47 ppm como NaCl) Orion application solution 011008 y Thermo Scientific Conductivity meter con electrodo Orion Conductivity Cell 013005 MD.

Potencial óxido reducción

El potencial de óxido reducción (por sus siglas en inglés ORP) mide la capacidad de oxidar o reducir por lo que se relaciona un ORP alto con la destrucción o eliminación de microorganismos y un ORP bajo permitirá un crecimiento microbiano y formación de biopelículas (Veronik, 2025).

Este fue medido por método electrométrico, los reactivos utilizados fueron ORP Standars (420 mV), Orion application solution 967901 (Thermo Fisher Orion, Waltham, MA, USA); el equipo utilizado fue Thermo Scientific Orion Star A215 pH/ Conductivity meter con un electrodo Orion Sure-Flow comb Redox/ORP 9678BNWP (Thermo Fisher Orion, Waltham, MA, USA).

Salinidad

La salinidad nos indica la cantidad de sales disueltas presentes en una muestra, va totalmente de a la mano con la conductividad eléctrica y ayuda a determinar diversos aspectos de la química del agua y los procesos biológicos que se producen en ellas (EPA, 2025). Fue medido por medio de un potenciómetro de la marca Thermo Scientific, Modelo Orion Star A215 equipado con un electrodo de ORION 013005MD.

Voltaje por circuito abierto

El voltaje generado nos habla sobre la materia orgánica presente que podría ser utilizada por los microorganismos presentes durante el proceso bio-electroquímico y liberar electrones, disminuyendo el potencial anódico y por lo tanto aumentando el voltaje de la celda (Sevda *et al.*, 2013). La medición de voltaje se llevó a cabo por método electrométrico con apoyo de un multímetro marca STEREN PC LINK a través de los fragmentos de acero inoxidable previamente insertados en el ánodo y cátodo de fieltro de grafito.



Ilustración 15. Medición de voltaje.

Análisis químicos

Demanda química de oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno es la relación oxígeno-materia orgánica presente en un medio a evaluar por medio de una oxidación fuerte mediante digestión con un catalizador el cual oxida la materia orgánica más resistente. Fue medida de acuerdo con la NMX-AA030/2-SCFI-2012 la cual especifica las condiciones de los parámetros de operación para tratamientos de efluentes industriales y urbanos.

Su medición se llevó a cabo por medio del método de reflujo a pequeña escala (NMX-AA-030/2-SCFI-2011, 2011) los reactivos utilizados fueron ácido sulfúrico concentrado (96-98%), dicromato de potasio (>99%), sulfato de mercurio (>98%) y sulfato de plata (>98%); los equipos utilizados fueron Termorreactor marca HACH modelo DRB 200 y espectrofotómetro, marca HACH modelo DR 5000.

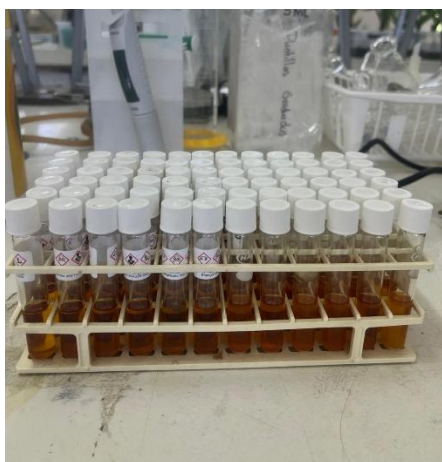


Ilustración 16. Tubos HACH preparados con muestra.



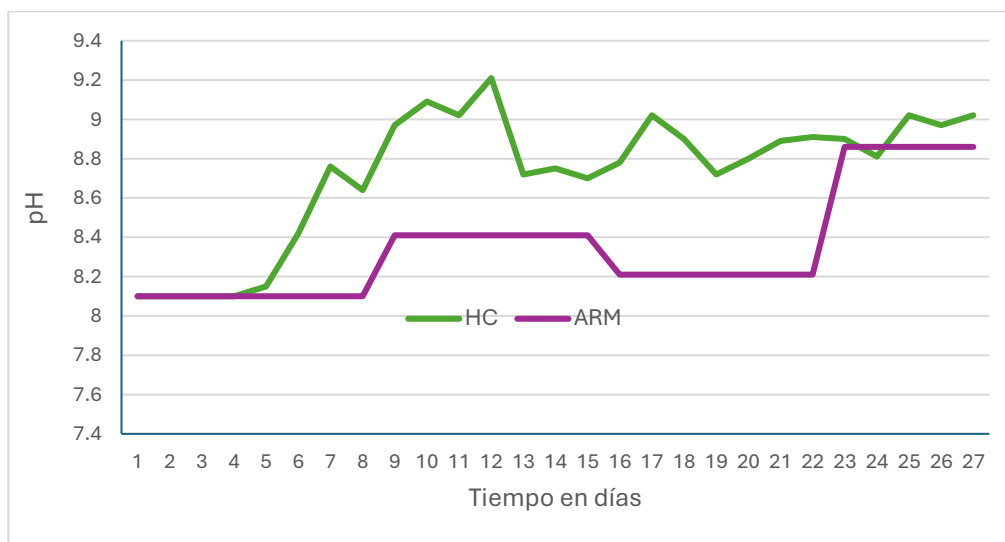
Ilustración 17. Tubos HACH preparados en digestor.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Potencial de hidrógeno

En la gráfica 1 se muestra el comportamiento del pH del influente (ARM) y en efluente (HC) a lo largo del experimento. De acuerdo con los resultados el comportamiento del efluente en el humedal construido fue relativamente estable con una ligera tendencia a la alcalinidad alcanzando un promedio de 8.833 ± 0.227 , lo cual indica la presencia de procesos metabólicos que favorecen la alcalinidad. Vymazal (2011) explica que este comportamiento se puede explicar por la interacción de diversos mecanismos como lo son la presencia de *Canna indica* que contribuye significativamente la dinámica del pH ya que su actividad fotosintética promueve la remoción del CO_2 disuelto, lo que desplaza el equilibrio carbonato-bicarbonato y genera un aumento de pH. Por otra parte, Kadlec & Wallace (2009) mencionan que la actividad metabólica de las comunidades microbianas adheridas al biofilm del sustrato permiten la degradación de materia orgánica y la transformación de compuestos nitrogenados, particularmente desnitrificación lo que promueve el consumo de protones y con ello, un cambio de pH.

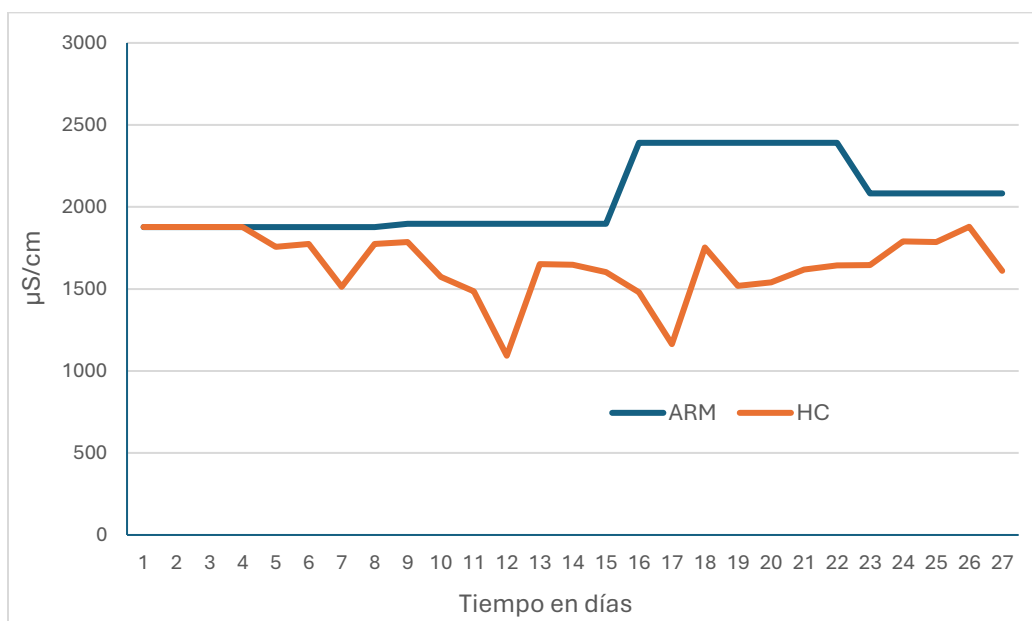
Los valores obtenidos de pH en el tratamiento de agua residual municipal por medio de un humedal de flujo horizontal construido se encuentran dentro de los parámetros permitidos en la norma vigente NOM-002-ECOL-1996 que establece como límites permisibles 5.5 y 10 para descargas a sistemas de alcantarillado.



Gráfica 1. Comportamiento de pH.

Conductividad eléctrica

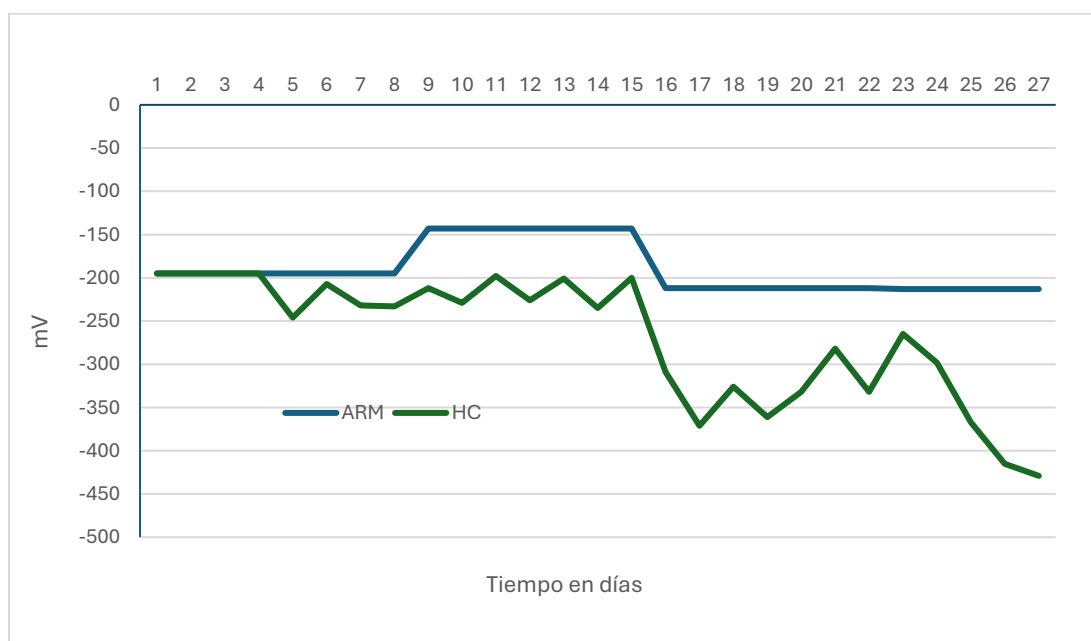
En la gráfica 2 se muestra el monitoreo del comportamiento de la conductividad eléctrica en el influente y efluente. Se observa como en el efluente del humedal su valor más bajo fue 1093 $\mu\text{S/cm}$ alcanzándose al día 11 del experimento y el más alto 1879 $\mu\text{S/cm}$ alcanzado el día 25 mientras que el influente (agua residual cruda) presento valores más elevados con un promedio de 2061.75 $\mu\text{S/cm}$. Mientras el efluente registró un promedio de 1612.35 $\mu\text{S/cm}$ evidenciando una disminución en la concentración de solidos disueltos a lo largo del sistema. De acuerdo con Vymazal (2007) y Kadlec & Wallace (2009), señalan que los humedales construidos presentan una capacidad considerable para la reducción de la conductividad eléctrica, esto debido a los mecanismos de absorción de iones por la vegetación y sedimentación además de los procesos fisicoquímicos en el sustrato mientras que la mineralización de la materia orgánica dentro del sistema puede generar la presencia de sales disueltas incrementando la conductividad. Por otra parte, Tchobanoglous *et al.* (2014) establecen que la conductividad eléctrica no suele eliminarse completamente en tratamientos biológicos, debido a que está asociada a sales disueltas que permanecen en el agua, aunque pueden transformarse o redistribuirse dentro del sistema. En este sentido, la reducción observada en el presente estudio, así como la estabilización hacia el final del periodo de operación, es representativa del comportamiento esperado en humedales construidos de flujo horizontal superficial.



Gráfica 2. Comportamiento de conductividad eléctrica.

Potencial de óxido-reducción

En la gráfica 3 se muestra el comportamiento del potencial óxido-reducción del influente proveniente del humedal construido y el efluente. Se observa que en el efluente se obtuvieron valores de ORP entre -12 mV como el valor más alto al día 5 y -430 mV como el más bajo al día 26, evidenciando condiciones reductoras mayormente a lo largo del sistema. El influente presento valores promedio de -190.75 mV mientras que el efluente registró un promedio de -94.61 mV (con una alta desviación estándar influente de 32.89 mV y efluente de 52.88 mV) lo que indica zonas con bajo contenido de oxígeno dentro del humedal. Este comportamiento es consistente con lo reportado por García *et al.* (2010), quienes señalan que los humedales construidos de flujo horizontal presentan condiciones predominantemente anaerobias debido a la limitada difusión de oxígeno en el sustrato saturado. Kadlec (2013) menciona que valores negativos de potencial de óxido-reducción están asociados con procesos reductores, tales como la desnitrificación y la degradación de materia orgánica, los cuales son característicos en este tipo de sistemas y en el presente trabajo se ve reflejado de la mano con la salinidad y pH ya mencionado. Los valores de ORP -100 mV indican condiciones anoxicas lo que coincide con el presente estudio.

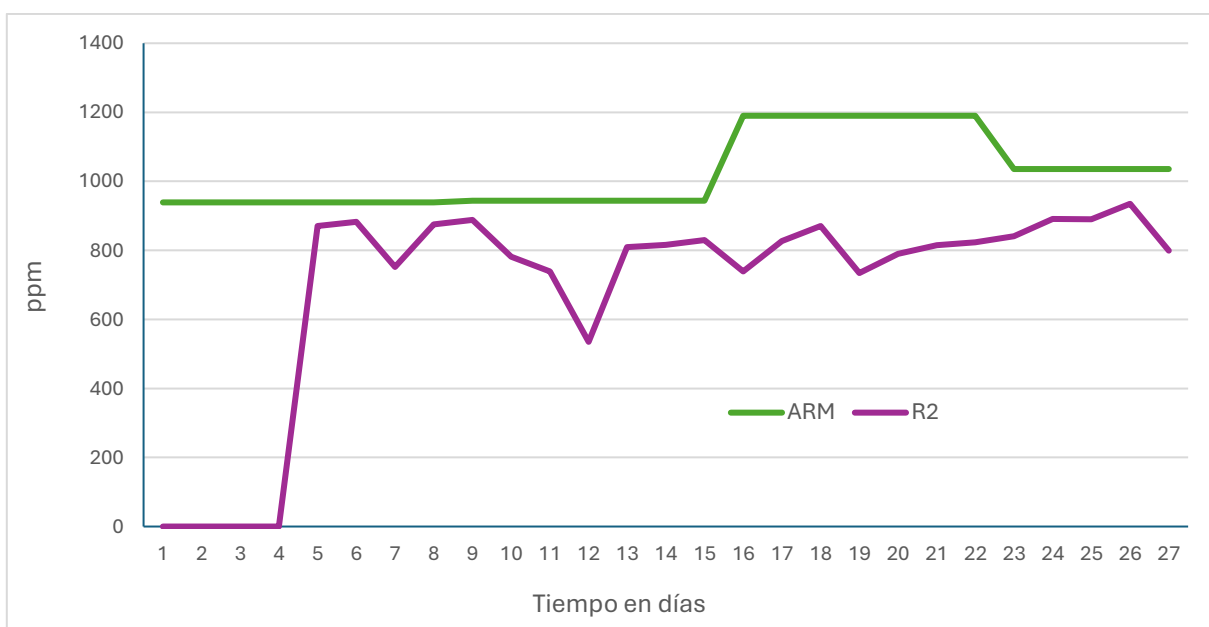


Gráfica 3. Comportamiento del potencial de óxido reducción.

Salinidad

En la gráfica 4 se muestra el comportamiento de la salinidad en el influente y el efluente. Se observa que en el efluente del humedal se obtuvieron valores de salinidad entre 535 ppm como el valor más bajo el día 11 y 935 ppm como el más alto al día 25, mientras que el influente presentó valores más elevados, con un promedio de 1027.25 ppm. Por otra parte, el

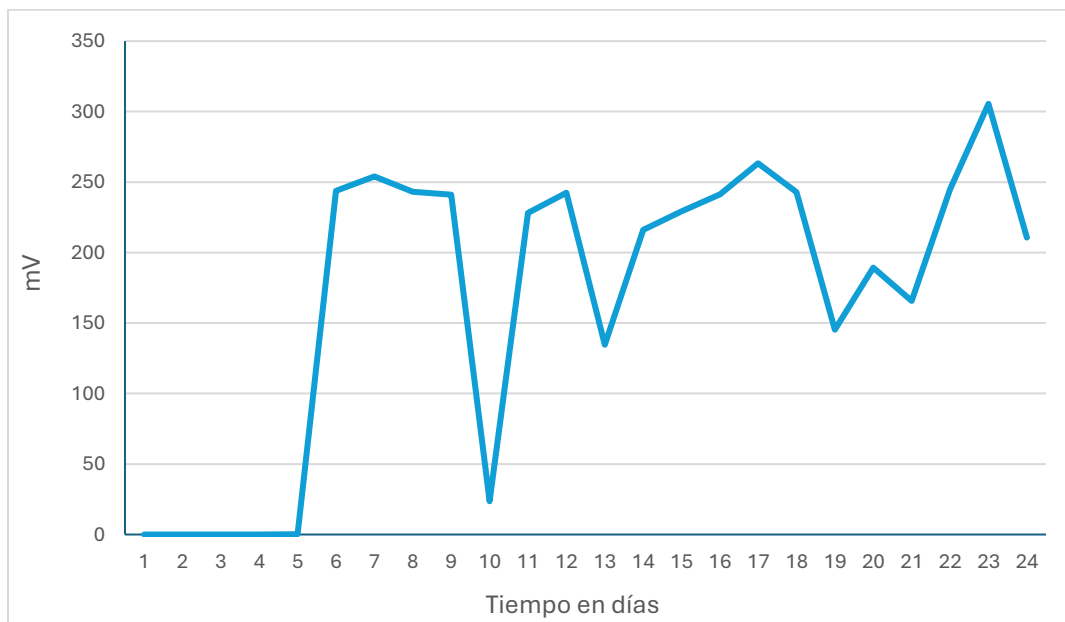
efluente final registró un promedio de 814.57 ppm, evidenciando una disminución en la concentración de sales disueltas durante el experimento. La salinidad mostró una tendencia a incrementarse gradualmente hasta estabilizarse en un rango aproximado de 799 a 935 ppm hacia los últimos días del monitoreo. La reducción observada entre el influente y el efluente indica que el humedal construido favorece la disminución de sales disueltas, aunque de manera moderada. Este comportamiento puede atribuirse a procesos como la retención en el sustrato, la absorción por las plantas y la interacción con microorganismos presentes en el biofilm del sustrato. De acuerdo con Brix (1994), los humedales construidos pueden influir en la concentración de solutos disueltos a través de procesos físicos, químicos y biológicos, aunque su eficiencia depende de las características del agua residual y del diseño del sistema. Mitsch y Gosselink (2015) señalan que las variaciones en la salinidad dentro de los humedales están influenciadas por factores como la evapotranspiración (pérdida total de agua hacia la atmosfera desde un ecosistema), la cual puede concentrar las sales disueltas, así como por procesos de descomposición de la materia orgánica que liberan iones al medio lo cual coincide con las fluctuaciones observadas en el efluente durante el periodo de monitoreo. La salinidad se encuentra directamente relacionada con la conductividad eléctrica ya que ambos parámetros dependen de la concentración de iones disueltos presentes en el agua por lo que la disminución observada en la salinidad del efluente coincide con la reducción de la conductividad eléctrica, lo que confirma la remoción parcial de sólidos disueltos a lo largo del humedal. La conductividad eléctrica es un indicador indirecto de la concentración de sales disueltas en el agua, por lo que su comportamiento está estrechamente vinculado con parámetros como la salinidad (Metcalf & Eddy, 2014).



Gráfica 4. Comportamiento de la salinidad.

Voltaje

En la gráfica 5 se observa la generación de voltaje lo que sucede a partir del día 5 a partir del día 5, alcanzando un valor máximo de 305.5 mV, un promedio de 203.27 mV y una desviación estándar de ± 76.85 mV. Durante los primeros cuatro días corresponde a lo reportado por Corbella *et al.* (2015) donde menciona que en sistemas bioelectroquímicos acoplados a humedales construidos existe un periodo de aclimatación donde las bacterias electroactivas requieren tiempo para formar biofilms estables y desarrollar mecanismos eficientes. Durante esta fase, la producción de voltaje suele ser baja o incluso nula debido a que la comunidad microbiana aún no alcanza una estructura funcional estable. Posteriormente, se muestra el incremento hasta alcanzar valores superiores a los 240 mV, con un máximo de 305.5 mV. Logan *et al.* (2006) mencionan que la generación de bioelectricidad en sistemas microbianos depende simultáneamente de factores como disponibilidad de sustrato, comunidades microbianas, entre otros no solamente la disponibilidad de materia orgánica. Los valores de voltaje obtenidos en el presente estudio se encuentran dentro del intervalo reportado para sistemas similares. Corbella *et al.* (2015) evaluaron humedales construidos acoplados a sistemas electroquímicos y reportaron valores de potencial eléctrico entre 100 y 500 mV, dependiendo de las características del agua residual y del diseño experimental. De igual manera, Doherty *et al.* (2015) mencionan que sistemas de humedales acoplados a celdas de combustible microbianas pueden alcanzar voltajes entre 200 y 700 mV bajo condiciones óptimas. Las fluctuaciones visibles que se reflejan en la alta desviación estándar puede atribuirse a una dinámica microbiana en constante estabilización.



Gráfica 5. Comportamiento del voltaje.

Demanda química de oxígeno

En la gráfica 6 se presenta el comportamiento de la demanda química de oxígeno donde la disminución significativa se refleja en una eficiencia de remoción aproximada de 83.39%. Estos resultados indican una elevada capacidad del sistema para reducir la carga orgánica presente en el agua residual. Durante los primeros días de operación se observó una reducción abrupta de la DQO desde concentraciones promedio a 700 mg/L hasta valores inferiores a los 130 mg/L, lo cual puede asociarse inicialmente a mecanismos físicos como sedimentación y adsorción sobre el medio filtrante. Los porcentajes de remoción obtenidos en el presente estudio resultan comparables con los reportados de Kadlec y Wallace (2009) quienes indican que estos sistemas generalmente presentan eficiencias de eliminación de la DQO de entre 70 a 90%, dependiendo de las características del influente y de las condiciones operativas, asimismo, Vymazal (2011) reportó eficiencias entre 65 y 89% para sistemas similares utilizados en el tratamiento de aguas residuales domésticas, por lo que el porcentaje de remoción detectado (83.39%) se encuentra cercano al límite superior de dichos intervalos, lo cual sugiere un desempeño favorable del sistema evaluado en esta investigación. Esta alta eficiencia indica que las condiciones internas del humedal permitieron un adecuado desarrollo de comunidades microbianas responsables de la degradación de la materia orgánica con la sinergia de la materia vegetal presente, tipo de sustrato utilizado y el tiempo de retención hidráulica utilizado.



Gráfica 6. Comportamiento de la demanda química de oxígeno.

Si se analiza de manera conjunta la capacidad de generación de voltaje y el porcentaje de remoción en la demanda química de oxígeno (DQO) se determina que la relación entre ambos

parámetros se fundamenta en el metabolismo microbiano. La DQO representa la cantidad de materia orgánica susceptible de oxidarse presente en el agua residual; por lo tanto, valores elevados indican una mayor disponibilidad de sustrato para la actividad microbiana. Durante la degradación biológica, los microorganismos utilizan estos compuestos orgánicos como fuente de energía y carbono, liberando electrones y protones como productos metabólicos. En sistemas electroquímicos acoplados a humedales, parte de estos electrones son transferidos hacia el ánodo, generando una diferencia de potencial eléctrico.

Se obtuvo una eficiencia de remoción de DQO promedio de 83%, mientras que el sistema generó un voltaje promedio de 203.27 mV, alcanzando valores máximos de 305.5 mV. A medida que los microorganismos consumieron materia orgánica, una fracción de la energía química contenida en estos compuestos fue transformada en energía eléctrica observado de manera inversamente proporcional en las gráficas 5 y 6.

Por otro lado, la conductividad eléctrica (CE) disminuyó de 1877 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 1610 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que representa una reducción aproximada de 14.2 %. De manera similar, la salinidad presentó una disminución de 939 mg/L a 799 mg/L, equivalente a 14.9 %. En contraste, el pH aumentó de 8.01 a 9.02, mientras que el potencial óxido-reducción (ORP) pasó de -195 mV a -216 mV, indicando una tendencia hacia condiciones más reductoras dentro del sistema.

La reducción simultánea de conductividad eléctrica y salinidad evidencia una relación directamente proporcional entre ambos parámetros, debido a que la conductividad depende principalmente de la concentración y movilidad de especies iónicas disueltas presentes en el agua. Una disminución de la salinidad implica una reducción en la concentración de sales y por tanto una menor disponibilidad de iones capaces de transportar carga eléctrica. Este comportamiento sugiere que el sistema presentó capacidad para disminuir compuestos disueltos mediante mecanismos de adsorción sobre el sustrato, absorción por parte de la vegetación y transformaciones mediadas por la actividad microbiana. De acuerdo con Kadlec y Wallace (2009), los humedales construidos favorecen procesos de retención y transformación de especies químicas que modifican la composición iónica del agua y por lo tanto la conductividad del medio.

Por otra parte, el ORP disminuyó de -195 mV a -216 mV, mostrando una tendencia hacia ambientes más reductores o anaerobios. En humedales construidos de flujo horizontal, la limitada difusión de oxígeno a través del sustrato favorece la formación de microzonas con baja disponibilidad de oxígeno, donde predominan procesos anaerobios y facultativos (Kadlec & Wallace, 2009). A su vez, el incremento del pH hasta un valor de 9.02 puede relacionarse con esta evolución de las condiciones redox. Generalmente, una disminución del ORP hacia valores más negativos se asocia con un aumento del pH debido a que diversos procesos microbianos consumen protones, durante las reacciones metabólicas. Procesos como la desnitrificación y la degradación anaerobia de materia orgánica pueden contribuir al aumento de alcalinidad del sistema, favoreciendo el incremento del pH. La relación

observada entre un ORP más negativo y un pH más elevado sugiere que el humedal desarrolló condiciones adecuadas para la actividad microbiana anaerobia.

CONCLUSIÓN

En conjunto, los resultados muestran que el humedal construido de flujo horizontal superficial con *Canna indica* favoreció el establecimiento de un ambiente predominantemente anaerobio, evidenciado por valores negativos de ORP y un incremento del pH, mientras que la disminución de la conductividad eléctrica y salinidad indica una reducción de especies iónicas disueltas durante el tratamiento. Aunque la reducción del ORP fue moderada, el comportamiento integral de los parámetros indica una interacción entre procesos físicos, químicos y biológicos que influyeron sobre la calidad del agua y el funcionamiento del sistema

Desde una perspectiva tecnológica y ambiental, estos resultados permiten considerar al humedal construido como una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales. Su capacidad para remover elevadas cargas orgánicas y generar simultáneamente energía eléctrica representa una ventaja importante frente a sistemas convencionales, particularmente en zonas rurales o regiones con acceso limitado a infraestructura energética. Además de reducir contaminantes, estos sistemas contribuyen al aprovechamiento de recursos y a la transición hacia tecnologías de tratamiento con menor consumo energético.

Por lo tanto, los resultados obtenidos en el presente experimento indican que el humedal construido evaluado no solo funcionó como un sistema biológico eficiente para la remoción de materia orgánica, sino que también demostró potencial como tecnología de recuperación energética, lo cual fortalece su aplicación futura dentro de estrategias de tratamiento sustentable y economía circular.

LITERATURA CITADA

1. ¿Qué es el ORP (Potencial de Oxidación-Reducción) y cómo se mide? (2025). <https://waboost.com/es/blog/que-es-el-potencial-de-oxidacion-reduccion-orp-y-como-se-mide>
2. Bostjan Veronik. (2024, 22 enero). What is electrical conductivity & why is it important? Aquaread. <https://www.aquaread.com/blog/what-is-electrical-conductivity-and-why-is-it-important/>
3. Brix (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science and Technology*, 35(5), 11–17. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00047-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00047-4)
4. Calheiros, Rangel & Castro (2009). Treatment of industrial wastewater with two-stage constructed wetlands planted with *Typha latifolia* and *Canna indica*. *Bioresource Technology*, 100(13), 3205–3213. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.033>
5. *Canna indica* - ficha informativa. (2005). <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/cannaceae/canna-indica/fichas/ficha.htm>
6. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2022). Estadísticas del agua en México. Gobierno de México
7. Corbella, Puigagut, García & Vives (2015). Constructed wetlands operating as bioelectrochemical systems: A review. *Science of the Total Environment*, 512–513, 415–423. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.045>
8. De Laboratorios, M. (2025, 2 julio). ¿Qué es el pH y cómo se mide? Escala, tipos e importancia clave. Mercalab. https://mercalab.com/blogs/noticias/concepto-ph?srsId=AfmBOorqjjhy6PIYNYwH1jHjT1p_wPhf98r7SyaWwqLFWgljIUFTu
9. Doherty, Zhao & Zhao, X. (2015). A review of a recently emerged technology: Constructed wetland coupled with microbial fuel cells. *Environmental science and pollution research*, 22(11), 8309–8324. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-4018-0>
10. García, J., Rousseau, D. P. L., Morató, J., Lesage, E., Matamoros, V., & Bayona, J. M. (2010). Contaminant removal processes in subsurface-flow constructed wetlands: A review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 40(7), 561–661. <https://doi.org/10.1080/10643380802471076>

11. Hanna-Alipin (2005). Constructed wetlands and sustainable development. *Philippine Journal of Science*, 134(1), 15–25.
12. Higgins (2013). ORP management in wastewater as an indicator of process efficiency <https://www.ysi.com/ysi-blog/water-blogged-blog/2013/08/orp-management-in-wastewater-as-an-indicator-of-process-efficiency>
13. Indicators: Salinity | US EPA. (2025, 18 diciembre). US EPA. <https://www.epa.gov/national-aquatic-resource-surveys/indicators-salinity>
14. *Ingeniería de aguas residuales (tratamiento, vertido y reutilización)* (3.^a ed., vol. 2). (1995). Antonio García Brage. https://www.academia.edu/45529169/ingenieria_de_aguas_residuales_tratamiento_vertido_y_reutilizacion_volumen_ii_metcalf_y_eddie
15. Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment wetlands* (2nd ed.). CRC Press.
16. Logan, Hamelers, Rozendal, Schröder, Keller, Freguia, Aelterman, Verstraete & Rabaey (2006). Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environmental science & technology*, 40(17), 5181-5192. <https://doi.org/10.1021/es0605016>
17. Marín-Muñiz, Sandoval-Herazo, López-Méndez, Sandoval-Herazo, Meléndez-Armenta, González-Moreno & Zamora (2023). Treatment wetlands in Mexico for control of wastewater contaminants: a review of experiences during the last twenty-two years. *Processes*, 11(2), 359. <https://doi.org/10.3390/pr11020359>
18. Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
19. *Monografía del tepojal*. (2015). Servicio Geológico Mexicano. <https://es.scribd.com/document/638971609/Monografia-de-Tepojal-2015>
20. Montenegro-Rosero, Fernández, Villamar-Ayala, & Espinoza-Montero (2019). *Humedales artificiales y celdas de combustibles microbianas como sistemas individuales y combinados para el tratamiento de aguas residuales: una revisión*. <https://portal.amelica.org/ameli/journal/157/157776001/>
21. Nugraha, Supriyanto, Pauzi & Junaidi (2023). The microbial fuel cell characteristics of the pva/chitosan membrane with variations of phosphate acid and sodium alginate derived from vegetable waste. *Journal of energy, material, and instrumentation technology*, 4(4), 136–143. <https://doi.org/10.23960/jemit.v4i4.131>
22. Oon, Ong, Ho, Wong, Dahalan, Oon, Lehl & Thung (2016). Hybrid system up-flow constructed wetland integrated with microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and electricity generation. *Bioresource Technology*, 203, 190–197. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.052>

23. Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2023). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2023. UNESCO.
24. Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017). Guidelines on sanitation and health.
25. Paucar & Sato (2022). An. *Energies*, 15(18), 6841. <https://doi.org/10.3390/en15186841>
26. Pérez-Zacarias, Sandoval-Herazo, Adame-García, Rivera. Humedales construidos: un aliado para la conservación y desarrollo sustentable. (2025). Humedales construidos: un aliado para la conservación y el desarrollo sostenible | PaCiencia Pa'Todos
27. Sevdá S, Domínguez-Benetton X, Vanbroekhoven K, De Wever H, Sreekrishnan TR, Pant D: High strength wastewater treatment accompanied by power generation using air cathode microbial fuel cell. *Appl Energy* 2013, 105:194–206
28. Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill.
29. Vymazal (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: A review. *Hydrobiologia*, 674, 133–156. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0738-9>
30. Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 380(1–3), 48–65. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>
31. Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: A review. *Hydrobiologia*, 674(1), 133–156. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0738-9>
32. Yadav, Dash, Mohanty, Abbassi & Mishra (2021). Performance assessment of microbial fuel cell integrated constructed wetland for wastewater treatment: a review. *Journal of environmental management*, 284, 112015. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112015>
33. Zhao, Y., Collum, S., Phelan, M., Goodbody, T., Doherty, L., & Hu, Y. (2013). Preliminary investigation of constructed wetland incorporating microbial fuel cell: Batch and continuous flow trials. *Chemical Engineering Journal*, 229, 364–370. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.06.023>
34. Zurita, Tejeda, Montoya, Carrillo, Sulbarán-Rangel, and Carreón-Álvarez, (2022) Generation of tequila vinasses, characterization, current disposal practices and study cases of disposal methods. *Water*. 14(9), 1395, <https://doi.org/10.3390/w14091395>.