



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

**“MODELO DE ECONOMÍA
CIRCULAR EN MICROEMPRESA
PORCINA PARA DETERMINAR LA
FACTIBILIDAD TÉCNICA Y
FINANCIERA DEL TRATAMIENTO
DE SUS EFLUENTES EN SISTEMAS
HÍBRIDOS DE BIORREACTOR Y
HUMEDALES CONSTRUIDOS, CON
FINES DE REUTILIZACIÓN DEL
AGUA EN EL SISTEMA DE
PRODUCCIÓN PORCINO”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTORA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**P R E S E N T A
M.I.I. MAYERLIN SANDOVAL HERAZO**

DIRECTOR

Dr. GREGORIO FERNÁNDEZ LAMBERT

CO-DIRECTORA

Dra. JACEL ADAME GARCÍA

MISANTLA, VERACRUZ

AGOSTO, 2023



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

**“MODELO DE ECONOMÍA
CIRCULAR EN MICROEMPRESA
PORCINA PARA DETERMINAR LA
FACTIBILIDAD TÉCNICA Y
FINANCIERA DEL TRATAMIENTO
DE SUS EFLUENTES EN SISTEMAS
HÍBRIDOS DE BIORREACTOR Y
HUMEDALES CONSTRUIDOS, CON
FINES DE REUTILIZACIÓN DEL
AGUA EN EL SISTEMA DE
PRODUCCIÓN PORCINO”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTORA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

P R E S E N T A

M.I.I. MAYERLIN SANDOVAL HERAZO

DIRECTOR

Dr. GREGORIO FERNÁNDEZ LAMBERT

CO-DIRECTORA

Dra. JACEL ADAME GARCÍA

MISANTLA, VERACRUZ

AGOSTO, 2023

OFICIO DE AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN DOCTORADO

FECHA: Agosto 14 de 2023

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN TESIS.

A QUIEN CORRESPONDA:

Por medio de la presente se hace constar que el (la) C:

MAYERLIN SANDOVAL HERAZO


estudiante del **Doctorado en Ciencias de la Ingeniería** con No. de Control 192T0838 ha cumplido satisfactoriamente con lo estipulado por el **Lineamiento de Posgrado para la obtención del grado de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería mediante Tesis.**

Por tal motivo se **Autoriza** la impresión del **Tema** titulado:

"MODELO DE ECONOMÍA CIRCULAR EN MICROEMPRESA PORCINA PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA DEL TRATAMIENTO DE SUS EFLUENTES EN SISTEMAS HÍBRIDOS DE BIORREACTOR Y HUMEDALES CONSTRUIDOS, CON FINES DE REUTILIZACIÓN DEL AGUA EN EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN PORCINO"

Dándose un plazo no mayor de un mes de la expedición de la presente a la solicitud del examen para la obtención del grado de Doctorado en Ciencias.


ATENTAMENTE



Dr. Gregorio Fernández Lambert
Director de Tesis




Dra. Jacel Adame García
Co-Directora



Dr. David Reyes González
Asesor



Dr. Isidro Rodríguez Montoro
Asesor



Dr. Luis Mójia Macario
Asesor

Archivo.

COMITÉ DOCTORAL

Dr. Gregorio Fernández Lambert– Director de Tesis

Perfil deseable PRODEP, Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel I. Es licenciado en ingeniería industrial químico, cuenta con una maestría en ciencias en ingeniería administrativa, ambos estudios por el Instituto Tecnológico de Orizaba. Tiene un doctorado en logística y dirección de la cadena de suministro por la Universidad del Estado de Puebla. Sus áreas de investigación son: 1.- Procesos agroindustriales inteligentes y sustentabilidad.

Dra. Jacel Adame García – Co-Directora de Tesis

Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel I, Profesora investigadora del Tecnológico de Úrsulo Galván, Veracruz, México. Doctora en Ciencias en Ecología y Biotecnología por la Universidad Veracruzana, Maestra en ciencias en biotecnología agropecuaria por la Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria (México), Ingeniero en Agronomía por el por la Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria (México). Sus áreas de investigación son: 1. Fitopatología; 2. Biología molecular; 3. Microorganismos; 4. Control biológico; 5. Biodiversidad.

Dr. David Reyes González – Miembro del Comité Tutorial

Miembro del Sistema Nacional de Investigadores SNI-C. Es ingeniero químico por el Instituto Tecnológico de Ecatepec Zacatepec (México), cuenta con una maestría en ciencias e ingeniería de Materiales por la Universidad Nacional Autónoma de México. Tiene un doctorado en Ciencias e Ingeniería de Materiales por la Universidad Nacional Autónoma de México. Sus áreas de investigación son: 3- Caracterización y modelado de materiales complejos.

Dr. Isidro Rodríguez Montoro– Miembro del Comité Tutorial

Perfil deseable PRODEP. Es licenciado en estadística por la Universidad Veracruzana, cuenta con una maestría en educación por la Universidad Popular Autónoma de Veracruz. Tiene un Doctorado en Administración y Desarrollo Empresarial por el Colegio de Estudios Avanzados de Iberoamérica. Sus áreas de investigación son: 1. Inteligencia de negocios; 2. Diseño de experimentos robusto; 3. Análisis multivariado.

Dr. Luis Mejía Macario – Miembro del Comité Tutorial

Miembro del Sistema Nacional de Investigadores SNI-C. Es ingeniero químico por la Universidad Autónoma de Coahuila (México). Tiene un doctorado en ingeniería química por Universidad de Birmingham (Inglaterra). Área de investigación: 1. Procesos químicos.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a Dios por permitirme valorar cada momento de vida y por dejarme llegar hasta este tiempo en el que veo culminado otro proyecto más de los que me he propuesto.

A mi maravilloso hijo Luis Santiago Torres Sandoval, por su amor y compañía.

A mis padres Belcy Herazo Villadiego y Luis Rafael Sandoval Herazo, quienes me inculcaron la importancia de la educación y del trabajo arduo.

A mi hermano Luis Carlos Sandoval Herazo, quien apoya incondicionalmente todos mis proyectos, por su amistad, sus enseñanzas y su amor.

A mi hermano Elber José Sandoval Herazo, por su cariño, su amistad y su apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Luis Carlos Sandoval Herazo, por brindarme la oportunidad de trabajar de su mano, enseñarme, motivarme y por las horas de dedicación y enseñanza que fueron fundamentales para mi formación. Así mismo, por su amistad y apoyo incondicional en el desarrollo de este proyecto y otros más.

Al Dr. Gregorio por sus asesorías, observaciones y sugerencias con fin de tener un mejor trabajo de tesis y aprendizaje, laboratorios y medios para desarrollar este proyecto.

Resumen

El agua es el recurso natural más valioso, no tiene sustituto natural y es indispensable para la existencia humana, su calidad se ha visto comprometida, derivado del crecimiento poblacional, el cambio en los patrones de consumo asociado al crecimiento económico, y el cambio climático, sumado a múltiples problemas como la alta tasa de contaminantes que se vierten a los cuerpos de agua sin ningún tratamiento previo, que ponen en riesgo el suministro de los bienes y servicios provistos por el medio ambiente. La calidad del recurso es una problemática que enfrentan en mayor grado las pequeñas y las microempresas, sobre todo, en comunidades de provincia. En ese sentido, para garantizar la eficiencia y sostenibilidad de recursos hídricos es necesario transitar de un modelo económico lineal a uno circular. Un sistema de economía circular en el tratamiento de aguas, primeramente, se enfoca en reutilizar el agua una y otra vez, tal como sucede en el ciclo natural, y evitar el uso lineal del agua como sucede en la industria tradicional. En la economía circular la gestión de los residuos y la reutilización del agua tienen gran importancia, en este sentido, el tratamiento de aguas residuales producto de la industria porcina en sistemas ecológicos híbridos (Bio-reactor anaerobios y aerobios - Humedales construidos) es una alternativa sustentable para solucionar problemas de contaminación en el medio natural basado en la naturaleza del sistema y bio-remediación que se presenta, debido a la adaptación de especies vegetales a condiciones de altas cargas de materia orgánica para asegurar su supervivencia y provocar una disminución en la carga de contaminantes que estas degradan o absorben para subsistir.

Esta investigación involucro previamente estudios a nivel mesocosmos que permitió evaluar el diseño experimental para escalar la eco-tecnología en condiciones ambientales reales, atendiendo la problemática de contaminación de efluentes en la industria porcina en un caso real de la comunidad de Tlacotepec de Mejía, en el estado de Veracruz-México, la cual se caracteriza por una alta carga orgánica de contaminantes con arrastre de sólidos fecales. La metodología se presenta por capítulos que corresponden a artículos científicos y se dividió en cuatro fases. La primera fase, se realizó un estudio preliminar de la literatura reportada en bases estadísticas y fuentes secundarias relacionada con el tratamiento de aguas

residuales y de su recuperación para aprovecharla como recurso hídrico. En la fase II se realizó a escala piloto a nivel mesocosmos el desempeño de seis unidades experimentales HC-VPS, sembrados por triplicado con Canna Hybrids e Iris germánica, rellenas con tezontle rojo. Se midió la eliminación de DQO, SST, N-NH₄, NTK y CF totales en la entrada y salida de los sistemas. En la fase III, se evalúa la producción total de biomasa tanto aérea como subterránea de un humedal construido como un sistema terciario de tratamiento de aguas residuales porcinas a gran escala en la vegetación, donde el humedal construido formaba parte del tren de tratamiento híbrido implementado a escala real en la granja porcina. En la fase IV, Se realizó la evaluación del sistema híbrido de tratamiento de aguas residuales integrado de un sedimentador, un biorreactor anaerobio, un humedal construido y un Biorreactor híbrido a nivel real, se midió la eliminación de DQO, SST, N-NH₄, NTK y CF totales en la entrada y salida de los sistemas; así mismo se evaluó el bosquejo del escenario de estudio de recirculación del agua para el diseño del modelo de economía circular de la granja y la evaluación técnica y financiera del mismo.

Se logó tratar el 100% de las aguas residuales producidas en la granja porcina, eliminando 90 % de los contaminantes presentes en el agua, permitiendo la reutilización del agua en el sistema de producción, generación de energía renovable, mejora de la calidad del agua y ahorro de costos. Este enfoque favorece la sostenibilidad y la eficiencia de recursos en la producción porcina. En esta investigación se encontró una brecha tecnológica en el campo de humedales construidos que posibilita el diseño de sistemas híbridos de biorreactor anaerobios- aerobios en humedales construidos sembrado con plantas a nivel real con dos propósitos: mejorar la eficiencia de remoción; y proponer una metodología eco- tecnológica para aprovechar el recurso energético generado por la carga de sólidos contenido en la carga orgánica que arrastra el efluente de descarga del proceso de engorda de cerdos.

Índice General

Capítulo I: Generalidades	14
1.1 Introducción	14
<i>1.2 Planteamiento del problema</i>	16
<i>1.2 Preguntas de investigación</i>	19
<i>1.3 Objetivos</i>	20
<i>1.3.1. Objetivo general</i>	20
<i>1.3.2. Objetivos específicos</i>	20
<i>1.4 Hipótesis</i>	20
<i>1.5 Aportes</i>	21
<i>1.6 Justificación</i>	22
<i>1.7 Estructura general del trabajo</i>	25
<i>1.5 Referencias bibliográficas</i>	25
Capítulo II: Diagnóstico del estado actual de tratamiento de aguas residuales porcinas en México, así como los sistemas de tratamiento empleados actualmente y su uso potencial en la generación de modelos de economía circular	29
<i>2.1 Introducción</i>	30
<i>2.2 Materiales y métodos</i>	31
<i>2.3 La porcicultura en México</i>	31
<i>2.4 Tratamiento de aguas residuales porcinas en México</i>	33
<i>2.5 Economía Circular y Humedales Construidos: Potencial relación bio-conveniente</i>	40
<i>2.6 Retos por cumplir</i>	42
<i>2.7 Conclusiones</i>	43
<i>2.8 Bibliografía</i>	44
Capítulo III: Evaluación del desempeño de humedales artificiales a nivel mesocosmos para el tratamiento de aguas residuales porcinas sembradas con <i>Canna Hybrids</i> e <i>Iris germánica</i>	47
<i>Resumen</i>	47
<i>2. 1 Introducción</i>	47
<i>3. 2 Material y métodos</i>	51
<i>3.2.1 Monitoreo del sistema</i>	52
<i>3.2.2 Análisis de datos</i>	53

3.3	<i>Resultados y discusiones</i>	53
3.3.2	<i>Eliminación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en HC-VPS.</i>	55
3.3.3	<i>Eliminación de Sólidos Suspendidos Totales (SST) en HC-VPS.</i>	56
3.3.4	<i>Eliminación de Nitrógeno en Forma de Amonio (N-H4+) en HC-VPS.</i>	57
3.3.5	<i>Eliminación de Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) en HC-VPS.</i>	57
3.3.6	<i>Eliminación de Coliformes Totales (NMP 100mL) en HC -VPS</i>	58
3.3.7	<i>Remociones de contaminame en HC-VPS.</i>	59
3.4	<i>Conclusiones.</i>	60
3.5	<i>Referencias bibliográficas.</i>	60
Capitulo IV: Producción de biomasa vegetal en humedales construidos que tratan aguas residuales porcinas en clima tropicales		67
	<i>Resumen</i>	67
4.1	<i>Introducción</i>	67
4.2	<i>Materiales y Métodos.</i>	68
4.2.1	<i>Fuente de la Biomasa.</i>	68
4.2.2	<i>Operación y duración del monitoreo</i>	69
4.2.3	<i>Supervivencia a la adaptación y supervivencia de plantas</i>	70
4.2.4	<i>Medición de desarrollo vegetal</i>	70
4.2.5	<i>Medición de biomasa destructiva.</i>	70
4.2.6	<i>Cálculo de biomasa no destructiva</i>	71
4.2.7	<i>Cuantificación de coliformes totales.</i>	71
4.2.8	<i>Análisis de datos</i>	71
4.3	<i>Resultados y discusiones</i>	72
4.3.1	<i>Operación y duración del monitoreo</i>	72
4.3.2	<i>Parámetros de calidad del agua.</i>	72
4.3.2.1	<i>Temperatura, pH y Oxígeno disuelto.</i>	72
4.3.2.2	<i>Parámetros fisicoquímicos y microorganismos.</i>	73
4.3.2.3	<i>Remoción de contaminantes</i>	73
4.3.3	<i>Biomasa</i>	76
4.4	<i>Conclusiones.</i>	77
4.5	<i>Referencias</i>	78
Capítulo V: Modelo de economía circular para aprovechamiento de aguas residuales porcinas por medio de un sistema de tratamiento de bajo costo a gran escala.		83

<i>Resumen</i>	83
<i>5.1 Introducción</i>	83
<i>5.2 Materiales y métodos</i>	85
<i>5.2.1 Aspectos técnicos</i>	86
<i>5.2.1.1 Localización de la zona donde se desarrolló el estudio</i>	86
<i>5.2.2 Descripción de diseño del sistema de tratamiento</i>	87
<i>5.2.3 Monitoreo de parámetros en el sistema</i>	90
<i>5.2.4 Preparación del sistema</i>	91
<i>5.2.5 Análisis del sistema</i>	92
<i>5.2.5.1 Procedimiento de preparación de muestras</i>	92
<i>5.2.5.1.1 PH</i>	93
<i>5.2.5.1.2 Conductividad eléctrica</i>	93
<i>5.2.5.1.3 Demanda química de oxígeno (DQO)</i>	93
<i>5.2.5.1.4 Nitrógeno total (NT)</i>	94
<i>5.2.5.1.5 Fosforo total (PT)</i>	95
<i>5.2.6 Análisis estadístico</i>	96
<i>5.2.7 Sistema de recirculación de agua</i>	96
<i>5.2.7.1 Estimación de costos de inversión sistema recirculación</i>	98
<i>5.2.8 Evaluación económica y financiera</i>	101
<i>5.2.8.1 Inversión inicial</i>	102
<i>5.2.8.2 Capital de trabajo</i>	102
<i>5.2.8.3 Financiamiento</i>	102
<i>5.2.8.4 Ingresos, costos y gastos</i>	102
<i>5.2.8.5 Estados financieros</i>	102
<i>5.2.8.6 Depreciación</i>	103
<i>5.2.8.7 Punto de equilibrio</i>	103
<i>5.2.8.8 TIR, VAR y B/C</i>	104
<i>5.3 Resultados y discusiones</i>	105
<i>5.3.1 Parámetros físicos y químicos convencionales presentes en aguas contaminadas</i>	105
<i>5.3.2 Eliminación de contaminantes</i>	105
<i>5.3.2.1 Demanda Química de Oxígeno (DQO)</i>	106
<i>5.3.2.2 Sólidos suspendidos totales (SST)</i>	106
<i>5.3.2.3 Nitrógeno amoniacal (N-NH₄)</i>	106
<i>5.3.2.4 Nitrógeno Total (TN)</i>	107
<i>5.3.2.5 Fósforo Total (TP)</i>	107

5.3.3 Modelo de economía circular implementado en granja barranquilla.....	107
5.3.4 Evaluación económico financiera	109
5.3.4.1 Inversión inicial.....	109
5.3.4.2 Ingresos.....	110
5.3.4.3 Costos de operación.....	111
5.3.4.4 Depreciación de sistema híbrido de tratamiento	114
5.3.4.5 Estado de resultados	114
5.3.4.6 Punto de equilibrio, TIR, VAR y B/C.	114
5.3.4.7 Análisis de ahorro estimado por la reutilización del agua tratada.....	116
5.4 Conclusiones.....	117
5.3 Referencias	117
Conclusiones y recomendaciones.....	126
Productos de esta Tesis.....	130
• Ponencia	130
• Ponencia	131
• Artículo JCR revista Fermentation.....	131
• Conferencia semana tecnológica 2021	132
• Artículo CONACYT.....	133

Índice de Figuras

Capítulo II

Figura 1. Estados con el mayor índice de producción de cerdos	32
Figura 2. Distribución nacional de los diferentes tipos de sistema Porcícola.....	32
Figura 3. Sistemas de tratamiento de efluentes.....	37
Figura 4. Configuración de sistemas de HC de flujo vertical parcialmente saturados.....	52
Figura 5. Concentraciones de contaminantes en las entradas y salidas de los sistemas HC-VPS.....	56
Figura 6. Contracción de coliformes totales en la entrada y salida de los HC-VPS.....	59
Figura 7. Remoción de contaminantes en HC-VPS.....	60

Capítulo IV

Figura 8. Sistema de Humedales Construidos a gran escala.....	69
Figura 9. Remoción de contaminantes.....	74
Figura 10. Crecimiento de plantas en humedales construidos.....	76
Figura 11. Desarrollo Typha latifolia y Canna H. durante el periodo de estudio a nivel real.....	77

Capítulo V

Figura 12. Ubicación sitio de estudio.....	87
Figura 13. Arranque y operación del sistema híbrido de tratamiento.....	87
Figura 14. Fases del sistema híbrido de tratamiento.....	88
Figura 15. Tanque sedimentador.....	88
Figura 16. Biorreactor anaerobio.....	89
Figura 17. Biorreactor anaerobio vista frontal.....	89
Figura 18. Humedal construido.....	90
Figura 19. Biorreactor híbrido.....	90
Figura 20. Línea de conducción Laguna/Tanque elevado-Producción	97

Figura 21. Diferencia en la elevación de la laguna a los chiqueros.....	97
Figura 22. Elementos del análisis de los costos de inversión.....	98
Figura 23. Sistema de economía circular maximización de la eficiencia del recurso agua	107
Figura 24. Sistema de economía circular implementado en granja Barranquilla.....	108

Índice de Tablas

Capítulo II

Tabla 1. Contaminantes de las granjas porcinas.....35

Tabla 2. Remoción de contaminantes mediante humedales construidos.....38

Capítulo III

Tabla 3. Métodos físicos y químicos utilizados en la medición de parámetros de calidad del agua en los mesocosmos HC-VPS.....52

Tabla 4. Parámetros de control en sistema en la entrada salida de los HC-VPS.....54

Capítulo IV

Tabla 5. Características de aguas residuales que ingresaron a los CWs sistema terciario de tratamiento.....72

Tabla 6. Adaptación y supervivencia de especies utilizadas75

Capítulo V

Tabla 7. Parámetros de calidad del agua.....91

Tabla 8. Estimación de costos de construcción del tanque elevado.....99

Tabla 9. Cotización sistema de almacenamiento de agua.....100

Tabla 10. Sistema de recirculación del agua tratada101

Tabla 11. Características físicas y químicas de aguas residuales en la entrada y salida de los sistemas durante el estudio.....105

Tabla 12. Concentración de contaminantes en granja porcina en la entrada y salida de las etapas del sistema de tratamiento durante el estudio.....106

Tabla 13. Indicadores de medición economía circular implementado en granja Barranquilla.....109

Tabla 14. Inversión inicial sistema híbrido de tratamiento109

Tabla 15. Proyección de ingresos de la granja con sistema híbrido tratamiento.....110

Tabla 16. Costos de operación de la granja con sistema híbrido de tratamiento.....112

Tabla 17. Costos fijos y variables con sistema híbrido de tratamiento.....112

Tabla 18. Depreciación del sistema híbrido de tratamiento.....114

Tabla 19. Estado de resultados del sistema híbrido de tratamiento.....114

Tabla 20. Punto de equilibrio en pesos del sistema híbrido de tratamiento.....115

Tabla 21. Calculo TIR, VAN y B/C del sistema híbrido de tratamiento.....	115
Tabla 22. Ahorro anual estimado facturas agua con sistema.....	116
Tabla 23. Ahorro anual estimado energía eléctrica con sistema de recirculación.....	116

Capítulo I: Generalidades

1.1 Introducción

La economía circular es una economía regenerativa que representa un cambio radical para lograr una economía sustentable. Este sistema económico se basa en un ciclo continuo de desarrollo que preserva, mejora el capital natural, y aprovecha los recursos mediante la reutilización y reciclaje de productos disponibles, priorizando el cuidado y la reducción de los impactos ambientales generados, como un mecanismo para construir un cambio radical en el sistema económico y en nuestro medio ambiente (Moreno, 2018).

El tratamiento de aguas residuales industriales es un problema que enfrentan en mayor grado las pequeñas y microempresas, sobre todo, en comunidades de provincia (Conagua, 2018). Un sistema de economía circular en el tratamiento de aguas, primariamente se enfoca en reutilizar el agua una y otra vez, tal como sucede en el ciclo natural, y evitar el uso lineal del agua como sucede en la industria tradicional. En la economía circular, la gestión de los residuos y la reutilización del agua tienen gran importancia. En este sentido, el tratamiento de las aguas residuales se considera un factor determinante, y aquí los humedales artificiales juegan un papel crucial como elementos de mejora ambiental. Esta importancia radica en el objetivo que tienen los humedales artificiales como alternativa eficiente y económica en el tratamiento de aguas residuales en comparación a los sistemas de tratamientos tradicionales. Los humedales artificiales se caracterizan por ser sistemas de fácil operación, y la calidad del agua resultante como agua tratada, es suficientemente apta para los diversos usos en el medio natural y urbano. También por su nivel de escala; estos sistemas de humedales artificiales son adecuados para la depuración de descargas de aguas residuales en núcleos rurales dispersos de pequeñas poblaciones y microempresas de mediana y/o baja escala (Alarcón et al., 2018). En todo caso, para el tratamiento de los efluentes, siempre es necesario conocer las características del agua residual para medir el impacto ambiental que ésta produce si éstas descargas llegan a cuerpos de agua del subsuelo o superficiales, sin el tratamiento adecuado de remediación (Amaral, 2018).

Para atender esta problemática ambiental, los Bio-reactores aerobios y anaerobios son considerados uno de los principales sistemas sustentables de tratamiento de aguas

residuales de diferentes fuentes (Parralejo et al., 2019). Estos sistemas de Bio- reactores aerobios y anaerobios han probado ser eficientes en el tratamiento de aguas de origen industrial en diferentes partes del mundo (Hernández-Salazar et al., 2018; Vymazal, 2013), como tecnologías de degradación efectiva de la materia orgánica en el medio natural (González y Hernández, 2006). La eficiencia de remoción de contaminantes convencionales hace presentar a estos bio-reactores con ventajas de depuración eficientes para la remoción de altas cargas orgánicas de efluentes agroindustriales. El éxito de estos sistemas está definido por la actividad metabólica de comunidades bacterianas desarrolladas en la biopelícula (Paniagua, 2018) formada en el soporte de los reactores y del humedal. Sin embargo, la implementación de las especies vegetales y la estructura y operación del sistema ayudará en la remoción de estos agentes dañinos para el medio ambiente y evitar la eutrofización de áreas en inundación donde se descargan este tipo de efluentes.

La economía circular resalta que, mediante la regeneración de las aguas residuales, se puede mitigar el consumo neto de agua reutilizándola en diferentes aplicaciones (riego agrícola, parques y jardines, limpieza, etc.). En el sector industrial, se tienen diversos estudios que han demostrado que se ha reutilizado el agua regenerada proveniente de los efluentes, para generar nuevos productos a partir de sus lodos crudos o hidrolizados, y de esta forma, reducir su impacto medioambiental; además de extraer y recuperar recursos valiosos contenidos en los diferentes efluentes industriales y municipales, como lo son el biogás a partir de biosólidos (Meza et al., 2020). Estos hallazgos, proponen el uso de estas tecnologías para el tratamiento de industrias agroalimentarias, como lo son las aguas residuales de la industria porcina, que requiere grandes cantidades de recurso hídrico para realizar el proceso de crianza de cerdos (Garzon-Zuñiga y Buelna, 2014). En tal sentido, el tratamiento de aguas residuales producto de la industria porcina en sistemas ecológicos híbridos (Bio- reactor anaerobios y aerobios - Humedales construidos) es una alternativa sustentable para solucionar problemas de contaminación en el medio natural basado en la naturaleza del sistema y bio-remediación que se presenta, debido a la adaptación de especies vegetales a condiciones de altas cargas de materia orgánica para asegurar su supervivencia y provocar una disminución en la carga de contaminantes que estas degradan o absorben para subsistir.

Esta Tesis atiende la problemática de contaminación en mantos acuíferos y descarga de aguas residuales de la Granja Barranquilla productora de cerdos en la región de Amatitla,

Tlacotepec de Mejía, Veracruz. Se propone un modelo de economía circular que demuestre la factibilidad técnica y financiera del tratamiento de sus efluentes en sistemas híbridos de biorreactor y humedales artificiales, con fines de reutilización del agua en el sistema de producción porcino.

Los resultados de esta investigación se documentan en esta Tesis por artículo, y se documenta en seis capítulos. En el capítulo 1 se aborda el contenido general del trabajo, la justificación de la realización del trabajo de estudio y los objetivos de este. El Capítulo 2 se enfoca en la investigación documental sobre el estado actual del tratamiento de aguas residuales porcinas en México, así como los sistemas de tratamiento empleados actualmente y su uso potencial en la generación de modelos de economía circular. En el capítulo 3 se evaluó el desempeño de humedales artificiales a nivel mesocosmos para el tratamiento de aguas residuales porcinas sembrados con *Canna Hybrids.*, y *Iris germánica*. En el Capítulo 4 se integraron los resultados del diseño e implementación de un sistema de tratamiento de bajo costo a gran escala para el tratamiento aguas residuales porcinas en la granja barranquilla ubicada en el municipio de Tlacotepec de Mejía, Veracruz, en el Capítulo 5, se propuso un modelo de economía circular para el aprovechamiento de las aguas residuales tratada de origen porcino en la granja barranquilla para empresa porcina y finalmente, se describen las conclusiones generales del proyecto, es decir, se integran los capítulos previos para concluir con una reflexión sobre el papel que juegan la economía circular y los humedales construidos como sistemas de tratamiento de aguas residuales porcinas y la eliminación de los contaminantes presentes en este tipo de aguas residuales para su posterior aprovechamiento de las mismas en el mismo proceso productivo de la granja desde una protección social al medio ambiente.

1.2 Planteamiento del problema

Para el tratamiento de distintos tipos de aguas residuales existen tecnologías complejas y eficientes. Sin embargo, este tipo de sistemas de tratamiento tiene altos consumos de energía, mano de obra y su mantenimiento es costoso. Estas consideraciones, reflejan la necesidad de búsqueda de tecnologías accesibles tecnológicamente, sustentables y económicas en su instalación, operación y mantenimiento (Zurita et al., 2011). Como un recurso vital para la humanidad, la contaminación del agua es uno de los problemas

permanentes y más graves a nivel mundial, ya que afectan directamente a los ecosistemas, tanto acuáticos como terrestres, incluyendo la salud pública.

El problema de contaminación del agua del subsuelo o superficial, tiene diferentes fuentes, como puede ser, la cultura social de protección al ambiente y/o responsabilidad social de las industrias. Cualquiera que sea el caso, el diseño de instalaciones de tratamiento de efluentes residuales ha sido una estrategia tecnológica que en gran medida ha resultado útil para grandes volúmenes de descarga de efluentes, sin embargo, con altos costos de operación, lo cual en gran medida imposibilita su instalación en regiones de economías emergentes. En este contexto, son necesario estudios que formen parte de una familia alternativa de métodos de tratamiento económicos, ecológicos y de fácil funcionamiento (Gómez- Duarte, 2018; Wang et al., 2016).

La ausencia de este tipo de plantas de tratamiento de aguas residuales ha generado un fuerte impacto en diferentes sitios, a gran y pequeña escala, en regiones y subregiones de México. En contraste, existen una gran cantidad de micro y pequeñas empresas que generan durante sus procesos aguas residuales, las cuales, en lo general, son unidades que no atienden sus descargas residuales, no sólo en México, sino también en países donde la economía se gesta en el comercio de productos locales, como las microempresas porcinas en México (Núñez, 2018). En este sector económico, México tiene un inventario de 18,365,289 millones de cabezas porcinas y para el 2019 representan el 21% de la producción total de carnes en México (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA], 2020). La producción de cerdos ocupa el tercer lugar a nivel nacional, respecto a las actividades ganaderas desarrolladas en el país, encontrando sus mayores índices de producción en los estados de Jalisco (20.25 % del total nacional), Sonora (11.1%), Puebla (10.3%), Veracruz (9.5 %), Yucatán (6.2 %) y Guanajuato (5.6%) (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2020). Veracruz cuenta con un inventario de 1,751,183 cabezas porcinas a diciembre 2019 (SIAP, 2020), de las cuales 7 de cada 10 se encuentran operando con sistemas tecnificados o semi tecnificados y 3 de cada 10 se encuentran en sistema traspatio. El tipo de productores traspatio genera 30% de la producción nacional, y en algunos casos puede considerarse como una actividad económica de subsistencia. En otros casos, estas pueden considerarse como empresas a pequeña escala, pues tienden a imitar las condiciones de crianza (Montero, 2015). Estas granjas de traspatio suman valor a los índices

registrados a nivel nacional, y también funcionan como una fuente de ingreso a nivel local en zonas rurales (Sánchez y Moreno, 2016).

Uno de los principales problemas generados por granjas porcinas de menor escala, reside en la poca importancia que se da al tratamiento de los residuos generados, puesto que este tipo de empresas agroindustriales no cuenta con el capital necesario para implementar acciones de mitigación por estos impactos, resultando en fuentes puntuales de contaminación ambiental (Correia-Gomes et al., 2017). Entre los principales problemas ambientales asociados a este tipo de instalaciones, son el deterioro de la calidad del aire, y la contaminación por carga orgánica del agua superficial y del subsuelo proveniente de las excretas, un m³ de excretas contiene 7.6 kg de Nitrógeno total, 6.5 kg de fosfato, 7.2 kg de Potasio, 47 kg de DQO, 25 kg de DBO₅; elementos altamente contaminantes para los cuerpos receptores (agua, suelo y aire). Esta característica del agua residual porcina contiene una carga orgánica con alto impacto ambiental por su contenido de restos de heces, orina, agua y residuos de alimento, entre otras partículas contaminantes (Zhu et al., 2017).

En la granja porcina ubicada en el municipio de Amatitla, Tlacotepec de Mejía, en Veracruz-México; tiene un total de 5,000 cabezas de ganado porcino. Esta granja comenzó a operar en el año 2013 y para su puesta en marcha no se realizó una consulta previa informativa entre los pobladores cercanos. No se tiene registro de manifestación del impacto ambiental, aunque si se encuentra registrada ante la procuraduría de medio ambiente de Veracruz. Desde mediados de febrero-2019, pobladores de “Amitantla” cercanos a la granja porcina, presentaron denuncias públicas ante medios de comunicación por malos olores y temor de contraer enfermedades por la mortandad de peces río bajo en la cuenca del “Río Atliyac” cercano a la granja porcina, con sospecha de que las descargas de la granja pudieran estar contaminando el agua que consumen y, afectando sus cosechas por contaminación presente en el suelo, y en consecuencia afectar su economía. Los habitantes de la cabecera municipal de Tlacotepec de Mejía manifestaron también disgusto y preocupación por la ubicación a 5 kilómetros de la cabecera municipal.

A raíz de las denuncias presentadas, la secretaria del Medio Ambiente evaluó la calidad del agua y los contaminantes presentes en las descargas de agua de la granja barranquilla. Los valores de los resultados presentaron que la cría de los 5,000 cerdos de la granja porcina estaba generando 600m³ de agua residual al mes, equivalente a 7,200 m³ al

año, con parámetros de descarga de 20 m³ diarios correspondientes a 600m³ mensuales de aguas residuales con concentraciones por fuera del rango los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a aguas y bienes de la nación establecidos en la NOM- 001-SEMARNAT-1996. Los parámetros fuera de especificación fueron el Nitrógeno Total, fosfato, Potasio, DQO, DBO₅. El valor de estos parámetros dio como resultado que la Procuraduría del Medio Ambiente aplicara una sanción y la clausura de la granja de cerdos el 17 de abril del 2019.

Ante este panorama, los administradores de la granja porcina plantearon la necesidad de invertir en infraestructura para un sistema de tratamiento de las aguas residuales porcinas con propósito de reducir la carga orgánica del agua residual del proceso de engorda de cerdo. Sin embargo, los altos costos de inversión planteados para una infraestructura tradicional para el tratamiento de dichos efluentes fueron superiores a la capacidad de inversión de la empresa.

Para atender esta problemática de remoción de contaminantes, los sistemas de Humedales Construidos se presentan como un sistema eco-tecnológico escalable a las necesidades presentes y futuras de la empresa, con bajo costo de inversión, bajos costos de operación comparado con sistemas convencionales, así como eficiencias de remoción de contaminantes similares a los resultados de los sistemas de plantas de tratamiento convencionales. Con estas ventajas tecnológicas y de inversión financiera, resultan ser accesibles a medianos y pequeños productores agroindustriales (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2016).

1.2 Preguntas de investigación

Para cumplir con lo anteriormente planteado, se parte de las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿El desarrollo de un sistema de tratamiento de aguas residuales porcinas a gran escala que integre biorreactor anaerobio, humedales artificiales y biorreactores híbridos, podría ayudar a eliminar hasta en 90% los contaminantes presentes en aguas residuales de microempresas con producción hasta 5,000 cerdos mensuales?

2. ¿Es factible técnica y económicamente la reutilización de las aguas residuales porcinas de un sistema de remediación con el sistema de biorreactor anaerobio,

humedales artificiales y biorreactores híbridos, tratado en esta investigación?

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un modelo de economía circular en microempresa porcina para determinar la factibilidad técnica y financiera del tratamiento de sus efluentes en sistemas híbridos de biorreactores y humedales artificial, con fines de reutilización del agua en el sistema mismo de la empresa porcina.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Diagnosticar, apoyado de una revisión de literatura, el estado actual de tratamiento de aguas residuales porcinas en México, así como los sistemas de tratamientos empleados actualmente y su uso potencial en la generación de modelos de economía circular.
2. Evaluar el desempeño de humedales artificiales a nivel mesocosmos para el tratamiento de aguas residuales porcinas sembrados con *Canna Hybrids* e *Iris* germánica.
3. Evaluar la producción de biomasa vegetal de las plantas *Typha latifolia* y *Canna Hybrids* en humedales construidos que tratan aguas residuales porcinas.
4. Diseñar un Modelo de Economía Circular para el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas en microempresa porcina con fines de reutilización del agua en el sistema productivo de la empresa por medio de un sistema a gran escala integrado por Biorreactor Anaerobio – Humedal Construido – Biorreactor híbrido.

1.4 Hipótesis

H1: La implementación de un modelo de economía circular en una microempresa porcina, utilizando sistemas híbridos de biorreactor y humedales construidos para el tratamiento de sus efluentes y la reutilización del agua en el sistema de producción porcino, es factible técnica y financieramente, lo que resultará en beneficios ambientales

y económicos para la empresa.

1.5 Aportes

1. Aportación al conocimiento y a la técnica

- Configuración de humedales artificiales y plantas vegetales para ser utilizadas en el tratamiento de aguas residuales porcinas mediante estos sistemas.
- Aportes a ciencias básicas en materia de Bio-reactores híbridos integrados ahumedales artificiales.
- Modelo de economía circular que permita reincorporar las aguas residuales porcinas tratadas a sistemas productivos agroindustriales.

2. Aportes específicos al conocimiento

- Aporte Sociales: Reutilización de agua para servicios del proceso porcícola y producción agrícola. Alternativa/Estrategia económica que reaprovecha el agua para una actividad económica.
- Aportes Tecnológicos: Protección industrial eco-tecnológico de tratamiento de aguas residuales porcícolas para reutilización en el sistema productivo de la empresa.
- Parámetros de operación para el diseño eco-tecnológico de sistemas híbridos de biorreactores y humedales artificiales.
- Aportes científicos: Metodología para la generación de biogás de manera eficiente y sustentable basado en un sistema híbrido de biorreactor y humedales artificiales.
- Impacto ambiental, se aporta un modelo eco-tecnológico para un tratamiento de efluentes con alta carga orgánica.

3. Transferencia de tecnología y de conocimiento

- Transferencia técnica: Actualmente este proyecto es financiado por la Granja Barranquilla. En consecuencia, la transferencia de tecnología se proyecta por licenciamiento o sesión de derechos. Con autoría a los investigadores.
- La transferencia del conocimiento se realizará por capacitación, elaboración de manuales que describen el *know how* del sistema de

biorreactores y humedales artificiales.

- Son usuarios de esta tecnología los empresarios de la empresa porcícola de la Granja Barranquilla.
- Son beneficiarios de esta eco-tecnología los empresarios de empresas agroindustriales, así como la comunidad y los pobladores de las comunidades en contexto.

1.6 Justificación

La economía circular es una estrategia regenerativa que representa un cambio radical en la forma de aprovechar recursos orientada a una economía sustentable a partir de la reutilización y reciclaje de productos disponibles. En esta estrategia se prioriza el cuidado y la reducción de los impactos ambientales generados. Las economías circulares han probado ser eficientes para la incorporación de residuos en las cadenas productivas en diferentes escenarios industriales, agroindustriales y sociales. Estas estrategias se han implementado con éxito en países desarrollados, en donde la generación de residuos y contaminantes está mayormente regulada dada la normatividad ambiental rígida que los ampara. Sin embargo, la depuración de contaminantes de los efluentes en núcleos rurales dispersos o pequeñas poblaciones de países emergentes son prácticamente nulos; sobre todo, en donde, las políticas públicas son débiles en materia de manejo eficiente de los residuos generados por sus industrias y la sociedad en general. El resultado de esta falla de control ambiental se traduce, además de una generación de grandes volúmenes de residuos y contaminantes de manera inconsciente, en un duro impacto al medio ambiente por efecto de verter al subsuelo y a los cuerpos de agua sus residuos y efluentes industriales. Esto antepone la baja o nula estrategia de la reutilización y/o regeneración de recursos primarios utilizados en los procesos industriales.

En la economía circular, la gestión de los residuos y la reutilización del agua tiene gran importancia, y en este sentido, el tratamiento de las aguas residuales se considera un factor determinante. En este campo, los humedales artificiales juegan un papel crucial como elementos de mejora ambiental, lo cual en gran parte se debe a que son una fuente alternativa económica y eficiente de tratamiento de aguas residuales.

Una limitante a la que se enfrentan las micro y pequeñas empresas en México es el

tratamiento de aguas residuales generada por dichos sectores (De Dios y Sanginés 2017); en donde, sólo se remedian en promedio 70.5 m³/s (Hernández-Salazar et al., 2018), y se dejan sin ningún tipo de tratamiento 67.06% de las aguas industriales. Mientras que, las pequeñas y microempresas que constituyen 98.7% de la actividad industrial en el país, no hacen tratamiento de sus efluentes residuales que producen, y mucho menos es el caso, de las industrias que operan en la informalidad, así como las economías que se desarrollan en comunidades rurales alejadas (Conagua, 2019).

Hernández-Salazar et al. (2018) reportan a nivel nacional aproximadamente 2,477 plantas de tratamiento municipales que sólo tratan 212.0 m³/s de aguas residuales, mientras que para el sector industrial operan 2,832 plantas, de las cuales en su mayoría funcionan para grandes industrias. Sin embargo, para las medianas empresas autoabastecidas por las microempresas, únicamente hacen remediación a sus descargas industriales aproximadamente 0.8% del total. Este dato, puede aún ser menor por la cantidad de microempresas informalmente establecidas.

Amaya (2019) resaltan que el acceso a programas para el tratamiento de aguas residuales industriales es una limitante que enfrentan las micro y pequeñas empresas. Aquí los argumentos pueden ser diversos, desde el entorno socialmente en materia de cultura ambiental, hasta la escasa atención de los gobernantes en este tema. Empresarialmente, Hernández-Salazar et al. (2018) se refiere al poco conocimiento de ecotecnologías por parte del sector empresarial de México, así como a los costos elevados de construcción e implementación de las plantas de tratamiento de agua residual convencionales.

Por otra parte, este contexto ambiental ha impulsado en el orden mundial diversos sistemas productivos y económicos, así como la gestación de Modelos de Economía Circular, sobre todo, en las zonas agroindustriales en que se generan desde residuos sólidos, líquidos y gases, que de alguna forma no son aprovechados para ser reincorporados en el mismo proceso. En este tema, los reportes de crecimiento empresarial de México registran 85% de aumento nacional de microempresas, de las cuales, 13.5% corresponde a la industria porcina, lo que demuestra la importancia que tienen este tipo de microempresas en la economía regional. Sin embargo, debe mencionarse que este tipo de empresas no disponen con algún sistema de tratamiento de aguas residuales para disminuir el impacto ambiental que pueden llegar a generar. La razón de esto son los costos elevados de instalación y operación que

representan las plantas de tratamiento convencionales, los cuales, no logran solventar financieramente las microempresas porcinas en economías emergente. Más aún, en comunidades económicas en las que las microempresas de este giro industrial no están fiscalmente establecidas, y entonces escapan a ser evaluadas en el cumplimiento de las normas aplicadas a este tipo de industria (Sánchez y Moreno, 2016).

Los principales aspectos que pueden favorecer la adopción de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales porcinas son los relativos bajos costos de inversión de capital para instalar estas eco-tecnologías de remoción amigables con sumedio ambiente, así como los bajos costos de operación que algunos pueden llegar a ofrecer (SEMARNAT, 2019). Los sistemas alternativos de tratamiento de aguas residuales porcinas aprovechan los procesos físicos, químicos y biológicos presentes durante el proceso de saneamiento, propiciando la remoción de sólidos suspendidos por sedimentación y filtración, y la biodegradación de la materia orgánica a partir de sistemas aeróbicos y anaeróbicos.

Los sistemas anaeróbicos son procesos fermentativos que liberan productos finales estables y una producción celular muy baja, en donde, 3% de la materia orgánica presente en el agua residual es convertida en masa celular. Mientras que 97% remanente es convertido en vía catabólica en CH_4 y CO_2 como producto final estable. La digestión anaerobia se ha aplicado principalmente al manejo de los recursos orgánicos rurales, animales y agrícola, y de manera más reciente en el tratamiento de aguas residuales. La fermentación es un proceso de producción de energía eficiente en la respiración de organismos heterótrofos estrictamente (Seco et al., 2018).

La tecnología de bio-reactores de membrana (BRM) combina un proceso físico de separación con el tratamiento biológico. Estos sistemas utilizan membranas de micro y/o ultrafiltración que permite la retención de sólidos coloidales y suspendidos además de que se han demostrado la utilización y remoción de microorganismos patógenos y de algunas macromoléculas solubles (Liu et al., 2019).

Esta investigación que se eleva a nivel de Tesis Doctoral atiende el problema de contaminación de efluentes en la industria porcina en un caso real de la comunidad de Tlacotepec de Mejía, en el estado de Veracruz-México, la cual se caracteriza por una alta carga orgánica de contaminantes con arrastre de sólidos fecales. En esta investigación se encuentra una brecha tecnológica en el campo de humedales construidos que posibilita el

diseño de sistemas híbridos de biorreactor anaerobios- aerobios en humedales construidos sembrado con plantas a nivel real con dos propósitos: mejorar la eficiencia de remoción; y proponer una metodología eco- tecnológica para aprovechar el recurso energético generado por la carga de sólidos contenido en la carga orgánica que arrastra el efluente de descarga del proceso de engorda de cerdos.

1.7 Estructura general del trabajo

Los resultados de este trabajo se dividieron en seis capítulos. En el capítulo 1 se aborda el contenido general del trabajo, la justificación de la realización del trabajo de estudio y los objetivos de este. El Capítulo II se enfoca en la investigación documental sobre el estado actual del tratamiento de aguas residuales porcinas en México, así como los sistemas de tratamiento empleados actualmente y su uso potencial en la generación de modelos de economía circular. En el Capítulo III se evaluó el desempeño de humedales artificiales a nivel mesocosmos para el tratamiento de aguas residuales porcinas sembrados con *Canna Hybrids.*, y *Iris* germánica. En el Capítulo IV se evalúa la producción de biomasa vegetal de las plantas *Typha latifolia* y *Canna Hybrids* en humedales construidos que tratan aguas residuales porcinas, en el Capítulo V, se propuso un modelo de economía circular para el aprovechamiento de las aguas residuales tratada de origen porcino en la granja barranquilla para empresa porcina y finalmente se describen las conclusiones generales del proyecto, es decir, se integran los capítulos previos para concluir con una reflexión sobre el papel que juegan la economía circular y los humedales construidos como sistemas de tratamiento de aguas residuales porcinas y la eliminación de los contaminantes presentes en este tipo de aguas residuales para su posterior aprovechamiento de las mismas en el mismo proceso productivo de la granja desde una protección social al medio ambiente.

1.5 Referencias bibliográficas

Alarcón, M. T., Zurita, F., Hadad, H., García, A., Vidal, G., Maine, M. A., & Vera, I. L. (2018). Humedales de tratamiento: alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10554/34519>.

Amaral Barros, F. (2018). Diseño de una estación depuradora de aguas residuales de una industria agropecuaria. (Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid).

Anda Sánchez, J. D. (2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. *Sociedad y ambiente*, (14), 119-143.

Comisión Nacional del Agua (Conagua) (2018) Aguas residuales y contaminación en México. <https://agua.org.mx/actualidad/aguas-residuales-contaminacion-en-mexico/>

Conagua (2019) Procesos de tratamiento de aguas residuales municipales por tratado caudal (2019). Recuperado de <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=plantasTratamiento&ver=reporte&o=0&n=nacional#&ui-state=dialog>

Correia-Gomes, C., Henry, MK, Auty, HK y Gunn, GJ (2017). Explorando el papel de los ganaderos en pequeña escala para la bioseguridad nacional: el caso de los cerdos. *Medicina veterinaria preventiva*, 145, 7-15.

De Dios, M. A. T., Sanginés, M. L. G. 2017. Estrategias empresariales es un micronegocio del giro mecánicos-automotriz en Guanajuato. *Jóvenes en la ciencia*, 3(2), 1354-1359.

Garzon-Zuñiga, M. A. Y Buelna, G. (2014). Caracterización de aguas residuales porcinas y su tratamiento por diferentes procesos en México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(1), 65-79.

Gómez-Duarte, O. G. (2018). Contaminación del agua en países de bajos y medianos recursos, un problema de salud pública. *Revista de la Facultad de Medicina*, 66(1), 7-8.

González Alonso, A y Hernández Orjuela, O. (2020). Evaluación de remoción de contaminantes en aguas residuales domésticas por plantas ornamentales mediante humedales flotantes en el Cantón Militar de Apiay, Villavicencio (Meta). *Universidad Santo Tomás*. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/30317/2020omarhern%c3%a1ndez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Hernández-Salazar, A. B., Moreno-Seceña, J. C., & Sandoval-Herazo, L. C. (2018). Tratamiento de aguas residuales industriales en México: Una aproximación a su situación actual y retos por atender. *RINDERESU*, 2(1-2), 75-87.

Liu, J., Eng, C. Y., Ho, J. S., Chong, T. H., Wang, L., Zhang, P., & Zhou, Y. (2019). Quorum quenching in anaerobic membrane bioreactor for fouling control. *Water research*, 156, 159-167

McKinsey & Company. (2016). *The circular economy: Moving from theory to*

practice./McKinsey Center for Business and Environment Special edition.
<https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/Sustainability/Our%20Insights/The%20circular%20economy%20Moving%20from%20theory%20to%20practice/The%20circular%20economy%20Moving%20from%20theory%20to%20practice.ashx>

Meza, N. N., Gómez, A. E. Y. C., & Estevez, M. J. (2020). Cálculo de la huella hídrica en una lavandería industrial como estrategia de responsabilidad social empresarial orientada al cumplimiento de los ods. comité organizador.

Montero-López, E. M., & Martínez-Rodríguez, R. (2015). Situación de la porcicultura a pequeña escala. *Alternativas para la producción porcina a pequeña escala. Universidad Autónoma de México, MEX*, 15-48.

Moreno, J. M. (2018). Agua y economía circular. *En Congreso Nacional del Agua Orihuela: Innovación y Sostenibilidad* (pp. 27-52). Universidad de Alicante. <http://hdl.handle.net/10045/88367> | <https://doi.org/10.14198/Congreso-Nacional-del-Agua-Orihuela-2019>

Núñez Rodríguez, G. (2018). Elementos para una estrategia de desarrollo económico de México. *Análisis económico*, 33(84), 9-31.

Paniagua Díaz, E. A. (2018). *Implementación de un sistema de gestión integral de las aguas residuales en la granja porcina Santa Adelaida, Estelí.* (Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Ingeniería).

Parralejo, AI, Royano, L., González, J., & González, JF (2019). Producción de biogás a pequeña escala con excrementos animales y residuos agrícolas. Cultivos y productos industriales , 131 , 307-314.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (04 de mayo, 2020). *Se estima para 2020 una producción de 1.7 millones de toneladas de carne de porcino: Agricultura.* Recuperado de <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/se-estima-para-2020-una-produccion-de-1-7-millones-de-toneladas-de-carne-de-porcino-agricultura>

Sánchez Juárez, I. L., & Moreno Brid, J. C. (2016). El reto del crecimiento económico en México: industrias manufactureras y política industrial. *Revista finanzas y política económica*, 8(2), 271-299.

Seco Torrecillas, A., Jiménez Benítez, A. L., Ruiz Martínez, A., & Ferrer, J. (2018).

Tecnología de biorreactores anaerobios de membrana (AnMBR) para tratamiento de aguas residuales urbanas y reutilización de agua en agricultura. Una simbiosis en el marco de la Economía Circular. *Retema Medio Ambiente*, (207), 8-16.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2016). Normas Oficiales Mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996-NOM-002-SEMARNAT-1996-NOM-003-SEMARNAT 1997. Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>

Silva Orrala, K. I., & Vélez Orosco, J. J. (2022). *Construcción de una base datos de información sobre cambio climático y recursos hídricos a nivel local, regional y nacional* (Bachelor's thesis, Quito: UCE).

Vymazal J. (2013). The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: A review of a recent development. *Water Research* 14, 4795-4811.

Wang, N. y otros tres autores, A Review on Fenton-like Processes for Organic Wastewater Treatment, doi:10.1016/j.jece.2015.12.016, *J. Environ. Chem. Eng.*, 4, 762-787 (2016)

Amaya, G. C. (2019). *Economía circular como alternativa sostenible para el desarrollo productivo de las industrias* (Doctoral dissertation, Universidad del Rosario)

Zhu, L., Wang, L., & Xu, Y. (2017). Chitosan and surfactant co-modified montmorillonite: A multifunctional adsorbent for contaminant removal. *Applied Clay Science*, 146, 35-42.

Zurita-Martínez, F., Castellanos-Hernández, O. A., Rodríguez-Sahagún, A. 2011. El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(spe1), 139-150.

Capítulo II: Diagnóstico del estado actual de tratamiento de aguas residuales porcinas en México, así como los sistemas de tratamiento empleados actualmente y su uso potencial en la generación de modelos de economía circular

Resumen

En la economía circular la gestión de los residuos y la reutilización del agua tienen gran importancia, en este sentido el tratamiento de las aguas residuales se considera un factor determinante y los humedales construidos juegan un papel crucial como elementos de mejora ambiental esto se debe en gran medida a que son una fuente alternativa y eficiente de tratamiento de aguas residuales. El objetivo de la presente investigación es mostrar el estado actual del tratamiento de aguas residuales porcinas en México, así como los sistemas de tratamiento empleados actualmente y su uso potencial en la generación de modelos de economía circular para el manejo descentralizado de aguas residuales en medianas y pequeñas granjas. Esta investigación es un estudio preliminar de la literatura reportada en bases estadísticas y fuentes secundarias relacionada con el tratamiento de aguas residuales y de su recuperación para aprovecharla como recurso hídrico. El diagnóstico del estado actual del tratamiento de aguas residuales porcinas en México muestra que la mayoría de las granjas porcinas en el país no cuentan con sistemas de tratamiento adecuados, lo que provoca la contaminación del suelo y del agua. Los sistemas de tratamiento empleados actualmente son principalmente los sistemas de lodos activados, los estanques anaerobios y los biofiltros. Se requiere la implementación de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales porcinas como alternativa sostenible que permite aplicar los principios de la economía circular en el ámbito del tratamiento de aguas residuales, este enfoque representa una oportunidad para mejorar la gestión ambiental y reducir el impacto de la actividad porcina sobre el medio ambiente y el fortalecimiento del sector agropecuario.

Palabras clave: Economía circular, humedales construidos, aguas residuales porcinas

2.1 Introducción

El recurso natural del agua es esencial e imprescindible para la existencia humana, su calidad se ha visto comprometida derivado del crecimiento de la población, el cambio en los hábitos de consumo asociado al crecimiento económico, su utilización en procesos industriales y a múltiples problemas como la alta tasa de contaminantes vertidos consciente o inconscientemente al subsuelo o directo a corrientes de agua sin previo tratamiento. Esto y entre otros factores, han puesto en riesgo el suministro de los bienes y servicios provistos por el medio ambiente. Se estima que para el 2025, alrededor de 1,800 millones de personas vivirán en áreas con estrés hídrico, estas proyecciones demandan mayor cantidad del recurso natural por parte de la población mundial (ONU, 2019; Seguí, et al., 2016), un aumento en el suministro de aguas genera mayor carga de aguas residuales, asociado a esto el incumplimiento de las metas globales de los objetivos de desarrollo sostenible, tal situación pone en riesgo el suministro de servicios de agua y saneamiento, la calidad de vida humana y de los ecosistemas. En ese sentido, para garantizar la eficiencia y sostenibilidad de recursos hídricos es necesario transitar de un modelo económico lineal a uno circular. Continuar bajo un modelo de economía lineal (Coger, producir, consumir y eliminar), aumentara la demanda a nivel mundial de agua excediendo el 40% sobre el agua disponible en el año 2025 (Mckinsey & Company, 2015). La economía circular es un sistema de economía regenerativa, la cual representa un cambio radical en el quehacer de las cosas para lograr una economía sustentable, para aprovechar los recursos mediante la reutilización y reciclaje de productos disponibles, con el propósito de priorizar el cuidado de los recursos primarios y reducir las externalidades negativas ambientales. En la economía circular la depuración de los residuos en efluentes es un proceso que incluye el reciclado de los recursos del agua y los recursos generados en el tratamiento de las aguas residuales, para su reutilización en los sistemas productivos y la reutilización del agua tratada necesaria para los diferentes usuarios, reduciendo las pérdidas del agua natural. En este proceso, los humedales artificiales tienen un papel crucial como tecnologías de mejora ambiental, debido en gran medida a que son una ecotecnología alternativa eficiente y económica para la remoción de contaminantes en aguas residuales. El objetivo de este trabajo es mostrar el estado actual del tratamiento de aguas residuales en México, sus retos y perspectivas para el manejo descentralizado de aguas

residuales en pequeñas y medianas granjas porcícolas del país.

2.2 Materiales y métodos

En este artículo se realizó una revisión intensiva sobre las oportunidades de implementar humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales porcinas en México bajo un enfoque de economía circular. Se realizó una búsqueda preliminar de la literatura reportada en bases científicas en el idioma inglés y español relacionadas con el tratamiento de aguas residuales, su recuperación para aprovecharla como insumo hídrico en los procesos agroindustriales bajo modelos de economía circular. Especialmente se consultan sitios de organismos gubernamentales; la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA), Secretaría de Agricultura, Ganadería Desarrollo Rural y Pesca (SAGARPA), y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) publicados en fuentes académicas como Scopus de Science Direct, MDPI, archivos de divulgación científica locales y el buscador Scielo (artículos científicos, tesis, memorias de congresos y libros) publicados entre el año 2015 y 2023.

2.3 La porcicultura en México

De acuerdo con datos del Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) (2020), en México existen alrededor de 34,000 granjas porcinas registradas, distribuidas principalmente en los estados de Jalisco 20.25 % del total nacional, Sonora 11.1%, Puebla 10.3%, Veracruz 9.5 %, y Yucatán 6.2 %, como se puede observar en la figura 1. La industria porcina en México es considerada una de las más importantes dentro de la producción agropecuaria del país, generando más de dos millones de empleo e ingresos económicos en diversas regiones del territorio nacional por valor de 62 mil millones de pesos (SADER, 2022), impactando positivamente en la economía del país. Se estima que el país cuenta con una población de cerca de 18.8 millones de cerdos, de los cuales 7 de cada 10 se encuentran operando con sistemas tecnificados o semitecnificados y 3 de cada 10 se encuentran en sistema traspatio, que son criados tanto para consumo interno como para exportación (SIAP, 2021).



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SIAP (2021)

Debido a que la producción de cerdos se lleva a cabo en diferentes sistemas productivos, desde empresas integradas, hasta productores artesanales, productores familiares o rurales, encontrando 3 modos principales de producción porcina: sistemas tecnificados, semitecnificados y artesanal o de traspatio (Montero, 2015). La principal diferencia entre estos tipos de sistemas es el uso de recursos y tecnologías que se ocupan en los sistemas productivos, y el número de animales que se producen, como se puede observar en la figura 2, el tipo de productores traspatio genera 30% de la producción nacional, y en algunos casos puede considerarse como una actividad económica de subsistencia. En otros casos, estas pueden considerarse como empresas a pequeña escala, pues tienden a imitar las condiciones de crianza (Montero, 2015). Estas granjas de traspatio suman valor a los índices registrados a nivel nacional, y también funcionan como una fuente de ingreso a nivel local en zonas rurales (Sánchez y Moreno, 2016).

SISTEMAS DE PRODUCCIÓN PORCÍCOLA

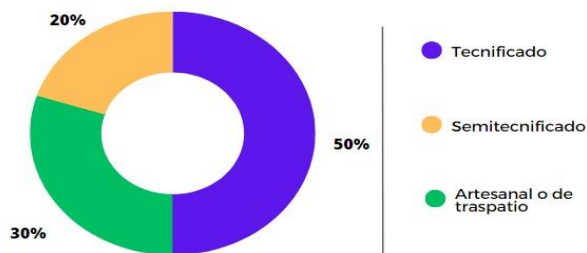


Figura 2. Distribución nacional de los diferentes tipos de sistema porcícola.

La mayoría de las granjas porcinas no tratan sus aguas residuales y las descargan directamente en ríos, arroyos o en el suelo, lo que puede provocar la contaminación del agua y del suelo, así como la emisión al aire de ciertos compuestos, asociados principalmente a las descargas de aguas residuales sin tratamiento o con tratamiento deficiente que contiene una carga orgánica con alto impacto ambiental por su contenido de restos de heces, orina, agua y residuos de alimento, entre otras partículas contaminantes (Zhu & Xu, 2017). Estos contaminantes generan en las aguas vertidas exceso de nutrientes, alto contenido de nitratos, carbono, fósforo y contaminación por carga orgánica del agua superficial y del subsuelo, proveniente de las excretas, elementos altamente contaminantes para los cuerpos receptores (agua, suelo y aire) y afectaciones a la salud pública y al medio ambiente (Villalobos & Amp; Díaz, 2018; Zhindón et al., 2018). El tratamiento de aguas residuales porcinas en México es un problema importante, ya que la industria porcina es una de las más grandes del país y produce grandes cantidades de aguas residuales. Según un informe de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) (2021), solo el 15% de las granjas porcinas en México cuentan con sistemas de tratamiento de aguas residuales.

No se dispone de información actualizada sobre el porcentaje de granjas porcinas en México que realizan tratamiento de aguas residuales (Conagua, 2021). Sin embargo, a nivel federal existe la obligación de que todas las instalaciones pecuarias, incluyendo las granjas porcinas, cuenten con sistemas de tratamiento de aguas residuales que cumplan con las disposiciones establecidas en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2018. Además, algunos estados y municipios también tienen regulaciones específicas sobre el tratamiento de aguas residuales en las granjas porcinas.

El Gobierno mexicano ha implementado iniciativas para fomentar la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales en granjas porcinas, mediante incentivos económicos y programas de capacitación, pero aún queda mucho por hacer para asegurar que todas las granjas porcinas cuenten con sistemas de tratamiento de aguas residuales adecuados y eficientes.

2.4 Tratamiento de aguas residuales porcinas en México

En México, la producción porcina es una actividad importante en varias regiones del país, y conlleva la generación de grandes cantidades de aguas residuales. Es importante

implementar sistemas de tratamiento adecuados para asegurar la calidad de las aguas y evitar la contaminación del medio ambiente. El tratamiento de aguas residuales porcinas se enfrenta a diferentes problemas que aún dificultan su adecuada gestión. A pesar de la normativa que regula su tratamiento, ésta en muchas ocasiones no se cumple, dejando a la población expuesta a los riesgos sanitarios y medioambientales.

En México se generan 14,000 millones de m³ al año de aguas residuales municipales y no municipales e industriales, y solo son tratados 40% de acuerdo con los reportes de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2020), lo cual indica que el porcentaje restante el 60% se filtra a suelos subsuperficiales, lagos ríos y mar sin ningún tipo de tratamiento. Dentro de los parámetros de calidad de las aguas en México, solo son monitoreados los siguientes: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días (DBO5), y Sólidos suspendidos totales (SST). (Ruiz et al., 2017; Tejada et al., 2015).

En materia de tratamiento de aguas residuales porcinas, la tabla 1 muestra la comparación de seis tipos de granjas porcinas, donde los contaminantes varían con respecto al clima de la zona, siendo un factor de suma importancia, Garzón-Zúñiga y Buelna (2014), consideradas como pequeña, mediana y grande industria. De acuerdo con la tabla siguiente se puede observar la variabilidad existente entre el efluente de las industrias porcinas, lo anterior dificulta su tratamiento sumado a los altos costos que se asocian a sistemas convencionales, nuevas alternativas y propuestas de tratamiento de aguas residuales provenientes de granjas porcinas, este tipo de aguas contienen niveles altos de materia orgánica, estos datos los podemos verificar en la tabla siguiente como los SST de 42500 (mg/L) y en los SSV de 32500 (mg/L), no hay que dejar de lado que este tipo de aguas provenientes de las granjas porcinas tienen altos contenidos de Nitrógeno (N) y Fosforo (F) los cuales llegan a contaminar de forma severa los cuerpos de agua cercanos a la zona, es ineludible la necesidad de la implementación de plantas de tratamiento alternativas, si bien existen algunas ya en funcionamiento, son muy escasas.

Existen diferentes estrategias para el tratamiento de aguas residuales porcinas efectivos para reducir dichas emisiones. Algunos de los sistemas de tratamiento convencionales (lodos activados, filtros biológicos, lagunas de estabilización, lagunas de oxidación, lagunas aireadas, sedimentación, etc.) empleados actualmente son de amplia

implementación en granjas de gran escala ya que son eficientes en la depuración y remoción de contaminantes, pero representan importantes incrementos en el costo de producción, puesto que estos generan altos costos en su construcción, sostenimiento y mantenimiento. Lo que representa una limitante para los pequeños o medianos productores puesto que estos por la naturaleza de su capital no pueden solventar los costos, lo que las convierte en tecnologías poco o nada accesibles, al no ser una opción económicamente asequible para comunidades con baja densidad poblacional y de difícil acceso, donde no se cuenta con recursos económicos suficientes para tratar las aguas residuales agro-industriales y para pequeños empresarios (Sandoval-Herazo et al., 2020).

Tabla 1. Contaminantes de las granjas porcinas.

Granja	1	2	3	4	5	6
Capacidad de animales	12,600	9,000	5,000	5,500	5,600	2,200
Tamaño de granja	Mediana	Mediana	Mediana	Mediana	Mediana	Chica
Clima del lugar	Cálido-semiseco	Cálido-semiseco	Sub-tropical	Sub-tropical	Sub-tropical	Templado
DQO(mg/L)	20,419	21,443	19,344	25,205	3,809	7,922
DBO5(mg/L)	4,047	7,032	9,613	8,460	1,657	5,330
SST(mg/L)	8,743.5	12,875	10,125	15,042	1,994	3,269
SSV(mg/L)	6,739	10,761	7,875	11,792	1,852	2,981
N Total (mg/L)	9,48	1,133	1,515	2,034	-	-
NTK	948	1,131	1,515	2,033	405	1,018
N-NH4+	410	763	1,500	1,760	178	496
N-(NO2-+NO3-) (mg/L)	0.13	1.94	0.13	0.63	0.13	0.13
P Total (mg/L)	54	103	77	180	41	102
pH	6.99	6.98	7.06	6.94	6.87	7.08
Coliformes fecales	1.8 x10 ⁷	22.1 x10 ⁷	x10 ⁴	9.2 x10 ⁸	1.6 x10 ⁸	1.3 x10 ⁸
DBO/DQO	0.45	0.37	0.5	0.3	0.4	0.7

Fuente. (Garzón-Zúñiga y Buelna, 2014)

Por lo que la mayoría de estas granjas porcinas se establecen y trabajan al margen de las normas ambientales, aun conociendo el daño ambiental que provocan estas instalaciones, convirtiéndose esto en uno de los principales problemas por la falta de una infraestructura adecuada para el tratamiento de estas aguas. Muchas granjas porcinas no cuentan con sistemas de tratamiento y disponen los residuos sin procesar en tierras cercanas, ríos o mantos freáticos, contaminando así el agua y la salud humana. Además, cuando sí existen sistemas de tratamiento, estos no operan de forma eficiente, lo que genera más contaminación (Ferrer et al., 2018).

Otro problema es la limitada capacitación de los productores y técnicos en el manejo adecuado de las aguas residuales, lo que propicia la falta de adopción de tecnologías eficientes y óptimas para su tratamiento. Es importante que se establezcan programas eficaces de educación y capacitación que fomenten el uso de prácticas sostenibles y tecnologías avanzadas para el tratamiento de aguas residuales porcinas. En materia de infraestructura de tratamiento los sistemas más empleados en México por las granjas porcinas que sí cuentan con sistemas de tratamiento de aguas residuales son principalmente sistemas biológicos, como lagunas de oxidación y biodigestores. Sin embargo, la falta de mantenimiento y capacitación en la operación de estos sistemas puede limitar su eficacia y eficiencia (Krishna et al., 2017).

En México, existen varios sistemas de tratamiento utilizados para el tratamiento de aguas residuales porcinas, figura 2, entre los que destacan:

- Lagunas de oxidación: este sistema es el más utilizado en México debido a su bajo costo y facilidad de operación. Consiste en un estanque impermeabilizado donde se depositan las aguas residuales porcinas y se dejan en reposo para que se produzca la oxidación biológica de la materia orgánica.
- Biodigestores: estos sistemas emplean la digestión anaerobia para la eliminación de la materia orgánica presente en las aguas residuales porcinas, produciendo biogás como subproducto. Este sistema es más eficiente que las lagunas de oxidación, pero requiere un mayor costo de instalación (Ferrer y col, 2018).
- Sistemas mecánico-biológicos: estos sistemas combinan la eliminación de sólidos suspendidos y la oxidación biológica en un solo proceso. Emplean tecnologías como

filtros biológicos, reactores aerobios y lodos activados para su operación.

- Plantas de tratamiento convencionales: estas plantas utilizan procesos físico-químicos y biológicos para la eliminación de contaminantes presentes en las aguas residuales porcinas. Son más costosas que los sistemas anteriores, pero ofrecen un elevado grado de eliminación de la carga contaminante.



Figura 3. *Sistemas de tratamiento de efluentes.*

Fuente: (SEMARNAT, 2021)

Todos ellos son altamente costosos tanto en su implementación como operación y mantenimiento, así mismo pueden tener diversas consecuencias ambientales, los sistemas de tratamiento anteriormente descritos pueden liberar grandes cantidades de contaminantes al medio ambiente si no son adecuadamente diseñados y operados. Los residuos porcinos contienen altas concentraciones de nitrógeno y fósforo, que pueden causar floraciones de algas en los cuerpos de agua cercanos, afectando el ecosistema acuático; se pueden generar emisiones de gases de efecto invernadero, la fermentación anaerobia de los residuos porcinos para generar biogás puede liberar metano, un gas de efecto invernadero mucho más potente que el dióxido de carbono. Si no se captura y utiliza adecuadamente, el metano puede contribuir al calentamiento global; el impacto en la calidad del suelo, se puede aumentar la carga de nutrientes y contaminantes en el suelo, lo que puede afectar su calidad y capacidad de producción agrícola y la contaminación del aire, los sistemas de tratamiento convencionales pueden generar olores desagradables y otros contaminantes atmosféricos,

como amoníaco y compuestos orgánicos volátiles, que pueden afectar la salud y el bienestar de las comunidades cercanas.

En resumen, el uso de sistemas de tratamiento convencionales para aguas porcinas puede tener graves consecuencias ambientales si no se gestionan adecuadamente. Por lo tanto, es necesario implementar tecnologías más avanzadas y sostenibles para minimizar el impacto ambiental de esta actividad porcina. Ante estos escenarios es primordial fomentar el uso de sistemas de tratamiento económicos y ecológicos que sean capaces de degradar contaminantes puntuales y no puntuales presentes en aguas residuales porcinas (Gorito et al., 2017; Sandoval et al., 2019).

Los humedales construidos son sistemas ecológicos, económicos, fáciles de operar, no requieren energía, ni de personal altamente capacitado para su operación, se pueden supervisar con facilidad, el personal es requerido especialmente durante la etapa de establecimiento y cuando se presentan problemas de obstrucción de tuberías o modificaciones en el sistema, estos requieren menos mantenimiento. por lo que son una solución viable para su implementación en la porcicultura. Los humedales construidos son sistemas artificiales que imitan los procesos de depuración natural que ocurren en los humedales naturales. En estos sistemas, las aguas residuales se infiltran en el sustrato del humedal, donde son depuradas por medio de una combinación de procesos físico-químicos y biológicos. Las plantas del humedal también contribuyen a la depuración, ya que absorben los nutrientes y eliminan contaminantes (Vymazal, 2016). Los humedales construidos han demostrado en diferentes estudios ser un método ecológico, económico y eficiente en la remoción de estos contaminantes presentes en diversas aguas residuales como se puede apreciar en la tabla 2, y adicionalmente pueden dar un valor estético al paisaje si se usan con plantas ornamentales y son amigables con el medio ambiente (Sandoval et al., 2019).

Tabla 2. *Remoción de contaminantes mediante humedales construidos.*

Tipo de agua	Remoción	País	Autores
Residuales industriales porcícolas	BOD: 82, TN: 53, TP: 60.	Chile	Morales et al. (2013)

Residuales industriales	N: 65-67, P: 63-74, Zn y Cu:98-99, Carbamazepine:25-51, LAS: 60-72	Italia	Macci et al. (2015)
Municipal	COD: 35, TN: 45.6	México	Belmont y Metcalfe (2003)
Residuales domésticas	COD: >75, P: 66, Coliformes: 99	México	Zurita et al. (2011)
Residuales domésticas	TSS: 62, COD: 80, BOD: 82, TP: >50, TN: >49	México	Zurita et al. (2011)
Residuales domésticas	BOD: 79, TN: 55, PT: 50	México	Zurita et al. (2011)
Residuales industriales porcícolas	COD: 92, N-NH4: 85, P-PO4: 80	México	Sandoval et al., (2019)
Residuales domésticas	BOD: 70	México	Hallack et al. (2015)

En la Tabla 2 se pueden apreciar algunos de los resultados obtenidos por otros investigadores tratando contaminantes como lo son DBO, TN, TP, N, Zn y Cu, Coliformes, SST, N-NH4 y P-PO4 de manera eficiente, en los cuales a pesar de la variabilidad que existen entre cada uno de los tipos de aguas residuales que estos manejan, los humedales construido demuestran ser un método de tratamiento eficiente, con gran capacidad de adaptación en los sitios en que se instalan, replicando la función que realizan los humedales naturales.

Este tipo de sistemas de tratamiento de aguas residuales puede ser aplicable en diferentes regiones del país, para grandes y pequeñas industrias que generen efluentes contaminantes de pequeña o baja escala, en territorio mexicano (Núñez, 2017).

Cabe resaltar que se debe tener en cuenta las dificultades en la fiscalización y supervisión de las actividades porcinas por parte de las autoridades ambientales en México. Muchas veces, falta de recursos económicos, falta de personal capacitado y la falta de una legislación más rigurosa se convierten en obstáculos para llevar a cabo una supervisión adecuada y, por tanto, un control apropiado sobre la gestión de las aguas residuales porcinas, la gestión de aguas residuales porcinas en México presenta importantes deficiencias en la infraestructura, la capacitación y la fiscalización. Se requiere más inversión para el mejoramiento y la expansión de sistemas de tratamiento eficientes, una educación y capacitación integradas de productores y técnicos y una fiscalización más rigurosa y efectiva por parte de las autoridades ambientales para garantizar la protección del medio ambiente y la salud pública.

La importante propuesta para este tipo de aguas residuales es la implementación de humedales artificiales ya que es uno de los sistemas más económicos, ecológicamente sustentables, de fácil mantenimiento y eficientes de la actualidad. Este sistema puede implementarse para cualquier tipo de población, ya que tienen la ventaja de ser sistemas de tratamiento que se pueden adaptar tanto a su entorno como a la población en donde estos sean implementados.

2.5 Economía Circular y Humedales Construidos: Potencial relación bio-conveniente.

La economía circular ha demostrado ser una forma diferente de hacer las cosas en los sistemas socio-industriales para mejorar la eficiencia y darles una segunda oportunidad a los recursos para ser reutilizados en los mismos sistemas. Dentro de los grandes retos del diseño de sistemas de reaprovechamiento del agua, la economía circular se orienta a reutilizar las aguas residuales tratadas en condiciones adecuadas que generen rentabilidad y eficiencia hídrica, como una medida que garantice el suministro de agua (EEA, 2016).

El uso del agua necesita una segunda vuelta un segundo ciclo, que va más allá de reducir el gasto del agua mediante la reducción de su consumo o de devolverla a las aguas naturales en condiciones seguras para disminuir el impacto sobre los ecosistemas. El reaprovechamiento del agua precisa usar el agua sin volver a consumirla, es decir tomar el agua y devolverla no solo a las aguas naturales, es volverla otra vez a los sistemas que la arrojaron, volverla otra vez a la industria, volverla otra vez a la agricultura, y hacer patente de que hay que cerrar ese círculo y que el agua hay que reincorporarla una y otra vez, tantas veces como sea necesario, lo que significa que los procesos de producción deben diseñarse para mantener ciclos de agua eficientes, reciclar esas aguas generadas mediante las actividades humanas, industriales o agroindustriales, someterlas a tratamiento y depuración de contaminantes y reutilizarlas en los mismos procesos, reduciendo el consumo del recurso de fuentes naturales, así mismo reciclar y reutilizar los recursos del agua generados en el proceso de depuración de las aguas residuales, reciclar sus residuos sólidos y valorar sus residuos orgánicos líquidos o sólidos en energía verde, desarrollando el acceso a los recursos disponibles y renovándolos en el mismo sitio productivo.

La economía circular se refiere a un enfoque en el que se pretende crear sistemas

económicos sostenibles, en los que los residuos y desechos se utilizan como recursos. En el caso del tratamiento de aguas residuales porcinas, la economía circular puede implicar procesos de recuperación y reutilización de los nutrientes presentes en el agua, como el nitrógeno, fósforo y otros elementos. Uno de los principales métodos utilizados para el tratamiento de aguas residuales porcinas es el uso de biodigestores, que permiten la captura de biogás y la generación de energía a partir de los desechos. El lodo residual resultante puede ser utilizado como fertilizante orgánico rico en nutrientes para cultivos agrícolas, cerrando así el ciclo de nutrientes. Esta gestión circular del agua, de la energía y de los residuos permite la reducción de las huellas de agua, materia y carbono, además de la optimización de los costos de producción de las diferentes actividades económicas (Simón, 2018). En este contexto, el uso de humedales construidos resulta una extraordinaria alternativa, ya que es uno de los sistemas más económicos, ecológicamente sustentables, de fácil mantenimiento y eficientes de la actualidad. La utilización de sistemas de humedales construidos facilita la filtración y depuración de las aguas residuales porcinas a través de la utilización de plantas acuáticas y microorganismos. El agua tratada resultante puede ser utilizada para riego, para aprovechar este recurso hídrico. Además, el uso de humedales construidos reduce la cantidad de residuos generados por el tratamiento de las aguas residuales, ya que no se requieren materiales sintéticos ni sustancias químicas para el proceso de depuración.

Este sistema de humedales construidos puede instalarse y adaptarse en diversos medios, ya que tienen la ventaja de adaptarse en su construcción en donde estos sean requeridos. Estos sistemas de humedales construidos pueden ser aprovechados en sistemas de economía circular para reaprovechar el agua y energía, con el propósito de potencializar los recursos primarios y recuperar las aguas residuales. Las regulaciones ambientales en materia de agua buscan reaprovechar las aguas regeneradas en la industria, en la ciudad o en la agricultura en el mismo proceso productivo; para esto es necesario evaluar e identificar el consumo de agua que se genera en el proceso productivo, de esta forma poder dimensionar la demanda potencial de aguas regeneradas que se podría tener susceptible de ser reutilizadas en el mismo proceso, y evaluar el ahorro del agua en un periodo determinado de tiempo. En este sentido, es importante la eficiencia del sistema de remediación que trate al efluente. En el tema energético, los humedales construidos han demostrado recientemente la capacidad de generar bioelectricidad; sin embargo, este es un campo poco explorado. En el caso de los

residuos se realiza una identificación de todos aquellos residuos resultantes de la actividad económica, como la recuperación de nutrientes y de otro tipo de biosólidos que puedan tener una circularidad al sistema que lo originó y otro sistema que los pueda aprovechar (Navarro, 2015). Este contexto bio-afín, se propone la hipótesis de que un sistema de economía circular gestionado por humedales construidos promueve un sistema sustentable para el reaprovechamiento de agua de efluentes de forma eficiente y económica.

2.6 Retos por cumplir

El crecimiento de plantas o sistemas de tratamiento de aguas residuales tiene que ser acorde al crecimiento acelerado de microempresas porcinas, principalmente en zonas rurales, puesto que en estos lugares no se cuenta con ningún tipo de tratamiento de aguas y como es común en muchos sitios (Garzòn-Zuñiga & Buelna, 2014), todas estas aguas terminan en ríos aledaños, que sin pensarlo son los mismos cuerpos de agua que algunas comunidades ocupan para consumo diario, tanto en la cocina como en el aseo y lo cual puede perjudicar de manera severa a la población que este expuesta a eso, de igual manera el control sistematizado en las zonas urbanas o semi urbanas de desechos de este tipo, para que la contaminación de todos los cuerpos de agua aledaños a estas zonas cese, y nuestras reservas de agua dejen de ser afectadas, esto para que de igual forma se pueda poner atención especial en cuerpos de agua ya contaminados y estos puedan ser tratados para contrarrestar parte de la afectación que se ha generado durante todo este tiempo, así mismo es necesario plantear opciones de reutilización de toda esta agua ya tratada, para bajar el consumo de agua pura en algunos otros sectores tanto industriales como habitacionales.

La importante propuesta para este tipo de aguas residuales es la implementación de humedales artificiales ya que es uno de los sistemas más económicos, ecológicamente sustentables, de fácil mantenimiento y eficientes de la actualidad. Este sistema puede implementarse para cualquier tipo de población, ya que tienen la ventaja de ser sistemas de tratamiento que se pueden adaptar tanto a su entorno como a la población en donde estos sean implementados.

Las lagunas de estabilización y los humedales artificiales se han implementado por diversos tipos de autores, por sus bajos costos de operación y construcción (Zurita y Col. 2011). Este tipo de tecnologías favorecen el crecimiento de agua tratada y no tiene desgaste

de ningún tipo de recurso, sin embargo los humedales construidos siguen teniendo ventaja con respecto a la utilización de vegetación ornamental nativa de la zona y con lo cual se puede contribuir no solo de manera medio ambiental al tratar las aguas residuales, si no de manera visual al entorno generando plantas de tratamiento que también sean atractivas para las personas y que de esta forma sean más fácilmente aceptadas en nuestra sociedad. Al tratar las aguas residuales porcinas una industria creciente en el país se contribuye notablemente a mejorar las características de los ríos, mares y lagunas receptoras de aguas residuales y preservar la vida y salud de los ecosistemas.

La implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales porcinas basados en la economía circular puede presentar numerosos beneficios, tanto desde el punto de vista ambiental como económico, y puede representar una solución sostenible y eficiente para la gestión de residuos en la industria porcina en México.

2.7 Conclusiones

Se puede disminuir el efecto de la crisis del agua que se predice por diversos autores y asegurar un futuro de agua suficiente para todos mediante la implementación de los principios de la economía circular, lo que se pretende es cambiar la proposición de valor, ir introduciendo nuevos elementos en relación al valor del agua, en los cuales se recuperan aguas residuales regeneradas. El agua tratada puede ser reutilizada en los sistemas productivos, esto reduce la demanda de agua natural, además, se reduce la cantidad de agua descargada como efluente, disminuyendo el impacto ambiental.

Reutilización del agua en el sistema de producción porcino:

Para evolucionar hacia una economía circular del agua es indispensable contar con un sistema de depuración eficiente, amigable con el medio ambiente y que además sea una opción económicamente accesible para la sociedad en general, por lo que los humedales construidos usados para tratar aguas residuales domésticas, agroindustriales e industriales en países desarrollados, que presentan ventajas competitivas en materia de costos de construcción, implementación y mantenimiento a comparación de sistemas mecánicos convencionales, además se han probado en su eficiencia para remover contaminantes presentes en distintos tipos de aguas residuales.

La economía circular es un modelo de gestión sostenible que busca reducir el

consumo de materiales y recursos naturales, así como minimizar la generación de residuos y la contaminación derivada de las actividades humanas. En el caso del tratamiento de aguas residuales porcinas, se puede aplicar un enfoque de economía circular mediante el uso de humedales construidos como sistemas naturales de depuración.

El uso de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales porcinas presenta diversas ventajas desde el punto de vista de la economía circular.

2.8 Bibliografía

Alarcón, M. T., Zurita, F., Hadad, H., García, A., Vidal, G., Maine, M. A., & Vera, I. L. (2018). Humedales de tratamiento: alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10554/34519>

Amórtegui, L. A. S., Vega, D. G., & Rojas, H. R. G. G. (2016). Huella hídrica: análisis como instrumento estratégico de gestión para el aprovechamiento eficiente de los recursos hídricos. *Ciencia Nicolaita*, (69).

Belmont, M. A., & Metcalfe, C. D. (2003). Feasibility of using ornamental plants (*Zantedeschia aethiopica*) in subsurface flow treatment wetlands to remove nitrogen, chemical oxygen demand and nonylphenol ethoxylate surfactants— a laboratory- scale study. *Ecological Engineering*, 21(4-5), 233-247

Castelán Cabañas, R. (2017). *Implementación de un humedal artificial para el tratamiento de aguas grises en el centro ecoturístico playa La junta, Amatlán de Los Reyes, Veracruz* (Master's thesis).

Comisión Nacional del Agua (2018) Aguas residuales y contaminación en México. <https://agua.org.mx/actualidad/aguas-residuales-contaminacion-en-mexico/EEA>

(2018). The problema of wáter stress. European Environment Agency.

Gorito, A. M., Ribeiro, A. R., Almeida, C. M. R., y Silva, A. M. (2017). A review on the application of constructed wetlands for the removal of priority substances and contaminants of emerging concern listed in recently launched EU legislation. *Environmental pollution*, 227, 428-443.

Macci, C., Peruzzi, E., Doni, S., Iannelli, R., & Masciandaro, G. (2015). Ornamental plants for micropollutant removal in wetland systems. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(4), 2406-2415.

Mckinsey & company (2015). Rethinking the wáter cycle. How movig to circular economiy can preserve our most vital resource. <http://dln.jaipuria.ac.in:8080/jspui/bitstream/123456789/3062/1/Rethinking%20the%20water%20cycle.pdf>

Mitsch, WJ y Gosselink, JG (2015). *Humedales*. John Wiley & Sons. https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=-vcwBgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Mitsch+W.J.,+Gosselink+J.G.+2007.+Wetlands,+fourth+ed.+John+Wiley+%26+Sons,+Nueva+York.&ots=3sVIccPldD&sig=x8fsu_6l5dzzB1r2CfgTESGYY_8&redir_esc=y#v=onepage&q=Mitsch%20W.J.%2C%20Gosselink%20J.G.%202007.%20Wetlands%2C%20fourth%20ed.%20John%20Wiley%20%26%20Sons%2C%20Nueva%20York.&f=false

Morales, G., López, D., Vera, I., & Vidal, G. (2013). Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas. *Theoria*, 22(1), 33-46

Navarro, D. M., Barrero, M. J. A., Costa, G. F., Rieradevall, J., Rife, M. T., & Sancho, F. H. (2015). Herramientas para la evaluación y optimización de la ecoeficiencia en el ciclo urbano del agua. In XXXIII Jornadas Técnicas de AEAS (p. 46). Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento.

Porcelli, A. M., & Martínez, A. N. (2018). Análisis legislativo del paradigma de la economía circular. *Revista Direito GV*, 14, 1067-1105.

Martinez, J. L. M., Ruiz, J. M., y Ramírez, E. L. (2017). Avances y restricciones en la gestión democrática del agua en México. *Plurimondi*, (15).

Sandoval, L., Marín-Muñiz, J. L., Zamora-Castro, S. A., Sandoval-Salas, F., y Alvarado-Lassman, A. (2019). Evaluation of Wastewater Treatment by Microcosms of Vertical Subsurface Wetlands in Partially Saturated Conditions Planted with Ornamental Plants and Filled with Mineral and Plastic Substrates. *International journal of environmental research and public health*, 16(2), 167.

Sandoval-Herazo, M., Nani, G., Sandoval, L., Rivera, S., Fernández-Lambert, G., & Alvarado-Lassman, A. (2020). Evaluación del desempeño de humedales construidos verticales parcialmente saturados para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(2), 38.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), Comisión nacional del agua (CONAGUA), 2018 Estadísticas del agua en México. Edición 2018.

Simon, A. (2018). La economía circular del agua: dirección obligatoria. *Tecnoaqua*, (30), 108-113.

Tejeda, A., López, Z., Rojas, D., Reyna, M. Z., Barrera, A., & Zurita, F. (2015). Eficiencia de tres sistemas de humedales híbridos para la remoción de carbamazepina. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(6), 19-31.

Vymazal, J., y Březinová, T. (2016). Accumulation of heavy metals in aboveground biomass of *Phragmites australis* in horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Chemical Engineering Journal*, 290, 232-242.

Zurita-Martínez, F., Castellanos-Hernández, O. A., & Rodríguez-Sahagún, A. (2011). El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(spe1), 139-150.

Pacheco, G. J. A. Análisis del recurso hídrico en México por medio de la huella hídrica.

Comisión Nacional del Agua (2018). Aguas residuales y contaminación en México. <https://agua.org.mx/actualidad/aguas-residuales-contaminacion-en-mexico/>

Meza, N. N., Gómez, A. E. Y. C., & Estevez, M. J. (2020). CÁLCULO DE LA HUELLA HÍDRICA EN UNA LAVANDERÍA INDUSTRIAL COMO ESTRATEGIA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL EMPRESARIAL ORIENTADA AL CUMPLIMIENTO DE LOS ODS. COMITÉ ORGANIZADOR.

Hernández-Salazar, A. B., Moreno-Seceña, J. C., & Sandoval-Herazo, L. C. (2018). Tratamiento de aguas residuales industriales en México: Una aproximación a su situación actual y retos por atender. *RINDERESU*, 2(1-2), 75-87.

Capítulo III: Evaluación del desempeño de humedales artificiales a nivel mesocosmos para el tratamiento de aguas residuales porcinas sembradas con *Canna Hybrids* e *Iris germánica*.

Resumen

El funcionamiento de los humedales construidos verticales parcialmente saturados (HC-VPS) son novedosos sistemas que mejoran la eliminación de Nitrógeno presente en aguas residuales y se han usado principalmente en Europa. Sin embargo, no se conocen reportes de su uso en el tratamiento de aguas residuales con alto contenido de Nitrógeno y materia orgánica como lo son las aguas residuales porcinas. Este estudio reporta el desempeño de HC-VPS a nivel mesocosmos para el tratamiento de aguas residuales porcinas sembrados por triplicado con *Canna Hybrids* e *Iris germánica*. Seis unidades experimentales HC-VPS, rellenas con tezontle rojo y con el nivel de control de la salida del agua a 0.5 m de altura de la base hacia arriba, fueron alimentados con agua residual porcina diluida 1:1 y alimentados de forma intermitente con 4 litros de agua cada 4 horas. Se midió la eliminación de DQO, SST, N-NH₄, NTK y CF totales en la entrada y salida de los sistemas. Se encontró que los HC-VPS mejoran la eliminación de contaminantes en los DQO (5%), SST (20%), N-NH₄ (25%), NTK (32%) y CF totales (20%) en relación a sistemas de humedales construidos verticales tradicionales. No se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$) para eliminación de ningún tipo de parámetros incluyendo DQO entre las dos especies empleadas como vegetación. Las dos especies empleadas lograron desarrollarse y adaptarse las nuevas condiciones de calidad de agua a que fueron expuestas. El agua derivada de estos sistemas puede ser empleada en procesos agroindustriales o incorporarse al ciclo productivo una vez se trata en HC-VPS.

Palabras clave: Humedales construidos verticales parcialmente saturados; aguas residuales porcinas; plantas ornamentales; microempresas porcinas.

2.1 Introducción

El bienestar poblacional y una buena calidad de vida, entre otros factores

socioeconómicos, ambientales, desarrollo tecnológico y el progreso científico, son fundamentales para lograr el desarrollo sustentable (Zaid et al., 2019). Sin embargo, el uso masivo de los recursos naturales como el agua para satisfacer diversas necesidades agroalimentarias, sumado a la falta regulada de sistemas de tratamiento de las aguas, tiene como consecuencia la contaminación y el deterioro medio- ambiental, principalmente en comunidades donde la población crece sin control(Alcama, 2019; Mikulčić et al., 2019).

La contaminación del agua es uno de los problemas más graves a nivel mundial ya que afecta directamente a los ecosistemas, tanto acuáticos como terrestres, incluyendo la salud pública (Tessema y Simane, 2019). Este problema ambiental ha sido reportado en gran medida por el crecimiento de las pequeñas comunidades y al aumento del número de pequeños empresarios, así como por la falta de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales que forman parte de una familia alternativa de métodos de tratamiento sustentables (Chowdhary et al., 2020; Qureshi y Qureshi, 2020).

Para el tratamiento de distintos tipos de aguas residuales, existen tecnologías sofisticadas y eficientes, sin embargo, este tipo de tecnologías tienen alto consumo de energía, requieren mano de obra calificada y el costo de construcción y mantenimiento es alto, convirtiéndose en una de las principales limitantes al momento de implementar estos sistemas (Zamora et al., 2019). La ausencia de ecotecnologías con bajo consumo energético y de adopción económica accesible al pequeño empresario para el tratamiento de aguas residuales, ha generado un fuerte impacto negativo de contaminación ambiental en diferentes sitios del país, tanto a gran y pequeña escala, como en regiones y subregiones tropicales y subtropicales de México (Puente et al., 2017).

En México, el tratamiento de aguas residuales industriales es una limitante a la que se enfrentan las pequeñas y microempresas (Hernández-Salazar et al., 2018).

El acceso a recursos del gobierno encaminados a tratar las aguas residuales que se generan y que puedan ser reutilizadas, es escaso. Así también, existen pocas investigaciones en países emergentes encaminadas al desarrollo tecnológico para el tratamiento de aguas residuales industriales con bajo costo de construcción, operación, y que puedan ser instaladas en las micro y pequeñas empresas (Marín, 2016; Zamora et al., 2019).

En el contexto agroindustrial, por su bajo costo de instalación y fácil manejo, la existencia de sistemas de tratamiento ecológicos, representan una tendencia como plantas de

tratamiento de efluentes. Entre estos sistemas de tratamiento se encuentran las lagunas de oxidación y los humedales construidos, los cuales tienen ventajas, como bajo o nulo consumo de electricidad, bajo costo de operación de la planta de tratamiento, fácil manejo de la planta de tratamiento y alta remoción de contaminantes y patógenos; lo cual demuestra la pertinencia del uso de estas tecnologías para el sector de la micro y pequeña empresa (Hu et al., 2019; Velvizhi, 2019).

En la actualidad, la literatura científica reporta un número creciente de estudios centrados en el diseño, desarrollo y desempeño de diferentes tipos de Humedales Construidos desde una preceptiva de flujo vertical insaturados y de flujo horizontal saturados (Avellán y Gremillion, 2019; Liu et al., 2019; Arden y Ma, 2018). Sin embargo, poca literatura describe el funcionamiento de humedales de flujo vertical en condiciones parcialmente saturadas para aumentar el proceso de remoción de contaminantes, y mucho menos se describen las comunidades microbianas y los parámetros críticos que influyen en la capacidad de degradación en Humedales Construidos (Han et al., 2019; Manon et al., 2019).

El uso de Humedales Construidos de Flujo Vertical (VFCW) ha estado creciendo rápidamente durante la última década para el tratamiento de las aguas residuales domésticas en las ciudades pequeñas (Abou-Elela et al., 2019). Estos VFCW están compuestos de dos zonas: una de flujo libre o insaturada (parte superior del sistema), y una zona de saturación constante (parte inferior) en la cual el control de salida de agua se encuentra a una altura superior al fondo, generando una zona de constante saturación, lo que permite una mejor eliminación de Nitrógeno Total a través de la secuencia nitrificación /desnitrificación. Adicionalmente la profundidad de la zona saturada puede ser ajustada para establecer los mejores parámetros de operación del sistema de tratamiento. Este sistema de tratamiento ha demostrado su eficiencia en la remoción de materia orgánica y el Nitrógeno de aguas crudas residuales municipales después del tratamiento primario (Nakase et al., 2019). Sin embargo, todavía quedan algunos campos de mejora, no sólo para la eliminación de Nitrógeno Total por nitrificación/ desnitrificación, sino también para retención de otros contaminantes. Por lo tanto, la concentración en los efluentes tratados debe satisfacer niveles normativos cada vez más bajos.

De acuerdo con Comisión Nacional del Agua (2018), en México existen aproximadamente 2,526 plantas de tratamiento municipales que sólo tratan 215.2 m³ /s de

aguas residuales. Mientras que para el sector industrial existen 3,025 plantas, las cuales en su mayoría operan en grandes industrias y en medianas de manera autoabastecida. Por otra parte, sólo 0.8% de estas microempresas tienen un sistema para tratar sus efluentes, dato del que se infiere que la realidad es aún más crítica, por la cantidad de microempresas no registradas que están trabajando sin plantas tratadoras de sus aguas residuales, con parámetros ambientales superiores a la normatividad nacional. Esta realidad crítica no sólo es común para México, sino también en los países en donde la economía se gesta en comercio de productos locales, como las microempresas porcinas en México (Núñez, 2018 Hernández-Salazar et al., 2018). En este sector agroindustrial, México tiene un inventario promedio superior a los 16 millones de cabezas porcinas. En 2018 México exportó más de 131,264 mil toneladas de carnes de cerdo con un valor de 525.4 millones de dólares, mientras que para el primer semestre de 2019 se reporta un incremento de 23.61% respecto al primer semestre 2018 (Organización de Porcicultores del País [OPORPA], 2019). En este contexto microempresarial, en México el crecimiento de este sector ha sido de 85% del total, donde 13.5% pertenece a la industria porcina, lo que demuestra la importancia que tienen este sector a nivel nacional (INEGI, 2017).

Es importante mencionar que este tipo de empresas agroindustriales no tienen un sistema de tratamiento de aguas residuales adecuado para disminuir el impacto ambiental que genera en su proceso de cría, engorda y sacrificio del cerdo. La razón de esto es el elevado costo de instalación y operación que tienen las plantas de tratamiento convencionales, las cuales son imposibles de solventar económicamente por una micro o pequeña empresa. Cabe mencionar que la mayor parte de las microempresas no cuentan con registros oficiales que puedan comprobar el desagüe diario que producen, por esta misma razón estas microempresas se desobligan legalmente a tratar toda el agua residual que generan durante sus procesos.

La principal ventaja de adoptar un sistema de Humedales Construidos Verticales Parcialmente Saturados (HC-VPS) como un sistema alternativo para el tratamiento de aguas residuales porcinas, es su eficiencia de remoción de contaminantes en otros tipos de efluentes industriales (SEMARNAT, 2016). El objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño de Humedales Construidos Verticales Parcialmente Saturados a nivel mesocosmo para el tratamiento de aguas residuales porcinas sembrados con *Canna Hybrids*., e *Iris* germánica.

3. 2 Material y métodos

Descripción del sistema Este estudio se desarrolló en las instalaciones del Tecnológico Nacional de México-Campus Misantla, en Misantla, Veracruz, México. Seis sistemas de humedales construidos de flujo vertical parcialmente saturados (HC-VPS) fueron construidos en mampostería (Largo: 0.5 m, ancho: 0.5 m, alto: 1.0 m), establecidos a la intemperie cubiertos por una polisombra de 50% sombra. El control de nivel se ubicó a 0.5 m, por debajo de la superficie del sustrato generando una zona de saturación constante (anóxica/anaerobia). Los 0.5 m restantes fueron de zona de drenaje libre (Figura 4). Todos los mesocosmos se rellenaron uniformemente con tezontle rojo, que es una grava de bajo peso molecular con mayor superficie de contacto que una roca basáltica, aunque tiene los mismos componentes químicos y diámetro de 1 a 3.5 mm, con una porosidad de 0.53 (Nakase et al., 2019). Este es un material inerte que no tiene sustancias tóxicas, es estable físicamente y su pH es cercano al neutro (Trejo-Téllez et al., 2013) y se encuentra con facilidad en la región de Misantla. Los mesocosmos fueron alimentados cada dos horas de forma intermitente con 4 litros de agua residual porcina diluida al 50%, proveniente de un tanque de almacenamiento de 1100 litros que se adaptó como sedimentador. Las plantas utilizadas son *Canna hybrids* e *Iris germánica*, ambas son de clima tropical y son también ornamentales. Estas plantas ornamentales, con una altura entre 25 a 30 cm, fueron recolectadas a 5 km de la ciudad de Misantla, Veracruz (19°29`N y 96° 48`O), y se transportaron a los mesocosmos con un bulbo de tierra en la raíz de su procedencia inicial. Tres mesocosmos HC-VPS fueron plantados con un individuo de *Canna hybrids* y tres con un individuo de *Iris germánica*. El sistema de humedales se alimentó por dos semanas con agua limpia, y durante las tres semanas posteriores se dosificó la concentración de aguas residuales porcinas diluidas al 50%. Las aguas porcinas se recogieron de una micro granja porcina ubicada a 2 km de las instalaciones del Tecnológico de Misantla, del 1 septiembre de 2018 a 30 de marzo de 2019 - duración de estudio.

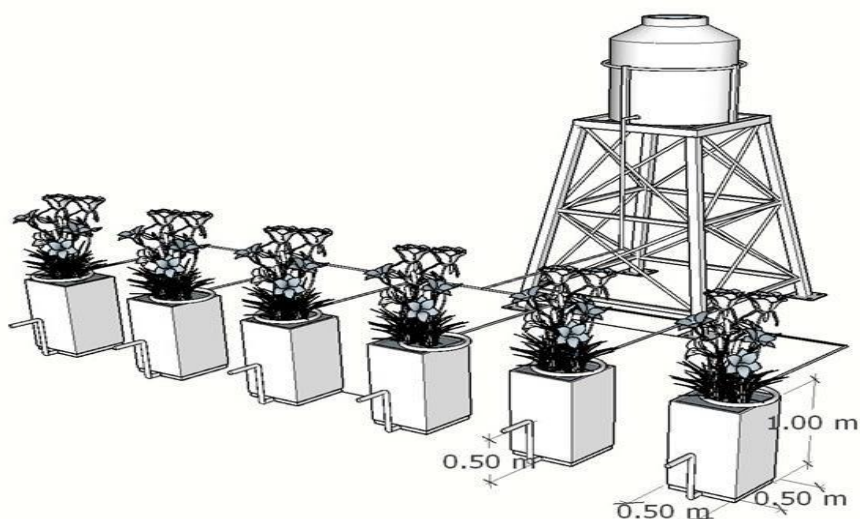


Figura 4. Configuración de sistemas de humedales construidos de flujo vertical parcialmente saturados.

Fuente: Elaboración propia

3.2.1 Monitoreo del sistema

Después de estabilizar el sistema de HC-VPS durante un periodo de 7 meses, se monitorearon en el laboratorio de aguas, suelo y planta del Tecnológico de Úrsulo Galván, los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua (Tabla 3), tanto en la entrada como en las salidas de los mesocosmos cada 15 días, del 15 de septiembre 2018 al 30 de marzo de 2019, cada 15 días, en el laboratorio de aguas, suelo y planta del Tecnológico de Úrsulo Galván.

Tabla 3. Métodos físicos y químicos utilizados en la medición de parámetros de calidad del agua en los mesocosmos HC-VPS.

Parámetro	Método de medición	Referencia
Oxígeno Disuelto (OD)	Electrodo (ilwaukeeMW600 LED)	---
Temperatura del agua (°C)	Termómetro (SPIREMIDELO: HG060)	---
pH	Electrodo (Ph 0-14 PortatilLcd)	---
Demanda química de oxígeno	Digestión por ácidosclorhídrico	APHA

(DQO)		(2005)
Sólidos suspendido Totales (SST)	Método Gravimétrico	APHA (2005)
Nitrógeno total Kjeldhal (TNK)	Kjeldhal (Mye de occidente:Mkj-8)	APHA (2005)
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺ -N)	Kjeldhal (Mye de occidente:Mkj-8)	APHA (2005)
Coliformes totales (CT)	Número más probable(NMP)	APHA (2005)

3.2.2 Análisis de datos

Los resultados obtenidos de la eliminación de contaminantes se analizaron con prueba de varianza de Dunnett. Se estableció como hipótesis nula la igualdad de las medias entre controles y sistemas de vegetación, con confianza del 95% como requisito estadístico de dicha prueba. Se desarrolló la prueba de independencia de los datos, haciendo referencia a X², prueba de varianza de Bartlett en Software Estadístico R versión 3.6 y RStudio 1.1.4.

3.3 Resultados y discusiones

3.3.1 Temperatura del agua, pH y Oxígeno disuelto

La temperatura en humedales de tratamiento afecta tanto a los microorganismos como la tasa de oxígeno disuelto (OD), siendo las temperaturas óptimas para el desarrollo de reacciones bioquímicas en humedales construidos de 16 a 35°C (Akratos, C. S., and Tsihrintzis, 2007; Sandoval-Herazo et al., 2018). Sin embargo, la temperatura del agua no alcanza la temperatura ambiente y es muy inferior hasta en 5 °C (Kadlec and Reddy, 2001). La Tabla 2 muestra que durante el periodo de estudio la temperatura del agua en los sistemas se encontró en los límites permisibles para un favorable desarrollo de relaciones bioquímicas, así como la dimensión en los rangos establecidos en la literatura entre el agua, encontrando diferencias significativas (p=0.001) entre entrada y salida (el agua a la salida >4 °C promedio que la entrada HC-VPS), lo que pudo favorecer resultados de la remoción de contaminantes en este estudio.

En cuanto al pH que indica la medida de acidez o alcalinidad en una solución acuosa (García et al., 2019), se registró una disminución significativa (p=0.0014), lo que pudo

deberse a la reducción de alcalinidad por los procesos de eliminación de Nitrógeno (Casierra-Martínez et al., 2017) los cuales están presentes en los mesocosmos de HC-VPS en humedales construidos para el desarrollo adecuado de la nitrificación entre 6.5 a 8.5 (Mang et al., 2014). Al respecto, los valores obtenidos en este estudio se encuentran entre estos rangos. Por otra parte, estos resultados también son similares a los reportados por Del Toro et al., (2019) que emplearon sistemas de humedales verticales parcialmente saturados con una fuente artificial de carbono en condiciones climatológicas similares, con aguas residuales domésticas.

Tabla 4. *Parámetros de control en sistema en la entrada salida de los HC-VPS*

Parámetro	Entrada	<i>Canna hybrids</i>	<i>Iris germánica</i>
Temperatura del agua (°C)	22.8±3.1	19.4±1.3	18.1±2.1
OD (mgL ⁻¹)	1.6±0.41	9.8±0.4	6.2±0.5
Ph	7.7±0.3	7.4±0.1	7.1±0.2

Promedio ± error estándar (n= 56); OD: oxígeno disuelto

El Oxígeno Disuelto (OD) en este estudio se incrementó significativamente ($p < 0.05$), tanto en los sistemas con presencia de *Canna hybrids* como en los que se plantaron con *Iris germánica*, siendo mayor el incremento en la primera especie ornamental (Tabla 4). Esto pudo deberse a tres factores: 1. A la presencia de la vegetación y a la liberación de Oxígeno en la zona radical (Zurita et al., 2015), dado que la especie de *Iris germánica* no logró sobrevivir en los sistemas al incremento del Oxígeno; 2. Las condiciones de flujo libre parcialmente saturadas que presentaron los sistemas de GC-VPS (Nakase et al., 2019); 3. A la exposición con la atmósfera que tuvo el agua cuando se midió en la salida, dado que no fue medida en el interior de los sistemas, puede ser uno de los factores por el cual se incrementó el Oxígeno en las aguas de salida de los sistemas, así como en otros estudios reportados en condiciones similares (Zurita et al., 2015). En general los estudios reportados con humedales con saturación total muestran menores porcentajes de OD en el agua, lo que demuestra que los HC-VPS pueden mejorar significativamente el OD presente en el sistema, y de esta forma favorecer el proceso de nitrificación.

3.3.2 Eliminación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en HC-VPS.

La DQO permite medir cuánto oxígeno se agota de un cuerpo que recibe agua como resultados de la acción bacteriana. Este parámetro se ocupa para cuantificar la cantidad de materia orgánica presente en el agua, y se usa para determinar el efecto que podrá tener un efluente en el cuerpo receptor (Mo et al., 2019; Robinson, 2016).

En este estudio la concentración de DQO ($p < 0.05$) entre el tipo de vegetación empleada (Figura 5). Estos resultados tienen sustento en la capacidad de mejorar la disminución de materia orgánica de la vegetación presente en los humedales construidos, debido a la liberación de exudados y enzimas que estimulan el desarrollo de microorganismo y actividad bioquímica en la zona de la rizófora (Sandoval-Herazo et al., 2018), así como el incremento del OD en los sustratos (Tabla 4).

Por otra parte, los sistemas de HCVPS, dado sus condiciones de presencia de una zona de drenaje libre y saturada, propician mejores escenarios para el desarrollo de diferentes microorganismos que favorecen la eliminación de materia orgánica presente en las aguas residuales porcinas. Esta consideración facilita que se cumpla con la normatividad de descarga de agua residuales tratadas a cuerpos de aguas superficiales, y para reúso en la agricultura (Lorenzo et al., 2009).

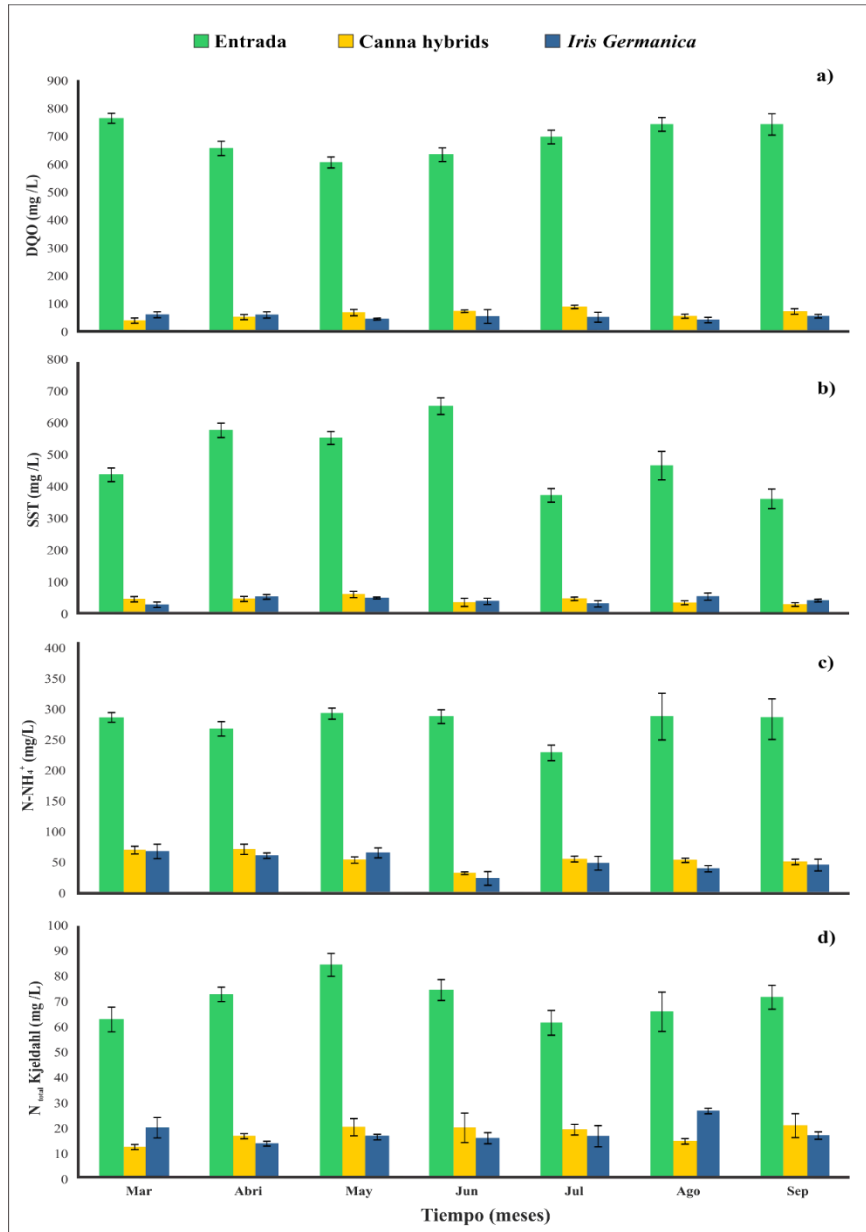


Figura 5. Concentraciones de contaminantes en a entradas y salidas de los sistemas HC-VPS

3.3.3 Eliminación de Sólidos Suspendedos Totales (SST) en HC-VPS

Los SST son el peso seco de las partículas en suspensión mayores a 2 micras que se encuentran en una muestra de agua (Becke et al., 2019). La reducción significativa ($p < 0.05$), de los SST, después de pasar por los CH-VPS (Figura 5), se pudo deber a la forma como se alimentaron los sistemas intermitentemente. Esta condición pudo favorecer que se sedimentaran y biodegradaran sólidos durante el tratamiento, así como el uso de tezontle rojo

como sustrato que es un material rojo que permite se sedimente y filtren fácilmente sólidos en su superficie porosa (Rodríguez et al., 2013). Por otra parte, las disoluciones de concentración de la entrada a los HC-VPS, en los meses julio, agosto y septiembre pudo deberse a las lluvias registradas durante estos meses en la zona de estudio, dado que son la temporada de lluvias en la región (Sandoval et al., 2019).

3.3.4 Eliminación de Nitrógeno en Forma de Amonio (N-NH₄⁺) en HC-VPS

El N-NH₄⁺ se produce por descomposición por hidrólisis enzimática de la urea presente en aguas residuales. Las aguas superficiales no deben de tener presencia de amoníaco y su presencia en amoníaco libre o ión-amonio se considera como una prueba química de contaminación reciente y peligrosa (Fernández et al., 2008; Ghimire et al., 2019). Las concentraciones de amonio en el agua residual porcina fueron altas (Figura 5) a pesar de que fueron diluidas 1:1, como era de esperarse dado el tipo de aguas empleado. El NH₄⁺-N se redujo significativamente ($p < 0.05$), y se encontraron mejores resultados que los reportados por estudios donde indican que eliminación de amonio en humedales construidos de flujo vertical de tradicionales (Ayaz et al., 2012; Saeed y Sun, 2012) y superiores a los reportados con otros tipos de humedales construidos con flujo de marea (Han et al., 2019). Estos resultados pudieron deberse a las condiciones de operación del HC-VPS, en donde, las condiciones parcialmente saturadas han demostrado, a comparación a otros tipos de sistemas de humedales construidos, un mejor rendimiento en la disminución de concentraciones de amonio en aguas residuales, (Nakase et al., 2019). Sin embargo, las concentraciones de este compuesto en otros estudios fueron mejores, lo que pudo deberse a la forma de alimentación de los sistemas intermitentes, que al parecer mejoró la eliminación de contaminantes en el sistema. Así también, la presencia de vegetación que mostro un desarrollo saludable y sin mayores dificultades de adaptación en las dos especies empleadas en este estudio, pudo deberse a que el amonio contribuye al desarrollo de la vegetación (Schwammberger et al., 2019; Schwammberger et al., 2020), lo que también pudo contribuir a estar reducciones considerables en los HC-VPS.

3.3.5 Eliminación de Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) en HC-VPS

El NTK es un indicador utilizado para encontrar la cantidad total de nitrógeno en el

agua analizada con química cuantitativa, el cual suma el nitrógeno orgánico en sus diferentes formas y el ion amonio (Sàez-Plaza et al., 2019). Los resultados de las concentraciones de NTK encontradas en este estudio se muestran en Figura 5, mostrando diferencias significativas ($p < 0.05$) en la eliminación de los sistemas plantados con *Canna hybrids* y *Iris germánica*, durante los meses de marzo, junio, agosto y septiembre (Figura 5), siendo más notable el efecto de *Iris germánica*, lo que pudo deberse al mayor crecimiento que presentó esta especie de planta durante estos meses del estudio. Mientras que en los meses de abril, mayo y julio no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$). Este estudio muestra resultados de eliminación de nitrógeno superiores a los reportados por Li et al. (2019) y La Mora- Orozco et al. (2018) que emplearon humedales construidos con las aguas residuales porcinas, en condiciones de operación tradicionales de estos sistemas. Estos resultados de mayor eliminación de NTK pudo deberse a los mecanismos de eliminación de nitrógeno en humedales construidos, como la desnitrificación que se puede dar en las zonas saturadas del HC-VPS y asimilación de la vegetación para su desarrollo y también en la zona de flujo libre del HC-VPS y presencia de raíces en esta zona, propicio la amonificación y nitrificación (Nakase et al., 2019). Por otra parte, las condiciones de pH y temperatura que se presentaron en el sistema (Tabla 4), son adecuadas para el desarrollo de reacciones bioquímicas en los sistemas (Pérez-Pérez et al., 2019).

3.3.6 Eliminación de Coliformes Totales (NMP 100mL) en HC -VPS

Los coliformes se reproducen fácilmente en aguas residuales porcinas dada las condiciones de alta presencia de nutrientes y materia orgánica (La Mora-Orozco et al., 2018). En este sentido las concentraciones de Coliformes Totales son significativamente menores ($p < 0.05$) después de pasar por los sistemas HC-VPS (Figura 5), mientras que entre los dos tipos de vegetación no se prestaron diferencias significativas ($p < 0.05$) después del tratamiento en HC-VPS. Esta eliminación se pudo deber a las condiciones de los HC-VPS, que favorece la mayor presencia de oxígeno en los sistemas, pero a la vez proporciona condiciones anaerobias en una zona del sistema (Figura 6), así como la forma como estos fueron alimentados intermitentemente. En general los resultados obtenidos en este estudio son superiores a los reportados por otros estudios de humedales construidos que operan de forma tradicional de acuerdo con dos revisiones recientes de literatura exhaustiva realizadas

sobre el tema por Wu et al., 2016 y Shingare et al., 2019. Estos resultados se pudieron confluir dado la integración de diversos factores como: las condiciones climáticas tropicales de operación de los sistemas, la mayor presencia de oxígeno en los HC-VPS (Tabla 4), la presencia de vegetación en los sistemas, y el mecanismo dealimentación intermitente que pudo permitir la inactivación de los coliformes.

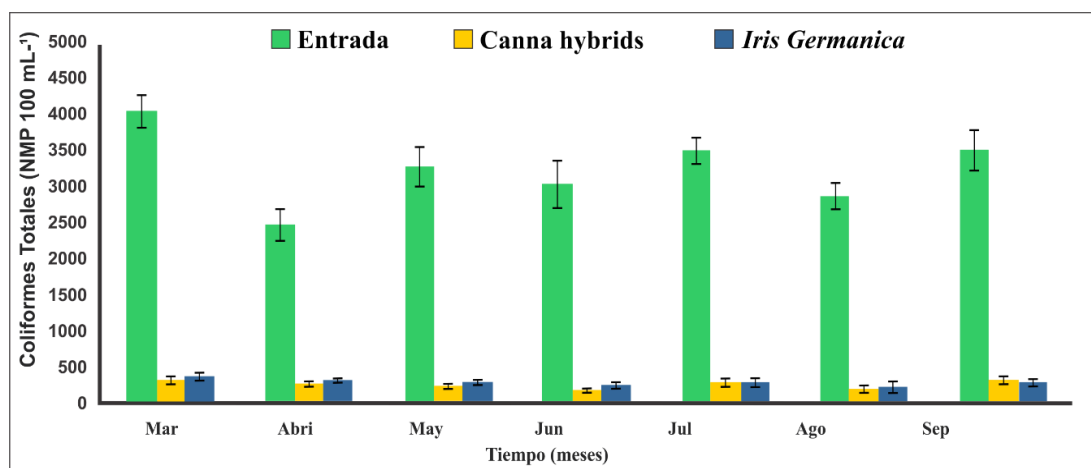


Figura 6 Contracción de coliformes totales en la entrada y salida de los HC-

VPS

3.3.7 Remociones de contaminame en HC-VPS

La remociones promedio de DQO (90 y 91%), N-NH₄ (77 y 79%), SST (), NTK (74 y 76%) y CT (94 y 93%) [LC1] en HC-VPS sembrados con Canna Hybrids y Iris germánica, respectivamente, en general son rangos superiores a los reportados por otros estudios según lo reportado por Shingare et al. (2019), donde se encontraron que en sistemas más eficientes de aguas residuales mediante humedales construidos de verticales, los porcentajes de eliminación reportados en el caso de Coliformes están en rangos de 65 a 82%. (figura 7) En el caso de otros parámetros convencionales se retomó el estudio realizado por Sandoval et al. (2019b), en el cual analizó 86 estudios de humedales construidos que usaron plantas ornamentales como las usadas en este estudio y de flujo vertical (45 documentos), encontrando eliminaciones en promedio inferiores a las encontradas en este estudio que emplearon concentraciones más altas de contaminantes; la remoción fue superior para los parámetros encontrados en HC-VPS DQO (5%), N-NH₄ (25%), SST (20%), NTK (32%).

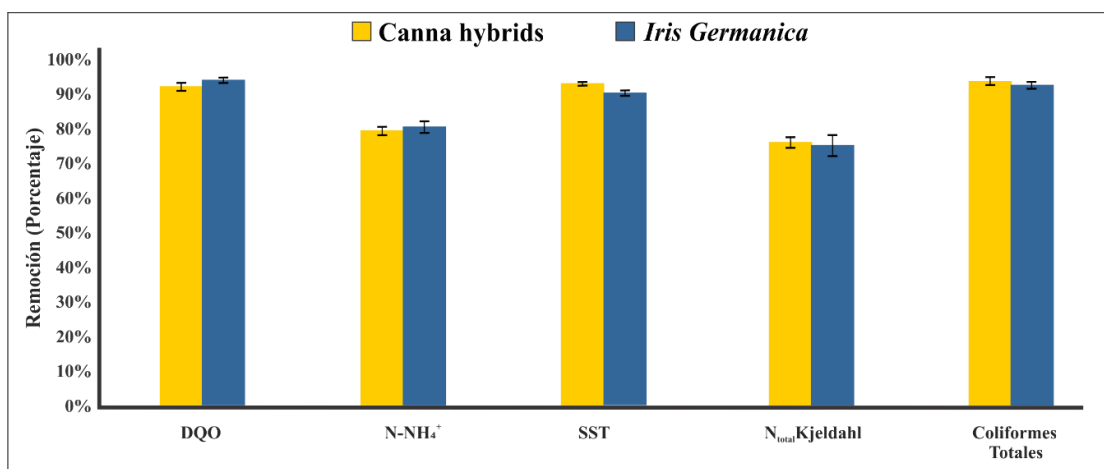


Figura 7. Remoción de contaminantes en HC-VPS

3.4 Conclusiones

El uso de humedales construidos verticales parcialmente saturados para tratar aguas residuales de la agroindustria porcina es un novedoso sistema de tratamiento económico ecológico a considerar en futuros diseños de humedales construidos. En este estudio demostraron ser más eficientes que los humedales construidos verticales tradicionalmente usados en estos sistemas de tratamiento para micro empresas porcinas. En este estudio se encontró que las condiciones de saturación parcial de los HC-VPS, son mayormente eficiente que los sistemas convencionales de tratamiento usados en humedales construidos y que la presencia de Canna Hybrids y Iris germánica, al parecer favorecen la eliminación de contaminantes y pueden ser empleadas como vegetación en el tratamiento de aguas residuales porcinas. Por otra parte, estudios con mayor periodo de duración son requeridos para análisis los posibles problemas que puedan presentar estos sistemas en cuanto a saturación, renovación de vegetación, y diferentes condiciones de operación, así como su evaluación en sistemas híbridos que permitan conocer si el proceso es igual de eficiente sin necesidad de diluir el agua. Así también, estos resultados dan la oportunidad de realizar estudios desde un enfoque de economía circular.

3.5 Referencias bibliográficas

Abou-Elela, S. I., Abo-El-Enein, S. A., & Hellal, M. S. (2019). Utilization of autoclaved aerated concrete solid waste as a bio-carrier in immobilized bioreactor for

municipal wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*, 168, 108-116.

Alvarado Álvarez, H. J., Gómez Villalva, J. C., Rodríguez Alava, J., López Aguayo, N., Filian Hurtado, W., & Vera Suárez, M. (2018). Evaluación de tres niveles de tallo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en dietas para cerdos. *Revista de Producción Animal*, 30(1), 8-12.

Arden, S., & Ma, X. (2018). Constructed wetlands for greywater recycle and reuse: a review. *Science of the Total Environment*, 630, 587-599.

Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. 2007. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological engineering*, 29(2), 173-191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.06.013>

Alcamo, J. 2019. Water quality and its interlinkages with the Sustainable Development Goals. Current opinion in environmental sustainability, 36, 126-140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.11.005>

American Public Health Association. APHA. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st ed. American Public Health Association, Washington DC, 1220p.

Ayaz, S. C., Aktaş, Ö., Findık, N., Akça, L., & Kınacı, C. 2012. Effect of recirculation on nitrogen removal in a hybrid constructed wetland system. *Ecological Engineering*, 40, 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.12.028>

Becke, C., Schumann, M., Steinhagen, D., Rojas-Tirado, P., Geist, J., & Brinker, A. 2019. Effects of unionized ammonia and suspended solids on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture*, 499, 348-357. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.09.048>

Casierra-Martínez, H. A., Charris-Olmos, J. C., Caselles-Osorio, A., & Parody-Muñoz

A. E. 2017. Organic matter and nutrients removal in tropical constructed wetlands using *Cyperus ligularis* (Cyperaceae) and *Echinochloa colona* (Poaceae). *Water, Air, & Soil Pollution*, 228(9), 338. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3531-1>

Chowdhary, P., Bharagava, R. N., Mishra, S., & Khan, N. 2020. Role of Industries in Water Scarcity and Its Adverse Effects on Environment and Human Health. In

Environmental Concerns and Sustainable Development (pp. 235-256). Springer, Singapore.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-5889-0_12

Comisión Nacional del Agua (2014). Numeragua México 2018. Encontrar en:
http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/Numeragua_2018.pdf

Del Toro, A., Tejeda, A., & Zurita, F. 2019. Addition of Corn Cob in the Free Drainage Zone of Partially Saturated Vertical Wetlands Planted with *I. sibirica* for Total Nitrogen Removal—A Pilot-Scale Study. *Water*, 11(10), 2151. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11102151>

Fernández, E. S., Garrido, J. M., Coda, F. E., Pujol, R. O., & Coma, S. C. 2008. Eliminación del nitrógeno amoniacal en aguas residuales sanitarias. *Técnica industrial*, 273, 44-49. DOI:<http://www.tecnicaindustrial.es/tiadmin/numeros/33/40/a40.pdf>

García, S. L., Arguello, A., Parra, R., & Pilay, M. P. 2019. Factores que influyen en el pH del agua mediante la aplicación de modelos de regresión lineal. *INNOVA Research Journal*, 4(2), 59-71. DOI:<https://doi.org/10.33890/innova.v4.n2.2019.909>

Ghimire, U., Jang, M., Jung, S. P., Park, D., Park, S. J., Yu, H., & Oh, S. E. 2019. Electrochemical Removal of Ammonium Nitrogen and COD of Domestic Wastewater using Platinum Coated Titanium as an Anode Electrode. *Energies*, 12(5), 883. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12050883>

Han, Z., Miao, Y., Dong, J., Shen, Z., Zhou, Y., Liu, S., & Yang, C. 2019. Enhanced nitrogen removal and microbial analysis in partially saturated constructed wetland for treating anaerobically digested swine wastewater. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 13(4), 52. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11783-019-1133-4>

Hu, S., Chen, Z., Lv, Z., Chen, K., Huang, L., Zuo, X., ... & Chen, Y. (2019). Depuración de lixiviados de lechos de tratamiento de lodos por humedales construidos de flujo subterráneo: efectos de las plantas y tiempo de retención hidráulica. *Investigación de la ciencia ambiental y la contaminación*, 26 (6), 5769-5781.

Hernández-Salazar, A. B., Moreno-Seceña, J. C., & Sandoval-Herazo, L. C. 2018. Tratamiento de aguas residuales industriales en México: Una aproximación a su situación actual y retos por atender. *RINDERESU*, 2(1-2), 75-87. Encontrar en: <http://www.rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/27>

Instituto Nacional de Geografía y Estadística (2017). Banco de información

económica Cuentas nacionales producto interno bruto por entidad federativa.

Kadlec, R. H., & Reddy, K. R. 2001. Temperature effects in treatment wetlands. *Waterenvironment research*, 73(5), 543-557. DOI: <https://doi.org/10.2175/106143001X139614>

La Mora-Orozco, D., González-Acuña, I., Saucedo-Terán, R., Flores-López, H., Rubio-Arias, H., & Ochoa-Rivero, J. 2018. Removing Organic Matter and Nutrients from Pig Farm Wastewater with a Constructed Wetland System. *International journal of environmental research and public health*, 15(5), 1031. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph15051031>

Li, X., Li, Y., Li, Y., & Wu, J. 2019. Enhanced nitrogen removal and quantitative analysis of removal mechanism in multistage surface flow constructed wetlands for the large-scale treatment of swine wastewater. *Journal of environmental management*, 246, 575-582. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.019>

Lorenzo, E. V., Ocaña, J. G. L., Fernández, L. A., & Venta, M. B. 2009. Reúso de aguas residuales domésticas para riego agrícola. Valoración crítica. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 40(1), 35-44. Encontrar en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181221574007>

Luz, M. I. R., Zárate, A. G., Núñez, S. G. C., & De Bazúa, C. D. 2011. Remoción de fósforo en un sistema de humedales artificiales a escala de laboratorio. *Química Central*, 2(1), 25-32. Encontrar en: <https://www.lenntech.es/eliminacion-del-fosforo>

Marín-Muniz, J. L. (2016). REMOCION DE CONTAMINANTES DE AGUAS RESIDUALES POR MEDIO DE HUMEDALES ARTIFICIALESESTABLECIDOS EN EL MUNICIPIO DE ACTOPAN, VERACRUZ, MEXICO REMOVAL OF WASTEWATER POLLUTANT IN ARTIFICIAL WETLANDS IMPLEMENTED IN ACTOPAN, VERACRUZ, MEXICO.

Revista Mexicana de Ingeniería Química, 15(2), 553-563. Encontrar en: <http://rmiq.org/iqfvp/Pdfs/Vol.%2015,%20No.%202/IA1/RMIQTemplate.pdf>

Meng, P., Pei, H., Hu, W., Shao, Y., & Li, Z. 2014. How to increase microbial degradation in constructed wetlands: influencing factors and improvement measures. *Bioresource technology*, 157,316-326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.095>

Mikulčić, H., Baleta, J., & Klemeš, J. J. (2019). Sustainability through combined

development of energy, water and environment systems. *Journal of Cleaner Production*, 119727. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119727>

Mo, H., Chen, Y., Tang, Y., Li, T., Zhuang, S., Wang, L., ... & Wan, P. (2019). Direct determination of chemical oxygen demand by anodic oxidative degradation of organics at a composite 3-D electrode. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 23(5), 1571-1579. DOI: [https://doi.org/10.1007/s10008-019-](https://doi.org/10.1007/s10008-019-04250-4)

[04250-4](https://doi.org/10.1007/s10008-019-04250-4)

Nakase, C., Zurita, F., Nani, G., Reyes, G., Fernández-Lambert, G., Cabrera-Hernández, A., & Sandoval, L. (2019). Nitrogen Removal from Domestic Wastewater and the Development of Tropical Ornamental Plants in Partially Saturated Mesocosm-Scale Constructed Wetlands. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(23), 4800. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16234800>

Núñez Rodríguez, G. (2018). Elementos para una estrategia de desarrollo económico de México. *Análisis económico*, 33(84), 9-31.

Organización de Porcicultores del País (2019). En 2018 México produjo 9.8 millones de toneladas de proteína animal. Encontrar en : <https://www.porcicultura.com/destacado/En-2018-Mexico-produjo-9.8-millones-de-toneladas-de-proteina-animal>

Puente, E. O. R., Murillo-Amador, B., Ortega-García, J., Preciado, P. R., Garibay, A. N., Peña, R. J. H., ... & Corral, F. J. W. 2017. Natural development of the halophyte *salicornia bigelovii* (tor.) In coastal area of Sonora state. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20(1). :<http://www.revista.ccba.uady.mx/urn:ISSN:1870-0462-tsaes.v20i1.1573>

Pérez-Pérez, T., Pereda-Reyes, I., Correia, G. T., Pozzi, E., Kwong, W. H., Oliva Merencio, D., & Zaiat, M. 2019. Adición de zeolita en reactor EGSB para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *INFOMIN*, 11. Encontrar en: <http://www.infomin.co.cu/index.php/i/article/view/120>

Qadri, R., & Faiq, M. A. (2020). Freshwater Pollution: Effects on Aquatic Life and Human Health. In *Fresh Water Pollution Dynamics and Remediation* (pp. 15- 26). Springer, Singapore. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-8277-2_2

Robinson, N. A. 2016. *Environmental Law Lexicon*. Law Journal Press. Encontrar

en: <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=BGjcw2OLwO4C&oi=fnd>

Rodríguez Díaz, E., Salcedo Pérez, E., Rodríguez Macias, R., González Eguiarte, D. R., & Mena Munguía, S. 2013. Reúso del tezontle: efecto en sus características físicas y en la producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Terra Latinoamericana*, 31(4), 275-284. Encontrar en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v31n4/2395-8030-tl-31-04-00275.pdf>

Sáez-Plaza, P., Asuero, A. G., & Martín, J. 2019. Una anotación sobre el método de Kjeldahl. In *Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia* (Vol. 85, No.1). Encontrar en: <http://www.analesranf.com/index.php/aranf/article/view/1907/1905>

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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.011>

Sandoval-Herazo, L., Alvarado-Lassman, A., Marín-Muñiz, J., Méndez-Contreras, J., & Zamora-Castro, S. A. 2018. Effects of the use of ornamental plants and different substrates in the removal of wastewater pollutants through microcosms of constructed wetlands. *Sustainability*, 10(5), 1594. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10051594>

Sandoval, L., Marín-Muñiz, J. L., Zamora-Castro, S. A., Sandoval-Salas, F., & Alvarado-Lassman, A. 2019a. Evaluation of Wastewater Treatment by Microcosms of Vertical Subsurface Wetlands in Partially Saturated Conditions Planted with Ornamental Plants and Filled with Mineral and Plastic Substrates. *International journal of environmental research and public health*, 16(2), 167. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16020167>

Sandoval, L., Zamora-Castro, S. A., Vidal-Álvarez, M., & Marín-Muñiz, J. L. 2019b. Role of Wetland Plants and Use of Ornamental Flowering Plants in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review. *Applied Sciences*, 9(4), 685. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9040685>

Schwammberger, P. F., Lucke, T., Walker, C., & Trueman, S. J. 2019. Nutrient uptake by constructed floating wetland plants during the construction phase of an urban residential development. *Science of The Total Environment*, 677, 390-403. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.341>

Schwammberger, P. F., Yule, C. M., & Tindale, N. W. 2020. Rapid plant responses following relocation of a constructed floating wetland from a construction site into an urban stormwater retention pond. *Science of The Total Environment*, 699, 134372.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134372>

Shingare, R. P., Thawale, P. R., Raghunathan, K., Mishra, A., & Kumar, S. 2019. Constructed wetland for wastewater reuse: Role and efficiency in removing enteric pathogens. *Journal of environmental management*, 246, 444-461. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.157>

Tessema, I., & Simane, B. 2019. AGROECOSYSTEM ANALYSIS OF FINCHA SUB BASIN, BLUE NILE RIVER BASIN, ETHIOPIA. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 22(2). Encontrar

en:<http://www.revista.ccba.uady.mx/urn:ISSN:1870-0462-tsaes.v22i2.2700>

Trejo-Téllez, L. I., Ramírez-Martínez, M., Gómez-Merino, F. C., García-Albarado, J.C., Baca-Castillo, G. A., & Tejeda-Sartorius, O. 2013. Physical and chemical evaluation of volcanic rocks and its use for tulip production. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(Especial 5), 863-876. Encontrar en: <http://www.inifap.gob.mx/.../rmca.aspx>

Wu, S., Carvalho, P. N., Müller, J. A., Manoj, V. R., & Dong, R. 2016. Sanitation in constructed wetlands: a review on the removal of human pathogens and fecal indicators. *Science of the Total Environment*, 541, 8-22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.047>

Zaid, A. Q., Ghazali, S. B., Mutamim, N. S. A., & Olalere, O. A. 2019. Experimental optimization of Moringa oleifera seed powder as bio-coagulants in water treatment process. *SN Applied Sciences*, 1(5), 504. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0518-0>

Zamora, S., Sandoval, L., Marín-Muñiz, J. L., Fernández-Lambert, G., & Hernández-Orduña, M. G. 2019. Impact of ornamental vegetation type and different substrate layers on pollutant removal in constructed wetland mesocosms treating rural community wastewater. *Processes*, 7(8), 531. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr7080531>

Zurita, F. M., Bravo, D. R., Álvarez, A. C., & Lomelí, M. G. 2015. Desinfección de aguas residuales en tres sistemas de humedales construidos híbridos. *Interciencia*, 40(6), 409-415. DOI: 0378-1844/14/07/468-08. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33938675008>

Capítulo IV: Producción de biomasa vegetal en humedales construidos que tratan aguas residuales porcinas en climas tropicales

Resumen

La producción de biomasa vegetal tanto aérea como subterránea en humedales construidos (CWs) es un tema poco conocido, a pesar de que la vegetación juega un papel importante en el proceso de eliminación de contaminantes presentes en aguas residuales y en consecuencia también se desconoce su uso en el tratamiento de aguas residuales porcinas en CWs. El Objetivo de este estudio fue evaluar la producción de biomasa aérea y subterránea de *Typha latifolia* y *Canna hybrids* en humedales construidos que tratan aguas residuales porcinas en climas tropicales. Se evaluó mediante el método de biomasa no destructiva, solo cinco plantas fueron evaluadas con biomasa destructiva para desarrollar el cálculo de biomasa total en el CWs de flujo subsuperficial horizontal en edad adulta con un área de 100 m² sembrados con *Typha latifolia*, en una proporción de 5 plantas/m². Se encontró que a pesar de las altas concentraciones de contaminantes la vegetación logró sobrevivir y crecer de forma saludable.

Palabras clave: Humedales construidos; biomasa vegetal; tratamiento agua residuales porcinas.

4.1 Introducción

Los humedales construidos son ecotecnologías de tratamiento que han ganado popularidad por su bajo costo, fácil operación y cero gasto energético en la solución de problemas de contaminación del agua tanto de origen doméstico, industrial y agrícola (Parde et al., 2020; Hammer, 2020), sus componentes y funcionamiento son conocidos y ampliamente estudiados (Kataki et al., 2021; Varma et al., 2020) como los tiempos de retención hidráulica (Stephenson & Sheridan 2021; Song et al., 2018; Vera et al., 2016), sustratos que van desde materiales pétreos hasta residuos reciclables (Yang et al., 2018), por otra parte, la vegetación es uno de los componentes de los humedales que juega un papel muy importante en el sistema (Vymzal, 2011), dado que tiene dos funciones principales, la primera es que absorbe contaminantes y favorece su eliminación, y la segunda es que

proporciona oxígeno por la liberación en la zona radical (Vymazal, 2013), algunas de las vegetaciones utilizadas en sistemas de humedales más conocidas son *Cyperus papyrus*, *Phragmites australis*, *Typha latifolia* y *Scirpus* spp. que son plantas típicas de humedales (Vymazal, 2013); otras plantas también utilizadas en HC son las ornamentales, que de acuerdo con Sandoval et al. (2019), las más empleadas son *Canna hybrids* spp., *Iris* spp., *Heliconia* spp, y *Zantedeschia* spp. Aunque se conocen las plantas que pueden funcionar en los humedales construidos aún su funcionamiento y capacidad de eliminación de contaminantes está en discusión, algunos autores como Mustapha et al. (2018) ; Zhao et al. (2016), indican que las plantas bioacumulan considerables cantidades de contaminantes en sus tejidos y esto depende principalmente de su altura y follaje; sin embargo, la información sobre la producción de biomasa y bioacumulación de contaminantes que se encuentran presentes en aguas residuales aun es escasa, algunos estudios como los de Wang et al. (2019) han detectado bioacumulación de metales pesados en tejidos y como Abbasi et al. (2018) que evaluaron cinéticas de bioacumulación de nutrientes en tejidos vegetales de plantas en CWs; sin embargo, hasta la fecha existen muy pocos estudios que cuantifican la producción de biomasa de la vegetación tanto en la zona radical como en la zona aérea (Vymazal et al., 2021; Jia et al., 2018; Kasak et al., 2018; Avellan et al., 2018) y mucho menos cuando se emplean aguas residuales de origen agroindustrial, como es el caso de las aguas residuales generadas por la agroindustria porcina que también han sido ya evaluadas en los humedales construidos en cuanto a sus remoción de contaminantes (Dong et al., 2001; Li et al., 2021; Fia et al., 2021; Feng et al., 2021). Por lo antes expuesto, en este estudio se reporta por primera vez la producción total de biomasa tanto aérea como subterránea de un humedal construido a gran escala en la vegetación de un sistema que trata aguas como un sistema terciario de tratamiento de aguas residuales porcinas en una granja ubicada en una región tropical.

4.2 Materiales y Métodos

4.2.1 Fuente de la Biomasa

En este estudio se evaluaron 5 plantas elegidas al azar de *Typha latifolia* y *Canna hybrids* respectivamente, de un humedal construido (CW) de flujo horizontal de 20 m de largo x 5 m de ancho con una profundidad de 0.65 m (Figura 8), relleno de grava volcánica roja con diámetro 2 a 4 cm, con una porosidad de 0.68 %, en el cual se sembraron un total de

600 plantas. Los 10 primeros metros del sistema se sembraron con *Typha latifolia* (300 plantas de 15 cm de altura) y los 10 metros restante más cercanos a la salida del CW se sembraron con *Canna hybrids* (300 plantas de 10 cm de altura), estas se obtuvieron en su estado natural en la zona centro del estado Veracruz, México. El sistema se instaló en una granja porcina de 5000 cerdos donde el CW (tratamiento terciario) formaba parte de un tren de tratamiento que trataba las aguas residuales producidas por la cría de cerdos en la granja, la cual producía 3 m³ de agua residual diaria. El CW a gran escala operó con un tiempo de retención hidráulica de 14 días. Todos los sistemas operaron en condiciones ambientales reales en un clima cálido subhúmedo con una temperatura promedio anual de 23 °C, una precipitación media anual de 1 500 mm y a 500 msnm (INEGI, 2021).

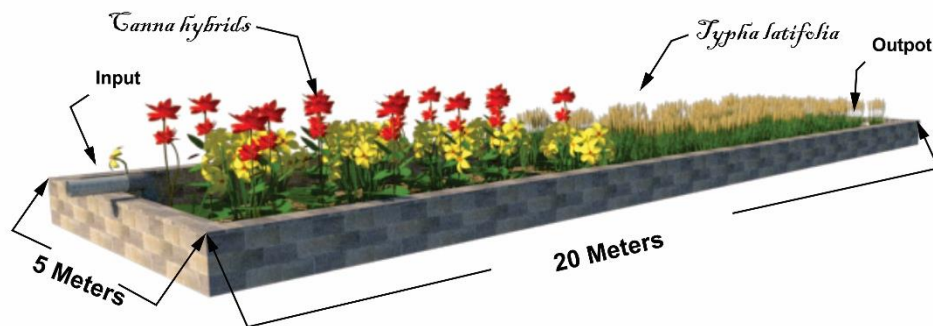


Figura 8. Sistema de Humedales Construidos a gran escala.

4.2.2 Operación y duración del monitoreo

El sistema recibió aguas pre-tratadas de un tren de tratamiento compuesto por 1 reactor anaeróbico y un reactor aeróbico, con una capacidad de 72 m³ y un tiempo de retención hidráulica de 14 días reactivamente.

El sistema se evaluó durante un periodo de 6 meses, después de 3 meses de adaptación del sistema a las nuevas condiciones de calidad de agua las plantas fueron inducidas a un proceso de preparación inicial donde se aclimataron a las condiciones de la calidad de agua actual, cabe mencionar que las plantas se tomaron de un humedal natural que recibe aguas residuales domesticas sin tratar, por lo que se facilitó su adaptación a las nuevas condiciones de contaminación del agua.

En cuanto a la remoción de contaminantes (RC) se determinó por la ecuación (1), de acuerdo a Marín-Muñiz (2016).

$$Em = ((C_i - C_e) / C_i) \times 100\%$$

Donde C_i es la concentración del contaminante en el influente (en miligramos por litro) y C_e es la concentración del contaminante en el efluente (en miligramos litros).

4.2.3 Supervivencia a la adaptación y supervivencia de plantas

Se monitoreó cada mes la supervivencia vegetal de forma visual, todas las plantas fueron numeradas para tener control de su supervivencia y a los hijuelos se le asignó una nueva numeración mes con mes, para dar seguimiento adecuado a su desarrollo vegetal, así como a la producción de flores. Como control se midieron los mismos parámetros en 5 plantas de la misma edad de madurez sembradas en suelo en su estado natural, plantadas en las mismas características iniciales de tamaño de las de CWs y se realizó el mismo tiempo de monitoreo.

4.2.4 Medición de desarrollo vegetal

El desarrollo vegetal se midió en el mes 6 mediante una cinta métrica registrándose el 100% de los individuos maduros y nuevos de cada especie de planta, para poder así medir altura, largo de hojas, número de hojas, ancho de hojas, estos datos se procesaron para sacar promedios y establecer los futuros volúmenes de biomasa no destructiva. Como control se midieron los mismos parámetros en 5 plantas de la misma edad de madurez sembradas en suelo en su estado natural plantadas con las mismas características de las de CWs inicial de tamaño y tiempo de monitoreo.

4.2.5 Medición de biomasa destructiva

Se sacrificaron 5 plantas maduras de *Typha latifolia* y *Canna hybrids* respectivamente, en las cuales se determinó la biomasa aérea y subterránea, separando a la planta de la raíz y lavándola con agua de grifo para retirar presencia de sólidos en la raíz que pudieron interferir con el resultado de biomasa. Inmediatamente fueron colocadas en un horno a 100°C durante 72 horas, con el fin de tener un peso constante y poder calcular la biomasa (Nakase et al. 2019). Las plantas fueron pesadas en una balanza analítica digital de alta precisión (Shimadzu

AUW-220D). Posteriormente se sumaron los resultados tanto de la zona aérea como subterránea, se promediaron los resultados de los cinco individuos de cada especie de planta con la finalidad de calcular la relación 1 g de biomasa aérea y subterránea con el tamaño de la planta. Para el caso de *Canna hybrids* se empleó la fórmula de plan growth obteniendo los datos de la Tabla 2 de crecimiento en ambas especies de planta. Como control se midieron los mismos parámetros en 5 plantas de la misma edad de madurez sembradas en suelo en su estado natural, plantadas en las mismas características de las CWs inicial de tamaño y tiempo de monitoreo.

4.2.6 Cálculo de biomasa no destructiva

Para el cálculo de biomasa no destructiva total del sistema de CWs en todas las plantas se consideraron el total de estas con edad promedio de 6 meses y se ponderó el total de plántulas nuevas por medio de análisis estadístico multivariado donde se obtuvo el dato de 1 g de biomasa de la zona radical y 1 g de biomasa de zona área (Incluida tallos y raíz), dato proveniente de la cuantificación de biomasa destructiva, finalmente por la relación de peso seco y altura de las plantas se calculó el total de biomasa extrapolada producida tanto aérea como subterránea, de cada una de las dos especies sembrada en CWs.

4.2.7 Cuantificación de coliformes totales

La cuantificación de coliformes fecales se realizó empelando el método Colilert. Este método está basado en la capacidad de los coliformes totales para producir la enzima β -galactosidasa que metaboliza el nutriente indicador de Colilert, el O-nitrofenil- β -Dgalactopiranosido (ONPG), lo que cambia las muestras a un color amarillo. El método Colilert está avalado por la Agencia de Protección Ambiental (APA) de EE. UU. para ser empleado en análisis de aguas y aguas residuales garantizando su eficiencia (APHA/AWWA/WEF, 2005)

4.2.8 Análisis de datos

El análisis estadístico y cálculo de los datos se realizó en el programa SPSS V18.0, se empleó análisis de varianza (ANOVA) para determinar las diferencias en los crecimientos de las plantas en CWs y en su estado natural, se empleó una prueba de correlación de Pearson

con un intervalo de confianza de 95%, así como una prueba de independencia de datos.

4.3 Resultados y discusiones

4.3.1 Operación y duración del monitoreo

El agua residual porcina que ingresó a los humedales presentó dos tratamientos previos, en la tabla 5 se muestran las características de entrada y de salida del sistema.

Tabla 5. Características de aguas residuales que ingresaron a los CWs sistema terciario de tratamiento.

Parámetro	Entrada (mg/L)	Salida (mg/L)	Método
Temperatura del agua (°C)	16.4 ± 4.2	15.2 ± 2.5	Método
Oxígeno Disuelto (OD)	1.7 ± 0.3	2.4 ± 0.2	Estándar
pH	7.1 ± 0.2	7.8 ± 0.3	(APHA-
Demanda Química de Oxígeno (COD)	789.6 ± 134.1	129.8 ± 53.6	AWWA-WEF,
Solidos Suspendidos Totales (TSS)	607.3 ± 107.5	108 ± 94.5	2005)
Nitrógeno Total (NT)	294.3 ± 46.6	16.4 ± 9.1	
Fosforo Total (PT)	53.4 ± 12.4	9.4 ± 4.6	
Coliformes Totales (CT)	1.6E+0.7	0.9E±0.6	

Nota. Promedio ± error estándar (n=24)

4.3.2 Parámetros de calidad del agua

4.3.2.1 Temperatura, pH y Oxígeno disuelto

La temperatura del agua es un indicador que afecta directamente tanto a desarrollo de microorganismos como a la presencia de oxígeno disuelto (OD) en los humedales construidos, así mismo la temperatura optima en estos sistemas para el desarrollo adecuado de las reacciones bioquímicas es de 16 a 35 °C (Akaratos & Tsihrintzis, 2007; Sandoval-Herazo et al., 2020). La temperatura promedio, entrada y de salida se muestra en la tabla 5, con un decremento no significativo. Winthrop, et al., (2002) señala que las bajas temperaturas se asocian con una disminución de la eliminación de materia orgánica (MO), es decir la temperatura promueve la oxidación de la MO. Por otra parte, el pH es una variable que al igual que la temperatura tiene un efecto sobre el desarrollo de organismos, el rango apropiado para la existencia de la mayor parte de la vida es de 5 a 9 (Sandoval-Herazo et al., 2018).

Para este parámetro se observó un incremento de 7 unidades en la salida con respecto a la entrada del sistema evaluado, adecuándose al rango que señala Sandoval-Herazo et al. (2018).

4.3.2.2 Parámetros fisicoquímicos y microorganismos

La COD, determina la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, en este trabajo se presentó una clara diferencia significativa ($p=0.05$) de la salida con respecto a la entrada (Tabla 5). Los sólidos suspendidos son sustancias presentes en el agua que tienen un estado sólido cuando se encuentran puras, al determinar este parámetro se observó una disminución significativa ($p<0.05$) entre la salida (108 ± 94.5 mg/L) y la entrada (607.3 ± 3 mg/L). El nitrógeno total es el nitrógeno total de todas las formas presentes en este caso, en las muestras de agua obtenidas, las cuales en este trabajo presento una disminución significativa ($p<0.05$) en la salida (16.4 ± 9.1 mg/L) con respecto a la entrada (294.3 ± 46.6 mg/L). El fosforo total se encuentra presente tanto en aguas naturales, aguas residuales y aguas tratadas, 9.4 ± 4.6 mg/L fue la concentración de este parámetro al final del tratamiento. La presencia de coliformes totales en un agua residual tratada indica una mala calidad en su tratamiento, en este estudio se observó la disminución de organismos a la salida del tratamiento.

4.3.2.3 Remoción de contaminantes

La figura 9, describe 5 parámetros evaluados en el sistema estudiado, el primero de ellos es la concentración de materia orgánica, expresadas como COD, cuya evaluación presenta un valor medio de remoción de 83.56 ± 16.98 %, mayor que lo que reporta Bedoya et al. (2014) (79.4 %) empleando *Typha latifolia*. Un 89.1 % de remoción empleando el mismo organismo se obtuvo en el tratamiento de contaminantes básicos de aguas residuales que realizó De la cruz, et al. (2010), remoción similar a la obtenida en este trabajo.

Demanda Química de Oxígeno (COD)	Sólidos Suspendidos Totales (TSS)	Nitrógeno Total (NT)	Fosforo Total (PT)	Coliformes Totales (CT)
83.56 ± 16.98 %	82.22 ± 17.70 %	94.43 ± 15.83 %	82.40 ± 23.22 %	94.38 ± 4.38 %

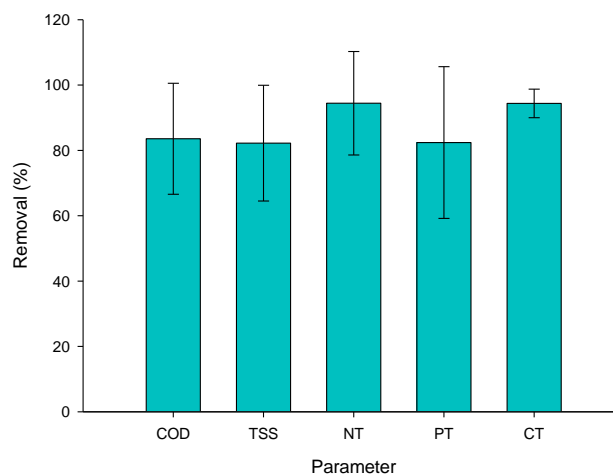


Figura 9. *Remoción de contaminantes*

Los sólidos suspendidos totales es el residuo que permanece en una cápsula después de evaporar y secar una muestra a una temperatura de 105 ± 2 °C. La remoción de sólidos en suspensión por el sistema de humedal construido fue en promedio del 82.22 ± 17.70 %.

Los principales nutrientes inorgánicos que entran en los humedales son el nitrógeno y el fósforo. En el humedal, el nitrógeno y el fósforo se eliminan del agua superficial y se transfieren al sedimento, las plantas del humedal o la atmósfera en este estudio, el Nitrógeno total fue removido en un 94.43 ± 15.83 % y el Fosforo total en un 82.40 ± 23.22 %. Entre las diferentes especies de nitrógeno, influyen en gran medida en los sistemas acuáticos, ya que son fácilmente disponible para ser absorbido por microorganismos acuáticos en lugar de otras partículas orgánicas (Yousaf et al., 2021).

El fósforo se elimina principalmente a través de procesos físicos y químicos, ingresa a un humedal en formas orgánicas como inorgánicas. La proporción relativa de cada forma depende de las características del suelo, la vegetación y el uso de la tierra de la cuenca de drenaje La asimilación y el almacenamiento de fósforo en las plantas dependen del tipo vegetativo y las características de crecimiento. Las hojas y tallos de la vegetación emergente y sumergida ayudan a asentar las partículas al ralentizar el agua y permitir que las partículas caigan (Reddy et al., 1999).

Para eliminar continuamente el fósforo, es necesario "construir" nuevos suelos dentro

del humedal a partir de tallos de plantas remanentes, hojas, restos de raíces y partes no descomponibles de algas, bacterias, hongos e invertebrados Muertos (Spenser, 1993)

Se ha demostrado que los humedales construidos son capaces de eliminar una amplia variedad de contaminantes, incluida la contaminación bacteriana (Ottová et al., 1997). En este estudio no es la excepción ya que la remoción de coliformes totales fue de 94.38 ± 4.38 %, indicativo de un tratamiento eficiente.

Cabe señalar que el tiempo de retención define el lapso en que los contaminantes permanecen en contacto con las plantas y los microorganismos para ser transformados biológica y químicamente (Aslam, 2007).

Tabla 6.

Adaptación y supervivencia de especies utilizadas

Especies		Número de plantas por mes						Altura promedio de plantas al final del estudio (mes 6)
		1	2	3	4	5	6	
<i>Typha</i>	Inicial	300	172	257	253	305	379	1.72 m
<i>latifolia</i>	Muertos	128	0	43	0	0	0	---
<i>latifolia</i>	Nuevos	0	85	39	52	74	47	0.74 m
	Sembrada en ambiente natural	--	--	--	--	--	--	1.56 m
<i>Canna</i>	Inicial	300	274	274	386	481	521	1.61 m
<i>hybrids</i>	Muertos	26	0	0	0	0	0	---
<i>hybrids</i>	Nuevos	0	0	112	95	40	61	0.54 m
	Sembrada en ambiente natural	--	--	--	--	--	--	0.97 m

Durante el desarrollo de este trabajo se observó que *Canna hybrids* presenta una mayor adaptación al medio en el que se desarrolló, ya que a lo largo de los 6 meses de evaluación se presentaron 0 individuos no viables (sin vida), sin en cambio la adaptación de *Typha latifolia* al inicio del experimento no se dio, ya que durante el primer y tercer mes del desarrollo del experimento 128 y 43 individuos respectivamente, dejaron de ser viables. Esto quiere decir que *Canna hybrids* se adapta más fácilmente a los cambios (Tabla 6), además

que tuvo una mayor tasa de individuos nuevos (n=581), siendo esto una ventaja, ya que, a mayor cantidad de individuos vivos, mayor será la calidad del agua a la salida del tratamiento.

4.3.3 Biomasa

La acumulación y distribución de biomasa en los vegetales son características genotípicas fácilmente afectadas por el ambiente y su interacción. Así, la proporción de biomasa asignada a hojas, tallos y frutos en cada momento del desarrollo depende de la cinética de crecimiento y de la tasa de distribución, que están regidas por el área foliar, clima y disponibilidad de nutrientes (Barrientos et al., 2015). En la figura 10 se observa el ritmo de la tasa de crecimiento de las especies empleadas; en la figura 11 se observa que el número de hojas de *Canna hybrids* fue mayor al final del experimento (17 hojas) con respecto *Typha latifolia* (8 hojas). El espesor de tallo en *Typha latifolia* fue mayor de inicio (3.5 cm) a fin (6 cm) del experimento (figura 11).

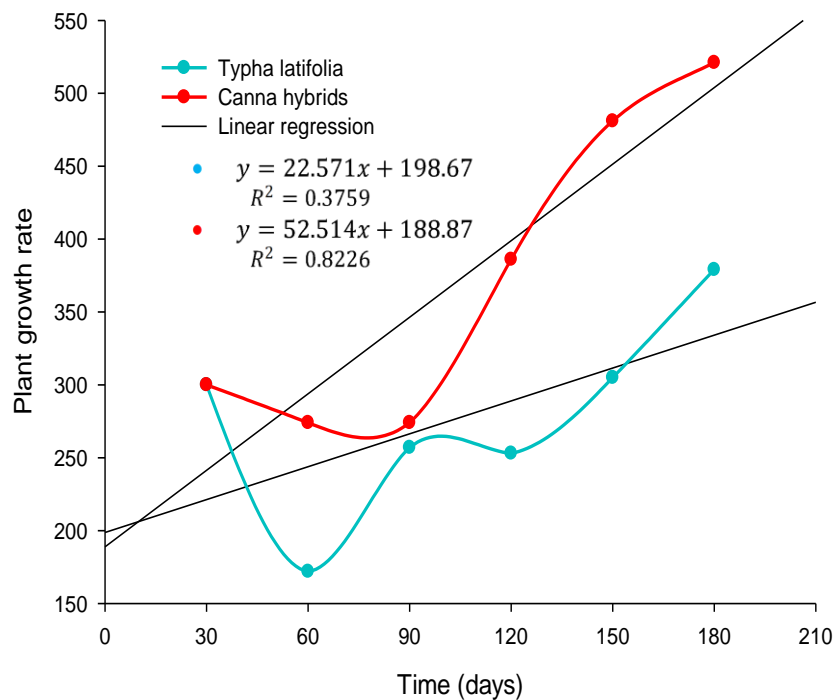


Figura 10. Crecimiento de plantas en humedales construidos.

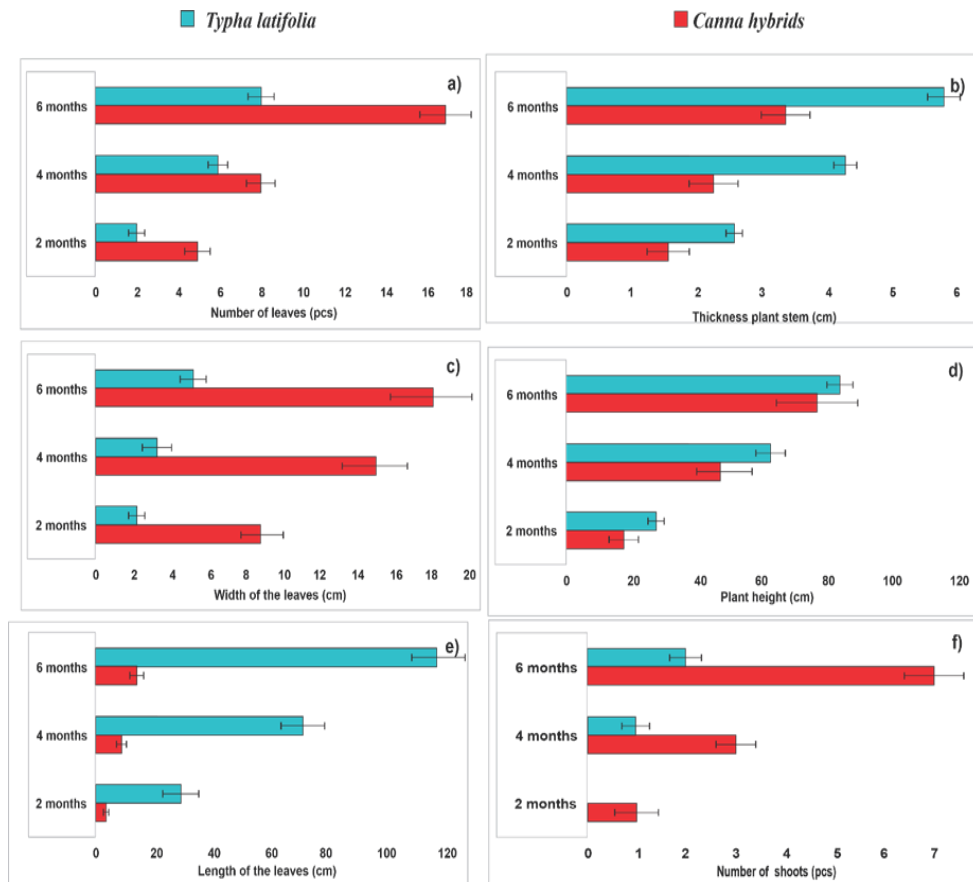


Figura 11. Desarrollo *Typha latifolia* y *Canna Hybrids* durante el periodo de estudio a nivel real.

Nota. (a) Número de hojas, (b) Grosor del tallo de la planta, (c) Ancho de las hojas, (d) Altura de la planta, (e) Longitud de las hojas, (f) Número de brotes. Promedio \pm desviación estándar.

El ancho de las hojas de *Canna hybrids* (11c) fue mayor que las de *Typha latifolia*, y por el contrario la longitud fue más grande en *Typha latifolia* (11c). La altura de *Typha latifolia* fue mayor a la de *Canna hybrids*, en un estudio realizado por Coleman et al. [40] *Typha latifolia* superó significativamente a *Juncus* y *Scirpus* tanto en crecimiento, como en mejora de la calidad de los efluentes, como se muestra en este trabajo, la altura promedio de *Typha latifolia* fue de 1.72 m esto quiere decir que *Typha latifolia* es un organismo útil para la producción de biomasa vegetal y el mejoramiento de la calidad del agua en un humedal construido.

4.4 Conclusiones

Los resultados de este estudio demuestran que el CWs de flujo subsuperficial horizontal, plantados con *Typha latifolia* y *Canna hybrids* plantas de clima tropicales,

representan una opción para reducir la carga contaminante de las aguas residuales porcinas, que es una actividad muy extendida en las zonas rurales de países en desarrollo como México. Se encontró que a pesar de las altas concentraciones de contaminantes la vegetación logró sobrevivir y crecer de forma saludable, para este tipo de efluente, las especies mejor adaptada fue la *Canna hybrids* presento una mayor adaptación al medio en el que se desarrolló y la *Typha latifolia*, mostró mayor crecimiento relativo, demostrando ser un organismo útil para la producción de biomasa vegetal y el mejoramiento de la calidad del agua en un humedal construido.

Esta especie fue principalmente determinante para la remoción de fósforo, lo que puede estar relacionado con su predominio en la mayor producción de flores, así como con la mayor acumulación de biomasa total.

4.5 Referencias

Abbasi, H. N., Xie, J., Vymazal, J., & Lu, X. (2018). Kinetics of nutrient uptake by economical vegetable species grown in constructed wetlands. *JAPS: Journal of Animal & Plant Sciences*, 28(3), 726-731.

Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2007). Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 29(2), 173-191.

Akratos, C. S., and Tsihrintzis, V. A., 2007. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological engineering*, 29(2), 173- 191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.06.013>

APHA/AWWA/WEF (2005) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association. Washington, DC, EEUU

Aslam, M. M., Malik, M., Baig, M. A., Qazi, I. A., & Iqbal, J. (2007). Treatment performances of compost-based and gravel-based vertical flow wetlands operated identically for refinery wastewater treatment in Pakistan. *Ecological engineering*, 30(1), 34-42.

Avellán, T., & Gremillion, P. (2019). Constructed wetlands for resource recovery in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 99, 42-57.

Barrientos Llanos, H., del Castillo Gutiérrez, C. R., & García Cárdenas, M. (2015). Análisis de crecimiento funcional, acumulación de biomasa y translocación de materia seca de ocho hortalizas cultivadas en invernadero. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 2(1), 76-86.

Bedoya Pérez, J. C., Ardila Arias, A. N., & Reyes Calle, J. (2014). Evaluation of a subsurface flow constructed wetland in treating wastewater generated at the University Institution College of Antioquia, Colombia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(3), 275-283.

Coleman, J., Hench, K., Garbutt, K., Sexstone, A., Bissonnette, G., & Skousen, J. (2001). Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetlands. *Water, air, and soil pollution*, 128(3), 283-295.

De la Cruz, N., Esquius, L., Grandjean, D., Magnet, A., Tungler, A., De Alencastro, LF y Pulgarín, C. (2013). Degradación de contaminantes emergentes por UV, UV / H₂O₂ y foto-Fenton neutro a escala piloto en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas. *Investigación sobre el agua*, 47 (15), 5836-5845.

Fang, J., Dong, J., Li, C., Chen, H., Wang, L., Lyu, T., ... & Liu, J. (2021). Response of microbial community composition and function to emergent plant rhizosphere of a constructed wetland in northern China. *Applied Soil Ecology*, 168, 104141.

Feng, L., He, S., Wei, L., Zhang, J., & Wu, H. (2021). Impacts of aeration and biochar on physiological characteristics of plants and microbial communities and metabolites in constructed wetland microcosms for treating swine wastewater. *Environmental Research*, 111415.

Fia, F. R. L., de Matos, A. T., Fia, R., de Matos, M. P., Borges, A. C., & Baptestini, G. C. F. (2021). Kinetics and Removal Efficiency of Nitrogen in Constructed Wetlands Cultivated with Different Plant Species for Treating Swine Wastewater Applied at Different Rates. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(1), 1-17.

Hammer, D. A. (Ed.). (2020). *Constructed wetlands for wastewater treatment: municipal, industrial and agricultural*. CRC Press.

INEGI

(2021)

<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/ver/territorio/clima.aspx?tema=me&e=30>

Jia, L., Wang, R., Feng, L., Zhou, X., Lv, J., & Wu, H. (2018). Intensified nitrogen removal in intermittently-aerated vertical flow constructed wetlands with agricultural biomass: effect of influent C/N ratios. *Chemical Engineering Journal*, 345, 22-30.

Kasak, K., Truu, J., Ostonen, I., Sarjas, J., Oopkaup, K., Paiste, P., ... & Truu, M. (2018). Biochar enhances plant growth and nutrient removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 639, 67-74.

Kataki, S., Chatterjee, S., Vairale, M. G., Dwivedi, S. K., & Gupta, D. K. (2021). Constructed wetland, an eco-technology for wastewater treatment: A review on types of wastewater treated and components of the technology (macrophyte, biofilm and substrate). *Journal of Environmental Management*, 283, 111986.

Li, L., Feng, J., Zhang, L., Yin, H., Fan, C., Wang, Z., ... & Song, H. (2021). Enhanced nitrogen and phosphorus removal by natural pyrite-based constructed wetland with intermittent aeration. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-17.

Marín-Muñiz, J. L. (2016). Remoción de contaminantes de aguas residuales por medio de humedales artificiales establecidos en el municipio de Actopan, Veracruz, México. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(2), 553-563.

Mustapha, H. I., Van Bruggen, H. J. J. A., & Lens, P. N. (2018). Vertical subsurface flow constructed wetlands for the removal of petroleum contaminants from secondary refinery effluent at the Kaduna refining plant (Kaduna, Nigeria). *Environmental Science and Pollution Research*, 25(30), 30451-30462.

Nakase, C., Zurita, F., Nani, G., Reyes, G., Fernández-Lambert, G., Cabrera-Hernández, A., & Sandoval, L. (2019). Nitrogen removal from domestic wastewater and the development of tropical ornamental plants in partially saturated mesocosm-scale constructed wetlands. *International journal of environmental research and public health*, 16(23), 4800.

Ottová, V., Balcarová, J., & Vymazal, J. (1997). Microbial characteristics of constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 35(5), 117-123.

Parde, D., Patwa, A., Shukla, A., Vijay, R., Killedar, D. J., & Kumar, R. (2020). A review of constructed wetland on type, technology and treatment of wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 101261.

Reddy, K. R., Kadlec, R. H., Flaig, E. & Gale, P. M. (1999). Phosphorus Retention in Streams and Wetlands: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 29(1):83—146

Sandoval, L., Zamora-Castro, S. A., Vidal-Álvarez, M., & Marín-Muñiz, J. L. (2019). Role of wetland plants and use of ornamental flowering plants in constructed wetlands for wastewater treatment: a review. *Applied Sciences*, 9(4), 685.

Sandoval-Herazo, L. C., Alvarado-Lassman, A., Marín-Muñiz, J. L., Méndez-Contreras, J. M., & Zamora-Castro, S. A. (2018). Effects of the use of ornamental plants and different substrates in the removal of wastewater pollutants through microcosms of constructed wetlands. *Sustainability*, 10(5), 1594.

Sandoval-Herazo, M., Nani, G., Sandoval, L., Rivera, S., Fernández-Lambert, G., & Alvarado-Lassman, A. (2020). Evaluation of the performance of vertical partially saturated constructed wetlands for sewage treatment swine. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(2).

Song, H. L., Li, H., Zhang, S., Yang, Y. L., Zhang, L. M., Xu, H., & Yang, X. L. (2018). Fate of sulfadiazine and its corresponding resistance genes in up-flow microbial fuel cell coupled constructed wetlands: effects of circuit operation mode and hydraulic retention time. *Chemical Engineering Journal*, 350, 920-929.

Spenser, E. (1993). *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Wildlife Habitat*. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Wildlife Habitat. Wetland. United States Environmental Protection Agency

Stephenson, R., & Sheridan, C. (2021). Review of experimental procedures and modelling techniques for flow behaviour and their relation to residence time in constructed wetlands. *Journal of Water Process Engineering*, 41, 102044.

Varma, M., Gupta, A. K., Ghosal, P. S., & Majumder, A. (2020). A review on performance of constructed wetlands in tropical and cold climate: Insights of mechanism, role of influencing factors, and system modification in low temperature. *Science of The Total Environment*, 142540.

Vera, I., Verdejo, N., Chávez, W., Jorquera, C., & Olave, J. (2016). Influence of hydraulic retention time and plant species on performance of mesocosm subsurface constructed

wetlands during municipal wastewater treatment in super-arid areas. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 51(2), 105-113.

Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. *Hydrobiologia*, 674(1), 133-156.

Vymazal, J. (2013). Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: a review. *Ecological engineering*, 61, 582-592.

Vymazal, J., Zhao, Y., & Mander, Ü. (2021). Recent research challenges in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Ecological Engineering*, 169, 106318.

Wang, Y., Yin, T., Kelly, B. C., & Gin, K. Y. H. (2019). Bioaccumulation behaviour of pharmaceuticals and personal care products in a constructed wetland. *Chemosphere*, 222, 275-285.

Winthrop, KL, Abrams, M., Yakrus, M., Schwartz, I., Ely, J., Gillies, D. y Vugia, DJ (2002). Un brote de furunculosis micobacteriana asociado con baños de pies en un salón de manicura. *Revista de Medicina de Nueva Inglaterra* , 346 (18), 1366-1371.

Yang, Y., Zhao, Y., Liu, R., & Morgan, D. (2018). Global development of various emerged substrates utilized in constructed wetlands. *Bioresource technology*, 261, 441-452.

Yousaf, A., Khalid, N., Aqeel, M., Noman, A., Naeem, N., Sarfraz, W., ... & Khalid, A. (2021). Nitrogen Dynamics in Wetland Systems and Its Impact on Biodiversity. *Nitrogen*, 2(2), 196-217.

Zhao, C., Xie, H., Xu, J., Zhang, J., Liang, S., Hao, J., ... & Wang, J. (2016). Removal mechanisms and plant species selection by bioaccumulative factors in surface flow constructed wetlands (CWs): in the case of triclosan. *Science of The Total Environment*, 547, 9-16.

Capítulo V: Modelo de economía circular para aprovechamiento de aguas residuales porcinas por medio de un sistema de tratamiento de bajo costo a gran escala.

Resumen

Actualmente a nivel mundial se ha generado un aumento de la producción del sector porcícola, un porcentaje mayor de la mitad de la producción de carne depende de este sistema. Sin embargo, el efecto de la producción sea de forma intensiva o extensiva, constituye una importante fuente de contaminación de los suelos y el agua, así como la emisión al aire de ciertos compuestos que conllevan a efectos perjudiciales para el medio ambiente. Esta investigación atiende el problema de contaminación de efluentes en la industria porcina en un caso real de la comunidad de Tlacotepec de Mejía, en el estado de Veracruz-México, la cual se caracteriza por una alta carga orgánica de contaminantes con arrastre de sólidos fecales. Se realizó el diseño y evaluación de un sistema híbrido de tratamiento de aguas residuales integrado de un sedimentador, un biorreactor anaerobio, un humedal construido y un Biorreactor híbrido anaerobio a nivel real, así mismo el bosquejo del escenario de estudio de recirculación del agua para el diseño del modelo de economía circular de la granja. La evaluación del sistema demostró mejorar la eficiencia de remoción de contaminantes en las aguas residuales que arrastra el efluente de descarga del proceso de engorda de cerdos del caso de estudio, los escenarios de estudio permitieron la determinación de los costos de inversión para el sistema de recirculación del agua tratada en la granja.

Palabras clave: economía circular, humedales construidos, biorreactores, tratamiento de aguas residuales porcinas.

5.1 Introducción

La contaminación del agua como consecuencia de uso industrial, agroindustrial o domiciliario representa a nivel mundial uno de los problemas ambientales más graves ha sido reportado en gran medida, suscitando la falta de plantas de tratamiento de aguas residuales con un mínimo de gasto energético e impacto ecológico. Los sistemas tecnológicos existentes para el tratamiento de distintos tipos de aguas residuales, son eficientes, sin embargo, este

tipo de plantas de tratamiento tiene altos consumos de energía, mano de obra y su mantenimiento es alto, lo que limita la implementación de esos sistemas al no ser una opción económicamente accesible para comunidades con baja densidad poblacional y de difícil acceso, donde no se cuenta con recursos económicos suficientes para tratar las aguas residuales de origen domésticas e industriales (de orígenes agrícolas y/o agro-industriales) y para pequeños empresarios (Sandoval-Herazo et al., 2020).

En México se generan 14,000 millones de m³ al año de aguas residuales municipales y no municipales e industriales, y solo son tratados 43.1% de acuerdo a los reportes de la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2018), lo cual indica que el porcentaje restante llega a mares, ríos, lagos y riegos agrícolas sin ningún tipo de tratamiento. La industria porcina genera unas cantidades considerables de aguas residuales, con alta concentraciones de materia orgánica, nitrógeno y coliformes fecales. El tratamiento de aguas residuales porcinas es una necesidad que enfrentan los pequeños y medianos productores en países en vía de desarrollo, aunque existen tecnologías como oxidación avanza, electrocoagulación y tratamientos biológicos, para atender esta problemática todos ellos son altamente costosos tanto en su implementación como operación y mantenimiento, y no están al alcance de medianos y pequeños productores, por lo que la mayoría de estas granjas porcinas se establecen y trabajan al margen de las normas ambientales, aun conociendo el impacto negativo que generan en el medio ambiente (Ferrer et al., 2018). Ante estos escenarios es primordial fomentar el uso de sistemas de tratamiento económicos y ecológicos que sean capaces de degradar contaminantes puntuales y no puntuales presentes en aguas residuales domésticas y no domésticas e industriales (Gorito et al., 2017; Sandoval et al., 2019).

El crecimiento de las microempresas porcinas en México ha ido en aumento año con año, de estas las microempresas de crianza de ganado porcino rebasan el 13.5% a nivel nacional. Debido a este crecimiento las microempresas no cuentan con registros oficiales ante las dependencias que les soliciten el tratamiento de sus aguas residuales, los contaminantes que contienen este tipo de aguas cuentan con concentraciones elevadas de nitrógeno y fósforo, debido a esto, el aumento de contaminación del agua va en crecimiento con el paso de los días. Los sistemas de tratamiento instalados actualmente no cuentan con la capacidad suficiente para el tratamiento de aguas residuales tanto residuales como industriales que se generan en el territorio nacional con una capacidad de tratamiento

instalada solo del 40%, dejando sin tratamiento el resto de las aguas que se generan. El uso de humedales artificiales son una fuente alternativa eficiente de tratamiento de aguas residuales, económicas en relación a los tratamientos obtenidos mediante otros sistemas, de fácil funcionamiento y la calidad del agua tratada es suficiente para la mayoría de los usos en el medio natural y ámbito urbano, son idóneos para la depuración en núcleos rurales dispersos, pequeñas poblaciones y microempresas que durante sus procesos generen sobrecargas de aguas residuales (Alarcón et al., 2018). Se deben atender varias retos y perspectivas en materia de tratamiento de aguas residuales porcinas en México, empezando por la implementación de tratamientos ecológicos y debajo costos como los humedales artificiales y la aplicación del enfoque de economía circular en el tratamiento de aguas, en los cuales reintegren la gestión de los residuos y la reutilización de las aguas residuales tratadas en condiciones seguras que generen rentabilidad y eficiencia hídrica, como una medida que permite garantizar el suministro de agua (Conagua, 2016), ambos son alternativas atractivas y poco investigadas en materia de tratamiento de este tipo de efluentes, por otra parte existe poca información en materia de anuales destinados a diseño construcción de sistemas de tratamiento ecológicos, y la mayor para de los sistemas de tratamiento se encuentran en zonas urbanas, siendo las rurales las de mayor producción de este tipo de ganado y con mayor inexistencia de tratamiento de las mismas.

Esta investigación atiende el problema de contaminación de efluentes en la industria porcina en un caso real de la comunidad de Tlacotepec de Mejía, en el estado de Veracruz-México, la cual se caracteriza por una alta carga orgánica de contaminantes con arrastre de sólidos fecales. Se realizó el diseño y evaluación técnica y financiera de un sistema híbrido de tratamiento de aguas residuales integrado de un sedimentador, un biorreactor anaerobio, un humedal construido y un Biorreactor híbrido anaerobio a nivel real, así mismo el bosquejo del escenario de estudio de recirculación del agua para el diseño del modelo de economía circular de la granja.

5.2 Materiales y métodos

Este estudio se llevó a cabo en la granja porcina barranquilla, en Amatitla municipio de Tlacotepec de Mejía, Veracruz, México. Se trabajó con aguas residuales porcinas. El sistema híbrido de tratamiento consistió en un sedimentador, seguido de un biorreactor anaerobio, seguido de humedal construido de flujo subsuperficial horizontal (HC- FSSH) y

seguido de Biorreactor híbrido, el sistema se alimentó en forma continua con un tiempo de retención hidráulico de cincuenta días. Se trabajó con un sistema de cuatro etapas. Se trató un caudal de 120,000 lit/día. (Figura 4.1). El efluente de la granja porcina fue alimentado de la siguiente forma el agua residual fluyó de los chiqueros por gravedad hacia un depósito de almacenamiento de 40,000 litros de capacidad, acondicionado para la sedimentación del agua, con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de cinco días. El efluente del biorreactor anaerobio fluyó por gravedad desde la salida del agua del tanque sedimentador, la capacidad del biorreactor es 120,000 litros y TRH de veinte días. Las dimensiones fueron 10×5×0.6 metros (largo x ancho x altura), en concreto reforzado. El efluente saliente proveniente del biorreactor fluyo por gravedad hacia el HC-FSSH en la superficie del sustrato. Las dimensiones del HC-FSSH, fueron de 20×5×0.6 metros (largo x ancho x altura). La unidad se construyó con dos zonas, una anaerobia y otra aerobia, Se desarrolló en celdas de concreto reforzado, con capacidad de 120,000 litros y TRH de cinco días. Se plantaron 54 individuos de *Canna ssp.*, *Iris spp.* (25-30cm de altura). Las dos plantas son especies ornamentales con alto valor de mercado en México que han sido utilizadas en estudios previos (Sandoval et al., 2020), desarrollándose vigorosamente con producción de flores. Como medio filtrante se utilizó roca volcánica tezontle con un d10 de 0,645mm, d60 de 2,3mm y un coeficiente de uniformidad (CU) de 3,6. El efluente de salida del HC-FSSH fluyo por gravedad hacia el biorreactor híbrido, construido con dos zonas, una anaerobia y una aerobia, con capacidad de 120,000 litros y TRH de veinte días. Las dimensiones fueron 10×5×0.6 metros (largo x ancho x altura), en concreto reforzado.

5.2.1 Aspectos técnicos

5.2.1.1 Localización de la zona donde se desarrolló el estudio

Amatintla ubicado a 2.5 Km. del municipio de Tlacotepec de Mejía, está en las coordenadas 19°10'51"N 96°49'15'W y 855 msnm.

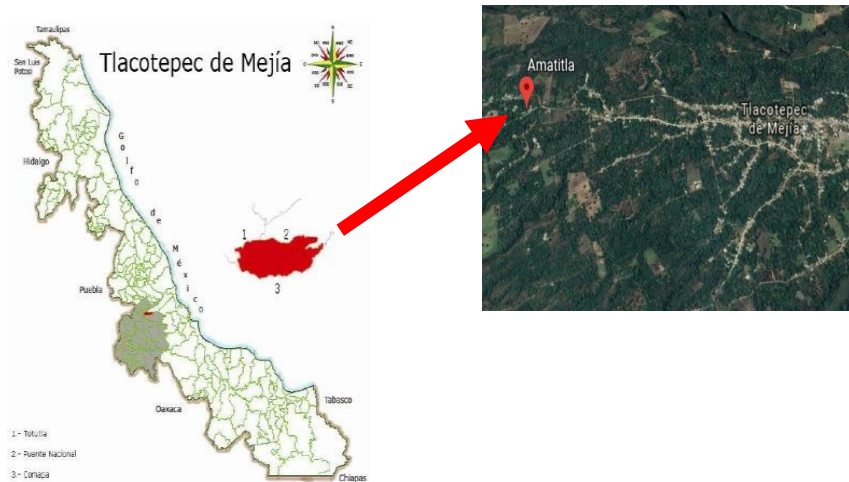


Figura 12. Ubicación sitio de estudio

5.2.2 Descripción de diseño del sistema de tratamiento

El sistema híbrido se encuentra diseñado en cuatro fases como se puede observar en la Figura 13 y Figura 14. Ver planos en los anexos.



Figura 13. Arranque y operación del sistema híbrido de tratamiento.

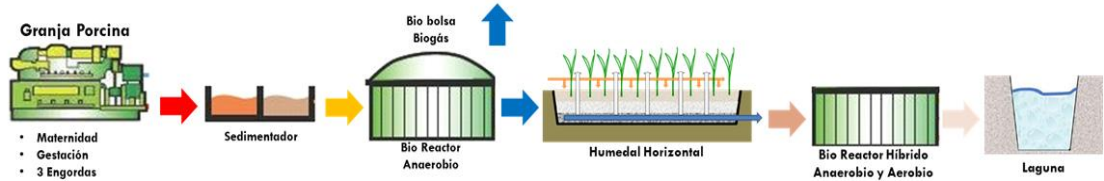


Figura 14. Fases del sistema híbrido de tratamiento.

5.2.2.1 Fase 1 Sedimentador: se realizó construcción tanque sedimentador para lo cual se ocuparon los siguientes materiales Concreto Reforzado $f'c=250$ [Kg/cm²] de 10 [cm] de espesor, hecho en obra con revolvedora con cemento arena 1:3 y reforzado con malla electrosoldada 6x6-10/10 con una pendiente de 2%. Se realizó Aplanado en muro a plomo y regla acabado fino con mezcla cemento arena 1:4 de 2.5 cm de espesor, por medios manuales con una altura de los trabajos de 1.65 mts. Entubadode la entrada y salida del sedimentador y tapa del tanque de 1.5 x3 m de plástico de alta resistencia (Figura 15).



Figura 15. Tanque sedimentador.

5.2.2.2 Fase 2 Biorreactor anaerobio: Para la construcción del reactor se empleó material plástico y como medio de soporte fijo tezontle rojo (diámetro 1-2 cm y porosidad 0.8) colectado en zonas cercanas al municipio de Tlacotepec de Mejía. Las dimensiones son de 3 metros por 15 metros (Figura 16; 17).

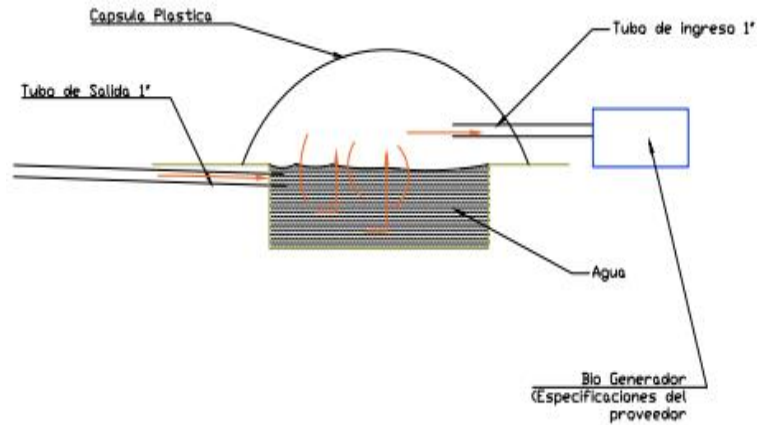


Figura 16. *Biorreactor anaerobio*

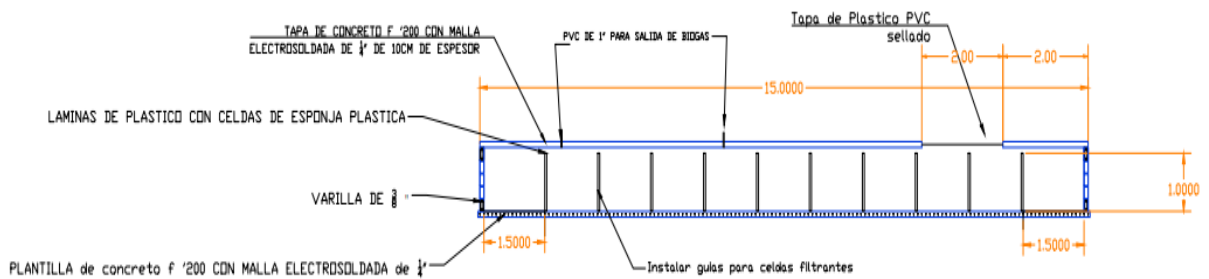


Figura 17. *Biorreactor anaerobio vista frontal.*

5.2.2.3 Fase 3. Humedal construido:

Se desarrolló en celdas de concreto reforzado y como medio de soporte tezontle rojo. Aplanado fino en muros con mortero cemento-arena 1:4, de 3 cm de espesor. Capa de 20 cm de espesor con piedra porosa de 20 cm de diámetro. Relleno de humedal con material producto de banco (grava de 3 mm) e instalación hidrosanitaria. Se sembró una planta por cada 75 cm en ambas direcciones (Figura 18).



Figura 18. Humedal construido

5.2.2.4 Fase 4. Biorreactor híbrido: consiste en la combinación de dos procesos en un mismo tanque del reactor, consiste en una mezcla de biorreactor anaerobio y aerobio, con relaciones volumétricas del 50% para ambos casos. El biorreactor tiene forma rectangular y fondo plano, con dimensiones 3 metros por 20 metros. Para la construcción del reactor se empleó material plástico, varillas de 3/8, plantilla de concreto f´200 con malla electrosoldada de ½ y como medio de soporte fijo tezontle rojo (diámetro 1-2 cm y porosidad 0.8) colectado en zonas cercanas al municipio de Tlacotepec de Mejía (Figura 19).

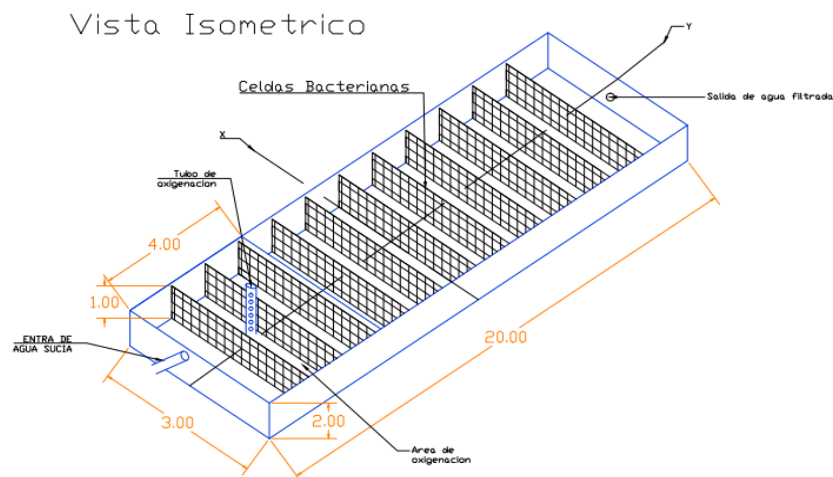


Figura 19. Biorreactor híbrido

5.2.3 Monitoreo de parámetros en el sistema

El monitoreo se realizó entre el 01 mayo 2020 al 31 dic 2020. Durante este periodo se llevó a cabo un monitoreo de parámetros de calidad del agua (Tabla 5.1). Los análisis de agua

del efluente e influente de los mesocosmos se realizaron quincenalmente mediante métodos estándares (APHA-AWWA-WEF, 2005). El porcentaje de remoción de contaminantes (Em) se determinó de acuerdo con Zhang et al., (2012); Marín-Muñiz (2016).

Tanto en el influente como en los efluentes se midieron el pH y temperatura del agua con un medidor impermeable de pH; sólidos disueltos totales (SDT); conductividad (CE); la relación CE/SDT y temperatura (Combo pH y CE – Waterproof) y el Oxígeno disuelto (O₂) (HI76407 / F-Hanna) cada quince días durante todo el periodo de estudio.

La temperatura ambiente y humedad se midió con un multi paramétrico in situ y la intensidad de luz se midió cada quince días con un luxómetro (HI97500/Hanna), lo anterior en horarios de 12 – 14 h. En cuanto al desarrollo vegetal se midió el número de flores y la altura de la planta con una cinta métrica cada 30 días.

5.2.4 Preparación del sistema

El sistema se estabilizó durante cuatro meses y posteriormente se monitorearon en forma semanal durante ocho meses.

Tabla 7. *Parámetros de calidad del agua.*

<i>Parámetro</i>	<i>Medición</i>	<i>Equipo</i>	<i>Referente</i>
pH	Cada 15 días	Electrodo	APHA-AWWA-WEF,2005
Temperatura	Cada 15 días	Termómetro	APHA-AWWA-WEF,2005
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Cada 15 días	Digestión por ácido, colorimétrico	APHA-AWWA-WEF,2005
Nitrógeno total (NT)	Cada 15 días	Colorimétrica	APHA-AWWA-WEF,2005
Nitrógeno Amoniacal(N-NH ₄)	Cada 15 días	Kjeldhal	APHA-AWWA-WEF,2005
Fósforo Total (PT)	Cada 15 días	Colorimétrica	APHA-AWWA-WEF,2005

Sólidos Suspendidos Totales (SST)	Cada 15 días	Gravimétrico	APHA-AWWA-WEF,2005
Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	Cada 15 días		APHA-AWWA-WEF,2005
Coliformes fecales	Cada 15 días		APHA-AWWA-WEF,2005
N-(NO ₂ -+NO ₃ -)	Cada 15 días		APHA-AWWA-WEF,2005

5.2.5 Análisis del sistema

El proceso de cuantificación de eliminación contaminantes se inició después de 4 meses de haber comenzado la alimentación de agua en los sistemas de tratamiento híbrido, de esta forma se otorgó un periodo de estabilización del 01 enero 2020 al 31 de marzo 2020, en el cual las plantas se adaptaron a los sistemas y se estabilizaron los procesos fisicoquímicos internos. Se midió tanto en el influente como los efluentes cada 30 días por un periodo de 8 meses del 01 de mayo 2020 al 31 de diciembre 2020.

El procedimiento utilizado se basó en Gracia-Lor et al., (2012) y Cervantes et al., (2017), la cual fue modificada para su mejora. Se realizaron determinaciones de coliformes totales (CTot) y de E-coli utilizando el método Colilert (IDEXX, 2013), que detecta simultáneamente los CTot y E-coli en aguas y aguas residuales. Este método se basa en la capacidad de los coliformes totales para producir la enzima β - galactosidasa que metaboliza el nutriente indicador de Colilert, el O-nitrofenil- β - Dgalactopiranósido (ONPG), lo que cambia las muestras a un color amarillo; por su parte, la E-coli, debido a su capacidad de producir la enzima β -glucuronidasa, metaboliza el 4-metilumbelliferil- β -Dglucurónido (MUG), también presente en el reactivo Colilert, lo que lleva a la producción de una sustancia fluorescente. El método Colilert está aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. para el análisis de aguas y aguas residuales (APHA/AWWA/WEF, 2005).

5.2.5.1 Procedimiento de preparación de muestras

5.2.5.1.1 PH

Se realiza la calibración del multiparamétrico, para lo cual se utilizan las soluciones Buffer (pH:4, pH:7).

Una vez calibrado el equipo, se selecciona el parámetro a analizar.

Después de calibrar se coloca en otro vaso de precipitado 50 ml de la muestra a analizar y se introduce el electrodo del equipo para realizar la toma de lectura.

5.2.5.1.2 Conductividad eléctrica

1. Se realiza la calibración del multiparamétrico con el empleo de la solución buffer (12880 $\mu\text{S}/\text{cm}$)
2. Una vez calibrado el equipo, se selecciona el parámetro a analizar.
3. Después de calibrar se coloca en otro vaso de precipitado 50 ml de la muestra a analizar y se introduce el electrodo del equipo para realizar la toma de lectura.

5.2.5.1.3 Demanda química de oxígeno (DQO)

1. Este método requiere una corrección del blanco. Un solo blanco puede ser usado en varias ocasiones, siendo estables por meses a temperatura ambiente. Para mejorar la precisión, utilice el mismo blanco para cada set de mediciones y siempre utilice el mismo set de reactivos y muestras.
2. Retire la tapa de dos viales Reactivo DQO Rango Alto.
3. Añada 0.2 ml de agua desionizada al Primer vial y 0.2 ml de muestra al Segundo vial, esto mientras mantiene los viales en un Angulo de 45°, coloque la tapa e invierta varias veces para mezclar, dichos viales se calentarán mientras los mezcla. Sea precavido con el manejo de estos.
4. Inserte los viales en el reactor y caliéntelos por 2 horas a 150 °C, una vez realizada la digestión apague el reactor. Espere un aproximado de 20 minutos para permitir a los viales enfriarse cerca

de 120 °C, invierta en varias ocasiones los viales mientras aún están calientes, luego colóquelos en la gradilla.

5. Deje los viales enfriarse en una gradilla y temperatura ambiente. No agite o invierta los viales, la muestra se volverá turbia.
6. Seleccione el método DQO HR EPA (13mm): Inserte el adaptador para viales de 13 mm, una vez ya insertado el adaptador ubique el vial blanco en el adaptador. Presione la tecla cero para realizar la lectura.

5.2.5.1.4 Nitrógeno total (NT)

1. Como primer paso se debe Precalentar el Reactor HANNA®HI839800 a 105°C (221°F).
2. Seguido a ello se retira la tapa de dos viales de digestión Nitrógeno Total Rango Alto, a los cuales se les añade un paquete de PERSULFATO/N a cada vial.
3. Agregar 0.5 ml de agua desionizada al primer vial (#1) y 0.5 ml de la muestra al segundo vial, mientras mantiene los viales en una posición de 45°, a los cuales se les coloca la tapa y agite enérgicamente por 30 segundos o hasta que el polvo se disuelva completamente.
4. Una vez realizado esto se deben insertar los viales en el reactor y calentarlos por 30 minutos a 105° centígrados. Al final de la digestión los viales se deben colocar en una gradilla para que se enfríen a temperatura ambiente.
5. Ya realizada la digestión de las muestras se debe seleccionar en el equipo el método Nitrógeno Total HR (13 mm), al cual se le debe insertar el adaptador para viales de 13 mm.
6. A continuación, se retira la tapa de los viales y se añade un paquete de BISULFITO/N a cada vial, colocando la tapa y agitando suavemente por 15 segundos.
7. Nuevamente se retira la tapa de los viales y se agrega un

paquete de Reactivo Nitrógeno Total a cada vial, colocando la tapa y agitando nuevamente de manera suave por 15 segundos.

8. Se procede a añadir 2 ml del blanco a uno de los viales reactivos y 2 ml de la muestra al segundo vial reactivo, mientras mantiene los viales en una posición de 45°C. Se coloca la tapa y se invierte 10 veces para mezclar.
9. Se ubica el vial blanco en el adaptador y finalmente se cierra la tapa para realizar la lectura.
10. Por último, se retira el vial blanco y se coloca el vial de la muestra en el equipo.

5.2.5.1.5 Fosforo total (PT)

1. Como primer paso se debe precalentar el Reactor HANNA a 150°C (302°F).
2. Después de que se precalentó el reactor, retirar la tapa de dos viales Reactivo Fósforo, a los cuales se les debe añadir 5 ml de agua desionizada al primer vial y 5 ml de agua en el segundo vial, mientras mantiene los viales en un ángulo de 45°.
3. Añada un paquete de PERFSULFATO/P a cada vial, no olvidando colocar la tapa y agitar suavemente hasta que el polvo se disuelva.
4. Una vez que ya se agregó todo debe insertarse el vial en el reactor para calentarlo a 150°C por 30 minutos. Al final de la digestión colocar los viales cuidadosamente en una gradilla y dejar que se enfríen a temperatura ambiente.
5. Selecciona en el equipo a utilizar (espectrofotómetro) el método Fósforo Total HR (13 mm), insertando el adaptador para cubetas de 13 mm.
6. Retirar la tapa de dos viales y añadir 2 ml de la solución NaOH 1.54N a cada vial, mientras se mantiene el vial en un

- ángulo de 45°, colocar la tapa una vez que haya añadido la solución e invertir en varias ocasiones para mezclar.
7. Ya mezclados volver a retirar la tapa de los viales y añadir 0.5 ml de Reactivo Fósforo Total Rango Alto B a cada vial, mientras mantiene el vial en un ángulo de 45°, colocando la tapa e invirtiendo nuevamente en varias ocasiones para mezclar.
 8. Habiendo realizado ya todos estos pasos proceder a colocar el vial blanco en el soporte para la toma de lectura, seguido al registro de lectura retirar el vial blanco y colocar el vial de la muestra en el equipo para realizar la lectura.

5.2.6 Análisis estadístico

El análisis de los resultados se llevó a cabo en el software SPSS (versión 19 para Windows). Se compararon los datos en un análisis de varianza (ANOVA) para encontrar diferencias estadísticas ($P \leq 0.05$) en el seguimiento de: pH, Temperatura del Agua, Humedad Intensidad de luz, SST, DQO, DBO5, NTK, N-NH₄, PT, NT, y desarrollo vegetal. Todos los datos se analizaron para determinar su distribución normal antes del análisis estadístico. La homogeneidad de la varianza se probó utilizando la prueba de Levene.

5.2.7 Sistema de recirculación de agua

Para determinar el material necesario para el sistema de recuperación de agua se trazó una línea que describiera la trayectoria de la tubería necesaria para llevar el agua tratada de la laguna a las áreas de producción de la granja (Figura 20).

Dado que el tanque elevado será ubicado junto a la laguna se utilizó un software de Sistema de Información Geográfica (SIG) para proponer la línea y obtener el perfil del suelo para proponer la altura del tanque de agua, se utilizó Google Earth para determinar la diferencia en la elevación de la laguna con respecto a los chiqueros (Figura 20) que es donde se quiere transportar el agua tratada, para así determinar la altura que requiere tener el tanque elevado para que al suministrar por medio de gravedad el agua a los chiqueros y que esta tenga una presión suficiente.



Figura 20. Línea de conducción Laguna/Tanque elevado – Producción
Fuente: Google Earth

Una vez realizado el análisis mediante el software de sistema de información geográfica (SIG) se obtuvo la línea y el perfil del suelo que se puede visualizar en la Figura 21, donde se obtiene que la diferencia en la elevación del punto A (Laguna) al punto B (Chiqueros) es de 8 metros, teniendo el punto A una altura de 809 msnm, y el punto B 817 msnm, cubriendo entre punto y punto una distancia de 200 m.

Teniendo en cuenta la diferencia de altura de 8 metros y considerando que para una buena presión del agua el contenedor de esta debe estar a por lo menos 2 metros por encima de la salida de agua más alta del lugar se optó por construir el tanque elevado el cual se encontraría junto a la laguna a una altura de 828 msnm., teniendo una altura de 11 metros y una diferencia de altura con el punto B de 3 metros lo cual ayudará a que el agua suministrada posea la presión necesaria.



Figura 21. Diferencia en la elevación de la laguna a los chiqueros
Fuente. Google Earth

5.2.7.1 Estimación de costos de inversión sistema recirculación

Para la realización del sistema de distribución de agua tratada de la granja Barranquilla se realizó un análisis de los costos de los materiales y mano de obra para la realización de un tanque elevado y su posterior tubería que transporte el agua de dicho tanque a las zonas de producción (chiqueros) de la granja, para ello se cotizaron 3 estructuras (Figura 22).

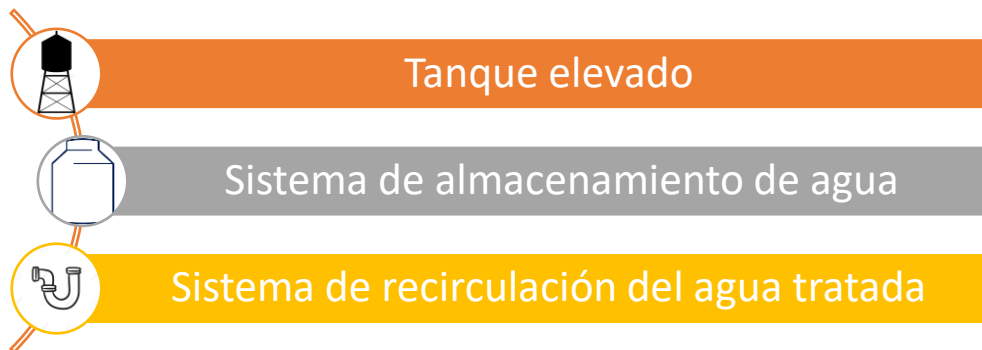


Figura 22. Elementos del análisis de los costos de inversión

Para la edificación del tanque elevado se estimó una inversión de \$112,900.00 MXN, teniendo en cuenta que tendrá una altura de 11 metros con una base en tierra de 4 x 4 metros y una base superior de 3 x 3 metros, como se muestra en la siguiente tabla (Tabla 8).

1 **Tabla 8.** *Estimación de costos de construcción del tanque elevado.*

Tanque elevado					
Concepto		Unidad	Cantidad	Precio unitario MXN	Precio total
4 Pilares de 0.4 x 0.4 x 11 mts.	Cemento Portland tipo 2 (Cemento para uso en construcciones de concreto expuestas a la acción moderada de sulfatos, recomendado en uso de estructuras industriales, puentes, obras portuarias, fabricación de tubos de concreto, alcantarillado perforaciones y en obras en contacto con aguas subterráneas).	Bultos	75	\$190.00	\$14,250.00
	Varillas de 1/2" de 12 metros c/u	PZA	41	\$420.00	\$17,220.00
	Varillas de 3/8" de 12 metros c/u	PZA	62	\$225.00	\$13,950.00
	Grava para 7.04 m ³ de volumen de construcción	Camionadas	1	\$2,200.00	\$2,200.00
	Arena para 7.04 m ³ de volumen de construcción	Camionadas	0.5	\$2,200.00	\$1,100.00
	Alambrón de 1/4"	Kg	2	\$60.00	\$120.00
					<i>\$48,840.00</i>
Base inferior de 4 x 4 x 0.30 mts.	Cemento Portland tipo 2 (Cemento para uso en construcciones de concreto expuestas a la acción moderada de sulfatos, recomendado en uso de estructuras industriales, puentes, obras portuarias, fabricación de tubos de concreto, alcantarillado perforaciones y en obras en contacto con aguas subterráneas).	Bultos	51	\$190.00	\$9,690.00
	Grava para 4.8 m ³ de volumen de construcción	Camionadas	0.5	\$2,200.00	\$1,100.00
	Arena para 4.8 m ³ de volumen de construcción	Camionadas	0.5	\$2,200.00	\$1,100.00
	Alambrón de 1/4"	Kg	4	\$60.00	\$240.00
					<i>\$12,130.00</i>
Base superior de 3 x 3 x 0.3 mts.	Cemento Portland tipo 2 (Cemento para uso en construcciones de concreto expuestas a la acción moderada de sulfatos, recomendado en uso de estructuras industriales, puentes, obras portuarias, fabricación de tubos de concreto, alcantarillado perforaciones y en obras en contacto con aguas subterráneas).	Bultos	19	\$190.00	\$3,610.00
	Grava para 1.8 m ³ de volumen de construcción	Camionadas	0.5	\$2,200.00	\$1,100.00
	Arena para 1.8 m ³ de volumen de construcción	Camionadas	0.5	\$2,200.00	\$1,100.00
	Alambrón de 1/4"	Kg	2	\$60.00	\$120.00
					<i>\$5,930.00</i>
Mano de de Obra	Mano de obra de la construcción del tanque elevado de 11 mts.				<i>\$46,000.00</i>
Total					<i>\$112,900.00</i>

2

Para la edificación del sistema de almacenamiento de agua se estimó una inversión de \$33,451.99 MXN, teniendo en cuenta un tinaco de 5,000 litros de capacidad, esto con base en el consumo de 3,200 litros de agua que se utilizan diariamente para el proceso productivo de la granja, la cotización se muestra en la siguiente Tabla (Tabla 9).

Tabla 9. Cotización sistema de almacenamiento de agua.

Sistema de almacenamiento de agua					
	Concepto	Unidad	Cantidad	Precio unitario MXN	Precio total
Tanque de almacenamiento de agua de 5,000 litros	Tanque de almacenamiento industrial de 5,000 litros, Altura: 1.77 m, Diámetro: 2.20 m, Peso: 90 Kg.	PZA	1	\$17,986.99	\$17,986.99
	Tubo plus de 1" de 4 metros c/u	PZA	10	\$295.00	\$2,950.00
	Termo fusora Tubo plus	PZA	1	\$1,600.00	\$1,600.00
	Codo Tubo plus 90° de 1"	PZA	5	\$20.00	\$100.00
	Codo Tubo plus 45° de 1"	PZA	5	\$20.00	\$100.00
	Cople Tubo plus de 1"	PZA	10	\$62.00	\$620.00
	Conector Hembra de 1"	PZA	10	\$40.00	\$400.00
	Conector Macho de 1"	PZA	5	\$215.00	\$1,075.00
	Brida conectora para tinaco de 1"	PZA	1	\$100.00	\$100.00
	Válvula de Pie 1"	PZA	1	\$200.00	\$200.00
	Respiradero de aire para tinaco	PZA	1	\$75.00	\$75.00
	Válvula de llenado sin fin para tinaco 1"	PZA	1	\$200.00	\$200.00
	Bomba de agua de 1hp 60Hz 127v con entrada y salida de 1", peso de 10 Kg.	PZA	1	\$1,975.00	\$1,975.00
	Rollo Cable Calibre 12 de 100 mts	PZA	1	\$990.00	\$990.00
	Interruptor pastilla termo magnética monofásica	PZA	1	\$80.00	\$80.00
					<i>subtotal</i>
Mano de Obra	Mano de obra de instalación del tinaco, bomba de agua e instalación eléctrica				\$5,000.00
				TOTAL	<u>\$33,451.99</u>

Para la implementación del sistema de recirculación de agua tratada se estimó una inversión de \$46,030.00 MXN, teniendo en cuenta la distancia que tendrá el tanque elevado con respecto a los chiqueros a los que se requiere reintroducir el agua, como se muestra en la

siguiente tabla (Tabla 9).

Tabla 10. Sistema de recirculación del agua tratada.

Sistema de recirculación del agua tratada					
		Unidad	Cantida	Precio	Precio total
			d	unitario	
				MXN	
	Tubo pvc c-15 conduit pesado de 2.5" (63 mm) de 3 mts cada uno	PZA	106	\$200.00	\$21,200.00
	Valvula de compuerta de tubo de 63 mm	PZA	4	\$400.00	\$1,600.00
	Tuboplus de 1" de 4 metros c/u	PZA	8	\$295.00	\$2,360.00
Tuberia	Brida para tinaco de 2.5" (63 mm)	PZA	1	\$46.00	\$46.00
PVC	Válvula multiconector 2.5" (63 mm)	PZA	1	\$104.00	\$104.00
	Válvula de esfera roscable (llave de paso) de 1"	PZA	8	\$159.00	\$1,272.00
	Conexión Tee PVC de 2.5" (63 mm)	PZA	8	\$80.00	\$640.00
	Reductor tubo pvd de 2.5" (63 mm) a 1" (25 mm)	PZA	8	\$341.00	\$2,728.00
	Codo Tubo plus 90° de 1"	PZA	4	\$20.00	\$80.00
subtotal tubería PVC					\$30,030.00
Mano de Obra	Mano de obra de instalación de la tubería PVC y accesorios del tanque elevado a los chiqueros				\$16,000.00
TOTAL					\$46,030.00

Teniendo en cuenta los costes de las 3 estructura mencionadas anteriormente y descritos los costos de inversión de las tablas 5.2, 5.3 y 5.4 se estimó que se requiere un total de \$223,163.11 MXN de inversión para la construcción de dicho sistema que pueda reintroducir al proceso productivo de la granja barranquilla el agua tratada almacenada en la laguna artificial.

5.2.8 Evaluación económica y financiera

Con los datos de la propuesta técnica desarrollada se elaboró el análisis económico y financiero del sistema para lo cual ocupamos el programa Microsoft Excel 2023. Como primer paso se determinó el monto de la inversión inicial, posteriormente se realiza cálculo de capital de trabajo, estimación ingresos, costos y gastos, para posterior análisis de indicadores financieros como punto equilibrio, TIR, VAR y B/C.

5.2.8.1 Inversión inicial

Con la finalidad de establecer el costo inicial de inversión de puesta en marcha del sistema híbrido de tratamiento de aguas residuales y de recirculación del agua tratada, se establecerá una memoria de cálculo con los costos necesarios para iniciar operaciones del proyecto. Incluirá todos los activos fijos, tangibles e intangibles, que se necesitan para iniciar las operaciones del proyecto en cuestión.

5.2.8.2 Capital de trabajo

Considerando que granja porcina ya se encuentra operando y en marcha al momento de la implementación el sistema de tratamiento, el capital de trabajo se definió de acuerdo con:

- Agua residual necesaria para la operación
- La cantidad de lechones utilizados en el ciclo de producción.

5.2.8.3 Financiamiento

Se describió el mecanismo por el cual se consiguió el capital suficiente para cubrir los recursos específicos que requiere el negocio, en este caso la granja absorbió la totalidad de los costos de la implementación del sistema híbrido de tratamiento.

5.2.8.4 Ingresos, costos y gastos

Aquí se incluyó:

- Los ingresos de producción: unidades vendidas y precio de venta.
- Costos de producción: mano de obra, materiales, maquinaria,
- Gastos totales: venta, administrativos y financieros (aquí se incluirá el monto de pago de todos los gastos)

5.2.8.5 Estados financieros

Se realizará el cálculo de estado de resultados. La proyección del estado de resultados del humedal artificialmente construido se realiza a 5 años, para realizar debidamente el estado de resultados deben desarrollarse primero los presupuestos, de

ahí elaborar el flujo para posteriormente realizar el estado financiero a una fecha determinada futura. Para esto es necesario contar con el detalle de ambos presupuestos.

Para la creación del flujo de efectivo se calcula el año 0, el cual está constituido por la compra del activo fijo, el activo diferido, y la compra del capital de trabajo, desglosada en el cuadro de inversión. Después se inicia actividades del proyecto, por lo cual comienzan los gastos de operación; el flujo de efectivo del año 1 corresponde a las ventas de las plantas ornamentales y al agua tratada más el valor de rescate, a esta suma se le realiza la diferencia de los egresos, los cuales serán los costos fijos y variables

5.2.8.6 Depreciación

La depreciación se refiere a reducción periódica del valor de un bien material o inmaterial.

Por lo tanto, se incluirá:

El valor original: El costo del concepto en el periodo determinado.

El porcentaje de la tasa que aumentará.

Los años que el concepto permanecerá en el proyecto (5 años)

El cargo anual, desprendido del valor total.

Valor residual, el monto total correspondiente a cada periodo contemplando el desgaste.

El valor del depósito anual o cargo por depreciación se calculará con la siguiente fórmula:

$$\text{Cargo de depreciación (CD)} = \frac{\text{Costo inicial (CI)} - \text{Valor de Salvamento (VS)}}{\text{Número de año de la vida útil (N)}}$$

5.2.8.7 Punto de equilibrio

Número mínimo de productos o servicios que debe vender para que la empresa no pierda dinero, es decir, para que sus ingresos sean iguales a sus costos. El punto de equilibrio se establece en unidades físicas o unidades monetarias. Para el caso particular de nuestros análisis financieros, por parte del humedal los ingresos van por la venta de cerdos finalizados y los no finalizados, la venta de plantas ornamentales y el agua residual tratada. El caso de la

PTAR, se descarta el ingreso de valor agregado de las plantas ornamentales.

Para hallar el punto de equilibrio es importante definir el margen de contribución, que es la diferencia entre el precio de venta del producto o servicio y los costos.

Margen de contribución por unidad producida = precio de venta - costo variable unitario.

El punto de equilibrio se calcula resolviendo:

$$\text{Punto de equilibrio del periodo} = \frac{\text{Total de costos fijos del periodo}}{\text{Margen de contribución unitaria}}$$

$$\text{Punto de Equilibrio Unidades} = \frac{\text{Costos Fijos X Unidades Producidas}}{\text{Ventas Totales - Costos Variables}}$$

$$\text{Punto de Equilibrio Monetario} = \frac{\text{Costos Variables}}{1 - (\text{Costos fijos} / \text{Ventas Totales})}$$

5.2.8.8 TIR, VAR y B/C

Tasa Interna de Rentabilidad (TIR) de una inversión está definida como la tasa de interés con la cual el Valor Actual Neto (VAN) es igual a cero.

$$\text{Rentabilidad} = \text{Utilidad} / \text{Costo de Inversión} \times 100$$

Índices para determinar la rentabilidad del plan del proyecto:

- La Relación Benéfico Costo: que deberá ser mayor a 1.
- La Tasa Interna de Retorno: deberá ser mayor a la tasa de interés a largo plazo del mercado.
- El Valor Actual Neto: que debe ser positivo.
- El plazo de recuperación descontado determina el momento en que se recupera el dinero de una inversión, teniendo en cuenta los efectos del paso del tiempo en el dinero.

VNA o VAN, es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión.

Al flujo de caja proyectado, se le hacen algunas modificaciones para llegar al flujo de fondos y luego se le aplica una tasa de descuento para estimar el valor del proyecto en el presente para calcular el Valor Neto (VAN).

El Valor Actual Neto = Valor Actualizado De Los Ingresos (Incluyendo el valor residual del proyecto) - Valor Actualizado de los ingresos (Incluyendo la

inversión inicial).

5.3 Resultados y discusiones

5.3.1 Parámetros físicos y químicos convencionales presentes en aguas contaminadas.

La temperatura óptima para eliminar contaminantes de diferentes tipos en humedales construidos es superior a 15°C (Kuschik et al., 2003); en este estudio la temperatura promedio en la entrada y salida de los sistemas se muestra en la Tabla 5.5. Se encontró una disminución significativa después de pasar por los mesocosmos ($p < 0.05$) en promedio en 3 °C, lo que pudo deberse al tiempo de retención hidráulica que se empleó en este estudio de acuerdo con Garzón et al., (2016).

Tabla 11. Características físicas y químicas de aguas residuales porcinas en la entrada y salida de los sistemas durante el estudio.

Parámetros	Influente	<i>Spathiphyllumblandum</i> TZN	Control TZN
Temperatura del agua (°C)	19.1±4.8	17.2±2.4	16.4±5.6
pH	7.4±0.1	7.6±0.7	7.8±1.4
OD (mg/L)	1.42±0.54	2.81±0.12	1.53±0.41
EC (μScm^{-1})	1628.48±36.6	1012.36±97.13	1053.51±75.91
	5		
SDT (mgL^{-1})	495.18±42.83	304.08±75.26	310.67±96.21

Nota. Los valores se dan como promedios \pm error estándar ($n = 80$); EC, conductividad eléctrica; OD, oxígeno disuelto; SDT, sólidos disueltos totales; TZN, tezontle.

5.3.2 Eliminación de contaminantes

Tabla 12. Concentración de contaminantes en granja porcina en la entrada y salida de las del sistema de tratamiento durante el estudio etapas.

Granja	Concentración de contaminantes	Salida del agua criaderos-entrada sedimentador		Salida del sedimentador- entrada biorreactor anaerobio		Salida del biorreactor anaerobio-Humedal artificial		Salida del Humedal artificial- entrada bioreactor híbrido		Salida del Biorreactor híbrido- entrada laguna de recolección		NOM-001-SEMARNAT-1996-RIOS					
		Concentración (mg/L)	% Eliminación	Concentración (mg/L)	% Eliminación	Concentración (mg/L)	% Eliminación	Concentración (mg/L)	% Eliminación	Concentración (mg/L)	% Eliminación	Uso en riego agrícola (A) mg/L	Uso Público Urbano(B) mg/L	Protección de vida acuática mg/L			
												P.M.	P.D	P.M.	P.D	P.M.	P.D
DQO(mg/L)	22,275	13,943.8	37.4	7111.34	50.8	3761.89	47.1	2,027.65	46.1	79.08	96.1	---	---	---	---	---	
DBO5(mg/L)	9,037	6,497.240	28.1	3118.67	47.6	1946.05	37.6	1,142.33	41.3	99.38	91.3	150	200	75	150	30	60
SST(mg/L)	12,584	6,379.670	49.3	3381.26	53.1	899.41	73.4	98.04	89.1	1.57	98.4	150	200	75	125	40	60
SSV(mg/L)	9,834	4,749.510	51.7	2707.27	56.4	587.47	78.3	50.52	91.4	2.73	94.6	---	---	---	---	---	---
NTK (mg/L)	1,775	1,339.74	24.5	790.46	58.9	605.49	23.4	344.32	43.1	13.43	96.1	40	60	40	60	15	25
N-NH4+	1,630	1,074.170	34.1	730.41	67.4	477.68	34.6	326.26	31.7	28.38	91.3	---	---	---	---	---	---
N-(NO2+NO3-)(mg/L)	0.50	0.163	67.3	0.121	70.5	0.099	17.6	0.123	-24.5	0.02	86.1	---	---	---	---	---	---
P Total (mg/L)	129	39.910	68.9	31.52	77.6	12.22	61.2	4.19	65.7	0.53	87.4	20	30	20	30	5	10
pH	7.0	7.5	---	7.5	---	7.4	---	7.8	---	7.8	---	---	---	---	---	---	---
Coliformes fecales	4.6 x 10 ⁸	1.1 x 10 ⁷	74.6	6.7 x 10 ⁶	42.2	4.6 x 10 ⁵	32.1	1.1 x 10 ⁴	23.9	0.2 x 10 ³	97.8	---	---	---	---	---	---
DBO/DQO	0.41	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Fuente: (Garzón-Zúñiga y Buelna, 2014)

P.D.= Promedio Diario; P.M.= Promedio Mensual.

5.3.2.1 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La DQO es uno de los principales parámetros que se emplean para medir el contenido de materia orgánica en aguas residuales y hacen referencia a la capacidad de las aguas para agotar el Oxígeno disuelto presente en ellas (Zhang et al., 2019). En la tabla 12, se presentan los resultados de concentraciones de DQO en sistemas durante el periodo de estudio.

5.3.2.2 Sólidos suspendidos totales (SST)

Los principales mecanismos de remoción de SST de las aguas residuales son por filtración o sedimentación y por acción de microorganismos presentes en los sustratos tanto aerobios como anaerobios (Bi et al., 2019). Las concentraciones iniciales de SST en este estudio clasifican de acuerdo a la CONAGUA (2014) como fuertemente contaminados ya que tienen una concentración e > 400 mg/L (En la tabla 12).

5.3.2.3 Nitrógeno amoniacal (N-NH4)

El comportamiento de la remoción de nitrógeno amoniacal se muestra en la en la tabla 12, se puede observar que durante cada etapa del sistema de tratamiento se evidencio

reducción de dicho contaminante.

5.3.2.4 Nitrógeno Total (TN)

Los resultados de TN en este estudio se muestran en la en la tabla 12. Se puede observar que durante cada etapa del sistema de tratamiento se evidenció reducción de dicho contaminante.

5.3.2.5 Fósforo Total (TP)

Los resultados de eliminación de Fósforo total se muestran en la tabla 12.

5.3.3 Modelo de economía circular implementado en granja barranquilla

El proceso de producción de la granja Barranquilla consume gran cantidad de agua y genera 100 m³/diario de agua residuales, 300 m³/mes, estas aguas residuales altamente contaminantes son tratadas mediante un sistema híbrido de tratamiento integrado por un sedimentador, un biorreactor anaerobio, un humedal construido y un biorreactor híbrido, con las aguas tratadas, se desarrolló un modelo de economía circular basado en la maximización de la eficiencia del recurso agua, con ello se enfocó a la reducción del consumo irracional del agua natural que se presenta en la producción porcina y fomentar en la granja porcina su reutilización en el proceso productivo Figura 23. Así mismo se alineo al ODS 6. Agua limpia y saneamiento de la agenda 2030.

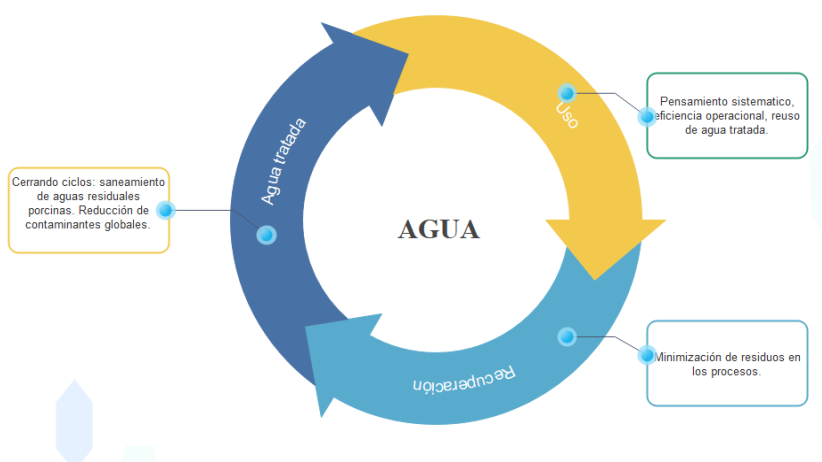


Figura 23. Sistema de economía circular maximización de la eficiencia del recurso agua

Inicialmente se trataron las aguas residuales generadas en el proceso por medio de un sistema híbrido con el cual se dio saneamiento al agua residual de 15 mil puercos anuales, es decir 5 mil puercos mensuales, produciendo 300 m³/día, la cual es reutilizada por la granja mediante un sistema de recirculación de agua implementado, el agua recirculada es utilizada como agua de utilidad o de proceso, para lavado de patios, chiqueros, sanitarios y riego agrícola. Generando 159 l/s de caudal con un tiempo de retención hidráulica de 3-5 días (Figura 24). posteriormente se fijaron indicadores de simbiosis agroindustrial e indicador de eficiencia en el uso de materias primas, reciclaje y valorización que permitieran medir el impacto de dichas acciones, cuantificar el impacto de la granja a nivel global vinculado con la consecución de reducción de consumo del recurso natural agua, el porcentaje de aguas residuales tratadas reutilizadas fue del 53.33%, lo que genero una reducción en el consumo de agua total equivalente al 46.67% y en el consumo de energía total de la granja del 33.54%. dicha métrica la detallamos en la Tabla 13.

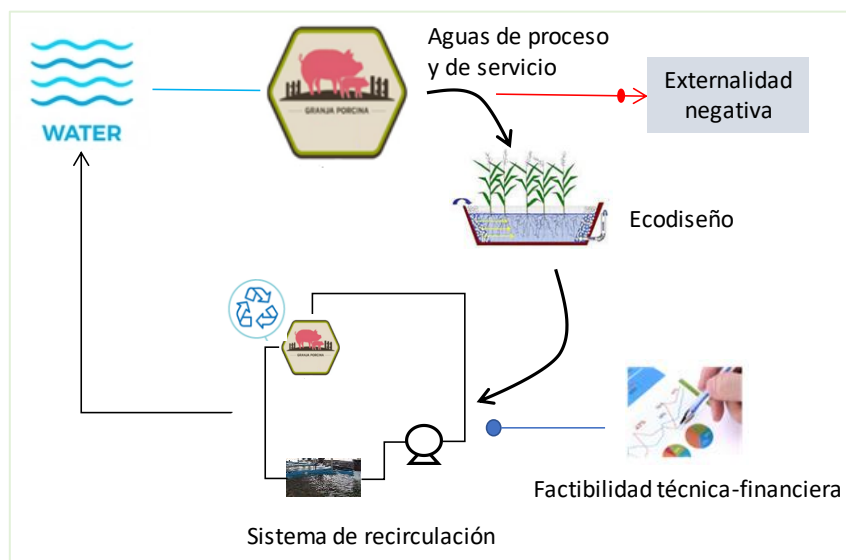


Figura 24. Sistema de economía circular implementado en granja barranquilla

Tabla 13. *Indicadores de medición economía circular granja porcina*

INDICADOR DE SIMBIOSIS AGROINDUSTRIAL	
Porcentaje de aguas residuales tratadas reutilizadas	53.33%
INDICADOR DE EFICIENCIA EN EL USO DE MATERIAS PRIMAS, RECICLAJE Y VALORIZACIÓN	
Reducción en el consumo de agua total	46.67%
Reducción en el consumo de energía total	33.54%

5.3.4 Evaluación económico financiera

5.3.4.1 Inversión inicial

El costo del sistema de tratamiento híbrido con sistema de recirculación de agua residual tratada es de \$1,500,000.00 (Un millón quinientos mil pesos 00/100 M.N.), como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. *Inversión inicial sistema híbrido de tratamiento.*

CONCEPTOS	UND.	CANT.	COSTO UNITARIO	MONTOS	GRANJA	FINANCIAMIENTO	TOTAL
ACTIVO FIJO							
Sedimentador	PZA	1	\$27,584.50	\$27,584.50	\$27,584.50	0.0	\$27,584.50
Biorreactor anaerobio Humedal construido	PZA	1	\$200,000.00	\$200,000.00	\$200,000.00	0.0	\$200,000.00
Biorreactor híbrido	PZA	1	\$882,017.51	\$882,017.51	\$882,017.51	0.0	\$882,017.51
Recirculación de agua tratada	PZA	1	\$198,016.00	\$198,016.00	\$198,016.00	0.0	\$198,016.00
	PZA	1	\$192,381.99	\$192,381.99	\$192,381.99	0.0	\$192,381.99
TOTAL ACTIVO FIJO					\$1,500,000.00	\$0.00	\$1,500,000.00

ACTIVO DIFERIDO						
Asesoría externa		1	\$29,250.00	\$29,250.00	\$29,250.00	\$29,250.00
TOTAL ACTIVO DIFERIDO					\$29,250.00	\$29,250.00
CAPITAL DE TRABAJO						
Agua residual	LOTE	12	\$2,500.00	\$30,000.00	\$30,000.00	\$30,000.00
Plantas Ornamentales	LOTE	1	\$576.00	\$576.00	\$576.00	\$576.00
Lechón	LOTE	15,000	\$950.00	\$14,250,000.00	\$14,250,000.00	\$14,250,000.00
TOTAL CAPITAL DE TRABAJO					\$14,280,576.00	\$14,280,576.00
TOTAL					\$15,809,826.00	\$15,809,826.00

Fuente. Elaboración propia con datos proporcionados por la granja porcina

5.3.4.2 Ingresos

Con el total de ingresos, se observa que son muy similares los valores debido a que solo en el Humedal se generan plantas ornamentales para una posterior venta en caso de existir o explotar este mercado (Tabla 15)

Tabla 15. Proyección de ingresos de la granja con sistema híbrido tratamiento.

CONCEPTO	UND	VENTA MENSUAL	PRECIO UNITARIO	VENTA MENSUAL	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
<i>canna Hybrids</i>	Pza	8	\$ 120.00	\$960.00	\$11,520.00	\$12,096.00	\$12,700.80	\$13,335.84	\$14,002.63
<i>Iris Germanica</i>	Pza	8	\$ 108.00	\$864.00	\$10,368.00	\$10,886.40	\$11,430.72	\$12,002.26	\$12,602.37
<i>Onthurium sp</i>	Pza	8	\$ 144.00	\$1,152.00	\$13,824.00	\$14,515.20	\$15,240.96	\$16,003.01	\$16,803.16
<i>Spathiphyllum wallisii</i>	Pza	8	\$ 96.00	\$768.00	\$9,216.00	\$9,676.80	\$10,160.64	\$10,668.67	\$11,202.11
<i>Zingiber Spectabile</i>	Pza	8	\$ 96.00	\$768.00	\$9,216.00	\$9,676.80	\$10,160.64	\$10,668.67	\$11,202.11
<i>Alpinia Purpurata</i>	Pza	8	\$ 108.00	\$864.00	\$10,368.00	\$10,886.40	\$11,430.72	\$12,002.26	\$12,602.37
Agua tratada	Lt	151200	\$ 0.25	\$37,800.00	\$453,600.00	\$476,280.00	\$500,094.00	\$525,098.70	\$551,353.64
Cerdos Finalizados de 110 kg	Pza	1155	\$ 5,500.00	\$6,354,274.75	\$76,251,296.94	\$80,063,861.79	\$84,067,054.88	\$88,270,407.62	\$92,683,928.00
Cerdos no desarrollados	Pza	61	\$ 5,000.00	\$304,032.28	\$3,648,387.41	\$3,830,806.78	\$4,022,347.12	\$4,223,464.48	\$4,434,637.70
TOTAL:					\$80,417,797.36	\$84,438,688.17	\$88,660,623.48	\$93,093,655.51	\$97,748,339.08

5.3.4.3 Costos de operación

Para el manejo del humedal construido no es necesaria la instalación eléctrica para bombeo del agua, pues es suministrada por gravedad desde los sedimentadores hacia el humedal, al ser adquirido el lote del lugar, no se generan costos de renta debido a que el valor del terreno fue adsorbido por el costo del sistema de tratamiento.

El humedal no genera salarios, solo costos de insumos al ser ingresados al humedal, el único costo es el de ingresar las plantas, aunque si se consideran los costos de energía eléctrica de la granja y del bio-reactor. Sin embargo, se calcula un costo de operación del sistema híbrido de tratamiento, con base en las especificaciones del constructor de al menos \$ 2,500 pesos mexicanos por un periodo mensual, como se observa en la Tabla 16 y Tabla 17.

Tabla 16. Costos de operación de la granja con sistema híbrido tratamiento

CONCEPTO	COSTO MENSUAL	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
Administrador general	\$ 5,000.00	\$ 60,000.00	\$ 63,000.00	\$ 66,150.00	\$ 69,457.50	\$ 72,930.38
Renta de local	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 0.00
Servicio de luz	\$ 750.00	\$ 9,000.00	\$ 9,450.00	\$ 9,922.50	\$ 10,418.63	\$ 10,939.56
Salarios (poda, colecta de flores y mantenimiento)	\$ 800.00	\$ 9,600.00	\$ 10,080.00	\$ 10,584.00	\$ 11,113.20	\$ 11,668.86
Mano de obra	\$ 35,000.00	\$ 420,000.00	\$ 441,000.00	\$ 463,050.00	\$ 486,202.50	\$ 510,512.63
Veterinario	\$ 4,500.00	\$ 54,000.00	\$ 56,700.00	\$ 59,535.00	\$ 62,511.75	\$ 65,637.34
Teléfono e internet	\$ 550.00	\$ 6,600.00	\$ 6,930.00	\$ 7,276.50	\$ 7,640.33	\$ 8,022.34
Lote de materias primas	\$ 8,136.00	\$ 97,632.00	\$ 102,513.60	\$ 107,639.28	\$ 113,021.24	\$ 118,672.31
Lechón	\$ 395,833.33	\$ 4,750,000.00	\$ 4,987,500.00	\$ 5,236,875.00	\$ 5,498,718.75	\$ 5,773,654.69
Alimentación	\$ 2,891,526.29	\$ 34,698,315.43	\$ 36,433,231.20	\$ 38,254,892.76	\$ 40,167,637.39	\$ 42,176,019.26
Vacunas	\$ 2,888,132.92	\$ 34,657,595.00	\$ 36,390,474.75	\$ 38,209,998.49	\$ 40,120,498.41	\$ 42,126,523.33
TOTAL	\$ 6,230,228.54	\$ 74,762,742.43	\$ 78,500,879.55	\$ 82,425,923.52	\$ 86,547,219.70	\$ 90,874,580.69

Tabla 17. Costos fijos y variables de la granja con sistema híbrido tratamiento.

COSTOS FIJOS	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
Administrador general	\$5,000.00	\$60,000.00	\$63,000.00	\$66,150.00	\$69,457.50
Renta de local	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Servicio de luz	\$750.00	\$9,000.00	\$9,450.00	\$9,922.50	\$10,418.63
Salarios (poda, colecta de Flores y mantenimiento)	\$800.00	\$9,600.00	\$10,080.00	\$10,584.00	\$11,113.20
Mano de obra	\$35,000.00	\$420,000.00	\$441,000.00	\$463,050.00	\$486,202.50
Veterinario	\$4,500.00	\$54,000.00	\$56,700.00	\$59,535.00	\$62,511.75
Teléfono e internet	\$550.00	\$6,600.00	\$6,930.00	\$7,276.50	\$7,640.33
TOTAL	\$46,600.00	\$559,200.00	\$587,160.00	\$616,518.00	\$647,343.90

COSTOS VARIABLES	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
Lote de materias primas					
	\$ 97,632.00	\$ 102,513.60	\$ 107,639.28	\$ 113,021.24	\$ 118,672.31
Lechón	\$ 4,750,000.00	\$ 4,987,500.00	\$ 5,236,875.00	\$ 5,498,718.75	\$ 5,773,654.69
Alimentación	\$ 34,698,315.43	\$ 36,433,231.20	\$ 38,254,892.76	\$ 40,167,637.39	\$ 42,176,019.26
Vacunas	\$ 34,657,595.00	\$ 36,390,474.75	\$ 38,209,998.49	\$ 40,120,498.41	\$ 42,126,523.33
TOTAL	\$ 74,203,542.43	\$ 77,913,719.55	\$ 81,809,405.52	\$ 85,899,875.80	\$ 90,194,869.59

COSTOS	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
Costos fijos	\$ 41,600.00	\$ 499,200.00	\$ 524,160.00	\$ 550,368.00	\$ 577,886.40
Costos variables	\$ 74,203,542.43	\$ 77,913,719.55	\$ 81,809,405.52	\$ 85,899,875.80	\$ 90,194,869.59
Costos totales	\$ 74,250,142.43	\$ 78,472,919.55	\$ 82,396,565.52	\$ 86,516,393.80	\$ 90,842,213.49

5.3.4.4 Depreciación de sistema híbrido de tratamiento

Como se puede visualizar en la Tabla 18 la depreciación de la planta de tratamiento asciende a un valor de \$750,000.00 pesos al final de su vida fiscal.

Tabla 18. Depreciación del sistema híbrido tratamiento.

ACTIVO FIJO	VALOR ORIGINAL	TASA	AÑOS	DEP ANUAL	VALOR RESCATE
Sedimentador	\$27,584.50	5%	10.00	\$1,379.23	\$13,792.25
Biorreactor anaerobio	\$200,000.00	5%	10.00	\$10,000.00	\$100,000.00
Humedal construido	\$882,017.51	5%	10.00	\$44,100.88	\$441,008.76
Biorreactor anaerobio y aerobio	\$198,016.00	5%	10.00	\$9,900.80	\$99,008.00
Recirculación de agua tratada	\$192,381.99	5%	10.00	\$9,619.10	\$96,191.00
TOTAL	\$1,500,000.00			\$75,000.00	\$750,000.00

5.3.4.5 Estado de resultados

Se realizó una proyección a 5 años del estado de resultados de la granja porcina una vez instalado el sistema de tratamiento híbrido, para el periodo proyectado en cada año se generaron ganancias y no se registraron pérdidas, generándose un aumento significativo de las mismas a partir del tercer año de proyección (Tabla 19).

Tabla 19. Estado de resultados del sistema híbrido tratamiento.

ESTADO DE RESULTADOS	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
VENTAS	\$80,417,797.36	\$84,438,688.17	\$88,660,623.48	\$93,093,655.51	\$97,748,339.08
COSTOS FIJOS	\$46,600.00	\$559,200.00	\$587,160.00	\$616,518.00	\$647,343.90
COSTOS VARIABLES	\$74,203,542.43	\$77,913,719.55	\$81,809,405.52	\$85,899,875.80	\$90,194,869.59
COSTOS TOTALES	\$74,250,142.43	\$78,472,919.55	\$82,396,565.52	\$86,516,393.80	\$90,842,213.49
UTILIDAD BRUTA	\$6,167,654.93	\$5,965,768.63	\$6,264,057.96	\$6,577,261.71	\$6,906,125.59
DEPRECIACION	\$75,000.00	\$78,750.00	\$82,687.50	\$86,821.88	\$91,162.97
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	\$6,092,654.93	\$5,887,018.63	\$6,181,370.46	\$6,490,439.83	\$6,814,962.62
IMPUESTOS	\$2,132,429.23	\$2,060,456.52	\$2,163,479.66	\$2,271,653.94	\$2,385,236.92
UTILIDAD DEL EJERCICIO	\$3,960,225.70	\$3,826,562.11	\$4,017,890.80	\$4,218,785.89	\$4,429,725.70

5.3.4.6 Punto de equilibrio, TIR, VAR y B/C.

El proyecto es viable de acuerdo con la evaluación realizada, con los

indicadores presentados, inicialmente se calculó el punto de equilibrio en pesos para una proyección de 5 años, dándonos para cada año el valor de las ventas como se puede ver en la Tabla 20, que para cada año si nos da menor al valor calculado resultaría una pérdida y si fuera mayor estaríamos ante una utilidad.

El VAN dio un valor mayor que cero, lo que significa que el proyecto además de la recuperación, las utilidades y ganancias, se tendrá al final de los 5 años una ganancia extra, un excedente de dinero como podemos apreciar en la Tabla 21. Se tiene un TIR mayor que la tasa de evaluación al ser $10\% > 28.30\%$, lo que indica viabilidad. Por último, la relación Beneficio-Costo es mayor que 1, lo que significa, que cada peso invertido se va a recuperar y se tendrá un excedente de 0.025 pesos (Tabla 21). Si es verdad que el porcentaje se ve mínimo, debido a las cantidades invertidas para la operación de la granja. El Retorno Neto nos arroja un valor de \$8,214,318.66 por lo que realmente es una ganancia sustancial.

Tabla 20. Punto de equilibrio en pesos del sistema híbrido tratamiento.

CONCEPTOS / AÑO	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
VENTAS	\$80,417,797.36	\$84,438,688.17	\$88,660,623.48	\$93,093,655.51	\$97,748,339.08
COSTOS FIJOS	\$46,600.00	\$559,200.00	\$587,160.00	\$616,518.00	\$647,343.90
COSTOS VARIABLES	\$74,203,542.43	\$77,913,719.55	\$81,809,405.52	\$85,899,875.80	\$90,194,869.59
COSTOS TOTALES	\$74,250,142.43	\$78,472,919.55	\$82,396,565.52	\$86,516,393.80	\$90,842,213.49
PUNTO DE EQUILIBRIO	\$603,044.03	\$7,236,527.43	\$7,598,352.88	\$7,978,269.65	\$8,377,182.32

Tabla 21. Calculo TIR, VAR y B/C del sistema híbrido tratamiento

AÑO	INGRESOS	COSTOS	FLUJO DE EFECTIVO	TASA (1+t) ⁻ⁿ	INGRESOS ACTUALIZADO	EGRESOS ACTUALIZADO	FLUJO DE EFECTIVO ACUMULADO
0	\$0.00	\$15,809,826.00	-\$15,809,826.00	1.00	\$0.00	\$15,809,826.00	-\$15,809,826.00
1	\$80,417,797.36	\$74,250,142.43	\$6,167,654.93	0.91	\$73,107,088.51	\$67,500,129.48	-\$9,642,171.07
2	\$84,438,688.17	\$78,472,919.55	\$5,965,768.63	0.83	\$69,784,039.81	\$64,853,652.52	\$68,830,748.48
3	\$88,660,623.48	\$82,396,565.52	\$6,264,057.96	0.75	\$66,612,038.68	\$61,905,759.22	\$151,227,314.00
4	\$93,093,655.51	\$86,516,393.80	\$6,577,261.71	0.68	\$63,584,219.32	\$59,091,861.08	\$237,743,707.80
5	\$97,748,339.08	\$90,842,213.49	\$6,906,125.59	0.62	\$60,694,028.03	\$56,405,867.39	\$328,585,921.29
TOTAL	\$444,359,103.60	\$428,288,060.7	\$16,071,042.81		\$333,781,414.35	\$325,567,095.68	

	\$8,214,318.66
VAN	18.66
TIR	28.30%
B/C	\$ 1.025

5.3.4.7 Análisis de ahorro estimado por la reutilización del agua tratada

Con el sistema de recirculación del agua tratada se logró preservar el recurso hídrico disponible en la granja porcina y renovarlo en el ciclo productivo, para lo cual tratamos las aguas residuales producidas en la granja y una vez tratadas las reutilizamos en el mismo sistema productivo. El agua tratada es reutilizada como agua de proceso o de utilidad para lavado de patios y chiqueros, uso de sanitarios, limpieza de las instalaciones. Gracias a dichas condiciones sostenibles de economía circular optimizamos las facturas de agua anualmente se genera un ahorro equivalente a \$268,800.00 y de energía de \$26,169.36 de la granja porcina como podemos apreciar en la Tabla 22 y Tabla 23. Si solo consideráramos el ahorro generado una vez implementado el sistema de recirculación podríamos ver la retribución de la inversión en un lapso de 5 años. De esta forma se redujo su costo de explotación y su impacto ambiental a \$ 294969.36

Tabla 22

Ahorro anual estimado factura agua con sistema de recirculación

Pago de factura agua sin sistema de recirculación agua Vr anual	Pago factura agua con sistema de recirculación agua/ Vr anual	Ahorro anual estimado/añual	Fuente
\$576,000.00	\$307,200.00	\$268,800.00	Elaboración propia con base en costos reales

Tabla 23

Ahorro anual estimado energía eléctrica con sistema de recirculación

Pago de factura luz sin sistema de recirculación/ Vr anual	Pago factura Luz con sistema de recirculación/ Vr anual	Ahorro anual estimado/añual	Fuente
\$78,027.84	\$51,858.48	\$26,169.36	Elaboración propia con base en costos reales

5.4 Conclusiones

Los resultados obtenidos tratando contaminantes como lo son DBO5, DQO, Coliformes fecales, SST, N-NH4, DDV, NTK, confirmaron que el sistema híbrido analizado funcionó de manera eficiente durante el primer periodo de evaluación, a pesar de la variabilidad de las concentraciones de contaminantes durante cada etapa del sistema de tratamiento. El sistema híbrido de tratamiento demuestra ser un método de tratamiento eficiente en la remoción de estos contaminantes presentes en aguas residuales porcinas; esto gracias al poder tan amplio de adaptación que éstos llegan a tener.

El presupuesto inicial de inversión es de \$1,500,000.00, dentro de lo que está considerado los activos fijos, los activos diferidos, sin contar el capital de trabajo (agua residual y plantas ornamentales típicas de la región durante la operación).

5.3 Referencias

Akratos, C. S., y Tsihrintzis, V. A. (2007). Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological engineering*, 29(2), 173-191.

Anderson, J. C., Carlson, J. C., Low, J. E., Challis, J. K., Wong, C. S., Knapp, C. W., y Hanson, M. L. (2013). Performance of a constructed wetland in Grand Marais, Manitoba, Canada: Removal of nutrients, pharmaceuticals, and antibiotic resistance genes from municipal wastewater. *Chemistry Central Journal*, 7(1), 54.

APHA-AWWA-WEF. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA.

Audino, F., Toro Santamaria, J. M., del Valle Mendoza, L. J., Graells, M., y Pérez-Moya, M.(2019). Removal of Paracetamol Using Effective Advanced Oxidation Processes. *International journal of environmental research and public health*, 16(3), 505.

Ávila, C., Reyes, C., Bayona, J. M., y García, J. (2013). Emerging organic contaminant removal depending on primary treatment and operational strategy in horizontal subsurface flow constructed wetlands: influence of redox. *Water research*,

47(1), 315- 325.

Ayele, Y., y Mamu, M. (2018). Assessment of knowledge, attitude and practice towards disposal of unused and expired pharmaceuticals among community in Harar city, Eastern Ethiopia. *Journal of pharmaceutical policy and practice*, 11(1), 27.

B. S. M. (2010). Ecotoxicological aspects related to the presence of pharmaceuticals in the aquatic environment. *Journal of hazardous materials*, 175(1-3), 45-95.

Bhatia, M., y Goyal, D. (2014). Analyzing remediation potential of wastewater through wetland plants: a review. *Environmental Progress y Sustainable Energy*, 33(1), 9-27.

Bi, R., Zhou, C., Jia, Y., Wang, S., Li, P., Reichwaldt, E. S., y Liu, W. (2019). Giving waterbodies the treatment they need: A critical review of the application of constructed floating wetlands. *Journal of environmental management*, 238, 484-498.

Boleda, M. R., Huerta-Fontela, M., Ventura, F., y Galceran, M. T. (2011). Evaluation of the presence of drugs of abuse in tap waters. *Chemosphere*, 84(11), 1601-1607.

Branchet, P., Castro, N. A., Fenet, H., Gomez, E., Courant, F., Sebag, D., ... y Cadot, E. (2019). Anthropogenic impacts on Sub-Saharan urban water resources through their pharmaceutical contamination (Yaoundé, Center Region, Cameroon). *Science of The Total Environment*, 660, 886-898.

Březinová, T. D., Vymazal, J., Koželuh, M., y Kule, L. (2018). Occurrence and removal of ibuprofen and its metabolites in full-scale constructed wetlands treating municipal wastewater. *Ecological Engineering*, 120, 1-5.

Brix, H., y Arias, C. A. (2005). The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. *Ecological engineering*, 25(5), 491-500.

Burgos, V., Araya, F., Reyes-Contreras, C., Vera, I., y Vidal, G. (2017). Performance of ornamental plants in mesocosm subsurface constructed wetlands under different organic sewage loading. *Ecological engineering*, 99, 246-255.

Carvalho PN, Araújo JL, Mucha AP, Basto MCP, Almeida CMR. Potential of constructed wetlands microcosms for the removal of veterinary pharmaceuticals from livestock wastewater. *Bioresour Technol* 2013;134:412–6.

Chen, Y., Vymazal, J., Březinová, T., Koželuh, M., Kule, L., Huang, J., y Chen, Z. (2016). Occurrence, removal and environmental risk assessment of pharmaceuticals and

personal care products in rural wastewater treatment wetlands. *Science of the Total Environment*, 566, 1660-1669.

Chízar-Fernández, C. (2009). *Plantas comestibles de Centroamérica* (No. F70/10794). Instituto Nacional de Biodiversidad, Heredia (Costa Rica). Encontrar en: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=ciagro.xisymethod=postyformato=2ycantidad=1yexpresion=mfn=005443>

Clara, M., Strenn, B., Gans, O., Martinez, E., Kreuzinger, N., y Kroiss, H. (2005). Removal of selected pharmaceuticals, fragrances and endocrine disrupting compounds in a membrane bioreactor and conventional wastewater treatment plants. *Water research*, 39(19), 4797-4807.

Conagua (2014) Estadísticas del Agua en México.

Dong, S., Scagel, C. F., Cheng, L., Fuchigami, L. H., y Rygiewicz, P. T. (2001). Soil temperature and plant growth stage influence nitrogen uptake and amino acid concentration of apple during early spring growth. *Tree Physiology*, 21(8), 541-547.

Dordio, A. V., Candeias, A. E., Pinto, A. P., da Costa, C. T., y Carvalho, A. P. (2009). Preliminary media screening for application in the removal of clofibric acid, carbamazepine and ibuprofen by SSF-constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35(2), 290-302.

Fedorka-Cray, P. J., Englen, M. D., Gray, J. T., Hudson, C., y Headrick, M. L. (2002). Programs for monitoring antimicrobial resistance. *Animal biotechnology*, 13(1), 43-54.

Fernández-Rubio, J., Rodríguez-Gil, J. L., Postigo, C., Mastroianni, N., de Alda, M.

Ferrer, S. J. C., Ortiz, M. G. R., Vergara, J. A. B., & Montiel, A. R. D. (2018). Eficiencia de un reactor biológico secuencial en el tratamiento de efluentes de una planta procesadora de productos cárnicos. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 23-33.

Fonseca, T. G., Morais, M. B., Rocha, T., Abessa, D. M. S., Aureliano, M., y Bebianno, M.

Foureaux, A. F. S., Reis, E. O., Lebron, Y., Moreira, V., Santos, L. V., Amaral, M. S., y Lange, L. C. (2019). Rejection of pharmaceutical compounds from surface water by nanofiltration and reverse osmosis. *Separation and Purification Technology*, 212, 171-179.

Ghauch, A., Tuqan, A. M., y Kibbi, N. (2012). Ibuprofen removal by heated persulfate in aqueous solution: a kinetics study. *Chemical engineering journal*, 197, 483-492.

Han, W., Luo, G., Luo, B., Yu, C., Wang, H., Chang, J., y Ge, Y. (2019). Effects of plant diversity on greenhouse gas emissions in microcosms simulating vertical constructed wetlands with high ammonium loading. *Journal of Environmental Sciences*, 77, 229- 237.

INEGI (Instituto Nacional de Geografía y Estadística). (2014). Banco de información económica Cuentas nacionales producto interno bruto por entidad federativa.

Iremonger, S., Liesner, R., y Sayre, R. (1995). Plant records from natural forest communities in the Bladen Nature Reserve, Maya Mountains, Belize. *Caribbean Journal of Science*, 31(1-2), 30-48.

J. (2017). Ecotoxicological assessment of the anticancer drug cisplatin in the polychaete *Nereis diversicolor*. *Science of the Total Environment*, 575, 162-172.

Kadlec, R. H., y Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands* (2^{da} edición). Boca Raton, USA: CRC Press.

Kasprzyk-Hordern, B., Dinsdale, R. M., y Guwy, A. J. (2009). The removal of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs during wastewater treatment and its impact on the quality of receiving waters. *Water research*, 43(2), 363-380.

Kusch, P., Wiessner, A., Kappelmeyer, U., Weissbrodt, E., Kästner, M., y Stottmeister, U. (2003). Annual cycle of nitrogen removal by a pilot-scale subsurface horizontal flow in a constructed wetland under moderate climate. *Water Research*, 37(17), 4236-4242.

L., Barceló, D., y Valcárcel, Y. (2019). Psychoactive pharmaceuticals and illicit drugs in coastal waters of North-Western Spain: Environmental exposure and risk assessment. *Chemosphere*.

Lassman, A. (2019). Evaluation of Wastewater Treatment by Microcosms of Vertical Subsurface Wetlands in Partially Saturated Conditions Planted with Ornamental Plants and Filled with Mineral and Plastic Substrates. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(2), 167.

Li, F., Lu, L., Zheng, X., Ngo, H. H., Liang, S., Guo, W., y Zhang, X. (2014). Enhanced nitrogen removal in constructed wetlands: effects of dissolved oxygen and step-

feeding. *Bioresource technology*, 169, 395-402.

Li, X., Ding, A., Zheng, L., Anderson, B. C., Kong, L., Wu, A., y Xing, L. (2018). Relationship between design parameters and removal efficiency for constructed wetlands in China. *Ecological engineering*, 123, 135-140.

Li, Y., Zhu, G., Ng, W. J., y Tan, S. K. (2014). A review on removing pharmaceutical contaminants from wastewater by constructed wetlands: design, performance and mechanism. *Science of the Total Environment*, 468, 908-932.

Liu, H., Hu, Z., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Liang, S., ... y Wu, H. (2016). Optimization on supply and distribution of dissolved oxygen in constructed wetlands: a review. *Bioresource technology*, 214, 797-805.

Marín-Muniz, J. L. (2016). Removal of wastewater pollutant in artificial wetlands implemented in Actopan, Veracruz, México. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(2), 553-563.

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

Martínez, N. B., Tejeda, A., Del Toro, A., Sánchez, M. P., y Zurita, F. (2018). Nitrogen removal in pilot-scale partially saturated vertical wetlands with and without an internal source of carbon. *Science of The Total Environment*, 645, 524-532.

Miège, C., Choubert, J. M., Ribeiro, L., Eusebe, M., y Coquery, M. (2008). Removal efficiency of pharmaceuticals and personal care products with varying wastewater treatment processes and operating conditions—conception of a database and first results. *Water Science and Technology*, 57(1), 49-56.

Molinos-Senante, M., Reif, R., Garrido-Baserba, M., Hernández-Sancho, F., Omil, F., Poch, M., y Sala-Garrido, R. (2013). Economic valuation of environmental benefits of removing pharmaceutical and personal care products from WWTP effluents by ozonation. *Science of the Total Environment*, 461, 409-415.

Montero-López, E. M., & Martínez-Rodríguez, R. (2015). Situación de la porcicultura a pequeña escala. *Alternativas para la producción porcina a pequeña escala. Universidad Autónoma de México, MEX*, 15-48.

Olguín, E. J., González-Portela, R. E., Sánchez-Galván, G., Zamora-Castro, J. E., y

Owen, T.(2010). Contaminación de ríos urbanos: El caso de la subcuenca del río Sordo en Xalapa, Veracruz, México. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*, 1(2), 178-190.

Quesada-Peñate, I., Jáuregui-Haza, U. J., Wilhelm, A. M., y Delmas, H. (2009). Contaminación de las aguas con productos farmacéuticos. Estrategias para enfrentar la problemática. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 40(3).

Quesada-Peñate, I., Jáuregui-Haza, U. J., Wilhelm, A. M., y Delmas, H. (2009). Contaminación de las aguas con productos farmacéuticos. Estrategias para enfrentar la problemática. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 40(3).

Repice, C., Dal Grande, M., Maggi, R., y Pedrazzani, R. (2013). Licit and illicit drugs in a wastewater treatment plant in Verona, Italy. *Science of the Total Environment*, 463, 27-34.

Roloff, J. (1998). Drugged Waters. *Science News*, 153, 187–189.

Sánchez Juárez, I. L., & Moreno Brid, J. C. (2016). El reto del crecimiento económico en México: industrias manufactureras y política industrial. *Revista finanzas y política económica*, 8(2), 271-299.

Sandoval, L., Marín-Muñiz, J. L., Zamora-Castro, S. A., Sandoval-Salas, F., y Alvarado

Sandoval-Herazo, L. C., Alvarado-Lassman, A., Marín-Muñiz, J. L., Méndez-Contreras, J. M., y Zamora-Castro, S. A. (2018). Effects of the Use of Ornamental Plants and Different Substrates in the Removal of Wastewater Pollutants through Microcosms of Constructed Wetlands. *Sustainability*, 10(5), 1594.

Santos, L. H., Araújo, A. N., Fachini, A., Pena, A., Delerue-Matos, C., y Montenegro, M. C.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (20 DE JULIO 2020) https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/564336/Inventario_2019_porcino.pdf
http://infosiap.siap.gob.mx/repoAvance_siap_gb/pecAvanceEdo.jsp

Shen, Y., Zhuang, L., Zhang, J., Fan, J., Yang, T., y Sun, S. (2019). A study of ferric-carbon micro-electrolysis process to enhance nitrogen and phosphorus removal efficiency in subsurface flow constructed wetlands. *Chemical Engineering Journal*, 359, 706-712.

Tejeda, A., Torres-Bojorges, Á. X., y Zurita, F. (2017). Carbamazepine removal in

three pilot-scale hybrid wetlands planted with ornamental species. *Ecological Engineering*, 98, 410-417.

Ternes, T. A., Herrmann, N., Bonerz, M., Knacker, T., Siegrist, H., y Joss, A. (2004). A rapid method to measure the solid–water distribution coefficient (K_d) for pharmaceuticals and musk fragrances in sewage sludge. *Water research*, 38(19), 4075-4084.

Truu, J., Truu, M., Espenberg, M., Nõlvak, H., y Juhanson, J. (2015). Phytoremediation and plant-assisted bioremediation in soil and treatment wetlands: a review. *The OpenBiotechnology Journal*, 9(1).

Veras, T. B., de Paiva, A. L. R., Duarte, M. M. M. B., Napoleão, D. C., y Cabral, J. J. D. S.P. (2019). ANALYSIS OF THE PRESENCE OF ANTI-INFLAMMATORIES DRUGS IN SURFACE WATER: A CASE STUDY IN BEBERIBE RIVER-PE, BRAZIL. *Chemosphere*.

Verlicchi, P., Al Aukidy, M., y Zambello, E. (2012). Occurrence of pharmaceutical compounds in urban wastewater: removal, mass load and environmental risk after a secondary treatment—a review. *Science of the total environment*, 429, 123-155.

Villalobos, A., & Díaz, J. A. (2018). Capítulo 4. Percepciones y creencias sobre el ambiente y los problemas ambientales en Costa Rica. *Avances hacia una política y economía sostenible en el contexto del cambio climático en Costa Rica*, 95.

Vyas, N., Turner, A., y Sewell, G. (2014). Platinum-based anticancer drugs in waste waters of a major UK hospital and predicted concentrations in recipient surface waters. *Science of the Total Environment*, 493, 324-329. Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the total environment*, 380(1-3), 48-65.

Wiebner, A., Kappelmeyer, U., Kuschik, P., Kastner, M., (2005). Influence of the redox condition dynamics on the removal efficiency of a laboratory-scale constructed wetland. *Water Research*, 29, 248–256.

Williams, H. D., Trevaskis, N. L., Charman, S. A., Shanker, R. M., Charman, W. N., Pouton, C. W., y Porter, C. J. (2013). Strategies to address low drug solubility in discovery and development. *Pharmacological reviews*, 65(1), 315-499.

Wu, S., Vymazal, J., y Brix, H. (2019). Critical Review: Biogeochemical Networking of Iron, Is It Important in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment?. *Environmental science y technology*.

Zamora-Castro, S.A.; Marín-Muñiz, J.L.; Sandoval, L.; Vidal-Álvarez, M.; Carrión-Delgado, J.M. Effect of Ornamental Plants, Seasonality, and Filter Media Material in Fill-and-Drain Constructed Wetlands Treating Rural Community Wastewater. *Sustainability* **2019**, *11*, 2350.

Zhang, D. Q., Gersberg, R. M., Zhu, J., Hua, T., Jinadasa, K. B. S. N., y Tan, S. K. (2012). Batch versus continuous feeding strategies for pharmaceutical removal by subsurface flow constructed wetland. *Environmental pollution*, *167*, 124-131.

Zhang, D. Q., Hua, T., Gersberg, R. M., Zhu, J., Ng, W. J., y Tan, S. K. (2013). Carbamazepine and naproxen: fate in wetland mesocosms planted with *Scirpus validus*. *Chemosphere*, *91*(1), 14-21.

Zhang, D. Q., Tan, S. K., Gersberg, R. M., Sadreddini, S., Zhu, J., y Tuan, N. A. (2011). Removal of pharmaceutical compounds in tropical constructed wetlands. *Ecological Engineering*, *37*(3), 460-464.

Zhang, D., Luo, J., Lee, Z. M. P., Gersberg, R. M., Liu, Y., Tan, S. K., y Ng, W. J. (2016). Ibuprofen removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands: treatment performance and fungal community dynamics. *Environmental technology*, *37*(12), 1467-1479.

Zhang, L., Lv, T., Zhang, Y., Stein, O. R., Arias, C. A., Brix, H., y Carvalho, P. N. (2017). Effects of constructed wetland design on ibuprofen removal—A mesocosm scale study. *Science of the Total Environment*, *609*, 38-45.

Zhang, L., Lv, T., Zhang, Y., Stein, O. R., Arias, C. A., Brix, H., y Carvalho, P. N. (2017). Effects of constructed wetland design on ibuprofen removal—A mesocosm scale study. *Science of the Total Environment*, *609*, 38-45.

Zhang, Y., Liu, X., Fu, C., Li, X., Yan, B., y Shi, T. (2019). Effect of Fe²⁺ addition on chemical oxygen demand and nitrogen removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Chemosphere*, *220*, 259-265.

Zhindón, R., Cartuche, D., España, P., & Maldonado, M. (2018, July). Evaluación ambiental de aguas residuales: estero y manglar el macho de la ciudad de Machala. In *Conference Proceedings UTMACH* (Vol. 2, No. 1).

Zhu, L., Wang, L., & Xu, Y. (2017). Chitosan and surfactant co-modified montmorillonite: A multifunctional adsorbent for contaminant removal. *Applied Clay*

Science, 146, 35-42.

Zurita, F., Belmont, M. A., De Anda, J., y Cervantes-Martinez, J. (2008). Stress detection by laser-induced fluorescence in *Zantedeschia aethiopica* planted in subsurface-flow treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 33(2), 110-118.

Zurita, F., Del Toro-Sánchez, C. L., Gutierrez-Lomelí, M., Rodriguez-Sahagún, A., Castellanos-Hernandez, O. A., Ramírez-Martínez, G., y White, J. R. (2012). Preliminary study on the potential of arsenic removal by subsurface flow constructed mesocosms. *Ecological engineering*, 47, 101-104.

Conclusiones y recomendaciones

Esta investigación involucro un estudio preliminar de revisión de literatura sobre el estado actual de tratamiento de las aguas residuales porcinas en México, los sistemas de tratamiento empleados en la actualidad y las oportunidades de implementar modelos de economía circular que permitan maximizar la eficiencia de recursos, minimizar los residuos y fomentar la sostenibilidad. Se evidencio que hace falta una mayor cobertura de sistemas de tratamiento de aguas residuales porcinas en México y que no se reportan sistemas de tratamiento eco-tecnológicos que vinculen modelos de economía circular para el aprovechamiento de las aguas tratadas mediante estos sistemas en los mismos procesos productivos. Así mismo el implementar un modelo de economía circular en el caso de una microempresas porcinas, a través del tratamiento de las aguas residuales en un sistema híbrido de humedales construidos y biorreactores, permite reducir la contaminación reduciendo así su impacto ambiental y contribuyendo a la protección del medio ambiente, generar energía renovable sostenibilidad y la eficiencia de recursos, lo que reduce la dependencia de fuentes de energía convencionales y disminuye la huella de carbono; así mismo obtener fertilizantes orgánicos del proceso de depuración, ayuda a cerrar el ciclo de nutrientes y evita la necesidad de fertilizantes químicos, promoviendo un enfoque más sostenible de la agricultura.

Posterior a la revisión bibliográfica se realizó un estudio a nivel mesocosmos que permitió evaluar el diseño experimental de un humedal construido para el tratamiento de aguas residuales porcinas para posteriormente escalar la ecotecnología a nivel real. El experimento demostró que el uso de humedales construidos para tratar aguas residuales de la agroindustria porcina es un novedoso sistema de tratamiento económico, ecológico a considerar en futuros diseños de humedales construidos, la vegetación empleada *Canna Hybrids* y *Iris germánica*, favorecen la eliminación de contaminantes y pueden ser empleadas como vegetación en el tratamiento de aguas residuales porcinas. Por otra parte, estudios con mayor periodo de duración son requeridos para análisis los posibles problemas que puedan presentar estos sistemas en cuanto a saturación, renovación de vegetación, y diferentes condiciones de operación, así como su evaluación en sistemas híbridos que permitan conocer

si el proceso es igual de eficiente sin necesidad de diluir el agua. En esta investigación se encuentra una brecha tecnológica en el campo de humedales construidos que posibilita el diseño de sistemas híbridos de biorreactor anaerobios- aerobios en humedales construidos sembrado con plantas a nivel real con dos propósitos: mejorar la eficiencia de remoción; y proponer una metodología eco- tecnológica para aprovechar el recurso energético generado por la carga de sólidos contenido en la carga orgánica que arrastra el efluente de descarga del proceso de engorda de cerdos.

Con ayuda de la información recolectada, se eligieron los fundamentos y características para el diseño y desarrollo del modelo de economía circular de la granja porcina, mediante un sistema híbrido de tratamiento. El sistema de economía circular se implementó posterior al desarrollo tecnológico del sistema híbrido de tratamiento integrado por un biorreactor anaerobio, un humedal construido y un biorreactor híbrido para el tratamiento de aguas residuales porcinas a gran escala en condiciones ambientales reales, atendiendo la problemática de contaminación de efluentes en la industria porcina en un caso real de la comunidad de Tlacotepec de Mejía, en el estado de Veracruz-México, la cual se caracterizaba por una alta carga orgánica de contaminantes con arrastre de sólidos fecales. El caudal tratado es de 100,00 litros diarios de efluentes de la descarga del proceso productivo, los resultados demostraron la eficiencia de remoción de contaminantes en el efluente porcino superior al 90%, en parámetros de DQO, SST, N-NH₄, NTK y CF totales en la entrada y salida de los sistemas, hasta el momento se han obtenido resultados satisfactorios con las pruebas de desempeño realizadas y los resultados se encuentran apegados a los límites permisibles de la norma NOM-001-SEMARNAT-1996-RIOS. En cuanto a la evaluación de la vegetación en este estudio se reporta por primera vez la producción total de biomasa tanto aérea como subterránea de un humedal construido a gran escala de un sistema que trata aguas como un sistema terciario de tratamiento de aguas residuales porcinas en una granja a escala real. Los resultados de este estudio demuestran que los humedales, plantados con *Typha latifolia* y *Canna hybrids*, representan una opción para reducir la carga contaminante de las aguas residuales porcinas, demostrando ser un organismo útil para la producción de biomasa vegetal y el mejoramiento de la calidad del agua en un humedal construido que es una actividad muy extendida en las zonas rurales de países en desarrollo como México.

El modelo de economía circular de la granja porcina se desarrolló entorno a la reutilización del agua en el sistema de producción porcino. El agua tratada en el sistema híbrido es reutilizada en el sistema de producción porcino. Esto reduce la demanda de agua natural y disminuye la exposición de los cerdos a contaminantes y patógenos. Además, se reduce la cantidad de agua descargada como efluente, disminuyendo el impacto ambiental. Al reutilizar el agua tratada y generar energía renovable, se pueden obtener ahorros significativos en los costos de agua y energía, lo que contribuye a la viabilidad financiera del modelo.

La factibilidad técnica y económica fue evaluada como un modelo de economía circular con fines de reutilización del agua en el sistema mismo de la empresa porcina, y se demostró que la recirculación del agua tratada en la granja porcina es altamente beneficioso tanto para la preservación del recurso hídrico como para la eficiencia económica y ambiental. Al reutilizar las aguas residuales en el ciclo productivo de la granja porcina, se ha logrado optimizar el consumo de agua y reducir los costos asociados al consumo de energía eléctrica y consumo del agua. El análisis económico de este modelo de recirculación demostró un ahorro anual de \$268,800.00 en agua y \$26,169.36 en energía. En este sentido, la inversión en el sistema de recirculación ha demuestra una rápida retribución en tan sólo 5 años, al reducir el costo de explotación y el impacto ambiental en \$294,969.36. Estos resultados respaldan la adopción de prácticas sostenibles basadas en la economía circular, que no solamente benefician a la granja porcina, sino que también contribuyen a la protección del medio ambiente.

Los resultados obtenidos en los experimentos anteriores han permitido demostrar la viabilidad de diseñar y desarrollar sistemas eco-tecnológicos como este, se cumplió con la hipótesis planteada la implementación del modelo de economía circular en la microempresa porcina a través del tratamiento de los efluentes en sistemas híbridos de biorreactor y humedales construidos permitió la reutilización del agua en el sistema de producción, generación de energía renovable, mejora de la calidad del agua y ahorro de costos. Este enfoque favorece la sostenibilidad y la eficiencia de recursos en la producción porcina, en este sentido la hipótesis se cumple dado que se logró optimizar el uso de agua en lo esperado sin diferencias significativas como se expresan en los capítulos anteriores.

Se recomienda que en futuros estudios se mejore el modelo de economía circular

implementado en la granja que se agregue la generación de energía renovable, el biogás producido en el biorreactor puede ser utilizado como una fuente de energía renovable, lo que permitiría evaluar la reducción de la dependencia de fuentes convencionales de energía y la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y la huella hídrica; así mismo la obtención de fertilizantes orgánicos, los residuos líquidos resultantes del tratamiento en los biorreactores son ricos en nutrientes y pueden ser utilizados como fertilizantes orgánicos que pueden ser utilizados en la agroindustria.

Al final de este proyecto, las siguientes contribuciones han sido identificadas:

1. Aportes Sociales: reutilización de agua para servicios del proceso porcícola y producción agrícola. Alternativa/Estrategia económica que reaprovecha el agua para una actividad económica.
2. Aportaciones tecnológicas: la eco-tecnología del sistema híbrido del humedal construido, los parámetros de operación del sistema del humedal construido, la metodología del tratamiento de efluentes porcinos en un sistema híbrido de humedal construido con biorreactor aerobio-anaerobio.
3. Aportes científicos: metodología para la generación de biogás de manera eficiente y sustentable basado en un sistema híbrido de biorreactor y humedales construidos.
Impacto ambiental, se aporta un modelo eco-tecnológico para un tratamiento de efluentes con alta carga orgánica.

Los resultados obtenidos han sido presentados en cuatro congresos nacionales y dos internacionales, se participó en un coloquio. Derivado de los resultados obtuvimos constancia de innovación y desarrollo tecnológico expedida por la granja porcina y se han publicado un artículo JCR revista Fermentation y un artículo CONACYT. En otro ámbito académico se publicó artículo JCR revista International Journal Environmental Research and Public Health y publicado capítulo de libro. Todas las evidencias de estos productos son acordes al tema de tesis y se presentan a continuación.

Productos de esta Tesis

- Ponencia

<p>Formado Por ID FIRMA</p> <p>Fecha PAGINA</p> <p>05/04/2023 1/1</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="display: flex; align-items: center;"> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Programa para el Fortalecimiento de los Sistemas de Ciencia y Tecnología FORCYT - RIARES</p> </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;"> <p>La Red Iberoamericana de Investigación en Agricultura Resiliente, Equitativa y Sostenible (RIARES) a través de la Universidad de Almería (UAL) Otorga el presente</p> <h1 style="margin: 0;">RECONOCIMIENTO</h1> <p style="margin: 0;">a</p> <h2 style="margin: 0; background-color: #e0e0e0; padding: 5px; display: inline-block;">Mayerlín Sandoval Herazo</h2> </div> <p style="text-align: center; margin-top: 20px;">Por su participación como Autor de correspondencia y Presentador oral en el Tercer Seminario Internacional RIARES sobre “Sistemas de producción agrícola y sostenibilidad, cosecha y postcosecha”, con su Propuesta de investigación virtual: “<i>Modelo de economía circular en microempresa porcina con fines de reutilización del agua tratada en sistemas híbridos de biorreactor y humedales construidos.</i>”, realizado en la Universidad de Almería (UAL) España, entre el 27 y 30 de marzo de 2023.</p> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;"> <p>Dr. José Miguel Guzmán Palomino Coordinador General Red RIARES (OEI-UE)</p> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;"> <p>UNIVERSIDAD DE ALMERÍA</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Uptc Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>UASLP Universidad Autónoma de San Luis Potosí</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>UNAP UNIVERSIDAD ARTURO PRAT DEL ESTADO DE CHILE</p> </div> </div>
---	--

Artículo JCR revista International Journal Environmental Research and Public Health



International Journal of
*Environmental Research
and Public Health*



Review

A Review of the Presence of SARS-CoV-2 in Wastewater: Transmission Risks in Mexico

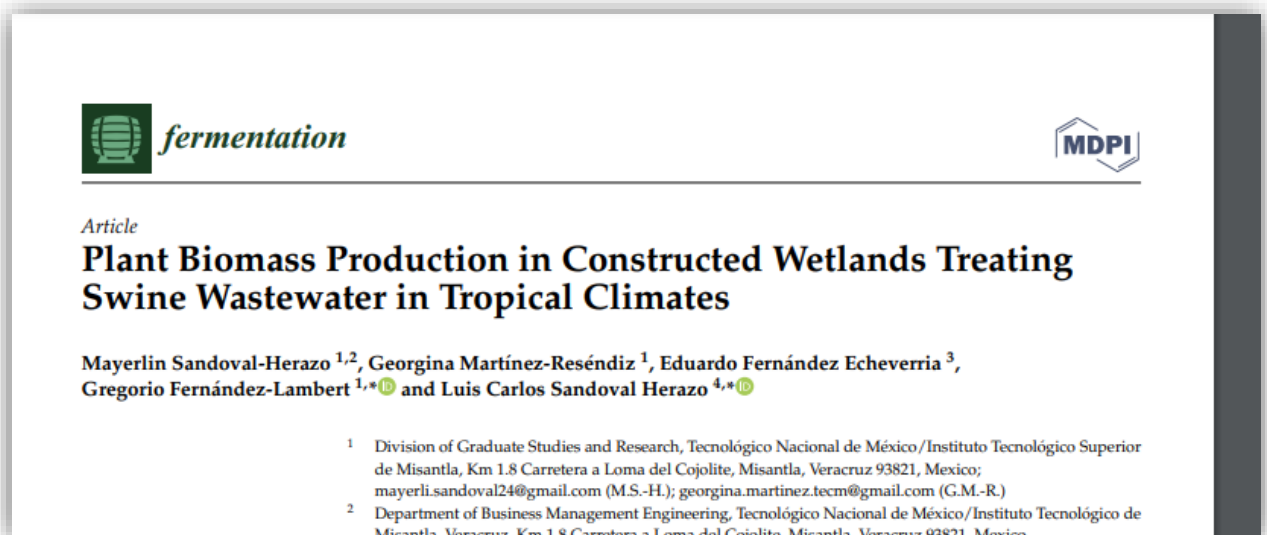
Mayerlín Sandoval Herazo ^{1,2,†}, Graciela Nani ^{1,2}, Florentina Zurita ³, Carlos Nakase ⁴, Sergio Zamora ⁵, Luis Carlos Sandoval Herazo ^{2,*} and Erick Arturo Betanzo-Torres ^{6,*}

¹ Department of Engineering in Business Management, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Misantla, Misantla 93821, Veracruz, Mexico; mayerli.sandoval24@gmail.com (M.S.H.); eenanir@itsm.edu.mx (G.N.)

- Ponencia



- Artículo JCR revista Fermentation



- Conferencia semana tecnológica 2021



- Constancia de innovación y desarrollo tecnológico.



Amatlán, Tlaxcoatepec de Mejía, Ver., a 8 de enero de 2019

ASUNTO: CONSTANCIA DE INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

A QUIEN CORRESPONDA

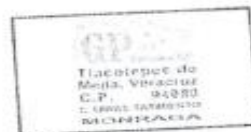
Mediante la presente, la empresa "Granja Barranquilla" dedicada a la cría y engorde de ganado porcícola en el municipio de Tlaxcoatepec de Mejía, Veracruz, hace constar de la innovación y aplicación de desarrollo tecnológico, por el proyecto denominado "Desarrollo de sistemas híbridos de Biorreactor y humedad artificial para el tratamiento de aguas residuales porcícolas", cuyas aplicaciones son la remoción de contaminantes y sólidos suspendidos en aguas residuales porcícolas producidas por las actividades pecuarias realizadas. El proyecto estuvo a cargo del Dr. Luis Carlos Sandoval Herazo como responsable técnico del proyecto y al Dr. Gregorio Fernández Lambert como colaborador, docentes de la División de Estudios de Posgrado en Investigación en Tecnológico Nacional de México Campus Misantla y la Mil Mayerlin Sandoval Herazo, estudiante del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, donde se desprende parte de la investigación para llevar a cabo el tema de Tesis:

"Modelo de economía circular en microempresas porcinas para determinar la factibilidad técnica y financiera del tratamiento de sus efluentes en sistemas híbridos de Biorreactor y humedad artificial, con fines de aprovechamiento en cultivos de café."

Agradecemos muy particularmente el cumplimiento de los objetivos planeados, así como las acciones realizadas, se extiende la presente para los fines que a los interesados convenga a los veinte días de noviembre de dos mil veinte.

ATENTAMENTE

C. Urias Sarmiento Monruga



- **Artículo CONACYT.**

Se redactó el artículo “Evaluación del desempeño de humedales construidos verticales parcialmente saturados para el tratamiento de aguas residuales porcinas”, el cual fue publicado por Tropical and Subtropical Agroecosystems (Q4/IF de 0.15/ISSN: 1870-0462/0.287-CONACYT).

Tropical and Subtropical Agroecosystems 23 (2020): #38

Sandoval-Herazo et al., 2020



EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS VERTICALES PARCIALMENTE SATURADOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PORCINAS †

[EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF VERTICAL PARTIALLY SATURATED CONSTRUCTED WETLANDS FOR SEWAGE TREATMENT SWINE]

Mayerlin Sandoval-Herazo¹, Graciela Nani², Saúl Rivera¹,
Gregorio Fernández-Lambert¹ and Luis Sandoval^{1*}

- **Estancia académica**

 **UACJ** Coordinación General de Investigación y Posgrado
UACJ-Investigación

Ciudad Juárez, a 1 de Marzo de 2021.

A QUIEN CORRESPONDA
Presente


Por este medio hago constar que la Doctorante: Mayerlin Sandoval Herazo (Cuarto Semestre) proveniente del Instituto Tecnológico Superior de Misantla y con tema de estancia virtual.

Tema: Diseño e implementación de un Modelo Inteligente de Economía Circular.

Realizo durante siete semanas una estancia virtual en el Doctorado en Tecnología (PNPC), y entregó un reporte de actividades de la misma.

Quedo de usted para cualquier información adicional.

Atentamente



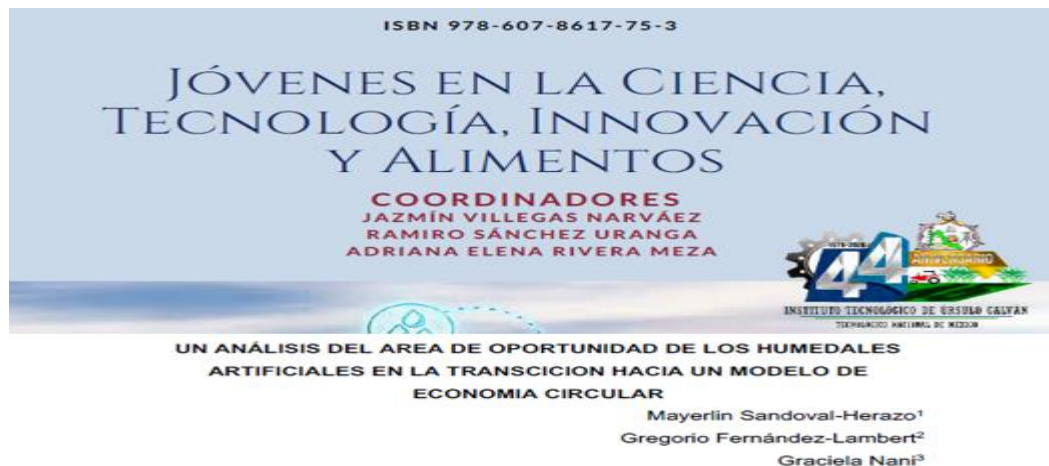
Dr. Alberto Ochoa Zezzatti
Doctorado en Tecnología (PNPC)
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
SNI Nivel 2

- **Participación congreso**



- **Capítulo de libro.**

Se redactó capítulo de libro “Un análisis del área de oportunidad de los humedales artificiales en la transición hacia un modelo de economía circular”, el cual fue publicado en el libro Jóvenes en la ciencia, tecnología, innovación y alimentos, editorial ©Red Iberoamericana De Academias De Investigación A.C. 2020 (ISBN 978-607-8617-75-3)



- **Constancia Primer coloquio Doctoral en Ciencias de la Ingeniería 2021.**



- **Congreso Internacional de Ingenierías “Agenda 2030”.**

Cartel: “Aproximación de la economía circular en la recuperación de agua de efluentes en beneficio de cultivos agrícolas”. Congreso Internacional de Ingenierías, Agenda 2030 (CIIA 2019), llevado a cabo del 7 al 9 de noviembre de 2019, que fue presentado en la ciudad de Misantla, Ver. México.

