



CIENCIAS DE LA INGENIERIA - F I U A C A M

INGENIERÍA
CIVIL

INGENIERÍA
COSTERA

INGENIERÍA
AMBIENTAL

INGENIERÍA
EN ENERGÍA

INGENIERÍA
MECATRÓNICA

INGENIERÍA
EN SISTEMAS

INGENIERÍA
EN MATERIALES

Vol. 1 Núm 1
Enero - Junio 2025



Ciencias de la Ingeniería - FIUACAM es una publicación digital científica de la Facultad de Ingeniería, UACAM, Año 1, No. 1, Enero - Junio 2025. Es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma de Campeche, Campus V, Predio s/n por Avenida Ing. Humberto Lanz Cardénas y Fracc. Ecológico Ambiental Siglo XXIII, Colonia Ex Hacienda Kalá, C.P. 24085. San Francisco de Campeche, Campeche, México, Tel. (981) 81 19800 etx. 3030100, <https://cienciasdelaingenieria.uacam.mx/index.php/cdi/index>, roacanul@uacam.mx. Editor responsable: Dr. Román Alejandro Canul Turrizza. Reserva de Derechos al uso Exclusivo: en trámite, ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Facultad de Ingeniería UACAM, Dr. Román Alejandro Canul Turrizza, Campus V, Predio s/n por Avenida Ing. Humberto Lanz Cardénas y Fracc. Ecológico Ambiental Siglo XXIII, Colonia Ex Hacienda Kalá, C.P. 24085, Ciudad de San Francisco de Campeche, México

fecha	de	la	última	modificación	Junio	2025
-------	----	----	--------	--------------	-------	------

REVISTA CIENCIAS DE LA INGENIERÍA - FIUACAM

Revista de la Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, México

Consejo Editorial de la Universidad Autónoma de Campeche

Dr. José Abud Flores

Rector - Universidad Autónoma de Campeche, México

Mtro. Fernando Medina Blum

Secretario General - Universidad Autónoma de Campeche, México

Dr. Domingo Concepción Flores Hernández

Director General de Posgrado de Investigación - Universidad Autónoma de Campeche, México

Dra. Julia Ramos Miranda

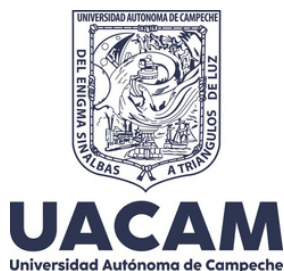
Coordinadora General Académica - Universidad Autónoma de Campeche, México

Lic. Enna Verónica Lara Gamboa

Coordinadora General de Vinculación y Extensión Académica - Universidad Autónoma de Campeche, México

MAC. Francisco Javier Barrera Lao

Director Académico de la Facultad de Ingeniería - Universidad Autónoma de Campeche



DIRECCIÓN:

Av. Agustín Melgar S/N entre Calle 20 y Juan de la Barrera. Col. Buenavista. CP 24039

Los criterios expuestos en los artículos son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no reflejan necesariamente la opinión de la dirección de la revista.

Ciencias de la Ingeniería - FIUACAM es una publicación digital científica de la Facultad de Ingeniería, UACAM. Es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma de Campeche, Campus V, Predio s/n por Avenida Ing. Humberto Lanz Cardénas y Fracc. Ecológico Ambiental Siglo XXIII, Colonia Ex Hacienda Kalá, C.P. 24075, San Francisco de Campeche, Campeche, México, Tel. (981) 81 19800 ext. 3030100, <https://cienciasdelaingenieria.uacam.mx/index.php/cdi/index>, roacanul@uacam.mx. Editor responsable: Dr. Román Alejandro Canul Turriza. Reserva de Derechos al uso Exclusivo: en trámite, ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Facultad de Ingeniería UACAM, Dr. Román Alejandro Canul Turriza, Campus V, Predio s/n por Avenida Ing. Humberto Lanz Cardénas y Fracc. Ecológico Ambiental Siglo XXIII, Colonia Ex Hacienda Kalá, C.P. 24085, Ciudad de San Francisco de Campeche, México fecha de la última modificación Junio 2025

Ciencias de la Ingeniería / Vol 1 / N° 1 / 2025 / ISSN EN TRAMITE





REVISTA CIENCIAS DE LA INGENIERÍA - FIUACAM

Revista de la Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, México

EDITOR RESPONSABLE:

DR. Román Alejandro Canul Turriza / Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de Campeche, México
roacanul@uacam.mx

DR. Oscar de Jesús May Tzuc / Facultad de Ingeniería, Universidad
Autónoma de Campeche, México
oscajmay@uacam.mx

DR. Mario Antonio Jiménez Torres / Centro de Investigaciones
Jurídicas, Universidad Autónoma de Campeche, México
majimene@uacam.mx

APOYO EDITORIAL - INFORMATICA

Dr. Joel C. Flores Escalante / Universidad Autónoma de Campeche,
México

CONSEJO EDITORIAL CIENTIFICO:

DR. YOUNESS ABDELLAOUI / Centro de Investigación y de Estudios
Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México
<https://orcid.org/0000-0003-3865-3691>

DR. PEDRO ALFONSO AGUILAR CALDERÓN / Escuela de Ingeniería
de Mazatlán, Universidad de Sinaloa, México
<https://orcid.org/0000-0003-3881-909X>

MAC. FRANCISCO JAVIER BARRERA LAO / Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de Campeche, México
<https://orcid.org/0000-0001-5144-8305>

DR. VICTOR COLLI EK / Centro de Investigaciones Jurídicas,
Universidad Autónoma de Campeche, México
<https://orcid.org/0000-0002-8524-6055>

DR. GUSTAVO DOMINGUEZ RODRIGUEZ / Centro de Investigación
en Corrosión, Universidad Autónoma de Campeche, México
<https://orcid.org/0000-0002-9434-9937>

MAC. ANDREA DEL ROSARIO CRUZ Y CRUZ / Facultad de
Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, México
<https://orcid.org/0000-0001-8661-1276>

DR. VIOLETA FERNANDEZ DIAZ / Facultad de Ciencias Marinas,
Universidad Autónoma de Baja California, México
<https://orcid.org/0000-0003-0450-2385>

DR. JOSE ISRAEL HERRERA / Centro de Investigaciones Jurídicas,
Universidad Autónoma de Campeche, México
<https://orcid.org/0000-0001-6961-8958>

DR. DANIEL SANCHEZ GARCIA / Departamento de Ingeniería
Mecánica y Diseño Industrial, Universidad de Cádiz, España
<https://orcid.org/0000-0002-3080-0821>

DR. LILIANA SAN PEDRO CEDILLO / Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de Yucatán, México
<https://orcid.org/0000-0002-6533-6571>

DR. RENAN GABRIEL QUIJANO CETINA / Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de Yucatán
<https://orcid.org/0000-0001-9515-9249>

DR. MANUEL JESUS RODRIGUEZ PEREZ / Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de Campeche, México
<https://orcid.org/0000-0003-1531-9180>

DIRECCIÓN:

Av. Humberto Lanz Cárdenas Siglo XXIII, Ex-Hacienda Kalá, C.P.
24085, San Francisco de Campeche, Campeche, México

Los criterios expuestos en los artículos son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no reflejan necesariamente la opinión de la dirección de la revista.

Ciencias de la Ingeniería - FIUACAM es una publicación digital científica de la Facultad de Ingeniería, UACAM. Es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma de Campeche, Campus V, Predio s/n por Avenida Ing. Humberto Lanz Cárdenas y Fracc. Ecológico Ambiental Siglo XXIII, Colonia Ex Hacienda Kalá, C.P. 24075, San Francisco de Campeche, Campeche, México, Tel. (981) 81 19800 ext. 3030100, <https://cienciasdelaingenieria.uacam.mx/index.php/cdi/index>, roacanul@uacam.mx. Editor responsable: Dr. Román Alejandro Canul Turriza. Reserva de Derechos al uso Exclusivo: en trámite, ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Facultad de Ingeniería UACAM, Dr. Román Alejandro Canul Turriza, Campus V, Predio s/n por Avenida Ing. Humberto Lanz Cárdenas y Fracc. Ecológico Ambiental Siglo XXIII, Colonia Ex Hacienda Kalá, C.P. 24085, Ciudad de San Francisco de Campeche, México fecha de la última modificación Junio 2025

Ciencias de la Ingeniería / Vol 1 / N° 1 / 2025 / ISSN EN TRAMITE



01

EDITORIAL

Román Canul Turriza, Oscar May Tzuc, Mario Jiménez Torres

4 - 5

02

SISTEMA DE DETECCIÓN DE ENFERMEDADES EN PLANTAS PARA LA REDUCCIÓN DE USO DE PESTICIDAS Y PLAGUICIDAS EN LA REGIÓN DE SINALOA

6 - 12

03

INNOVACIONES EN EL DISEÑO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS PARA MEJORAR EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

13 - 23

04

EVALUACIÓN DE UN HUMEDAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN SAN MARCOS ATEXQUILAPAN, NAOLINCO, VERACRUZ, MÉXICO, SEMBRADO CON POLICULTIVO DE PLANTAS ORNAMENTALES

24 - 29

05

DESARROLLO DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA APLICADA EN LA ENSEÑANZA Y LA CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE A TRAVÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA STEAM

30 - 36



EDITORIAL

Es un honor para nosotros presentar el primer número de la revista Ciencias de la Ingeniería, albergada por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche (UACAM). Este hito representa el fruto de un arduo trabajo y el compromiso inquebrantable por fomentar la divulgación científica, dando visibilidad a las investigaciones y desarrollos tecnológicos generados por los académicos de nuestra institución, así como por investigadoras e investigadores de otras universidades y centros de investigación.

La creación de esta revista surge con el firme propósito de consolidarse como un espacio de encuentro para investigadores, cuerpos académicos, redes de colaboración y especialistas en las diversas áreas de la ingeniería. A través de esta plataforma, buscamos difundir conocimiento de alto impacto, promoviendo el intercambio de ideas y resultados que contribuyan al avance científico y tecnológico en México y más allá de sus fronteras.

Agradecemos profundamente a los autores que han depositado su confianza en este proyecto al someter sus valiosas contribuciones para este primer número, así como a sus instituciones de origen por respaldar esta iniciativa. Nuestro compromiso es garantizar la calidad y el rigor académico de cada publicación, con el objetivo de posicionar a Ciencias de la Ingeniería en los índices y bases de datos más representativos de Latinoamérica y, a largo plazo, del ámbito internacional.

Sin duda, este primer ejemplar marca el inicio de una publicación científica con gran potencial para albergar trabajos mult institucionales y transdisciplinarios, reflejando la esencia misma de la ingeniería: innovación, colaboración y solución de problemas complejos.

Invitamos a la comunidad académica a sumarse a este esfuerzo, contribuyendo con sus investigaciones y siendo parte activa del crecimiento de esta revista. Estamos convencidos de que Ciencias de la Ingeniería se convertirá en un referente para la difusión del conocimiento científico y tecnológico en nuestra región y más allá.



EDITORES

OSCAR DE JESÚS MAY TZUC

Doctor en Ingeniería opción Energías Renovables
Facultad de Ingeniería - Universidad Autónoma de Campeche
Editor Responsable, Revista Ciencias de la Ingeniería
<https://orcid.org/0000-0001-7681-8210>
oscajmay@uacam.mx

ROMÁN ALEJANDRO CANUL TURRIZA

Doctor en Ingeniería Civil opción en Puertos y Costas
Facultad de Ingeniería - Universidad Autónoma de Campeche
Editor Responsable, Revista Ciencias de la Ingeniería
<https://orcid.org/0000-0001-7681-8210>
roacanul@uacam.mx

MARIO ANTONIO JIMÉNEZ TORRES

Doctor en Ingeniería opción Energías Renovables
Centro de Investigaciones Jurídicas - Universidad Autónoma de Campeche
Editor Responsable, Revista Ciencias de la Ingeniería
<https://orcid.org/0000-0001-7681-8210>
majimene@uacam.mx



Recibido 20/03/2025
Aceptado 10/05/2025

SISTEMA DE DETECCIÓN DE ENFERMEDADES EN PLANTAS PARA LA REDUCCIÓN DE USO DE PESTICIDAS Y PLAGUICIDAS EN LA REGIÓN DE SINALOA

PLANT DISEASE DETECTION SYSTEM REDUCING PESTICIDE AND AGROCHEMICAL USE IN THE SINALOA REGION

Eduardo Alfonso Huerta Mora¹, Manuel Iván Tostado Ramírez^{12*}, Rogelio Estrada Lizárraga², Alma Delia Figueroa Suarez¹

¹Facultad de Ingeniería y Tecnología de Mazatlán - Universidad Autónoma de Sinaloa, Unidad Regional Sur, Mazatlán, Sinaloa.

²Facultad de Informática de Mazatlán, Universidad Autónoma de Sinaloa, Unidad Regional Sur, Mazatlán, Sinaloa.
Correo de autor de correspondencia: itostado@uas.edu.mx

RESUMEN

Este artículo presenta un sistema de detección temprana de enfermedades en plantas basado en el algoritmo YOLOv8 (You Only Look Once, versión 8), una arquitectura de red neuronal convolucional (CNN) de una sola etapa (single-stage) optimizada para la detección en tiempo real, el sistema está diseñado para reducir el uso de pesticidas en la región de Sinaloa, México, enfocándose en cultivos de pepino y melón. El sistema utiliza técnicas de aprendizaje profundo para identificar enfermedades comunes en cultivos como pepino y melón. Mediante técnicas de aprendizaje profundo, el modelo identifica enfermedades comunes como mosca blanca, quemaduras, virus del mosaico, analizando imágenes de hojas. Se recolectó un conjunto de datos de 9660 imágenes, preprocesadas y aumentadas para mejorar la generalización del modelo. El entrenamiento de YOLOv8 logró una precisión del 94.5%, un recall del 92.3% y un F1-score de 93.4%, superando a otros métodos como Faster R-CNN y EfficientDet en términos de precisión y eficiencia. El sistema fue implementado en una aplicación móvil que permite diagnósticos en tiempo real, con un tiempo de inferencia de 25 ms por imagen. Se estima que su implementación podría reducir el uso de pesticidas en un 30 a 40%, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles. Aunque el sistema demostró un alto rendimiento, se identificaron limitaciones relacionadas con la calidad de las imágenes y la generalización a otros cultivos, lo que sugiere áreas de mejora para futuras investigaciones. Este trabajo contribuye al avance, con potencial para mejorar la productividad y reducir los impactos ambientales.

PALABRAS CLAVE

Detección de enfermedades en plantas, YOLOv8, Aprendizaje Profundo, Agricultura Sostenible.

ABSTRACT

This paper presents a plant disease early detection system based on the YOLOv8 (You Only Look Once, version 8) algorithm, a single-stage convolutional neural network (CNN) architecture optimised for real-time detection, the system is designed to reduce pesticide use in the region of Sinaloa, Mexico, focusing on cucumber and melon crops. The system uses deep learning techniques to identify common diseases in crops such as cucumber and melon. Using deep learning techniques, the model identifies common diseases such as whitefly, scorch, mosaic virus by analysing leaf images. A dataset of 9660 images was collected, pre-processed and augmented to improve the generalisation of the model. YOLOv8 training achieved an accuracy of 94.5%, recall of 92.3% and F1-score of 93.4%, outperforming other methods such as Faster R-CNN and EfficientDet in terms of accuracy and efficiency. The system was implemented in a mobile application that allows real-time diagnostics, with an inference time of 25ms per image. It is estimated that its implementation could reduce pesticide use by 30-40%, promoting more sustainable farming practices. Although the system demonstrated high performance, limitations related to image quality and generalisability to other crops were identified, suggesting areas of improvement for future research. This work contributes to progress, with potential to improve productivity and reduce environmental impacts.

KEYWORDS

Plant disease detection, YOLOv8, Deep Learning, Sustainable Agriculture.

INTRODUCCIÓN

La agricultura es uno de los pilares económicos más importantes en la región de Sinaloa, México, destacándose como uno de los principales productores de cultivos como tomate, maíz y hortalizas [1]. Sin embargo, el sector agrícola enfrenta desafíos significativos, entre los que destaca el manejo de enfermedades en plantas, que afectan directamente la productividad y calidad de los cultivos [2]. Tradicionalmente, los agricultores han dependido del uso intensivo de pesticidas y plaguicidas para controlar estas enfermedades, generando impactos negativos en el medio ambiente, la salud humana, y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas [3].

En los últimos años, el uso excesivo de agroquímicos se ha asociado con problemas como la contaminación del suelo, el agua y la pérdida de biodiversidad, además de representar un riesgo para la salud de los trabajadores agrícolas y los consumidores [4]. Ante esta problemática, surge la necesidad de implementar tecnologías innovadoras que permitan detectar de manera temprana y precisa las enfermedades en plantas, lo que reduciría la dependencia de pesticidas y promovería prácticas agrícolas sostenibles [19].

La inteligencia artificial (IA) y, en particular las técnicas de aprendizaje profundo (deep learning), han demostrado ser herramientas efectivas para la identificación automatizada de enfermedades en plantas a través del análisis de imágenes [5]. Estas tecnologías permiten procesar grandes volúmenes de datos (como fotografías de hojas o frutos) para identificar patrones asociados con enfermedades específicas, facilitando una toma de decisiones rápida y precisa [7]. Además, su implementación en dispositivos móviles o plataformas web puede democratizar el acceso a estas herramientas, beneficiando a pequeños y medianos agricultores [8].

En este contexto, el presente trabajo propone el desarrollo de un sistema de detección de enfermedades en plantas basado en técnicas de IA, específicamente diseñado para la región de Sinaloa. El objetivo principal es reducir el uso de pesticidas y plaguicidas mediante identificación temprana de patologías, mejorando así la productividad agrícola y contribuyendo a la protección del medio ambiente y salud pública. Este sistema se enfoca en cultivos clave para la región (pepino y melón) y utiliza un enfoque de aprendizaje profundo (deep learning) para lograr alta precisión en la detección [18].





2. TRABAJOS RELACIONADOS

En este capítulo, se revisan estudios recientes que han abordado la detección de enfermedades en plantas utilizando técnicas de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje profundo. Estos trabajos proporcionan un contexto para la investigación actual y resaltan las contribuciones innovadoras de este estudio.

2.1 DETECCIÓN DE ENFERMEDADES BASADA EN APRENDIZAJE PROFUNDO

El uso de técnicas de aprendizaje profundo para la detección de enfermedades en plantas ha ganado popularidad en los últimos años debido a su alta precisión y capacidad para manejar grandes volúmenes de datos. Por ejemplo, Mohanty et al. [7] utilizaron redes neuronales convolucionales (CNN) para clasificar enfermedades en plantas a partir de imágenes de hojas, logrando una precisión del 92% en el conjunto de datos PlantVillage. Este trabajo sentó las bases para muchos estudios posteriores, demostrando la viabilidad de la IA en aplicaciones agrícolas.

Otro estudio relevante es el de Barbedo [5], quien revisó los principales desafíos en la identificación automática de enfermedades en plantas, destacando la importancia de la calidad de las imágenes y la necesidad de conjuntos de datos balanceados. Este trabajo resaltó que, aunque las CNN son efectivas, su rendimiento depende de en gran medida del preprocesamiento de datos y la selección de hiperparámetros.

2.2 REDUCCIÓN DEL USO DE PESTICIDAS MEDIANTE DETECCIÓN TEMPRANA

Varios estudios han explorado como la detección temprana de enfermedades puede reducir el uso de pesticidas. Por ejemplo, Sharma et al. [4] demostraron que la identificación precisa de enfermedades en etapas iniciales puede reducir el uso de pesticidas en un 30 a 40%, lo que tiene impacto positivo en el medio ambiente y la salud humana. Este estudio resalta la importancia de desarrollar sistemas de detección precisos y accesibles para los agricultores.

En un trabajo relacionado, Jiang et al. [17] desarrollaron un sistema basado en IA para detectar enfermedades en cultivos de arroz, logrando una reducción del 35% en el uso de pesticidas. Este sistema fue implementado en una aplicación móvil, lo que permitió a los agricultores realizar diagnósticos en tiempo real.

2.3 APLICACIONES DE YOLO EN AGRICULTURA

La familia de algoritmos YOLO (YOU ONLY LOOK ONCE) ha sido ampliamente utilizada en aplicaciones agrícolas debido a su eficiencia en la detección de objetos en tiempo real. Por ejemplo, Bochkovski et al. [12] presentaron YOLOv4, una versión optimizada para tareas de detección en condiciones adversas, como iluminación variable y fondos complejos. Este trabajo de campo, donde la velocidad y la precisión son críticas.

En un estudio más reciente Wang et al. [20] utilizaron YOLOv5 para detectar enfermedades en hojas de tomate, logrando una precisión del 93% y un tiempo de inferencia de 30 ms por imagen. Este trabajo resalta las ventajas de YOLO sobre otros métodos de detección, como Faster R-CNN, en términos de eficiencia computacional.

2.4 LIMITACIONES DE TRABAJOS ANTERIORES

A pesar de los avances significativos, los trabajos anteriores presentan algunas limitaciones que este estudio busca abordar:

- **Dependencia de conjuntos de datos pequeños:** Muchos estudios utilizan conjunto de datos limitados, lo que afecta la generalización de modelos [8].
- **Falta de implementación en dispositivos de bajo costo:** Aunque algunos sistemas han sido implementados en aplicaciones móviles, su rendimiento en dispositivos de gama baja aún no ha sido ampliamente evaluado [16].
- **Enfoque en cultivos específicos:** La mayoría de los estudios se centran en cultivos como el tomate y el maíz, dejando de lado otros cultivos importantes para la región como lo es Sinaloa [18].

2.5 CONTRIBUCIONES DE ESTE TRABAJO

Este estudio contribuye a la literatura existente de las siguientes maneras:

- **Uso de YOLOv8:** Se implementa YOLOv8, una versión más reciente y optimizada de YOLO, para la detección de enfermedades en plantas.
- **Conjunto de datos diverso:** Se utiliza un conjunto de datos amplio y diverso, que incluye imágenes de pepino y melón en diferentes condiciones.
- **Implementación en dispositivos móviles:** El sistema se implementa en una aplicación móvil, lo que facilita su uso por parte de los agricultores.
- **Enfoque en la reducción de pesticidas:** Se evalúa el impacto potencial del sistema en la reducción del uso de pesticidas, contribuyendo a la sostenibilidad agrícola.

METODOLOGÍA

3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La región de Sinaloa es reconocida como uno de los principales productores agrícolas de México, contribuyendo significativamente a la producción nacional de cultivos como el tomate, maíz, y vegetales [1]. Sin embargo, en esta región enfrenta desafíos importantes relacionados con la presencia de enfermedades en plantas, que afectan tanto la calidad como el rendimiento de los cultivos. En particular, enfermedades como el mildiu (causado por *Phytophthora infestans*) y la roya (causada por *Puccinia* spp.) son comunes en cultivos de tomate, maíz, melón y pepino, respectivamente [2]. Estas enfermedades no solo reducen la productividad, sino que también incrementan el uso de pesticidas y plaguicidas, lo que genera impactos negativos en el medio ambiente y salud humana [3].

Para el desarrollo del sistema de detección de enfermedades, se recolectó un conjunto de datos compuesto por 6,000 imágenes de hojas de pepino y melón, obtenidas en campo bajo condiciones controladas de iluminación y resolución. Las imágenes incluyen ejemplos de plantas sanas y enfermas, cubriendo las principales enfermedades reportadas en la región [4]. Adicionalmente, se utilizaron conjuntos de datos públicas, como PlantDoc y PlantVillage, para complementar el conjunto de datos y asegurar una mayor diversidad en las muestras [7].

El preprocesamiento de las imágenes incluyó técnicas como redimensionamiento a 224x224 píxeles, normalización de valores de píxeles (escalado entre 0 y 1), y la técnica de aumento de datos (data augmentation) para mejorar la generalización del modelo. Las técnicas de aumento de datos incluyeron rotaciones, zoom, cambios de brillo y volteo horizontal, lo que permitió, incrementar el tamaño del conjunto de datos en un 300% [21].

3.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE DETECCIÓN

El sistema de detección de enfermedades se desarrolló utilizando YOLOv8, una arquitectura de detección de objetos basada en redes neuronales convolucionales (CNN) que combina alta precisión y velocidad de inferencia. YOLOv8 es una evolución de la familia YOLO, optimizada para tareas de detección en tiempo real, lo que la hace ideal para aplicaciones agrícolas donde la eficiencia es crítica [9].

El diagrama de flujo ilustra el proceso completo de detección de enfermedades en plantas de manera estructurada, la cual incluye desde la captura de imágenes, preprocesamiento de datos, la detección y la clasificación hasta el diagnóstico final. La figura 1 muestra el diagrama de flujo del proceso, que consta de las siguientes etapas:

- **Captura de imágenes:** El agricultor o el usuario toma una foto de la hoja de la planta.
- **Preprocesamiento:** La imagen se redimensiona, normaliza y aumenta.
- **Detección de objetos:** YOLOv8 procesa la imagen y detecta las regiones de interés.
- **Clasificación:** El modelo clasifica las enfermedades.
- **Resultados:** El sistema muestra el diagnóstico final.

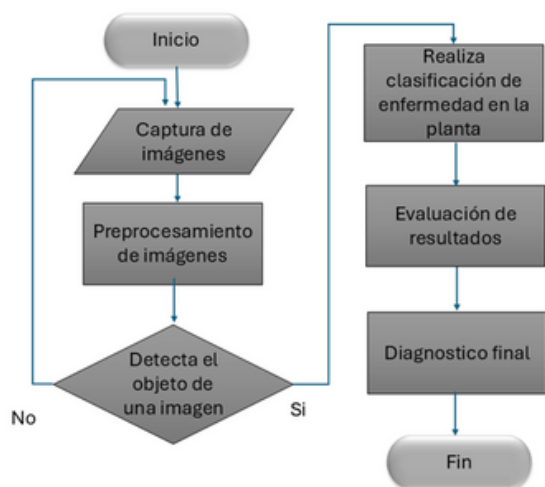


Figura 1. Diagrama de flujo del sistema de detección de enfermedades en plantas.

3.3.1. CLASIFICACIÓN DE LOS DATOS Y ARQUITECTURA YOLOV8

La arquitectura de YOLOv8 (You Only Look Once) se basa en un enfoque de detección de objetos en una sola pasada (one-stage), lo que la hace significativamente más rápida que otros métodos de dos etapas, como Faster R-CNN. YOLO divide la imagen en una cuadrícula de celdas (por ejemplo, $S \times S$), y cada celda es responsable de predecir un número fijo de cajas delimitadoras (bounding boxes) y sus correspondientes posibilidades de clase [9].

El proceso de clasificación se divide en 3 etapas:

- División de la imagen: La imagen de entrada se divide en una cuadrícula de " $S \times S$ " celdas. Para cada celda, YOLO predice "B" cajas delimitadoras y sus correspondientes puntajes de confianza.
- Predicción de clases: Cada celda también predice las probabilidades de clase para los objetos detectados. Estas probabilidades indican la probabilidad de que un objeto pertenezca a una clase en específico (por ejemplo, mosquita blanca, quemadura, etc.).
- Fusión de predicciones: Las cajas delimitadoras y las probabilidades de clase se combinan para generar las predicciones finales. YOLO utiliza un umbral de confianza para filtrar las predicciones débiles y la supresión no máxima (Non-Maximum Suppression, NMS) para eliminar cajas duplicadas [12].

YOLOv8 utiliza una arquitectura de un solo paso (one-stage) para la detección de objetos, lo que permite predecir las coordenadas de las cajas delimitadoras (Bounding boxes) y las clases de los objetos en una sola pasada por la red. Esto reduce significativamente el tiempo de inferencia en comparación con métodos de dos etapas, como Faster R-CNN [10]. La arquitectura incluye:

- Backbone: Una red convolucional profunda para extraer características de las imágenes.
- Neck: Módulos como PaNet (Path Aggregation Network) para fusionar características de diferentes niveles.
- Head: Capas finales que predicen las cajas delimitadoras, las clases y los puntajes de confianza.

3.3.2. PREPROCESAMIENTO Y AUMENTO DE DATOS

El conjunto de datos personalizado utilizado en este trabajo de investigación cuenta con 9660 imágenes de 2 cultivos y dando 7 clases distintas en las que se involucran imágenes de pepino y melón saludables y algunas de sus enfermedades. La figura 2 muestra un ejemplo de cada clase distinta que se utilizó para el preprocesamiento y aumento de datos para preparar las imágenes para el entrenamiento, la tabla 1 y la figura 3 muestran un resumen del total de imágenes por cada clase utilizada.



Figura 2. Muestra de cada clase del conjunto de datos personalizado que cuenta con 7 clases distintas de 2 cultivos diferentes como son pepino y melón.

Tabla 1. Conjunto de datos utilizado

Número	Clases	Clases de imágenes
1	Cucumber angular leaf spot	855
2	Cucumber gummy stem blight	178
3	Cucumber healthy	2933
4	Cucumber mosaic virus	666
5	Cucumber whitefly	1068
6	Melon healthy	2786
7	Melon whitefly	1174
Total		9960

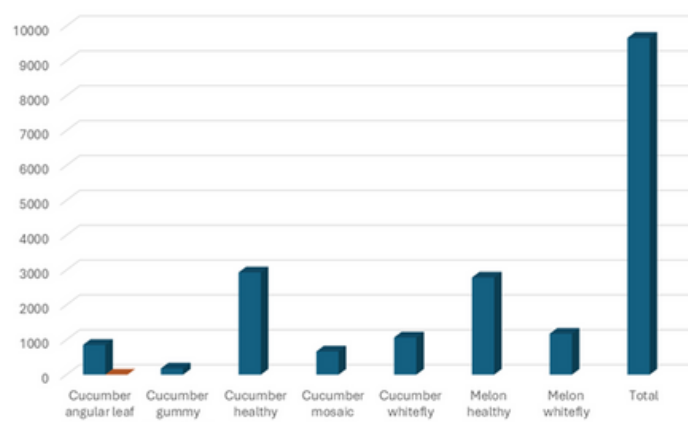


Figura 3. Gráfico del conjunto de datos utilizado



Antes del entrenamiento, las imágenes fueron redimensionadas a 640 x 640 píxeles, el tamaño de entrada predeterminado para YOLOv8.

El rendimiento de las redes neuronales de aprendizaje profundo a menudo mejora con la cantidad de datos disponibles, el realizar este aumento de manera artificial se denomina Data augmentation o aumento de datos, que es una parte primordial del preprocesamiento de datos.

El aumento de datos de imágenes es una técnica que se puede utilizar para expandir artificialmente el tamaño de un conjunto de datos de entrenamiento mediante la creación de versiones modificadas de imágenes en el conjunto de datos.

Las técnicas aplicadas de aumento de datos (data augmentation), fueron:

- Rotaciones aleatorias (± 30 grados).
- Cambios de brillo y contraste.
- Volteo horizontal y vertical.

Estas técnicas ayudaron a mejorar la generalización del modelo y a manejar variaciones en las condiciones de iluminación y orientación de las hojas [12].

Finalmente, los datos se separaron en dos conjuntos, que contenían el 70% de los datos en el conjunto de entrenamiento y el 30% restante en el conjunto de pruebas. La elección de la división se basa en la propuesta de [7].

3.3.3. ENTRENAMIENTO DEL MODELO

El modelo YOLOv8 fue entrenado utilizando el conjunto de datos recolectado, que incluye imágenes de hojas de pepino y melón con enfermedades como mildiu y roya. El entrenamiento se realizó en un entorno Python, utilizando la biblioteca Ultralytics, que proporciona una implementación optimizada de YOLOv8 [11]. Los hiperparámetros utilizados incluyeron:

- Tasa de aprendizaje (learning rate): 0.001, con reducción en meseta (learning rate scheduling) si la pérdida no mejoraba después de 10 épocas.
- Tamaño de lote (batch size): 16, debido a limitaciones de memoria en la GPU utilizada (NVIDIA GTX 1650Ti).
- Número de épocas: 100, con early stopping para evitar el sobreajuste.

Para esta red de aprendizaje profundo, el entrenamiento y la validación se realizaron en un equipo de cómputo con procesador Intel i5-10th Gen, tarjeta de video NVIDIA GTX1650Ti con 24GB en RAM.

3.3.4. OPTIMIZACIÓN Y REGULARIZACIÓN

Para mejorar el rendimiento del modelo, se implementaron técnicas de regularización como:

- Dropout: Con una tasa de 0.5 en las capas Fully-Connected.
- Weight decay: Con un valor de 0.0005 para penalizar pesos grandes y evitar el sobreajuste.
- Early stopping: Deteniendo el entrenamiento si la pérdida en el conjunto de validación no mejoraba después de 15 épocas [13].

Para permitir una comparación equitativa entre las diferentes arquitecturas, también se hizo un intento de estandarizar los hiperparámetros entre las diferentes arquitecturas, utilizando los siguientes hiperparámetros, que se describen en la Tabla 2.

Tabla 2. Hiperparámetros de entrenamiento

Hierparámetros	Valor
Épocas	100
Batch size (Tamaño del lote)	16
Algoritmo de optimización	Adam*
Learning rate	0.001
Tamaño de imagen	640 x 640
Weight decay	0.0005
Dropout	0.5

Adam, un algoritmo para la optimización basada en gradiente de primer orden de funciones objetivo-estocásticas, basado en estimaciones adaptativas de momentos de orden inferior. El método es fácil de implementar, es computacionalmente eficiente, tiene pocos requisitos de memoria, es invariable para el cambio de escala diagonal de los gradientes y es muy adecuado para problemas que son grandes en términos de datos y/o parámetros. El método también es apropiado para objetivos no estacionarios y problemas con gradientes muy ruidosos y/o dispersos. Los hiperparámetros tienen interpretaciones intuitivas y generalmente requieren poca sincronización. Se discuten algunas conexiones con algoritmos relacionados, en los que se inspiró Adam. También analizamos las propiedades de convergencia teórica del algoritmo y proporcionamos un arrepentimiento vinculado a la tasa de convergencia que es comparable a los mejores resultados conocidos en el marco de optimización convexo en línea. Los resultados empíricos demuestran que Adam funciona bien en la práctica y se compara favorablemente con otros métodos de optimización estocástica [26].

Por lo tanto, los experimentos de entrenamiento se llevaron a cabo en una estación de trabajo, presentando los detalles resumidos en la tabla 3. El proceso de capacitación fue realizado con Python 3.9.7, Tensorflow (2.2), Ultralytics (8.1.2) [11] y Pytorch (2.0), que proporciona un marco para diseñar e implementar la arquitectura de YOLOv8 basada en CNNs, donde las aplicaciones y los gráficos mediante Matplotlib ayudan a visualizar las activaciones de la red y monitorear el progreso de la capacitación en la red.

Tabla 3. Especificaciones de equipo utilizado para el entrenamiento de YOLOv8

Hardware y software	Características
Memoria	24 GB de RAM
Procesador	CPU Intel Core i5 10th Gen
Gráficos	GEFORCE GTX 1650TI X 4 GB
Sistema operativo	Windows 11, 64 bits

3.3.5. EVALUACIÓN Y SUS MÉTRICAS

El rendimiento del método propuesto en este trabajo de investigación se evalúa mediante distintas métricas. La calidad de los algoritmos de aprendizaje generalmente se evalúa analizando de tan bien se desempeñan en los datos de una prueba [24]. La matriz de confusión es una de las métricas más intuitivas y sencillas que se utiliza para encontrar la precisión y exactitud del modelo. Se utiliza para el problema de clasificación donde la salida puede ser de dos o más tipos de clases [25].

La matriz de confusión es un resumen de los resultados de predicción sobre un problema de clasificación. El número de predicciones correctas e incorrectas se resume con valores de conteo y se desglosa por clase. Esta es la clave de la matriz de confusión. La matriz de confusión muestra las formas en que su modelo de clasificación se confunde cuando hace predicciones. Nos da una idea no solo de los errores que esta cometiendo un clasificador, sino más importante aún, de los tipos de errores que se están cometiendo [26].

De acuerdo con Mohanty et al. [7], menciona que la matriz de confusión es una herramienta utilizada para evaluar el rendimiento de un modelo de clasificación. Consiste en una tabla que muestra la distribución de las predicciones del modelo en comparación con las clases reales. Cada fila de la matriz representa las instancias de una clase real, mientras que cada columna representa las instancias de una clase predicha. Los elementos de la diagonal principal indican el número de predicciones correctas, mientras que los elementos fuera de la diagonal representan errores de clasificación [15].

El rendimiento del modelo fue evaluado utilizando métricas como son precisión (accuracy), recall, F1-score. La precisión mide la proporción de predicciones correctas sobre el total de predicciones, mientras que el recall evalúa la capacidad del modelo para identificar correctamente todas las instancias de una clase. El F1-score combina la precisión y recall en una sola métrica, siendo especialmente útil en conjuntos de datos desbalanceados [5]. Además, se realizó una validación cruzada de 5 pliegues (5-fold-cross-validation) para asegurar la robustez del modelo. Esto implicó dividir el conjunto de datos en 5 subconjuntos, entrenando el modelo en 4 de ellos y validándolo en el restante, repitiendo el proceso 5 veces [16].



La precisión, definida como el número de verdaderos positivos (TP) divididos relacionados con el número de verdaderos positivos más el número de falsos positivos (FP), viene dada por la Ec. (1). Esta medida trata sobre la corrección, es decir, evalúa el poder predictivo o del algoritmo. La precisión es cuan "preciso" es el modelo fuera de los positivos predichos y cuantos de ellos son realmente positivos.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1)$$

La sensibilidad o el recall corresponde a la precisión de los ejemplos positivos, y se refiere a cuantos ejemplos de las clases positivas se etiquetaron correctamente: esto se puede calcular con la Ec. 2, donde TP se refiere a los verdaderos positivos, que son el número de instancias que son positivas y están correctamente identificadas, y FN representa los falsos negativos, que son el número casos positivos que se clasifican erróneamente como negativos.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

El F1-score se determina como la precisión y recall media armónica, como se muestra en la Ec. 3. Se centra en el análisis de clase positiva. Un valor alto de esta métrica indica que el modelo funciona mejor en la clase positiva [16].

$$F1 - score = 2 \times \frac{precision \times Recall}{precision + Recall} \quad (3)$$

En general, la sensibilidad o recall evalúan la efectividad del algoritmo en una sola clase, positiva y negativa, respectivamente [16]. Comúnmente, la exactitud se calculó cada 9660 iteraciones. Esta métrica calcula el porcentaje de muestras que se clasifican correctamente y se representa en la Ec. 4:

$$Exactitud = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (4)$$

3.3.6. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

El sistema fue implementado como una aplicación móvil compatible con Android, utilizando el framework de Android Studio para el desarrollo de la interfaz de usuario y se tomó base de Tensorflow Lite para la inferencia del modelo en dispositivos móviles. La aplicación permite a los agricultores capturar imágenes de plantas y recibir diagnósticos en tiempo real, con una latencia promedio de 25 ms por imagen [17].

Adicionalmente, se desarrolló una plataforma web basada en Django para el análisis de grandes volúmenes de datos y la generación de reportes estadísticos. La plataforma está alojada en un servidor en la nube (AWS), lo que permite escalar el sistema para su uso en otras regiones o cultivos [8].

Para el análisis de la implementación en una aplicación móvil primero se tuvo que analizar el modelo propuesto en [23] acerca del modelo de Vistas 4+1 la cual describe la arquitectura de software desde distintas perspectivas. Este modelo consta de 4 vistas principales más una vista adicional que las integra. Cada vista se enfoca en un aspecto específico del sistema, lo que facilita su comprensión y diseño. La primera vista llamada Vista lógica (Logical view), en ella se representa la funcionalidad del sistema desde la perspectiva del usuario final, incluye los componentes del sistema, sus relaciones y como interactúan para cumplir con los requisitos funcionales, además este sistema basado en capas, la vista lógica describe los componentes de cada capa interactuando entre sí. La vista de desarrollo (Development View) se enfoca en la organización del código fuente y los módulos del sistema. Incluye la estructura de directorios, las dependencias entre módulos y las herramientas de desarrollo utilizadas, en el modelo de capas esta vista describe como se organizan los módulos en cada capa.

La capa 3 llamada Vista de procesos (Process view) representa los aspectos dinámicos del sistema, como la concurrencia, la sincronización y la comunicación entre los procesos. Es especialmente útil para sistemas distribuidos o concurrentes, en el modelo de capas desarrollado en este sistema la vista de procesos describe como los procesos o hilos de ejecución interactúan entre las capas. Y la última vista la vista física (Physical view) representa la infraestructura física del sistema, incluyendo hardware, servidores, redes y dispositivos, es útil para entender cómo se despliega el sistema en un entorno real, en este modelo de capas, la vista física describe como las capas se distribuyen en los diferentes componentes físicos [22] [23]. Y la vista adicional llamada vista de escenarios (Scenarios View) es la vista que integra las otras 4 vistas, consiste en escenarios o casos de uso que describen como el sistema funciona en situaciones específicas. Esta vista ayuda a validar que las otras vistas estén alineadas [22] [23].

En la figura 4 se muestra la arquitectura del sistema implementado en una aplicación móvil, donde se descompone en 3 capas la primera es la capa de vista la cual es la que observa el usuario donde se observa la interfaz gráfica, pasa la información a la capa de control donde se realiza el proceso de detección y una vez realizada la detección pasa a la tercera capa la cual es el sistema externo que es la cámara.

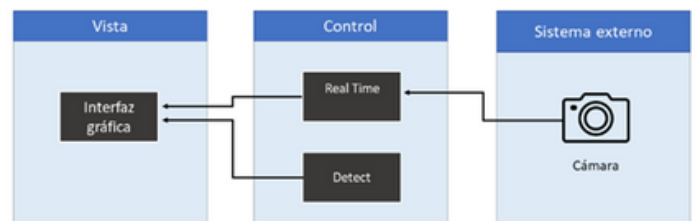


Figura 4. Arquitectura del sistema utilizando el modelo de capas de la vista lógica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 EVALUACIÓN DEL MODELO YOLOV8

El modelo YOLOv8 fue evaluado utilizando el conjunto de datos de prueba, que incluye imágenes de hojas de pepino y melón con enfermedades. Las métricas principales utilizadas para evaluar el rendimiento del modelo fueron:

- Precisión(accuracy): Proporción de predicciones correctas sobre el total de predicciones.
- Recall: Capacidad del modelo para identificar correctamente todas las instancias de una clase.
- F1-Score: Media armónica entre precisión y recall, útil para conjuntos de datos desbalanceados.
- Matriz de confusión: Visualización de las predicciones correctas e incorrectas por clase.
- Precisión: 94.5%.
- Recall: 92.3%.
- F1-Score: 93.4%.

Estos resultados indican que el modelo YOLOv8 es altamente efectivo para la detección de enfermedades en plantas, superando a otros enfoques basados en redes convolucionales tradicionales [9].

Para evaluar el rendimiento del modelo de clasificación, se utilizó una matriz de confusión. Esta herramienta permite visualizar la distribución de las predicciones del modelo en comparación con las clases reales, identificando tanto los aciertos como los errores de clasificación [4].

A través de las explicaciones de los diferentes autores puedo concluir que la matriz de confusión es especialmente útil para:

- Identificar errores de clasificación: Muestra cuantas instancias de una clase fueron clasificadas incorrectamente como otra clase.
- Calcular métricas de rendimiento: A partir de la matriz, se pueden calcular métricas como precisión, recall, F1-score y exactitud.
- Analizar el equilibrio del modelo: Permite evaluar si el modelo tiene sesgos hacia ciertas clases.

A continuación, se describirá la evaluación del modelo con la matriz de confusión resultante del modelo de detección que fue entrenado en la tabla 4.



Tabla 4. Matriz de confusión resultante del entrenamiento YOLOv8

	Predicho: Sano	Predicho: Quemaduras	Predicho: Mosquita Blanca
Real: Sano	90	5	5
Real: Quemaduras	3	85	12
Real: Mosquita blanca	3	8	89

Dando como resultado de la matriz de confusión una diagonal principal la cual corresponde al número de predicciones correctas con 90 Sanos, 85 con quemaduras y 89 con mosquita blanca. Y los que quedan fuera de la diagonal son los errores de clasificación, como son 5 detecciones de quemaduras clasificados como sano, 5 detecciones de mosquita blanca clasificados como sano, 3 detecciones de sanos clasificados como quemaduras y mosquita blanca, 8 detecciones de quemaduras clasificados como mosquita blanca y 12 detecciones de mosquita blanca clasificados como quemaduras.

En la figura 5 se observa la detección en tiempo real realizada por el sistema entrenado para detectar cultivos de pepino, melón y algunas de sus enfermedades más comunes donde se observa como alcanza una precisión alta al detectar hojas de pepino sano. Por otro lado, en la figura 6 se muestra cómo se realiza una detección de un cultivo mediante la selección de imágenes de la galería del dispositivo móvil encerrando en los bounding boxes la detección de una quemadura en una hoja de pepino.

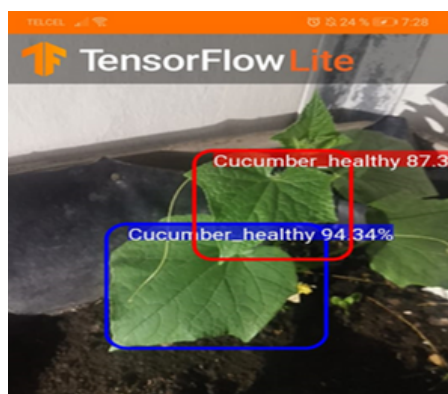


Figura 5. Detección en tiempo real del modelo YOLOv8 detectando uno de los cultivos de los cuales fue capacitado el sistema.



Figura 6. Detección de una enfermedad en el cultivo mediante el modelo YOLOv8

La alta precisión y recall del modelo se deben a la capacidad de YOLOv8 para detectar objetos en tiempo real y su arquitectura optimizada para tareas de detección. Comparado con trabajos anteriores que utilizaron Faster R-CNN o ResNet-50, YOLOv8 demostró ser más eficiente en términos de velocidad de inferencia y precisión [10].

4.2. COMPARACIÓN CON OTROS MÉTODOS

Para contextualizar los resultados, se comparó el rendimiento de YOLOv8 con otros métodos de detección de enfermedades en plantas, como Faster R-CNN y EfficientDet. La tabla 5 resume los resultados.

Tabla 5. Comparación con otras técnicas de detección de enfermedades en plantas

Métodos	Precisión (%)	Recall (%)	F1 - score
YOLOv8	94.5	92.3	93.4
Faster R-CNN	91.2	89.5	90.3
EfficientDet	93.0	90.8	91.9

YOLOv8 no solo superó a Faster R-CNN y EfficientDet en términos de precisión y recall, sino que también demostró ser significativamente más rápido en la inferencia de detección, con un tiempo promedio de 25 ms por imagen, respecto a Faster R-CNN que obtuvo 120 y 50 EfficientDet respectivamente en tiempo de inferencia (ms). Esto hace ideal para aplicaciones en tiempo real, como el diagnóstico de enfermedades en campo [12].

4.3. ANÁLISIS DE CASOS ESPECÍFICOS

Se analizaron casos específicos donde el modelo tuvo dificultades para clasificar correctamente las enfermedades. Por ejemplo, en algunas imágenes con iluminación deficiente o hojas particularmente ocultas, el modelo confundió quemaduras de sol con manchas foliares causadas por otros factores. Esto resalta la importancia de mejorar el conjunto de datos con más ejemplos de condiciones adversas [5].

Aunque el modelo tuvo un rendimiento general excelente, estos casos específicos muestran que aún hay margen de mejora. Futuras investigaciones podrían incluir técnicas de aumento de datos más avanzadas, como la simulación de condiciones climáticas adversas, para mejorar la robustez del modelo [8].

4.4. IMPACTO POTENCIAL EN LA REDUCCIÓN DE PESTICIDAS

El sistema de detección temprana de enfermedades en plantas tiene el potencial de reducir significativamente el uso de pesticidas en la región de Sinaloa. Según estimaciones basadas en datos históricos, la detección temprana podría reducir el uso de pesticidas en un 30-40%, lo que tendría un impacto positivo en el medio ambiente y la salud humana [4].

La implementación de este sistema no solo mejoraría la productividad agrícola, sino que también contribuiría a la sostenibilidad ambiental. Estudios previos han demostrado que la reducción del uso de pesticidas está directamente relacionada con la mejora de la calidad de suelo y la biodiversidad [2].

4.5 LIMITACIONES Y TRABAJO A FUTURO

Aunque el sistema demostró un alto rendimiento, existen algunas limitaciones que deben ser abordadas en futuras investigaciones:

- **Dependencia de la calidad de las imágenes:** El modelo puede tener dificultades con imágenes de baja resolución o con condiciones de iluminación extremas.
- **Generalización a otros cultivos:** El sistema fue entrenado principalmente con imágenes de pepino y melón, por lo que su rendimiento en otros cultivos aún no ha sido evaluado.
- **Implementación en dispositivos de bajo costo:** Aunque el modelo es eficiente, su implementación en dispositivos móviles de gama baja aún presenta desafíos.



Trabajos a futuro:

- Ampliar el conjunto de datos para incluir más cultivos y condiciones adversas.
- Optimizar el modelo para su implementación en dispositivos móviles de bajo costo.
- Integrar el sistema con drones equipados con cámaras RGB. La arquitectura YOLOv8, por su eficiencia en tiempo real, se desplegaría en un módulo embebido (NVIDIA Jetson) a bordo del dron. Las imágenes capturadas en vuelo se procesarían on-board (para diagnóstico inmediato), donde el modelo identificará patrones de enfermedades a gran escala de campo [17].

CONCLUSIONES

El desarrollo de un sistema de detección de enfermedades en plantas basado en YOLOv8 representa un avance significativo en la aplicación de tecnologías de inteligencia artificial (IA) para la agricultura sostenible en la región de Sinaloa. Este estudio demostró que el uso de técnicas de aprendizaje profundo, específicamente YOLOv8, permite la identificación temprana y precisa de enfermedades en cultivos como el pepino y melón, con una precisión del 94.5% y un tiempo de inferencia de 25 ms por cada imagen. Estos resultados superan los obtenidos por métodos tradicionales y otros algoritmos de detección, como Faster R-CNN y EfficientDet, lo que resalta la eficiencia y efectividad de YOLOv8 para aplicaciones en tiempo real [9].

Una de las principales contribuciones de este trabajo es la implementación del sistema en una aplicación móvil, lo que facilita su uso por parte de los agricultores en campo. Esta accesibilidad es crucial para promover la adopción de tecnologías innovadoras en regiones agrícolas como Sinaloa, donde la detección temprana de enfermedades puede reducir significativamente el uso de pesticidas y plaguicidas. Según estimaciones basadas en hechos históricos, la implementación de este sistema podría reducir el uso de agroquímicos en un 30-40%, lo que tendría un impacto positivo en el medio ambiente, salud humana y economía local [4].

Sin embargo, el estudio también identificó algunas limitaciones que deben ser abordadas en futuras investigaciones. Por ejemplo, el rendimiento del modelo puede verse afectado por condiciones adversas, como iluminación deficiente o fondos complejos. Además, aunque el sistema fue entrenado con un conjunto de datos diverso, su generalización a otros cultivos y regiones aun no ha sido evaluada.

Para superar estas limitaciones de condiciones adversas y explorar técnicas de transfer learning para adaptar el modelo a otros cultivos [8].

En conclusión, este trabajo contribuye a la promoción de prácticas agrícolas más sostenibles mediante el uso de tecnologías avanzadas de IA. La implementación de sistemas de detección temprana de enfermedades no solo mejora la productividad agrícola, sino que también reduce el impacto ambiental y los costos asociados con el uso de pesticidas. Futuras investigaciones deberían enfocarse en optimizar el modelo para su uso en dispositivos de bajo costo y en integrar el sistema con drones para la detección de enfermedades a gran escala [17].

En conclusión, este trabajo contribuye al avance de la agricultura de precisión mediante el uso de tecnologías avanzadas de inteligencia artificial. La implementación de sistemas de detección temprana de enfermedades no solo mejora la productividad agrícola, sino que también reduce los costos y los impactos negativos asociados con el uso de pesticidas, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles y responsables.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación me honra ser partícipe de la convocatoria del Primer Número de la Revista de académica Ciencias de la Ingeniería, así mismo agradecer a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche por la invitación y participación en el primer Congreso Latinoamericano de Enseñanza en la Hidráulica y Sostenibilidad.

Así como agradecer a la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) y a la Facultad de Ingeniería y Tecnología de Mazatlán por brindar las instalaciones y recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación.

De manera especial, queremos reconocer a los agricultores de la región de Sinaloa por su colaboración en la recolección de datos y por compartir su conocimiento sobre las enfermedades que afectan sus cultivos. Su participación fue fundamental para el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, expresamos nuestro agradecimiento a los revisores y colegas que contribuyeron con sus valiosos comentarios y sugerencias para mejorar la calidad de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] SAGARPA, "Anuario estadístico de la producción agrícola en Sinaloa," Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2021.
- [2] FAO, "El estado mundial de la agricultura y la alimentación," Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2020.
- [3] J. Pretty et al., "Agricultural sustainability: Concepts, principles and evidence," Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, vol. 363, no. 1491, pp. 447-465, 2008.
- [4] P. Sharma et al., "Impact of pesticides on human health and environment: A review," Journal of Environmental Science and Health, Part C, vol. 38, no. 1, pp. 1-30, 2020.
- [5] J. G. A. Barbedo, "A review on the main challenges in automatic plant disease identification based on visible range images," Biosystems Engineering, vol. 144, pp. 52-60, 2016.
- [6] D. P. Kingma and J. L. Ba, "Adam: A method for stochastic optimization," arXiv preprint arXiv:1412.6980, 2017. [En línea]. Disponible: <https://arxiv.org/pdf/1412.6980v9.pdf>
- [7] S. P. Mohanty, D. P. Hughes, and M. Salathé, "Using deep learning for image-based plant disease detection," Frontiers in Plant Science, vol. 7, p. 1419, 2016.
- [8] A. Kamilaris and F. X. Prenafeta-Boldú, "Deep learning in agriculture: A survey," Computers and Electronics in Agriculture, vol. 147, pp. 70-90, 2018.
- [9] J. Redmon and A. Farhadi, "YOLOv3: An incremental improvement," arXiv preprint arXiv:1804.02767, 2018.
- [10] S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun, "Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 39, no. 6, pp. 1137-1149, 2017.
- [11] Ultralytics, "YOLOv8 documentation," 2023. [En línea]. Disponible: <https://docs.ultralytics.com/>
- [12] A. Bochkovskiy, C.-Y. Wang, and H.-Y. M. Liao, "YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection," arXiv preprint arXiv:2004.10934, 2020.
- [13] N. Srivastava et al., "Dropout: A simple way to prevent neural networks from overfitting," Journal of Machine Learning Research, vol. 15, no. 1, pp. 1929-1958, 2014.
- [14] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, "Deep residual learning for image recognition," Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 770-778, 2016.
- [15] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, "Deep learning," Nature, vol. 521, no. 7553, pp. 436-444, 2015.
- [16] J. Amara, B. Bouaziz, and A. Algergawy, "A deep learning-based approach for banana leaf diseases classification," International Journal of Advanced Computer Science and Applications, vol. 11, no. 7, 2020.
- [17] P. Jiang et al., "A deep learning approach to detecting agricultural diseases from images," IEEE Access, vol. 8, pp. 163517-163529, 2020.
- [18] H. Durmuş, E. O. Güneş, and M. Kırç, "Disease detection on the leaves of the tomato plants by using deep learning," Agronomy, vol. 11, no. 1, p. 23, 2021.
- [19] M. A. Ferentinos, "Deep learning models for plant disease detection and diagnosis," Computers and Electronics in Agriculture, vol. 145, pp. 311-318, 2018.
- [20] R. R. Kumar et al., "Plant disease detection using deep learning techniques: A review," Sensors, vol. 21, no. 11, p. 3839, 2021.
- [21] C.-Y. Wang, H.-Y. M. Liao, and I.-H. Yeh, "YOLOv5: A new state-of-the-art for real-time object detection," arXiv preprint arXiv:2012.01703, 2020.
- [22] Garlan and M. Shaw, "An Introduction to Software Architecture," Advances in Software Engineering and Knowledge Engineering, vol. 1, pp. 1-39, 1993.
- [23] L. Bass, P. Clements, and R. Kazman, Software Architecture in Practice, 3rd ed. Addison-Wesley, 2012.
- [24] J. G. Arnal Barbedo, "Digital image processing techniques for detecting and quantifying plant diseases," Springer, 2020.
- [25] A. Tharwat, "Classification assessment methods," Applied Computing and Informatics, vol. 17, no. 1, pp. 168-192, 2020.
- [26] J. C. Montero Rodríguez, R. Roshan Biswal, and E. Sánchez de la Cruz, "Algoritmos de aprendizaje automático de vanguardia para el diagnóstico de enfermedades," Research in Computing Science Journal, vol. 148, no. 7, pp. 1-14, 2019. [En línea]. Disponible: https://www.rcs.cic.ipn.mx/2019_148_7/Algoritmos%20de%20aprendizaje%20automatizado%20de%20vanguardia%20para%20el%20diagnostico%20de%20enfermedades.pdf



Recibido 04/04/2025

Aceptado 15/05/2025

INNOVACIONES EN EL DISEÑO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS PARA MEJORAR EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

INNOVATIONS IN CONSTRUCTED WETLAND DESIGN TO IMPROVE WASTEWATER TREATMENT

Claudia Lizeth Muñoz-Aguilar¹, José Luis Marín-Muñiz¹

¹El Colegio de Veracruz, C. Carrillo Puerto 26, zona Centro, C.P. 91000, Xalapa, Veracruz, México.
Correo de autor de correspondencia: munozaquilarcl@gmail.com

RESUMEN

Los humedales construidos (HC) o humedales de tratamiento (HT) son ecotecnologías que con diseño ingenieril imitan los procesos físicos, químicos y biológicos de un humedal natural para remover los contaminantes presentes en las aguas residuales. Sin embargo, gracias a múltiples investigaciones se les pueden otorgar algunas características como bajo costo de construcción, operación y mantenimiento. Por ello, se convierten en una excelente opción para las zonas rurales, donde el desarrollo económico es menor con relación a una zona urbana. De acuerdo al flujo del agua, los HC han sido clasificados como sistemas superficiales o subsuperficiales, estos últimos debido a la entrada del agua en subsuperficiales verticales u horizontales; siendo los más utilizados. Con el fin de acelerar los procesos de remoción, se han probado nuevos diseños que incluyen adecuaciones para entrada de oxígeno, distribución de agua, uso de nuevas especies o combinación de sustratos, dichas adecuaciones convierten a estos sistemas en humedales de tratamiento intensificados (HTI). Debido a que aún se conoce muy poco sobre estas innovaciones y su aplicación en México es escasa, este estudio tuvo como objetivo analizar el uso de HC y los tipos de sistemas empleados, así como los avances tecnológicos en el diseño de HTI a través de técnicas de indagación documental y revisión bibliográfica. Donde se identificó que el sustrato, los microorganismos y la vegetación son los componentes más estudiados con el fin de eficientizar la depuración de aguas residuales de distinta procedencia. Además, se analizaron seis tipos de humedales (humedal superficial, subsuperficiales verticales y horizontales, aireados, verticales tipo francés y por pulsos), siendo China el país con más investigaciones en cada uno de ellos y Francia el país dominante en el humedal vertical tipo francés, quien fue implementado por primera vez en el año 2012, siendo la innovación más reciente hasta la actualidad.

PALABRAS CLAVE

Humedales de tratamiento, innovaciones, aguas residuales, diseño

ABSTRACT

Constructed wetlands (CW) or treatment wetlands (TW) are eco-technologies that, with engineering design, imitate the physical, chemical and biological processes of a natural wetland to remove contaminants present in wastewater. However, thanks to multiple investigations, they can be given some characteristics such as low construction, operation and maintenance costs. Therefore, they become an excellent option for rural areas, where economic development is lower in relation to an urban area. According to the water flow, CW have been classified as surface or subsurface systems, the latter due to the entry of water into vertical or horizontal subsurfaces. These being the most used. Currently, to accelerate the removal processes, new designs have been tested that include adaptations for oxygen entry, water distribution, use of new species or combination of substrates, said adaptations convert these systems into intensified treatment wetlands (ITW). Since very little is known about these innovations and their application in Mexico is scarce, this chapter aimed to analyse the most studied components of HC and the technological advances in the design of ITW through documentary research techniques and bibliographic review. Where it was identified that the substrate, microorganisms and vegetation are the most studied components to make the purification of wastewater from different sources more efficient. In addition, six types of wetlands were analysed (surface wetland, vertical and horizontal subsurface wetland, aerated, vertical French-type and pulsed), with China being the country with the most research in each of them and France being the dominant country in the French-type vertical wetland, which was implemented for the first time in 2012, being the most recent innovation to date.

KEYWORDS

Treatment wetlands, innovation, wastewater, design

INTRODUCCIÓN

Los humedales naturales son definidos como ecosistemas de transición entre ambientes terrestres y acuáticos, los cuales presentan una saturación temporal o permanente de agua y en ellos crece vegetación adaptada a condiciones de suelo anegadas, conocidos como suelos hídricos. Son zonas con un alto valor ambiental, pues aportan diversos servicios ecosistémicos como la regulación del clima, favorecen el régimen hidrológico de cuencas y son hábitat de múltiples especies [1,2]. Además, dichos ecosistemas llevan a cabo funciones relacionadas a la transformación, remoción y almacenamiento de nutrientes y materia orgánica presentes en aguas contaminadas, debido a la presencia de microorganismos y a la actividad fito-remediadora de las plantas. Por ello, desde hace algunos años se les otorgó el nombre de "riñones del planeta" [3]. Con el fin de simular los procesos que se llevan a cabo en estos medios naturales y lograr un beneficio entre el ambiente y los seres humanos, se desarrolló una tecnología basada en condiciones de diseño que replican la actividad de depuración y transformación llevada a cabo por un humedal natural, conociendo a estos sistemas como humedales construidos (HC) o humedales de tratamiento (HT) [4-6]. por ello se les conoce como una solución basada en la naturaleza.

Los HC son celdas o canales que pueden ser superficiales o subsuperficiales. Los últimos son rellenos por un medio filtrante o sustrato, donde se desarrollan biopelículas de microorganismos, además, sirve de anclaje para las raíces de la vegetación sembrada. Dichos sistemas presentan múltiples ventajas como sistemas alternativos de tratamiento para aguas residuales, ya que presentan altas remociones de contaminantes y a su vez bajos costos de construcción, operación y mantenimiento [7,8]. Por ello, a lo largo del tiempo han sido ampliamente estudiados [9-12], con el fin de mejorar los procesos de remoción y eficientizar estas tecnologías depuradoras. Y como resultado, actualmente se puede clasificar a los HC en dos tipos: HC convencionales e intensificados; estos últimos, presentando adecuaciones en sus condiciones de diseño con el fin de acelerar los procesos de remoción y con ello, la obtención de efluentes tratados que puedan reutilizarse, sobre todo, ante los problemas de escasez existente en los últimos años [13].

En México, el recurso hídrico ha sido reconocido como un asunto estratégico y de seguridad nacional, pues cumple un papel fundamental en políticas ambientales y económicas del país. Sin embargo, para poder seguir dándole dicho protagonismo, se requiere que los cuerpos de agua estén limpios, que no existan descargas de aguas contaminadas con compuestos que afecten su condición natural [14].





Además de considerar que, contar con agua de calidad es un derecho constitucional, como dicta el artículo 4º, párrafo 6, de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, donde específicamente se menciona que *"toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos..."* [15]. Por esta razón, el Programa Nacional Hídrico 2020 – 2024 de México establece los objetivos, estrategias y acciones que aportan al desarrollo sustentable, definiendo al agua como un promotor de dicho desarrollo [16]; y, como bien lo menciona la publicación realizada en 1983 denominada Nuestro Futuro Común, mejor conocida como El Informe Brundtland, el desarrollo sustentable es aquel que busca cubrir las necesidades del presente, pero tomando en cuenta a las generaciones futuras para que puedan cubrir sus propias necesidades [17].

Con relación a lo anterior y de acuerdo con la establecido por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), el agua es el epicentro del desarrollo sustentable y un recurso fundamental para tener un desarrollo socioeconómico, y por supuesto, la supervivencia de los seres humanos [18]. Sin embargo, es importante destacar que debido al crecimiento poblacional, y al mayor consumo del agua en hogares, actividades agrícolas e industriales, se genera la necesidad de cubrir las demandas de este recurso para que todas las personas puedan satisfacer sus necesidades, por ello, dicho panorama genera una nueva problemática: la contaminación de los cuerpos de agua por la descarga de aguas residuales sin tratamiento, lo que perjudica el avance hacia el logro de los Objetivos del Desarrollo Sostenible publicados por la Agenda 2030, específicamente el ODS 6; Agua Limpia y Saneamiento [19].

Sumando a lo anterior, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), describe que las aguas residuales son aquellas compuestas por diferentes tipos de afluentes provenientes de las descargas municipales, comerciales, industriales, agropecuarias, de zonas habitacionales o de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas [20]. En México, dichas aguas son tratadas a través de los sistemas de tratamiento convencionales conocidos como Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), sin embargo, del 100% de las aguas residuales municipales colectadas solo se trataron el 66.7% en el año 2022, lo cual corresponde a 143.8 m³/s. Este tratamiento se llevó a cabo a través de las 2,774 PTAR que existen en el país. Cabe destacar que las aguas residuales municipales son vertidos domésticos, principalmente [21].

Es importante reconocer la carencia de estas infraestructuras depuradoras en comunidades rurales, donde existe una población no mayor a 2,500 habitantes, pero, principalmente su desarrollo económico y tecnológico es escaso [22]. Puesto que, la construcción de dichas plantas de tratamiento puede superar hasta los 5 millones de pesos mexicanos (\$5,000,000.00 M.N.), más un aproximado de 40 mil pesos mexicanos (\$40,000.00 M.N.) mensuales para su operación por metro cúbico [8]. Por ello, dichas comunidades no cuentan con el recurso necesario para poder costear un sistema de tratamiento convencional. Esta situación orilla a que las aguas residuales generadas en estas zonas sean vertidas directamente a cuerpos de agua naturales como lagunas, lagos, ríos, océanos, o incluso a cielo abierto, convirtiendo a estos vertederos en focos contaminantes y en espacios aptos para infecciones entre los seres humanos, afectando a su vez a la flora y la fauna que habita estos ecosistemas, así como generando malos olores y una vista indeseable [23]. Cabe destacar que, de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda realizado por INEGI, en México existen 185,243 localidades rurales y se han reportado aproximadamente 48,000 comunidades que no cuentan con sistemas de tratamiento [7].

Ante esta carencia y el uso constante del recurso hídrico, a lo largo del tiempo se han desarrollado tecnologías ecológicas altamente eficientes y económicamente viables para impulsar el saneamiento de aguas contaminadas de manera alternativa en zonas rurales, entre estas tecnologías se encuentran los biodigestores, biofiltros, lavaderos ecológicos y los humedales construidos [23,24], siendo los intensificados los de aplicación actual. Cabe destacar que en México, uno de los principales problemas es la falta de infraestructura de saneamiento en zonas rurales, donde las aguas residuales suelen descargarse directamente en ríos y lagunas, generando contaminación y afectando la salud pública [25]. Los HC, pueden ser una solución accesible y de bajo costo para estas problemáticas, ofreciendo una depuración eficiente mediante procesos naturales.

Otro aspecto crítico es la contaminación de cuerpos de agua por actividad industrial y agrícola, ya que sustancias como metales pesados y nutrientes derivados de fertilizantes han deteriorado la calidad de fuentes hídricas en estados como Sonora y Guanajuato [26]. En estos casos, dichos sistemas alternativos han demostrado su capacidad para reducir la presencia de contaminantes y mejorar la calidad del agua. Finalmente, el manejo de aguas pluviales en entornos urbanos representa un desafío ante las recurrentes inundaciones en ciudades mexicanas, agravadas por la falta de infraestructura verde que facilite la absorción y recarga de acuíferos [10]. La implementación de HC en zonas urbanas puede mitigar efectos, mejorando la gestión hídrica y promoviendo un enfoque sostenible de drenaje urbano. Estos ejemplos evidencian la importancia de los HC como una solución basada en la naturaleza, capaz de abordar problemáticas actuales de saneamiento, restauración ambiental y resiliencia hídrica en México.

Debido a que aún se desconoce a profundidad estas innovaciones y su aplicación en México es escasa, el presente trabajo tiene como objetivo analizar los avances tecnológicos en el diseño de humedales construidos para mejorar el tratamiento de dichas aguas. Para ello, se plantearon los siguientes objetivos específicos: primero, describir la importancia de los humedales construidos, tipos y sus componentes; segundo, construir una línea del tiempo respecto al uso de humedales construidos; para así, como tercer paso, analizar los avances respecto a los cambios de diseño del uso de humedales para el tratamiento de aguas residuales.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología empleada fue de tipo cualitativo. Para ello, se utilizaron técnicas tanto de indagación documental como de revisión bibliográfica, el diseño utilizado no fue experimental, y su alcance fue descriptivo con un tamaño de muestra no probabilístico [27]. La Figura 1 presenta el proceso metodológico, el cual se realizó en 4 fases principalmente.

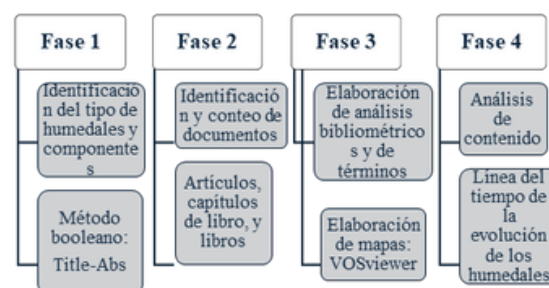


Figura 1. Diseño metodológico

Fase 1: Como primera fase se llevó a cabo una búsqueda de literatura en la plataforma de información científica DIMENSIONS. Dicha exploración se realizó utilizando el método booleano TITLE-ABS, con el fin de limitar la búsqueda de las palabras clave únicamente en el título y resumen de los documentos encontrados [28]. La búsqueda se realizó en dos apartados, el primero de ellos fue con el fin de conocer los componentes más estudiados en los humedales construidos. Y, el segundo apartado se realizó para identificar a los países que han desarrollado mayor investigación de humedales convencionales (humedal superficial, humedal de flujo subsuperficial horizontal y humedal de flujo subsuperficial vertical) y humedales intensificados (humedales aireados, humedales por pulso o flujo mareal y humedales de flujo vertical tipo francés). Las palabras clave utilizadas para el apartado uno fueron: ("Constructed wetlands" OR "Artificial wetlands" OR "Treatment wetlands"), en dicha búsqueda no se especificó el periodo y fue un análisis "FULL DATA", ya que se pretendía conocer los términos más utilizados desde las publicaciones más antiguas. Y, por último, las palabras clave utilizadas para el apartado dos fueron: ("Surface flow constructed wetland" OR "Free water surface constructed wetland"); ("Horizontal subsurface flow constructed wetland"); ("Vertical subsurface flow constructed wetland"); ("sequential feeding constructed wetland" OR "pulse flow constructed wetland" OR "tidal flow constructed wetland"); ("constructed wetland" OR artificial wetland" AND "aeration"), estableciendo como periodo de búsqueda 2010 – 2024.



Fase 2: Se realizó un conteo del tipo de documentos encontrados en la plataforma DIMENSIONS, haciendo uso únicamente de artículos, capítulos de libro y libros.

Fase 3: Una vez realizada la búsqueda, se exportaron las bases de datos en un archivo CVS para realizar un mapa de términos con el programa VOSviewer versión 1.6.20, con la finalidad de hacer un análisis de co-ocurrencia, para identificar cuáles son las palabras más utilizadas en el tema de humedales construidos y así corroborar los componentes de estas ecotecnologías (29). Asimismo, se realizaron mapas bibliométricos y un acoplamiento bibliográfico por países para identificar qué países son los que están trabajando con los diferentes tipos de humedales construidos (28).

Fase 4: Finalmente, se realizó un análisis de contenido de la literatura, con el fin de desarrollar una línea del tiempo que permitiera plasmar la evolución que han presentado los humedales construidos desde sus primeras aplicaciones hasta la actualidad.

RESULTADOS

3.1. IMPORTANCIA DE LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS

El ambiente es un pilar importante dentro del desarrollo sustentable, pero no el único [30], pues la sustentabilidad va más allá del cuidado y preservación de los recursos naturales; también está íntimamente relacionada a la solución de problemas sociales y su relación con el eje económico y ambiental de una comunidad en particular [31]. Ejemplo de ello, es la problemática existente de las aguas residuales sin tratamiento, ya que este tipo de efluentes cuenta con altas cantidades de contaminantes, impactando negativamente a los ecosistemas acuáticos que funcionan como receptores de estas aguas contaminadas [5], además de que están relacionadas con enfermedades de transmisión hídrica [23]. De aquí parte la importancia de los humedales construidos.

En México y gran parte de América Latina, la mayor cantidad de aguas residuales tratadas son de áreas urbanas [32]. No obstante, si todas las comunidades buscan entrar a un esquema de sustentabilidad es necesario que incluyan procesos de remoción de contaminantes de sus aguas para así, generar menos impacto al ambiente [33]. Y, sin duda alguna, los humedales construidos se han convertido en una tecnología sostenible, ya que son sistemas amigables con el medio ambiente, económicamente viables tanto en construcción, operación como mantenimiento y, gracias a los procesos físicos, químicos y biológicos desarrollados en el sistema cuentan con altos porcentajes de remoción [24]. Asimismo, este tipo de sistemas de tratamiento de acuerdo con [13], son descritos con una característica importante: robustos, es decir, que el rendimiento de dichos humedales es poco susceptible a cambios de carga y concentración de contaminantes en las aguas residuales.

Otra de las características fundamentales de este tipo de sistemas, y que han elevado su interés de investigación y uso, es su eficiencia para depurar diversos tipos de aguas como domésticas, municipales, agrícolas e industriales. Además, pueden ser implementados como tratamientos secundarios o terciarios, dentro de un proceso de depuración para mejores resultados de remoción [13,32]. Gracias a estas características se han desarrollado diferentes investigaciones relacionadas a los componentes más importantes de los humedales.

3.2. COMPONENTES DE LOS HUMEDALES

Al aplicar la metodología descrita anteriormente e introducir las palabras clave en DIMENSIONS para la fase 1 y 2, e identificar los componentes más estudiados de estas ecotecnologías, se obtuvieron 98,634 publicaciones en un periodo de 1964 al 2024. Dichas publicaciones se clasificaron en artículos (79,755 ejemplares), capítulos de libro (15,655) y libros (3,224). Los artículos de investigación son el tipo de documento que predomina más en la búsqueda de información acerca de los humedales construidos.

Una vez obtenida la base de datos, se procedió a realizar la fase 3, donde se llevó a cabo un análisis de co-ocurrencia; obteniendo un mapa representado en la Figura 2 basado en la distancia, es decir, muestra la distancia de los elementos reflejando la fuerza de relación entre ellos. Dicho mapa representa la frecuencia de uso de cada palabra a través de diferentes clústeres por color. [29].



Figura 2. Mapa de co-ocurrencia de términos

En la figura se observan cuatro grandes grupos relacionados entre sí, pero cada uno con su término dominante: TECHNOLOGY o tecnología (color rojo), WASTEWATER o aguas residuales (color verde), SEDIMENT o sedimento (color amarillo), y BACTERIUM o bacterias (color azul), las palabras mencionadas son los nodos de mayor tamaño, lo que indica que son términos con mayor influencia dentro del tema de los trabajos publicados sobre HC. Si se corrobora lo obtenido en la Figura 2 con la literatura existente, se observa que son términos comunes dentro de las investigaciones de este ámbito. Pues de acuerdo con algunos autores [5,24,34], definen a los humedales construidos como tecnologías para el tratamiento de aguas residuales. Y, de acuerdo con Johann Beckmann quien fue un promotor de dicho concepto, explica que la tecnología es una ciencia que procesa lo natural para crear bienes o servicios y satisfacer necesidades de la sociedad, ya que facilita la explicación y solución de problemas [35]. Esto se aplica totalmente en los humedales construidos, pues son conocimientos científicos nacidos de la ingeniería ecológica aplicados con el fin de simular procesos naturales para darle tratamiento a las aguas contaminadas, integrando a la sociedad para lograr un beneficio mutuo entre el ambiente y los seres humanos [4,36].

Como segundo término se encuentra el de aguas residuales (WASTEWATER), puesto que son ecotecnologías que pueden tratar aguas contaminadas de diferente procedencia, se han utilizado para depurar aguas del sector industrial [37,38], el sector agrícola [39], porcícola [40] y municipal [41], entre otros. Además, para algunos autores las aguas residuales se pueden considerar como parte de los componentes de los humedales [42].

Los siguientes dos términos dominantes dentro del análisis fueron SEDIMENT y BACTERIUM. De acuerdo con algunos autores, los componentes más estudiados de estas tecnologías son el sustrato (SEDIMENT), los microorganismos (BACTERIUM), y la vegetación [32,43].

El sustrato es uno de los elementos con mayor investigación, puesto que su función no solo es actuar de soporte para las plantas sino, que actúan como medio filtrante y funge como hábitat para el desarrollo de microorganismos. Los materiales más estudiados destacan por su porosidad, ejemplo de ellos son la arena, grava o roca, tezontle o zeolita [24]. De acuerdo con las investigaciones más relevantes sobre el sustrato son con el fin de conocer cual material y tamaño son más eficiente para remover sustancias contaminantes [44].

Además, en los últimos años se han investigado materiales de polietileno tereftalato (botellas PET), utilizando las partes rugosas o con dobleces y las taparrosas, esto debido a la gran facilidad de obtención y con el fin de dar un segundo uso a dicho material que normalmente termina en un relleno sanitario o en los océanos [45,46]. Asimismo, el utilizar sustratos específicos mejora la retención de los contaminantes y, por ende, mejora la remoción de estos. Por ello, el estudiar algún material en particular para remover un contaminante objetivo, da lugar a los humedales intensificados, ejemplo de ello es el uso de materiales reactivos para la eliminación del fósforo como, por ejemplo, productos naturales, subproductos industriales y manufacturados ricos en Calcio (Ca), Hierro (Fe) y Aluminio (Al) [13].



Los microorganismos corresponden a uno de los componentes más importantes dentro de los HC, gracias a que son los principales encargados de realizar tratamientos biológicos, junto con las plantas. De acuerdo con la cantidad de oxígeno presente en el humedal se desarrollan dos tipos; la zona superior que presenta mayor cantidad por el contacto con la atmósfera y por los exudados de las raíces es habitada por microorganismos aerobios y, el resto del sustrato presenta microorganismos anaerobios, ya que hay una cantidad menor o nula de oxígeno [11,42]. Los principales procesos realizados por estos organismos son: la eliminación de nutrientes, elementos traza, degradación de materia orgánica y desinfección [10]. De acuerdo con la gran variedad de especies que pueden adaptarse a estos sistemas, se han desarrollado diferentes estudios para caracterizar cuales microorganismos se encuentran presentes en la depuración de las aguas residuales. Algunos ejemplos incluyen a bacterias, hongos y protozoarios [47,48].

En relación con lo presentado en la Figura 2, la vegetación no fue identificada con un nodo de gran tamaño, sino que fue relacionada dentro del grupo referente al sustrato, esto debido a que las plantas se encuentran ancladas a este. Sin embargo, a pesar de que este término faltó dentro del análisis, cabe destacar que las plantas son uno de los componentes más importantes en estos sistemas de tratamiento, pues gracias a su capacidad de transferir oxígeno a través de su tejido arenquimoso hacia su sistema de raíces (rizosfera), ayudan al desarrollo de microhábitats aerobios, donde la presencia de microorganismos de este tipo, favorecerán procesos necesarios para la mitigación contaminantes dentro del humedal [42]. Además, mediante las raíces, la vegetación realiza procesos de adsorción y absorción de minerales como metales pesados, fósforo y nitrógeno; y, compuestos derivados del consumo de medicamentos, o de productos químicos usados en el aseo personal y del hogar, estos últimos presentes en aguas residuales municipales y catalogados actualmente como contaminantes emergentes [32]. Por ello han sido estudiadas en gran medida desde plantas típicas de humedales como *Phragmites* spp., *Typha* spp., y *Schoenoplectus* spp. [5], hasta plantas ornamentales terrestres como *Zantedeschia eathiopica* [49,50], *Canna* spp. [5], *Anturium* spp. [51] y *Heliconias* spp., [49], las cuales han sido adaptadas a condiciones de HC. Destacando que México es el país con mayor aplicación de HC con vegetación ornamental [36]. Dichas investigaciones recomiendan el uso de este tipo de plantas, ya que mejoran el paisaje del sistema por su apariencia estética con flores, además pueden otorgar beneficios económicos debido a la comercialización de dichas flores [5] o en la elaboración de artesanías a partir de tejido de plantas que se siembran en estos humedales [52].

3.3. TIPOS DE HUMEDALES CONSTRUIDOS

Los resultados obtenidos en la fase 1 del apartado dos, con el fin de conocer los principales países que realizan investigaciones sobre los tipos de humedales construidos, se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Identificación de documentos con el método booleano

Tipo de humedal	Artículos	Capítulos de Libro	Libros
Humedal superficial	495	12	0
Humedal superficial de flujo horizontal	510	31	0
Humedal superficial de flujo vertical	147	5	0
Humedal de flujo mareal	107	0	0
Humedal de tratamiento aireado	429	28	1
Humedal vertical tipo francés	22	1	0

Como se puede observar, la mayor cantidad de documentos encontrados en cada uno de los tipos de humedales son artículos de investigación, especialmente en los humedales subsuperficiales de flujo horizontal, con un total de 510 artículos. Además, se observa que el humedal vertical tipo francés es quien tuvo menos trabajos de investigación del 2010 al 2014, pues únicamente se encontraron 22 artículos, más 1 capítulo de libro, siendo un total de 23 publicaciones. Y, el único libro encontrado fue referente a los humedales de tratamiento aireados.

Posteriormente, para la realización de la fase 3, se realizaron los análisis bibliométricos, con el fin de conocer cuáles son los países que presentan mayor número de investigaciones de cada uno de los seis tipos de humedales construidos. Obteniendo los resultados de la Figura 3.

Como se puede observar en la Figura 3, se muestran los principales países que han desarrollado investigaciones relacionadas a los diferentes tipos de humedales existentes en el periodo de 2010 al 2024, así como las colaboraciones entre ellos. De acuerdo con lo presentado en la figura, China es el país que más aporte ha tenido en investigaciones a excepción del humedal construido tipo francés (f).

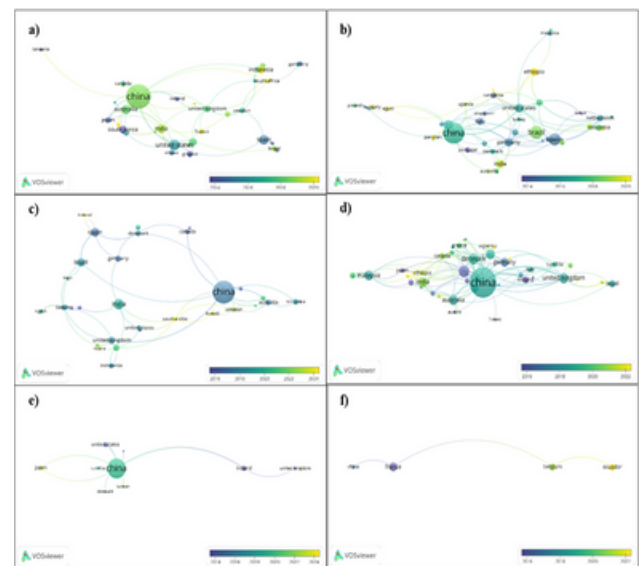


Figura 3. Mapas bibliométricos de países, a) humedal superficial, b) humedal superficial horizontal, c) humedal subsuperficial vertical, d) humedal de tratamiento aireado, e) humedal flujo mareal y f) humedal vertical tipo francés

Referente a los de flujo superficial (a) cuenta con un 32.3% de publicaciones a partir del año 2016, seguido de Estados Unidos con un 6.3% del total y Australia con un 4.5%. En investigaciones de humedales subsuperficiales horizontales (b), el país asiático sigue siendo el principal investigador con un total de 143 publicaciones correspondientes a un 26.4% en el año 2016, seguido de Brasil con 9.7%, quien realizó sus investigaciones a partir del año 2018 y, finalmente España con 8.3% quien ha tenido su mayor número de investigaciones desde el 2014.

Para humedales subsuperficiales verticales (c), China cuenta con el 38.8% de publicaciones desde el 2016. El mayor número de investigaciones de humedales con tecnologías intensificadas como los de tratamiento aireado (d) se desarrollaron a partir del 2018 también en China, quien tiene el 44.9% del total de publicaciones, asimismo, India es el país que ha realizado trabajos más recientes, a partir del 2022. Y finalmente, en humedales por pulsos (e) China sigue siendo líder, donde se observó el 78.5% de análisis, a partir del 2018. Sin embargo, el humedal de flujo vertical tipo francés (f) como su nombre lo indica, ha surgido en Francia, por ello es el país con mayor número de publicaciones, las cuales corresponden a un 21.7% del total desde el 2016, seguido de Bélgica y Ecuador con un 13.0%, en donde dichas investigaciones se han ejecutado principalmente a partir del 2020 y 2022 respectivamente. Este tipo de sistemas además de ser similares a un humedal de flujo vertical cuentan con un diseño francés que consiste en colocar una primera etapa de filtros alimentados con aguas residuales sin tratar, permitiendo un proceso de nitrificación completo [53].

De acuerdo con la revisión documental realizada, se pudo encontrar que el uso de los humedales construidos ha sufrido un cambio durante la última década. Estos cambios se han implementado específicamente en el diseño y estrategias operativas [13]. Debido a estos avances, actualmente se pueden clasificar en dos tipos (Figura 4): humedales convencionales, quienes realizan un tratamiento pasivo y a su vez se dividen de acuerdo con el flujo del agua a tratar (de flujo superficial y subsuperficial); y los humedales intensificados, estos tienen como objetivo la obtención de estándares de calidad de agua más altos. Esta nueva clasificación de humedales también se divide en dos: por el uso de energía externa o sustratos específicos para eliminar principalmente el fósforo [32], ya que es un elemento poco removido en los humedales de tipo convencional, con porcentajes del 44 al 71.6%. Cabe destacar que su remoción se asocia al sustrato [2,54,55].

El diseño de los HC toma en cuenta principalmente variables hidráulicas y cinéticas que integran tanto a variables hidrodinámicas como al comportamiento de los microorganismos, vegetación y su adaptación al medio filtrante. Así como la carga de contaminantes a tratar [6].

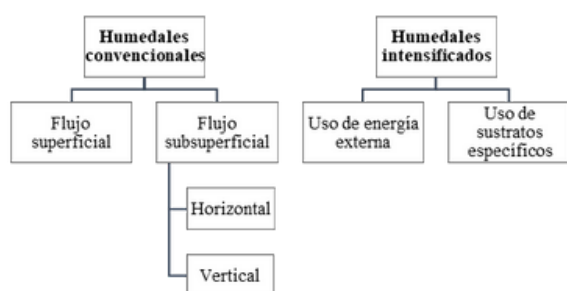


Figura 4. Clasificación actual de los humedales construidos. Elaboración propia

3.3.1. HUMEDALES SUPERFICIALES

Son sistemas de tratamiento conocidos como humedales de flujo superficial (FS) o flujo libre. Se asemejan lo más posible a un humedal natural [42]. Estos sistemas consisten básicamente en estanques o canales con una profundidad relativamente baja de 0.5 a 1 metro. El agua circula a través de los tallos de las plantas y se encuentra en contacto directo con la atmósfera [56]. La vegetación utilizada es de tipo acuática, puede ser flotante, emergente o sumergida (Figura 5).

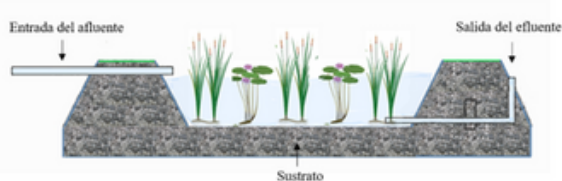


Figura 5. Humedal de flujo superficial. Elaboración propia

Dichos sistemas son eficientes, sin embargo, su combinación con otras tecnologías de depuración podría aumentar sus porcentajes de remoción, ya que de acuerdo a lo reportado en un estudio publicado en el 2018 [57], donde se evaluó la eficiencia de un humedal de FS utilizando *Cyperus papyrus* y *Phragmites australis* en Perú, el cual pretendía corroborar el cumplimiento del agua tratada con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos por el Ministerio del Ambiente en dicho país, con el fin de reutilizar el agua para riego. De acuerdo con el análisis se obtuvieron remociones del 84% para DBO, 89% para Coliformes Totales y Termotolerantes, 3% en pH y 77% para turbidez. Sin embargo, a pesar de que la mayoría de las remociones fueron de un 70 a casi 90%, dichos parámetros no dieron cumplimiento con los ECA. Por lo que se recomendó utilizar otro sistema de tratamiento posterior al humedal para lograr un cumplimiento a dichos estándares, así como también aumentar el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) del humedal.

3.3.2. HUMEDALES SUBSUPERFICIALES

Los humedales de flujo subsuperficial (HFSS) se caracterizan por tener una circulación de agua subterránea a través del sustrato, la cual está en contacto con las raíces y rizomas de las plantas. La profundidad de estos sistemas varía entre los 0.45 a 1 metro. El agua que ingresa a estos humedales se da a través de los caudales de escorrentía, agua subterránea, precipitaciones y de las descargas específicas a tratar [56]. Los actores principales en la remoción de dichos contaminantes son los microorganismos que crecen adheridos al sustrato, quien funge como filtro; y a las raíces de las plantas, donde estas llevan a cabo procesos de absorción y adsorción de contaminantes [42,56]. El sustrato puede estar conformado por diferentes materiales como grava, roca, sedimentos o restos de vegetación acumulados debido al crecimiento biológico [58]. Cabe destacar que el tamaño del medio poroso influye directamente en el flujo hidráulico y por ende en el caudal del agua a tratar [6]. Por ello, la determinación de la variación de los caudales es un parámetro importante que considerar en el diseño de estos sistemas, donde se toma en cuenta variables como: Q_a quien representa el caudal del afluente, E la evapotranspiración, P la precipitación, A_s el área superficial, H la altura del humedal, L la longitud del humedal y W el ancho del humedal.

Asimismo, Mitsch y Gosselink [3], proponen una fórmula mencionada en la Ec. 1 para determinar el caudal de entrada al sistema, la cual considera variables como tiempo de retención hidráulica (TRH). Dicha variable se refiere al tiempo que tarda el agua desde que entra y sale del sistema; y el volumen de agua a tratar. Dicho volumen hace referencia al espacio para agua que queda, descontando el espacio del medio poroso:

$$TRH = \frac{(Vm^3)}{Q(m^3 \div hr)} \rightarrow Q = \frac{V}{TRH} \quad (1)$$

El modelo implementado para el diseño consiste básicamente en un flujo de tipo pistón. Este tipo de flujo es considerado como el más básico, y con él se busca que la velocidad sea uniforme, es decir, todas las partículas del fluido desde la entrada hasta la salida deben tener la misma velocidad [59]. Buscando que el flujo rompa la resistencia creada por las plantas, raíces, sedimentos y sólidos acumulados. Por ello, para poder lograr una energía que rompa dicha resistencia se le proporciona al humedal una pendiente (comúnmente al 1 o 2%) con una salida de altura variable. Por ello, para el diseño de este tipo de sistemas, es importante considerar criterios como: reactores biológicos, flujo de pistón, y leyes que expliquen sobre el flujo a través de medios porosos como la ley de Darcy [42]. Los HFSS pueden ser utilizados para tratar eficientemente aguas residuales domésticas, industriales o lixiviados [60]. Y, se clasifican de acuerdo con el flujo o movimiento del agua en dos tipos: horizontales y verticales [3].

3.3.3. HUMEDALES SUBSUPERFICIALES HORIZONTALES

Los humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal (FSSH) se caracterizan principalmente porque el flujo del agua es de manera horizontal a través del sustrato poroso. Es decir, ingresa en la parte superior de un extremo y es recogida por un tubo en la parte opuesta inferior tal cual como se presenta en la Figura 6.

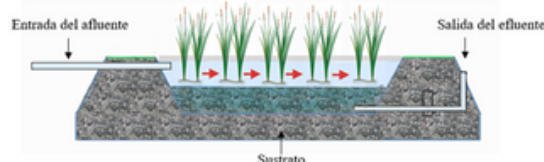


Figura 6. Humedal del flujo subsuperficial horizontal. Elaboración propia

El diseño de estos sistemas se basa en una cama impermeable con un sustrato de tierra o arena y grava, plantado con vegetación [42]. El agua se trata a través de su recorrido de manera lateral por todo el sistema. La profundidad del humedal varía entre 0.45 a 1 metro y cuenta con una pendiente entre 0.5 a 1%, con cargas orgánicas aproximadas de 6 g DBO5/m2d [6]. Cabe destacar que el agua residual que ingresa al sistema debe mantener un nivel inferior a la superficie (5-10 cm), lo cual se logra regulando el nivel del caudal de entrada [6].



Los criterios de diseño para los HFSSH son: cálculos del área del sistema, profundidad, pendiente, información sobre la porosidad del sustrato y relación largo-ancho [42].

Un ejemplo de la eficiencia de este tipo de sistemas fue reportado en 2021, donde se evaluó un humedal FSSH para tratar aguas pertenecientes a un colegio rural ubicado en el Municipio de San Juan de Pasto en el Departamento de Nariño, dicho sistema cuenta con una capacidad de 700 personas (personal administrativo, alumnos y docentes) y fue evaluado como un sistema de tratamiento secundario posterior a una trampa de grasa. El humedal de FSSH tuvo un TRH de 1.3 días, y fue sembrado con *Scirpus californicus* (junco o totora). Los parámetros evaluados con las remociones obtenidas fueron las siguientes: 93.89% para DBO₅, 84.98% de DQO, 40% de SST, 99.9% en Coliformes Totales y 99.97% para E. Coli, dichos porcentajes comprueban que el agua obtenida después del tratamiento es apta para descargarla en cuerpos naturales o reutilizarla para fines agrícolas, según las normas establecidas en Colombia. Además, el presente estudio corrobora la eficiencia de tratamiento de estos sistemas, y reafirma la viabilidad de implementación en zonas rurales gracias a las altas remociones, además de sus ventajas operativas y económicas [62].

3.3.4. HUMEDALES SUBSUPERFICIALES VERTICALES

Los humedales construidos de flujo subsuperficial vertical (FSSV) fueron inicialmente desarrollados en Europa como alternativa a los humedales de FSSH para producir efluentes nitrificados [9]. Los humedales de FSSV son alimentados de manera intermitente para preservar y estimular al máximo las condiciones aerobias, a través de una tubería perforada colocada encima del sustrato. Recibiendo las aguas residuales de arriba hacia abajo, como regadera. El cual se muestra en la Figura 7. De esta forma, las condiciones de saturación con el agua en el sistema son seguidas por períodos de insaturación, estimulando el suministro de oxígeno. La profundidad del medio granular es de entre 0.5 y 0.8 m. Operan con cargas de alrededor de 20 g DBO/m²·día [56]. Las aguas filtran verticalmente a través del sustrato y se recogen en una tubería situada en el fondo del humedal. La vegetación emergente se planta también en este medio granular. A diferencia del HFSSH, el sustrato está constituido por varias capas, encontrándose las más finas en la parte superior, aumentando el diámetro de la grava hacia abajo, para favorecer el drenado y evitar saturación [6].

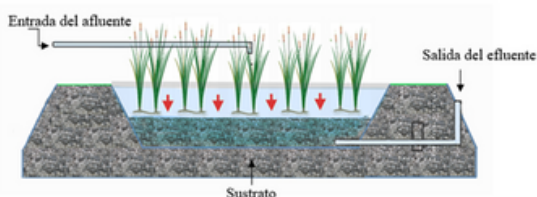


Figura 7. Humedal del flujo subsuperficial vertical. Elaboración propia

Para su diseño se debe considerar la construcción de dos humedales para que la operación sea de forma paralela, es decir, cada humedal debe tener un periodo de reposo y un periodo de suministro de agua, ya que son sistemas que operan con cargas superiores a los horizontales [63]. El periodo de reposo a considerar es 1 a 2, refiriéndose a que, por cada periodo de alimentación, se tengan dos periodos de reposo [42]. Esta manera de operación favorece la oxigenación del sustrato pues, la lámina de agua suministrada al sistema empujará el aire a través de los poros del sustrato; una vez que el agua sale totalmente del humedal, el espacio vacío formado se llenará con aire, el cual se arrastra en la siguiente aplicación. Cabe destacar que los criterios de diseño a considerar son los mismos que en un humedal FSSH.

En 2020, Sandoval-Herazo et al., (2020), evaluaron la eficiencia de remoción de humedales verticales parcialmente saturados en el tratamiento de aguas generadas en una granja porcina. Para ello, se adecuaron 6 unidades experimentales alimentadas cada 4 horas, en dicho estudio se analizaron parámetros como DQO, SST, N-NH₄, NTK, y CF totales.

Una vez realizadas las mediciones y cálculos necesarios se obtuvieron remociones del 5% para DQO, 20% de SST, 25% de N-NH₄, 32% de NTK y 20% de CF totales, cabe destacar que dicho humedal fue plantado con especies vegetales como *Canna hybrids* e *Iris germánica*, las cuales demostraron tener una eliminación efectiva de contaminantes, así como importante resistencia a las aguas porcinas. Concluyendo que los humedales de FSSV son eficientes para tratar este tipo de afluentes, debido a las condiciones de saturación parcial que generan condiciones aerobias y anaerobias, favoreciendo los procesos de nitrificación y desnitrificación [40].

3.3.5. HUMEDALES DE TRATAMIENTO AIREADOS

Los humedales de tratamiento aireados (HTA) corresponden a los sistemas de humedales intensificados (13). Pueden ser de flujo horizontal o vertical. Este tipo de sistemas permiten una mayor eliminación de contaminantes, tienen la capacidad de remover entre 10 y 100 veces más la materia orgánica que un humedal convencional, gracias a la mayor disponibilidad de oxígeno (12). Dicho sistema es aireado de manera mecánica desde la parte inferior a través de un sistema de distribución de aire (64)(Figura 8).

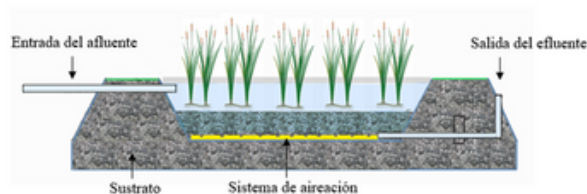


Figura 8. Humedal de tratamiento aireado. Elaboración propia

Los HTA se han implementado en gran medida en Reino Unido, pues más de 40 sistemas de humedales aireados de flujo horizontal han operado exitosamente como tratamientos terciarios. Su interés de uso se ha elevado considerablemente gracias a investigaciones que han corroborado su eficiencia en la remoción de contaminantes en aguas residuales de diferente procedencia como industriales (33), lixiviados de vertederos (65), escorrentía de deshielo de aeropuertos (66), aguas mineras (67) y aguas contaminadas por derrames de petróleo (68), entre otras.

El diseño de estos sistemas es similar a los humedales de flujo subsuperficial, con un sustrato conformado por grava y con profundidades saturadas al menos de 1 m. El agua residual entra al sistema de forma regulada a través de una tubería de alimentación y se mantiene por debajo del sustrato, aproximadamente entre 5 y 10 cm por debajo (13).

De acuerdo con algunos autores (69,70), los HTA tanto horizontales como verticales son altamente eficientes en la remoción de carbono y amonio, además eliminan nitrógeno total (NT) en mayores cantidades que los humedales subsuperficiales convencionales. Sin embargo, el utilizar la aireación de manera intermitente favorece la eliminación de NT en humedales aireados de flujo vertical.

En el 2020, se desarrolló una investigación con el fin de evaluar el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria atunera en Ecuador, a través de un humedal artificial aireado. Dicho sistema fue sembrado con 3 especies vegetales, las cuales correspondieron a *Chrysopogon zizanioides* (pasto vetiver), *Saccharomyces cerevisiae* y *Trichoderma harzianum*. Para poder evaluar cual era la especie más eficiente en la remoción de contaminantes, se establecieron 3 tratamientos (pasto vetiver + *S. cerevisiae*; pasto vetiver + *T. harzianum*; y, por último, pasto vetiver + *S. cerevisiae* + *T. harzianum*), los tres tratamientos se compararon con una celda control (sin vegetación) y una celda con puro pasto vetiver. Todos los experimentos tuvieron un total de 15 especies y un caudal de aire correspondiente a 3 l/min. De acuerdo con los análisis realizados, se pudo concluir que el tratamiento que contenía las especies de vetiver + *S. cerevisiae*, fue el sistema con mayores porcentajes de remoción, obteniendo 99.78% para DBO, 71.27% de NTK. Comprobando que el sistema de aireación proporciona condiciones óptimas para una mayor remoción de materia orgánica y nitrógeno.

3.3.6. HUMEDAL POR PULSOS O FLUJO MAREAL

Estos sistemas son conocidos como humedales de alimentación secuencial, humedales con flujo por pulsos (llenado-vaciado) o humedales de flujo mareal (HFM). Los HFM consisten en dos o más celdas de humedales de flujo subsuperficial acopladas, es decir en serie, tal y como se muestra en la Figura 9. Las cuales se llenan y se drenan de manera periódica y alternada por medio de bombas de aire (71). La alimentación secuencial hace referencia al llenado y vaciado alternativo de las celdas, mientras que el flujo por pulsos se configura en pares o en serie.



Figura 9. Humedal del flujo mareal. Elaboración propia

El objetivo principal de la alimentación secuencial es para aumentar la cantidad de oxígeno subsuperficial, y así tener mayores remociones de compuestos que necesitan oxígeno como Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO5) y Nitrógeno amoniacal (13). Para ello se requiere un diseño adecuado, pues durante la etapa de drenado del agua, el aire entra por todo el sustrato y la superficie del agua, siendo su difusión de manera rápida. Durante la segunda etapa, se realiza el llenado posterior, donde la película de agua superficial del sustrato se encuentra cubierta de agua en condiciones anaerobias y anóxicas, prevaleciendo las condiciones reductoras. Durante todo el ciclo se crean condiciones únicas que permiten la proliferación de diversos microorganismos (72).

Debido a la tecnología implementada, son sistemas adecuados para tratar aguas residuales complejas, pues han demostrado altas remociones de contaminantes (73,74). Sin embargo, presentan altos costos de inversión, operación y mantenimiento por el uso de bombas y componentes necesarios para trasladar el agua de una celda a otra. Por ello, los HFM a pequeña escala presentan altos costos de implementación, no obstante, a escala real son una opción tecnológica rentable, comparados con sistemas convencionales (75). Además, si existe una descarga de aguas residuales permanente, se debe considerar el uso de amplios contenedores y sedimentadores para resguardar el agua antes de alimentar el sistema de humedales. Esto mientras se mantiene el drenado en las celdas.

En 2022, se realizó una comparación del rendimiento de humedales artificiales mareales y no mareales, los cuales trataban aguas residuales de la maricultura (76). En dicho estudio se pretendía eliminar principalmente el nitrógeno y fósforo, a través del uso de *Aegiceras corniculatum* (manglar típico). En cuanto a los resultados para estos dos compuestos inorgánicos, indicaron que las tasas de remoción son superiores en los humedales de flujo subsuperficial sin marea a comparación de los humedales superficiales con y sin marea. Los porcentajes de remoción obtenidos para el humedal de FSS no mareal fueron 88.4% de NO_2^- , 80.5% de NO_3^- , 81.4% de NH_4^+ , 79.7% de Nitrógeno Total (NT) y 40.8% de Fósforo Total (TP), asimismo, las remociones para el humedal de flujo superficial mareal fueron 65.3, 61.3, 90.6, 60.1 y 19.2%, respectivamente. Dichos resultados fueron comparados entre sí, y a la par, con las remociones obtenidas para el humedal de flujo superficial no mareal, el cual obtuvo las siguientes remociones: 11.4, 64.6, 68.7, 56.6 y 16.3%. Dichos porcentajes indicaron que los humedales de FSS no mareales son más estables y efectivos en su actividad depuradora para aguas marinas en comparación con los humedales de flujo libre mareales y no mareales. Así mismo, Wu y colaboradores (73), evaluaron un HC a escala piloto con flujo mareal, principalmente para observar la transferencia de oxígeno, eliminación de materia orgánica y amonio. De acuerdo con los resultados expuestos, los HC con flujo mareal mejoraron significativamente el suministro de oxígeno y la eliminación de DBO_5 y NH_4^+ , sin embargo, el contar con altas cargas de DBO, esto provocó una inhibición en los procesos de nitrificación, debido al crecimiento desmedido de las bacterias heterotróficas (microorganismos que usan los compuestos orgánicos para crecer).

3.3.7. HUMEDAL VERTICAL TIPO FRANCÉS

El humedal de flujo vertical tipo francés (HT-FV francés) representado en la Figura 10, es un sistema de tratamiento originado en Francia, el cual tiene como propósito tratar aguas residuales crudas a través de dos etapas consecutivas de humedales verticales convencionales con distintos sustratos (13,77). Su diseño específico permite tratar las aguas después de pasar por una reja. En la primera etapa, denominada lecho de carrizos francés, se lleva a cabo el tratamiento de los lodos, retención de sólidos y eliminación parcial de materia orgánica y nitrificación. La capa retenida en la superficie debe retirarse cuando alcance la profundidad máxima (20 cm), dicha capacidad es alcanzada en un periodo de 10 a 15 años. Posteriormente, en la segunda etapa se lleva a cabo la eliminación de la materia orgánica y procesos de nitrificación en mayor medida, a través de un humedal vertical convencional, asimismo, dicho humedal puede ser sustituido por otro sistema si se busca potenciar algún otro proceso de remoción (77).

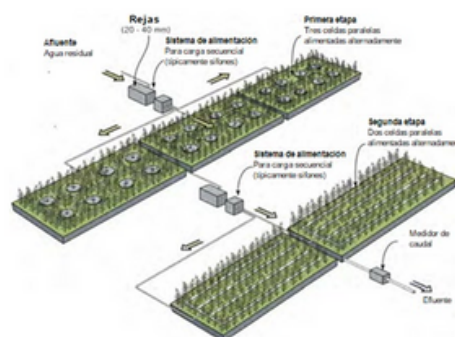


Figura 10. Humedal vertical tipo francés [13]

El diseño del HT-FV francés se caracteriza por su simplicidad. Pues no existe otra unidad de tratamiento más que las mallas y los filtros. Un punto importante dentro del correcto funcionamiento del sistema es la buena colocación de las plantas, las cuales consisten únicamente en carrizos (*Phragmites* sp.). Los filtros de la primera etapa son de gran utilidad para remover materia orgánica y Sólidos Suspendedos Totales (SST), los filtros de la segunda etapa se utilizan con el fin de pulir la DQO, DBO_5 y SST. El sustrato utilizado en todo el sistema tiene diferentes dimensiones con el fin de proporcionar las condiciones adecuadas para un buen tratamiento. En la etapa uno, se suele colocar grava de 2 a 6 mm. Cabe destacar que el agua en este punto es recogida por un sistema de tuberías en la parte inferior del sistema, donde se encuentra la grava de mayor tamaño (20 – 60 mm) para evitar obstrucciones. En la etapa dos, el sustrato más utilizado es la arena (13). Las celdas son construidas con relación al largo y ancho de la superficie de uno, con una pendiente del 1%. La profundidad de la capa principal se establecerá de acuerdo con el rendimiento deseado, pues la mayor parte de la eliminación de carbono y amonio en los HT-FV francés se produce dentro de los 10 a 40 cm superiores de un filtro insaturado. Cuando se deben alcanzar concentraciones estrictas de efluentes, se puede aumentar la profundidad de la capa principal (> 60 cm para la eliminación de DQO y > 80 cm cuando se requiere una nitrificación completa) (78).

En 2019, se realizó una evaluación de un HC tipo francés a escala piloto en la Universidad de Paula Santander-Ocaña, Colombia, el cual trataba aguas residuales porcinas, dicho sistema utilizaba *Typha latifolia* (Totora), y evaluó la remoción de contaminantes en dos TRH, 10.5 días y 7 días. Los porcentajes obtenidos para 10.5 días fueron: 98.43% para DQO, 90.0 % de DBO_5 y 99.0 % para SST%; y, las remociones para el TRH de 7 días: 91.02%, 76.09% y 90.0% respectivamente. Dichos resultados demostraron que el HT-FV francés a escala piloto obtuvo mejores resultados con un mayor TRH, por ello, dicho sistema es recomendado para el tratamiento de aguas porcícolas, sin embargo, recomendado su implementación en otros sectores para corroborar su eficiencia depurativa (79).

No obstante, cabe destacar que dicho sistema al igual que los demás ha sido estudiado en los últimos años con el fin de generar nuevos diseños. Esto genera una nueva oportunidad para centros de investigación, industrias o diferentes establecimientos públicos y privados que tienen como objetivo reducir los costos y mejorar el rendimiento de estas ecotecnologías para el tratamiento de aguas residuales (53).



3.4. HUMEDALES CONSTRUIDOS A TRAVÉS DEL TIEMPO

Desde hace más de tres décadas se les adjudicó el término "riñones del planeta" a los humedales naturales, debido a las actividades de desinfección y transformación de materia orgánica y otros nutrientes (80). Cabe destacar que el uso de estos sistemas no es nuevo, pues se han realizado reportes donde se registra el uso de humedales naturales desde civilizaciones antiguas, en los cuales China y Egipto utilizaban estos sistemas para disponer de sus aguas servidas (81). Sin embargo, el utilizar estos sistemas como descarga de aguas residuales de manera descontrolada provocó la pérdida de ecosistemas húmedos. En la década de los 50's se produjo un cambio radical en el uso de los humedales naturales como sitios de descarga, debido al basto conocimiento que se generó sobre sus servicios ecosistémicos. Por ello, se comenzó a investigar acerca de nuevas tecnologías que imitaran los procesos de los humedales naturales, generando la idea de los HC (2).

La evolución sobre los HC a través del tiempo se puede dividir en tres etapas, la primera etapa comprende un periodo acerca de los primeros humedales construidos desde 1950 a 1970; la segunda etapa se centra en un periodo de 1980 a 1990; y, por último, del año 2000 a la actualidad.

La Figura 11 presenta una línea del tiempo adaptado de una publicación de Vidal y Hormozábal en el 2018 (2), presentando los hechos más relevantes en la historia de los HC.

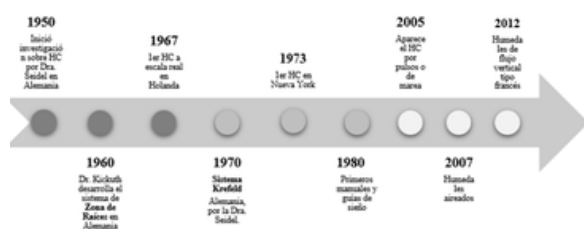


Figura 11. Evolución de los humedales construidos (adaptado de Vidal y Hormozábal, 2018) [2]. Elaboración propia

3.4.1. PERIODO DE 1950 A 1970

Uno de los trabajos más antiguos sobre estos sistemas fue presentado en una carta elaborada por Nemo en 1904, quien observó por primera vez que las aguas domésticas podían tratarse en un jardín, mediante canales con una profundidad aproximada de 0.381 a 0.457 m y con la presencia de plantas que podían desarrollarse en lugares inundados (81,82). Pero fue hasta los 50's donde comenzaron los primeros trabajos científicos sobre plantas capaces de remover contaminantes. En 1952 la Dra. Käthe Seidel en el instituto de Max Planck, Alemania, realizó experimentos en jardineras donde obtuvo remociones de fenoles, metales pesados e hidrocarburos presentes en aguas contaminadas, especialmente con *Schoenoplectus* spp. (junco), donde se confirmó que dicha planta no solo enriquecía el sustrato, sino que exudaban antibióticos (2). Posteriormente en 1960, dicha pionera trabajó en colaboración con el Dr. Kickuth de la Universidad de Göttingen, Alemania. Posterior a su separación, éste desarrolló un sistema llamado "Método de Zona de Raíces", el cual básicamente consistió en la investigación sobre el funcionamiento de las plantas en humedales con flujo horizontal, con un sustrato específico y con la especie *Phragmites australis* (carrizo), dichos trabajos se centraron en el análisis de la transferencia de oxígeno por medio de su sistema de raíces, así como su aporte de carbono hacia las bacterias, procesos de nitrificación y desnitrificación, así como la precipitación de fósforo (2,83). Debido a las múltiples investigaciones sobre los HC de FS que se estaban desarrollando hasta el momento, en 1967 se construyó el primer HC a escala real en Lelystad, Países Bajos para 6,000 personas, y un año más tarde en Keszthely, Hungría, ambos para tratar aguas servidas. Cabe destacar que las investigaciones sobre humedales en Alemania solo se limitaron al método de zona de raíces, mientras que en Estados Unidos se experimentaba sobre flujos subterráneos (84). Sin embargo, fue hasta 1973 cuando se diseñó y construyó el primer humedal de FS como sistema piloto en el Laboratorio Nacional de Brookhaven, Nueva York (85). Las investigaciones realizadas por la Dra. Seidel dieron como resultado un sistema conocido como "Sistema Krefeld" en 1970. Dicho sistema consistía en humedales en paralelo, conocidos como lecho de filtración (84), con varias etapas y vegetación emergente. En este modelo se solía utilizar un humedal de FSSV en las primeras etapas, y posteriormente un humedal de FSSH. Estos experimentos dieron base a lo en el siglo XX se denominarían humedales híbridos (85).

2.4.2. PERIODO DE 1980 A 1990

Como resultado de los diferentes experimentos, la aplicación de los HC comenzó a expandirse, implementando dichos sistemas en California, Dinamarca, Reino Unido, Portugal, España, Grecia e Italia (2). Por ello, a finales de 1980 se crearon las primeras guías y manuales con relación al diseño y construcción de estas ecotecnologías (86-89).

2.4.3. PERIODO DEL 2000 A LA ACTUALIDAD

De acuerdo con Vidal y Hormozábal, a partir del año 2000 las investigaciones referentes a los HC crecieron en gran medida (2). Y, un dato más actual se representa en la tabla 1, donde los resultados obtenidos para investigaciones de humedales construidos en la plataforma de información científica DIMENSIONS fue de 98,634 en total.

Asimismo, se ha podido observar que dichos sistemas han sido investigados desde distintos enfoques, tomando en cuenta principalmente sus componentes. Sin embargo, uno de los eventos más significativos en la evolución de los humedales construidos ha sido la generación de nuevos diseños con el fin de obtener un tratamiento más eficiente de las aguas residuales, creando la clasificación de humedales intensificados (13). De acuerdo con lo presentado en la Figura 12, y la búsqueda de información en DIMENSIONS, el primer artículo publicado sobre el humedal tipo mareal fue en el año de 2005 (90), el cual se centró en un experimento basado en mejorar la eliminación de la materia orgánica y nitrógeno amoniacal. Posteriormente, en el 2007 se publicó el primer artículo sobre humedal de tratamiento aireado (65), el cual pretendía mostrar la eficiencia de remoción a escala piloto en lixiviados de un vertedero. Y, por último, siendo el humedal de más reciente creación el humedal originado en Francia en el año 2012 (91).

3.5. AVANCES TECNOLÓGICOS EN EL DISEÑO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS

Los avances tecnológicos de los humedales construidos básicamente consisten en el diseño y condiciones operativas (6). Dichos sistemas presentan tecnologías avanzadas para pasar de las remociones que proporciona un humedal convencional a generar altos porcentajes de remoción a través de los humedales intensificados, los cuales hacen uso de estrategias operativas, de diseño y/o materiales específicos para remover principalmente fósforo, nitrógeno y materia orgánica. Dichos avances se basan principalmente en el uso de medios reactivos, recirculaciones, saturaciones parciales, alimentación secuencial y sistemas de aireación forzada (13). Los medios reactivos suelen utilizarse como sustituto del sustrato convencional (arena, grava o piedra porosa), con el fin de eliminar el fósforo o retener temporalmente el amonio. Debido a que la eliminación del fósforo está íntimamente relacionada con propiedades fisicoquímicas e hidrológicas del medio filtrante, ya que este se encarga de absorberlo o precipitarlo (55). Ejemplo de sustratos específicos son los medios naturales como la apatita, arena de conchas, conchas de ostras calentadas o quemadas; subproductos industriales, como cenizas volantes y escorias; o productos manufacturados como Ferrosorp®, LECA®, phosclean®, entre otros, siempre y cuando tengan altas concentraciones de Ca, Fe y Al (92). Una de las desventajas de este tipo de sustratos es el aumento considerable del pH del agua tratada y la colmatación que puede sufrir el sustrato en un largo tiempo por la precipitación del fósforo, ya que se reducen los poros (13). La recirculación y la saturación parcial son dos formas de aumentar la eliminación del nitrógeno total (NT) y materia orgánica en los humedales verticales. La recirculación consiste en direccionar una parte del efluente (agua tratada con alta cantidad de nitrato, pero poca materia orgánica) al afluente (agua contaminada con bajo nitrato y alta materia orgánica) permitiendo que se lleve a cabo procesos de desnitrificación gracias a las composiciones de los dos tipos de aguas (93). Asimismo, la saturación parcial consiste en mantener la capa superior de la celda del humedal de FV sin agua y la capa inferior con agua, al no contar con agua la primera parte del sistema favorecerá las condiciones aerobias desarrollando procesos de nitrificación (13). Otras de las estrategias operativas es la alimentación secuencial, la cual se lleva a cabo en el humedal de tipo mareal (71) y los sistemas de aireación activa o aireación forzada, donde se coloca una bomba de aire a través de una tubería en la parte inferior del humedal, permitiendo la distribución de las burbujas por todo el sustrato con el fin de eliminar en mayor proporción el carbono, amonio y NT (13,64).



CONCLUSIONES

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, los humedales construidos presentan diversas características que elevan su importancia e interés de uso, ya que son sistemas altamente estudiados para tratar aguas residuales de diferente procedencia como, aguas industriales, municipales, domésticas, agrícolas, entre otras. Por ende, han sido investigados a través del tiempo, especialmente sus componentes principales como el sustrato, los microorganismos y la vegetación; con el objetivo de mejorar los procesos de remoción de contaminantes y generando un nuevo tipo de humedales construidos desarrollados a partir del año 2000: los humedales de tratamiento intensificado (humedales aireados, de flujo mareal y vertical tipo francés). Dichos sistemas se caracterizan por utilizar energía externa o sustratos específicos para eliminar contaminantes como el fósforo, amonio y materia orgánica, principalmente. Asimismo, se pudo detectar que China es el país con mayor investigación sobre humedales construidos tanto convencionales como intensificados, a excepción del humedal vertical tipo francés que, como su nombre lo indica, fue originado en Francia, por lo que dicho país es el principal investigador sobre este humedal. Además, se identificó que los principales avances tecnológicos en el diseño de esta nueva clasificación de humedales consiste en el uso de tecnologías específicas como bombas de recirculación, tuberías de aireación, o estrategias operativas como alimentaciones secuenciales, uso de medios reactivos como sustrato y saturaciones parciales. Dichos métodos son con el fin de eliminar los componentes que no suelen removerse en grandes cantidades en los humedales convencionales. Sin embargo, la presencia de sus componentes y la circulación del agua son aspectos que permanecen igual desde 1950, año en el que iniciaron las investigaciones científicas sobre este tópico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo de El Colegio de Veracruz, por brindarme la oportunidad de cursar la Maestría en Desarrollo Regional Sustentable, perteneciente al Sistema Nacional de Posgrados de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SNP-SECIHTI). Asimismo, agradezco a SECIHTI por el financiamiento del Proyecto de posgrado con número de **CVU 1324929**. Además, agradezco a mis directores del proyecto por su confianza y apoyo.

REFERENCIAS

Marín-Muñoz JL. Humedales. Riñones del planeta y hábitat de múltiples especies. 1st ed. Secretaría de Educación del Gobierno de Veracruz, editor. Xalapa, Veracruz: Editora de Gobierno; 2018. 1-95 p.

2. Vidal G, Hormazábal S. Humedales construidos. 1st ed. Concepción, Chile: Universidad de Concepción; 2018.

3. Mitsch WJ, Gosselink JG. Wetlands. fourth. Nueva York: John Wiley & Sons, Inc.; 2007.

4. Mitsch WJ, Jorgensen SE. Ecological engineering: A field whose time has come. *Ecol Eng*. 2003 Oct;20(5):363-77.

5. Morales G, López D, Vera I, Vidal G. Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas. *Theoria* [Internet]. 2013 [cited 2024 Nov 4];22(1):33-46. Available from: <https://www.redalyc.org/pdf/299/29936198004.pdf>

6. Aspirilla WJ, Ramirez JS, Rodríguez DC. Humedales artificiales subsuperficiales: comparación de metodologías de diseño para el cálculo del área superficial basado en la remoción de la materia orgánica. *Ingenierías USBMed*. 2022 Oct 6;11(1):65-73.

7. Zurita-Martínez F, Castellanos-Hernández OA, Rodríguez-Sahagún A. El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México. *Rev Mex De Cienc Agric*. 2011 Aug 31;1(1):39-50.

8. Hernández ME. Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable*. 2016;1(2):1-12.

9. EPA. Humedales artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales. Una revisión. *Ecol Eng*. 1993;2(4):382-9.

10. Lara JA. Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales [Tesis de Maestría]. [Barcelona]: Universidad Politécnica de Cataluña; 1999.

11. Arias O. Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial [Tesis]. [Barcelona]: Universidad de Cataluña; 2004.

12. Nivala J. Effect of desing on treatment performance, plant nutrition and clogging in subsurface flow treatment wetlands. [Aarhus, Denmark]: Aarhus University; 2012.

13. Dotro Gabriela, Langergraber Guenter, Molle Pascal, Nivala J, Puigagut J, Stein O, et al. Humedales para Tratamiento. Vera-Puerto I, Arias C, editors. Vol. 7. IWA Publishing; 2021. 1-177 p.

14. De la Peña ME, Ducci J, Zamora V. Tratamiento de aguas residuales en México. México: BID; 2013. 1-42 p.

15. Secretaría de Gobernación. DECRETO de 2012 por el cual se declara reformado el párrafo quinto y se adiciona un párrafo sexto al artículo 4o. de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. [Internet]. DOF. 8 de febrero México; 2012. Available from: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5232952&fecha=08/02/2012#gsc.tab=0

16. CONAGUA. Programa Nacional Hídrico 2020 - 2024 [Internet]. 2020 [cited 2024 Nov 5]. Available from: <https://www.gob.mx/conagua/articulos/consulta-para-el-del-programa-nacional-hidrico-2019-2024-190499>

17. Ramírez A, Sánchez JM, García A. El Desarrollo Sustentable: Interpretación y Análisis. *Revista del Centro de Investigación*. 2003 Apr;6(21):55-9.

18. ONU. Agua | Naciones Unidas [Internet]. 2023 [cited 2024 Nov 5]. Available from: <https://www.un.org/es/global-issues/water>

19. ONU. Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. 2023.

20. SEMARNAT, INECC. Mitigación del cambio climático. Ciudad de México; 2018 Nov.

21. CONAGUA. Estadísticas del Agua en México 2023. México; 2023.

22. INEGI. Población Rural y Urbana [Internet]. 2020 [cited 2024 Nov 5]. Available from: https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema=P

23. Vidal-Álvarez M. Tratamiento de aguas residuales en México: problemáticas de salud pública y oportunidad de uso de ecotecnologías sustentables. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable*. 2018 Oct 10;3(1-2):41-58.

24. Marín-Muñoz JL. Humedales construidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reuso del agua. *Agro Productividad* [Internet]. 2017 [cited 2024 Nov 5];10(5). Available from: <https://www.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/1028>

25. SEMARNAT. Los humedales en México. 2014.

26. CONAGUA. NumeraguA 2022 [Internet]. 2022. Available from: www.gob.mx/conagua

27. Hernández-Sampieri R, Fernández C, Baptista P. Metodología de la Investigación. 6th ed. McGraw Hill; 2014. 1-634 p.

28. Zitácuaro-Contreras I, Ortega G, Marín-Muñoz JL. Análisis de la educación a nivel primaria basada en la ética y su relación con el medio ambiente y la sustentabilidad. In: Noceda DA, editor. *Rostros de la postmodernidad: crisis ambiental y alternativas de desarrollo sustentable en México*. 1st ed. El Colegio de Puebla, A. C.; 2024.

29. Sarmiento EG, Roa Perez J, Ortiz-Ospino L. Análisis de las tecnologías en sistemas de abastecimiento de agua potable. *Investigación y Desarrollo en TIC* [Internet]. 2019 Jul 1;10(2):32-44. Available from: <http://revistas.unisimon.edu.co/index.php/identec>

30. Rillo AG. Análisis hermenéutico de la relación entre desarrollo sostenible y competencias profesionales del médico general mexicano. *Foro de Educación*. 2015 Jul;13(19):263-93.

31. Quiroz MR, Sierra AB. Pertinencia de las ANP como política de conservación y mejoramiento de la calidad de vida. Análisis de percepción en la Reserva de la Biosfera de Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado. *Estudios Sociales: Revista de Investigación Científica*. 2008;16(32):141-76.

32. Zurita-Martínez F, Sandoval-Herazo LC. La tecnología de los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales. Tendencias en energías renovables y sustentabilidad [Internet]. 2024 Oct 26;3(1):6-10. Available from: <https://aldeser.org/journals/index.php/TERTYS/article/view/186>

33. González-Pereyra D, Cisneros-Almazán R, Cisneros-Pérez R, Guadiana-Alvarado ZA, Soto-Peña GA. Tratamiento de aguas residuales de la industria galvanoplástica mediante humedales intensificados a nivel microcosmos. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales Investigación, desarrollo y práctica*. 2022 Dec 6;15(3):1080-94.



34. Pérez YA, García Cortés DA, Jauregui Haza UJ. Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión. *Ecosistemas*. 2022 Apr 26;31(1):2279.
35. Carvajal G. Sobre el discurso tecnológico de la modernidad. *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*. 2012 Aug 18;12(25):37-59.
36. Marín-Muñiz JL, Hernández ME, Gallegos-Pérez MP, Amaya-Tejeda SI. Plant growth and pollutant removal from wastewater in domiciliary constructed wetland microcosms with monoculture and polyculture of tropical ornamental plants. *Ecol Eng*. 2020 Mar 15;147.
37. Guerra-Sandoval BG. Tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria de productos lácteos San Salvador - Cantón Riobamba, mediante fitorremediación con humedales artificiales empleando totora. [Riobamba-Ecuador]: Universidad Nacional de Chimborazo; 2018.
38. Sierra-Gaviria E, Campos-Gilón A, Daza-Ordoñez A, Coral P, Gómez L, Morantes CF, et al. Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales construidos en la remoción de mercurio de efluentes mineros auríferos. *Hidrobiológica*. 2024 Mar 15;34(1):51-9.
39. García Hernández J, Valdés-Casillas C, Cadena-Cárdenas L, Romero-Hernández S, Silva-Mendizábal S, González-Pérez G, et al. Humedales artificiales como un método viable para el tratamiento de drenes agrícolas. *Rev Mex De Cienc Agric* [Internet]. 2011;(1):97-111. Available from: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263120987008>
40. Sandoval-Herazo M, Nani G, Sandoval L, Rivera S, Fernández-Lambert G, Alvarado-Lassman A. Evaluación del desempeño de humedales construidos verticales parcialmente saturados para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 2020 Mar 19;23(38):1-12.
41. Portillo-Peralta JI, Marín-Muñiz JL, Celis M del C, Zamora-Castro SA. Diagnóstico sobre el funcionamiento y la apropiación social de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales en pasturas. *Journal of Basic Sciences* [Internet]. 2022;8(23):162-9. Available from: <http://revistas.ujat.mx/index.php/jobs>
42. Delgadillo O, Camacho A, Pérez LF, Andrade M. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Antequera Durán N, editor. Vol. 1. Bolivia: Centro AGUA; 2010. 1-115 p.
43. Delgadillo O, Camacho A, Serie MA. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales [Internet]. 2010. 115 p. Available from: http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf%5Cnhttp://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales
44. Pidre JR. Influencia del tipo y granulometría del sustrato en la depuración de las aguas residuales por el sistema de humedales artificiales de flujo vertical y horizontal [Tesis doctoral]. [Cádiz, España]: Universidad de Cádiz; 2010.
45. López JE, Marín-Muñiz JL, Zamora-Castro SA, Celis M del C. Evaluación del crecimiento de plantas sembradas en humedal artificial: efecto del posicionamiento de sembrado. *Journal of Basic Sciences* [Internet]. 2022;8(23):104-11. Available from: <http://revistas.ujat.mx/index.php/jobs>
46. Andrade VA, Rosero JA. Evaluación de la remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo subsuperficial a escala piloto como tratamiento de pulimento en las aguas residuales de Frigovito S.A. [Tesis de especialidad]. [Pereira]: Universidad Tecnológica de Pereira; 2018.
47. Salgado I, Cruz M, Durán M del C, Oviedo R, Carballo ME, Martínez A. Bacterias como herramientas potenciales en el mejoramiento de humedales artificiales para el tratamiento de aguas. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*. 2010;41:1-10.
48. Reyes-Ibarguen DE, Torres-González C. Caracterización de hongos antagonistas de tres humedales subsuperficiales utilizados para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*. 2011;(10):21-30.
49. Zurita F, de Anda J, Belmont MA. Performance of Laboratory-Scale Wetlands Planted with Tropical Ornamental Plants to Treat Domestic Wastewater. *Water Quality Research Journal*. 2006 Nov 1;41(4):410-7.
50. Hernández ME, Galindo-Zetina M, Juan Carlos HH. Greenhouse gas emissions and pollutant removal in treatment wetlands with ornamental plants under subtropical conditions. *Ecol Eng*. 2018 Apr;114:88-95.
51. Sandoval-Herazo L, Alvarado-Lassman A, Marín-Muñiz J, Méndez-Contreras J, Zamora-Castro SA. Effects of the Use of Ornamental Plants and Different Substrates in the Removal of Wastewater Pollutants through Microcosms of Constructed Wetlands. *Sustainability*. 2018 May 16;10(5):1594.
52. Zitácuaro-Contreras I, Vidal-Álvarez M, Hernández y Orduña MG, Zamora-Castro SA, Betanzo-Torres EA, Marín-Muñiz JL, et al. Environmental, Economic, and Social Potentialities of Ornamental Vegetation Cultivated in Constructed Wetlands of Mexico. *Sustainability*. 2021 Jun 1;13(11):6267.
53. Molle P. French vertical flow constructed wetlands: a need of a better understanding of the role of the deposit layer. *Water Science and Technology*. 2014 Jan 1;69(1):106-12.
54. Boyás TA, Álvarez-Hernández LM, Marín-Muñiz JL, Celis-Pérez M del C, Zamora-Castro SA, Landa MG. Condiciones ambientales para el óptimo desarrollo de plantas ornamentales y fitorremediadoras. *Journal of Basic Sciences*. 2022;8(23):96-103.
55. Vohla C, Köiv M, Bavor HJ, Chazarenc F, Mander Ü. Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands—A review. *Ecol Eng*. 2011 Jan;37(1):70-89.
56. García-Serrano J, Corzo-Hernández A. Depuración con Humedales Construidos. España; 2008 Nov.
57. Torres Guerra JD, Magno Vargas JS, Pineda Aguirre RR, Cruz Huaranga MA. Evaluación de la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales para riego mediante humedales Artificiales de flujo libre superficial (FLS) con las especies *Cyperus Papyrus* y *Phragmites Australis*, en Carapongo-Lurigancho. *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*. 2018 Feb 6;3(2).
58. Plaza de los Reyes C, Vera L, Salvato M, Borin M, Vidal G. Consideraciones para la eliminación de nitrógeno en humedales artificiales. *Tecno Agua*. 2011;31:41-9.
59. Kosonen R, Zhou B. Reactor de lecho fluidizado. In: Shaofen L, editor. *Ingeniería de reacción*. Butterworth-Heinemann; 2016. p. 369-403.
60. Reynolds K. Tratamiento de las aguas residuales en latinoamérica. *Agua Latin*. 2002;12:1-4.
61. Pérez-López ME. Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el estado de Durango [Tesis de Doctorado]. [Chihuahua]: Centro de Investigación de Materiales Avanzados, S. C.; 2009.
62. Cabrera PAM, Ojeda CA. Eficiencia de un humedal de flujo subsuperficial horizontal para tratar los efluentes de un colegio rural en Colombia / Eficiência de uma área úmida de fluxo subsuperficial horizontal para tratar efluentes de uma escola rural na Colômbia. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*. 2021 Jul 30;4(3):3488-99.
63. Hernández-Ruiz JM, Pérez-Villar MM, Domínguez ER, Cachaldora IJ. Humedal subsuperficial vertical para el tratamiento de aguas residuales: diseño, construcción y evaluación. *Revista Cubana de Química*. 2012;24(2):1-8.
64. Rizzo A. Humedales Aireados. In: Arias CA, Vera-Puerto IL, Rodríguez T, editors. *Soluciones basadas en la naturaleza (SBN) para tratamiento de aguas residuales*. IWA PUBLISHING; 2023. p. 177-91.
65. Nivala J, Hoos MB, Cross C, Wallace S, Parkin G. Treatment of landfill leachate using an aerated, horizontal subsurface-flow constructed wetland. *Science of The Total Environment*. 2007 Jul;380(1-3):19-27.
66. Murphy C, Wallace S, Knight R, Cooper D, Sellers T. Treatment performance of an aerated constructed wetland treating glycol from de-icing operations at a UK airport. *Ecol Eng*. 2015 Jul;80:117-24.
67. Higgins JP, Hurd S, Weil C. The use of engineered wetlands to treat recalcitrant wastewaters. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 2000 Sep;35(8):1309-34.
68. Wallace S, Kadlec R. BTEX degradation in a cold-climate wetland system. *Water Science & Technology*. 2005;51(9):165-71.
69. Foladori P, Ruaben J, Ortigara ARC. Recirculation or artificial aeration in vertical flow constructed wetlands: A comparative study for treating high load wastewater. *Bioresour Technol*. 2013 Dec;149:398-405.
70. Fan J, Liang S, Zhang B, Zhang J. Enhanced organics and nitrogen removal in batch-operated vertical flow constructed wetlands by combination of intermittent aeration and step feeding strategy. *Environmental Science and Pollution Research*. 2013 Apr 2;20(4):2448-55.



71. Behrends LL. Humedales para tratamiento de alimentación secuencial (flujo por pulsos). In: Arias CA, Vera-Puerto IL, Rodríguez T, editors. Soluciones basadas en la naturaleza (SBN) para tratamiento de aguas residuales. IWA PUBLISHER; 2023. p. 199–207.
72. Green M, Friedler E, Ruskol Y, Safrai I. Investigation of alternative method for nitrification in constructed wetlands. *Water Science and Technology*. 1997;35(5):63–70.
73. Wu S, Zhang D, Austin D, Dong R, Pang C. Evaluation of a lab-scale tidal flow constructed wetland performance: Oxygen transfer capacity, organic matter and ammonium removal. *Ecol Eng*. 2011 Nov;37(11):1789–95.
74. Austin D. Influence of cation exchange capacity (CEC) in a tidal flow, flood and drain wastewater treatment wetland. *Ecol Eng*. 2006 Nov;28(1):35–43.
75. Austin D, Nivala J. Energy requirements for nitrification and biological nitrogen removal in engineered wetlands. *Ecol Eng*. 2009 Feb;35(2):184–92.
76. Zhang T, Liu C, Wei L, Tian S, Li J, Ndayambaje P, et al. Performance of tidal and non-tidal mangrove constructed wetlands in treating maricultural wastewater. *Water Science and Technology*. 2022 May 1;85(9):2772–85.
77. Tondera K, Rizzo A. Humedales de flujo vertical tipo francés. In: Arias CA, Vera-Puerto IL, Rodríguez T, editors. Soluciones basadas en la naturaleza (SBN) para tratamiento de aguas residuales. IWA PUBLISHER; 2023. p. 129–32.
78. Millot Y, Troesch S, Esser D, Molle P, Morvannou A, Gourdon R, et al. Desing improvements for high ammonium removal by one-stage vertical flow constructed wetlands. *Ecol Eng*. 2016;97:516–23.
79. Mejía JL, Guillín C. Evaluación de la eficiencia de un humedal artificial tipo francés a escala piloto para el tratamiento de las aguas residuales del proyecto porcino de la Universidad Francisco de Paula Santander-Ocaña, Colombia [Tesis de Licenciatura]. [Ocaña, Colombia]: Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña; 2019.
80. Cappato J. Humedales: los "riñones" del Planeta. *Ecosistemas*. 1999;8(1):33–5.
81. Brix H. Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development status, and future perspectives. *Water Science and Technology*. 1994;30:209–23.
82. Luna-Pabello V, Miranda-Ríos M. Estado del arte y perspectivas de aplicación de los humedales artificiales de flujo horizontal en México . Serie: Tratamiento biológico de aguas residuales . Researchgate. 2001;(January 2017):132.
83. Kickuth R. A low-cost process for purification of municipal and industrial waste water. *Der Tropenlandwirt*. 1982;83:141–54.
84. Vymazal J. The Historical Development of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Land (Basel)*. 2022 Jan 21;11(2):174.
85. Kadlec R, Wallace S. Humedales de tratamiento. 2da Edición. CRC Press; 2009. 1–366 p.
86. UN-HABITAT. Manual de Humedales Construidos [Internet]. 2008 [cited 2024 Dec 14]. Available from: <https://unhabitat.org/constructed-wetlands-manual>
87. Davis L. Un manual de humedales construidos: Una guía para crear humedales para aguas residuales agrícolas, aguas residuales domésticas, drenaje de minas de carbón y aguas pluviales en la región del Atlántico Medio [Internet]. Vol. 1. 1995 [cited 2024 Dec 14]. 1–53 p. Available from: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/constructed-wetlands-handbook.pdf>
88. CONAGUA. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales [Internet]. 2018 [cited 2024 Dec 14]. Available from: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf>
89. Brown DS, Kreissl JF, Gearhart RA, Kruzic AP, Boyle WC, Otis RJ. Manual: Tratamiento de Aguas Residuales Municipales mediante Humedales Construidos [Internet]. 2000 [cited 2024 Dec 14]. Available from: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/30004TBD.PDF?Dockkey=30004TBD.PDF>
90. Sun G, Zhao Y, Allen S. Enhanced removal of organic matter and ammoniacal-nitrogen in a column experiment of tidal flow constructed wetland system. *J Biotechnol*. 2005 Jan;115(2):189–97.
91. Prost-Boucle S, Molle P. Recirculation on a single stage of vertical flow constructed wetland: Treatment limits and operation modes. *Ecol Eng*. 2012 Jun;43:81–4.
92. Arias CA, Del Bubba M, Brix H. Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds. *Water Res*. 2001 Apr;35(5):1159–68.
93. von Sperling M. Lodos activados y reactores de biopelícula aeróbica. Vol. 5. Londres, UK: IWA Publishing; 2007. 1–338 p.



Recibido 01/04/2025
Aceptado 15/05/2025

EVALUACIÓN DE UN HUMEDAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN SAN MARCOS ATEXQUILAPAN, NAOLINCO, VERACRUZ, MÉXICO, SEMBRADO CON POLICULTIVO DE PLANTAS ORNAMENTALES

EVALUATION OF A WASTEWATER TREATMENT WETLAND IN SAN MARCOS ATEXQUILAPAN, NAOLINCO, VERACRUZ, MEXICO, PLANTED WITH A POLY CULTURE OF ORNAMENTAL PLANTS

David Mejía-Escobar¹, José Luis Marín-Muñiz¹, Gonzalo Ortega-Pineda¹

¹El colegio de Veracruz, Carrillo Puerto 26, Zona Centro, Centro 91000 Xalapa-Enríquez, Veracruz, México

¹Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km 1.8 Carretera Lomas del Cojolite, 93828 Misantla, Veracruz, México

Correo de autor de correspondencia: mejiaescobard@gmail.com

RESUMEN

El uso de los humedales como sistemas de tratamiento de aguas residuales es una alternativa prometedora en localidades rurales, ya que es económica y fácil de operar. Debido a su practicidad, al implementarlos es necesario analizar su funcionamiento en torno a remoción de contaminantes, pues esto ayuda a tomar consideraciones en el diseño y apoya en la replicabilidad de los mismos, por su potencial para disminuir la polución hídrica y mejorar la calidad de vida.

Por ello, el presente trabajo evaluó la remoción de contaminantes en las aguas residuales tratadas a través de un humedal construido sembrado con plantas ornamentales en la localidad de San Marcos Atexquilapan, Naolinco Ver., mediante la recopilación de 6 parámetros; Temperatura, pH, Conductividad eléctrica (CE), Solidos Disueltos Totales (TDS), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Carbono Orgánico Total (TOC). Dicho estudio tuvo una duración de 180 días (6 meses). La zona de estudio presentó una temperatura promedio de 20.73 °C. Las aguas tratadas alcanzaron remociones máximas de 47 % en DQO, 50 % en SDT, 60 % en COT, 72 % en CE, y un pH fluctuante alrededor de 6. Aunque estos resultados son relevantes, es necesario optimizar las condiciones de diseño para mejorar la eficiencia en la remoción de contaminantes. Además, al comparar con estudios de otros autores, se identificó que los bajos porcentajes de remoción podrían estar relacionados con las condiciones climáticas, el proceso de adaptación de las plantas debido a que el sistema tiene apenas 12 meses de operación, así como factores externos como la sobrecarga orgánica.

PALABRAS CLAVE

Humedales de tratamiento, innovaciones, aguas residuales, diseño

ABSTRACT

The use of wetlands as wastewater treatment systems is a promising alternative in rural areas, as it is economical and easy to operate. Due to their practicality, their implementation requires analyzing their performance in terms of contaminant removal. This helps to take into account design considerations and supports their replicability, given their potential to reduce water pollution and improve quality of life.

Therefore, this study evaluated contaminant removal in wastewater treated by a constructed wetland planted with ornamental plants in the town of San Marcos Atexquilapan, Naolinco, Veracruz, by collecting six parameters: temperature, pH, electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), chemical oxygen demand (COD), and total organic carbon (TOC). The study lasted 180 days (6 months). The study area had an average temperature of 20.73°C. The treated water achieved maximum removal rates of 47% COD, 50% TDS, 60% TOC, 72% EC, and a pH level of approximately 6. Although these results are relevant, it is necessary to optimize the design conditions to improve contaminant removal efficiency. Furthermore, when compared with studies by other authors, it was identified that the low removal percentages could be related to climatic conditions, the adaptation process of the plants due to the system's relatively short operational period of 12 months, as well as external factors such as organic overload.

KEYWORDS

Treatment wetlands, innovation, wastewater, design

INTRODUCCIÓN

Los humedales construidos (HC) representan una tecnología innovadora en el ámbito de la gestión y conservación ambiental, con un impacto significativo en el desarrollo sustentable (26). Su principal objetivo es tratar aguas residuales, ofreciendo una alternativa económica y ecológicamente viable en comparación con las plantas de tratamiento convencionales. Estos sistemas emulan los procesos naturales de depuración que ocurren en los humedales naturales, utilizando una gran variedad de macrófitas, junto con microorganismos y sustratos específicos para filtrar y tratar las aguas residuales municipales (15).

La implementación de HC es especialmente valiosa en comunidades aisladas de las áreas urbanas, donde las condiciones específicas pueden limitar la implementación de sistemas de saneamiento adecuados. La falta de infraestructura, el presupuesto económico limitado y el acceso reducido a la tecnología pueden resultar en la contaminación de fuentes de agua potable, afectando la biodiversidad local y creando un ciclo pernicioso de deterioro ambiental y problemas de salud pública (2).

Aunque existen algunos estudios que comprueban su funcionalidad (29), esta depende de varios factores como la temperatura regional, tipo de agua a tratar, vegetación y sustratos a utilizar y otros factores de diseño. En el estado de Veracruz aún son pocos los sistemas instalados (18), y aún menos en zonas de montaña de allí la importancia de analizar el funcionamiento de los HC en estas regiones.

Por lo tanto, es necesario evaluar sistemas de tratamiento que sean de uso real en comunidades rurales. La información generada a partir de estas evaluaciones es más precisa, dado que los resultados obtenidos bajo condiciones controladas a escala de laboratorio no siempre representan las condiciones reales, donde las variables pueden diferir significativamente (33). En este contexto, el presente trabajo evalúa el humedal para el tratamiento de aguas residuales en la comunidad de San Marcos Atexquilapan, Naolinco, Veracruz, México, sembrado con un policultivo de plantas ornamentales. Este monitoreo busca obtener datos reales sobre el comportamiento del humedal en condiciones reales, lo que permitirá mejorar su eficiencia y aplicabilidad en comunidades con problemas similares de contaminación.





MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, en la Figura 1 se presenta el proceso metodológico llevado a cabo durante la investigación y posteriormente se describe cada paso.

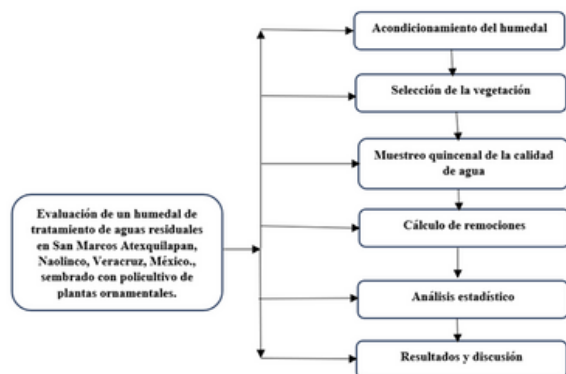


Figura 1. Diagrama metodológico. Elaboración propia

2.1. ACONDICIONAMIENTO DEL HUMEDAL

Para realizar las mediciones quincenales fue necesario eliminar malezas y sólidos de gran tamaño que se encontraban dentro del humedal. Posterior a la limpieza, fue necesario conocer la composición de la tecnología.

El sistema cuenta con una capacidad total de 100,000 L, con 5 cuadrantes (1 m de ancho, 2 m de largo y 0.80 m de profundidad) a lo largo del recorrido. El interior del sistema contenía una capa inferior de gravón de 10 cm de diámetro aproximadamente y una capa superior de grava volcánica (3 cm), las cuales cumplían una función filtrante de la materia orgánica presente en el agua residual, además de ser hábitat para el desarrollo de biopelículas bacterianas (31). A su vez, el material pétreo también funge como soporte de distintas plantas que aportan a la remoción y embellecimiento del paisaje.

2.2. SEMBRADO DE LA VEGETACIÓN

Para la colocación de especies en el humedal fue necesario realizar una revisión bibliográfica mediante herramientas como Google académico y Dimensions mediante el método booleano TITLE-ABS, el cual permite restringir la búsqueda de palabras clave que aparecen en el título y el resumen de los documentos encontrados (35), lo que facilita obtener resultados relevantes y específicos sobre las posibles especies que se adaptaran con más facilidad a las características de la zona.

Tras la revisión bibliográfica, se procedió a la selección de las especies vegetales para su posterior siembra y adaptación en el humedal. Asimismo, el sistema fue dividido en cinco cuadrantes mediante líneas imaginarias, con el fin de distribuir adecuadamente los diferentes tipos de plantas durante el proceso de siembra

2.3. MUESTREO QUINCENAL

El muestreo de agua en los cuadrantes del humedal se realizó quincenalmente durante 6 meses (180 días) a partir del 8 de mayo del 2024 al 21 de octubre del 2024, analizando: temperatura, pH, Conductividad eléctrica (CE), Sólidos Disueltos Totales (TDS), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Carbono Orgánico Total (TOC), tanto a la entrada como a la salida de cada cuadrante del sistema. Las muestras tomadas fueron en frascos de polietileno de 250 mL.

2.4. CÁLCULO DE REMOCIONES

Para la determinación de remociones fue necesario aplicar la siguiente fórmula, considerando las muestras de agua tomadas.

$$\%Remocion = \frac{Entrada - Salida}{Entrada} \times 100 \quad (1)$$

2.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Luego de la obtención de muestras fue necesario analizar los datos obtenidos para generar conclusiones acerca del tratamiento a lo largo del humedal. Para ello fue necesario utilizar Excel Microsoft para Windows y IBM SPSS Statistics 25 para windows, un programa informático-estadístico donde se realizó una prueba de normalidad (Kolmogorov Smirnov) para observar el comportamiento de los datos y posteriormente la prueba de Kruskal Wallis para determinar las diferencias significativas de cada cuadrante, dado que los datos no fueron normales. Un valor de $p=0.05$ fue utilizado para revelar diferencias estadísticas entre los análisis.

RESULTADOS

3.1. SELECCIÓN DE PLANTAS

Se seleccionaron diversas especies de plantas ornamentales considerando sus características fisiológicas, las cuales les permiten adaptarse al clima local (con una temperatura promedio entre 22 y 23 °C), así como su capacidad para la adsorción de nutrientes y su resistencia a altos volúmenes de agua contaminada (19).

Se ha demostrado mediante estudios que el crecimiento de plantas ornamentales en humedales construidos a gran escala no solo contribuye significativamente a la remoción de contaminantes, sino que también potencia la producción floral, lo que a su vez tiene implicaciones estéticas y económicas, por lo tanto, su implementación es tanto efectiva como beneficiosa para el tratamiento de aguas (20).

Para el presente estudio se utilizaron las plantas ornamentales: *Canna indica*, *Xanthosoma violaceum*, *Lilium candidum*, *Chrysopogon zizanioides* y *Zantedeschia aethiopica*, siendo distribuidas como se muestra en la figura 2.

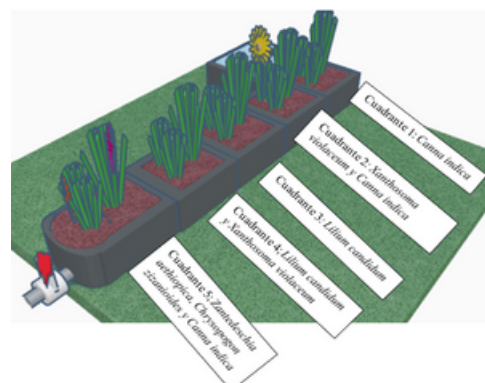


Figura 2. Distribución de especies. Elaboración propia

3.2. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LOS CONTAMINANTES PRESENTES

La metodología para realizar la evaluación de calidad de agua, según la CONAGUA (6), es mediante el análisis de 4 indicadores: Demanda Bioquímica de Oxígeno ([DBO] _5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos totales (SST) y coliformes fecales, sin embargo, para fines de investigación y por disponibilidad de equipos, únicamente se analizaron los parámetros DQO y sólidos disueltos totales (SDT), los cuales están relacionados con la materia orgánica.



3.2.1. DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO (DQO)

La DQO es un indicador utilizado para evaluar la cantidad de oxígeno necesario en el agua para oxidar químicamente la materia orgánica (27). Este proceso también es utilizado para evaluar la carga de contaminantes en cuerpos de agua o sistemas de tratamiento de agua residual, proporcionando un estándar indirecto de la cantidad de materia orgánica presente (7).

A continuación, en la Figura 3a se puede analizar el comportamiento del parámetro a lo largo de los 5 cuadrantes durante 6 meses. La concentración de los flujos de entrada (Afluentes) osciló en 1825 mg O₂/L en promedio y en cuanto a los flujos de salida (efluentes) oscilaron en 911 mg O₂/L, por lo que el sistema de tratamiento tuvo una capacidad de remoción del 48 % durante un rango de tiempo de 180 días.

La DQO en los afluentes de este sistema es considerablemente más alta que la reportada en otros estudios, como el caso donde la DQO inicial fue de 1110 mg O₂/L (3).

Los elevados niveles de DQO observados podrían estar relacionados con las prácticas habituales de la comunidad naolinqueña, donde es común la crianza y engorde de cerdos y otros animales de corral dentro de las viviendas. Estos animales son sacrificados para consumo, lo que ocasiona la presencia frecuente de restos de carne y sangre en el humedal, debido a que los drenajes domésticos transportan estos desechos, dificultando la remoción de contaminantes. Además, al tratarse de un sistema de reciente implementación, la eficiencia aún puede ser limitada. Los efluentes provenientes de mataderos contienen sangre, grasas, tejidos orgánicos, heces y orina, lo que incrementa significativamente la carga orgánica del agua y eleva la DQO (23).

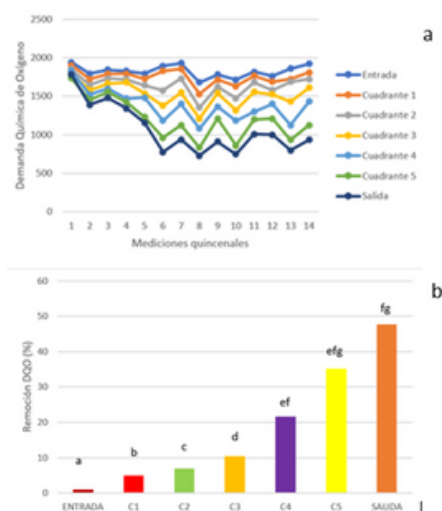


Figura 3. Comportamiento de la DQO, a) Muestrios quincenales y b) Remociones. Elaboración Propia

Al comparar los resultados obtenidos con lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021 (31), que fija un límite máximo permisible de 210 mg O₂/L para la DQO en descargas destinadas a riego e infiltración, se observa que las mediciones registradas en este estudio no cumplen con la norma. A pesar de que el porcentaje de remoción fue significativo (47.69 %), los valores finales de DQO permanecieron elevados, impidiendo alcanzar los niveles permitidos. En consecuencia, resulta relevante considerar la implementación de un sistema de flujo superficial complementario al sistema subsuperficial actual, configurando así un humedal híbrido que permita mejorar la eficiencia en la remoción de contaminantes.

De acuerdo con la Figura 3b, se presentan los porcentajes de remoción en los cinco cuadrantes del sistema, donde se observaron diferencias significativas en cada punto de muestreo, en comparación con la entrada. La mayor remoción se registró en la salida, donde predominan las especies *Canna indica*, *Chrysopogon zizanioides* y *Zantedeschia aethiopica*, generándose una remoción progresiva a lo largo de todo el recorrido. Cabe destacar que los cuadrantes 4 (21.62 %) y 5 (35.17 %) no mostraron diferencias significativas respecto a la salida, dado que corresponden a la fase final del tren de tratamiento, donde la concentración de contaminantes es menor.

Diversos autores han reportado eficiencias de remoción de entre 80 % y 95 % utilizando plantas como *Pontederia cordata* y *Phragmites australis*, ambas ornamentales, en combinación con sustratos de grava volcánica para aplicaciones domiciliarias (16,3). A diferencia del sistema actual, que opera con mayores volúmenes de agua y cargas contaminantes diarias, estos estudios suelen realizarse bajo condiciones más controladas.

En el caso de esta investigación, no es posible controlar la cantidad de agua ni la carga de contaminantes que ingresan al sistema. Además, las macrófitas empleadas en este estudio no contaron con un período de adaptación previo para regular las concentraciones del agua de entrada; Desde el inicio, el agua residual fue incorporada directamente a las celdas. Por lo tanto, las especies vegetales tuvieron que adaptarse simultáneamente al sustrato, las condiciones climáticas y el tratamiento del agua, lo que pudo influir en los resultados observados durante los primeros muestreos.

3.2.2. SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT)

Los STD en agua hacen referencia a la cantidad de sólidos disueltos que se encuentran presentes en el agua, los cuales incluyen sales, minerales, metales y otros compuestos orgánicos e inorgánicos (9). Un incremento en las unidades de SDT puede ser perjudicial para la vida acuática, afectando la reproducción y crecimiento de peces, así como el olor y sabor del agua (12). Por otro lado, es importante mencionar que los SDT se encuentran directamente relacionados con la conductividad eléctrica (CE), un parámetro que mide la capacidad del agua para conducir electricidad y está influenciada por la presencia de iones disueltos. Los iones presentes en el agua aumentan la CE, por lo que a mayores niveles de SDT, mayores serán las unidades de CE (32).

Con respecto a las mediciones del humedal, se encontraron concentraciones promedio en los afluentes de 1882.92 mg/L y en los efluentes 936.14 mg/L (Figura 4a), lo que indica que se tuvieron remociones de hasta el 50.28 %. Comparando estos resultados con la NOM-001-SEMARNAT-2021, que indica que para riego e infiltración se necesitan máximos de 140 mg/L y para descarga a ríos de 84 mg/L, se obtiene que el sistema no cumple con los límites máximos permisibles, por lo que la inclusión de sistemas de pretratamiento de mayor tamaño como sedimentadores, desarenadores o cribas, serían necesarios para disminuir dicha carga.

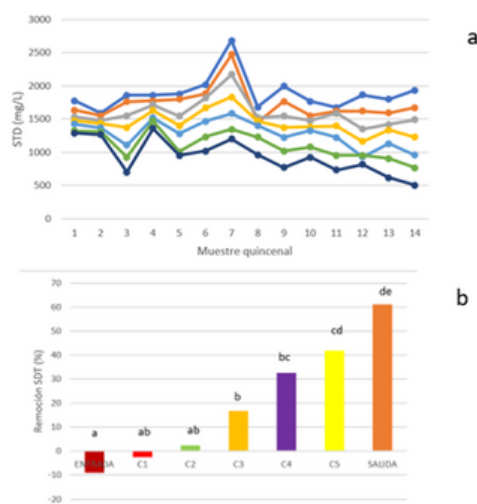


Figura 4. Comportamiento de los SDT, a) Muestrios quincenales y b) Remociones. Elaboración propia

En la Figura 4b se presentan los porcentajes de remoción de SDT a lo largo de los cinco cuadrantes del sistema de tratamiento, donde se identificaron diferencias significativas en cada cuadrante en comparación con la entrada. Como se observa, la mayor eliminación de SDT se registró en la salida, con un porcentaje de remoción del 61.08 %. Por otro lado, los cuadrantes 1 (-2.38 %) y 2 (2.48 %) no mostraron diferencias significativas respecto a la entrada, lo que confirma que los niveles de remoción de SDT en el efluente son estadísticamente diferentes en comparación con el afluente, logrando una reducción de hasta el 61.08 %.



La remoción de SDT en este sistema es considerablemente superior en comparación con otros estudios, donde se reportaron eficiencias de eliminación cercanas al 20 % o, en algunos casos, hasta un 50 %, utilizando también plantas ornamentales. No obstante, es probable que la eficiencia del sistema actual pueda incrementarse al aumentar el tiempo de retención hidráulica (TRH) (11,30).

3.2.3. CARBONO ORGÁNICO TOTAL (COT)

El papel que juegan los humedales naturales como sumideros de carbono es de gran relevancia, pues, aunque los humedales cubren solo una pequeña fracción de la superficie terrestre, su capacidad para almacenar carbono es sorprendentemente alta, sin embargo, las tasas de carbono secuestrado varían ampliamente dependiendo el tipo de humedal y su vegetación (10). Sin embargo, en humedales de tratamiento, el objetivo es disminuir todas las cargas orgánicas, para que las aguas tratadas puedan ser reutilizadas para otros usos como la irrigación de cultivos.

En el humedal de estudio se registró un promedio en el afluente que oscilaba en 1744 mg/L y 687 mg/L en el efluente, lo que implica un 60.59 % de remoción durante los 6 meses evaluados. Un punto importante a destacar es que el cuadrante con mayor desarrollo de vegetación y floración fue el 5, donde el promedio de COT ya era bajo a comparación de la entrada (687 mg/L). Pues esto quiere decir que el carbono removido en el agua es aprovechado por las plantas mediante la fotosíntesis, reflejándose en efectos positivos como una buena adaptación de las especies (2).

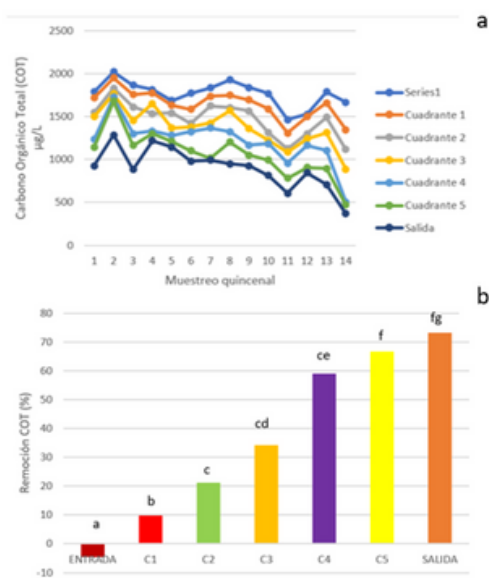


Figura 5. Comportamiento de cuadrantes, a) Muestreos quincenales y b) Remociones. Elaboración Propia

En la Figura 5b se presenta el porcentaje de remoción del COT a lo largo del tratamiento, donde se observa que desde el inicio existen diferencias significativas al comparar la entrada (-4.59 %) con el cuadrante 1 (9.79 %). Posteriormente, en los cuadrantes 2 (21.30 %), 3 (34.20 %) y 4 (58.96 %) no se registraron diferencias significativas, dado que en esta etapa se produce la mayor absorción de carbono. Finalmente, los cuadrantes 5 (66.60 %) y la salida (73.13 %) tampoco mostraron diferencias significativas entre sí. Estos resultados indican que a lo largo de todo el recorrido se lleva a cabo un adecuado de almacenamiento de carbono, con una evolución progresiva. Se identifican tres sectores principales de remoción claramente definidos, lo cual podría estar relacionado con la distribución de la vegetación en el sistema: en los primeros cuadrantes (1 y 2) la cobertura vegetal es menor, posiblemente debido al exceso de contaminantes, mientras que en los últimos cuadrantes (4 y 5) el crecimiento de la vegetación es muy buena.

Estudios demuestran que la utilización de plantas en humedales construidos ayuda al secuestro de carbono en gran medida, es por ello que se recomienda una buena elección de la misma, así como los cuidados necesarios para su sobrevivencia (36).

3.3. PARÁMETROS IMPORTANTES QUE SE RELACIONAN CON ALGUNOS CONTAMINANTES

3.3.1. EVALUACIÓN DE TEMPERATURA DEL AGUA

El agua es un medio biológico que necesita características específicas para alojar vida en los humedales construidos (HC). Una de las más importantes es la temperatura (T), ya que cuando esta es adecuada, favorece el crecimiento y metabolismo de microorganismos que ayudan en la eliminación de contaminantes, además de ayudar a la adaptación de plantas y la degradación de partículas orgánicas, por lo que una temperatura adecuada es crucial para tener un buen tratamiento de aguas residuales (8).

Cuando la T del agua se encuentra por arriba de los 23 °C, la vegetación crece exponencialmente, lo que acelera la actividad microbiana y mejora la contaminación de contaminantes como el amonio. A temperaturas más altas se favorecen procesos biológicos como la desnitrificación, que es de mucha importancia para la remoción del nitrógeno (17).

La medición de temperatura en este estudio fue llevada a cabo bajo al método de prueba NMX-AA.007-SCFI-2013 para aguas residuales, la cual arrojó un promedio oscilante en los 20.73 °C (Figura 6). Es importante señalar que esta medición se realizaba a las 9 am, sin embargo, es razonable inferir que la temperatura disminuya varios grados durante la noche. Este dato resulta relevante, ya que permite asumir que la temperatura del agua en el sistema permanece por debajo de los 20 °C durante más de 12 horas diarias.

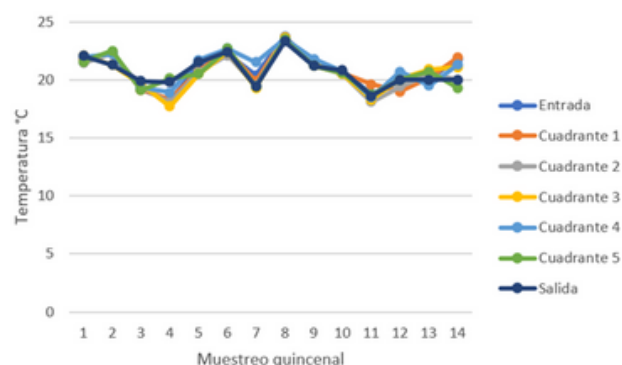


Figura 6. Evaluación de temperatura. Elaboración propia

Cuando la temperatura acuática se encuentra por debajo de 20°C, la actividad microbiana disminuye considerablemente, provocando afectaciones en la remoción de contaminantes como el nitrógeno y la materia orgánica. Esto sucede debido a que la cinética de reacción biológica es más lenta por debajo de estas temperaturas (8).

La DQO y los SDT son dos de los parámetros más sensibles a la disminución de la temperatura por debajo de 20 °C (26), ya que este descenso afecta la actividad microbiana y la dinámica de las reacciones, lo que provoca la acumulación de materia orgánica. Como consecuencia, se incrementan los niveles de sólidos flotantes en el agua, reflejándose en valores elevados de DQO y SDT (25).

3.3.2. EVALUACIÓN DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La conductividad Eléctrica (CE) refleja la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica, lo que se relaciona directamente con los iones disueltos en la misma. La medición de este parámetro es de importancia, ya que además de revelar la cantidad de iones disueltos en el agua, es una medida indirecta de la cantidad de SDT presentes. Esto significa que, a mayor CE, mayor es la carga de contaminantes en el agua (4).

La medición de este parámetro se realizó conforme a la norma NMX-AA-093-SCFI-2018, aplicable para aguas naturales, residuales tratados y no tratados. Los resultados arrojaron valores promedio de conductividad eléctrica de 2500.71 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el afluente y 1961.35 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el efluente, lo que representa una remoción promedio del 72 % (Figura 7). Al comparar estos datos con los reportados por otros autores (9, 24), quienes registraron concentraciones superiores a 2700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el afluente y por debajo de 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el efluente, se puede afirmar que el sistema evaluado logró remociones considerables en términos de conductividad eléctrica.



De acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021, no se establecen límites máximos permisibles específicos para la conductividad eléctrica (CE) en aguas residuales, sin embargo, la norma indica que si la CE es inferior a 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se debe analizar la presencia de *Escherichia coli*, mientras que si la CE es igual o superior a 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, es necesario considerar parámetros adicionales para la evaluación del efluente. En el presente estudio no se realizó análisis para detectar la presencia de patógenos.

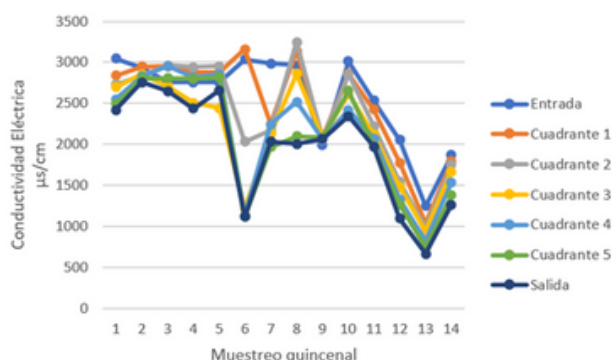


Figura 7. Evaluación de conductividad eléctrica. Elaboración propia

3.3.3. EVALUACIÓN DE PH

La evaluación del pH en humedales de tratamiento es de suma importancia ya que se encuentra relacionado con la eficiencia de procesos químico-biológicos como el crecimiento de colonias bacterianas degradadoras de materia orgánica. En general, mayoría de bacterias neutrófitas crecen en un rango óptimo cercano a 7, sin embargo, pueden sobrevivir en ambientes de 5 a 8 (23). Los valores encontrados en el pH del humedal comunitario oscilaban en 6.90 en el afluente y 6.80 en el efluente, lo que quiere decir que el agua se encontraba cercana a la neutralidad, lo que favorece la actividad microbiana y el crecimiento de plantas (32).

CONCLUSIONES

La evaluación de la calidad del agua en HC es crucial para determinar su eficiencia en la remoción de contaminantes. En este estudio, se analizaron parámetros como la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Disueltos Totales (SDT), obteniendo remociones del 48% para DQO y del 50.28% para SDT. Aunque estos resultados son prometedores, no cumplen con los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021. Sin embargo, es relevante destacar que, a diferencia de otros estudios que también emplean plantas ornamentales y grava como sustrato, este trabajo evalúa un humedal de tratamiento diseñado para aguas residuales comunitarias, lo que implica que los afluentes contaminados no están sujetos a control alguno. En el caso de este sistema existía una gran presencia de materia orgánica y temperatura acuática por debajo de lo ideal, dificultando aún más la degradación. Posiblemente aplicando un tiempo de evaluación mayor, el humedal genere remociones más altas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo de mi institución, El Colegio de Veracruz, que me brindó la oportunidad de cursar la Maestría en Desarrollo Regional Sustentable, reconocida dentro del Sistema Nacional de Posgrados. Agradezco especialmente al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el financiamiento del proyecto de posgrado con el número de CVU 1324965. También quiero expresar mi gratitud a mis directores del proyecto por su confianza y apoyo constante durante el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- Agudelo, R. M., Jaramillo, M. L., Peñuela, G., y Aguirre, N. J. (2010). Remoción del carbono orgánico disuelto en humedales piloto de flujos subsuperficial y superficial. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 28 (1), 21-28. Recuperado el 28 de marzo de 2025 de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-386X2010000100003&lng=en&tlng=es.
- Arias, C. A. (2005). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Científica General José María Córdova*, 3(3), 40-44. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=476259066011>
- Bedoya, J. C., Ardila, A., Alba, N., y Reyes, C.J. (2014). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(3), 275-283. Recuperado en 28 de marzo de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000300004&lng=es&tlng=es.
- Calderón, J. B., y Pulgar, A.F. (2023). Efecto de la conductividad eléctrica a partir de la salinidad y sólidos disueltos en los procesos biológicos de nitrificación y desnitrificación para la remoción de compuestos nitrogenados en aguas residuales domésticas. Tesis de licenciatura. Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia. <https://repositorio.cuc.edu.co/server/api/core/bitstreams/ce136f98-0ab0-41b1-9928-18e8ff08dce5/content>
- Chavarría, E. Y., Huamani, L. L., Cusiche, M. L., Humán, W., Angeles, J.M., Basurto, C. M. (2024). Sólidos totales disueltos en agua superficial para consumo humano en San Juan de Pillo, Perú. *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria*, 8 (24), 870-881. Publicación electrónica del 20 de septiembre de 2024. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v8i24.310>
- Comisión Nacional del Agua (2020). Programa Nacional Hídrico 2020-2024: Programa Especial derivado del plan nacional de Desarrollo 2019-2024. CONAGUA. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/consulta-para-el-del-programa-nacional-hidrico-2019-2024-190499>
- Comisión Nacional del Agua (2021). Intervalo Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. CONAGUA, https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/759492/Inventario_2021.pdf
- De La Mora-Orozco, C., Saucedo-Terán, R.A., González-Acuña, I.J., Gómez-Rosales, S. y Flores-López, H.E. (2018). Efecto de la temperatura del agua sobre la constante de velocidad de reacción de los contaminantes en un humedal construido para el tratamiento de aguas residuales porcícolas. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11(s2), 1-20. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11s2.4681>
- Echeverría, I., Aliaga, G., y Saavedra, O. (2024). Evaluación de calidad de agua residual tratada para riego en el valle alto de la ciudad de Cochabamba. *Investigación y Desarrollo*, 24(1), 35-45, DOI: 10.23881/idupbo.024.1-3i
- García, J., Valdés-Casillas, C., Cadena-Cárdenas, L., Romero-Hernández, S., Silva-Mendizábal, S., González-Pérez, G., Leyva-García, G. N., y Aguilera-Márquez, D. (2011). Humedales artificiales como un método viable para el tratamiento de drenes agrícolas. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(spe1), 97-111. Recuperado en 30 de marzo de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000700008&lng=es&tlng=es.
- González, D., Marín-Muñiz, J.L. y Ortega, G. (2024). Evaluación de humedales construidos sembrados con plantas ornamentales como tratamiento del nejayote (residuo del proceso de nixtamalización) y sus riesgos socio-ambientales en San José Pastorías, Actopan, México. Tesis de Maestría. El Colegio de Veracruz. Xalapa, Veracruz, México.
- Guerrero-Jiménez, G., Rico-Martínez, R., & Silva-Briano, M. (2017). Monitoreo de una planta tratadora de aguas residuales mediante pruebas de toxicidad aguda con el cladóceros *Daphnia magna* y el rotífero de agua dulce *Lecane quadridentata*. *Hidrobiológica*, 27(1), 87-92. Recuperado en 27 de marzo de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-889720170001000087&lng=es&tlng=es.
- Hernandez-Cardona, M.A. (2019). Tratamiento de aguas residuales domesticas por medio de humedales artificiales híbridos en yucatan [tesis maestría. Universidad Autónoma de Yucatán]. Repositorio Institucional.



14. Marín, C., Solís, R., López, G., Bautista, R. G. y Romellón, M.J. (2014). Tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales tropicales en Tabasco, México. *Revista IBEROAMERICANA DE LAS CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AGROPECUARIAS*, 5 (10). Recuperado a partir de <https://www.ciba.org.mx/index.php/CIBA/article/view/54>
15. Marín-Muñiz, J. L. (2017). Humedales construidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reuso del agua. *Agroproductividad*, 10(5), 90-95.
16. Marín-Muñiz. (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
17. Martínez, M. D. (2016). Eficiencia en la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno y Sólidos Suspendidos Totales en la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Celendín. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional de Cajamarca. Cajamarca, Perú.
18. Martínez-Aguilar, K.E., Marín-Muñiz, J.L., Álvarez-Hernández, L.M., Delfín-Portela, E., y Zamora-Castro, S.A. (2024). Estado actual del tratamiento de aguas residuales mediante humedales de tratamiento a gran escala en el Estado de Veracruz, México. *Energía renovable, biomasa y sostenibilidad*, 6 (2), 32-42. <https://doi.org/10.56845/rebs.v6i2.105>
19. Mitsch, W. Y Gosselink, J. (2015). *The wetland Enviroment*. In wiley (Eds.), *Wetlands fifth edition* (pp.11-215). Wilery.
20. Morles, G., López, D., Vera, I. y Vidal, G. (2013). Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia Orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas. *THEORIA*, (22), 33-46.
21. Nava-Rojas, J., Lango-Reynoso, F., Castañeda-Chávez, M., y Reyes-Velázquez, C. (2024). Remoción de Contaminantes en los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial: Una Revisión. *Terra Latinoamericana*, 41, <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1715>
22. Oluseun, O., Olorunbon, D., Olugbenga, D., Omoladun, E., Oluwasegun, E. y Adams, N. (2019) Evaluación del impacto de los efluentes de matadero en la calidad de las aguas subterráneas en una zona residencial de Omu-Aran, Nigeria. *Enviromental Sciences Europe*, Vol. 31, <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0201-5>
23. Ome, Ó., y Zafra, C. (2018). Factores clave en procesos de biorremediación para la depuración de aguas residuales. una revisión. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 21 (2), 573-585. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1037>
24. Pérez-Díaz, J.P., Ortega-Escobar, H.M., Ramírez-Hayala, C., Flores-Magdaleno, H., Sánchez-Bernal, H.I., Can-chulim, A., y Mancilla-Villa, O.R. (2017). Evaluación de la calidad del agua residual para el riego agrícola en Valle del Mezquital, Hidalgo. *Acta Universitaria* 29, doi. <http://doi.org/10.15174.au.2019.2117>
25. Raffo, E. y Ruíz, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial Data*, Vol. 17, 71-80.
26. Ramos, J. D. (2019). Medición en línea de la DQO mediante correlación del coeficiente de absorción espectral de luz uv. *PRODUCCIÓN+LÍMPIA*, Vol. 13, 67-76, DOI: 10.22507/pml.v13n2a8
27. Rivas, B.A. (2019). Evaluación del desempeño de humedales artificiales a escala piloto en la remoción de nitrógeno y fósforo de lixiviados agrícolas. Tesis de licenciatura.
28. Ruiz-Nájera, R. E., Medina-Meléndez, J. A., Carmona-de la Torre, J., Rincón-Enríquez, C., Sánchez-Yáñez, J. M., y Raj-Aryal, D. (2021). Efecto de la disposición de los residuos resultantes del beneficiado húmedo del café sobre las características físicas y química del agua de corriente natural. *Terra Latinoamericana*, 39, e884. Epub 13 de septiembre de 2021. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.884>
29. Sánchez, V.G., Palomino, P.A., y Malpartida, R.J. (2021). Eficiencia de humedales artificiales de totora y berros sobre efluentes de granja porcícola, Perú. *ALFA Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias*, 5 (14), <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i14.110>
30. Sandoval-Herazo, M., Nani, G., Sandoval, L. y Rivera S. (2020). Evaluación del desempeño de humedales construidos verticales parcialmente saturados para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Agrosistemas tropicales y subtropicales*, 23 (28), 1-12.
31. Secretaría de Gobernación (2022). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.
32. Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L. A., y Mora-Alvarado, D. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(1), 35-46. <https://dx.doi.org/10.18845/tm.v31i1.3495>
33. Torres, A. X., Hernandez, N. A., Fausto, A. A., y Zurita, F. (2016). Evaluación de tres sistemas de humedales híbridos a escala piloto para la remoción de Nitrógeno. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, Vol. (33). DOI:10.20937/RICA.2017.33.01.03
34. Velázquez-Vázquez, G., Ortega, E., Cobo, A., y Pérez-Armendáriz, B. (2023). Actividad antimicrobiana y antibiopelícula del extracto vegetal *Sambucus canadensis* en bacterias patógenas transmitidas por alimentos. *Biotecnia*, 25(3), 176-183. 2024. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v25i3.2115>
35. Zitacuaro-Contreras, I.Z, Marín-Muñiz, J.L. Celis-Pérez, M., Vidal-Álvarez, M., León-Estrada, X. y Zamora-Castro, S. (2021). Vegetación ornamental utilizada en fitoremediación y sus potencialidades ambientales, económicas y sociales. *Journal of Basic Sciences*, 8 (23), 133-145. <https://doi.org/10.19136>
36. Zurita, F., Rojas, D., Álvarez, A. y Gutiérrez, M. (2015). Desinfección de aguas residuales en tres sistemas de humedales construidos híbridos. *INTERCIENCIA*. 40(6), 409-415



Recibido 13/04/2025
 Aceptado 18/05/2025

DESARROLLO DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA APLICADA EN LA ENSEÑANZA DE LA HIDRÁULICA Y LA CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE A TRAVÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA STEAM

DEVELOPMENT OF APPLIED TECHNOLOGICAL INNOVATION IN THE TEACHING OF HYDRAULICS AND SUSTAINABLE CONSTRUCTION THROUGH THE IMPLEMENTATION OF THE STEAM METHODOLOGY

Karla Karina Romero Valdez¹, Víctor Manuel Martínez García², Rosa Edilma Garzón González¹, Yennifer Díaz Romero³

¹Facultad de Ingeniería y Tecnología de Mazatlán, Universidad Autónoma de Sinaloa, Av. ejército mexicano y de los deportes S/N, Mazatlán, Sinaloa, México.

²Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Sinaloa, Av. ejército mexicano y de los deportes S/N, Mazatlán, Sinaloa, México.

³Unidad Académica de Ciencias de la Educación Mazatlán, Universidad Autónoma de Sinaloa, Av. ejército mexicano y de los deportes S/N, Mazatlán, Sinaloa, México.

Correo de autor de correspondencia: ingkarlaromero@uad.edu.mx

RESUMEN

Este artículo basado en el estudio de caso llevado a cabo en la Facultad de Ingeniería y Tecnología de Mazatlán explora la implementación del enfoque educativo STEAM en el espacio universitario orientado hacia dos vertientes: el desarrollo de proyectos de innovación tecnológica aplicados a la construcción sustentable que favoreció la creación de dos diferentes tipos de bloques destinados a la autoconstrucción de edificaciones y la propuesta de un ocrópodo de geopolímero como elemento de mitigación del impacto medioambiental y, por otro lado, el diseño de recursos de informática educativa, Cefficiency y Pmixer, software destinado al proceso de aprendizaje del área de la hidráulica, los cuales actualmente forman parte de los recursos didácticos institucionales. Estos proyectos que surgen a partir de la incorporación de la metodología activa tienen como objetivo potencializar las habilidades integrales en los estudiantes a través de la colaboración interdisciplinaria que favorece la construcción de conocimientos y la creación de soluciones viables a problemáticas del contexto ingenieril en el marco de la sostenibilidad.

PALABRAS CLAVE

Metodología STEAM, Innovación tecnológica, sostenibilidad

ABSTRACT

This article, based on the case study conducted at Facultad de Ingeniería y Tecnología de Mazatlán, explores the implementation of the STEAM educational approach in an university setting, focusing on two main aspects: the development of technological innovation projects applied to sustainable construction, which led to the creation of two different types of building blocks intended for self-construction, and the proposal of a geopolymer octopod as an element for environmental impact mitigation, as well as the design of education computing resources, Cefficiency and Pmixer, software geared toward supporting the learning process in the field of hydraulics, and currently part of the institution's didactic resources. These projects, which arise from the incorporation of an active methodology, aim to enhance students' comprehensive skill sets through interdisciplinary collaboration, fostering both the construction of knowledge and the creation of viable solutions to problems within an engineering context in the framework of sustainability.

KEYWORDS

STEAM methodology, technological innovation, sustainability

INTRODUCCIÓN

El notable impacto del desarrollo tecnológico en la dinámica social ha permitido la mejora orientada hacia la atención de las necesidades en los diferentes sectores. La tecnología es y ha sido fundamental en el progreso de las comunidades y en este contexto, una pertinente gestión sostenible es modular para potencializar los beneficios que su implementación conlleva a la par de acciones tendientes a aminorar los efectos negativos que su desarrollo genera sobre el planeta como en la sociedad misma.

La sostenibilidad [1] es un concepto presente en los discursos contemporáneos. Se ha convertido en un principio filosófico que implica la transformación de la sociedad tal y como la conocemos, en un transitar hacia un modelo social con mayor sentido de corresponsabilidad con el medio ambiente y con la promoción de una sociedad más justa y equitativa a través de la adopción de prácticas sostenibles.

En la actualidad, la educación se ha posicionado como un mecanismo fundamental de respuesta ante los desafíos actuales. Es eje dorsal para garantizar la sostenibilidad a través de cambios en los paradigmas educativos que conllevan al diseño de modelos pedagógicos vanguardistas caracterizados por incorporar de manera orgánica cuestiones esenciales para el desarrollo sostenible dentro del proceso de enseñanza y aprendizaje [2].

Este escenario ha marcado la pauta para que las instituciones educativas de enseñanza superior integren en el espacio de formación académica, experiencias de aprendizaje a través de la inclusión de metodologías activas [3] que permitan al estudiante aproximarse al conocimiento y desarrollar competencias que promuevan el pensamiento crítico y la innovación como aporte hacia el progreso económico y la construcción de una sociedad más próspera.

Por otra parte, la ingeniería y la construcción sostenible como disciplinas comprometidas con la creación de soluciones tecnológicas armónicas con el progreso de la humanidad y el equilibrio ambiental, requieren de profesionistas con perfil integral, expertos sustentados en una base sólida de conocimientos técnicos y conciencia social, con capacidad de realizar la toma de decisiones y evaluación de impactos con visión de futuro.

En este sentido, el enfoque pedagógico STEAM [4] distintivo por sus siglas en inglés Science, Technology, Engineering, Arts and Mathematics, es una metodología activa interdisciplinaria que ha venido a contribuir sustancialmente en el campo formativo de la ingeniería y la construcción sostenible (Figura 1).



Figura 1. Enfoque metodológico STEAM





Centrado en el aprendizaje y basado en la indagación [5], este modelo educativo constructivista posee sus cimientos en los fundamentos teóricos de Jerome Brunner y el aprendizaje por descubrimiento [6]. A través del Aprendizaje Basado en Proyecto (ABP) como estrategia pedagógica [7], se traslada una problemática del contexto ingenieril hacia un entorno educativo práctico y experimental permitiendo a los estudiantes interactuar activamente en la búsqueda y propuesta de solución abordando los desafíos desde diversas perspectivas, lo que favorece el proceso de construcción del conocimiento y el desarrollo de inteligencias múltiples [8].

La educación STEAM ha venido a nutrir significativamente el proceso formativo de los ingenieros preparándolos para afrontar las transformaciones tecnológicas futuras y cultivando competencias claves para el presente siglo XXI [9] teniendo como eje directriz el plan de acción global propuesto por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), la Agenda 2030, la cual establece 17 Objetivos para el Desarrollo Sostenible (ODS) que articula las tres esferas de la sostenibilidad (económica, social y medioambiental) [10].

El objetivo general del presente trabajo es describir los proyectos de desarrollo de innovación tecnológica aplicados en el campo de enseñanza de la hidráulica y la construcción sustentable producto del proceso de implementación del enfoque metodológico STEAM en el escenario académico universitario.

Un análisis derivado del desarrollo de diversos proyectos de investigación realizados en la Facultad de Ingeniería y Tecnología de Mazatlán (FITEM) de la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) que fueron concebidos mediante actividades integradoras que se promueven desde el seno institucional y que se transforman en proyectos de investigación con pertinencia social registrados ante Dirección General de Investigación y Posgrado (DGIP) y en los departamentos de servicio social universitario y prácticas profesionales con base en la misión y visión del modelo educativo UAS 2022.

La presente narrativa enfatiza en la presentación de resultados de los diversos proyectos enmarcados principalmente en cuatro ODS: educación de calidad, agua limpia y saneamiento, industria, innovación e infraestructura y ciudades y comunidades sostenibles. Sin embargo, es importante mencionar qué, debido a la estrecha relación entre ellos, el efecto que se genera en un objetivo aporta al alcance de los demás.

Los proyectos de innovación tecnológica alusivos en este documento están relacionados con el diseño de elementos constructivos sustentables, así como con el desarrollo de proyectos de diseño de herramientas digitales educativas con aplicabilidad en el área de la hidráulica.

DISEÑO DE ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS SUSTENTABLES

El desarrollo de proyectos centrados en la creación de elementos constructivos sustentables contribuye de manera sustancial en la reducción del impacto de las actividades humanas sobre el medio ambiente y en la atención a las necesidades de sectores poblacionales vulnerables.

El Bloque de concreto "Punta de flecha", bloque de plástico y octrápodo de geopolímero (Figura 2) son elementos a los que hace referencia este artículo son el resultado del trabajo investigativo y colaborativo llevado a cabo en la unidad académica a partir de la integración del enfoque metodológico STEAM.



Figura 2. Bloque de concreto "Punta de flecha", bloque de plásticos y octrápodo de geopolímero

2.1. BLOQUE DE PLÁSTICO

El bloque de plástico o Plastic Block surge como una alternativa para conformar un elemento utilizable en la autoconstrucción de muros modulares. Este proyecto consiste en el diseño y fabricación de un bloque hueco de plástico apilable, es decir, que puede colocarse de manera ordenada y estable, uno sobre otro hasta obtener el elemento arquitectónico deseado. Esta propuesta considera para la manufactura el uso exclusivo de plástico, con la finalidad de que las piezas sean utilizadas sin dificultad en la creación de muros y sus variantes.

2.2. OCTRÁPIDO DE HORMIGÓN A BASE DE POLÍMETOS MINERALES

Por otro lado, el diseño de piezas de hormigón en forma de octrápodo, es un proyecto que propone la elaboración de estos elementos con base en geopolímeros también denominados polímeros minerales, los cuales se obtienen a partir de la reacción de arcillas o cenizas volantes con álcalis. Esta forma en lo particular, permite una mayor superficie de contacto con el medio ambiente, lo que aumenta la eficiencia de la remediación ambiental, crucial para restaurar ecosistemas dañados por la contaminación. Estos elementos pueden ser utilizados en una variedad de aplicaciones tales como en el tratamiento de aguas residuales siendo útiles para remover contaminantes del flujo, remediación de suelos y protección de costas y estuarios de la erosión y como medio de fijación de lixiviados.

2.3. BLOQUE DE CONCRETO "PUNTA DE FLECHA"

Asimismo, es descrito el proyecto de diseño del prototipo de block extruido el cual consiste en la elaboración de un elemento de mampostería de concreto para construcción de muro extruido verticalmente, caracterizado por su forma de "V" invertida o "Punta de flecha". Este elemento dispone de dos perforaciones que facilitan el apropiado sistema de encaje durante su colocación. El proceso de fabricación de este elemento está basado en las recomendaciones y especificaciones establecidas en las Normas Técnicas Complementarias (NTC) de mampostería para elementos estructurales como no estructurales.

HERRAMIENTAS DIGITALES EDUCATIVAS APLICADAS EN LA ENSEÑANZA DE LA HIDRÁULICA

La innovación tecnológica que tiene raíz a partir de los diversos procesos de investigación científica es parteaguas en términos educativos para transformar las experiencias de aprendizaje universitarias y el desarrollo de competencias claves para la inclusión en la actual era digital a través de la incorporación en los espacios académicos de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC's) y las Tecnologías para el Aprendizaje y el Conocimiento (TAC's) [11].

Incluir el uso en la tecnología en el escenario curricular permite trascender más allá de las prácticas pedagógicas convencionales situando al proceso de enseñanza aprendizaje en enfoques educativos de vanguardia factibles de potenciar la formación integral de los estudiantes.

En la actualidad, la informática educativa [12] se ha convertido en una herramienta invaluable para el aprendizaje y para el acceso hacia entornos globales altamente digitalizados. Por lo tanto, la creación de recursos digitales educativos originados a partir del enfoque metodológico STEAM, genera con una intencionalidad educativa, herramientas didácticas que, de la mano con estrategias pedagógicas facilitan el acercamiento hacia el conocimiento en una atmósfera virtual de aprendizaje.

Particularmente en el ámbito profesional y educativo de la hidráulica, el uso de software para el dimensionamiento, modelado y simulación son cada vez más frecuentes. Programas como HCANALES, EPANET, HECRAS entre otros, son una muestra tecnológica para el diseño, operatividad y, por ende, optimización y aprovechamiento de los recursos hídricos.



3.1. PMIXER: MEZCLADOR RÁPIDO HIDRÁULICO

Entre los proyectos de innovación tecnológica creados a partir de la metodología STEAM se encuentra la aplicación Pmixer. Una herramienta diseñada con la finalidad de interpretar los parámetros de diseño de un mezclador rápido hidráulico y proporcionar las dimensiones pertinentes de una estructura que facilite una mezcla eficiente del coagulante dentro del proceso de potabilización del agua [13].

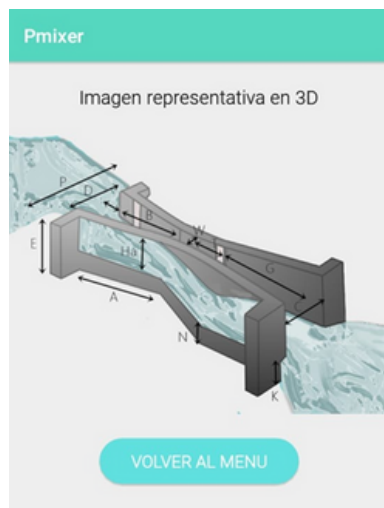


Figura 3. Aplicación Pmixer.

3.2. CEFFICIENCY: SOFTWARE PARA DISEÑO DE CANALES

Asimismo, en el espacio universitario fue desarrollado el software Cefficiency dirigido al diseño de canales bajo el criterio de máxima eficiencia hidráulica. Esta herramienta faculta al usuario, estudiante o profesionista en el campo de la hidráulica, el ingreso del caudal de diseño, el material de construcción de la estructura y la pendiente de fondo, permitiendo que el programa determine los parámetros hidráulicos y dimensionales de un canal de máxima eficiencia hidráulica distintivo por ser una sección con un menor perímetro mojado. Cefficiency es una herramienta informática que, en comparativa con otros programas similares, otorga la oportunidad al usuario de acceder no sólo a las soluciones, sino además permite la visualización de las ecuaciones empleadas en el diseño de la obra hidráulica, el proceso de cálculo y una imagen representativa del dimensionamiento del canal con sus parámetros hidráulicos, ventajas que convierten a Cefficiency en un valioso recurso didáctico el proceso formativo ingenieril [14].



Figura 4. Pantalla de resultados del programa Cefficiency

MARCO METODOLÓGICO

El presente documento denominado Desarrollo de innovación tecnológica aplicada en la enseñanza de la hidráulica y la construcción sustentable a través de la implementación de la metodología STEAM es el resultado del esfuerzo compartido de los miembros y colaboradores del Cuerpo Académico Ingeniería y Educación Sustentable enmarcado en el Área del conocimiento Humanidades, Arquitectura y Desarrollo sustentable conformado por un equipo multidisciplinario integrado por arquitectos, ingenieros civiles, químicos y electrónicos, especialistas en urbanismo y educación. Es también la suma del trabajo colaborativo llevado a cabo por docentes y estudiantes de la unidad académica, prestadores de servicio social universitario y tesis conjuntamente con el ejercicio de vinculación interdisciplinar con alumnos de la Licenciatura de Ingeniería en Procesos Industriales y la Licenciatura en informática.

La naturaleza de esta investigación está basada en el enfoque metodológico cualitativo de corte descriptivo, un estudio de caso derivado de la labor de desarrollo de innovación tecnológica impulsado desde el seno de la Facultad de Ingeniería y Tecnología de Mazatlán (FITEM) de la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS). Un trabajo que parte de la compilación de diversos proyectos generados a partir de la implementación de la metodología STEAM, investigaciones que estuvieron orientadas bajo el enfoque cuantitativo de corte experimental a través de la investigación acción participativa.

Este artículo estuvo basado en una revisión exhaustiva correspondiente a una labor de rastreo documental relacionada con los diferentes proyectos de desarrollo de innovación tecnológica generados dentro de la unidad académica. Un estudio que tuvo como punto de partida, indagar sobre el origen de cada proyecto, su sustento teórico, el marco metodológico utilizado y, enfatizando principalmente en los resultados obtenidos de cada proyecto investigativo.

Como se ha hecho mención en párrafos anteriores, los proyectos de desarrollo de innovación tecnológica a los que hace alusión este documento estuvieron regidos bajo la metodología cuantitativa experimental existiendo similitud en relación con las etapas empleadas para su desarrollo (Figura 5).

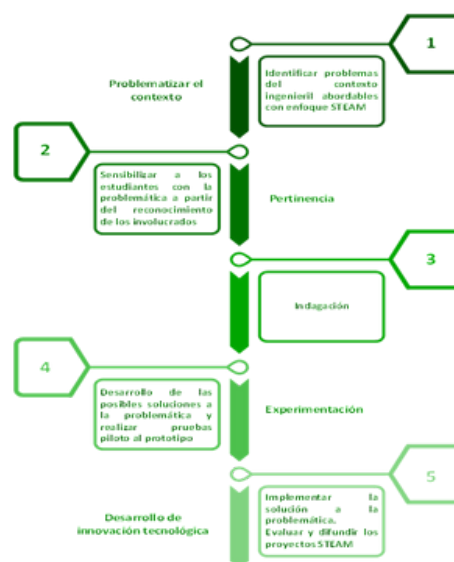


Figura 5. Fases de la metodología STEAM en el desarrollo de los proyectos de innovación tecnológica

4.1. FASE INICIAL: PROBLEMATIZAR EL CONTEXTO

La fase inicial de los proyectos descritos en esta investigación parte de la atención a diversas problemáticas detectadas en el contexto, o bien del interés de los miembros de cuerpo académico o estudiantes por un área o tema en específico.



4.2. PERTINENCIA

La segunda etapa funge como un acercamiento hacia el objeto de estudio con la finalidad de construir un diagnóstico, establecer los alcances y beneficios de los proyectos, así como estimar los recursos de toda índole necesarios para la ejecución.

Este encuentro desarrollado entre docentes y estudiantes, investigadores universitarios se suscita en el seno de la Universidad Autónoma de Sinaloa en la Facultad de Ingeniería y Tecnología de Mazatlán en el espacio operativo del Cuerpo Académico Ingeniería y Educación Sustentable, asimismo en el Departamento de Investigación y Posgrado de la Unidad Regional Sur.

4.3. INDIGACIÓN

Una vez establecida los lazos de comunicación se inicia la tercera fase: la indagación. Ésta consiste en llevar a cabo el proceso de investigación documental; el acervo que establece el estado del arte y el fundamento teórico y normativo que sustenta cada proyecto. A la par, se realizaron entrevistas semiestructuradas diseñadas como instrumento de diagnóstico que vierte información proveniente de expertos en el área, con el objetivo de extender el panorama acerca de la temática del proyecto e identificar variables válidas para la etapa experimental.

4.4. EXPERIMENTACIÓN

Culminadas las etapas anteriores y considerando la viabilidad del proyecto, se efectúa la planificación de la investigación y la acción, iniciando de esta manera el trabajo experimental. El proceso de experimentación estuvo definido en virtud del tipo de tecnología a desarrollarse.

4.4.1. FASE EXPERIMENTAL: ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS SUSTENTABLES

En el caso específico de los elementos constructivos sustentables, esta fase fue iniciada a través de la participación colaborativa de los estudiantes en la modelación digital a través del uso de herramientas computacionales permitiendo así, definir la forma y los parámetros dimensionales de los elementos.

Posteriormente, se dio paso a la construcción física del prototipo empleando diversos materiales de constitución con el propósito de encontrar la opción viable en términos de funcionamiento y sustentabilidad. Algunos prototipos realizados tal es el caso particular del bloque de mampostería punta de flecha fue sometido a pruebas de resistencia a la compresión tanto como en elemento individual como apilable para efecto del análisis comparativo con la normatividad vigente.

4.4.2. FASE EXPERIMENTAL: DISEÑO DE HERRAMIENTAS DIGITALES EDUCATIVAS

Para el caso del diseño de herramientas digitales educativas aplicadas en la enseñanza de la hidráulica, el ciclo experimental surgió a partir de la elección del sistema operativo y lenguaje de programación.

Esta actividad se desarrolló en entornos de cooperación interdisciplinar entre estudiantes de ingeniería civil e informática, quienes a su vez generaron el diseño de la plataforma interactiva y transformaron el código programable en un programa ejecutable para resolver problemas relacionados con temas del área de hidráulica.

4.5. DIFUSIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LOS PROYECTOS STEAM

Al culminar de manera satisfactoria las etapas anteriores se dio paso a la fase de divulgación de resultados e implementación de los proyectos tecnológicos desarrollados.

Con respecto a los elementos constructivos, los proyectos presentados en este compendio fueron presentados ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI) para registro de patente obteniéndose el aval para el bloque de mampostería "punta de flecha" y el plastibloque, mientras que ocrápodo de geopolímero continúa aún en solicitud de admisión de registro. Es importante mencionar, que los resultados derivados de estos proyectos de investigación producto del trabajo colaborativo interdisciplinar docente - alumno, hoy forman parte del acervo académico institucional como instrumento de generación de conocimiento formando parte de artículos de divulgación y difusión en diversos textos científicos.

Asimismo, cabe resaltar que el proyecto de bloque "punta de flecha" está en proceso de evaluación para fabricación masiva como elemento de mampostería una vez que las pruebas de ensayo validen los resultados para ser utilizado en la autoconstrucción de viviendas sustentables.

En relación con las herramientas digitales aplicadas en el proceso de enseñanza de la hidráulica se han convertido en valiosos recursos pedagógicos que, incorporados de manera estratégica en las secuencias didácticas dentro del espacio áulico facilitan el aprendizaje mediante el uso de la tecnología educativa en el proceso formativo de los ingenieros civiles.

En este sentido, el marco metodológico expuesto, deja al descubierto el valor de la implementación de metodologías como el enfoque pedagógico STEAM en el proceso de formación activa de los estudiantes, facilitando el desarrollo de competencias sustentadas en los cinco pilares de la educación presentes en los modelos educativos de vanguardia.

RESULTADOS

La educación STEAM en el escenario universitario ha contribuido de manera significativa al proceso formativo de los estudiantes de ingeniería civil al integrar los conocimientos teóricos, prácticos y actitudinales en el campo experimental mediante la intervención en proyectos relacionados con el contexto ingenieril potenciando así, el desarrollo de experiencias de aprendizaje.

El presente trabajo investigativo de corte descriptivo basado en el estudio de caso realizado en el espacio universitario de la FITEM tiene como finalidad detallar desde la perspectiva pedagógica los beneficios y alcances de la incorporación de la metodología STEAM en el desarrollo de proyectos de innovación tecnológica. A partir de una planeación estratégica que define objetivos, acciones y recursos necesarios, los estudiantes son participantes en ambientes colaborativos en las diferentes fases del proceso.

5.1. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS SUSTENTABLES

En los proyectos de innovación tecnológica centrados en el diseño de elementos constructivos, la participación del estudiante en el proceso creativo ha sido gradual con base en una planeación metodológica previamente establecida que indica las distintas etapas de intervención.

En general los tres elementos descritos en esta compilación son el resultado del trabajo de colaboración disciplinar principalmente de estudiantes de ingeniería civil en conjunto con prestadores de servicio social universitario de arquitectura. Esta dinámica ha fomentado el intercambio de conocimientos desde la generación de ideas, la elaboración de prototipos, las pruebas de ensayo en laboratorio y en algunos casos puntuales, la producción de piezas.

Cabe mencionar que el diseño del bloque de plástico y el block de mampostería de concreto "punta de flecha" surgen con la intención de atender a la población más vulnerable a través de la propuesta de materiales alternos con viabilidad para la autoconstrucción de viviendas u otros espacios.

Reconociendo los beneficios que la variedad de materiales plásticos representa para la sociedad actual y conscientes del impacto hacia el medio ambiente que esto conlleva, se genera esta iniciativa que se enfoca en promover su uso responsable a través de un proyecto de creación de bloques de construcción fabricados a partir de plástico reciclado y diseñados específicamente para la construcción de muros.

El proyecto de bloques de plástico (Figura 6) al que se hace alusión en este documento surge como un prototipo caracterizado por disponer de orificios y subestructuras rellenables, con la finalidad de ofrecer una solución innovadora en términos de construcción sostenible [15]. Se busca que la elaboración de piezas se realice de forma individual para el fácil ensamblaje. La propuesta también considera que los elementos sean rellenos con arena o agua con el propósito de crear muros resistentes y con durabilidad debido a las características propias del plástico, que es considerado un material de larga vida y difícil de degradar por los microorganismos presentes en la naturaleza.

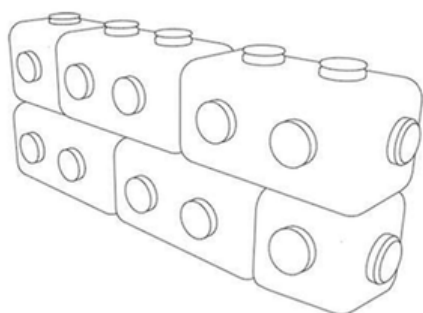


Figura 6. Prototipo de block de plástico

El desarrollo e implementación del bloque de concreto con una forma innovadora de "V" invertida (Figura 7) se sustenta en facilitar su uso en la construcción a través de una propuesta de mejora en el rendimiento en comparativa con los bloques convencionales en términos de mano de obra. Este mecanismo permite reducir significativamente la cantidad de aglomerante utilizado para unir estas piezas en cumplimiento con las normas mexicanas de mampostería para elementos estructurales NMX-C-404-ONNCCE 2013 y para uso de mampostería no estructural, Norma Mexicana NMX-C-441-ONNCCE 2013 que hace alusión a las piezas de bloques, ladrillos, tabiques y tabicones, así como piezas para celosías.



Figura 7. Proceso de elaboración del bloque de concreto "Punta de flecha"

Desde la etapa de concepción del elemento de mampostería hasta la fase actual del proyecto, se ha mantenido un arduo trabajo de cooperación e interacción docente - estudiante para desarrollar coordinadamente las acciones de conformación del sustento teórico - normativo, modelado de prototipos, selección de materiales de constitución del elemento estructural, tratamiento y dosificación de los agregados, establecimiento de la muestra, ensayos de laboratorio, evaluación de las pruebas físicas y mecánicas de los elementos de mampostería, así como la difusión de resultados obtenidos. Estas actividades son propiamente las fases del enfoque pedagógico STEAM. A la fecha de esta publicación se han realizado pruebas mecánicas de laboratorio de resistencia a la compresión en elementos individuales en los bloques de concreto, utilizando concreto convencional y mezcla con adición de PET residual, obteniéndose los siguientes resultados (Tabla 1):

Tabla 1. Resultados de pruebas mecánicas de resistencia a la compresión del bloque de concreto "Punta de flecha" por tipo de material de composición

Material de composición	Resistencia a la compresión (kg/cm^2)
Concreto convencional	45
Residuos PET	20

Con base a estos datos vertidos de la fase experimental se puede observar que sólo las piezas fabricadas con concreto tradicional superan el valor mínimo de resistencia a la compresión como elemento no estructural (40 kg/cm^2), siendo los resultados de mezcla con adiciones PET residual significativamente menores a lo establecido en la norma NMX-C-441-ONNCCE 2013.

En consecuencia, el equipo de trabajo continúa realizando adecuaciones a las dosificaciones, pero además se realizan pruebas para evaluar la resistencia de la mezcla con otras alternativas sostenibles como las adiciones minerales de conchas marinas, con un porcentaje de adición no mayor al 15%. En este sentido, este proyecto tecnológico sigue deconstruyéndose, lo que ha generado una mayor apertura para que la comunidad estudiantil continúe contribuyendo en la generación de nuevos conocimientos.

En lo referente al ocrápodo de geopolímero, es un proyecto de innovación tecnológica que surge como una propuesta de atención a problemáticas medioambientales (Figura 9). Fabricado con un material considerado entre los más ecológicos, compuesto principalmente por aluminio y silicio, la estructura ofrece una excelente resistencia a condiciones adversas, como ataques químicos y cambios bruscos de temperatura. Es importante mencionar que una de las tecnologías más prometedoras es el uso del geopolímero, un material sintético que imitan las propiedades de los minerales naturales caracterizado por ser resistente a la corrosión, lo que lo hace ideal para aplicaciones en ambientes agresivos. Adicionalmente, una ventaja de este material es que, durante su proceso productivo, las emisiones de gases de efecto invernadero son inferiores en comparativa con la producción del cemento tradicional.

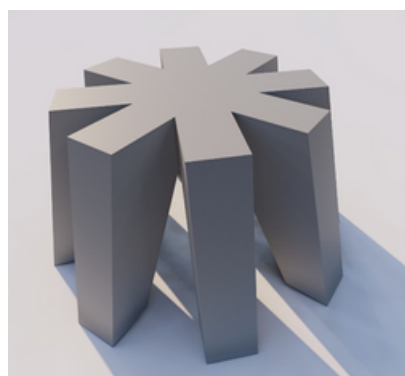


Figura 8. Modelación de la estructura forma de ocrápodo.



Figura 9. Fase de elaboración del prototipo de ocrápodo con geopolímero



Como se ha hecho mención en párrafos anteriores, la labor conjunta de los estudiantes permitió generar una propuesta de diseño novedoso en forma de ocrópodo con una amplia superficie de contacto idónea para la remoción de contaminantes principalmente de flujos de agua y suelo. Este proyecto cuenta con solicitud de registro como propiedad intelectual ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Intelectual (IMPI), sin embargo, aún en etapa de evaluación y mejora, dando apertura a la integración de más colaboradores.

5.2. HERRAMIENTAS DIGITALES EDUCATIVAS APLICADAS EN LA ENSEÑANZA DE LA HIDRÁULICA

En lo que respecta a las herramientas de informática educativa Cefficiency y Pmixer citadas en la sección introductoria de esta narrativa, estas se han convertido en recursos didácticos útiles en el proceso de la enseñanza de la hidráulica. La construcción de estas aplicaciones son el reflejo del trabajo interdisciplinar estudiantil presente desde la concepción, diseño y operatividad de los programas, permitiendo verificar procesos de cálculo y validar resultados de forma interactiva.

Particularmente Pmixer es una aplicación desarrollada para sistema operativo Android que se basa en el diseño de un canal Parshall, un mecanismo de aforo de caudales también utilizado dentro del proceso de potabilización de agua como mezclador hidráulico de coagulante. Esta herramienta educativa fue generada a través de la participación principalmente de alumnos prestadores de servicio social universitario de la licenciatura de ingeniería civil e informática, quienes generaron un proyecto de tesis de investigación de titulación y a su vez, un recurso didáctico hoy participe en el aprendizaje significativo de temas de las asignaturas de hidráulica de canales, hidrología y potabilización de agua.

En relación a su operatividad, Pmixer [13] permite la entrada de datos relacionados con el caudal de diseño, viscosidad absoluta y peso específico del fluido (Figura 10) dando paso a una serie de cálculos regidos bajo un sustento teórico, mostrando a detalle el procedimiento y las ecuaciones que hacen posible la validación del mecanismo como un canal idóneo para el mezclado rápido del coagulante a través del salto hidráulico que se genera (Figura 11).



Figura 10. Pantalla de presentación de la App y de ingreso de datos de entrada.



Figura 11. Detalle de procedimientos de cálculo, ecuaciones aplicadas y validación de resultados emitidos durante el proceso.

Mientras tanto, el programa Cefficiency diseñado para ambiente Windows es un software de diseño de canales bajo el criterio de máxima eficiencia hidráulica. Este programa desarrollado con la colaboración de estudiantes de último grado de la licenciatura en ingeniería civil de FITEM y prestadores de servicio social de FIMAZ tiene la finalidad proponer las dimensiones idóneas de un canal prismático que transporte un caudal específico, minimizando el perímetro mojado y, por consiguiente, reduciendo los costos de construcción a través de la disminución de volúmenes y profundidad de excavación.

Cefficiency es un programa que ofrece dos alternativas de diseño y dimensionamiento de canales. Una primera opción para canales de sección transversal rectangular, triangular, circular y trapezoidal fundamentadas en ecuaciones de perfiles óptimos (Figura 12) y adicionalmente propone una segunda alternativa para diseño de canales trapezoidales con relación de taludes diferentes a 60° en función principalmente a las características de estabilidad del suelo.

El programa permite al estudiante ingresar tres variables: gasto de diseño, coeficiente de rugosidad de Manning y pendiente de fondo (Figura 13), para proceder a mostrar el procedimiento, las ecuaciones base, así como los esquemas representativos con las dimensiones del canal resultante además de otros parámetros hidráulicos [14].



Figura 12. Determinación de las dimensiones de un canal rectangular de máxima eficiencia hidráulica.

Esta herramienta tecnológica hoy se encuentra disponible en un espacio virtual universitario de fácil acceso para la comunidad estudiantil y para aquellos usuarios que requieran de su instalación. Adicionalmente se menciona que Cefficiency es un proyecto tecnológico educativo difundido por los propios participantes en eventos estudiantiles nacionales y que fungió como base para un trabajo de investigación como opción de titulación de licenciatura. Actualmente, esta aplicación de fácil manejo es un recurso didáctico utilizado con confiabilidad en la unidad de aprendizaje de hidráulica de canales alcanzando una proyección internacional a través de colaboraciones llevadas a cabo a través de clases espejo producto de la vinculación interinstitucional entre FITEM y otras universidades con las que mantiene convenios académicos la UAS. Cefficiency como apoyo educativo permite la comparación de resultados obtenidos a través de métodos de aprendizaje convencionales en contraste con el uso de las TAC's en el marco de la sostenibilidad.



Figura 13. Diseño de un canal trapezoidal de máxima eficiencia hidráulica con relación de taludes de 60°.



CONCLUSIONES

El engranaje de la metodología STEAM en el escenario universitario, particularmente en el campo de la ingeniería civil ha demostrado ser una estrategia pedagógica fundamental para el desarrollo de habilidades integrales en los estudiantes en un sentido holístico. Al integrar ciencia, tecnología, ingeniería, artes y matemáticas en un mismo espacio, se prepara a los futuros ingenieros para afrontar los desafíos que impone una sociedad en constante movimiento.

Los proyectos de innovación tecnológica relacionado con el diseño de elementos constructivos sustentables y herramientas digitales aplicadas a la enseñanza de la hidráulica presentados en este artículo, evidencian la importancia de las relaciones interdisciplinarias mediante la sinergia entre participantes de diversas áreas que, conjuntamente con el asesoramiento del docente investigador han generado propuestas de soluciones creativas y viables a problemas del contexto desde el marco de la educación superior.

La Educación STEAM viene a contribuir sustancialmente a la misión y visión que promueve la Universidad Autónoma de Sinaloa en un modelo educativo [15] con enfoque humanista, centrado en el aprendizaje y constructivista y, con base en ello, desde el entorno educativo estas estrategias didácticas promueven la formación de profesionales competentes y comprometidos con el desarrollo de una sociedad más justa y equitativa.

AGRADECIMIENTOS

Sin duda alguna, el presente trabajo de investigación no hubiera sido posible sin la labor y entrega de cada uno de los miembros colaboradores de los diferentes proyectos descritos en este documento.

El agradecimiento principal, al capital humano, los estudiantes miembros de FITEM y de otros campos formativos; prestadores de servicio social universitario, tesisistas y colaboradores voluntarios que participaron desde su espacio en el desarrollo de los proyectos de innovación tecnológica. A los docentes investigadores miembros del Cuerpo Académico Ingeniería y Educación Sustentable quienes elaboran la planeación metodológica, comparten la experiencia a través del asesoramiento continuo y dan oportuno seguimiento a las actividades. Asimismo, se externa el agradecimiento a todo el personal laboratorista universitario involucrado y aquellas empresas de la iniciativa privada que otorgan apoyo en las fases experimentales.

REFERENCIAS

- [1] I. Pérez-Almeida y A. Romero-Santos, "La Sostenibilidad como Paradigma Socio-ecológico: Complejidad, Transdisciplinariedad y Desarrollo Sostenible", Departamento de Publicaciones Universidad ECOTEC: Samborombón – Ecuador, pp 38-40, octubre 2023.
- [2] A. Vilches y D. Gil-Pérez, "Educación para la Sostenibilidad", Repensar la Sostenibilidad, Capítulo 20, pp 373-389, enero 2020.
- [3] F. Fernández-de-Castro y R.A. Villegas-Pantoja, "Metodologías activas en educación superior: el caso de una universidad particular en México", European Public & Social Innovation Review, vol. 9, pp 1-15, septiembre 2024. <https://doi.org/10.31637/epsir-2024-631>.
- [4] J. P. Santillán-Aguirre, E. M. Jaramillo-Moyano, R. D. Santos-Poveda, V. D. C. Cadena-Vaca, "STEAM como metodología activa de aprendizaje en la educación superior" Polo del Conocimiento, vol. 5, no. 9, pp 467- 492, 2020.
- [5] R. M. Gillies, "Using Cooperative Learning to Enhance Students' Learning and Engagement during Inquiry-Based Science", Education Sciences, vol. 13, no. 12 1242, december 2023. <https://doi.org/10.3390/educsci13121242>.
- [6] M. I. Cedeño, M.P. Barreiro y J.Z. Acosta, 593 Digital Publisher CEIT, vol. 7, no. 1, pp 418-429, 2022. <https://doi.org/10.33386/593dp.2022.1.1014>.
- [7] S.S. Evenddy, N. Gailea y S. Syafrizal, "Exploring the Benefits and Challenges of Project-Based Learning in Higher Education", PPSDP International Journal of Education, vol. 2, no. 2, pp 458-469, november 2023. <https://doi.org/10.59175/pijed.v2i2.148>.

[8] S. Delgado-Rodríguez, R. García-Fandiño y R. González-García, "Estilos de Aprendizaje y Estilos de Enseñanza. Innovación educativa a través de los espacios y metodologías de enseñanza y aprendizaje en entornos STEAM" Revista de Estilos de Aprendizaje, vol. 16 no. 22 pp 1-4, noviembre 2023. <https://doi.org/10.55777/rea.v16i32.6314>.

[9] M. T. Carrillo-Hernández y B. Benavidez-Martínez, "El currículo en el siglo XXI: competencias, identidades y profesiones", Pedagogía y Saberes, vol. 57, pp 25-37, julio 2022. <https://doi.org/10.17227/pys.num57-13577>.

[10] C. Calles C, "ODS y Educación Superior. una mirada desde la función de investigación", Revista Educación Superior y Sociedad, vol. 32, no. 2, pp.167-201, julio 2020.

[11] L. Zahorodnia, Y. Protsko, T. Pakhomova, O. Titarenko & Y. Luchko Y, "The Role of Information and Communication Technologies in Students' Academic Achievements", Cadernos De Educação Tecnologia E Sociedade, vol. 17, no. se1, pp 147-158, april 2024. <https://doi.org/10.14571/brajets.v17.nse1.147-158>.

[12] M. Akour & M. Alenezi, "Higher Education Future in the Era of Digital", Education Sciences, vol.12, no.11, 784, november 2022. <https://doi.org/10.3390/educsci12110784>.

[13] K. K. Romero, R.E. González, V.M. García y Y. Romero. "Diseño de herramientas digitales educativas aplicables en el proceso formativo de los estudiantes de ingeniería", Revista Digital de Tecnologías Informáticas y Sistemas, vol. 7, no. 1, pp 50-55, diciembre 2023. <https://doi.org/10.61530/redtis.vol7.n1.2023.180.50-55>.

[14] M. A. Morales, K.K. Romero y R.E. González, "Aplicación del software educativo Cefficiency para el diseño de canales de máxima eficiencia hidráulica", Revista de Investigación Tecnológica RITI, vol 7, no. 13, pp 101-106, enero 2019.

[15] UAS 2022 "Modelo Educativo UAS 2022" Universidad Autónoma de Sinaloa