

Inteligencia artificial para el diseño de humedales artificiales: Chat GPT en soluciones basadas en la naturaleza

María Concepción Martínez-Rodríguez (<https://orcid.org/0000-0003-3094-5411>)

Diego Domínguez-Solís* (<https://orcid.org/0000-0001-8402-5157>)

Héctor Guadalupe Ramírez-Escamilla (<https://orcid.org/0000-0001-9440-4644>)

Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo, México.

Producto derivado del proyecto de investigación SIP:20251143

*Autor de correspondencia: diegossolis32@gmail.com

Resumen

El uso de humedales artificiales (HA) para el tratamiento de aguas grises constituye una alternativa sustentable frente a las limitaciones técnicas y económicas de los sistemas convencionales. El objetivo de este estudio fue explorar la utilidad de ChatGPT versión GPT-4o como herramienta de apoyo en el diseño preliminar de HA para el tratamiento de aguas grises domésticas. Se desarrolló

una metodología basada en un ‘*prompt*’ estructurado que permitió integrar al modelo información sobre caudal, características fisicoquímicas del agua residual y restricciones presupuestales para generar alternativas de configuración, materiales, vegetación y operación. La propuesta generada fue posteriormente contrastada con criterios técnicos y literatura especializada para valorar su pertinencia. Como resultado, ChatGPT propuso un humedal subsuperficial de flujo horizontal (HSSF) para un caudal de $160 \text{ L} \cdot \text{día}^{-1}$, con un costo estimado de aproximadamente \$12,000 MXN y eficiencias preliminares de remoción de 80–90 % para DBO_5 , de 70–85 % para DQO y SST de 85–95 %, rangos consistentes con valores reportados en la literatura. Los resultados sugieren que los modelos de lenguaje pueden facilitar la integración de información y la generación de alternativas durante las etapas iniciales del diseño. Sin embargo, sus propuestas requieren verificación mediante criterios de ingeniería, literatura especializada y validación experimental. Por tanto, ChatGPT puede utilizarse como herramienta complementaria en el diseño conceptual de HA, particularmente en contextos con recursos técnicos o económicos limitados.

Palabras clave: Sustentabilidad, agua, tratamiento, humedales artificiales, inteligencia artificial.

Recibido: 22 de enero de 2026

Aceptado: 26 de agosto de 2026

Introducción

La contaminación del agua sigue siendo un asunto crítico a escala mundial, debido principalmente a la escasa disponibilidad de tecnologías accesibles, descentralizadas, económicas y eficaces para su tratamiento. Los sistemas tradicionales de plantas de tratamiento de aguas residuales suelen requerir considerables inversiones de capital, junto con elevados gastos de edificación y conservación. Además, su funcionamiento demanda personal especializado, lo que aumenta los obstáculos técnicos y económicos, particularmente en situaciones con recursos escasos (Marín-

Muñiz, 2018). De acuerdo con Zamora-Castro et al. (2025), los humedales artificiales se han establecido como una alternativa ecológica para la gestión de aguas residuales, al fusionar conceptos de ingeniería con procedimientos que estimulan el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos naturales. Estas ecotecnologías posibilitan la purificación del agua a través de procesos físicos, químicos y biológicos comparables a los que ocurren en humedales naturales, aunque en ambientes diseñados y regidos. En este escenario, Sandoval-Herazo et al. (2018) indican que los humedales artificiales formados por sustrato, vegetación y comunidades de microorganismos, se muestran como una opción viable tanto económica como ecológica para el saneamiento del agua en estas zonas. Sin embargo, su desempeño depende de variables como la configuración hidráulica, el tiempo de retención, la carga contaminante, el sustrato, la vegetación y las condiciones ambientales, por lo que su diseño requiere integrar diversos criterios técnicos (Wu et al., 2023). En años recientes, Alprol et al. (2024) menciona que la inteligencia artificial (IA) y el Internet de las Cosas (IoT), está transformando los enfoques tradicionales de tratamiento y monitoreo del agua. Estas tecnologías han permitido desarrollar aplicaciones orientadas a la predicción de parámetros, optimización de procesos, monitoreo de la calidad del agua y automatización de operaciones mediante diferentes técnicas de aprendizaje automático (Alprol et al., 2024). En este escenario, los humedales artificiales también pueden aprovechar estas herramientas, en particular durante su fase de diseño, donde la IA brinda posibilidades para perfeccionar su configuración, funcionalidad y adaptabilidad a diversos ambientes. Sin embargo, la aplicación de modelos de lenguaje generativo en este ámbito requiere distinguir entre la generación de recomendaciones preliminares y la validación técnica de un sistema, ya que las respuestas producidas por estos modelos deben contrastarse con criterios de ingeniería y evidencia científica. Teniendo en cuenta el progreso de herramientas de inteligencia artificial utilizadas en el tratamiento de aguas, el propósito de esta investigación es valorar el potencial de ChatGPT (Generative Pre-trained Transformer) versión GPT-4o como un asistente inteligente para el diseño inicial de humedales artificiales. El objetivo fue analizar su utilidad como herramienta de apoyo en la generación de alternativas preliminares de diseño, considerando su consistencia con criterios técnicos y literatura científica, especialmente en áreas con recursos limitados.

Antecedentes sobre los humedales artificiales

Los humedales artificiales, son sistemas de tratamiento de aguas residuales que replican los procesos de depuración naturales empleando materiales como grava, arena y plantas acuáticas bajo condiciones reguladas (Gorgoglione et al., 2018). Según Kataki et al. (2021) y Stefanakis et al. (2016) esta tecnología es vista como una opción ecológica y sostenible en comparación con los métodos tradicionales, dado que brinda numerosas ventajas económicas, ambientales y sociales, entre ellas el bajo uso de energía, costos disminuidos de funcionamiento y conservación, y la habilidad de incorporarse en comunidades rurales o con recursos escasos. Hay varios tipos de humedales edificados, principalmente de flujo superficial y subsuperficial, cada uno ajustado a diferentes requerimientos y situaciones. A nivel global, los humedales construidos se han implementado exitosamente en más de 50 países, destacando su potencial para el saneamiento descentralizado y la protección ambiental (Wu et al., 2023).

ChatGPT versión GPT-4o en el tratamiento de aguas residuales

La inteligencia artificial (IA) ha empezado a tener un rol predominante en el sector del manejo y tratamiento de aguas residuales, especialmente mediante modelos sofisticados como ChatGPT versión GPT-4o (“o” de “*omni*”). Esta herramienta, fundamentada en el procesamiento del lenguaje natural, se destaca como un recurso revolucionario para respaldar la toma de decisiones técnicas, debido a su habilidad para manejar y condensar grandes cantidades de información en tiempo real (Agathokleous et al., 2023; Memarian et al., 2023). De acuerdo con Egbemhenghe et al. (2023) su implementación posibilita optimizar la utilización de recursos, prever necesidades de mantenimiento y potenciar la supervisión de parámetros críticos, favoreciendo de esta manera una

administración más eficaz y sostenible de las plantas de tratamiento de aguas residuales. También esta IA puede incorporarse en plataformas de análisis y supervisión automatizadas, simplificando labores como la categorización de tecnologías, el análisis de procesos y la revisión de literatura científica pertinente, lo que es particularmente beneficioso en situaciones con restricciones técnicas o temporales (Alshami et al., 2023).

Metodología

En la **Figura 1** se presenta el diagrama de flujo que describe la metodología general utilizada para el diseño preliminar de un humedal artificial mediante el uso de IA, específicamente ChatGPT versión GPT-4o. El procedimiento se planteó como una estrategia de apoyo a la toma de decisiones, en la que la IA fue utilizada para integrar información de entrada, generar alternativas y organizar criterios técnicos, sin considerar sus respuestas como una validación experimental del sistema propuesto.

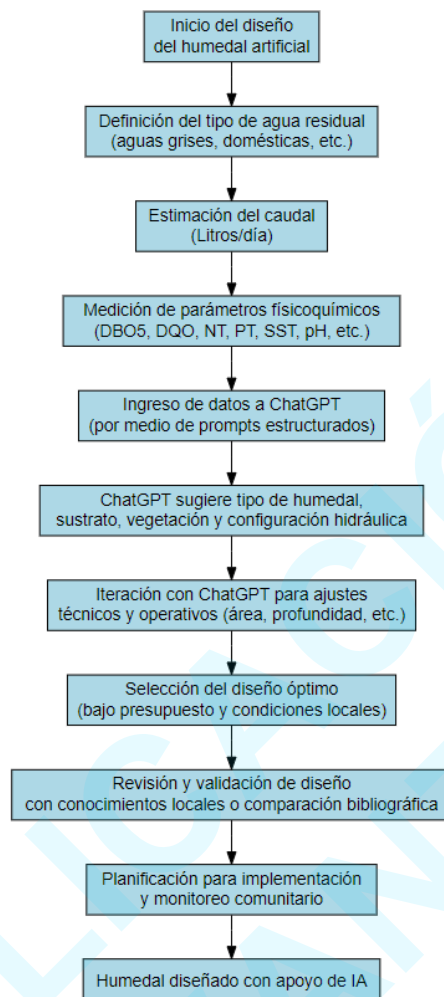


Figura 1. Diagrama metodológico para el diseño asistido por ChatGPT de un humedal artificial.

Fuente: Elaboración propia.

El proceso comenzó con la identificación del tipo de agua residual, por ejemplo, aguas grises o domésticas, posteriormente se estimó el caudal diario y la caracterización de los parámetros físicoquímicos iniciales como: demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total (NT), fósforo total (PT), sólidos suspendidos totales (SST) y potencial de hidrógeno (pH). La selección de estas variables respondió a la importancia para la caracterización de la carga contaminante y el establecimiento de criterios de diseño y desempeño de los humedales artificiales (Wu et al., 2023).

Una vez que se recopiló esta información se integró en ChatGPT versión GPT-4o mediante instrucciones estructuradas *prompts*. Como resultado, la IA sugirió un tipo de humedal apropiado,

con un tipo de sustrato, vegetación macrófita y una configuración hidráulica básica. El uso de *prompts* permitió establecer condiciones de entrada y criterios específicos para orientar la generación de respuestas, una estrategia que ha sido propuesta para organizar tareas técnicas y de revisión mediante modelos de lenguaje (Alshami et al., 2023). En esta etapa, las recomendaciones generadas por el modelo se consideraron alternativas preliminares y no resultados de una simulación experimental o computacional.

Después de definir varias alternativas, se seleccionó el diseño más conveniente considerando restricciones presupuestales y operativas. Algunos estudios señalan que la selección debe realizarse mediante la comparación de las características técnicas de las alternativas generadas y su correspondencia con información reportada en literatura especializada. La evaluación de las propuestas se debe fundamentar en criterios previamente establecidos para los humedales artificiales, considerando aspectos como configuración hidráulica, requerimientos de operación, características del sustrato, vegetación y capacidad esperada de remoción (Kataki et al., 2021; Wu et al., 2023). Por último, el diseño seleccionado se comparó con la literatura científica disponible y con criterios técnicos de diseño, con el propósito de identificar coincidencias, posibles inconsistencias y limitaciones de las recomendaciones generadas por ChatGPT.

El *prompt* ingresado guio al modelo para solicitar al usuario datos clave, por ejemplo: el tipo de agua residual a tratar, el caudal diario y los valores iniciales de los parámetros fisicoquímicos. Con esta información, el modelo generó propuestas de diseño de humedales artificiales optimizados para las condiciones específicas del caso. Las instrucciones estructuradas permiten establecer de manera explícita las variables de entrada y las tareas que debe desarrollar el modelo, esto optimiza una mayor trazabilidad de generación de respuestas (Alshami et al., 2023).

Para el diseño del HA de esta investigación se describe a continuación el *prompt* utilizado como punto de partida para la generación estructurada de alternativas de diseño:

“Actúa como un asistente técnico especializado en el diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas grises domésticas (provenientes de duchas, lavabos y lavandería). Emplea una metodología estructurada basada en inteligencia artificial para proponer soluciones viables desde cero.

Tu primera tarea es preguntarme:



¿Cuál es el caudal diario aproximado del agua gris a tratar (en litros por día ($l \cdot día^{-1}$))?

¿Cuáles son los valores iniciales estimados o medidos de los siguientes parámetros fisicoquímicos: DBO_5 ($mg \cdot L^{-1}$), DQO ($mg \cdot L^{-1}$), SST ($mg \cdot L^{-1}$), NT ($mg \cdot L^{-1}$), PT ($mg \cdot L^{-1}$), pH?

¿Cuál es tu presupuesto estimado en pesos mexicanos (MXN) para la construcción del sistema?

Una vez que recabes esta información, procede a:

- Proponer dos tipos de humedales artificiales técnicamente adecuados (por ejemplo: subsuperficial horizontal, vertical, híbrido, superficial), ajustados al presupuesto disponible.
- Estimar el costo aproximado de cada sistema (materiales, mano de obra y vegetación), aclarando supuestos.
- Presentar de forma clara las ventajas y desventajas técnicas, operativas y de mantenimiento de cada alternativa.
- Sugerir cuál opción podría ser más conveniente según los objetivos de tratamiento, espacio disponible, uso final del agua tratada o condiciones locales.
- Estimar los porcentajes de remoción esperados para cada parámetro (DBO_5 , DQO, SST, NT, PT y pH) en ambos diseños.

Después de presentar esta comparación, esperarás a que el usuario elija uno de los dos sistemas propuestos para entonces:

- Detallar su diseño paso a paso: dimensiones, materiales, especies vegetales, configuración hidráulica y mantenimiento recomendado.

Hazlo de forma clara, práctica y técnica, considerando restricciones presupuestales, climáticas o de espacio si las menciono.”

A partir de este *prompt*, el modelo solicitó la información base al usuario y desarrolló de manera secuencial las tareas indicadas. Las respuestas generadas se contrastaron con criterios de diseño y literatura especializada sobre humedales artificiales (HA), se consideraron aspectos como la configuración hidráulica, el tiempo de retención, sustrato, vegetación, requerimientos operativos

y eficiencias de remoción. El resultado del modelo se consideró como una propuesta preliminar sujeta a evaluación técnica, y no como una predicción experimental del comportamiento del sistema. Este enfoque permitió generar respuestas adaptadas a las condiciones definidas para el escenario de estudio y así explorar la utilidad de un modelo de lenguaje generativo como herramienta de apoyo en las primeras etapas del diseño de un HA.

Características del escenario para el diseño de un HA a través de ChatGPT versión GPT-4o.

Para el diseño del HA se planteó un escenario con las siguientes condiciones iniciales, las cuales fueron parte de un proyecto de innovación desarrollado en el Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIIEMAD). Es importante destacar que los parámetros físicoquímicos analizados se consideraron como indicadores clave de la calidad del agua residual, para esta investigación fueron: Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Nitrógeno Total (NT) y Fósforo Total (PT) (**Cuadro 1**).

Cuadro 1. Características del escenario para el diseño de humedales artificiales.

Categoría	Escenario
Tipo de agua residual	Aguas grises domésticas
Número de personas por vivienda	4
DBO ₅ (mg·L ⁻¹)	150
DQO (mg·L ⁻¹)	300
SST (mg·L ⁻¹)	100

Nitrógeno total (NT, mg·L ⁻¹)	20
Fósforo total (PT, mg·L ⁻¹)	3.5
pH	7.2
Presupuesto estimado (MXN)	\$12,000

Fuente: Elaboración propia con información de ChatGPT versión GPT-4o.

Resultados y Discusión

Elección del tipo de humedal artificial

El diseño propuesto utiliza un humedal construido subsuperficial de flujo horizontal para tratar aguas grises domésticas, lo cual se justifica por varias ventajas frente a otras configuraciones como el flujo vertical. Con base los resultados proporcionados por el modelo ChatGPT versión GPT-4°, se presentan dos opciones técnicamente viables para el tratamiento de aguas grises: 1) el humedal subsuperficial de flujo horizontal (HSSF) y 2) el humedal subsuperficial de flujo vertical (VSSF) (**Cuadro 2**). En los humedales subsuperficiales, el agua fluye bajo la superficie a través del medio poroso, evitando su exposición al aire libre y, por tanto, reduce significativamente el riesgo de proliferación de mosquitos (Walton et al. 2016). Por otro lado, Morandi et al. (2021) y Nourozi et al. (2023) señalan que los humedales de flujo vertical suelen requerir una alimentación intermitente del agua desde la superficie, lo cual puede implicar mayor complejidad operativa (bombas o dispositivos de dosificación) y cierta exposición del agua.

Cuadro 2. Tipos de humedales artificiales recomendados por ChatGPT versión GPT-4o.

Característica	HSSF	VSSF
Área requerida	Moderada a amplia	Moderada
Eficiencia en DBO ₅ , DQO, SST	Alta	Muy alta
Eficiencia en NT y PT	Media	Alta
Complejidad hidráulica	Baja	Moderada (riego intermitente)
Mantenimiento	Bajo	Bajo a medio
Costo estimado	\$12,000	\$12,000
Requiere bombeo o temporizador	No	Opcional (recomendado)
Visibilidad del agua	No (subsuperficial)	No (subsuperficial)
Riesgo de olores/mosquitos	Muy bajo	Muy bajo

Fuente: Elaboración propia con información de ChatGPT versión GPT-4o.

Sin embargo, después de evaluar las características operativas, se consideró como el mejor HA el HSSF debido a su simplicidad hidráulica, ya que no requiere bombeo ni sistema de riego intermitente, lo que reduce tanto la complejidad técnica como los costos de operación a largo plazo. Además, su bajo requerimiento de mantenimiento y el riesgo mínimo de generación de olores o proliferación de vectores lo convierten en una alternativa especialmente adecuada para comunidades rurales con recursos limitados y sin acceso a personal especializado. Otra de las ventajas por las que se justifica la elección de un HSSF es que puede operar de forma enteramente pasiva por gravedad, sin requerir la energía que demandan muchos sistemas verticales, lo cual simplifica su manejo en comunidades con recursos limitados.

Por estas razones, el sistema elegido resulta congruente con los objetivos y restricciones del caso, privilegiando la simplicidad, bajo mantenimiento y control de vectores, por encima de la máxima nitrificación que podría lograr un VSSF.

Pertinencia técnica del diseño propuesto

Los parámetros considerados para el diseño fueron:

- Caudal diario (Q): 160 L·día⁻¹
- Tiempo de retención hidráulico (TRH): 3 días (recomendado para aguas grises)
- Porosidad del sustrato (n): 0.35 (grava lavada)
- Profundidad útil: 0.6 m
- Carga hidráulica superficial (CHS): 2–5 cm·día⁻¹

El volumen requerido se calculó con la ecuación 1:

$$V = Q \times TRH = 160 \frac{L}{día} \times 3 = 480 L = 0.48 m^3 \quad (1)$$

El Área superficial (A) se calculó con la ecuación 2:

$$A = \frac{V}{n \times Profundidad} = \frac{0.48 m^3}{0.35 \times 0.6 m} \approx 2.29 m^2 \quad (2)$$

Dimensiones sugeridas:

- Largo: 3.0 m
- Ancho: 0.8 m
- Profundidad total: 0.7 m (60 cm útiles + 10 cm de capa libre)

El humedal diseñado tuvo dimensiones de 3.0 m de largo × 0.8 m de ancho × 0.7 m de profundidad, con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de ±3 días (Figura 2), esta escala resultó técnicamente adecuada para el caudal estimado de 160 L·día⁻¹ generado por cuatro personas (Ghosh et al., 2010; Wang et al., 2021). El volumen poroso del lecho fue acorde para proporcionar ±3 días de retención, de acuerdo con Da Silva et al. (2020) está dentro de los rangos típicos recomendados (2–5 días) para humedales subsuperficiales efectivos. Lestari & Widiassa (2025) han demostrado que incrementar el TRH más allá de 3 días tiene rendimientos decrecientes en la mejora de la DBO/DQO.

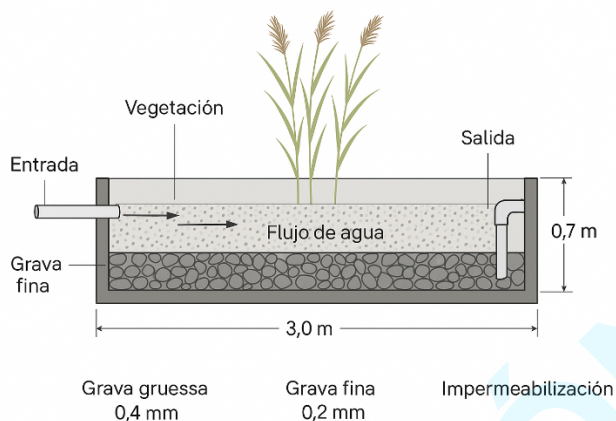


Figura 2. Perfil lateral de un HSSF para el tratamiento de aguas grises en una comunidad rural.

Fuente: Elaborado con ChatGPT versión GPT-4o.

Sustrato y vegetación

Con respecto a la configuración hidráulica, el diseño prevé alimentación distribuida en un extremo mediante tubería perforada de PVC y drenaje en el extremo opuesto, asegurando flujo horizontal uniforme.

La configuración hidráulica utilizada se enlista a continuación:

- Entrada: Tubería PVC perforada a lo largo del ancho, enterrada superficialmente
- Flujo: Horizontal, subsuperficial, controlado por desnivel
- Salida: Tubo regulable en “L invertida” con codo, permite ajuste del nivel del agua

Para el diseño ChatGPT versión GPT-4o propuso un material de sustrato granular adecuado (grava gruesa 10–30 mm y una capa superior de grava fina/arena lavada) (**Cuadro 3**). El uso de grava de tamaño relativamente grande en la base ayuda a prevenir problemas de colmatación y asegura buena permeabilidad del flujo.

Cuadro 3. Materiales para la construcción del humedal subsuperficial de flujo horizontal.

Elemento	Descripción
Estructura del humedal	Cajón impermeabilizado (geotextil, geomembrana, o concreto)
Capa inferior (40 cm)	Grava gruesa lavada (10–30 mm)
Capa superior (20 cm)	Grava fina (5–10 mm) o arena gruesa lavada
Sistema de entrada	Tubería PVC Ø2" perforada + válvula de control
Sistema de salida	Tubería PVC en forma de “L invertida” con codo para nivelar
Vegetación macrófita	<i>Phragmites australis</i> o <i>Typha domingensis</i>
Otros	Malla geotextil, pala, nivel, mano de obra

Fuente: Elaboración propia con información de ChatGPT versión GPT-4o.

La vegetación elegida fue la especie *Phragmites australis* —conocida comúnmente como “carrizo”— que se considera apropiada y de uso común en este tipo de sistema, su elección está justificada debido a su alta tolerancia, denso sistema radicular y capacidad de transferencia de oxígeno a la rizósfera, soporte de bacterias y estética, también se propusieron otras especies de plantas típicas (*Typha*, *Cyperus*, etc.), que ayudan a remover contaminantes mediante procesos físicos, químicos y biológicos. La densidad sugerida para este HA fue de 4–6 plantas·m⁻² con un total de 10–15 plantas·m⁻².

Las actividades de mantenimiento recomendado se describen a continuación:

Cuadro 4. Actividades y su frecuencia para el mantenimiento de los sistemas.

Frecuencia	Actividad
Semanal	Verificar flujo de entrada y salida
Mensual	Retiro de sólidos visibles y maleza
Trimestral	Evaluar desarrollo de plantas, podar si es necesario
Anual	Verificar estado del sustrato y tuberías

Fuente: Elaboración propia con información de ChatGPT versión GPT-4o.

Eficiencia estimada de remoción de contaminantes

El diseño anticipa elevadas eficiencias de remoción para los principales contaminantes presentes en las aguas grises. Estas metas coinciden con los rangos reportados en estudios recientes sobre humedales subsuperficiales tratados de aguas grises.

La remoción de DBO_5 en humedales subsuperficiales bien diseñados con un influente de aproximadamente $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ pueden alcanzar eficiencias del 80–90 %, resultando en efluentes por debajo de $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Los resultados obtenidos con este diseño son consistentes con los valores reportados por otros autores ya que cumple con los estándares de tratamiento secundario avanzado, para la reutilización en riego restringido o descarga segura (Bafrani et al. 2024; Zhang et al. 2015). (Cuadro 5).

Cuadro 5. Porcentaje estimado de remoción de contaminantes.

Parámetro	Remoción esperada (%)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)	80–90
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	70–85
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	85–95
Nitrógeno Total (NT)	30–40
Fósforo Total (PT)	20–30
pH	Estable (7.0–7.5)

Fuente: Elaboración propia con información de ChatGPT versión GPT-4o.

Un estudio realizado por Khalifa et al. (2020) indican una proyección de remoción del 70–85 % de la DQO, con un influente de $\sim 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, los resultados propuestos (70–85 %) son consistentes con los reportados internacionalmente para humedales subsuperficiales bien operados. La DQO suele mostrar porcentajes de remoción ligeramente menores respecto a la DBO debido a la presencia de fracciones orgánicas no biodegradables, pero alcanzar reducciones superiores al 80% es factible y frecuente en este tipo de sistemas (Salem et al., 2022).

Los humedales de flujo subsuperficial horizontal (HSSF) destacan por su alta eficiencia en la remoción de SST, principalmente gracias a la filtración a través del lecho granular y la sedimentación en zonas de flujo lento. Algunas investigaciones sustentan eficiencias de remoción de SST entre 85 y 95 % como las propuestas por ChatGPT versión GPT-4o, logrando efluentes menores a $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de SST, lo que da como resultado agua prácticamente clara y reduce el riesgo de colmatación (Taha et al., 2023).

La remoción de NT en HSSF se puede considerar menos eficiente en comparación con la eliminación de DBO, DQO o sólidos suspendidos, con valores de reducción que oscilan entre 30–50 % (Gao et al. 2017). Esto se debe principalmente a la limitada nitrificación en un medio saturado, ya que la baja disponibilidad de oxígeno restringe la conversión de amonio a nitrato y, por consecuencia, se limita la desnitrificación posterior (Vymazal et al., 2020).

La expectativa de una remoción de PT del 20–30% en el HSSF se encuentra dentro del rango reportado por Saeed et al. 2017. La eliminación de fósforo en estos sistemas suele estar limitada y depende principalmente de la adsorción en el sustrato, la precipitación química con minerales presentes en el medio y, en menor medida, a la asimilación por biomasa vegetal y microbiana (Li et al., 2021).

El tratamiento de aguas residuales en humedales construidos mantiene regularmente un pH del efluente en un rango neutro (7.0–7.5) cuando el influente también es neutro (~ 7.2) los resultados del HSSF propuesto fueron similares. Los procesos biogeoquímicos en el humedal actúan como un sistema tampón, evitando cambios significativos de pH, incluso al variar el tiempo de retención hidráulica (TRH) entre 1 y 3 días (Kumar et al., 2019).

Viabilidad en comunidades rurales de recursos limitados

De acuerdo con Moreira et al. (2020) y García-Herrero et al. (2020) los humedales construidos representan una alternativa eficaz, económica y sostenible para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en comunidades rurales con recursos limitados. Su bajo costo de instalación y operación, el uso de procesos naturales sin necesidad de energía eléctrica o insumos químicos, así como su alta eficiencia en la remoción de contaminantes, los hacen especialmente adecuados en contextos de baja densidad poblacional y escasa infraestructura (Akyürek et al., 2024). Además, su implementación facilita el reúso del agua, promueve beneficios sociales y ambientales, y está alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), siempre que exista participación comunitaria para garantizar su mantenimiento a largo plazo (Waly et al., 2022).

Costo del humedal subsuperficial de flujo horizontal

El costo estimado de construcción fue de aproximadamente \$12,000 MXN para el humedal artificial (**Cuadro 6**), equivalente a \$3,000 MXN por persona beneficiada (4 personas), es considerablemente más bajo en comparación con alternativas como biodigestores avanzados o fosas sépticas con filtro arenoso, lo que lo hace especialmente asequible para familias rurales, sobre todo si se aprovechan materiales y mano de obra local (Gabr et al., 2023).

Cuadro 6. Costo de los materiales para la implementación del HA.

Concepto	Costo estimado (MXN)
Grava y arena	\$3,500
Geomembrana/geotextil	\$1,500
Tubería y conexiones	\$1,000
Mano de obra	\$3,000
Vegetación	\$1,500
Variaciones y extras	\$1,500

Fuente: Elaboración propia con información de ChatGPT versión GPT-4^o y validados por la literatura.

Estudios realizados en México y en otros países señalan que los HSSF presentan costos de inversión y operación significativamente menores que los sistemas convencionales, y su viabilidad económica mejora aún más en contextos rurales donde el acceso a infraestructura y recursos es limitado (Lomeli et al., 2025).

Conclusiones

Este estudio permitió explorar la utilidad de la IA en este caso ChatGPT versión GPT-4^o como herramienta de apoyo para la generación preliminar de propuestas de diseño de humedales artificiales (HA), particularmente en contextos con restricciones técnicas o presupuestales. Mediante un *prompt* estructurado, el modelo integró información sobre caudal, características fisicoquímicas del agua residual y presupuesto disponible para generar alternativas de tratamiento.

A partir de las condiciones establecidas, ChatGPT propuso un humedal construido subsuperficial de flujo horizontal para el tratamiento de aguas grises domésticas, caracterizado por su operación pasiva, baja complejidad hidráulica y reducidos requerimientos de mantenimiento. El diseño consideró un caudal de 160 L·día⁻¹ y un costo estimado de aproximadamente \$12,000 MXN. Las eficiencias propuestas para DBO₅ (80–90 %), DQO (70–85 %) y SST (85–95 %) fueron consistentes con rangos reportados en la literatura; sin embargo, estos valores deben interpretarse como estimaciones preliminares y no como resultados validados experimentalmente.

Los resultados sugieren que ChatGPT puede facilitar la integración de información y la generación de alternativas durante las etapas iniciales del diseño. Sin embargo, sus propuestas requieren contrastarse con literatura especializada, cálculos hidráulicos, evaluación de las condiciones

locales y validación experimental. Por tanto, su principal aporte radica en complementar, y no sustituir, el conocimiento especializado y los procedimientos convencionales de ingeniería para el diseño y validación de humedales artificiales.

Referencias

- Agathokleous, E., Saitanis, C., Fang, C., & Yu, Z. (2023). Use of ChatGPT: What does it mean for biology and environmental science?. *Science of the Total Environment*, 888, 164154. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164154>
- Alprol, A. E., Mansour, A. T., Ibrahim, M. E. E., & Ashour, M. (2024). Artificial Intelligence Technologies Revolutionizing Wastewater Treatment: Current Trends and Future Prospective. *Water*, 16(2), 314. <https://doi.org/10.3390/w16020314>
- Alshami, A., Elsayed, M., Ali, E., Eltoukhy, A., & Zayed, T. (2023). Harnessing the Power of ChatGPT versión GPT-4o for Automating Systematic Review Process: Methodology, Case Study, Limitations, and Future Directions. *Systems*, 11 (7), 351. <https://doi.org/10.3390/systems11070351>
- Akyürek, A., & Ağdağ, O. (2024). Comparison of constructed wetlands and package type sequencing batch biological treatment plants in rural areas in terms of efficiency and cost in a full-scale example. *Ecological Engineering*, 201, 107190. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107190>
- Bafrani, A., Mirbagheri, S., Shafiepour, E., Kinsley, C., & Stefanakis, A. (2024). Investigating the effect of hydraulic residence time, artificial aeration and plants presence on different constructed wetland designs treating oil industry effluent. *Journal of Environmental Management*, 370, 122348. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122348>

- Da Silva, I., Costa, G., Queluz, J., & Garcia, M. (2020). Effect of hydraulic retention time on chemical oxygen demand and total nitrogen removal in intermittently aerated constructed wetlands. *Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science* 15(30). <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2504>
- Egbemhenghe, A., Ojeyemi, T., Iwuzor, K., Emenike, E., Ogunsanya, T., Anidiobi, S., & Adeniyi, A. (2023). Revolutionizing water treatment, conservation, and management: Harnessing the power of AI-driven ChatGPT Solutions. *Environmental Challenges*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100782>
- Gabr, M., Al-Ansari, N., Salem, A., & Awad, A. (2023). Proposing a Wetland-Based Economic Approach for Wastewater Treatment in Arid Regions as an Alternative Irrigation Water Source. *Hydrology*, 10(1), 20. <https://doi.org/10.3390/hydrology10010020>
- Gao, Y., Xie, Y., Zhang, Q., Wang, A., Yu, Y., & Yang, L. (2017). Intensified nitrate and phosphorus removal in an electrolysis -integrated horizontal subsurface-flow constructed wetland. *Water Research*, 108, 39-45. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.10.033>.
- García-Herrero, L., Lavrnić, S., Guerrieri, V., Toscano, A., Milani, M., Cirelli, G., & Vittuari, M. (2022). Cost-benefit of green infrastructures for water management: A sustainability assessment of full-scale constructed wetlands in Northern and Southern Italy. *Ecological Engineering*, 185. 106797. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106797>
- Ghosh, D., & Gopal, B. (2010). Effect of hydraulic retention time on the treatment of secondary effluent in a subsurface flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 36, 1044-1051. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2010.04.017>
- Gorgoglione, A., & Torretta, V. (2018). Sustainable Management and Successful Application of Constructed Wetlands: A Critical Review. *Sustainability*, 10 (11), 3910. <https://doi.org/10.3390/SU10113910>
- Kataki, S., Chatterjee, S., Vairale, M., Dwivedi, S., & Gupta, D. (2021). Constructed wetland, an eco-technology for wastewater treatment: A review on types of wastewater treated and components of the technology (macrophyte, biofilm and substrate). *Journal of environmental management*, 283, 111986. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111986>

- Khalifa, M., El-Reash, Y., Ahmed, M., & Rizk, F. (2020). Effect of media variation on the removal efficiency of pollutants from domestic wastewater in constructed wetland systems. *Ecological Engineering*, 143, 105668. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105668>
- Kumar, S., & Dutta, V. (2019). Constructed wetland microcosms as sustainable technology for domestic wastewater treatment: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 11662-11673. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04816-9>
- Lomeli, J., Zamora-Castro, S., Zamora-Lobato, T., Sandoval-Herazo, E., Adame-García, J., Zurita, F., Monroy-Pineda, M., Aguilar-Cortés, G., Rivera, S., & Sandoval-Herazo, M. (2025). Performance of Large-Scale Ornamental Wetlands for Municipal Wastewater Treatment: A Case Study in a Polluted Estuary in the Gulf of Mexico. *Sustainability* 17(5), 2120. <https://doi.org/10.3390/su17052120>
- Lestari, A., & Widiasta, N. (2025). Application of Vertical Flow Constructed Wetland for Organic Pollutant Removal from Petroleum Refinery Wastewater. *Reaktor* 24(2), pp. 68-75. <https://doi.org/10.14710/reaktor.24.2.68-75>
- Li, L., Feng, J., Zhang, L., Yin, H., Fan, C., Wang, Z., Zhao, M., Ge, C., & Song, H. (2021). Enhanced nitrogen and phosphorus removal by natural pyrite-based constructed wetland with intermittent aeration. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 69012-69028. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15461-6>
- Marín-Muñiz, J. L. (2018). Humedales construidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reusó del agua. *Agro Productividad*, 10(5). <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/1028>
- Memarian, B., & Doleck, T. (2023). ChatGPT in education: Methods, potentials and limitations. *Computers in Human Behavior: Artificial Humans* 1(2), 100022. <https://doi.org/10.1016/j.chbah.2023.100022>

- Morandi, C., Schreiner, G., Moosmann, P., & Steinmetz, H. (2021). Elevated Vertical-Flow Constructed Wetlands for Light Greywater Treatment. *Water*, 13(18), 2510. <https://doi.org/10.3390/w13182510>
- Moreira, F., & Dias, E. (2020). Constructed wetlands applied in rural sanitation: a review. *Environmental Research*, 190, 110016. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110016>
- Nourozi, A., Naeeni, S., & Akbari, Z. (2023). Application of hybrid vertical flow constructed wetland systems to treatment of greywater for their use to irrigation in rural areas. *Journal of Cleaner Production*, 412, 137368. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137368>.
- OpenAI. (2024). *GPT-4o* [Modelo de lenguaje de gran escala]. <https://openai.com/chatgpt>
- Saeed, T., & Sun, G. (2017). A comprehensive review on nutrients and organics removal from different wastewaters employing subsurface flow constructed wetlands. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47, 203 - 288. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1318615>.
- Salem, M., Gabr, M., Mossad, M., & Mahanna, H. (2022). Random Forest modelling and evaluation of the performance of a full-scale subsurface constructed wetland plant in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal* 13(6), 101778. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101778>
- Sandoval-Herazo, L. C., Alvarado-Lassman, A., Marín-Muñiz, J. L., Méndez-Contreras, J. M., & Zamora-Castro, S. A. (2018). Effects of the Use of Ornamental Plants and Different Substrates in the Removal of Wastewater Pollutants through Microcosms of Constructed Wetlands. *Sustainability*, 10(5), 1594. <https://doi.org/10.3390/su10051594>
- Stefanakis, A. (2016). Constructed Wetlands: Description and benefits of an Eco-Tech water treatment system. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-9559-7.ch012>
- Taha, S. Y., Almansoori, A. F., Al-Baldawi, I. A., Abdullah, S. R. S., Ismail, N. I., Hazaimah, M., & Sharuddin, S. S. N. (2023). Hybrid constructed wetland for treatment of power plant effluent polluted with hydrocarbons. *Journal of Water Process Engineering*, 56, 104372. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104372>

- Vymazal, J., Sochacki, A., Fučík, P., Seres, M., Kaplická, M., Hnátková, T., & Chen, Z. (2020). Constructed wetlands with subsurface flow for nitrogen removal from tile drainage. *Ecological Engineering*, 155, 105943. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105943>
- Waly, M., Ahmed, T., Abunada, Z., Mickovski, S., & Thomson, C. (2022). Constructed Wetland for Sustainable and Low-Cost Wastewater Treatment: Review Article. *Land*, 11(9), 1388. <https://doi.org/10.3390/land11091388>
- Walton, W., Duguma, D., Tao, M., Popko, D., & Nygren, S. (2016). Integrated Mosquito Management in Experimental Constructed Wetlands: Efficacy of Small-Stature Macrophytes and Fluctuating Hydroperiod. *Water*, 8, 421. <https://doi.org/10.3390/W8100421>
- Wang, R., Xu, L., Xu, X., Xu, Z., Zhang, X., Cong, X., & Tong, K. (2021). Hydraulic characteristics of small-scale constructed wetland based on residence time distribution. *Environmental Technology*, 44, 1061 - 1070. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1994018>
- Wu, H., Wang, R., Yan, P., Wu, S., Chen, Z., Zhao, Y., Cheng, C., Hu, Z., Zhuang, L., Guo, Z., Xie, H., & Zhang, J. (2023). Constructed wetlands for pollution control. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4, 218 - 234. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00395-z>
- Zamora-Castro, S. A., González-Moreno, H. R., Hernández-Orduña, M. G., Zitácuaro-Contreras, I., & Marín-Muñiz, J. L. (2025). Environmental Assessment of a Constructed Wetland with Ornamental Vegetation for Wastewater Treatment: A Sustainable Option for Neighborhoods (The Case of Veracruz, Mexico). *World*, 6(2), 50. <https://doi.org/10.3390/world6020050>
- Zhang, D., Jinadasa, K., Gersberg, R., Liu, Y., Tan, S., & Ng, W. (2015). Application of constructed wetlands for wastewater treatment in tropical and subtropical regions (2000-2013). *Journal of Environmental Sciences*, 30, 30-46. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.10.013>