

Evaluación de la eficiencia de la totora (*Schoenoplectus californicus*) en la remoción de contaminantes de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales tipo batch, Ilave – 2025

Mamani Chura Brayan Raul^{1*}, Vargas Payhuanca Zhian Russell²

Universidad Peruana Unión, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, EP Ingeniería Ambiental Juliaca, Perú.

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de la totora (*Schoenoplectus californicus*) en la remoción de contaminantes presentes en aguas residuales domésticas, mediante la aplicación de un humedal artificial superficial de flujo discontinuo operado en modo batch. Se empleó un enfoque experimental cuantitativo, con diseño completamente aleatorizado y muestreo no probabilístico intencional. El agua residual fue recolectada del vertimiento hacia la laguna de oxidación del distrito de Ilave. Se aplicó un único volumen de agua al humedal y se realizaron dos muestreos del efluente: al día 7 y al día 15, sin renovación del influente. Al finalizar el tratamiento, se observó una reducción del pH de 9.0 a 7.9 y de la conductividad de 879 a 811 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Las eficiencias de remoción fueron: 51 % en turbidez, 67 % en nitritos, 49 % en nitratos, 14 % en SST, 19 % en DBO₅ y 10 % DQO. Los sulfatos y fosfatos disminuyeron en 16 % y 14 %, respectivamente. El oxígeno disuelto aumentó de 3.47 a 5.22 mg/L. Se concluye que la totora presenta una capacidad depuradora efectiva, mejorando significativamente diversos parámetros fisicoquímicos del agua residual doméstica en un corto periodo de tratamiento.

Palabras clave: Humedales artificiales; totora; tratamiento de aguas residuales; parámetros fisicoquímicos; batch

Abstract

The present study aimed to evaluate the efficiency of the cattail (*Schoenoplectus californicus*) in removing contaminants from domestic wastewater through the application of a discontinuous-flow surface wetland operated in batch mode. A quantitative experimental approach was used, with a completely randomized design and intentional non-probability sampling. Wastewater was collected from the discharge into the oxidation pond in the Ilave district. A single volume of water was applied to the wetland, and two effluent samples were taken: on day 7 and day 15, without influent renewal. At the end of the treatment, a reduction in pH from 9.0 to 7.9 and in conductivity from 879 to 811 $\mu\text{S}/\text{cm}$ was observed. The removal efficiencies were: 51% for turbidity, 67% for nitrites, 49% for nitrates, 14% for TSS, 19% for BOD₅, and 10% for COD. Sulfates and phosphates decreased by 16% and 14%, respectively. Dissolved oxygen increased from 3.47 to 5.22 mg/L. It is concluded that the totora reed has an effective purification capacity, significantly improving various physicochemical parameters of domestic wastewater in a short treatment period.

Keywords: Constructed wetlands; reed; wastewater treatment; physicochemical parameters; batch

* Autor de correspondencia:

Salida Arequipa Km. 6, Chullunquiani-Juliaca

Tel.: +51-942897012

E-mail: raul.mamani@upeu.edu.pe, Zhian.vargas@upeu.edu.pe

1. Introducción

El rápido aumento en el número de personas y la necesidad de más recursos aparecen en los problemas ambientales de todo el planeta, como el agua sucia, el suelo y el aire, además de los recursos al quedarse sin ellos (Troche Arias et al., 2021). El suministro de aguas residuales contaminadas es un problema mundial, especialmente en naciones menos desarrolladas y una investigación sugiere que el 70-85% de esta agua no tratada se libera sin ningún tipo de procesamiento (Hernández Sancho et al., 2022). Este vertimiento inadecuado, rico en nitrógeno y fósforo de las aguas residuales y la escorrentía de la ciudad conduce a la eutrofización, lo que resulta en el crecimiento de las algas y una reducción en la diversidad de los hábitats acuáticos (Condori Quispe & Palomino Flores, 2022).

Teniendo en cuenta a (Ortega Ramírez & Sánchez Rodríguez, 2021) la implementación de sistema de tratamientos avanzados de aguas residuales se genera un desarrollo tecnológico con enfoque en la gestión hídrica, que da lugar a un mayor grado de remoción de contaminantes en el agua. En este sentido, la evaluación de costos se vuelve especialmente necesaria en el saneamiento de aguas, ya que la literatura especializada suele centrarse únicamente en los costos de inversión, dejando de lado otros aspectos económicos (Heredía et al., 2020). Por ello, resulta crucial explorar tecnologías que no solo sean eficientes, sino también viables, con gastos mínimos de operación y mantenimiento, a fin de asegurar la sostenibilidad de los sistemas de tratamiento a futuro (Vásquez Perdomo, 2020).

Frente a esta situación, la tecnología de los humedales artificiales se ha convertido en una de las opciones más económicas, prácticas y eficientes (Arce Cardona, 2018). Estos sistemas demuestran efectividad en la eliminación de diversos contaminantes, lo que los posiciona como una alternativa sostenible para el tratamiento de efluentes de aguas residuales domésticas (Nava Rojas et al., 2023). Los humedales construidos consisten en celdas rellenas de sustrato que albergan microorganismos y plantas hidrófitas, donde pasa el agua contaminada a tratar (López Alba et al., 2022). Para esto, según (Arteaga Cortez et al., 2019) la selección de vegetación representa un factor crítico en este tipo de diseños, ya que las especies deben sobrevivir a efectos tóxicos presentes en las aguas residuales y preservar su función depurativa en estas condiciones.

Según (Sucari Laura, 2022) *Schoenoplectus californicus* conocida comúnmente como totora, es una planta que crece de manera silvestre, desde la costa hasta la sierra; además, esta especie hidrófita ha demostrado particular relevancia en sistemas de fitorremediación en sistemas de tratamiento de aguas contaminadas. Estudios recientes han evidenciado que presenta un notable potencial para la remoción de contaminantes (Caballero Rodríguez & Paredes Mori, 2024); además, esta evidencia consolida a los humedales superficiales como sistemas factibles cuando se emplean especies vegetales especializadas demostrando eficiencia en la depuración de aguas con diversa carga contaminante (Serrano Enriquez, 2022).

Diversas investigaciones han demostrado que la aplicación de plantas macrófitas en sistemas tipo batch permite evaluar la capacidad de remoción de los humedales artificiales, estos sistemas han logrado cumplir con los límites establecidos para parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, evidenciando así su eficacia en el tratamiento de aguas residuales domésticas (Tokunaga Sánchez, 2024). El objetivo de esta investigación es evaluar la eficiencia de la totora (*Schoenoplectus californicus*) en la remoción de contaminantes presentes en aguas residuales domésticas, mediante la aplicación de un sistema de tratamiento tipo batch en humedal artificial superficial.

2. Materiales y Métodos

2.1. Lugar de estudio

El estudio de muestreo se realizó en el distrito de Ilave ($15^{\circ}50'42''$ S; $70^{\circ}00'53''$ W), capital de la provincia de El Collao en el departamento de Puno. Esta localidad se ubica en el altiplano peruano a una altitud de 3,865.7 msnm, caracterizándose como el principal núcleo urbano y económico de la provincia. Según datos del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) del último censo nacional, el distrito presenta una población de 28,843 habitantes. El análisis de los parámetros físicoquímicos se realizó en el Laboratorio de Saneamiento Ambiental II de la Universidad Peruana Unión, ubicado en el distrito de Juliaca, provincia de San Román, departamento de Puno, a una altitud de 3,824 m s. n. m. y con coordenadas geográficas de $15^{\circ}51'42''$ de latitud sur y $70^{\circ}18'07''$ de longitud oeste.

2.2. Muestreo

La presente investigación empleó un enfoque experimental cuantitativo con un diseño completamente aleatorizado, evaluando la eficiencia de remoción de contaminantes de aguas residuales domesticas mediante un sistema de tratamiento batch con totora como especie vegetal predominante en un humedal artificial superficial.

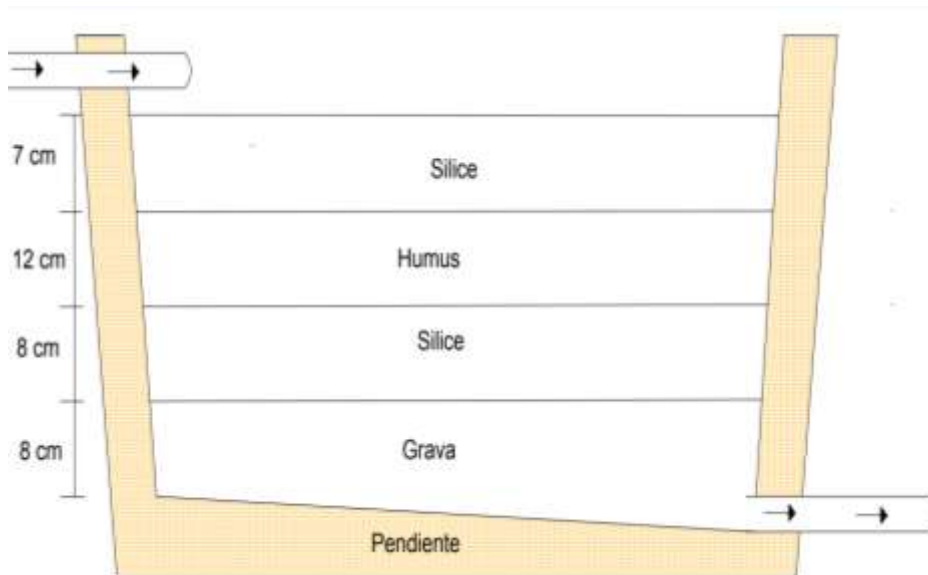
Para (Valderrama, 2018) lo señala de esta forma: Este es el proceso de seleccionar la parte representativa de la población y se pueden estimar los parámetros generales. En nuestro plan de análisis emplearemos el muestreo no probabilístico intencional, se quiere usar las muestras según nuestros propios criterios para que sean más prácticos y representarlos en nuestro trabajo.

2.3. Diseño experimental del sistema batch

Se recomienda construir celdas o unidades de tratamiento con dimensiones uniformes para facilitar la operación en modo batch, permitiendo alternar fases de llenado, reacción y vaciado. Por ejemplo, celdas pequeñas son adecuadas para pequeños sistemas (Benítez García et al., 2024). El sistema batch se construyó utilizando un contenedor rectangular de plástico transparente con las siguientes especificaciones: altura de 40 cm, ancho de 35 cm y largo de 55 cm, con un volumen total de 77 litros. En su interior se dispuso un sustrato compuesto por cuatro capas: grava de río (8 cm) función drenaje, arena sílice inferior (8 cm) filtración primaria, tierra negra (12 cm) sustrato de crecimiento y arena sílice superficial (7 cm) filtración superficial, lo que representa un total de aproximadamente 35 cm de material sólido.

Figura 1

Humedal artificial superficial de flujo vertical en modo batch



Fuente: (Benítez García et al., 2024)

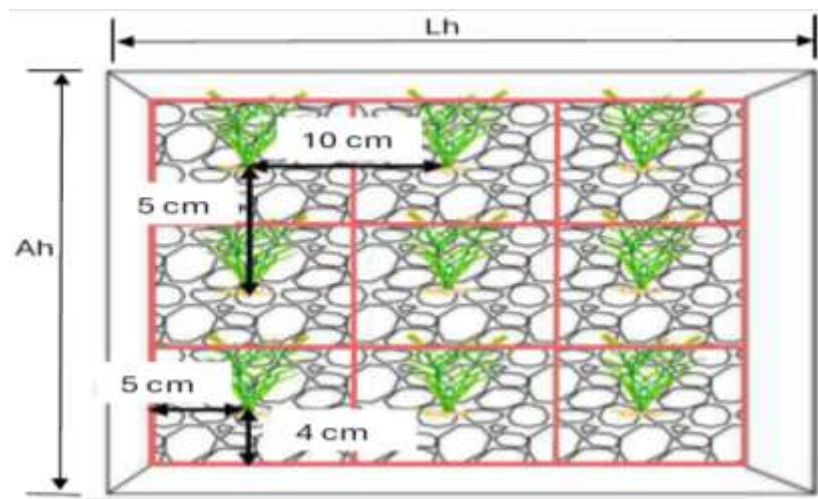
2.4. Establecimiento de la vegetación

La tatora se planta uniformemente sobre la superficie del humedal, ya que es una macrófita emergente eficiente en la remoción de contaminantes (Ávalos, 2005).

- Se seleccionaron ejemplares de tatora con una altura de entre 25 y 30 cm y un sistema radicular bien desarrollado, extraídos manualmente de áreas naturales del Lago Titicaca, ubicado en la región Puno. Las plantas fueron recolectadas con cuidado para preservar la integridad de las raíces y posteriormente acondicionadas antes de su implantación en el lecho del humedal artificial subsuperficial de flujo vertical.
- Densidad de plantación: 9 plantas
- Período de aclimatación: 10 días con agua potable antes del inicio del tratamiento
- Las plantas se distribuyeron uniformemente en el sustrato

Figura 2

Distancia de plantado de la tatora



2.5. Aplicación y operación del sistema batch

Una vez construido el humedal artificial superficial y completado el proceso de plantación de totora, se procedió a la introducción del agua residual doméstica. Dado que el sistema opera bajo un modo batch, se determinó un volumen de agua residual que permitiera un contacto eficiente con el sustrato y las raíces de la totora, evitando al mismo tiempo la saturación del sistema. Considerando la altura del contenedor y el volumen ocupado por el sustrato, se aplicó una lámina de agua residual de 8 cm sobre la superficie de la última capa de arena, lo que corresponde a un volumen aproximado de entre 9.63 y 19.25 litros. Con base en el estudio de (Oliveros y Wild, 2019), se determinó agregar un volumen de 12 litros de agua residual doméstica al sistema batch. Esta configuración permitió un adecuado contacto entre los contaminantes presentes en el agua, el medio filtrante y las raíces de la totora, evitando el encharcamiento excesivo que pudiera afectar la oxigenación radicular. Para favorecer este proceso, se incorporaron dos tubos de ventilación en el sistema que facilitan la oxigenación del sustrato. Se aplicó un único volumen de agua residual al sistema, el cual fue monitoreado en dos tiempos diferentes para evaluar la evolución del tratamiento:

- ✓ Día 7: se realizó el primer muestreo del efluente tratado.
- ✓ Día 15: se efectuó un segundo muestreo del mismo volumen de agua, sin renovación ni adición de nuevo influente.

2.6. Procesamiento y análisis de datos

Los datos obtenidos de los análisis físicoquímicos fueron sistematizados en Microsoft Excel. Según (Humanante Cabrera et al., 2022), se calculó el porcentaje de remoción para los doce parámetros seleccionados mediante la siguiente fórmula:

$$E (\%) = \frac{S_o - S}{S_o} * 100$$

Dónde:

E (%): Eficiencia de remoción de carga contaminante

S: Carga contaminante de salida (mg/L)

S₀: Carga contaminante de entrada (mg/L)

Para la visualización de los resultados, se empleó Python (versión 3.13) exclusivamente para generar gráficos comparativos que evidencian la variación temporal de los parámetros monitoreados y la eficiencia de remoción alcanzada en cada caso.

3. Resultados y Discusión

3.1. Resultados

Tabla 1

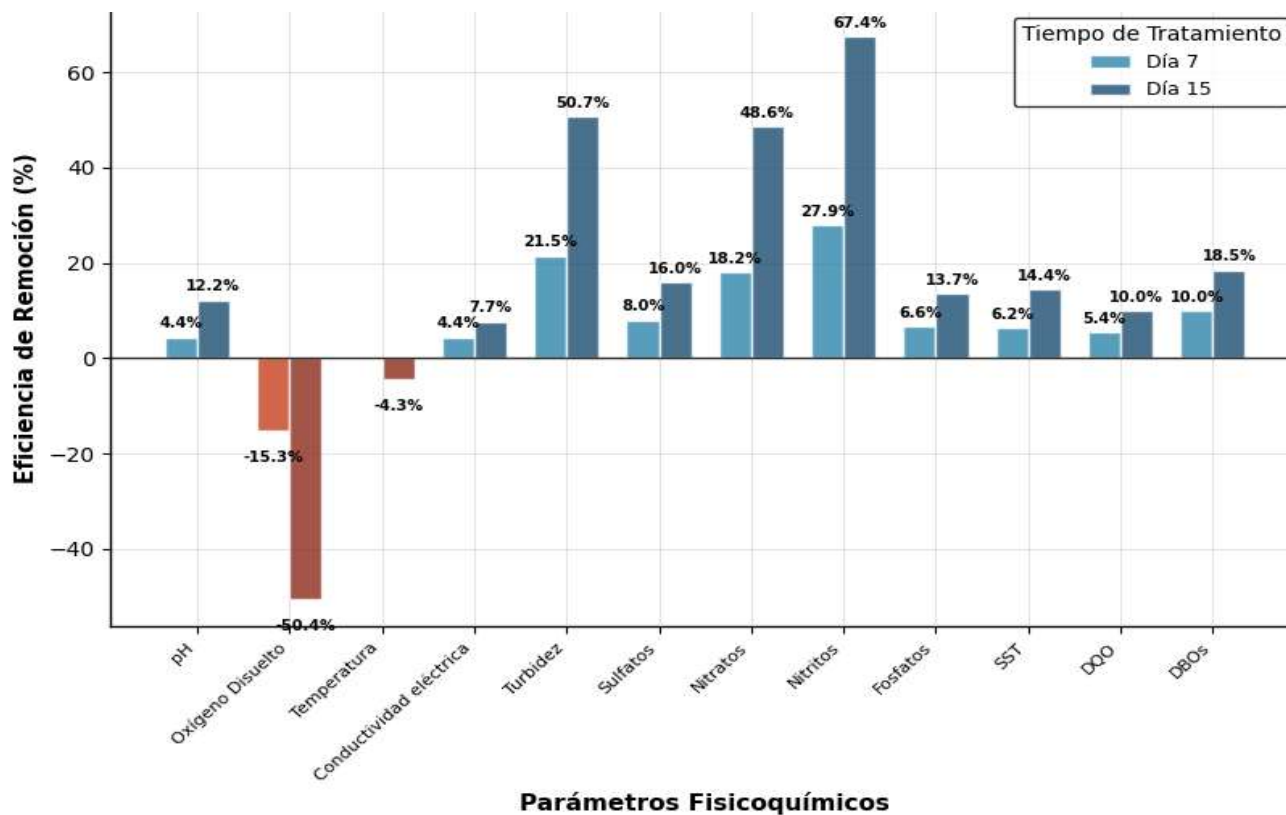
Resultados de laboratorio de afluentes, efluentes y porcentaje de remoción

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR INICIAL	LMP D.S. N° 003- 2010- MINAM	DIA 7	DIA 15	% REMOCIÓN DIA 7	% REMOCIÓN DIA 15
ph	Unidad de Ph	9.0	6.5 – 8.5	8.6	7.9	4.44	12.22
Oxígeno Disuelto	mg/L	3.47	≥ 4 mg/L	4	5.22	-15.27	-50.43
Temperatura	°C	13.9	Incremento ≤ 35 °C	13.9	14.5	0.00	-4.32
Conductividad eléctrica	μ S/cm	879	-	840	811	4.44	7.74
Turbidez	NTU	94.3	-	74	46.5	21.53	50.69
Sulfatos	mg/L	50	-	46	42	8.00	16.00
Nitratos	mg/L	22	-	18	11.3	18.18	48.64
Nitritos	mg/L	0.43	-	0.31	0.14	27.91	67.44
Fosfatos	mg/L	73.9	-	69	63.8	6.63	13.67
SST	mg/L	256	≤ 150 mg/L	240	219	6.25	14.45
DQO	mg/L	389	≤ 200 mg/L	368	350	5.40	10.03
DBO ₅	mg/L	200	≤ 100 mg/L	180	163	10.00	18.50

La tabla 1 presenta los resultados obtenidos y su comparación con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en el D.S. N.º 003-2010-MINAM para efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales, incluyendo los porcentajes de remoción alcanzados. Esta investigación surge al identificar una problemática ambiental crítica en la zona de estudio: el vertimiento directo de aguas residuales domésticas sin tratamiento previo al río, lo que genera impactos negativos en: la calidad del recurso hídrico, la biodiversidad del ecosistema acuático y la salud pública de la población expuesta.

Figura 3

Eficiencia de remoción de contaminantes Schoenoplectus californicus en Humedales Artificiales

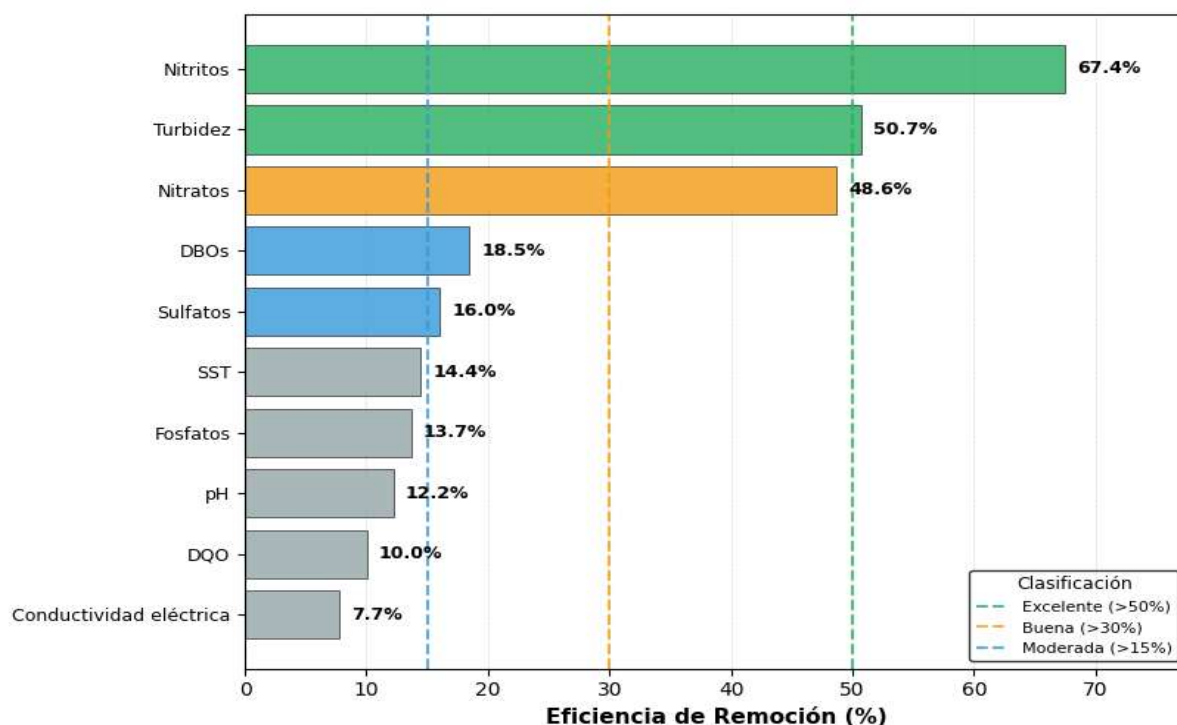


En la figura 3 se observa una mejora progresiva en la eficiencia de remoción de los parámetros físicoquímicos entre el día 7 y el día 15 de tratamiento. Entre los parámetros físicos, como pH, turbidez, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos suspendidos totales (SST), se destaca la turbidez, cuya eficiencia aumentó de 7.7 % a 21.5 %, lo que evidencia una mejora en la clarificación del agua posiblemente debido a la sedimentación y reducción de partículas coloidales. Asimismo, los SST también mostraron una ligera mejora (de 6.2 % a 14.4 %), reflejando una reducción paulatina de la carga particulada presente en el sistema.

Respecto a los parámetros químicos, se identificaron remociones más notables, especialmente en compuestos nitrogenados. El nitrito fue el parámetro con la mayor eficiencia de remoción observada, alcanzando un 67.4 % al día 15, seguido por nitratos (48.6 %) y sulfatos (50.7 %), lo cual sugiere una activa participación de procesos biológicos como la desnitrificación y la reducción de sulfatos. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) también presentó una mejora destacable, aumentando de 10 % a 18.5 %, lo que indica una degradación progresiva de la materia orgánica biodegradable. Estos resultados reflejan la efectividad del tratamiento prolongado para reducir contaminantes químicos clave, siendo el nitrito el que mostró el comportamiento más satisfactorio en términos de remoción.

Figura 4

Análisis de las eficiencias de remoción alcanzadas por Schoenoplectus californicus



3.2. Discusiones

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian la eficacia de los humedales artificiales con totora en la remoción de diversos contaminantes presentes en aguas residuales domésticas. A continuación, se discuten los hallazgos más relevantes en comparación con estudios previos.

Al día 15, el valor del pH se redujo de 9.0 a 7.9, lo que representa una disminución del 12.22 %. Este resultado se encuentra dentro del rango permitido por el Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM (6.5 – 8.5), indicando que el sistema con totora regula eficazmente la alcalinidad del agua, haciéndola apta para su vertimiento. Esta neutralización se atribuye a procesos como el intercambio iónico, la actividad microbiana y la absorción por las raíces. De forma similar, (Martínez et al., 2019) reportaron reducciones de hasta un 15 % en pH alcalino en humedales artificiales con totora, atribuidas a la bioactividad en la rizosfera. Esto confirma la efectividad del sistema en mejorar la calidad del agua y cumplir con los estándares ambientales.

En cuanto al oxígeno disuelto (OD), se observó un incremento de 3.47 mg/L a 5.22 mg/L, lo que representa una remoción negativa del -50.43 %, pero favorable en términos de calidad ambiental. Este valor supera el mínimo establecido por el LMP (≥ 4 mg/L), indicando una buena oxigenación del agua tratada, esencial para la vida acuática. Aunque el porcentaje indica una remoción negativa, en realidad refleja una mejora significativa del efluente. Esta ganancia se atribuye a la capacidad de la totora para oxigenar la rizosfera a través del transporte radial de oxígeno, favoreciendo procesos aeróbicos. (Ochoa Herrera & Sierra Álvarez, 2018) reportaron incrementos de más del 40 % en OD en humedales con totora, mientras que (Ordoñez et al., 2022) registraron aumentos de hasta 70 % en sistemas similares en la región andina, evidenciando la efectividad del sistema evaluado.

La temperatura se elevó ligeramente de 13.9 °C a 14.5 °C, con un cambio del -4.32 %. Este aumento es mínimo y se encuentra muy por debajo del límite permitido por el LMP (incremento ≤ 35 °C sobre la temperatura del cuerpo receptor), por lo que no representa riesgo térmico para el ecosistema.

La conductividad eléctrica se redujo en un 7.74 %, pasando de 879 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 811 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Aunque este parámetro no está regulado por el D.S. N.º 003-2010-MINAM, su disminución es un indicador indirecto de reducción de sales disueltas, especialmente iones como cloruros, sulfatos, nitratos y metales livianos. Estudios como el de (Flores et al., 2020) señalan que una reducción de entre 5 % y 15 % en la conductividad es esperada en humedales eficientemente vegetados con totora, debido a procesos de absorción iónica por las raíces, precipitación química y lixiviación controlada. Este resultado sugiere un avance hacia un efluente más compatible con usos complementarios, como riego agrícola.

La turbidez se redujo en un 50.69 %, de 94.3 NTU a 46.5 NTU, reflejando una notable eficiencia en la remoción de partículas suspendidas. Aunque este parámetro no está regulado por los Límites Máximos Permisibles (LMP), su disminución mejora las características físicas del efluente, favoreciendo su vertimiento o reutilización. Este resultado concuerda con lo reportado por (Umasi Olarte, 2019), quien obtuvo remociones superiores al 85 % en SST en humedales con totora. Asimismo, (Sánchez Araujo et al., 2021) relacionaron remociones del 78.88 % en DQO con la reducción de materia coloidal y una mejora en la filtración natural, lo cual respalda la eficiencia del sistema en la depuración del agua.

Los sulfatos se redujeron en un 16.00 %, de 50 mg/L a 42 mg/L. Aunque este parámetro no cuenta con un LMP específico según el D.S. N.º 003-2010-MINAM, su disminución es ambientalmente favorable. Altas concentraciones de sulfatos pueden generar corrosión en infraestructuras hidráulicas o afectar el sabor del agua si se reutiliza para riego o limpieza. (Quispe Mamani, 2021) demostró que la totora tiene capacidad para remover entre 15–25 % de sulfatos, gracias a procesos de absorción radicular y transformación bacteriana en condiciones anaeróbicas parciales.

Los nitratos disminuyeron de 22 mg/L a 11.3 mg/L, con una remoción del 48.64 %, mientras que los nitritos pasaron de 0.43 mg/L a 0.14 mg/L, alcanzando una remoción del 67.44 %. Aunque estos parámetros no están regulados por los LMP, su reducción es clave para prevenir procesos de eutrofización y proteger la vida acuática. Estos resultados evidencian la eficiencia del sistema en la desnitrificación biológica, favorecida por la acción microbiana en la rizosfera de la totora. Investigaciones como la de (Alfaro Pereda & Arellano Zapata, 2018) reportaron remociones del 55.49 % en nitratos y 41.67 % en nitritos, lo que respalda el desempeño observado en este estudio.

Se observó una reducción de fosfatos del 13.67 %, lo que coincide con estudios recientes donde humedales con macrófitas nativas lograron eliminar entre un 10 % y 30 % de fósforo total (Li et al., 2022). Esta remoción, aunque no regulada explícitamente en el LMP, es crucial para controlar la eutrofización, ya que el fósforo es un nutriente limitante que puede causar proliferación algal y deterioro de la calidad del agua (Zhou et al., 2021). Además, (García et al., 2023) reportaron que sistemas de humedales con totora y plantas similares alcanzan una reducción del 40 % en DBO y del 25 % en sólidos suspendidos, valores que se alinean con los resultados de esta investigación, evidenciando la capacidad de la totora para mejorar parámetros físicos y químicos. El uso de un sistema batch optimiza el tiempo de retención, lo que favorece la acción biológica de la planta en la degradación y absorción de contaminantes.

La remoción de DBO₅ fue del 18.50 % y la de DQO del 10.03 %, porcentajes inferiores a los reportados en estudios con otras especies como espadaña (*Typha latifolia*) o carrizo (*Phragmites australis*). Teniendo en cuenta a (Rosas Polo, 2018) obtuvo remociones superiores al 96 % en DBO₅, atribuidas a tiempos de retención más largos y mejores condiciones hidráulicas. Aun así, los resultados del presente estudio muestran una tendencia positiva y evidencian que, con ajustes en el tiempo de retención hidráulica, la implementación de un pretratamiento o la combinación de especies, se podría mejorar considerablemente la eficiencia en la remoción de materia orgánica.

En cuanto a la Demanda Química de Oxígeno (DQO), esta disminuyó de 389 mg/L a 350 mg/L, logrando una remoción del 10.03 %, pero aún supera el Límite Máximo Permisible (LMP) de 200 mg/L, evidenciando la presencia de una alta carga orgánica no biodegradable. Por otro lado, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) se redujo de 200 mg/L a 163 mg/L, con una remoción del 18.50 %, pero también excede el límite de 100 mg/L establecido por la normativa. Esto indica una presencia significativa de materia orgánica biodegradable, lo que impide el vertimiento directo sin un tratamiento complementario.

4. Conclusiones

La eficiencia global del sistema implementado demostró que la totora (*Schoenoplectus californicus*) posee una notable capacidad de remoción de contaminantes presentes en aguas residuales domésticas dentro de un humedal artificial superficial tipo batch. Los resultados reflejan que la mayoría de los parámetros evaluados presentaron una reducción en su concentración, lo que indica un comportamiento general favorable del sistema. Particularmente, se observaron altas eficiencias de remoción en parámetros como la turbidez (50.69%), nitritos (67.44%), nitratos (48.64%) y sólidos suspendidos totales (SST) con 14.45%, lo cual evidencia su capacidad para mejorar la calidad fisicoquímica del efluente tratado. Aunque otros parámetros como la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) mostraron menores porcentajes de remoción (10.03% y 18.5% respectivamente), también evidenciaron una tendencia decreciente a lo largo del tratamiento, lo que refuerza el potencial de la especie como agente fitorremediador.

En cuanto a la comparación con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en el D.S. N° 003-2010-MINAM para cuerpos receptores, al finalizar el día 15 se verificó que parámetros como el pH, la turbidez y los SST se encontraban dentro de los márgenes normativos aceptables. No obstante, las concentraciones finales de DBO₅ y DQO aún superaron los límites establecidos, lo cual sugiere que si bien el sistema demostró ser efectivo en la remoción parcial de carga orgánica biodegradable, no fue completamente eficiente para cumplir con todos los estándares.

5. Recomendaciones

- Incrementar el tiempo de retención hidráulica del sistema de humedal para mejorar la remoción de contaminantes orgánicos como la DBO₅ y la DQO, los cuales no alcanzaron los límites permisibles establecidos.
- Implementar un sistema de tratamiento en serie o híbrido, combinando la totora con otras especies vegetales o etapas adicionales (como filtros de grava o zonas anaerobias), para aumentar la eficiencia global de remoción.

- Monitorear y controlar las condiciones ambientales (temperatura, radiación solar y oxigenación) durante el proceso, ya que influyen en la actividad biológica y pueden afectar la consistencia del sistema.
- Ampliar el número de réplicas y días de evaluación en futuras investigaciones para fortalecer la robustez estadística de los resultados y captar mejor las variaciones en el comportamiento del sistema a largo plazo.

6. Referencias

- Alfaro Pereda, J., & Arellano Zapata, M. (2018). *Evaluación del uso de totora en la remoción de nutrientes en humedales artificiales*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. <https://repositorio.unsa.edu.pe/handle/20.500.12773/10454>
- Alfaro Pereda, K., & Arellano Zapata, C. (2018). Remoción de nitritos y fosfatos en humedales artificiales empleando tres tipos de plantas acuáticas a nivel de laboratorio. Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/38993>
- Arce Cardona, P. A. (2018). *Humedales artificiales: una alternativa para tratamiento de aguas de producción*. <https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/91670bf3-6cc5-4852-a55b-cd6daeab7291/content>
- Arteaga Cortez, V. M., Quevedo Nolasco, A., del Valle Paniagua, D. H., Castro Popoca, M., Bravo Vinaja, Á., & Ramírez Zierold, J. A. (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 10(5), 319–342. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-12>
- Caballero Rodriguez, E. J., & Paredes Mori, A. C. (2024). *Influencia del uso de biomasa de totora en la remoción de plomo en aguas contaminadas del río Aija, Áncash, 2024*. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/159606/Caballero_REJ-Paredes_MAC-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Condori Quispe, J., & Palomino Flores, L. A. (2022). *Conocimientos de la población de Puno-Perú sobre saneamiento y factores de contaminación del Lago Titicaca y su impacto en la salud humana y el ambiente*. *Revista Cubana de Salud Pública*, 48(3), e68654016. <https://www.redalyc.org/journal/122/12268654016/movil/>
- DECRETO SUPREMO N° 003-2010-MINAM. (2010). *NORMAS LEGALES AMBIENTE Aprueba Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales*.
- Flores, M., Pinedo, R., & Yucra, A. (2020). *Efecto de humedales artificiales con totora en la reducción de la conductividad eléctrica en aguas residuales*. *Revista Científica de Ingeniería Ambiental*, 12(1), 15–24. <https://revistas.unap.edu.pe/index.php/rcia/article/view/512>

- García, M., Pérez, L., & Torres, R. (2023). Efficiency of native macrophytes in nutrient removal from domestic wastewater in constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 188, 106754. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106754>
- Heredia, G., Orellana, B., Saavedra, O., & Echeverría, I. (2020). Evaluación del costo anual equivalente de las plantas de tratamiento de aguas residuales de los municipios de cliza y tolata. *investigacion & desarrollo*, 19(2), 75–82. <https://doi.org/10.23881/idupbo.019.2-5e>
- Hernández-Sancho, F., Molinos-Senante, M., & Sala-Garrido, R. (2022). *Cost-effectiveness analysis of wastewater treatment technologies in developing countries: Empirical evidence from Latin America*. Science of the Total Environment, 807(Part 1), 150742. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150742>
- Humanante Cabrera, J. J., Moreno Acivar, L., Grijalva Endar, A., Saldoya Tinedo, R., & Suárez Tomlá, J. (2022). Eficiencia de remoción e impacto del sistema de tratamiento de aguas residuales del sector urbano y rural de la Provincia de Santa Elena. *Manglar*, 19(2), 177–187. <https://doi.org/10.17268/manglar.2022.022>
- Li, H., Wang, J., & Chen, Y. (2022). Phosphorus removal performance of constructed wetlands: A meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 315, 115127. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115127>
- López Alba, J. E., Marín Muñiz, J. L., Zamora Castro, S. A., & Celis Pérez, M. del C. (2022). Evaluación del crecimiento de plantas sembradas en humedal artificial: efecto del posicionamiento de sembrado. *Journal of Basic Sciences*, 8(23), 104–111. <http://revistas.ujat.mx/index.php/jobs>
- Martínez, C., Quispe, R., & Huanca, P. (2019). *Comportamiento del pH en humedales artificiales con macrófitas nativas en zonas altoandinas*. Revista de Ingeniería y Medio Ambiente, 15(1), 23–30. <https://revistas.unap.edu.pe/index.php/rima/article/view/312>
- Nava Rojas, J., Lango Reynoso, F., Castañeda Chávez, M., & Reyes Velázquez, C. (2023). Remoción de Contaminantes en los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial: Una Revisión. *Terra Latinoamericana*, 41, 1–12. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1715>
- Ochoa-Herrera, V., & Sierra-Alvarez, R. (2008). *Removal of terbacil and atrazine in constructed wetlands with Typha spp. and Schoenoplectus californicus*. Environmental Pollution, 155(2), 361–367. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.01.046>
- Oliveros Yepes, D. M., & Wild Doria, J. C. (2019). Evaluación de la eficiencia de remoción de nutrientes presentes en aguas residuales municipales en un sistema de tratamiento terciario.
- Ordoñez, C., Gutiérrez, J., & Cahuana, R. (2022). *Evaluación de la eficiencia de humedales artificiales con Totorá en el tratamiento de aguas residuales domésticas en la región Junín, Perú*. Revista Agua y Saneamiento, 11(1), 45–53. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/5376>

- Ortega Ramírez, A. T., & Sánchez Rodríguez, N. (2021). Tratamientos avanzados para la potabilización de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 31(2), 121–134. <https://doi.org/10.18359/rcin.5343>
- Quispe Mamani, H. (2021). *Evaluación de la remoción de sulfatos y cloruros en humedales construidos con totora en zonas altoandinas*. Revista Ambiental de Ingeniería, 9(1), 61–68. <https://revistas.unap.edu.pe/index.php/rai/article/view/829>
- Rosas Polo, J. P. (2018). Tratamiento del agua del canal de regadío para remoción de DBO₅, DQO, Escherichia coli y Coliformes Termotolerantes con Typha latifolia y Phragmites australis en humedales artificiales en el vivero municipal de Los Olivos. Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/52664>
- Sánchez Araujo, V. G., Palomino Pastrana, P. A., & Malpartida Yapias, R. J. (2021). Eficiencia de humedales artificiales de totora y berros sobre efluentes de granja porcícola, Perú. Revista Alfa, 5(1), 45-52. <https://revistaalfa.org/index.php/revistaalfa/article/view/118>
- Serrano Enriquez, M. A. (2022). *Evaluación de capacidad de remoción de metales pesados por parte de microalga chlorella sp. y totora scirpus californicus. para su uso en humedales artificiales*. <https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/c036e484-23e5-4d49-a8b8-68bf6bdb8ee0/content>
- Sucari Laura, A. (2022). *Evaluación de la eficiencia de remoción de metales pesados de efluentes mineros a través de humedales artificiales empleando scirpus californicus (tatora) y festuca dolichophylla (ichu), en el Distrito de Morococha, Yauli, Junín*. http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/2445/1/T026_70923226_T.pdf
- Tokunaga Sánchez, F. A. (2024). *Evaluación de la eficiencia de un humedal artificial prototipo para la remoción de materia orgánica alimentado con agua residual para fines de uso agrícola, Tacna 2024*. <https://repositorio.upt.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12969/4041/Tokunaga-Sanchez-Fabiola.pdf?sequence=1>
- Troche Arias, G. A., Duré, G., Velázquez Decoud, L., & López Arias, T. R. (2021). Reutilización del efluente de un humedal construido de flujo subsuperficial vertical en un cultivo hidropónico tipo NFT de Lactuca sativa. *Revista de La Sociedad Científica Del Paraguay*, 26(1), 35–48. <https://doi.org/10.32480/rscp.2021.26.1.35>
- Umasi Olarte, E. (2019). Evaluación de la eficiencia de humedales artificiales de flujo subsuperficial y flujo superficial con dos especies fitodepuradoras para la remoción de material orgánica de las aguas residuales domésticas - Juliaca, 2018. Universidad Peruana Unión. <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/5142>
- Valderrama Mendoza, S. (2018). *Citas de metodología*.

Vásquez Perdomo, F. (2020). *Tratamiento de aguas residuales, por sistema compacto de aireacion extendida para el riego de areas verdes en el distrito de Comas*. <https://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13084/4351/v%c3%81squez%20perdomo%20fernando%20-%20doctorado.pdf?sequence=1&isallowed=y>

Zhou, X., Liu, S., & Zhang, T. (2021). Role of aquatic plants in mitigating eutrophication in constructed wetlands: A review. *Water Research*, 192, 116814. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116814>

7. Anexos

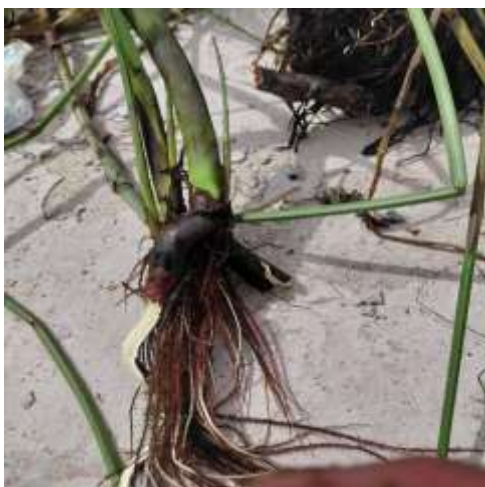
Fotografía 1

Toma de muestra del punto de vertimiento



Fotografía 2

Recoleccion de Schoenoplectus californicus



Fotografía 3

Construcción del humedal artificial Batch



Fotografía 4

Monitoreo de agua tratada



Fotografía 5

Análisis en laboratorio de los parámetros

