




Performance assessment of the of *Cyperus alternifolius* and *Chrysopogon zizanioides* in greywater treatment with artificial wetland

Juan Castillo Vargas, Bachelor in Environmental Engineering and Management¹, Janet Lianaje Arroyo, Bachelor in Environmental Engineering and Management² and Anita Arrascue Lino, Master in Environmental Development³
^{1, 2, 3} Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú
u201915865@upc.edu.pe¹, u20181c567@upc.edu.pe², anita.arrascue@upc.edu.pe³

Abstract– In Peru, the discharge of wastewater is due to the lack of treatment and sewage infrastructure in various areas of the country, mainly in new human settlements resulting from the unplanned and disproportionate growth of Peruvian cities. Inside of city that constantly being impacted by the water that reaches its water mirrors, just due to the constant dumping of domestic wastewater mainly from the settlements located in the buffer zone. Therefore, we seek to improve the quality of the water of these canals using of horizontal flow subsurface wetlands using *Chrysopogon zizanioides* and *Cyperus alternifolius* species. We evaluated the removal of different parameters such as BOD5, turbidity and thermotolerant coliforms (TC). We found that the removal percentages for BOD5 were 66.87% for *Cyperus alternifolius* and 62.84% for *Chrysopogon zizanioides*. TC removal was 99.08% (*Chrysopogon zizanioides*) and 98.43% (*Cyperus alternifolius*) and to turbidity, both species reached high removals, up to 99.18%.

Keywords– Artificial wetlands, sewage, pollutants, macrophyte species

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Evaluación del desempeño de las especies *Cyperus alternifolius* y *Chrysopogon zizanioides* en la depuración de aguas grises mediante humedales artificiales

Juan Castillo Vargas, Bachiller en Ingeniería y Gestión Ambiental¹, Janet Lianaje Arroyo, Bachiller en Ingeniería y Gestión Ambiental² y Anita Arrascue Lino, Magíster en Desarrollo Ambiental³

^{1,2,3} Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú
u201915865@upc.edu.pe¹, u20181c567@upc.edu.pe², anita.arrascue@upc.pe³

Resumen: En el Perú el vertimiento de las aguas residuales se debe a la falta de infraestructura de tratamiento y alcantarillado en diversas zonas del país, principalmente en los nuevos asentamientos humanos producto de la expansión desordenada y sin planificación de las ciudades del Perú. En esta investigación abordamos el problema que atraviesa el Refugio de Vida Silvestre Pantanos de Villa, el cual está siendo constantemente impactado por las aguas contaminadas que llegan de manera constante a los espejos de agua natural, debido al vertimiento de aguas residuales domésticas en los canales de este espacio natural provenientes principalmente de los asentamientos ubicados en la zona de amortiguamiento, y de las múltiples actividades que estos desarrollan. Es por ello, que buscamos mejorar la calidad del agua que circula por estos canales mediante el uso de humedales subsuperficiales de flujo horizontal utilizando las especies *Chrysopogon zizanioides* y *Cyperus alternifolius*, para ello evaluamos la remoción de diferentes parámetros como el DBO₅, la turbiedad y los coliformes termotolerantes (CT). Encontramos que los porcentajes de remoción para DBO₅ fueron del 66.87% para *Cyperus alternifolius* y 62.84% para *Chrysopogon zizanioides*, mientras que la remoción de CT fue del 99.08% (*Chrysopogon zizanioides*) y 98.43% (*Cyperus alternifolius*) y con relación a la turbiedad, ambas especies alcanzaron altas remociones, de hasta el 99.18%.

Palabras clave: Humedales artificiales, aguas residuales, canales de agua, especies macrófitas

I. INTRODUCCIÓN

En el mundo, la contaminación de las fuentes de agua superficial es uno de los problemas ambientales más persistentes de los últimos tiempos, siendo los cauces de ríos los principales receptores de la contaminación antropogénica. Se estima que el 80% de la contaminación para América Latina, Asia y África corresponde a la descarga de aguas residuales domésticas e industriales, sin tratamiento previo, en ríos de la región [1].

Según el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos del 2017, los países con economías desarrolladas, tratan alrededor del 70% de sus aguas residuales, mientras que los países catalogados con un

desarrollo medio a bajo, entre los cuales se encuentra el Perú, el promedio se reduce al 28% y, finalmente, los países en vías de desarrollo sólo tratan el 8% de sus aguas residuales. Estas aproximaciones reafirman que, a nivel mundial, no menos del 80% de las aguas residuales generadas a nivel mundial pasan por un tratamiento adecuado antes de su vertimiento final, generalmente a cuerpos de agua superficiales [1].

En el Perú, aproximadamente, se generan 2 217 946 m³ de agua residuales por día, es decir, 142 litros por habitante. De este volumen, solo el 32% reciben un correcto tratamiento antes de ser vertido a un cuerpo de agua natural [2]. Lima, es un claro reflejo de lo que se observa a nivel nacional, ya que es el departamento con el mayor volumen de vertimiento de aguas residuales industriales sin tratamiento, alcanzando los 861 millones de metros cúbicos. Lima Metropolitana genera una cantidad diaria de 1 202 286 m³ de aguas residuales. Sin embargo, solo se trata el 21.2% de este volumen [3].

Para las ciudades costeras como Lima, los cuerpos de agua más afectados por esta problemática son los humedales costeros, los cuales son espacios geográficos con alta cobertura vegetal en zonas desérticas, cuya formación surge debido al afloramiento de aguas subterráneas hacia la superficie. Estos humedales suelen encontrarse en áreas de altitud muy baja y están localizadas típicamente próximos al mar [4].

Los humedales pueden ofrecer servicios ecosistémicos de manera más eficaz y sostenible que las infraestructuras alternativas construidas por el hombre, lo que los convierte en una inversión valiosa para la gestión del agua y de las aguas residuales. Su restauración ya está en la vanguardia de la restauración de ecosistemas en muchos países, especialmente debido a sus funciones hidrológicas claves, como la depuración de recursos hídrico [5].

Uno de estos espacios naturales es el “Refugio de Vida Silvestre Los Pantanos de Villa”, ubicado en el litoral costero del distrito de Chorrillos, Lima. (Figura 1). El área total de la zona es de 263,27 hectáreas y está conformada por cinco cuerpos de agua, los cuales son abastecidos constantemente por fuentes naturales y canales situados en la parte más baja

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

del valle. La red de canales abastecedores de agua se encuentra actualmente en un estado crítico; ya que diariamente se vierten en su curso litros de efluentes domésticos, comerciales, de lavanderías, etc., lo cual provoca el deterioro de la calidad de sus aguas. Este humedal es de vital importancia para la ciudad, por su funcionalidad como ecosistema, por su ubicación dentro de un espacio urbano (es uno de los pocos espacios públicos y naturales de la ciudad) y por la conservación y servicios que brinda a la ciudad (aprovechamiento de sus recursos, turismo, entre otros) [6].

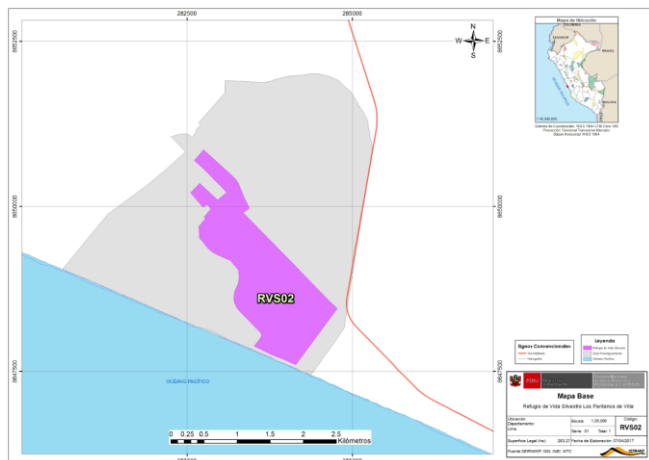


Fig.1 Ubicación del Refugio de Vida Silvestre Los Pantanos de Villa [7].

El estudio [8] registró un valor de C.E (uS/cm) de 7220 en los canales naturales del humedal, valor que supera el ECA4¹ (lagos y lagunas) el cual debería ser de 1000 C.E (uS/cm). Así mismo, el valor de Oxígeno Disuelto (OD) fue de 2.9 (mg/L), el ECA4 establece como valor máximo ≥ 5 (mg/L). Ante esta situación, surge la necesidad de implementar medidas que contribuyan a mitigar este problema. Sin embargo, debido a que la mayoría de las plantas convencionales presentan altos costes de mantenimiento y construcción, el uso de humedales artificiales se ha convertido en una alternativa eficiente para el tratamiento de aguas residuales [9].

Un humedal artificial es un sistema diseñado para imitar los procesos naturales que ocurren en los humedales naturales, y están siendo utilizados ampliamente para el tratamiento de las aguas residuales. Estos sistemas se componen típicamente de una serie de zonas inundadas con agua que contienen plantas, sustratos y microorganismos que ayudan a remover diferentes contaminantes del agua [10]. Los humedales artificiales se utilizan para tratar una variedad de fuentes de aguas residuales, incluyendo las domésticas, industriales y aguas de escorrentía urbana. A través de diferentes procesos

¹ De acuerdo con la normativa del Perú, los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) son indicadores de la calidad de los diferentes cuerpos de agua, los cuales establecen la concentración máxima de diferentes sustancias, que al sobrepasarse pueden afectar significativamente a la salud humana y de los ecosistemas.

como la filtración biológica, la absorción de nutrientes y la sedimentación. Los humedales artificiales han demostrado que pueden reducir la cantidad de nutrientes y contaminantes de las aguas contaminadas [11].

Existen dos categorías principales de humedales artificiales: los sistemas de flujo superficial (SF) y los sistemas de flujo subsuperficial (SSF), ambos utilizados para reducir múltiples contaminantes [12]. Los humedales de flujo superficial son a la vez de flujo libre y son ampliamente empleados en el tratamiento de aguas residuales y aguas pluviales, mientras que los humedales de flujo subsuperficial utilizan métodos que favorecen el crecimiento de las plantas y permiten que las aguas residuales fluyan a través del sustrato de manera natural, ya sea horizontal o verticalmente [10]. Los humedales de flujo vertical consisten en una capa plana de arena o grava cubierta con vegetación y más arena o grava. Las aguas residuales se vierten en la parte superior y se filtran a través del lecho para ser posteriormente recolectadas mediante una red de drenaje ubicada en la base. El líquido fluye lentamente hacia abajo a través del lecho y se recoge en la red de drenaje situada en la base [13]. Por otro lado, generalmente el diseño de los humedales de flujo horizontal implica una cama rectangular que está sembrada con plantas acuáticas grandes y recubierta por una membrana impermeable [11]. Las aguas residuales que ya han sido pretratadas mecánicamente se introducen en la entrada y fluyen lentamente a través de un medio de filtración ubicado debajo de la superficie de la cama en un trayecto más o menos horizontal, hasta que alcanzan la zona de salida (Figura 2) [11]

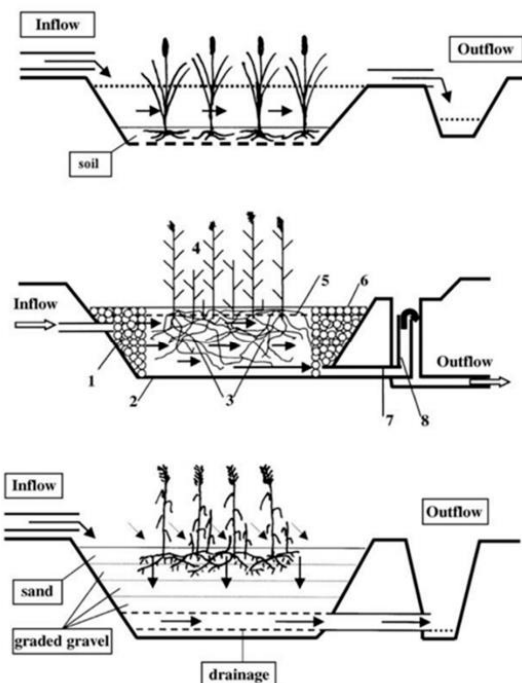


Fig. 2 De arriba abajo, humedal artificial superficial de flujo libre, humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal y humedal artificial de flujo subsuperficial vertical [14].

La referencia [15] evaluó el rendimiento general de la tecnología de fitorremediación bajo un sistema piloto de lecho plantado con dos plantas nativas de Malasia, *Lepironia articulata* y *Scirpus grossus*, para el tratamiento de aguas residuales domésticas. En el estudio obtuvieron grandes porcentajes de remoción de sólidos suspendidos, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), fosfatos y amonio. En otra investigación [16], se comparó la capacidad de purificación de aguas residuales domésticas de dos especies macrófitas emergentes en humedales de flujo vertical subsuperficial (*Cyperus Papyrus* y *Pragmatia Australis*), para ello construyeron dos humedales a escala piloto rellenos con grava y arena sílice de diferente granulometría, con lo cual se lograron niveles de remoción de hasta 98% en algunos de los mismos parámetros descritos en el estudio [15].

Por ello, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el desempeño de un sistema modular de humedales artificiales a escala piloto utilizando las especies *Cyperus alternifolius* y *Chrysopogon zizanioides* en la depuración de las aguas contaminadas procedentes del canal Ganaderos, un afluente importante de la red de lagunas de la Reserva de Vida Silvestre Los Pantanos de Villa (ZRE). Para lo cual primero realizamos la caracterización de la calidad del agua superficial del canal Ganaderos ubicado en la zona de amortiguamiento de la ZRE, lo cual nos permitió determinar el porcentaje de remoción de contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos de estos humedales artificiales construidos con las especies *Cyperus alternifolius* y *Chrysopogon zizanioides*. También determinamos si la interacción entre el tiempo de retención hidráulica y el tipo de especie impacta en el porcentaje de remoción de sólidos disueltos (TDS), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Turbiedad y Coliformes Termotolerantes (CT).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño y construcción de los humedales modulares

Se construyeron tres módulos de humedales de flujo horizontal subsuperficial en las instalaciones de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas; de los cuales, dos fueron plantados con las especies *Cyperus alternifolius* (módulo 3) y *Chrysopogon zizanioides* (módulo 2), mientras que el otro módulo no fue plantado y cumplió la función de módulo de control (módulo 1). Los humedales construidos fueron de escala piloto con una longitud, ancho y profundidad de 0.8 m, 0.45 m, 0.50 m, respectivamente (Figura 3).

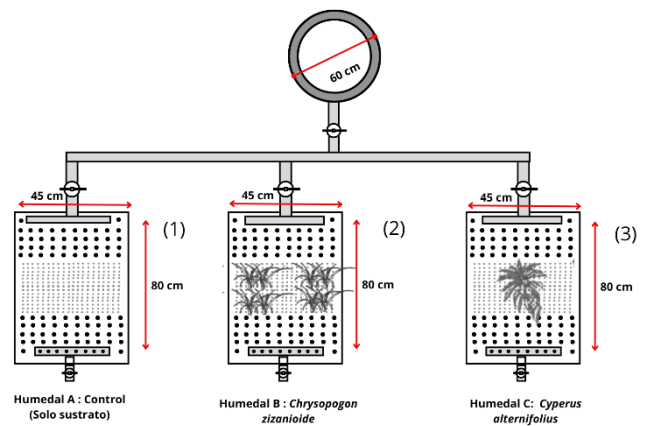


Fig. 3 Esquema de los módulos plantados y de control

Los módulos fueron llenados con sustrato de una composición diversa, el cual integra agregados de construcción como grava (6 – 7 mm), confitillo (4 – 5 mm) y por último se adicionó biocarbón como un biomaterial sugerido por otros autores por su alta retención de materia orgánica (Figura 4) [17], [18], [19].



Fig. 4 Vista de perfil de la composición del sustrato

[1] Características operacionales de los módulos

En primer lugar, se realizaron actividades de recolección y transporte de 200 litros de agua del canal hasta la universidad, a fin de alimentar el tanque de almacenamiento primario de 120 litros. Este tanque estuvo conectado a los tres módulos mediante tuberías de una pulgada (Figura 5). A partir de ello, cada humedal fue alimentado de manera discontinua con 40 litros del afluente mediante la apertura y cierre de válvulas. Se realizó este procedimiento con tiempos de retención (TRH) de 2 días, 4 días y 8 días.

Luego del tratamiento para los diferentes TRH indicados, se tomaron muestras mediante la descarga del efluente por grifos hacia vasos precipitados para su análisis fisicoquímico y microbiológico. Este ciclo de alimentación se repitió 27 veces, equivalente a un periodo de experimentación de 7 semanas.

[2] *Ubicación de puntos de muestreo y parámetros analizados.*

Durante el periodo de experimentación se recogieron muestras de agua a los 2, 4 y 8 días de tratamiento. Es por ello, que se definieron cuatro puntos de muestreo ubicados de la siguiente forma: Se establecieron los puntos P1, P2, P3 en la salida de cada sistema modular, mientras que se estableció el punto P4 en la zona de entrada del afluente (Figura 6). Para evaluar el desempeño de cada módulo se midieron parámetros fisicoquímicos en campo y en el laboratorio. En campo se midió la temperatura (T°), potencial de hidrógeno (pH), oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE), turbiedad y sólidos disueltos totales (TDS). Los parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y coliformes termotolerantes (CT), se determinaron en el laboratorio.



Fig. 5 Tanque de almacenamiento del agua contaminada.



Fig. 6 Imagen de los sistemas modulares y ubicación de los puntos de muestreo.

Recolección de datos

La recolección de los datos se realizó mediante el muestreo de agua y la medición de parámetros de la calidad del agua. Estas mediciones se realizaron en función al número de réplicas, las cuales fueron tres por cada periodo de tratamiento o TRH. En total se realizaron 27 corridas experimentales por lo tanto se recolectaron 108 datos. Para esto se utilizaron equipos portátiles de calidad de agua, los cuales generan datos para los parámetros en campo en unidades de concentración (Tabla 1). Por otro lado, se recolectaron las muestras de agua siguiendo los parámetros establecidos por el Protocolo Nacional para El Monitoreo de la Calidad del Agua de los Recursos Hídricos Superficiales [20]. Posteriormente se midieron los valores de DBO₅ en un laboratorio acreditado². Para la determinación de la carga microbiana se utilizó el método del Número Más Probable (NMP), o llamado también método de los tubos múltiples, el cual se llevó a cabo en el Laboratorio de Aguas y Energías Renovables de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas

Determinación del porcentaje de remoción

Para la determinación del porcentaje de remoción de los parámetros evaluados se utilizaron los datos de la concentración inicial y final de los contaminantes (luego del tratamiento) [21] [16]. Con ello se determinaron los porcentajes de remoción para cada contaminante priorizado por la investigación (DBO₅, TDS, CT y turbiedad) utilizando la siguiente ecuación: [22].

$$RE \% = \frac{Ci - Cf}{Ci} \times 100 \tag{1}$$

Análisis estadístico

Para el tratamiento estadístico de los resultados se realizó un análisis de varianza para cada una de las tasas de remoción de contaminantes (TDS, DBO₅, Turbiedad y CT). Se tuvo como referencia el modelo estadístico ANOVA de dos factores para demostrar la interacción entre los factores: tiempo de retención hidráulica y el tipo de módulo, y su influencia en las tasas de remoción. Este análisis se llevó a cabo con el software Minitab 20 con un nivel de confiabilidad del 95% y un nivel de significación del 5% (p=0.05).

² Las muestras de agua se enviaron al laboratorio acreditado Pacific Control S.A.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Mediciones de parámetros en el afluente y efluente

Los resultados de las mediciones efectuadas en cada periodo de tratamiento (2, 4 y 8 días) indicaron que el efluente tratado en los humedales plantados y de control, registró una temperatura de 21 °C a 23°C, aproximadamente (Tabla 1). Este parámetro es importante porque se relaciona con la disponibilidad de OD en el agua, pues los resultados obtenidos indican que se presenta reducción de oxígeno en el efluente respecto al afluente en todos los módulos. La reducción se debe a que dentro de un humedal ocurren reacciones químicas y biológicas que reducen el oxígeno y aumenta la temperatura del agua. Con tal de eliminar materia orgánica como DBO₅ y microorganismo como CT, es necesario el consumo de oxígeno. Se comprobó, que en los humedales horizontales plantados con *Chrysopogon zizanioides* ocurre una reducción similar debido al ecosistema biótico presente dentro de cada módulo [23].

Los valores de pH obtenidos (Tabla 1) durante el proceso tienden a ser neutros (7.03 - 7.57) con tendencias hacia un estado básico. Las fluctuaciones en el pH pueden ser explicadas por diferentes factores. Durante el día, tanto en la mañana como en la tarde, se genera amoníaco como resultado de la degradación de compuestos ricos en nitrógeno, lo que contribuye al incremento del pH [16]. En contraste, durante la noche, la liberación de dióxido de carbono provoca una disminución en este parámetro. Esto significa que el pH del efluente puede ser ácido durante las horas nocturnas y alcalino durante las diurnas. [24].

TABLA I
CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DEL AFLUENTE Y EFLUENTE EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

TRH	Parámetros	Unidades	Sistemas modulares						
			Control		<i>Chrysopogon zizanioides</i>		<i>Cyperus Alternifolius</i>		
			Afluente	Efluente	RE (%)	Efluente	RE (%)	Efluente	RE (%)
2 días	T*	C*	21.60	21.60	0.00%	21.63	-0.15%	21.60	0.00%
	pH	-	8.18	7.60	7.05%	7.53	7.87%	7.67	6.24%
	CE	mS/l	6.07	6.14	-1.04%	6.09	-0.22%	6.90	-13.61%
	TDS	ppt	4.07	3.21	21.21%	3.20	21.46%	3.62	10.95%
	OD	mg/l	10.90	8.84	18.95%	9.49	12.96%	11.66	-6.91%
	Turbidez	NTU	46.08	1.63	96.46%	1.24	97.32%	1.16	97.48%
	DBO	mg/l	15.33	10.40	32.17%	6.33	58.70%	6.43	58.04%
	CT	NMP/100ml	403.33	176.67	56.20%	21.33	94.71%	43.67	89.17%
	T*	C*	22.93	22.07	3.78%	22.13	3.49%	22.20	3.20%
	pH	-	8.31	7.73	6.98%	7.57	8.98%	7.47	10.18%
4 días	CE	mS/l	5.79	6.10	-5.47%	2.54	56.06%	5.17	10.72%
	TDS	ppt	4.04	3.19	21.11%	1.34	66.87%	1.50	62.84%
	OD	mg/l	10.00	6.63	33.64%	6.09	39.08%	9.75	2.50%
	Turbidez	NTU	119.70	1.80	98.50%	0.99	99.18%	1.51	98.74%
	DBO	mg/l	19.53	13.80	29.35%	9.10	53.41%	8.40	57.00%
	CT	NMP/100ml	603.33	44.60	92.61%	5.53	99.08%	9.47	98.43%
	T*	C*	21.93	21.80	0.61%	21.47	2.13%	21.53	1.82%
	pH	-	7.44	6.90	7.22%	7.03	5.42%	6.87	7.66%
	CE	mS/l	6.29	6.43	-2.28%	6.63	-5.46%	7.74	-23.17%
	TDS	ppt	4.27	3.29	23.13%	3.41	20.22%	3.27	23.52%
8 días	OD	mg/l	9.47	6.06	36.01%	7.47	21.12%	9.19	2.96%
	Turbidez	NTU	42.16	1.34	96.83%	1.61	96.17%	1.30	96.92%
	DBO	mg/l	13.57	10.33	23.83%	8.53	37.10%	5.53	59.21%
	CT	NMP/100ml	350.00	71.00	79.71%	17.37	95.04%	35.67	89.81%

Las mediciones de conductividad en los módulos (Tabla 1) presentaron porcentajes negativos lo cual evidencia un incremento de minerales, esencialmente sales disueltas desprendidas por el medio granular que es el sustrato. El sustrato compuesto por agregados de construcción contiene

impurezas como arena o triturados de roca, lo cuales contienen minerales que son lavados por el agua que fluye a través del sustrato. La investigación [16] obtuvo por su parte un porcentaje de reducción de la conductividad de 1,49% en plantas piloto de humedales de flujo vertical vegetados con la especie *Cyperus Papyrus*. Otros autores coinciden con los datos de nuestra investigación, pues los humedales no son buenos reductores de conductividad en el agua [25] [26].

Porcentajes de remoción de contaminantes

Los resultados de remoción de los sólidos disueltos totales (TDS) demuestran que, a los 4 días de tratamiento, los humedales plantados alcanzan remociones del 66.87% para *Chrysopogon zizanioides* y 62.84% para la especie *Cyperus alternifolius*, mientras que el humedal control llega al 21.11% de remoción (Figura 7). Estas tasas de remoción indican que los humedales artificiales plantados presentan un mejor rendimiento a los 4 días con respecto a la retención de los sólidos disueltos en el efluente. Otro estudio similar sometió al pasto Vetiver a experimentación mediante humedales de flujo vertical, donde se logró remover TDS, aunque tardó más de 12 días para poder obtener una reducción significativa [27]

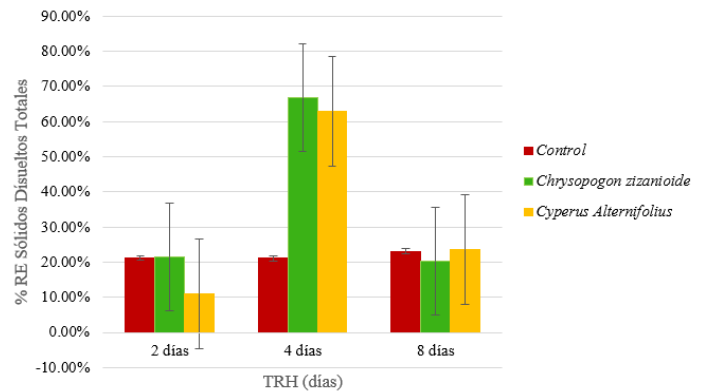


Fig. 7 Porcentaje de remoción de TDS

Con relación al DBO₅, los porcentajes de remoción más altos corresponden, de igual manera, a los humedales plantados, siendo el sistema con *Cyperus alternifolius* el que presenta una remoción de 59.21%, luego de 8 días de tratamiento (Figura 8). Esta especie ha alcanzado remociones de hasta 64.8% en humedales de flujo horizontal en un estudio realizado en Italia [26]. No obstante, el módulo con *Chrysopogon zizanioides* alcanzó una remoción de 58.70% a los 2 días, es decir, esta especie puede eliminar DBO₅ en menos tiempo en relación con la otra especie.

El análisis ANOVA indica que la interacción entre el TRH y el tipo de módulo no afecta significativamente la remoción de DBO₅ del agua (p value > 0.05). Sin embargo, el análisis individual de los factores indica que el tipo de módulo sí afecta la remoción de DBO₅ (p value < 0.05); el análisis Tukey a un 95% de confiabilidad determinó que el módulo

plantado con *Cyperus alternifolius* es el tratamiento que más remueve DBO₅ de los tres módulos analizados. Según otros autores, si se desea optimizar la remoción de DBO₅, los humedales plantados con esta especie son una opción eficaz en la fitodepuración de aguas residuales domésticas [28] [29].

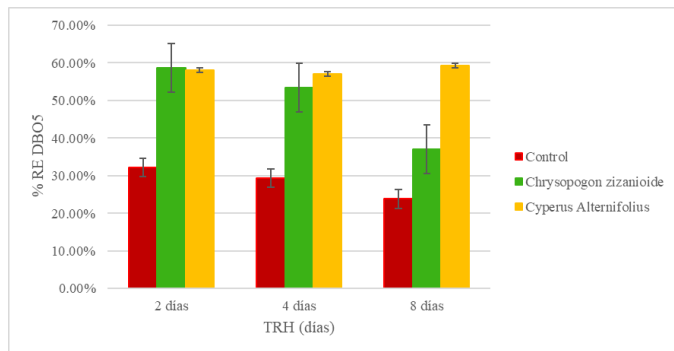


Fig. 8 Porcentaje de remoción de DBO₅

Para los resultados obtenidos para el parámetro de Turbiedad (Figura 9), todos los humedales evidenciaron un buen desempeño en la retención de sólidos suspendidos, lo cuales se relacionan con la turbiedad del agua [30]. Los sistemas modulares presentaron las más altas remociones a los 4 días de tratamiento, 98.50% (Control), 99.18% (*Chrysopogon zizanioides*) y 98.74% (*Cyperus alternifolius*).

El análisis de ANOVA indica que la interacción entre TRH y el tipo de módulo no afecta significativamente la remoción de la turbiedad del agua (*p* value). El análisis individual de los factores de igual forma demuestra que los humedales plantados como los no plantados no afectan en la remoción. Por lo tanto, las altas tasas de remoción son atribuibles a la propiedad de filtración de partículas del sustrato, mas no a la acción fitodepuradora de la planta.

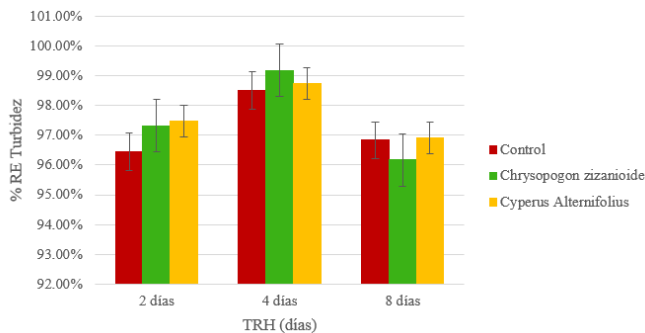


Fig. 9 Porcentajes de remoción de Turbiedad

Con relación a la remoción de la carga microbiana, los resultados de la presencia de CT (NMP/100ml) indican que los tres módulos alcanzaron altas tasas de remoción con un TRH de 4 días (Figura 10). Cabe resaltar, que el humedal con *Chrysopogon zizanioides* puede llegar a remover hasta el

99.08% de CT del agua, la cual es la tasa de eliminación microbiana más alta entre todos los módulos construidos. La especie *Chrysopogon zizanioides* es comúnmente utilizada para la biorremediación de aguas residuales no convencionales debido a su capacidad de hiperacumulación de contaminantes orgánicos. Esta especie es buena reduciendo la carga microbiana y alcanza tasas similares (>99%) a las que se determinaron en esta investigación [31]

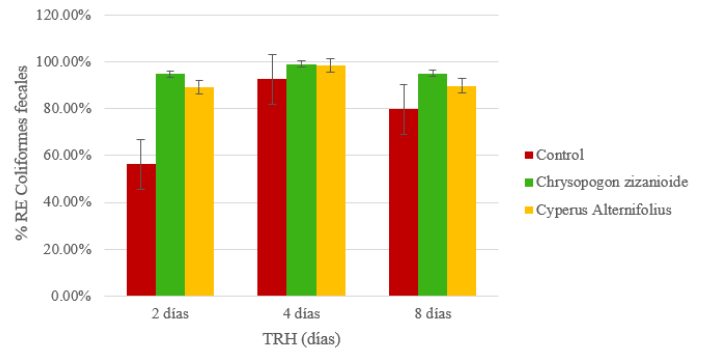


Figura 10. Porcentajes de remoción de CT

El análisis ANOVA indica que la interacción entre el TRH y el tipo de módulo no afecta significativamente la remoción de CT del agua (*p* value > 0.05). Sin embargo, el análisis individual de los factores indica que el tipo de módulo sí afecta la remoción de CT (*p* value < 0.05), por su parte el factor del TRH también afecta la remoción de CT en el agua (*p* value < 0.05). El análisis Tukey para ambos factores demuestra que el módulo plantado con pasto Vetiver es el mejor tratamiento para eliminar CT del agua; asimismo, el TRH de 4 días es el período óptimo de tratamiento para que pueda ocurrir la mayor eliminación de CT en los tres humedales.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados de la experimentación evidencian el buen desempeño del sistema modular de humedales a escala piloto en la remoción de contaminantes orgánicos y microbianos, bajo condiciones controladas y usando agua de un canal impactado. A partir del análisis de los valores de remoción, se concluye que el módulo plantado con *Cyperus alternifolius* presentó altos porcentajes de DBO₅ en comparación con los otros módulos, mientras que, el humedal con pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) es un buen removedor de carga microbiana (CT) y TDS.

Así mismo, los humedales artificiales son buenos filtradores de partículas suspendidas, alcanzando porcentajes de reducción de la turbiedad de hasta el 99.18% usando pasto Vetiver, aun así, todos los módulos también presentan un excelente desempeño para clarificar el agua, mejorando de esta forma el color del agua. El análisis estadístico de los datos indica que no se puede evidenciar que la relación entre el tiempo de retención hidráulica y el tipo de módulo impacta

significativamente en los porcentajes de remoción de los principales contaminantes estudiados en esta investigación.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen a las Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas por permitirles llevar a cabo la investigación en sus instalaciones y brindar las herramientas para la experimentación en campo y al Laboratorio de Aguas y Energías Renovables de la Carrera de Ingeniería Ambiental.

REFERENCIAS

[1] WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas), *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos, 2017: Aguas residuales: el recurso no explotado*, vol. 1. Paris: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 2017. Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247647>

[2] Sunass (Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento), "Las EPS y su desarrollo 2013," Lima, 2014. Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.sunass.gob.pe/wp-content/uploads/2020/09/La-EPS-y-su-desarrollo-2013-indicadores-de-gestion.-Datos-2013.pdf>

[3] INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática), "Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales 2022," 2022. Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1877/libro.pdf

[4] C. Arana and L. Salinas, "Flora vascular de los Humedales de Chimbote, Perú Vascular Plants of the Chimbote Wetlands, Peru," *Rev. peru. biol.*, vol. 10, no. 2, pp. 221–224, 2003, Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <http://sisbib.unmsm.edu.pe/BVRevistas/biologia/biologiaNEW.htm>

[5] D. Russi *et al.*, "The economics of ecosystems and biodiversity for water and wetlands," London and Brussels, 2013. Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.cbd.int/financiamiento/valores-g-ecowaterwetlands-teeb.pdf>

[6] R. Otero, "Actitudes hacia el medio ambiente en un grupo de pobladores de las inmediaciones de los Pantanos de Villa," PUCP (Pontificia Universidad Católica del Perú), Lima, 2011. Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/799/OTERO_ROOSE_RAUL_ACTITUDES_MEDIO_AMBIENTE.pdf?s_equence=1&isAllowed=y

[7] Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado, "Refugio de Vida Silvestre Los Pantanos de Villa," Lima, Jan. 01, 2019. Accessed: Jan. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/sernanp/informes-publicaciones/1833908-refugio-de-vida-silvestre-los-pantanos-de-villa>

[8] A. Puma-Quispe, P. J. Zavaleta-Muñoz, T. F. Palma-Ventura, and V. M. García-Medina, "Evaluación de la calidad del agua subterránea en un sector de la Zona de Reglamentación Especial de Los Pantanos de Villa," *South Sustainability*, vol. 3, no. 2, p. e062, 2022, doi: 10.21142/ss-0302-2022-e062.

[9] P. Andreo-Martínez, N. García-Martínez, and L. Almela, "Domestic Wastewater Depuration Using a Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland and Theoretical Surface Optimization: A Case Study under Dry Mediterranean Climate," *Water (Basel)*, 2016, doi: 10.3390/w8100434.

[10] R. Kadlec and S. Wallace, *Treatment Wetlands*, 2nd ed., vol. 1. New York: Taylor & Francis Group, 2009. Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: [https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/KADLEC%](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/KADLEC%20WALLACE%202009%20Treatment%20Wetlands%202nd%20Edition_0.pdf)

20WALLACE%202009%20Treatment%20Wetlands%202nd%20Edition_0.pdf

[11] J. Vymazal, "Constructed Wetlands, Subsurface Flow," *Encyclopedia of Ecology, Five-Volume Set*, pp. 748–764, Jan. 2008, doi: 10.1016/B978-008045405-4.00080-X.

[12] J. Vymazal, "Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review," *Ecol Eng.*, vol. 73, pp. 724–751, Dec. 2014, doi: 10.1016/J.ECOLENG.2014.09.034.

[13] C. Rodríguez, "Humedales construidos. Estado del arte. (II)," in *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 3rd ed., vol. XXIV, no. 3, La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, 2003, pp. 42–48. Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://docplayer.es/42302884-Humedales-construidos-estado-del-arte-ii.html>

[14] J. Vymazal, "Removal of nutrients in various types of constructed wetlands," *Science of the Total Environment*, vol. 380, no. 1–3, pp. 48–65, Jul. 2007, doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.09.014.

[15] F. A. H. Al-Ajalín, M. Idris, S. R. S. Abdullah, S. B. Kurniawan, and M. F. Imron, "Evaluation of short-term pilot reed bed performance for real domestic wastewater treatment," *Environ Technol Innov.*, vol. 20, p. 101110, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.ETI.2020.101110.

[16] F. García-Ávila, J. Patiño-Chávez, F. Zhinín-Chimbo, S. Donoso-Moscoso, L. Flores del Pino, and A. Avilés-Añazco, "Performance of Phragmites Australis and Cyperus Papyrus in the treatment of municipal wastewater by vertical flow subsurface constructed wetlands," *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 7, no. 3, pp. 286–296, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.ISWCR.2019.04.001.

[17] C. Xing, X. Xu, Z. Xu, R. Wang, and L. Xu, "Study on the decontamination effect of biochar-constructed wetland under different hydraulic conditions," *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 7, Apr. 2021, doi: 10.3390/w13070893.

[18] P. de Rozari, M. Greenway, and A. El Hanandeh, "Nitrogen removal from sewage and septage in constructed wetland mesocosms using sand media amended with biochar," *Ecol Eng.*, vol. 111, pp. 1–10, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.11.002.

[19] P. de Rozari, M. Greenway, and A. El Hanandeh, "Nitrogen removal from sewage and septage in constructed wetland mesocosms using sand media amended with biochar," *Ecol Eng.*, vol. 111, pp. 1–10, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.11.002.

[20] Autoridad Nacional del Agua, *Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales*. 2016. Accessed: Jan. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.ana.gob.pe/publicaciones/protocolo-nacional-para-el-monitoreo-de-la-calidad-de-los-recursos-hidricos-0>

[21] M. S. Gaballah, O. Abdelwahab, K. M. Barakat, and A. I. Stefanakis, "A pilot system integrating a settling technique and a horizontal subsurface flow constructed wetland for the treatment of polluted lake water," *Chemosphere*, vol. 295, p. 133844, May 2022, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.133844.

[22] M. von Sperling, *Basic Principles of Wastewater Treatment*, vol. 2. London: IWA Publishing, 2007.

[23] D. Rohaningsih *et al.*, "The efficacy of Vetiveria zizanioides in horizontal subsurface flow constructed wetland for treating textile wastewater," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2023. doi: 10.1088/1755-1315/1201/1/012073.

[24] J. Vymazal, "Constructed Wetlands, Subsurface Flow," *Encyclopedia of Ecology, Five-Volume Set*, pp. 748–764, Jan. 2008, doi: 10.1016/B978-008045405-4.00080-X.

[25] R. Sepúlveda, A. M. Leiva, and G. Vidal, "Performance of Cyperus papyrus in constructed wetland mesocosms under different levels of salinity," *Ecol Eng.*, vol. 151, May 2020, doi: 10.1016/j.ecoleng.2020.105820.

[26] C. Leto, T. Tuttolomondo, S. La Bella, R. Leone, and M. Licata, "Effects of plant species in a horizontal subsurface flow constructed wetland - phytoremediation of treated urban wastewater with Cyperus alternifolius L. and Typha latifolia L. in the West of Sicily (Italy)," *Ecol Eng.*, vol. 61, pp. 282–291, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.ecoleng.2013.09.014.

- [27] A. A. Badejo, D. O. Omole, and J. M. Ndambuki, "Municipal wastewater management using *Vetiveria zizanioides* planted in vertical flow constructed wetland," *Appl Water Sci*, vol. 8, no. 4, Jul. 2018, doi: 10.1007/s13201-018-0756-0.
- [28] M. Bilgin, I. Şimşek, and Ş. Tulun, "Treatment of domestic wastewater using a lab-scale activated sludge/vertical flow subsurface constructed wetlands by using *Cyperus alternifolius*," *Ecol Eng*, vol. 70, pp. 362–365, Sep. 2014, doi: 10.1016/J.ECOLENG.2014.06.032.
- [29] N. Darajeh, P. Truong, S. Rezanian, H. Alizadeh, and D. W. M. Leung, "Effectiveness of Vetiver Grass versus other Plants for Phytoremediation of Contaminated Water," 2019. [Online]. Available: <http://www.jett.dormaj.com>
- [30] M. Mahmoudpour, S. Gholami, M. Ehteshami, and M. Salari, "Evaluation of Phytoremediation Potential of Vetiver Grass (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) for Wastewater Treatment," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/3059983.
- [31] M. M. Dorafshan, J. Abedi-Koupai, S. Eslamian, and M. J. Amiri, "Vetiver Grass (*Chrysopogon zizanioides* L.): A Hyper-Accumulator Crop for Bioremediation of Unconventional Water," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 4, MDPI, Feb. 01, 2023. doi: 10.3390/su15043529.