

Comparison of the efficiency of two wastewater treatment schemes using Subsurface Flow Wetlands for contaminant removal

Vladimir Antonio Rodríguez-Núñez¹; Atuey de Jesús Martínez Durán²
Rainier Vicente Sánchez Camacho³; José Ángel Vásquez Cuello⁴

^{1,2}Universidad Tecnológica de Santiago, UTESA, República Dominicana, sostenibilidad@utesa.edu, atueymartinez@utesa.edu

³Instituto Superior de Formación Docente Salomé Ureña, ISFODOSU, República Dominicana, rainersan76@gmail.com

⁴Universidad Tecnológica de Santiago, UTESA, República Dominicana, josevasquez23@alumno.utesa.edu

Abstract – Effective wastewater treatment is essential to meet environmental and public health standards. This study evaluates the performance of two wastewater treatment schemes using Subsurface Flow Constructed Wetlands (SFCWs) for contaminant removal under varying hydraulic retention times (HRTs) of 3, 5, 7, 9, 11, 13, and 15 days. The analyzed parameters include total coliforms, fecal coliforms, dissolved oxygen (DO), suspended solids (SS), chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD₅), ammonium nitrogen, total nitrogen, nitrate nitrogen, total phosphorus, and orthophosphates. The influent wastewater exhibited high levels of organic matter, nutrients, and microbial contamination. Both schemes achieved significant reductions in all evaluated parameters, with varying efficiencies depending on the HRT and treatment scheme. The results underscore the effectiveness of both treatment schemes in achieving substantial contaminant removal, meeting water quality standards, and providing valuable insights for optimizing HRTs and improving treatment outcomes. This study contributes to the development of sustainable wastewater management strategies, particularly valuable for regions with limited resources or high environmental vulnerability.

Keywords – subsurface flow constructed wetlands, wastewater treatment, hydraulic retention time, contaminant removal, water quality management.

Comparación de la eficiencia de dos esquemas de tratamiento de aguas residuales utilizando Humedales de Flujo Subsuperficial para la remoción de contaminantes

Vladimir Antonio Rodríguez-Núñez¹; Atuey de Jesús Martínez Durán²;

Rainier Vicente Sánchez Camacho³; José Ángel Vásquez Cuello⁴

^{1,2}Universidad Tecnológica de Santiago, UTESA, República Dominicana, sostenibilidad@utesa.edu, atueymartinez@utesa.edu

³Instituto Superior de Formación Docente Salomé Ureña, ISFODOSU, República Dominicana, rainiersan76@gmail.com

⁴Universidad Tecnológica de Santiago, UTESA, República Dominicana, josevasquez23@alumno.utesa.edu

Resumen– El tratamiento eficaz de aguas residuales es esencial para cumplir con los estándares ambientales y de salud pública. Este estudio evalúa el desempeño de dos esquemas de tratamiento de aguas residuales utilizando humedales de flujo subsuperficial (HFS) para la remoción de contaminantes bajo diferentes tiempos de retención hidráulica (TRH) de 3, 5, 7, 9, 11, 13 y 15 días. Los parámetros analizados incluyen coliformes totales, coliformes fecales, oxígeno disuelto (OD), sólidos suspendidos (SS), demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBOs), nitrógeno del amonio, nitrógeno total, nitrógeno del nitrato, fósforo total y ortofosfatos. El agua residual influente presentó altos niveles de materia orgánica, nutrientes y contaminación microbiana. Ambos esquemas lograron reducciones significativas en todos los parámetros evaluados, con eficiencias variables dependiendo del TRH y del esquema de tratamiento. Los resultados destacan la efectividad de ambos esquemas para lograr una remoción sustancial de contaminantes, cumpliendo con los estándares de calidad del agua y proporcionando información valiosa para optimizar los TRH y mejorar los resultados del tratamiento. Este estudio contribuye al desarrollo de estrategias sostenibles de gestión de aguas residuales, particularmente valiosas para regiones con recursos limitados o alta vulnerabilidad ambiental.

Palabras clave-- humedales de flujo subsuperficial, tratamiento de aguas residuales, tiempo de retención hidráulica, remoción de contaminantes, gestión de calidad del agua

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua constituye un desafío ambiental crítico que afecta tanto a los ecosistemas acuáticos como a la salud humana de múltiples maneras. La necesidad de proteger el medio ambiente y garantizar la salud pública ha impulsado el desarrollo de sistemas de tratamiento de aguas residuales más eficientes, lo cual ha captado la atención a nivel mundial. Asimismo, la relación entre la calidad del agua y los Objetivos de Desarrollo Sostenible ha sido reconocida como una prioridad en la mayoría de los países, tanto desarrollados como en vías de desarrollo [1]. En este contexto, la calidad del agua se posiciona como un componente esencial en la gestión de los recursos hídricos, particularmente en el tratamiento de

aguas residuales, donde la eliminación de contaminantes resulta fundamental para cumplir con los estándares ambientales y de salud pública.

Los humedales construidos (HC) han cobrado relevancia por su capacidad para remover contaminantes emergentes presentes en diversas matrices ambientales [2]. Estos sistemas son considerados una tecnología rentable, energéticamente eficiente y multifuncional, orientada al tratamiento sostenible de aguas residuales [3]. En este tipo de sistemas, las especies vegetales desempeñan un papel central en la eficiencia del proceso de remediación, al participar en la eliminación de contaminantes a través de mecanismos físicos, químicos y biológicos [4]. Además, el tiempo de retención hidráulica (TRH) se ha identificado como un parámetro crítico que condiciona la eficacia del tratamiento. Diversos estudios han demostrado que un mayor TRH tiende a mejorar la calidad del efluente, aunque su valor óptimo depende del tipo de contaminante y de las características del influente [5].

En particular, los humedales artificiales (HA) han demostrado ser efectivos en el tratamiento de aguas residuales en climas tropicales, debido a factores como las altas temperaturas, la elevada humedad, el crecimiento vegetal acelerado, la mayor radiación solar y la intensificación de la actividad microbiana [6]. Estos sistemas son diseñados y construidos a profundidades menores a un metro, y se caracterizan por el uso de vegetación acuática macrófita (sumergida, emergente y flotante) cuyas raíces crecen directamente en el agua [7]. Se reconoce que los HA son ecológicamente beneficiosos, ya que favorecen la conservación del hábitat de la fauna local y permiten una adecuada integración paisajística [8]. En cuanto a su mantenimiento y operación, los HA presentan ventajas ambientales notables, al no requerir energía eléctrica ni equipos costosos; además, demandan una capacitación mínima para su manejo y, al tratarse de un sistema natural, sus costos operativos son significativamente más bajos en comparación con los tratamientos convencionales [9].

Los humedales artificiales funcionan como biorreactores complejos, aprovechando los procesos físicos y biogeoquímicos de las interacciones entre el suelo, la vegetación, la atmósfera y las comunidades microbianas para reducir la carga de nutrientes [[10], [11], [12]].

Este estudio se centra en la evaluación de dos esquemas de tratamiento, denominados A y B, diseñados para abordar los desafíos de la contaminación hídrica. A lo largo de diferentes tiempos de retención hidráulica (TRH): 3, 5, 7, 9, 11, 13 y 15 días, se analizó su desempeño en la remoción de parámetros clave, incluidos coliformes totales, coliformes fecales, oxígeno disuelto (OD), sólidos suspendidos (SS), demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), nitrógeno del amonio, nitrógeno total, nitrógeno del nitrato, fósforo total y ortofosfatos. Estos indicadores representan aspectos fundamentales de la calidad del agua, como la eliminación de microorganismos patógenos, la reducción de materia orgánica y el control de nutrientes responsables de la eutrofización.

Los influentes utilizados en este estudio presentaron altas concentraciones de carga contaminante, típicas de aguas residuales con elevados niveles de materia orgánica y nutrientes. Los resultados demostraron que ambos esquemas lograron reducciones significativas en todos los parámetros evaluados, con diferencias en la eficiencia dependiendo del tiempo de retención y el diseño del esquema de tratamiento.

El objetivo principal de este trabajo es comparar la efectividad de los esquemas A y B, destacando su capacidad para reducir los niveles de contaminantes y cumplir con los estándares de calidad del agua. Este análisis busca contribuir al desarrollo de estrategias más eficientes para el tratamiento de aguas residuales, promoviendo la protección de los recursos hídricos y el bienestar ambiental.

II. METODOLOGÍA

Zona de estudio

La experimentación se desarrolló en un área ubicada en la ciudad de Moca, provincia Espaillat, República Dominicana, específicamente en las coordenadas Zona 19 Q, Coordenadas Este 340031.44 m E y Coordenadas Norte 2145764.93 m, con una elevación de 186 msnm. Esta zona se caracteriza por tener un clima con veranos largos, cálidos y nublados; los inviernos son cortos y mayormente despejados. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 19 °C a 32 °C y rara vez baja a menos de 17 °C o sube a más de 34 °C. La temporada calurosa dura 4.5 meses, del 30 de mayo al 15 de octubre, y la temperatura máxima promedio diaria es más de 31 °C. El mes más cálido del año en Moca es julio, con una

temperatura máxima promedio de 32 °C y mínima de 23 °C. La temporada fresca dura 2.9 meses, del 29 de noviembre al 26 de febrero, y la temperatura máxima promedio diaria es menos de 29 °C. El mes más frío del año en Moca es enero, con una temperatura mínima promedio de 19 °C y máxima de 28 °C.

Área de estudio

Para realizar el estudio se construyeron dos humedales de flujo horizontal subsuperficial con las siguientes características:

Esquema A para el tratamiento de las aguas residuales

Un humedal de flujo subsuperficial construido en una estructura rectangular en bloques de concreto con las superficies laterales y de fondo impermeabilizadas con mortero. La estructura cuenta con un medio filtrante granulométrico de 0.80 m de altura con respecto a la superficie del fondo, en capas de grava de gradación desde 1/2 hasta 1 pulgada, para garantizar la conductividad hidráulica y minimizar el riesgo de colmatación, y, también, permitir el desarrollo de vegetación hidrófita denominada *Typha domingensis* (Eneas), que coloniza el lecho filtrante y contribuye a la oxigenación del sustrato y del agua, así como a la eliminación de nutrientes del agua residual y al desarrollo de la biopelícula.

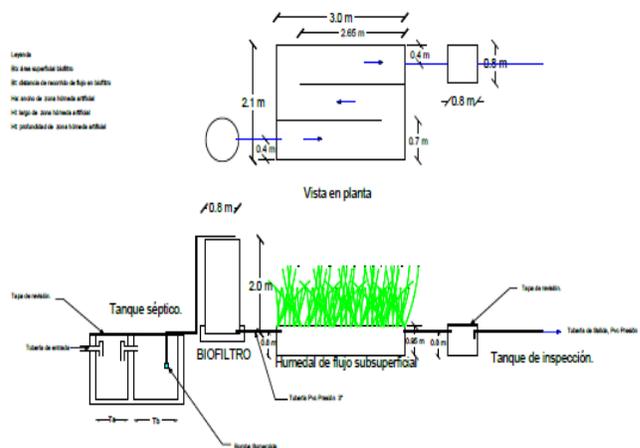


Figura 1. Esquema A para el tratamiento de las aguas residuales

La propagación de la especie vegetal *Typha domingensis* se realizó principalmente a través de órganos derivados del tallo, fraccionando sus rizomas. Se sembraron 15 plantas de la especie citada en el humedal, colocándolas con una separación de 50 cm entre ellas y a una profundidad la raíz de 15 a 25 cm, asegurando que las raíces quedaran completamente cubiertas

por el sustrato y protegidas de la luz solar. Se estableció un período de 16 semanas para la colonización del área del humedal, alcanzando un total de 92 plantas al momento de comenzar el proceso de monitoreo del humedal.

El humedal artificiales de flujo subsuperficial, corresponde a una geometría rectangular y dimensiones de 2.10 m de ancho, 3.00 m de largo y 0.80 m de profundidad, cubriendo un área total de 5.04 m³. La estructura incluye mamparas de 2.65 m de longitud que forman un laberinto para evitar que el flujo de agua siga un camino preferencial, según se muestra en la figura 1 correspondiente al diseño del esquema A.

Para verificar el funcionamiento del sistema construido, se utilizó un volumen de 5.0 m³ de aguas residuales, en función del tiempo de retención hidráulica sujeto a experimentación, para cada dinámica de prueba. El agua residual tratada fue sometida a diferentes tiempos de retención hidráulica para evaluar cómo varía la eficiencia del sistema en la eliminación de contaminantes.

Esquema B para el tratamiento de las aguas residuales

Un humedal de flujo horizontal subsuperficial dentro de una estructura rectangular hecha de bloques de concreto, cuyas superficies laterales y de fondo fueron impermeabilizadas con mortero. El humedal cuenta con un medio filtrante de 0.80 m de altura desde el fondo, compuesto por capas de grava con tamaños que varían entre 1/2 y 1 pulgada, para asegurar una adecuada conductividad hidráulica y reducir el riesgo de obstrucción. Además, el sistema de tratamiento dispone de vegetación hidrófita *Typha domingensis* (Eneas), que coloniza el lecho filtrante, ayudando a oxigenar el sustrato y el agua, a eliminar nutrientes del agua residual y a promover el desarrollo de la biopelícula.

La propagación de la especie vegetal *Typha domingensis* se realizó principalmente mediante órganos derivados del tallo, fraccionando sus rizomas. Se sembraron 16 plantas de esta especie en el humedal, utilizando un marco de siembra de 60 cm por 40 cm; los 60 cm de separación entre plantas y los 40 cm entre hileras. Las raíces se plantaron a una profundidad de 15 a 25 cm, asegurando que quedaran completamente cubiertas por el sustrato y protegidas de la luz solar. Se estableció un período de 16 semanas para la colonización del área del humedal, evidenciándose, en las plantas, un sistema radicular fuerte y una cobertura de hojas importante, alcanzando un total de 95 plantas al momento de iniciar el monitoreo de las aguas residuales utilizadas en el proceso de tratamiento.

El área estudiada corresponde a un sistema de zonas húmedas artificiales de flujo subsuperficial, con una geometría rectangular y dimensiones de 2.10 m de ancho, 3.00 m de largo y 0.80 m de profundidad, cubriendo un área total de 5.04 m³.

Con el fin de verificar la efectividad del sistema construido, se utilizó un volumen de 5.0 m³ de aguas residuales, en función del tiempo de retención hidráulica sujeto a experimentación, para cada dinámica de prueba. El agua residual utilizada en el tratamiento fue sometida a distintos tiempos de retención hidráulica, lo que permitió evaluar cómo cambia la eficiencia del sistema en la eliminación de contaminantes.

Muestreo y análisis

El tiempo de retención hidráulica (TRH) para cada esquema de tratamiento se ajustó a intervalos de tres (3), cinco (5), siete (7), nueve (9), once (11), trece (13) y quince (15) días. Se realizó monitoreo del influente y efluente correspondiente a cada intervalo de TRH. Esta dinámica se repitió tres (3) veces, utilizando influentes con diferentes concentraciones de carga contaminante, cada uno con características típicas de agua altamente contaminada.

Los muestreos fueron realizados por la empresa Laboratorio Ambiental y Energético (LAMENER), la cual está certificada por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de la República Dominicana. Posteriormente, cada muestra fue conservada y enviada para análisis al laboratorio de dicha empresa.

Los parámetros de calidad del agua seleccionados para esta investigación se presentan en la tabla 1, incluyendo la unidad de medida, el símbolo y el método analítico.

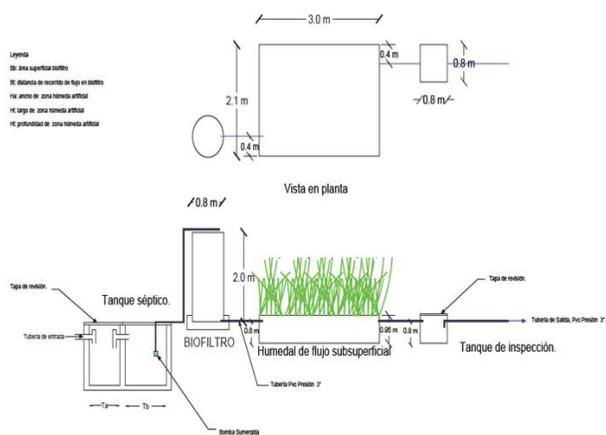


Figura 2. Esquema B para el tratamiento de las aguas residuales

Tabla 1. Parámetros, símbolo, unidad y método analítico

Parámetro	Símbolo	Unidad	Método analítico
Coliformes totales		NMP/100ml	SM-9221-B
Coliformes fecales		NMP/100ml	SM-9221-E
Potencial de Hidrógeno	pH	-	SM-4500-H+.B
Turbidez		NTU	SM-2130-B
Color		U. Pt-Co	SM-2120-C
Oxígeno Disuelto	OD	% sat.	SM-4500-O-G
Sólidos Suspendidos	SS	mg/l	SM-2540-D
Temperatura		° C	SM-2550-B
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	SM-5220-D
Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO ₅	mg/l	SM-5210-B
Nitrógeno del Amonio	NH ₄ ⁺	mg/l	SM-4500-NH3
Nitrógeno Total	N	mg/l	SM-4500-N-C
Nitrógeno del Nitrato	NO ₃ ⁻	mg/l	SM-4500-NO3 ⁻ -E
Fósforo Total	P	mg/l	SM-4500-P-C
Ortofosfatos	P-PO ₄	mg/l	SM-4500-P

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se evaluó la eficiencia de los esquemas de humedales construidos (A y B) en la remoción de contaminantes presentes en aguas residuales, con un enfoque particular en cómo el tiempo de retención hidráulica (TRH) influye en la calidad del efluente. Los resultados obtenidos permiten comprender el impacto del TRH en la mejora de la calidad del efluente, así como identificar el tiempo óptimo de retención para maximizar la eficiencia del tratamiento en este tipo de sistemas.

En la tabla 2 se muestra el valor de cada parámetro en el influente y efluente en función del tiempo de retención hidráulica, para la experimentación I.

Experimentación I

Tabla 2 Características fisicoquímicas y microbiológicas, esquemas A y B para el tratamiento de aguas residuales, experimentación I.

Parámetro	Unidad	Influente	Valores de efluentes según el tiempo de retención hidráulica, esquemas A y B					
			A		B		A	
			3 días	3 días	5 días	5 días	7 días	7 días
Coliformes totales	NMP/100ml	16,000,000	22,000	49,000	13,000	24,000	4,900	14,000

Coliformes fecales	NMP/100ml	16,000,000	17,000	49,000	13,000	13,000	4,900	14,000
Potencial de Hidrógeno	-	7.7	7.7	7.7	7.7	7.1	7.8	7.5
Turbidez	NTU	168.5	6.0	4.0	5.0	2.0	3.0	5.0
Color	U. Pt-Co	730.5	19.0	10.0	13.0	7.0	14.0	10.0
Oxígeno Disuelto	mg/l	0.4	1.0	1.1	2.8	2.2	7.8	9.0
Sólidos Suspendidos	mg/l	642.5	40.0	10.0	4.0	1.0	5.0	11.0
Temperatura	° C	26.6	31.0	30.0	31.1	31.6	29.3	30.2
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	505.0	57.0	57.0	16.0	38.0	22.0	36.0
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	151.5	16.8	15.3	4.7	13.0	5.5	10.6
Nitrógeno del Amonio	mg/l	61.0	8.4	6.0	7.9	1.8	0.7	0.8
Nitrógeno Total	mg/l	105.0	19.0	15.0	11.0	3.0	2.0	2.0
Nitrógeno del Nitrato	mg/l	7.4	1.9	1.3	1.6	0.7	0.9	1.0
Fósforo Total	mg/l	6.3	1.8	2.0	0.7	1.0	1.0	1.1
Ortofosfatos	mg/l	2.5	0.6	0.7	0.2	0.4	0.3	0.4

Continuación de Tabla 2 Características fisicoquímicas y microbiológicas, esquemas A y B para el tratamiento de aguas residuales, experimentación I

Parámetro	Unidad	Valores de efluentes según el tiempo de retención hidráulica, esquemas A y B							
		A		B		A		B	
		9 días	9 días	11 días	11 días	13 días	13 días	15 días	15 días
Coliformes totales	NMP/100ml	2,400	330	240	240	240	240	240	240
Coliformes fecales	NMP/100ml	1,300	330	240	240	240	240	240	240
Potencial de Hidrógeno	-	8.2	7.7	8.3	7.3	7.9	7.2	8.2	7.3
Turbidez	NTU	5.0	6.0	48.0	15.0	15.0	6.0	6.0	10.0
Color	U. Pt-Co	18.0	4.0	22.0	13.0	5.0	4.0	3.0	8.0
Oxígeno Disuelto	mg/l	10.8	17.6	12.3	12.0	8.6	8.0	13.0	13.3
Sólidos Suspendidos	mg/l	13.0	7.0	15.0	24.0	13.0	6.0	5.0	10.0
Temperatura	° C	31.3	30.1	29.6	28.6	28.7	29.0	29.7	29.9
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	25.0	26.0	37.0	29.0	27.0	18.0	28.0	60.0
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	7.5	5.3	8.9	5.6	6.6	5.3	7.9	16.8
Nitrógeno del Amonio	mg/l	0.7	0.5	0.4	0.4	0.4	1.4	0.1	0.2
Nitrógeno Total	mg/l	2.0	<1.0	1.0	<1.0	<1.0	3.0	<1.0	<1.0
Nitrógeno del Nitrato	mg/l	0.8	0.4	0.6	0.5	0.4	1.1	0.3	0.7
Fósforo Total	mg/l	0.7	0.4	0.8	1.7	0.7	0.9	0.6	0.8
Ortofosfatos	mg/l	0.2	0.2	0.2	0.6	0.2	0.3	0.2	0.3

Coliformes totales y fecales: El influente presentó una concentración alta de coliformes totales y fecales (16,000,000 NMP/100 ml), evidenciando una carga microbiológica significativa. Ambos esquemas (A y B) lograron una reducción drástica de esta carga, con eficiencias superiores al 99.9%. Sin

embargo, en tiempos de retención hidráulica más cortos (3 a 7 días), ninguno de los esquemas cumplió con los límites establecidos por la Norma Dominicana Ambiental sobre Control de Descargas a Aguas Superficiales, Alcantarillado Sanitario y Aguas Costeras, que fija un máximo permisible de 1,000 NMP/100 ml para coliformes totales. Según los datos, el esquema B alcanzó el cumplimiento normativo a partir del día 9, mientras que el esquema A lo logró desde el día 11. Esto evidencia que ambos sistemas son eficaces para la remoción de coliformes, pero requieren tiempos de retención hidráulica adecuados para garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad del agua.

Oxígeno disuelto (OD): El influente exhibió un nivel muy bajo de oxígeno disuelto (0.4 mg/l), indicando condiciones anóxicas. Ambos esquemas lograron aumentar significativamente los niveles de oxígeno disuelto, con el esquema B alcanzando niveles más altos de manera consistente en casi todos los tiempos de retención hidráulica. Esto evidencia que el esquema B favorece una mayor oxigenación del agua tratada, lo cual es crucial para la mejora de la calidad del agua y el soporte de procesos biológicos aeróbicos.

Sólidos suspendidos (SS): El influente mostró una alta concentración de sólidos suspendidos (642.5 mg/l), lo que evidencia una carga significativa de materia en suspensión. Ambos esquemas lograron reducciones importantes, alcanzando valores tan bajos como 4.0 mg/l en el esquema A y 1.0 mg/l en el esquema B a los 5 días de retención hidráulica. Sin embargo, a partir de los 7 días, ambos esquemas presentaron ligeros aumentos en los valores, alcanzando 11.0 mg/l en el esquema B a los 7 días y 13.0 mg/l en el esquema A a los 9 días, con fluctuaciones posteriores en ambos sistemas. Esto sugiere que, aunque ambos esquemas son altamente efectivos en tiempos cortos e intermedios, es fundamental monitorear y optimizar las condiciones operativas en tiempos más prolongados para mantener la estabilidad en la remoción de sólidos suspendidos.

Demanda Química de Oxígeno (DQO): El influente presentó una concentración elevada de DQO (505.0 mg/l), lo que indica una carga orgánica significativa en el agua residual. Ambos esquemas lograron reducciones importantes, alcanzando valores tan bajos como 16.0 mg/l en el esquema A y 38.0 mg/l en el esquema B a los 5 días de retención hidráulica. Sin embargo, a partir de los 7 días, se observaron ligeras fluctuaciones en los valores, con el esquema A manteniendo una tendencia más estable en la remoción, mientras que el esquema B presentó un aumento notable a 60.0 mg/l a los 15 días. Esto sugiere que, aunque ambos esquemas son efectivos en tiempos cortos e intermedios, el esquema A demuestra un mejor desempeño en tiempos prolongados, siendo crucial monitorear las condiciones operativas del esquema B para evitar el incremento de la carga orgánica tratada.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅): El influente mostró una alta concentración de DBO₅ (151.5 mg/l), reflejando una carga orgánica biodegradable considerable. Ambos esquemas lograron reducciones significativas, alcanzando valores tan bajos como 4.7 mg/l en el esquema A y 13.0 mg/l en el esquema B a los 5 días de retención hidráulica. A partir de los 7 días, los valores se estabilizaron con ligeras fluctuaciones, siendo el esquema B más consistente al mantener valores más bajos (5.3 mg/l a los 9 días y 5.3 mg/l a los 13 días), aunque ambos mostraron un incremento a los 15 días. Esto indica que, aunque ambos esquemas son eficaces, el esquema B ofrece una ligera mayor estabilidad en la remoción de la carga orgánica biodegradable, especialmente en tiempos de retención hidráulica más largos.

Nitrógeno del Amonio (NH₄⁺): El influente exhibió una concentración elevada de nitrógeno del amonio (61.0 mg/l), reflejando una carga significativa de este compuesto. Ambos esquemas lograron reducciones importantes, alcanzando valores tan bajos como 0.7 mg/l en el esquema A y 0.8 mg/l en el esquema B a los 7 días, lo que corresponde a reducciones del 98.85% en el esquema A y 98.69% en el esquema B. A partir de los 11 días, ambos esquemas mantuvieron valores muy bajos, con el esquema A destacándose al alcanzar 0.1 mg/l a los 15 días, lo que representa una reducción del 99.84%. Esto sugiere que ambos sistemas son efectivos para la remoción de nitrógeno amoniacal.

Nitrógeno total (N): El influente presentó una concentración alta de nitrógeno total (105.0 mg/l). Ambos esquemas lograron reducciones significativas, alcanzando valores menores a 1.0 mg/l en el esquema A desde los 11 días y en el esquema B desde los 9 días, lo que equivale a reducciones superiores al 99.05%. Esto demuestra que ambos esquemas son altamente efectivos para la remoción de nitrógeno total, cumpliendo con los estándares de calidad del agua.

Nitrógeno del nitrato (NO₃⁻): El influente mostró una concentración de nitrato de 7.4 mg/l. Ambos esquemas lograron reducciones importantes, alcanzando valores tan bajos como 0.4 mg/l en el esquema B (94.59%) y 0.3 mg/l en el esquema A (95.95%).

Fósforo total (P): El influente exhibió una concentración de fósforo total de 6.3 mg/l. Ambos esquemas lograron reducciones significativas, alcanzando valores tan bajos como 0.4 mg/l en el esquema B (93.65%) a los 9 días y 0.6 mg/l en el esquema A (90.48%) a los 15 días.

Ortofosfatos (P-PO₄): El influente presentó una concentración de ortofosfatos de 2.5 mg/l. Ambos esquemas lograron reducciones importantes, alcanzando valores tan bajos como 0.2 mg/l en el esquema A y el esquema B a partir de los 9 días, lo que corresponde a una reducción del 92.00%. Esto

demuestra que ambos esquemas son altamente efectivos para la remoción de ortofosfatos, con un desempeño similar en tiempos prolongados.

Experimentación II

Tabla 3 Características fisicoquímicas y microbiológicas, esquemas A y B para el tratamiento de aguas residuales, experimentación II

Parámetro	Unidad	Influyente	Valores de efluentes según el tiempo de retención hidráulica, esquemas A y B							
			A		B		A		B	
			3 días	3 días	5 días	5 días	7 días	7 días	7 días	7 días
Coliformes totales	NMP/100ml	5,800,000	13,000	24,000	2,400	790	1,700	2,400		
Coliformes fecales	NMP/100ml	5,800,000	13,000	24,000	2,400	790	790	1,300		
Potencial de Hidrógeno	-	6.6	7.3	6.7	7.7	7.0	8.0	7.1		
Turbidez	NTU	309.0	24.0	62.0	3.0	2.0	7.0	4.0		
Color	U. Pt-Co	475.3	10.0	13.0	9.0	5.0	11.0	7.0		
Oxígeno Disuelto	mg/l	1.1	3.4	8.3	10.9	10.5	8.2	9.8		
Sólidos Suspendidos	mg/l	729.3	28.0	10.9	4.0	2.0	3.0	1.0		
Temperatura	° C	27.0	29.3	29.0	29.1	28.7	29.8	29.5		
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	448.5	58.0	137.0	29.0	32.0	30.0	26.0		
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	203.5	18.0	42.0	7.6	9.4	6.8	6.1		
Nitrógeno del Amonio	mg/l	58.5	2.6	3.2	0.4	0.6	0.4	0.3		
Nitrógeno Total	mg/l	127.5	5.0	7.0	1.0	<1.0	1.0	<1.0		
Nitrógeno del Nitrato	mg/l	7.7	1.3	2.2	0.7	0.8	0.5	0.5		
Fósforo Total	mg/l	10.3	0.6	2.3	0.9	1.0	0.5	0.5		
Ortofósforos	mg/l	3.4	0.2	0.8	0.3	0.3	0.2	0.2		

Continuación de Tabla 3 Características fisicoquímicas y microbiológicas, esquemas A y B para el tratamiento de aguas residuales, experimentación II

Parámetro	Unidad	Valores de efluentes según el tiempo de retención hidráulica, esquemas A y B							
		A		B		A		B	
		9 días	9 días	11 días	11 días	13 días	13 días	15 días	15 días
Coliformes totales	NMP/100ml	170	790	790	790	490	240	790	130
Coliformes fecales	NMP/100ml	130	490	490	490	490	240	490	130
Potencial de Hidrógeno	-	8.3	7.1	7.7	7.2	7.6	6.9	8.1	8.4
Turbidez	NTU	17.0	4.0	15.0	6.0	21.0	6.0	27.0	5.0
Color	U. Pt-Co	11.0	6.0	10.0	7.0	14.0	7.0	10.0	3.0
Oxígeno Disuelto	mg/l	12.9	11.0	9.4	13.4	11.1	9.6	9.2	10.9
Sólidos Suspendidos	mg/l	10.0	6.0	10.0	3.0	18.0	2.0	15.0	6.0
Temperatura	° C	29.1	28.4	26.7	27.0	26.8	26.7	28.9	29.3
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	30.0	23.0	27.0	17.0	30.0	24.0	25.0	27.0

Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	8.5	6.4	7.9	5.3	7.8	6.9	6.7	7.9
Nitrógeno del Amonio	mg/l	1.4	0.1	0.3	0.1	0.7	0.1	0.7	1.2
Nitrógeno Total	mg/l	4.0	2.0	<1.0	<1.0	3.0	<1.0	<1.0	2.0
Nitrógeno del Nitrato	mg/l	2.1	1.5	0.4	0.3	1.4	0.9	0.4	0.7
Fósforo Total	mg/l	1.0	0.9	0.6	0.5	0.9	0.7	0.9	1.1
Ortofósforos	mg/l	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.4

Coliformes totales: El influente presentó una concentración extremadamente alta de coliformes totales (5,800,000 NMP/100 ml), reflejando una carga microbiológica significativa. Ambos esquemas lograron reducciones importantes. A los 5 días, el esquema A alcanzó una concentración de 2,400 NMP/100 ml, con una reducción del 99.96%, mientras que el esquema B logró 790 NMP/100 ml, con una reducción del 99.99%, cumpliendo con los límites establecidos por la norma (<1,000 NMP/100 ml). A partir de los 9 días, el esquema A alcanzó 170 NMP/100 ml (reducción del 99.997%), mientras que el esquema B presentó 790 NMP/100 ml. A los 15 días, ambos esquemas lograron valores muy bajos, destacándose el esquema B con 130 NMP/100 ml (reducción del 99.998%). Estos resultados demuestran que ambos sistemas son efectivos, con el esquema B mostrando un desempeño más rápido y consistente en el cumplimiento de los estándares de calidad del agua.

Oxígeno Disuelto (OD): El influente exhibió una concentración baja de oxígeno disuelto (1.1 mg/l). Ambos esquemas lograron incrementos significativos en los niveles de oxígeno disuelto. A los 3 días, el esquema A alcanzó 3.4 mg/l, mientras que el esquema B mostró un aumento mayor con 8.3 mg/l. A los 5 días, el esquema A registró 10.9 mg/l, y el esquema B alcanzó casi la concentración más alta con 10.5 mg/l. A partir de los 9 días, los niveles se estabilizaron, con valores que oscilaron entre 9.2 mg/l y 13.4 mg/l, siendo el esquema A el que alcanzó el nivel máximo. Estos resultados demuestran que ambos sistemas son efectivos para oxigenar el agua, con un desempeño ligeramente superior del esquema A en tiempos prolongados.

Sólidos suspendidos (SS): El influente mostró una alta concentración de sólidos suspendidos (729.3 mg/l), reflejando una carga considerable de partículas en suspensión. Ambos esquemas lograron reducciones significativas. A los 5 días, el esquema A alcanzó 4.0 mg/l (reducción del 99.45%) y el esquema B logró 2.0 mg/l (reducción del 99.73%). Sin embargo, a partir de los 9 días, ambos esquemas mostraron ligeros aumentos en los valores de sólidos suspendidos, alcanzando 10.0 mg/l en el esquema A y 6.0 mg/l en el esquema B. A los 15 días, el esquema A presentó 15.0 mg/l, mientras que el esquema B registró 6.0 mg/l, mostrando mayor estabilidad. Esto sugiere que ambos sistemas son efectivos en la remoción de sólidos suspendidos, con un desempeño más consistente en el esquema B en tiempos prolongados.

Demanda Química de Oxígeno (DQO): El influente presentó una elevada concentración de demanda química de oxígeno (448.5 mg/l), indicando una alta carga orgánica y presencia de contaminantes químicos. Ambos esquemas lograron reducciones importantes. A los 3 días, el esquema A alcanzó 58.0 mg/l (reducción del 87.07%), mientras que el esquema B mostró un valor mayor de 137.0 mg/l (reducción del 69.44%). A los 5 días, ambos esquemas presentaron valores similares, con 29.0 mg/l en el esquema A y 32.0 mg/l en el esquema B. A partir de los 7 días, los valores se estabilizaron, con el esquema B alcanzando un mínimo de 17.0 mg/l a los 11 días, mientras que el esquema A mostró una tendencia ligeramente más fluctuante, con valores entre 25.0 mg/l y 30.0 mg/l. Esto sugiere que ambos sistemas son efectivos en la remoción de DQO, con un desempeño más consistente y eficiente en el esquema B.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅): El influente exhibió una alta demanda bioquímica de oxígeno (203.5 mg/l), reflejando una carga orgánica biodegradable significativa. Ambos esquemas lograron reducciones destacadas. A los 3 días, el esquema A alcanzó 18.0 mg/l (reducción del 91.15%), mientras que el esquema B registró 42.0 mg/l (reducción del 79.36%). A los 5 días, los valores se redujeron aún más, con 7.6 mg/l en el esquema A y 9.4 mg/l en el esquema B. A partir de los 9 días, ambos esquemas mostraron valores estables, con un mínimo de 5.3 mg/l en el esquema B a los 11 días y 6.7 mg/l en el esquema A a los 15 días. Esto demuestra que ambos sistemas son altamente efectivos para la remoción de DBO₅, con un desempeño ligeramente superior en el esquema B.

Nitrógeno del amonio (NH₄⁺): El influente mostró una concentración elevada de nitrógeno del amonio (58.5 mg/l), indicando una carga significativa de este compuesto. Ambos esquemas lograron reducciones importantes. A los 3 días, el esquema A alcanzó 2.6 mg/l (reducción del 95.56%) y el esquema B 3.2 mg/l (reducción del 94.53%). A los 5 días, los valores descendieron aún más, con el esquema A logrando 0.4 mg/l (reducción del 99.32%) y el esquema B 0.6 mg/l (reducción del 98.97%). A partir de los 5 días, ambos esquemas mantuvieron valores muy bajos.

Nitrógeno total (N): El influente presentó una alta concentración de nitrógeno total (127.5 mg/l). A los 3 días, el esquema A logró una reducción significativa, alcanzando 5.0 mg/l (reducción del 96.08%), mientras que el esquema B alcanzó 7.0 mg/l (reducción del 94.51%). A partir de los 5 días, ambos esquemas mostraron valores muy bajos, destacando el esquema B con una remoción más constante.

Nitrógeno del nitrato (NO₃⁻): El influente exhibió una concentración de nitratos de 7.7 mg/l. A los 3 días, el esquema A alcanzó 1.3 mg/l (reducción del 83.12%) y el esquema B 2.2

mg/l (reducción del 71.43%). A los 7 días, ambos esquemas lograron valores más bajos, con 0.5 mg/l en ambos casos (reducción del 93.51%). El esquema B alcanzó un mínimo de 0.3 mg/l a los 11 días, mostrando una mayor consistencia en la remoción. Esto indica que, aunque ambos esquemas son efectivos, el esquema B presenta una ligera ventaja en términos de estabilidad en tiempos prolongados.

Fósforo total (P): El influente mostró una concentración de fósforo total de 10.3 mg/l. A los 3 días, el esquema A logró una reducción significativa, alcanzando 0.6 mg/l (reducción del 94.17%), mientras que el esquema B alcanzó 2.3 mg/l (reducción del 77.67%). A partir de los 5 días, ambos esquemas mostraron valores similares, con un mínimo de 0.5 mg/l en ambos esquemas a los 7 días. Esto demuestra que ambos sistemas son efectivos para la remoción de fósforo total.

Ortofosfatos (P-PO₄): El influente presentó una concentración de ortofosfatos de 3.4 mg/l. A los 3 días, el esquema A alcanzó 0.2 mg/l (reducción del 94.12%), mientras que el esquema B registró 0.8 mg/l (reducción del 76.47%). A partir de los 7 días, ambos esquemas lograron valores mínimos de 0.2 mg/l, manteniendo una remoción efectiva y estable en tiempos prolongados. Esto evidencia que ambos esquemas son altamente efectivos en la remoción de ortofosfatos, con un desempeño similar en tiempos prolongados.

Experimentación III

Tabla 4 Características fisicoquímicas y microbiológicas, esquemas A y B para el tratamiento de aguas residuales, experimentación III

Parámetro	Unidad	Influente	Valores de efluentes según el tiempo de retención hidráulica, esquemas A y B					
			A	B	A	B	A	B
			3 días	3 días	5 días	5 días	7 días	7 días
Coliformes totales	NMP/100ml	790,000	790	240	240	2,400	2,400	330
Coliformes fecales	NMP/100ml	790,000	790	240	240	2,400	1,300	330
Potencial de Hidrógeno	-	7.6	8.0	7.2	7.7	7.6	8.6	8.1
Turbidez	NTU	116.0	26.0	6.0	5.0	4.0	3.0	11.0
Color	U. Pt-Co	257.0	15.0	4.0	2.0	2.0	5.0	9.0
Oxígeno Disuelto	mg/l	1.6	8.1	12.0	7.3	15.0	18.9	27.9
Sólidos Suspendidos	mg/l	234.0	13.5	6.0	2.0	2.0	9.0	7.0
Temperatura	° C	25.9	29.6	28.3	28.1	30.3	31.0	31.0
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	189.0	57.0	23.0	18.0	29.0	49.0	19.8
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	78.0	14.0	6.7	5.2	7.8	11.0	5.0
Nitrógeno del Amonio	mg/l	16.0	2.4	1.0	0.6	0.5	0.7	1.1
Nitrógeno Total	mg/l	37.0	7.0	2.0	<1.0	<1.0	<1.0	2.0

Nitrógeno del Nitrato	mg/l	6.8	1.1	0.6	0.2	0.4	0.8	0.6
Fósforo Total	mg/l	4.9	1.3	0.9	0.6	0.9	1.6	1.2
Ortofósforos	mg/l	1.6	0.4	0.3	0.2	0.3	0.5	0.6

Continuación de Tabla 4 Características fisicoquímicas y microbiológicas, esquemas A y B para el tratamiento de aguas residuales, experimentación III

Parámetro	Unidad	Valores de efluentes según el tiempo de retención hidráulica, esquemas A y B							
		A		B		A		B	
		9 días	9 días	11 días	11 días	13 días	13 días	15 días	15 días
Coliformes totales	NMP/100ml	78	170	2,400	230	330	240	330	240
Coliformes fecales	NMP/100ml	78	170	1,300	230	330	240	330	240
Potencial de Hidrógeno	-	6.9	6.9	8.4	7.9	7.9	7.7	8.1	8.2
Turbidez	NTU	2.0	11.0	4.0	11.0	6.0	10.0	11.0	10.0
Color	U. Pt-Co	2.0	7.0	4.0	9.0	5.0	7.0	6.0	7.0
Oxígeno Disuelto	mg/l	7.9	7.8	20.0	20.0	16.0	15.0	20.0	20.0
Sólidos Suspendidos	mg/l	2.0	7.0	8.0	8.0	10.0	7.0	8.0	8.0
Temperatura	° C	31.5	32.3	32.1	33.3	33.0	33.5	32.5	33.0
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	8.0	12.0	25.5	23.0	27.0	15.0	29.0	19.5
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	2.3	3.8	8.5	5.0	7.2	4.8	9.1	6.5
Nitrógeno del Amonio	mg/l	0.4	1.1	0.8	1.1	0.7	1.1	0.4	0.7
Nitrógeno Total	mg/l	<1.0	2.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.1	<1.0	<1.1
Nitrógeno del Nitrato	mg/l	0.7	0.8	0.1	0.3	0.4	1.0	0.1	0.8
Fósforo Total	mg/l	0.9	1.6	0.7	1.3	0.6	0.9	0.6	1.0
Ortofósforos	mg/l	0.3	0.5	0.2	0.6	0.2	0.3	0.2	0.4

Coliformes totales y fecales: El influente mostró una concentración de coliformes totales (790,000 NMP/100ml), reflejando una carga microbiológica significativa. Ambos esquemas lograron reducciones importantes en distintos tiempos de retención hidráulica. A los 3 días, el esquema A alcanzó 790 NMP/100ml (reducción del 99.9%), mientras que el esquema B logró una reducción aún mayor, alcanzando 240 NMP/100ml (reducción del 99.97%). Sin embargo, a los 5 días el esquema B y a los 7 días el esquema A mostraron un aumento en los valores de coliformes, alcanzando 2,400 NMP/100ml en ambos casos, posiblemente debido a fluctuaciones en las condiciones del tratamiento.

Oxígeno Disuelto (OD): El influente exhibió una baja concentración de oxígeno disuelto (1.6 mg/l). A los 3 días, ambos esquemas mostraron un aumento significativo, alcanzando 8.1 mg/l en el esquema A y 12.0 mg/l en el esquema B, con un incremento del 406% y 650%, respectivamente. A los 5 días, el esquema B mostró un

desempeño superior con 15.0 mg/l, mientras que el esquema A disminuyó ligeramente a 7.3 mg/l. A los 7 días, el esquema B alcanzó su máximo valor de 27.9 mg/l, representando un aumento del 1643% respecto al influente inicial, mientras que el esquema A se mantuvo en 18.9 mg/l. Posteriormente, los valores se estabilizaron en ambos esquemas, oscilando entre 15.0 mg/l y 20.0 mg/l a partir de los 11 días. Esto sugiere que ambos esquemas son efectivos para incrementar los niveles de oxígeno disuelto, con el esquema B destacándose por su capacidad de alcanzar concentraciones más altas en tiempos intermedios.

Sólidos Suspendidos (SS): El influente presentó una concentración de sólidos suspendidos de 234.0 mg/l, reflejando una alta carga de materia en suspensión. A los 3 días, ambos esquemas lograron reducciones significativas, alcanzando 13.5 mg/l en el esquema A (reducción del 94.2%) y 6.0 mg/l en el esquema B (reducción del 97.4%). A los 5 días, los valores disminuyeron aún más en el esquema A, llegando a 2.0 mg/l, mientras que el esquema B mantuvo el mismo valor. A los 7 días, el esquema A mostró un ligero aumento a 9.0 mg/l, mientras que el esquema B alcanzó 7.0 mg/l. A partir de los 9 días, los valores se estabilizaron en ambos esquemas, oscilando entre 7.0 mg/l y 10.0 mg/l. Estos resultados indican que ambos esquemas son efectivos para la remoción de sólidos suspendidos, con el esquema A mostrando una mayor consistencia en tiempos prolongados.

Demanda Química de Oxígeno (DQO): El influente mostró una concentración de DQO de 189.0 mg/l, reflejando una carga orgánica elevada. A los 3 días, ambos esquemas lograron reducciones significativas, alcanzando 57.0 mg/l en el esquema A (reducción del 69.8%) y 23.0 mg/l en el esquema B (reducción del 87.8%). A los 5 días, el esquema A mantuvo un mejor desempeño con 18.0 mg/l, mientras que el esquema B mostró un leve aumento a 29.0 mg/l. A los 9 días, ambos esquemas lograron una remoción más eficiente, con valores de 8.0 mg/l en el esquema A y 12.0 mg/l en el esquema B. A partir de los 11 días, los valores oscilaron ligeramente hacia arriba. Esto demuestra que ambos esquemas son efectivos para reducir la carga orgánica, con el esquema B mostrando un rendimiento más consistente en tiempos intermedios.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅): El influente exhibió una concentración de DBO de 78.0 mg/l, indicando una carga biodegradable considerable. A los 3 días, ambos esquemas lograron reducciones importantes, alcanzando 14.0 mg/l en el esquema A (reducción del 82.1%) y 6.7 mg/l en el esquema B (reducción del 91.4%). A los 5 días, el esquema A mostró una mayor eficiencia con 5.2 mg/l, mientras que el esquema B alcanzó 7.8 mg/l. A los 9 días, el esquema A alcanzó su valor más bajo de 2.3 mg/l, representando una reducción del 97.1%, mientras que el esquema B llegó a 3.8 mg/l. A partir de los 11 días, los valores fluctuaron

ligeramente, con un mínimo de 4.8 mg/l en el esquema B y 6.5 mg/l en el esquema A. Estos resultados indican que ambos esquemas son altamente efectivos para la remoción de materia biodegradable.

Nitrógeno del amonio (NH_4^+): El influente inicial presentó una concentración de 16.0 mg/l, reflejando una carga significativa de nitrógeno amoniacal. A los 3 días, el esquema A logró reducirlo a 2.4 mg/l (reducción del 85.0%) y el esquema B a 1.0 mg/l (reducción del 93.8%). A los 5 días, ambos esquemas mantuvieron valores bajos, con 0.6 mg/l en el esquema A y 0.5 mg/l en el esquema B. A los 7 días, el esquema A presentó 0.7 mg/l, mientras que el esquema B aumentó ligeramente a 1.1 mg/l. A partir de los 11 días, ambos esquemas estabilizaron sus valores, alcanzando un mínimo de 0.4 mg/l en el esquema A y 0.7 mg/l en el esquema B a los 15 días. Estos resultados demuestran que ambos esquemas son efectivos en la remoción de nitrógeno amoniacal, con un rendimiento más consistente en el esquema A en tiempos prolongados.

Nitrógeno total (N): El influente mostró una concentración de 37.0 mg/l, indicando una carga elevada de nitrógeno total. A los 3 días, el esquema A logró reducirlo a 7.0 mg/l (reducción del 81.1%) y el esquema B a 2.0 mg/l (reducción del 94.6%). A partir de los 5 días, ambos esquemas alcanzaron valores menores a 1.0 mg/l, manteniéndose así hasta los 15 días. Esto evidencia que ambos esquemas son altamente efectivos para la remoción de nitrógeno total, cumpliendo con los estándares de calidad del agua a partir de los 5 días.

Nitrógeno del nitrato (NO_3^-): El influente exhibió una concentración de 6.8 mg/l. A los 3 días, el esquema A lo redujo a 1.1 mg/l (reducción del 83.8%) y el esquema B a 0.6 mg/l (reducción del 91.2%). A los 5 días, el esquema A alcanzó su valor más bajo de 0.2 mg/l, mientras que el esquema B llegó a 0.4 mg/l. En tiempos prolongados, el esquema A mantuvo valores bajos, con un mínimo de 0.1 mg/l a los 11 días, mientras que el esquema B mostró ligeras oscilaciones, alcanzando 0.8 mg/l a los 15 días. Ambos esquemas son efectivos, destacándose el esquema A por su estabilidad en la remoción de nitratos.

Fósforo total (P): El influente presentó una concentración de 4.9 mg/l. A los 3 días, el esquema A logró reducirlo a 1.3 mg/l (reducción del 73.5%) y el esquema B a 0.9 mg/l (reducción del 81.6%). A los 5 días, ambos esquemas mostraron valores similares, con 0.6 mg/l en el esquema A y 0.9 mg/l en el esquema B. A los 15 días, el esquema A alcanzó un valor mínimo de 0.6 mg/l, mientras que el esquema B presentó 1.0 mg/l. Esto sugiere que ambos esquemas son efectivos para la remoción de fósforo total.

Ortofosfatos (P-PO_4): El influente mostró una concentración de 1.6 mg/l. A los 3 días, el esquema A logró reducirlo a 0.4

mg/l (reducción del 75.0%) y el esquema B a 0.3 mg/l (reducción del 81.3%). A los 5 días, ambos esquemas mostraron valores similares, con 0.2 mg/l en el esquema A y 0.3 mg/l en el esquema B. A partir de los 11 días, ambos esquemas estabilizaron sus valores en 0.2 mg/l, con ligeras oscilaciones en el esquema B. Esto indica que ambos sistemas son altamente efectivos para la remoción de ortofosfatos.

IV. CONCLUSIONES

La investigación comparó dos esquemas de humedales construidos (A y B) diseñados para el tratamiento de aguas residuales domésticas, evaluando su efectividad en la remoción de contaminantes bajo diferentes tiempos de retención hidráulica (TRH). El análisis incluyó parámetros fisicoquímicos y microbiológicos clave, con el objetivo de determinar su capacidad para cumplir con los estándares de calidad del agua de la República Dominicana.

Resultados relevantes

1. Reducción de coliformes totales y fecales
 - Ambos esquemas lograron reducciones significativas, superiores al 99.9%.
 - El esquema B alcanzó el cumplimiento normativo de <1,000 NMP/100 ml desde el día 9, mientras que el esquema A lo hizo a partir del día 11.
2. Oxígeno disuelto (OD)
 - Ambos esquemas incrementaron los niveles de OD de condiciones anóxicas (<1 mg/l) a valores adecuados (>8 mg/l). El esquema B lo hizo a partir de los 7 días y el esquema A a partir de los 9 días.
 - El esquema B mostró un desempeño ligeramente superior, con valores consistentes más altos.
3. Sólidos suspendidos (SS)
 - Se logró una reducción significativa de >97% en los primeros 5 días.
 - En tiempos prolongados, el esquema B mostró mayor estabilidad en el control de sólidos suspendidos.
4. Demanda química y bioquímica de oxígeno (DQO y DBO_5)
 - Ambos esquemas lograron reducciones de >88% en la DQO y DBO_5 .
 - El esquema A mostró un mayor desempeño en TRH de 3 a 9 días, mientras que el esquema B fue más eficiente en los tiempos de retención hidráulica de 11 a 15 días.
5. Nutrientes (nitrógeno y fósforo)
 - Ambos esquemas lograron remociones superiores al 90% para nitrógeno total, nitratos y fósforo total, cumpliendo consistentemente con los estándares normativos.

- El esquema A destacó por su desempeño en la remoción de fosforo total, mientras que el esquema B fue más eficiente en la remoción de nitrógeno total y nitrógeno del amonio.

Conclusión general

Ambos esquemas demostraron ser altamente eficaces en la remoción de contaminantes de aguas residuales domésticas y cumplen con los estándares de calidad del agua de la República Dominicana a partir de TRH óptimos. Sin embargo, el esquema B mostró ventajas en términos de estabilidad y velocidad en la reducción de coliformes, sólidos suspendidos y nitrógeno, mientras que el esquema A sobresalió en la remoción de la DBO₅, DQO y nutrientes específicos como el fósforo.

Recomendaciones

- Optar por el esquema B en zonas con requisitos estrictos de reducción microbiológica y estabilidad operativa.
- Considerar el esquema A para aplicaciones donde la remoción de nutrientes sea prioritaria.
- Optimizar el TRH según las características del influente y las metas específicas de tratamiento.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores de este trabajo desean agradecer al Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (MESCyT) de la República Dominicana, por el apoyo brindado al proyecto de investigación "Biosistema Natural para el Tratamiento de las Aguas Residuales de Origen Doméstico en República Dominicana" a través del Fondo Nacional para la Innovación y el Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDOCyT) 2022 (Código 2022-2B2-157).

REFERENCIAS

[1] J. Alcamo, "Water quality and its interlinkages with the Sustainable Development Goals," *Current Opinion in Environmental Sustainability*, vol. 36, pp. 126–140, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.11.005>

[2] N. Chen, J. Zhang, Z. Hu, Y. Wang, C. Ren, L. Zhang, G. Yang, X. Chen, and H. Liu, "Performance and mechanisms of reactive substrates in constructed wetlands: Emerging contaminant removal and greenhouse gas mitigation—A comprehensive review," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 69, Art. no. 106653, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106653>

[3] Q. Yuan, J. Lian, F. Yang, M. Shen, Y. Wang, Q. Kong, B. Chen, X. Cai, H. Tao, and H. Wu, "A systematic review on greenhouse gas emissions from constructed wetlands: Focusing on effects of planting strategies and emission reduction measures," *Journal of*

Water Process Engineering, vol. 69, Art. no. 106696, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106696>

- [4] J. Chen, S.-S. Liu, Q. Wu, W.-J. Huang, F. Yang, Y.-J. Wang, L.-X. He, G.-G. Ying, W.-L. Chen, and C.-E. Chen, "Removal, fate, and bioavailability of fluoroquinolone antibiotics in a phytoremediation system with four wetland plants: Combining dynamic DGT and traditional methods," *Science of The Total Environment*, vol. 881, Art. no. 163464, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163464>
- [5] V. A. R. Núñez, A. de J. M. Durán, R. V. S. Camacho, and J. Á. V. Cuello, "Impact of hydraulic retention time on the quality of treated effluents in a horizontal subsurface flow wetland," *Revista de Gestão Social e Ambiental (RGSA)*, vol. 19, no. 1, p. e010757, Jan. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n1-031>
- [6] C. Witthayaphrom, C. Chiemchaisri, W. Chiemchaisri, Y. Ogata, Y. Ebie, and T. Ishigaki, "Organic micro-pollutant removals from landfill leachate in horizontal subsurface flow constructed wetland operated in the tropical climate," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 38, Art. no. 101581, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101581>
- [7] D. M. DelValle-Borrero, J. R. Medina, and K. Fuentes, "Humedales artificiales flotantes y su valor paisajístico en ríos urbanos - Ciudad de Panamá," *Prisma Tecnológico*, vol. 13, no. 1, pp. 3–9, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33412/pri.v13.1.2871>
- [8] M. A. Arciniega Galaviz, J. A. Ávila Díaz, and P. Hernández Sandoval, "Evaluación de un humedal artificial piloto para el tratamiento de aguas residuales domésticas - Fitorremediación con *Eichhornia crassipes*," *Revista Ra Ximhai*, vol. 20, no. 3 Especial, pp. 17–37, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.35197/rx.20.03.2024.01.ma>
- [9] M. J. Romellón Cerino, E. Cocoltzi Vázquez, and G. López Ocaña, "Tratamiento de aguas residuales domésticas de una institución educativa por un sistema de humedales artificiales en serie," *Universita Ciencia*, vol. 11, no. 30, pp. 147–162, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7843244>
- [10] H. Wu, R. Wang, P. Yan, et al., "Constructed wetlands for pollution control," *Nature Reviews Earth & Environment*, vol. 4, pp. 218–234, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00395-z>
- [11] J. Vymazal, "Constructed wetlands for wastewater treatment," *Water*, vol. 2, no. 3, pp. 530–549, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/w2030530>
- [12] F. D. Moreira and E. H. O. Dias, "Constructed wetlands applied in rural sanitation: A review," *Environmental Research*, vol. 190, Art. no. 110016, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110016>