

# Evaluation of the Efficiency of a Subsurface Flow Wetland in Contaminant Removal: Results on the Impact of Hydraulic Retention Time

Vladimir Antonio Rodríguez-Núñez<sup>1</sup>; Atuey de Jesús Martínez Durán<sup>2</sup>

Rainier Vicente Sánchez Camacho<sup>3</sup>; José Ángel Vásquez Cuello<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup>Universidad Tecnológica de Santiago, UTESA, República Dominicana, [sostenibilidad@utesa.edu](mailto:sostenibilidad@utesa.edu), [atueymartinez@utesa.edu](mailto:atueymartinez@utesa.edu)

<sup>3</sup>*Instituto Superior de Formación Docente Salomé Ureña, ISFODOSU, República Dominicana*, [rainiersan76@gmail.com](mailto:rainersan76@gmail.com)

<sup>4</sup>Universidad Tecnológica de Santiago, UTESA, República Dominicana, [josevasquez23@alumno.utesa.edu](mailto:josevasquez23@alumno.utesa.edu)

**Abstract** – This study provides valuable insights into the behavior and performance of a subsurface flow wetland, offering a solid foundation for optimizing the design and operation of similar systems for environmentally sustainable wastewater treatment. The system's efficiency in removing various contaminants was evaluated, considering different hydraulic retention times (HRT) ranging from 3 to 15 days. A total of 24 water samples were collected for analysis. The evaluated parameters included total and fecal coliforms, hydrogen potential (pH), turbidity, color, dissolved oxygen, suspended solids, temperature, chemical oxygen demand (COD), and biochemical oxygen demand (BOD<sub>5</sub>). Additionally, nutrients such as total nitrogen, ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, total phosphorus, and orthophosphates were analyzed. The results provide an understanding of the HRT's impact on effluent quality improvement and help identify the optimal retention time to maximize treatment efficiency in this type of system.

**Keywords** – subsurface flow wetland, wastewater treatment, hydraulic retention time (HRT), contaminant removal, effluent quality.

# Evaluación de la eficiencia de un Humedal de Flujo Subsuperficial en la remoción de contaminantes: Resultados del Impacto del Tiempo de Retención Hidráulica

Vladimir Antonio Rodríguez-Núñez<sup>1</sup>; Atuey de Jesús Martínez Durán<sup>2</sup>

Rainier Vicente Sánchez Camacho<sup>3</sup>; José Ángel Vásquez Cuello<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup>Universidad Tecnológica de Santiago, UTESA, República Dominicana, sostenibilidad@utesa.edu, atueymartinez@utesa.edu

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

<sup>4</sup>Universidad Tecnológica de Santiago, UTESA, República Dominicana, josevasquez23@alumno.utesa.edu

**Resumen**— Este estudio proporciona información valiosa sobre el comportamiento y desempeño de un humedal de flujo subsuperficial, y ofrece una base sólida para optimizar el diseño y operación de sistemas similares en la gestión ambientalmente sostenible del tratamiento de aguas residuales. Se evaluó la eficiencia del sistema en la remoción de diversos contaminantes, considerando distintos tiempos de retención hidráulica (TRH), que oscilaron entre 3 y 15 días. Se recolectaron un total de 24 muestras de agua para su análisis. Los parámetros evaluados incluyen coliformes totales y fecales, potencial de hidrógeno (pH), turbidez, color, oxígeno disuelto, sólidos suspendidos, temperatura, demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>). Además, se analizaron nutrientes como nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, nitrógeno en forma de nitrato, fósforo total y ortofosfatos. 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 sistema.

**Palabras clave**--humedal de flujo subsuperficial, tratamiento de aguas residuales, tiempo de retención hidráulica (TRH), remoción de contaminantes, calidad del efluente.

## I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua es uno de los problemas ambientales más críticos a nivel global, ya que afecta tanto a los ecosistemas acuáticos como a la salud humana. De hecho, la falta de saneamiento adecuado afecta a al menos 4,500 millones de personas [1]. Incluso en países con alta cobertura de instalaciones de saneamiento modernas, el diseño deficiente y la falta de compromiso para mantener la infraestructura generan contaminación masiva, especialmente a través de la descarga de aguas residuales en cuerpos de agua superficiales y subterráneos [2]. La República Dominicana no es una excepción. Estudios realizados en la provincia de Santiago han demostrado que la rápida urbanización, la expansión industrial y el crecimiento demográfico han aumentado significativamente las demandas sobre los sistemas de gestión de agua y residuos [3]. Actualmente, la provincia de Santiago solo cuenta con un 20% de cobertura en el tratamiento de aguas residuales en relación con la cantidad total de aguas

residuales generadas [4]. Esto resalta la urgencia de mejorar la infraestructura y el manejo de los recursos hídricos para mitigar los impactos negativos sobre la salud pública y el medio ambiente.

En este contexto, los humedales artificiales, y en particular los humedales de flujo subsuperficial, han emergido como una alternativa efectiva y sostenible para el tratamiento de aguas residuales. Varios estudios han demostrado que los humedales artificiales pueden reducir de manera efectiva la concentración de contaminantes en las aguas residuales domésticas. Además, estos sistemas también han mostrado un notable potencial en el tratamiento de aguas residuales industriales [5], efluentes mineros [6], efluentes municipales [7], aguas residuales hospitalarias [8] y aguas residuales agrícolas [9].

Los humedales se han convertido en una tecnología importante en el tratamiento de las aguas residuales, ofreciendo soluciones sostenibles y efectivas. La degradación de los contaminantes involucra mecanismos complejos, incluyendo la absorción, sorción, precipitación, hidrólisis y degradación microbiana [10]. Estos sistemas imitan los procesos naturales de depuración mediante la interacción entre el agua, los microorganismos, el sustrato y la vegetación, permitiendo la eliminación de contaminantes de manera eficiente y con un bajo costo de operación y mantenimiento.

El objetivo de esta investigación es evaluar la eficiencia de un humedal de flujo subsuperficial en la remoción de diversos contaminantes presentes en el agua residual y determinar el impacto de distintos tiempos de retención hidráulica (TRH), que oscilaron entre 3 y 15 días en la calidad del efluente tratado. Se consideraron diversos parámetros de calidad del agua, incluyendo coliformes totales y fecales, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), nitrógeno del amonio, ortofosfatos, turbidez, color, sólidos suspendidos, pH y otros nutrientes. La investigación se enmarca en la necesidad de cumplir con los límites establecidos por la Norma Dominicana Ambiental

sobre Control de Descargas a Aguas Superficiales, Alcantarillado Sanitario y Aguas Costeras.

A través de esta evaluación, se busca no solo optimizar el diseño y operación del humedal, sino también contribuir al desarrollo de tecnologías de tratamiento de aguas residuales que sean sostenibles y adaptables a diferentes condiciones ambientales. Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa para la mejora continua de estos sistemas, asegurando su eficiencia y cumplimiento normativo en el contexto de la República Dominicana y otros países.

## 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

Un humedal de flujo subsuperficial construido en una estructura rectangular en bloques de concreto con las superficies laterales y de fondo impermeabilizada 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 substrato y del agua, así como a la eliminación de nutrientes del agua residual y al desarrollo de la biopelícula.

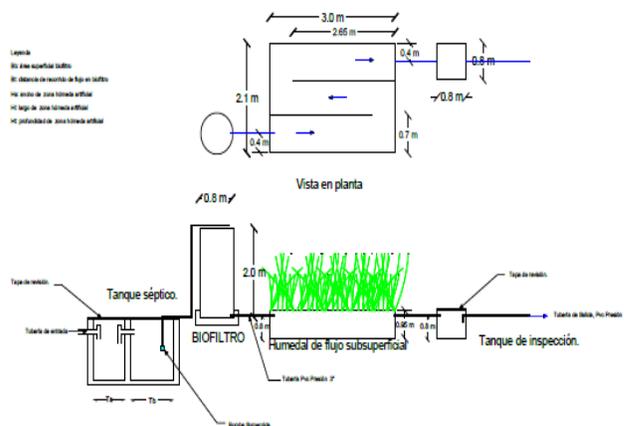


Figura 1. Esquema A para el tratamiento de las aguas residuales

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 substrato 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 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 m<sup>2</sup>. 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 m<sup>3</sup> 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. El objetivo es identificar el tiempo de retención óptimo que maximiza la depuración sin sobrecargar el sistema. El Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) se refiere al tiempo promedio durante el cual el agua residual permanece en el sistema de tratamiento antes de ser efluente.

### Muestreo y análisis

El tiempo de retención hidráulica (TRH) del sistema se ajustó a intervalos de tres (3), cinco (5), siete (7), nueve (9), once

(11), trece (13) y quince (15) días. Se llevó a cabo un monitoreo tanto del influente como del efluente en cada intervalo de Tiempo de Retención Hidráulico (TRH). Este procedimiento 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.

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 <sub>5</sub>	mg/l	SM-5210-B
Nitrógeno del Amonio	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/l	SM-4500-NH3
Nitrógeno Total	N	mg/l	SM-4500-N-C
Nitrógeno del Nitrato	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	SM-4500-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -E
Fósforo Total	P	mg/l	SM-4500-P-C
Ortofosfatos	P-PO <sub>4</sub>	mg/l	SM-4500-P

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se evaluó la eficiencia del humedal de flujo subsuperficial 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 del sistema de tratamiento de aguas residuales, experimentación I.

Parámetro	Unidad	Influente	Valores de efluentes según el tiempo de retención hidráulica						
			3 días	5 días	7 días	9 días	11 días	13 días	15 días
Coliformes totales	NMP/100ml	16,000.00	22,000	13,000	4,900	2,400	240.0	240.0	240.0
Coliformes fecales	NMP/100ml	16,000.00	17,000	13,000	4,900	1,300	240.0	240.0	240.0
Potencial de Hidrógeno	-	7.7	7.7	7.7	7.8	8.2	8.3	7.9	8.2
Turbidez	NTU	168.5	6.0	5.0	3.0	5.0	48.0	15.0	6.0
Color	U. Pt-Co	730.5	19.0	13.0	14.0	18.0	22.0	5.0	3.0
Oxígeno Disuelto	mg/l	0.4	1.0	2.8	7.8	10.8	12.3	8.6	13.0
Sólidos Suspendidos	mg/l	642.5	40.0	4.0	5.0	13.0	15.0	13.0	5.0
Temperatura	° C	26.6	31.0	31.1	29.3	31.3	29.6	28.7	29.7
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	505.0	57.0	16.0	22.0	25.0	37.0	27.0	28.0
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	151.5	16.8	4.7	5.5	7.5	8.9	6.6	7.9
Nitrógeno del Amonio	mg/l	61.0	8.4	7.9	0.7	0.7	0.4	0.4	0.1
Nitrógeno Total	mg/l	105.0	19.0	11.0	2.0	2.0	1.0	<1.0	<1.0
Nitrógeno del Nitrato	mg/l	7.4	1.9	1.6	0.9	0.8	0.6	0.4	0.3
Fósforo Total	mg/l	6.3	1.8	0.7	1.0	0.7	0.8	0.7	0.6
Ortofosfatos	mg/l	2.5	0.6	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2

El influente que ingresa al sistema de tratamiento de aguas residuales presenta características típicas de un agua altamente contaminada, lo que se refleja en la elevada carga orgánica y microbiológica. Los niveles de coliformes totales y fecales alcanzan valores de 16,000,000 NMP/100 ml, que indica una contaminación fecal significativa, comúnmente asociada a aguas residuales domésticas. Este alto contenido de microorganismos patógenos subraya la necesidad crítica de un proceso de tratamiento efectivo para proteger la salud pública y los ecosistemas acuáticos. Además, el influente presenta una demanda química de oxígeno (DQO) de 505 mg/l y una demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) de 151.5 mg/l, lo que señala una alta concentración de materia orgánica que requiere de un tratamiento adecuado para prevenir la desoxigenación de cuerpos de agua receptores y, consecuentemente, la pérdida y/o disminución de la vida acuática.

En términos de nutrientes, el influente contiene 61 mg/l de nitrógeno del amonio y 2.5 mg/l de ortofosfatos, ambos valores indicativos de una potencial contribución a procesos de eutrofización en ambientes acuáticos si no se realiza un

tratamiento apropiado al agua residual. La turbidez del agua residual influente, con un valor de 168.5 NTU, sugiere la presencia de sólidos suspendidos y otras partículas que afectan la claridad del agua. Este parámetro, junto con los sólidos suspendidos totales que alcanzan los 642.5 mg/l, contribuye al deterioro de la calidad del agua y requiere una reducción significativa durante el tratamiento. Por último, el influente muestra un color de 730.5 U. Pt-Co, lo que evidencia una elevada concentración de sustancias disueltas que pueden incluir compuestos orgánicos e inorgánicos. Estas características del influente plantean un desafío para el sistema de tratamiento, que debe ser capaz de reducir eficazmente todos estos contaminantes para cumplir con los límites establecidos por las normativas ambientales dominicanas.

A pesar de las elevadas concentraciones de contaminantes presentes en el influente, el humedal de flujo subsuperficial ha demostrado ser eficaz en la reducción significativa de estos parámetros a lo largo de los distintos tiempos de retención hidráulica (TRH). A medida que el agua residual pasa por el sistema, los coliformes totales y fecales, así como otros indicadores de contaminación orgánica y nutrientes, experimentan una disminución drástica. Esta transición del influente al efluente revela el impacto del tratamiento en la mejora de la calidad del agua, cumpliendo con los estándares establecidos por las normativas ambientales dominicanas y asegurando un efluente seguro para su liberación en cuerpos de agua receptores.

#### Coliformes Totales y Fecales:

El comportamiento de los coliformes totales y fecales a lo largo del tiempo de retención hidráulica (TRH) muestra una disminución significativa en su concentración, lo que refleja la eficiencia del sistema del humedal de flujo subsuperficial en la eliminación de microorganismos patógenos. El influente presentó concentraciones iniciales extremadamente elevadas de 16,000,000 NMP/100 ml. A los 3 días de TRH, los coliformes totales se redujeron a 22,000 NMP/100 ml y los fecales a 17,000 NMP/100 ml. Esta tendencia continuó de manera sostenida, alcanzando concentraciones de 240 NMP/100 ml tanto para coliformes totales como fecales a partir de los 11 días de TRH, manteniéndose constante hasta los 15 días. Estos valores están por debajo del límite máximo permitido de la Norma Dominicana Ambiental (1,000 NMP/100 ml), lo que indica que el sistema es eficaz para el tratamiento microbiológico del agua residual.

#### Potencial de Hidrógeno (pH), Turbidez y Color:

El potencial de hidrógeno (pH) en el efluente se mantuvo dentro del rango establecido por la normativa (6.0 a 8.5) en todos los tiempos de retención evaluados, con valores que oscilan entre 7.7 y 8.3, lo que indica que el sistema es capaz de neutralizar el agua tratada de manera efectiva. En cuanto a la turbidez, se observó una reducción significativa desde 168.5

NTU en el influente hasta 3.0 NTU a los 7 días de TRH. Sin embargo, a los 11 días se observó un aumento notable a 48.0 NTU, posiblemente debido a la liberación de partículas acumuladas en el medio filtrante, para luego disminuir nuevamente a 6.0 NTU a los 15 días. El color también mostró una disminución drástica de 730.5 U. Pt-Co en el influente a 19.0 U. Pt-Co a los 3 días de TRH y a los 15 días de TRH 3.0 U. Pt-Co, lo que sugiere que el sistema es eficaz en la eliminación de sustancias colorantes presentes en el agua residual.

#### Demanda Química y Bioquímica de Oxígeno (DQO y DBO<sub>5</sub>) y Nutrientes:

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) del efluente disminuyeron de manera significativa con el aumento del TRH. La DQO pasó de 505 mg/l en el influente a 16 mg/l a los 5 días de TRH, mientras que la DBO<sub>5</sub> se redujo de 151.5 mg/l a 4.7 mg/l en el mismo periodo, manteniéndose por debajo de los límites normativos (130 mg/l para DQO y 35 mg/l para DBO<sub>5</sub>) en todos los tiempos de retención monitoreados. En relación a los nutrientes, el nitrógeno del amonio disminuyó de 61.0 mg/l en el influente a 8.4 mg/l a los 3 días y a 0.1 mg/l a los 15 días de TRH, mientras que los ortofosfatos se redujeron de 2.5 mg/l a 0.6 mg/l a los 3 días y se mantuvo por debajo de 0.3 mg/l a partir de los 5 días, lo que indica una alta eficiencia del sistema en la remoción de nutrientes. Estos resultados destacan la capacidad del humedal de flujo subsuperficial para tratar eficientemente tanto la materia orgánica como los nutrientes presentes en el agua residual, cumpliendo con los estándares de calidad establecidos.

El análisis de los porcentajes de disminución al tiempo de retención hidráulica (TRH) mínimo que cumple con las normativas dominicanas de calidad de efluentes demuestra la eficiencia del sistema de humedal de flujo subsuperficial en la remoción de contaminantes. Los coliformes totales y fecales experimentan una reducción extrema, alcanzando un 99.9985% de disminución a un TRH de 11 días, lo que subraya la efectividad del sistema en la eliminación de microorganismos patógenos. Este alto nivel de depuración es crucial para garantizar la seguridad sanitaria del agua tratada y cumplir con los límites máximos permitidos establecidos en la normativa ambiental.

Por otro lado, la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) muestran una disminución significativa del 88.71% y 88.91%, respectivamente, con un TRH mínimo de 3 días. Esto indica que el sistema es capaz de reducir de manera efectiva la carga orgánica presente en el agua residual en un tiempo relativamente corto. En cuanto a los nutrientes, el nitrógeno del amonio presenta una notable disminución del 98.85% al TRH de 7 días, mientras que los ortofosfatos logran una

reducción del 92% a los 5 días. Estos resultados reflejan la capacidad del sistema para reducir de manera eficiente los compuestos de nitrógeno y fósforo, que son responsables de la eutrofización en cuerpos de agua. En conjunto, los datos demuestran que el humedal de flujo subsuperficial es una tecnología viable y eficaz para el tratamiento de aguas residuales, con un rendimiento que varía según el parámetro en cuestión y el TRH aplicado.

## Experimentación II

Tabla 3 Características fisicoquímicas y microbiológicas del sistema de tratamiento de aguas residuales, experimentación II.

Parámetro	Unidad	Influyente	Valores de efluentes según el tiempo de retención hidráulica						
			3 días	5 días	7 días	9 días	11 días	13 días	15 días
Coliformes totales	NMP/100ml	5,800,000	13,000	2,400	1,700	170.0	790.0	490.0	790.0
Coliformes fecales	NMP/100ml	5,800,000	13,000	2,400	790.0	130.0	490.0	490.0	490.0
Potencial de Hidrógeno	-	6.6	7.3	7.7	8.0	8.3	7.7	7.6	8.1
Turbidez	NTU	309.0	24.0	3.0	7.0	17.0	15.0	21.0	27.0
Color	U. Pt-Co	475.3	10.0	9.0	11.0	11.0	10.0	14.0	10.0
Oxígeno Disuelto	mg/l	1.1	3.4	10.9	8.2	12.9	9.4	11.1	9.2
Sólidos Suspendedos	mg/l	729.3	28.0	4.0	3.0	10.0	10.0	18.0	15.0
Temperatura	° C	27.0	29.3	29.1	29.8	29.1	26.7	26.8	28.9
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	448.5	58.0	29.0	30.0	30.0	27.0	30.0	25.0
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	203.5	18.0	7.6	6.8	8.5	7.9	7.8	6.7
Nitrógeno del Amonio	mg/l	58.5	2.6	0.4	0.4	1.4	0.3	0.7	0.7
Nitrógeno Total	mg/l	127.5	5.0	1.0	1.0	4.0	<1.0	3.0	<1.0
Nitrógeno del Nitrato	mg/l	7.7	1.3	0.7	0.5	2.1	0.4	1.4	0.4
Fósforo Total	mg/l	10.3	0.6	0.9	0.5	1.0	0.6	0.9	0.9
Ortofosfatos	mg/l	3.4	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3

El influente que ingresa al humedal de flujo subsuperficial, presenta características típicas de un agua residual contaminada, evidenciadas por la elevada carga microbiológica y orgánica. Además, la alta Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) de 203.5 mg/l y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 448.5 mg/l reflejan una considerable presencia de materia orgánica biodegradable, que requiere de un tratamiento intensivo para evitar la desoxigenación en cuerpos de agua receptores y preservar la calidad ambiental.

En términos de características físicas y químicas, el influente subraya la necesidad de un proceso de tratamiento eficiente para reducir significativamente la carga contaminante antes de que el agua tratada pueda ser liberada al medio ambiente, ya que la presencia excesiva de materia orgánica y nutrientes puede estimular el crecimiento desmedido de algas y plantas

acuáticas en los cuerpos receptores, alterando el equilibrio ecológico y reduciendo la calidad del agua de los mismos.

El análisis de los datos obtenidos en relación con los coliformes totales y fecales evidencia una reducción significativa en sus concentraciones a lo largo de los diferentes tiempos de retención hidráulica (TRH). El influente inicial presentaba concentraciones altas, con 5,800,000 NMP/100 ml tanto para coliformes totales como fecales. Después de 3 días de TRH, se observó una reducción considerable, alcanzando 13,000 NMP/100 ml en ambos casos. A los 9 días, las concentraciones de coliformes totales se redujeron a 170 NMP/100 ml, mientras que los coliformes fecales disminuyeron a 130 NMP/100 ml. Sin embargo, se observó un ligero aumento en las concentraciones a los 11 y 15 días, posiblemente debido a la recontaminación o liberación de bacterias del sustrato. Estos resultados indican que el sistema de humedal de flujo subsuperficial es efectivo en la eliminación de microorganismos patógenos, especialmente durante los primeros 11 días de tratamiento.

En cuanto al comportamiento de la turbidez y el color, los resultados muestran una disminución considerable en ambos parámetros durante los primeros días de tratamiento. La turbidez del influente, que inicialmente era de 309 NTU, se redujo a 3 NTU a los 5 días de TRH, lo que refleja una eficiencia significativa en la remoción de sólidos suspendidos y otras partículas que afectan la claridad del agua. Sin embargo, se observa un aumento gradual de la turbidez a partir del séptimo día, alcanzando 27 NTU a los 15 días, lo que podría indicar una acumulación de partículas en el sistema o la liberación de material del medio filtrante. El color, por otro lado, mostró una reducción más estable, pasando de 475.3 U. Pt-Co en el influente a 10 U. Pt-Co a los 3 días, manteniéndose cerca de este valor durante todo el período de retención evaluado. Esto sugiere que el sistema es eficaz en la eliminación de sustancias colorantes, aunque la estabilidad en los valores de color indica que los componentes responsables del color en el agua residual son removidos consistentemente a lo largo del tratamiento.

Por último, el análisis de los parámetros de oxígeno disuelto (OD), demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) demuestra una mejora significativa en la calidad del agua tratada. El oxígeno disuelto aumentó considerablemente desde 1.1 mg/l en el influente hasta alcanzar 12.9 mg/l a los 9 días de TRH, lo que indica una mejora en la capacidad de soporte de vida acuática y una reducción de la demanda de oxígeno en el cuerpo receptor. La DQO y la DBO<sub>5</sub> también experimentaron reducciones notables, con la DQO disminuyendo de 448.5 mg/l en el influente a 29 mg/l a los 5 días, y la DBO<sub>5</sub> reduciéndose de 203.5 mg/l a 7.6 mg/l en el mismo intervalo de tiempo. Estos resultados resaltan la eficiencia del humedal en la remoción de

materia orgánica y la mejora de la calidad del efluente, cumpliendo con los estándares ambientales dominicanos para la descarga de aguas residuales tratadas.

El análisis de los porcentajes de disminución al tiempo de retención hidráulica (TRH) mínimo que cumple con las normativas ambientales revela la efectividad del sistema de humedal de flujo subsuperficial para la eliminación de contaminantes en aguas residuales. Los coliformes totales y fecales, indicadores clave de contaminación microbiológica, muestran reducciones drásticas de 99.9971% y 99.9978% respectivamente, alcanzadas a un TRH de 9 días. Estos resultados demuestran que el sistema es eficiente en la eliminación de microorganismos patógenos, asegurando que el efluente tratado cumpla con los estándares de seguridad para la protección de la salud pública y los ecosistemas acuáticos.

Por otro lado, los parámetros relacionados con la materia orgánica, como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), también presentan reducciones significativas con TRH mínimos de 3 y 5 días respectivamente, logrando disminuciones del 91.16% y 93.53%. Los nutrientes, especialmente el nitrógeno del amonio y el nitrógeno total, alcanzan una reducción del 99.32% y 99.22% en TRH de 5 días, lo que evidencia la capacidad del sistema para prevenir la eutrofización en cuerpos de agua receptores. En conjunto, estos resultados subrayan la capacidad del humedal de flujo subsuperficial para tratar eficientemente tanto la contaminación microbiológica como la orgánica, asegurando que el efluente tratado cumpla con los requisitos normativos en un tiempo de tratamiento relativamente corto.

### Experimentación III

Tabla 4 Características fisicoquímicas y microbiológicas del sistema de tratamiento de aguas residuales, experimentación III.

Parámetro	Unidad	Influente	Valores de efluentes según el tiempo de retención hidráulica						
			3 días	5 días	7 días	9 días	11 días	13 días	15 días
Coliformes totales	NMP/100ml	790,000	790.0	240.0	2,400.0	2,400.0	78.0	330.0	330.0
Coliformes fecales	NMP/100ml	790,000	790.0	240.0	1,300.0	1,300.0	78.0	330.0	330.0
Potencial de Hidrógeno	-	7.6	8.0	7.7	8.6	6.9	8.4	7.9	8.1
Turbidez	NTU	116.0	26.0	5.0	3.0	2.0	4.0	6.0	11.0
Color	U. Pt-Co	257.0	15.0	2.0	5.0	2.0	4.0	5.0	6.0
Oxígeno Disuelto	mg/l	1.6	8.1	7.3	18.9	7.9	20.0	16.0	20.0
Sólidos Suspendidos	mg/l	234.0	13.5	2.0	9.0	2.0	8.0	10.0	8.0
Temperatura	°C	25.9	29.6	28.1	31.0	31.5	32.1	33.0	32.5
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	189.0	57.0	18.0	49.0	8.0	25.5	27.0	29.0
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	78.0	14.0	5.2	11.0	2.3	8.5	7.2	9.1
Nitrógeno del Amonio	mg/l	16.0	2.4	0.6	0.7	0.4	0.8	0.7	0.4

Nitrógeno Total	mg/l	37.0	7.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
Nitrógeno del Nitrato	mg/l	6.8	1.1	0.2	0.8	0.7	0.1	0.4	0.1
Fósforo Total	mg/l	4.9	1.3	0.6	1.6	0.9	0.7	0.6	0.6
Ortofosfatos	mg/l	1.6	0.4	0.2	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2

En el experimento III, el influente que ingresa al sistema de tratamiento de aguas residuales se caracteriza por tener, en general, un menor valor de carga de contaminantes que los influentes correspondientes a las experimentaciones I y II. Los coliformes totales y fecales alcanzan concentraciones en el orden de 790,000 NMP/100 ml, lo que indica una contaminación microbiológica y la presencia de patógenos que pueden representar un riesgo significativo para la salud pública. Además, la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) presentan valores de 189 mg/l y 78 mg/l, respectivamente, lo que evidencia una considerable concentración de materia orgánica biodegradable en el agua influente. Esta considerable carga orgánica puede provocar la desoxigenación de los cuerpos de agua receptores, contribuyendo a la degradación de los ecosistemas acuáticos.

Adicionalmente, el influente muestra altos niveles de turbidez (116 NTU) y sólidos suspendidos (234 mg/l), lo que sugiere la presencia de una considerable cantidad de partículas sólidas que afectan la claridad del agua y pueden transportar contaminantes adsorbidos en su superficie. El color del influente, con un valor de 257 U. Pt-Co, indica la presencia de sustancias disueltas, como compuestos orgánicos e inorgánicos, que contribuyen al deterioro de la calidad visual del agua. En términos de nutrientes, el nitrógeno del amonio y el fósforo total se presentan en concentraciones de 16 mg/l y 4.9 mg/l, respectivamente, lo que podría favorecer la eutrofización de cuerpos de agua si no se realiza un tratamiento adecuado. Estas características del influente subrayan la necesidad de un sistema de tratamiento eficiente que pueda reducir significativamente la carga de contaminantes antes de que el agua sea descargada en el medio ambiente.

El sistema de tratamiento de aguas residuales implementado mostró una notable reducción en la concentración de coliformes totales y fecales a lo largo de los diferentes tiempos de retención hidráulica (TRH). El influente presentaba una elevada carga microbiológica con 790,000 NMP/100 ml tanto de coliformes totales como fecales. A los 3 días de TRH, ambas concentraciones se redujeron significativamente a 790 NMP/100 ml, alcanzando los valores más bajos a los 11 días con 78 NMP/100 ml, antes de experimentar un ligero aumento hasta 330 NMP/100 ml en los días posteriores. Estos resultados indican que el sistema es más eficiente en la reducción de la carga microbiológica durante los primeros 9 días de tratamiento, lo que podría estar relacionado con la capacidad del sustrato y la vegetación para filtrar y eliminar

patógenos, alcanzando niveles que cumplen con las normativas de calidad para el agua tratada.

En términos de las propiedades físicas del agua tratada, la turbidez y el color mostraron reducciones significativas. La turbidez del influente era de 116 NTU, pero se redujo a un mínimo de 2 NTU a los 9 días de TRH. Sin embargo, se observó un leve incremento en la turbidez hasta 11 NTU a los 15 días, lo que podría deberse a la liberación de partículas atrapadas en el medio filtrante con el tiempo. Similarmente, el color disminuyó de 257 U. Pt-Co en el influente a un mínimo de 2 U. Pt-Co a los 9 días, manteniéndose en valores bajos en los días siguientes. Estas reducciones indican que el sistema de humedal es eficaz en la eliminación de sólidos y compuestos que afectan la apariencia del agua, mejorando así su calidad visual y física.

Los parámetros relacionados con la materia orgánica, como la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), también reflejaron una disminución significativa. La DQO del influente, que era de 189 mg/l, se redujo a 18 mg/l a los 5 días de TRH, antes de estabilizarse en un rango de 25.5 a 29 mg/l en los días posteriores. De manera similar, la DBO<sub>5</sub> se redujo de 78 mg/l a 5.2 mg/l en el mismo periodo, manteniéndose baja hasta los 15 días. Estos resultados demuestran la efectividad del sistema en la reducción de la carga orgánica, lo que es esencial para evitar la desoxigenación de los cuerpos de agua receptores.

Por último, los nutrientes como el nitrógeno del amonio y el fósforo total también mostraron reducciones sustanciales. El nitrógeno del amonio disminuyó de 16 mg/l en el influente a 0.6 mg/l a partir de los 5 días de TRH, mientras que el fósforo total se redujo de 4.9 mg/l a 0.6 mg/l para el mismo periodo. Estas reducciones indican que el humedal de flujo subsuperficial no solo es eficaz en la eliminación de contaminantes microbiológicos y orgánicos, sino también en la remoción de nutrientes, lo que es crucial para prevenir la eutrofización en cuerpos de agua naturales. En conjunto, estos resultados destacan la capacidad del sistema para tratar eficazmente una variedad de contaminantes presentes en el agua residual, con una eficiencia que varía según el parámetro y el tiempo de retención aplicado.

#### IV. CONCLUSIONES

La presente investigación ha mostrado que el tiempo de retención hidráulica (TRH) es un factor crítico en la eficiencia del sistema para la remoción de diversos contaminantes. A medida que el TRH aumenta, se observan mejoras significativas en la calidad del efluente. Sin embargo, el TRH óptimo varía según el tipo de contaminante, lo que sugiere la necesidad de ajustes específicos en el TRH dependiendo de las características del influente y los objetivos de tratamiento.

El análisis de los datos obtenidos de los tres conjuntos de experimentación ha permitido identificar los TRH mínimos requeridos para que cada parámetro cumpla con la norma dominicana ambiental:

**Coliformes Totales y Fecales:** Se logró una reducción significativa en ambos parámetros con un TRH de 11 días, alcanzando concentraciones por debajo del límite permitido de 1000 NMP/100 ml. Esto demuestra que un TRH de 11 días es el mínimo necesario para asegurar el cumplimiento normativo en cuanto a la calidad microbiológica del agua tratada.

**Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>):** Para la DQO, se encontró que un TRH de 3 días es suficiente para reducir la concentración por debajo del límite normativo de 130 mg/l. Para la DBO<sub>5</sub>, un TRH de 3 días también resultó eficaz, con una concentración promedio de 16.3 mg/l, muy por debajo del límite de 35 mg/l. Estos resultados indican que un TRH de 3 días es el mínimo necesario para cumplir con los estándares de calidad en términos de oxígeno demandado.

**Nutrientes (Nitrógeno del Amonio, Nitrógeno Total, Nitrógeno del Nitrato, Fósforo Total y Ortofosfatos):** Los resultados indican una alta eficiencia del humedal de flujo subsuperficial en la remoción de nutrientes clave, alcanzando niveles muy bajos que cumplen con los límites establecidos por la normativa ambiental. Las reducciones porcentuales de contaminación son significativas en todos los parámetros analizados, especialmente para el Nitrógeno del Amonio y el Nitrógeno Total, donde se alcanzan reducciones superiores al 90% en los primeros días de tratamiento. La reducción del Nitrógeno del Amonio y del Nitrógeno Total alcanzan más del 90% en solo 3 días y superando el 99% en 15 días. La reducción del Nitrógeno del Nitrato es algo más lenta, con una disminución de poco más del 80% en 3 días, alcanzando un 95.9% en 15 días. La remoción de Fósforo Total y Ortofosfatos es muy efectiva desde los primeros días, con una reducción del 83 % en 3 días y más del 90% en 15 días.

**Otros Parámetros (Turbidez, Color, Sólidos Suspendidos y pH):** La mayor reducción de la turbidez se alcanza en los primeros 3 a 5 días. Sin embargo, después de los 7 días, se observan fluctuaciones, lo que podría deberse a la desestabilización de partículas suspendidas o la actividad microbiológica en el humedal. Al igual que la turbidez, el color muestra una gran reducción en los primeros días, alcanzando 8.0 U. Pt-Co a los 5 días. La eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos es alta durante los primeros días, superior al 90% y el pH se mantiene dentro del rango aceptable según la Norma Dominicana Ambiental (6.0 a 8.5) durante todo el periodo de tratamiento. Las pequeñas variaciones indican que el sistema no induce cambios drásticos en la acidez o alcalinidad del agua, lo que es beneficioso para

mantener un ambiente estable para los procesos biológicos en el humedal.

En resumen, los resultados indican que el humedal de flujo subsuperficial no solo es eficaz en la eliminación de contaminantes microbiológicos y orgánicos, sino también en la remoción de nutrientes, lo que es crucial para prevenir la eutrofización en cuerpos de agua naturales. En conjunto, los datos demuestran que el humedal de flujo subsuperficial es una tecnología viable y eficaz para el tratamiento de las aguas residuales, con un rendimiento que varía según el parámetro en cuestión y el TRH aplicado.

Como se observa, los coliformes totales y fecales son los parámetros analizados que requieren de un mayor tiempo de retención hidráulica para alcanzar el nivel de cumplimiento normativo (11 días). En este sentido, los valores de los restantes parámetros monitoreados (demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nitrógeno del amonio, nitrógeno de nitrato, nitrógeno total, fósforo total, ortofosfatos, turbidez, color, sólidos suspendidos, pH, oxígeno disuelto) cumplen con los valores normativos a los tres (3) días de TRH, por lo que si adicionalmente se dispone de un sistema de desinfección del efluente, se pudiese establecer un TRH de tres días para el tratamiento de las aguas residuales en este tipo de sistema.

#### 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] United Nations, "Achieving clean water and safe sanitation for all," \*United Nations\*, [Online]. Available: <https://www.un.org/es/desa/achieving-clean-water-and-safe-sanitation-all>. [Accessed: 23-Aug-2024].

[2] S. L. Wear, V. Acuña, R. McDonald, and C. Font, "Sewage pollution, declining ecosystem health, and cross-sector collaboration," *Biol. Conservation*, vol. 255, p. 109010, March 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109010>

[3] V. A. Rodríguez Núñez and F. Orgaz-Agüera, "Polluting Load From The City Of Santiago De Los Caballeros (Dominican Republic) To The Yaque Del Norte River. A longitudinal study," *LACCEI*, vol. 1, no. 8, 2023.

[4] V. A. Rodríguez-Núñez, F. Orgaz-Agüera, A. D. J. Martínez-Durán, and C. M. Domínguez-Valerio, "Estudio de la cobertura

de tratamiento de las aguas y lodos residuales en la provincia de Santiago, República Dominicana," *Proceedings of the 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI 2024)*, p. 182, 2024.

[5] M. Shehzadi, M. Afzal, M. U. Khan, E. Islam, A. Mobin, S. Anwar, and Q. M. Khan, "Enhanced degradation of textile effluent in constructed wetland system using *Typha domingensis* and textile effluent-degrading endophytic bacteria," *Water Research*, vol. 58, pp. 152-159, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.03.064>.

[6] O. C. Türker, H. Böcük, and A. Yakar, "The phytoremediation ability of a polyculture constructed wetland to treat boron from mine effluent," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 252-253, pp. 132-141, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.02.032>

[7] H.-L. Song, K. Nakano, T. Taniguchi, M. Nomura, and O. Nishimura, "Estrogen removal from treated municipal effluent in small-scale constructed wetland with different depth," *Bioresource Technology*, vol. 100, pp. 2945-2951, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.01.045>

[8] M. Alsubih, R. El Morabet, R. A. Khan, N. A. Khan, A. R. Khan, S. Khan, N. M. Mubarak, M. H. Dehghani, and L. Singh, "Field performance investigation for constructed wetland clubbed with tubesettler for hospital wastewater treatment," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 49, p. 103147, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103147>

[9] M. Wang, D. Zhang, J. Dong, and S. K. Tan, "Application of constructed wetlands for treating agricultural runoff and agro-industrial wastewater: a review," *Hydrobiologia*, vol. 805, pp. 1-31, 2018.

[10] T. Tian, Q. Yang, G. Wei, S. G. Cheung, P. K. S. Shin, Y. S. Wong, ... and N. F. Y. Tam, "Changes of substrate microbial biomass and community composition in a constructed mangrove wetland for municipal wastewater treatment during 10-years operation," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 155, p. 111095, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111095>