

Sucesión del perifiton e identificación de metabolitos como indicadores de degradación orgánica en una planta de tratamiento de aguas residuales

Yirley Angélica Rincón Blanquicet¹  

José Ismael Rojas Peña²  

Cristian David Ojeda García³  

Yair Leandro Zapata Muñoz⁴  

Juan Manuel Trujillo González⁵  

Marco Aurelio Torres Mora⁶  

Recibido: 14/10/2025 Aceptado: 9/02/2026 Actualizado: 04/08/2026

DOI: 10.17151/luaz.2026.63.6

Resumen

Las plantas de tratamiento de agua residual están expuestas a factores físicos y químicos que permiten el desarrollo de comunidades como el perifiton, gracias a los nutrientes presentes en el agua residual, importantes por su capacidad para absorber y transformar contaminantes. Este estudio permitió analizar la composición y sucesión de la comunidad perifítica en una planta de tratamiento de agua residual (PTAR) para evaluar la influencia de los factores fisicoquímicos en su desarrollo e identificar metabolitos clave de interés biológico en biorremediación. Para ello se instalaron sustratos artificiales en los biodigestores de una PTAR universitaria para monitorear la colonización durante 72 horas. Las muestras recolectadas se procesaron mediante técnicas microscópicas, análisis de cromatografía de gases y análisis de parámetros fisicoquímicos del agua. Los resultados obtenidos evidenciaron una sucesión con formación de biopelículas a las seis horas y consolidación de una comunidad perifítica a las 72 horas, evidenciando condiciones eutrofizadas que aceleran la sucesión perifítica dominada por cianobacterias, algas verdes, protozoos e invertebrados. Además, el análisis cromatográfico identificó metabolitos propios de procesos de descomposición que participan en el desarrollo del perifiton como el 3-metil-indol y el p-cresol. Estos resultados sumados a los valores reportados en las concentraciones de oxígeno disuelto, fósforos, nitritos y nitratos son indicativos de una intensa actividad microbiana, lo que demuestra que esta comunidad en su desarrollo dentro del sistema de la PTAR utiliza los compuestos contaminantes como fuente primaria para su establecimiento.

Palabras clave: agua residual, calidad de agua, eutrofización, metabolitos, sucesión ecológica

Succession of Periphyton and Identification of Metabolites as Indicators of Organic Degradation in a Wastewater Treatment Plant

Abstract

Wastewater treatment plants are exposed to physical and chemical factors that allow communities such as periphyton to develop, thanks to the nutrients present in the wastewater, which are important for their ability to absorb and transform contaminants. This study analyzed the composition and succession of the periphyton community at a wastewater treatment plant (WWTP) to evaluate the influence of physicochemical factors on its development and to identify key metabolites of biological interest in bioremediation. To this end, artificial substrates were installed in the biodigesters of a university-affiliated WWTP to monitor colonization over a 72-hour period. The collected samples were processed using microscopic techniques, gas chromatography analysis, and analysis of the water's physicochemical parameters. The results showed a succession process with biofilm formation at six hours and the establishment of a periphytic community at 72 hours, indicating eutrophic conditions that accelerate periphytic succession dominated by cyanobacteria, green algae, protozoa, and invertebrates. In addition, chromatographic analysis identified metabolites characteristic of decomposition processes involved in the development of periphyton, such as 3-methylindole and p-cresol. These results, combined with the reported values for dissolved oxygen, phosphorus, nitrites, and nitrates, are indicative of intense microbial activity, demonstrating that this community, as it develops within the WWTP system, uses pollutants as its primary source for establishment.

Keywords: wastewater, water quality, eutrophication, metabolites, ecological succession

Introducción

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) representan infraestructuras fundamentales para la mitigación del impacto ambiental resultante de las actividades humanas, al facilitar la eliminación de contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en las aguas residuales de origen doméstico, industrial y agropecuario (Akhtar et al., 2021; Al-Mawla et al., 2023; Orozco Jaramillo, 2014; Rathi et al., 2021; Saravanan et al., 2021). Con el incremento de la población y la

densificación de los centros urbanos, se ha intensificado la presión sobre los recursos hídricos. Esta situación también impacta a instituciones como los campus universitarios, donde el aumento transitorio de la población estudiantil causa descargas irregulares de aguas residuales (Lozano-Povis et al., 2023; Salazar-Larrota et al., 2019).

El sistema de reactor de *biofilm* de lecho móvil (*moving bed biofilm reactor*, MBBR) es una de las tecnologías más empleadas debido a su diseño compacto y eficiencia. Este sistema se fundamenta en el crecimiento de biomasa adherida a bioportadores denominados *biocarriers*, lo cual facilita los procesos de descomposición orgánica a través de consorcios microbianos (Leyva-Díaz et al., 2020; Madan et al., 2022; Castillo León y Duque Escobar, 2000). En estos sistemas, el perifiton, una comunidad compleja de microorganismos tales como bacterias, algas, hongos y protozoos que se desarrollan en superficies sumergidas, juega un papel crucial en los procesos de biorremediación como la erradicación de contaminantes. Esto se debe a su capacidad para absorber, transformar y descomponer compuestos orgánicos e inorgánicos (Andramunio-Acero et al., 2018; Alcántara et al., 2020; Chen et al., 2009; Dhote et al., 2012; Kesaano y Sims, 2014; Li, et al., 2022; Montoya Moreno y Aguirre Ramírez, 2013; Singh et al., 2017; Sládečková, 1994; Trbojevic et al., 2018).

En este contexto, la planta de tratamiento de la Universidad de los Llanos, que opera mediante un sistema MBBR en su campus Barcelona, ofrece una oportunidad para estudiar la sucesión perifítica en condiciones reales de operación, con aguas altamente eutrofizadas. El presente estudio tuvo los siguientes objetivos, I) analizar la composición y sucesión de la comunidad perifítica en una PTAR; II) evaluar la influencia de los factores fisicoquímicos en su desarrollo, e III) identificar metabolitos clave de interés biológico mediante análisis cromatográfico. Estos resultados aportan a la comprensión de procesos de biorremediación basados en microbiota autóctona y permiten proponer mejoras sostenibles en el tratamiento de aguas residuales urbanas.

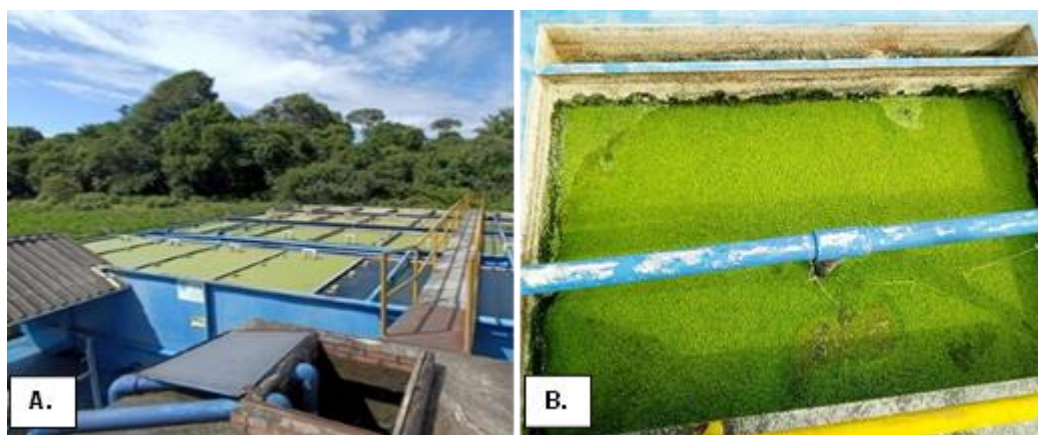
Materiales y métodos

Localización del sistema de estudio

El estudio se realizó en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la Universidad de los Llanos, ubicada en la vereda Barcelona, a 12 km del casco urbano del municipio de Villavicencio, Meta, Colombia, con coordenadas geográficas 4 ° 04 ' 33.1 " N y 73 ° 34 ' 49.8 " O. Esta instalación ocupa un área de 538 m² y está sujeta a una temperatura promedio de 24 °C, con un régimen de

precipitación de aproximadamente 18 días al mes y una elevada intensidad lumínica, condiciones que influyen en el desarrollo de comunidades biológicas dentro del sistema (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2024). La planta opera bajo el sistema MBBR para el tratamiento de aguas residuales domésticas y dotacionales generadas por las actividades del campus. El proceso incluye la circulación secuencial del agua desde el pozo eyector hacia cuatro tanques biodigestores, seguido por unidades de desinfección y filtrado, antes de su vertimiento en el caño Piñalito, afluente del río Ocoa (Universidad de los Llanos, 2019) ([Figura 1](#)).

Figura 1. Planta de tratamiento de agua residual de la Universidad de los Llanos



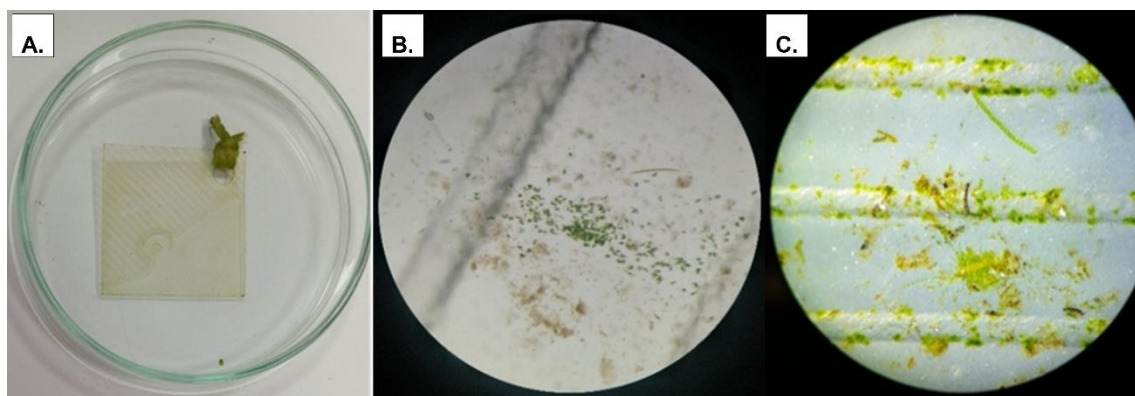
Nota. A. Panorámica de los tanques biodigestores. B. Detalle de la superficie de un reactor. Fuente: elaboración propia.

Composición y sucesión perifítica

Se diseñaron sustratos artificiales para facilitar la colonización de organismos del perifiton a partir de cuadrantes de acetato rugoso de 0,04 m × 0,04 m, siguiendo las recomendaciones de Freixa et al. (2023) para estudios de *biofilms* en ambientes acuáticos (Freixa et al., 2023). Para determinar la dinámica de colonización del perifiton se realizó un seguimiento *in situ* en los tanques biodigestores de la PTAR durante un periodo de cuatro meses, analizando réplicas de sustratos de acetato recolectadas en el tanque biodigestor 4 a intervalos de seis horas, hasta completar un ciclo de 72 horas. Las muestras adheridas a los sustratos fueron observadas mediante un estereoscopio *Stemi 305 Carl Zeiss* bajo diferentes aumentos ([Figura 2](#)), confirmando la presencia de comunidades microbianas. Posteriormente, se realizó un raspado controlado de la superficie colonizada sobre cajas de Petri, utilizando agua destilada. El material resultante fue preservado en solución *Transeau* (relación 1:1) para su análisis taxonómico y cuantitativo mediante el método de sedimentación en

cámara de Utermöhl, bajo microscopio invertido *Leica DMIL IED* (Paxinos y Mitchell, 2000). La identificación se realizó utilizando claves taxonómicas especializadas (Bellinger y Sigee, 2015; Bicudo y Menezes, 2017).

Figura 2. Colonización del perifiton en sustrato artificial



Nota. A. Sustrato (acetato rugoso) 24 h; B. Visualización 8X, sustrato 24 h; C. Visualización 4X, 30 h.
Fuente: elaboración propia.

Análisis fisicoquímico en el sistema de una planta de tratamiento de aguas residuales

Se evaluaron parámetros fisicoquímicos del agua del sistema de tratamiento de la PTAR en donde se llevaron los procesos de desarrollo algal y sucesión microbiana, incluyendo oxígeno disuelto (mg O₂/L), pH (Und. pH), temperatura (°C), conductividad eléctrica (μS/cm), nitritos (mg NO₂-/L), nitratos (mg NO₃-/L), fósforo total (mg P/L) y fósforo disuelto (mg PO₄-P/L). Estas variables se determinaron siguiendo las metodologías del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (American Public Health Association [APHA], 2017).

Identificación de metabolitos del perifiton

Con el fin de evaluar la composición química del perifiton, se recolectó una muestra representativa de biomasa, a través del raspado de los sustratos expuestos después de 72 horas en un tanque biodigestor de la PTAR, la cual fue preservada en cadena de frío hasta su análisis cromatográfico. La identificación presuntiva de compuestos volátiles se realizó mediante la técnica de microextracción en fase sólida en cromatógrafo de gases *Agilent Technologies AT 6890* acoplado a un detector selectivo de masas (MSD, AT 5973N), operado en el modo de barrido completo de radiofrecuencia (full scan) empleando el método de determinación de la fracción volátil en sólidos.

Resultados y discusión

Composición y sucesión perifítica

Se identificaron tres grandes grupos funcionales en la comunidad perifítica: fitoperifiton, zooperifiton, y una fracción integrada por hongos e invertebrados. En total, se registraron 35 taxones, de los cuales 2 fueron identificados hasta especie, 30 a nivel de género y 3 permanecieron sin determinar (ND). Estos organismos se agruparon en 30 géneros, 26 familias, 5 divisiones y 4 filos ([Tabla 1](#)).

Tabla 1. *Composición y sucesión de los grupos del perifiton en aguas residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales*

División / Filo	Familia	Género / Especie	# Organismos							
			6H	12 H	18 H	24H	30H	36H	48H	72H
Fitoperifiton (microalgas)										
Bacillariophyta	Amphipleuraceae	Frustulia sp.	-	-	12	16	-	37	-	-
	Gomphonemataceae	Gomphonema sp.	-	-	-	-	-	727	-	-
	Naviculaceae	Navicula sp.	-	26	120	53	90	710	81	109
	Pinnulariaceae	Pinnularia sp.	-	2	227	35	34	94	54	234
	Surirellaceae	Surirella sp.	-	-	2	-	-	-	-	-
Charophyta	Closteriaceae	Closterium sp.	-	-	4	27	-	5	12	-
	Desmidiaceae	Actinotaenium sp.	-	-	-	9	-	-	-	56
		Cosmarium sp.	-	-	-	20	-	1	4	24
	Mesotaeniaceae	Netrium sp.	-	2	-	5	2	-	7	-
	Zygnemataceae	Mougeotia sp.	-	-	-	-	-	42	-	-
Chlorophyta	Chaetophoraceae	Stigeoclonium sp.	-	-	4	-	-	-	-	-
	Characiaceae	Characium sp.	-	-	-	34	-	-	-	-
	Chlorellaceae	Dictyosphaerium sp.	-	-	-	-	-	1	-	-

División / Filo	Familia	Género / Especie	# Organismos							
			6H	12 H	18 H	24H	30H	36H	48H	72H
	Hydrodictyaceae	<i>Tetraedron</i> sp.	-	2	-	2	-	-	1	-
	Scenedesmaceae	<i>Coelastrum</i> sp.	-	-	-	-	-	3	-	-
		<i>Pectinodesmus</i> sp.	-	-	-	-	-	1	-	-
	Selenastraceae	<i>Ankistrodesmus</i> sp.	-	-	-	-	-	52	-	-
		<i>Kirchneriella</i> sp.	-	-	-	-	-	27	-	-
	Sphaerocystidaceae	<i>Sphaerocystis</i> sp.	-	-	3	-	-	12	-	-
	Trebouxiophyceae	<i>Crucigenia</i> sp.	-	-	3	-	-	-	-	-
	Volvocaceae	<i>Eudorina</i> sp.	-	-	2	-	7	-	-	-
Cyanobacteria	Leptolyngbyaceae	<i>Leptolyngbya</i> sp.	-	-	1	-	-	-	-	-
	Merismopediaceae	<i>Merismopedia</i> sp.	-	-	11	-	1	-	-	-
	Microcystaceae	<i>Chroococcus</i> sp.	6	370	425	949	234 7	114 6	268 7	287 4
		<i>Microcystis</i> sp.	-	-	12	-	1	-	-	-
	Nostocaceae	<i>Anabaena</i> sp.	-	-	-	-	-	1	-	-
Euglenozoa	Euglenaceae	<i>Euglena</i> sp.	-	27	-	28	-	10	-	2
	Phacaceae	<i>Phacus</i> sp.	-	-	-	-	-	28	-	-
Zooperifiton										
Amoebozoa	Arcellidae	<i>Arcela discoides</i>	-	-	-	1	-	-	-	-
		<i>Arcella</i> sp.	-	-	-	-	-	-	1	2
		<i>Arcella verrucosa</i>	-	-	-	-	-	2	-	-
	Diffugiidae	<i>Difflugia</i> sp.	-	-	-	-	-	-	3	-
Arthropoda	Diplostraca ND	<i>Diplostraca</i> ND (<i>Cladocero</i>)	-	-	-	-	1	2	-	6
Hongos										

División / Filo	Familia	Género / Especie	# Organismos							
			6H	12 H	18 H	24H	30H	36H	48H	72H
Basidiomycota	Basidiomycota ND	<i>Basidiomycota ND</i>	-	-	-	-	-	146	-	-
Invertebrados										
Mollusca	Mollusca ND	<i>Mollusca ND</i>	-	-	-	-	-	-	-	9
TOTAL			6	401	465	107 5	235 9	304 7	285 0	297 3

Nota. Elaboración propia.

La colonización de la comunidad del perifiton en la PTAR se desarrolló en tres fases sucesivas ([Figura 3](#)). La fase inicial (6-12 horas) mostró la formación de una matriz extracelular dominada por cianobacterias, lo que sugiere una rápida colonización facilitada por la alta disponibilidad de nutrientes en el sistema. Este proceso se desarrolló en un tiempo significativamente menor que el reportado para sistemas naturales, donde la formación de biofilms suele ocurrir entre 36 y 48 horas (Chen et al., 2025; Andramunio-Acero et al., 2018), lo que resalta el efecto del ambiente eutrofizado en la aceleración de la sucesión perifítica (Agostini et al., 2018).

La segunda fase (18-24 horas) evidenció un incremento en la diversidad del fitoperifiton, dominado por diatomeas de los géneros *Navicula*, *Pinnularia*, *Frustulia* y *Surirella*, además de clorofitas como *Closterium* y *Crucigenia*. Esta sucesión coincide con lo descrito por Osorio-Ávila et al. (2015), en cuanto a la colonización progresiva de superficies por microalgas adaptadas a ambientes enriquecidos (Osorio-Ávila et al., 2015). La fase final (30-72 horas) estuvo marcada por la aparición del zooperifiton, representado por ameboides del género *Arcella* y *Diffflugia*, y cladóceros no determinados, así como organismos fúngicos del filo Basidiomycota observados en las muestras de 30 horas. Esta etapa concluye con el ensamblaje de una comunidad perifítica estructuralmente estable hacia las 72 horas.

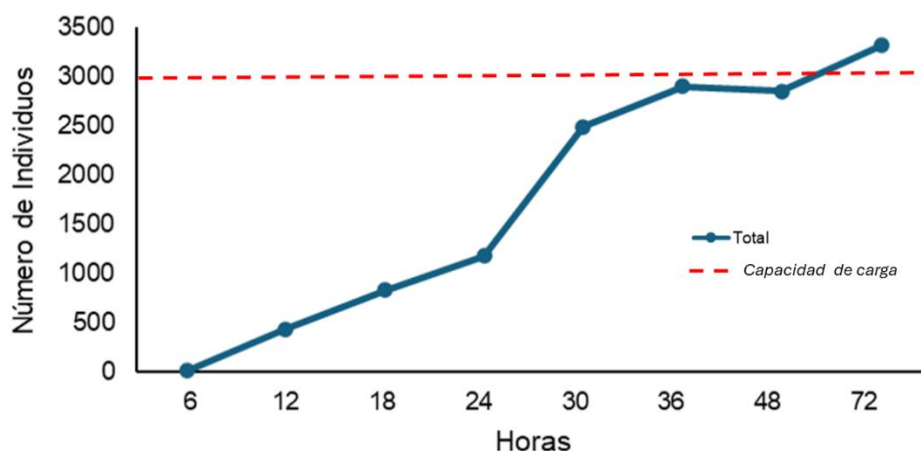
Figura 3. Diagrama de sucesión del perifiton en un sistema de una planta de tratamiento de aguas residuales



Nota. Elaboración propia.

El comportamiento poblacional del perifiton siguió un patrón de crecimiento logístico ([Figura 4](#)). Durante las primeras 30 horas se evidenció un crecimiento exponencial impulsado por la alta disponibilidad de nutrientes, la luz incidente y la naturaleza del sustrato. No obstante, a partir de las 36 horas se observó una meseta en la curva de crecimiento, lo que indica una capacidad de carga alcanzada, limitada por el espacio disponible y la competencia por recursos en la matriz del biofilm (Assmy et al., 2019; Sivakumar et al., 2012). A esto posiblemente se sumó la acción de organismos heterótrofos, principalmente protozoos y pequeños invertebrados, los cuales ejercieron presión sobre las algas a través de relaciones tróficas tipo depredador-presa (Beisner y Thackeray, 2024), estabilizando la comunidad en un estado más complejo y equilibrado.

Figura 4. Comportamiento poblacional del perifiton en las aguas residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales



Nota. Elaboración propia.

En cuanto a la composición dominante, los géneros *Pinnularia*, *Navicula* y *Chroococcus* presentaron la mayor riqueza. Estos organismos son considerados pioneros en procesos de sucesión perifítica debido a su alta capacidad de colonización bajo condiciones de alta irradiancia y disponibilidad de nutrientes (Bellinger y Sigee, 2015; Bicudo y Menezes, 2017). El género *Gomphonema*, registrado únicamente a las 36 horas se caracteriza por su resistencia a la radiación y su capacidad de adherencia.

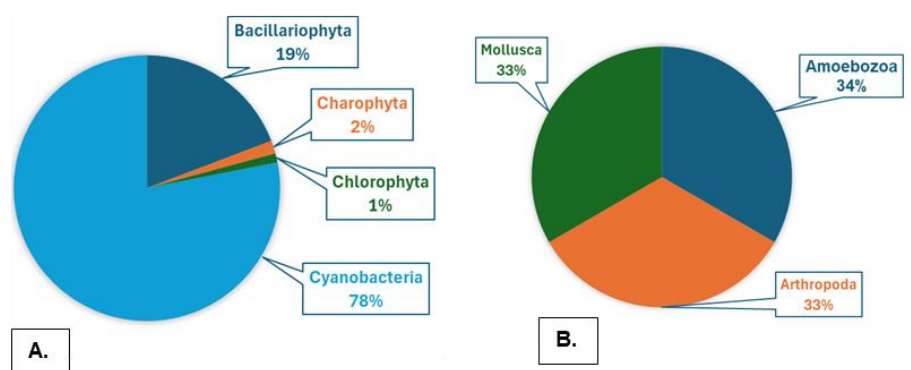
En comparación con otros sistemas, como el reportado por Zea-Cano y Aguilar-Carrera (2017) en una PTAR de Guatemala, donde se evidenció una dominancia de Bacillariophyta (62 %) y Chlorophyta (35 %) (Zea-Cano y Aguilar-Carrera, 2017), el sistema evaluado de la PTAR de Universidad de los Llanos, mostró una dominancia Cyanobacteria (78 %), seguida por Bacillariophyta (19 %) (Figura 5). Esta diferencia refleja un proceso de eutrofización más avanzado y persistente, probablemente influenciado por las condiciones particulares de nutrientes, temperatura e iluminación. La alta abundancia de Cyanobacteria podría explicarse por su capacidad de asimilar eficientemente nitrógeno y fósforo, y por su ventaja competitiva en ambientes con alta carga orgánica (Salomón et al., 2020).

Para tratamiento de aguas residuales, se han determinado grupos algales de *Scenedesmus sp.*, *Chlorella sp.*, *Actinastrum sp.*, *Microactinium sp.*, *Pediastrum sp.*, *Ankistrodesmus sp.*, *Euglenas sp.* y *Sphaerocystis sp.*, siendo eficientes para realizar tratamientos de aguas residuales, por eliminar de

manera eficiente metales pesados en las aguas residuales, además de poder crecer en medios contaminados (Aguirre et al., 2011; Craggs, 2005; Craggs et al., 2011; Forero Trejos, 2007; Godos et al., 2012; Metaxa et al., 2006; Oswald, 1990; Park y Craggs, 2011; Salazar et al., 2005). En este estudio se reportan individuos de estos géneros a excepción del género *Chlorella*, y *Microactinium*, lo que demuestra que el sistema de la PTAR de la Universidad de los Llanos cuenta con los microorganismos potenciales para procesos de depuración del agua residual. De acuerdo con Cerón Hernández et al. (2015), esta estrategia no solo mejoraría la eficiencia del tratamiento, sino que también permitiría aprovechar la biomasa algal para diversas aplicaciones, generando un valor agregado al proceso.

Por otro lado, aunque las bacterias y hongos no fueron los más abundantes, su presencia fue relevante. Las bacterias dominaron la superficie del sustrato en las primeras seis horas, proporcionando la base mucilagínosa para la posterior adhesión de algas. Por su parte, los hongos basidiomicetos se observaron únicamente en etapas intermedias del proceso (30 horas), lo cual puede estar asociado a las condiciones de pH ácido registradas en el sistema (entre 6,03 y 6,63), que no favorecen su crecimiento óptimo (Agostini et al., 2018).

Figura 5. Distribución porcentual de abundancia de organismos del perifiton



A. Fitoperifiton. B. Zooperifiton. Fuente: elaboración propia.

Influencia de factores fisicoquímicos en el desarrollo del perifiton

Los análisis fisicoquímicos realizados en el sistema de la PTAR evidenciaron una mejora progresiva en la calidad del agua tratada (Tabla 2). Uno de los principales indicadores fue el aumento del oxígeno disuelto, que pasó de 1,75 mg/L en la entrada a 6,05 mg/L en el biodigestor 4, reflejando una oxigenación eficiente del sistema. Este comportamiento está en concordancia con lo reportado

para sistemas en los que la actividad microbiana, junto con la formación de biofilms, favorece significativamente la transferencia de oxígeno al medio (Ríos-Aragüez, 2013; Shahzad et al., 2025). Por otro lado, el pH se mantuvo estable a lo largo del proceso, con valores entre 6,03 y 6,63, lo que indica condiciones propicias para la sucesión microbiana y I2025; Ríos de biorremediación. Sin embargo, estos valores ligeramente ácidos pueden limitar la presencia de ciertos protozoos, favoreciendo organismos tolerantes como las tecamebas del orden Arcellinida (Andramunio-Acero et al., 2018; Bejarano-Novoa y Escobar-Carvajal, 2015; Zapata et al., 2008).

Tabla 2. *Parámetros físicoquímicos en aguas residuales de una PTAR*

Parámetro	Unidad	Entrada a PTAR	Biodigestor 1	Biodigestor 2	Biodigestor 3	Biodigestor 4	Salida PTAR
Oxígeno disuelto	mg O ₂ /L	1,75	2,12	4,68	3,23	6,05	4,47
pH	Und. pH	6,08	6,03	6,09	6,10	6,63	6,46
Temperatura del agua	°C	26,90	28,90	28,30	29,15	29,70	31,70
Conductividad eléctrica	µS/cm	135,65	111,15	81,65	82,80	121,70	110,49
Nitritos	mg NO ₂ ⁻ /L	<0,033	<0,033	<0,033	<0,033	0,12	0,05
Nitratos	mg NO ₃ ⁻ /L	<0,113	<0,113	<0,113	<0,113	<0,113	0,437
Fósforo total	mg P/L	0,65	0,56	0,26	0,24	0,49	0,42
Fósforo disuelto	mg PO ₄ ⁻ /L	0,52	0,36	0,14	0,15	0,22	0,20

Nota. Elaboración propia.

En relación con la dinámica de nutrientes, se observó una reducción significativa en las concentraciones de fósforo total (de 0,65 mg/L a 0,42 mg/L) y fósforo disuelto (de 0,52 mg/L a 0,20 mg/L), lo que evidencia una eficiente asimilación de estos nutrientes por parte del perifiton. Este resultado es consistente con el papel ecológico de estas comunidades en la absorción de nitrógeno y fósforo, lo cual es esencial para prevenir procesos de eutrofización en cuerpos de agua receptores

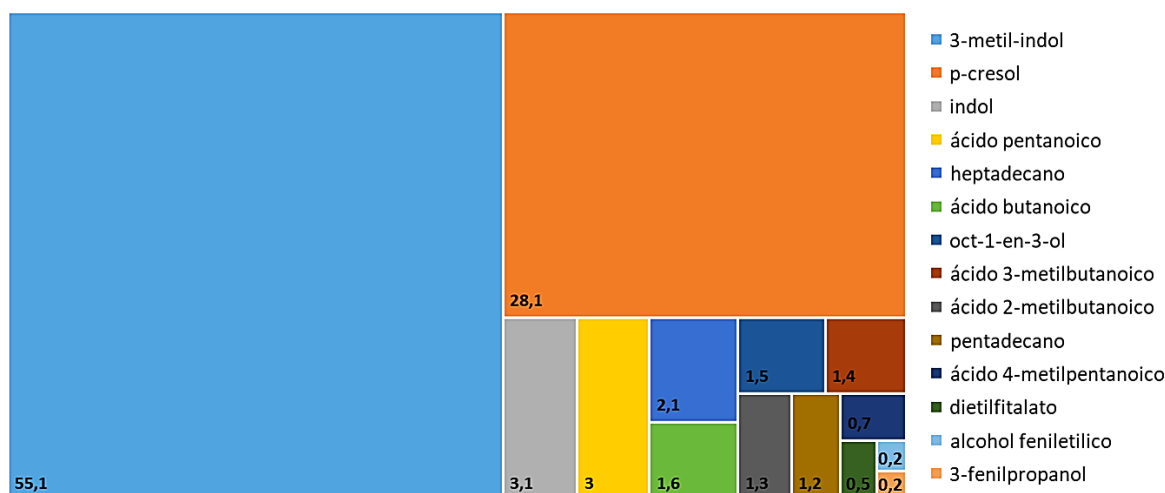
(Reddy y DeLaune, 2008). Adicionalmente, la disminución de la conductividad eléctrica desde 135,65 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la entrada hasta 81,65 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el biodigestor 2 respalda la retención de solutos iónicos en las etapas iniciales del tratamiento.

No obstante, se detectó un incremento en las concentraciones de nitritos (0,12 mg/L en el biodigestor 4) y nitratos (0,437 mg/L en la salida), lo que sugiere la activación de procesos de nitrificación durante las etapas finales del tratamiento, fenómeno común en sistemas de tratamiento biológico por biofilm (Oswald, 1990; Salazar, et al., 2005). Según Ríos-Aragüez (2013), este proceso es reforzado por la presencia de géneros algales como *Scenedesmus sp.*, *Pediastrum sp.* y *Euglena sp.*, los cuales están directamente relacionados con la eliminación de nutrientes y la mejora de la calidad del agua. La interacción simbiótica entre algas y bacterias en estos sistemas imita mecanismos de autodepuración natural observados en ecosistemas acuáticos, favoreciendo la conversión de materia orgánica y la optimización del rendimiento del sistema de tratamiento (Ríos-Aragüez, 2013).

Perfil de metabolitos del perifiton y su relación con procesos de degradación biológica

Los resultados obtenidos mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (HS-SPME-GC/MS) revelan un perfil característico de descomposición de materia orgánica ([Figura 6](#)). Entre los compuestos identificados, el 3-metil-indol (55,1 %) y el p-cresol (28,1 %) representaron los porcentajes más altos de composición relativa, mientras que otros como indol, ácido pentanoico y heptadecano se presentaron en menores proporciones (<10%).

Figura 6. *Identificación presuntiva y cantidad relativa (%) de los componentes del perifiton de la planta de tratamiento de aguas residuales, analizada por método de cromatografía*



Nota. Elaboración propia.

El 3-metil-indol (*escatol*), producto de la fermentación bacteriana del triptófano, es un metabolito típico de procesos anaerobios asociados a residuos animales y aguas residuales. Este compuesto actúa como inhibidor del crecimiento bacteriano y de la formación de biopelículas, lo que sugiere su rol como estrategia competitiva microbiana en sistemas como los MBBR (Amer et al., 2022; Choi et al., 2014; Ma et al., 2021). El p-cresol, por su parte, es un fenol metilado derivado de la degradación de compuestos orgánicos complejos, también asociado a procesos anaerobios. En paralelo, el indol, presente en menor cantidad, se asocia a la degradación proteica mediada por bacterias como *Escherichia coli*, siendo común en aguas contaminadas con materia fecal.

La detección de heptadecano (2,1 %), un hidrocarburo saturado, sugiere la participación de rutas de metabolismo lipídico microbiano y su posible papel en la regulación de exopolisacáridos del biofilm, aspectos claves para la estabilidad estructural del perifiton (Chénier et al., 2006). Por su parte, la presencia de dietil ftalato (DEP), aunque baja (0,5 %), indica una posible contaminación por compuestos derivados de plásticos, lo que refuerza la necesidad de monitorear compuestos exógenos en sistemas de tratamiento (Kamrin y Mayor, 1991). Los ácidos orgánicos como ácido butanoico, 3-metilbutanoico, 2-metilbutanoico, pentanoico y 4-metilpentanoico fueron identificados como productos intermedios clave en la digestión anaeróbica, relacionados con la transformación de materia orgánica compleja en productos más simples como metano y CO₂ (Parra Huertas, 2015). Su presencia refleja una actividad metabólica activa y eficiente en la comunidad perifítica. Asimismo, compuestos volátiles como oct-1-en-3-ol, alcohol feniletílico y 3-fenilpropanol, aunque en baja proporción, podrían contribuir al olor característico de los biodigestores, siendo

también indicadores de desequilibrio metabólico cuando aparecen en concentraciones elevadas (Zhou et al., 2016).

Estos hallazgos sugieren que la comunidad perifítica del sistema MBBR actúa no solo como biofiltro físico sino también como biorreactor activo, donde convergen procesos aeróbicos y anaeróbicos que favorecen la degradación de proteínas y aminoácidos. Este proceso genera compuestos volátiles y olorosos típicos de ambientes eutrofizados y carentes de oxígeno (Corrales et al., 2015). La abundancia de estos metabolitos refleja una intensa actividad microbiológica asociada a la elevada carga orgánica del sistema, coherente con lo reportado en ambientes eutróficos (Wood et al., 2012). En este contexto, el sistema MBBR ofrece un escenario propicio para la coexistencia de procesos autotróficos y heterotróficos, lo que contribuye a la estabilidad de las biopelículas, la eficiencia en la remoción de contaminantes y la resiliencia del ecosistema microbiano frente a condiciones ambientales variables.

Conclusiones

El presente estudio evidenció una sucesión perifítica acelerada en los biodigestores de la PTAR de la Universidad de los Llanos, respecto a la reportado en otras investigaciones, con formación de biofilms a las seis horas y colonización algal a partir de las 12 horas. Este comportamiento, más rápido que en sistemas naturales, se atribuye a las condiciones eutrofizadas del sistema, caracterizadas por una alta disponibilidad de nutrientes y parámetros fisicoquímicos estables que favorecen la actividad microbiana y el ensamblaje de comunidades complejas.

La comunidad perifítica mostró una elevada diversidad funcional, incluyendo cianobacterias, microalgas, protozoos, hongos e invertebrados, cuya sucesión estuvo influenciada por factores como el sustrato, los tiempos de exposición y aireación de los biodigestores. Estos organismos no solo contribuyeron a la depuración del agua, sino que también actuaron como bioindicadores del estado del sistema.

Por otra parte, el análisis cromatográfico permitió identificar metabolitos característicos de la descomposición de proteínas y lípidos, como el 3-metil-indol y el p-cresol, los cuales aportan información relevante sobre la eficiencia del tratamiento, la presencia de contaminantes y los procesos de biorremediación. Esto refuerza la premisa de que el perifiton desempeña un papel clave en la autodepuración del sistema y destaca la importancia de su monitoreo integrado como

estrategia para la optimización de la calidad del efluente en plantas de tratamiento de aguas residuales.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro de investigación Instituto de Ciencias Ambientales de la Orinoquía Colombiana, a la Dirección General de Investigaciones de la Universidad de Los Llanos y al Centro de Calidad de Aguas por el apoyo al desarrollo de la investigación.

Fuentes de financiación

Proyecto FCBI-INS-F02-003-2023, Universidad de Los Llanos.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses que pueda haber influido en los resultados, la interpretación o las conclusiones del presente estudio.

Referencias

- Agostini, V. O., Macedo, A. J., y Muxagata, E. (2018). O papel do biofilme bacteriano no acoplamento bentopelágico, durante o processo de bioincrustação. *Revista Liberato*, 19(31), 23-42. <https://revista.liberato.com.br/index.php/revista/article/view/520>
- Aguirre, P., Álvarez, E., Ferrer, I., y García, J. (2011). Treatment of piggery wastewater in experimental high rate algal ponds. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*, 2(2), 57-66. <https://hdl.handle.net/2117/107792>
- Akhtar, N., Syakir-Ishak, M. I., Bhawani, S. A., y Umar, K. (2021). Various natural and anthropogenic factors responsible for water quality degradation: a review. *Water*, 13(2660). <https://doi.org/10.3390/w13192660>

- Alcántara, C., Acien-Fernández, F. G., Fernández-Sevilla, J. M., Riaño, B., Hernández, D., García-González, M. C., . . . Muñoz, R. (2020). Chapter 40 - Exploring the potential of microalgae for the bioremediation of agro-industrial wastewaters. En *Handbook of Algal Science, Technology and Medicine* (págs. 641-658). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818305-2.00040-1>.
- Al-Mawla, Y. M., Jaeel, A. J., Al-Rekabi, W. S., y Obeid, Z. H. (2023). A review of characteristics and treatment of domestic wastewater. *AIP Conference Proceedings*, 2787(1). <https://doi.org/10.1063/5.0149966>
- Amer, M. A., Ramadan, M. A., Attia, A. S., y Wasfi, R. (2022). Silicone Foley catheters impregnated with microbial indole derivatives inhibit crystalline biofilm formation by *Proteus mirabilis*. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2022.1010625>
- Andramunio-Acero, C., Caraballo-Gracia, P., Duque-Escobar, S. R., y Solari, L. C. (2018). Cambios en la estructura de la comunidad perifítica en el sistema de lagos de Yahuaraca, Amazonía colombiana. *Actualidades Biológicas*, 4(109). <https://doi.org/10.17533/udea.acbi.v40n109a03>
- American Public Health Association. (2017). *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (23.^a ed.).
- Assmy, P., Smetacek, V., Montresor, M., y Ferrante, M. I. (2019). Algal blooms. En *Encyclopedia of microbiology* (pp. 61-76). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.20959-X>
- Beisner, B. E., y Thackeray, S. J. (2024). Chapter 20 - Ecology and Functioning of Zooplankton Communities. En I. Jones y J. P. Smol (Eds.), *Wetzel's limnology: Lake and river ecosystems* (4.^a ed., pp. 587–620). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822701-5.00020-3>
- Bejarano-Novoa, M. E., y Escobar-Carvajal, M. (2015). *Eficiencia del uso de microorganismos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en una planta de tratamiento de agua residual* [Trabajo de pregrado, Universidad de la Salle].

- Bellinger, E. G., y Sigee, D. C. (2015). *Freshwater algae: Identification, enumeration and use as bioindicators* (2.^a ed.). Wiley Blackwell.
- Bicudo, C. E., y Menezes, M. (2017). *Gêneros de algas de águas continentais do Brasil: chave para identificação e descrições* (3.^a ed.). RiMa.
- Castillo León, C. T., y Duque Escobar, S. R. (2000). Productividad y biomasa fitoperifítica en los lagos Yahuaraca y Tarapoto (Amazonas - Colombia). *Acta Biológica Colombiana*, 5(1), 71. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/view/26682>
- Cerón Hernández, V. A., Madera Parra, C. A., y Peña Varón, M. (2015). Uso de lagunas algales de alta tasa para tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería y Desarrollo*, 33(1). <http://dx.doi.org/10.14482/inde.33.1.5318>
- Chen, C.-J., Han, Z.-Y., Zhu, Y. M., y Wu, W. X. (2009). Periphyton and its application in water purification. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao*, 20(11). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20136022/>
- Chen, L., Zhao, M., Li, X., Li, Y., y Wu, J. (2025). Effect of High-Strength Wastewater on Formation Process and Characteristics of Hydrophyte Periphytic *Biofilms*. *Sustainability*, 17(6). <https://doi.org/10.3390/su17062654>
- Chénier, M. R., Beaumier, D., Fortin, N., Roy, R., Driscoll, B. T., Lawrence, J. R., y Greer, C. W. (2006). Influence of nutrient inputs, hexadecane, and temporal variations on denitrification and community composition of river biofilms. *Applied and Environmental Microbiology*, 72(1), 575-584. <https://doi.org/10.1128/AEM.72.1.575-584.2006>
- Choi, S. H., Kim, Y., Oh, S., Chun, T., y Kim, S. H. (2014). Inhibitory effect of skatole (3-methylindole) on enterohemorrhagic *Escherichia coli* O157:H7 ATCC 43894 biofilm formation mediated by elevated endogenous oxidative stress. *Letters in Applied Microbiology*, 58(5), 454-461. <https://doi.org/10.1111/lam.12212>
- Corrales, L. C., Antolinez Romero, D. M., Bohórquez Macías, J. A., y Corredor Vargas, A. M. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, 13(24), 55-82. <https://doi.org/10.22490/24629448.1717>
- Craggs, R. (2005). Advanced integrated wastewater ponds. En A. Shilton (Ed.), *Pond treatment technology* (pp. 282-310). IWA Publishing.

- Craggs, R. J., Heubeck, S., Lundquist, T. J., y Benemann, J. R. (2011). Algal biofuels from wastewater treatment high rate algal ponds. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 63(4), 660–665. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.100>
- Dhote, J., Ingole, S., & Chavhan, A. (2012). Review on wastewater treatment technologies. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 1(5).
- Forero Trejos, R. J. (2007). *Aproximación a la problemática del manejo y tratamiento de las aguas residuales del corregimiento de Arauca (Palestina)* [Trabajo de especialización, Universidad Nacional]. <https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/e4127163-e797-4de4-bd2c-e586dcdef031/content>
- Freixa, A., Ortiz-Rivero, J., y Sabater, S. (2023). Artificial substrata to assess ecological and ecotoxicological responses in river biofilms: Use and recommendations. *MethodsX*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102089>
- Godos, I., Muñoz, R., y Guieysse, B. (2012). Tetracycline removal during wastewater treatment in high-rate algal ponds. *Journal of Hazardous Materials*, 229-230. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.05.106>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2024). *Boletín Climatológico*. <https://ideam.gov.co/sala-de-prensa/boletines/Bolet%C3%ADn-climatol%C3%B3gico>
- Kamrin, M. A., y Mayor, G. H. (1991). Diethyl phthalate: A perspective. *Journal of Clinical Pharmacology*, 31(5), 484-489. <https://doi.org/10.1002/j.1552-4604.1991.tb01908.x>
- Kesaano, M., y Sims, R. C. (2014). Algal biofilm based technology for wastewater treatment. *Algal Research*, 5, 231-240. <http://dx.doi.org/10.1016/j.algal.2014.02.003>
- Leyva-Díaz, J. C., Monteoliva-García, A., Martín-Pascual, J., Munio, M. M., García-Mesa, J. J., y Poyatos, J. M. (2020). Moving bed biofilm reactor as an alternative wastewater treatment process for nutrient removal and recovery in the circular economy model. *Bioresource Technology*, 299. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122631>
- Li, L., He, Z., Liang, T., Sheng, T., Zhang, F., Wu, D., & Ma, F. (2022). Colonization of biofilm in wastewater treatment: A review. *Environmental Pollution*, 293. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118514>

- Lozano Povis, A. A., y Sanabria-Pérez, E. A. (2023). Wastewater treatment using microbial enzymatic mixture. *Revista Ambiente & Água An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 18, 1.12. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2866>
- Ma, Q., Meng, N., Li, Y., y Wang, J. (2021). Occurrence, impacts, and microbial transformation of 3-methylindole (skatole): A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 416. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126181>
- Madan, S., Madan, R., y Hussain, A. (2022). Advancement in biological wastewater treatment using hybrid moving bed biofilm reactor (MBBR): a review. *Applied Water Science*, 12(141). <https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-022-01662-y>
- Metaxa, E., Deviller, G., Pagand, P., Alliaume, C., Casellas, C., y Blancheton, J. P. (2006). High rate algal pond treatment for water reuse in a marine fish recirculation system: Water purification and fish health. *Aquaculture*, 252(1), 92-101. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.11.053>.
- Montoya Moreno, Y., y Aguirre Ramírez, N. J. (2013). Estado del arte del conocimiento sobre perifiton en Colombia. *Gestión y Ambiente*, 16(3), 91-117. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/257a6e98-a43c-48c8-be4b-644c3c3f106c/content>
- Orozco Jaramillo, A. (2014). *Bioingeniería de aguas residuales: teoría y diseño*. ACODAL.
- Osorio-Ávila, F. J., Rodríguez-Barrios, J., y Montoya-Moreno, Y. (2015). Sucesión de microalgas perifíticas en tributarios del río Gaira, Sierra Nevada de Santa Marta-Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 20(2), 119-131. <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v20n2.41932>
- Oswald, W. J. (1990). Advanced integrated wastewater ponds systems. En *Supplying water and saving the environment for six billion people: Proceedings of the 1990 ASCE convention* (pp. 78–85). American Society of Civil Engineers, Environmental Engineering Division.
- Park, J. K., y Craggs, R. J. (2011). Nutrient removal in wastewater treatment high rate algal ponds with carbon dioxide addition. *Water Science y Technology*, 63(8), 1758-1764. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.114>

- Parra Huertas, R. A. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción + Limpia*, 10(2), 142-159. <https://revistas.unilasallista.edu.co/index.php/pl/article/view/905>
- Paxinos, R., y Mitchell, J. G. (2000). A rapid Utermohl method for estimating algal numbers. *Journal of plankton research. Journal of Plankton Research*, 22(12), 2255-2262. <https://doi.org/10.1093/plankt/22.12.2255>
- Rathi, B. S., Kumar, S. P., y Show, P. L. (2021). A review on effective removal of emerging contaminants from aquatic systems: Current trends and scope for further research. *Journal of Hazardous Materials*, 409. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124413>
- Reddy, K. R., y DeLaune, R. D. (2008). *Biogeochemistry of wetlands: Science and applications*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203491454>
- Ríos-Aragüez, J. L. (2013, 16 de mayo). Sistemas de depuración de aguas residuales. *TRIPLENLACE*. <https://triplenlace.com/2013/05/16/sistemas-de-depuracion-de-aguas-residuales-16/>
- Salazar, M., Bernal, V., y Martínez, E. (2005). Tratamiento de efluentes anaerobios con microalgas clorofitas (*Chlorella vulgaris* y *Sphaerocystis* sp). .). En *XI Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería 2005*. Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería.
- Salazar-Larrota, L., Uribe-García, L., Gómez-Torres, L., y Zafra-Mejía, C. (2019). Análisis de la eficiencia de reactores UASB en una planta de tratamiento de aguas residuales municipales. *Revista DYNA*, 86(209), 319-326. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n209.70332>
- Salomón, S., Rivera-Rondón, C. A., y Zapata, Á. M. (2020). Floraciones de cianobacterias en Colombia: estado del conocimiento y necesidades de investigación ante el cambio global. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(171), 376-391. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1050>
- Saravanan, A., Senthil-Kumar, P., Jeevanantham, S., Karishma, S., Tajsabreen, B., Yaashikaa, P. R., y Reshma, B. (2021). Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: Processes and applications towards sustainable development. *Chemosphere*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130595>
- Shahzad, K., Mahmood, S., Khalid, A., Amir, R. M., Nawaz, R., Hanfiah, M. M., y Anjum, M. (2025). Periphyton biofilms formulation and application for the removal of trace pollutants from

- water. *International Biodeterioration y Biodegradation*, 198.
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2025.106003>
- Singh, S., James, A., y Bharose, R. (2017). Biological assessment of water pollution using periphyton productivity: a review. *Nature Environment and Pollution Technology*, 16(2), 559-567.
[https://www.neptjournal.com/upload-images/NL-60-32-\(30\)B-3414com.pdf](https://www.neptjournal.com/upload-images/NL-60-32-(30)B-3414com.pdf)
- Sivakumar, G., Xu, J., Thompson, R. W., Yang, Y., Randol-Smith, P., y Weathers, P. J. (2012). Integrated green algal technology for bioremediation and biofuel. *Bioresource Technology*, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.091>
- Sládečková, A. (1994). The role of periphyton in waste treatment technology. *SIL Proceedings*, 1922-2010, 25(3), 1929-1932. <https://doi.org/10.1080/03680770.1992.11900527>
- Trbojevic, I., Knežević, J., Kostić, D., Popović, S., Predojević, D., Karadžić, V., y Subakov Simić, G. (2018). Periphyton developed on artificial substrates: Effect of substrate type and incubation depth. *Russian Journal of Ecology*, 49(2), 135-142.
<https://doi.org/10.1134/S1067413618020145>
- Universidad de los Llanos. (2019). Manual de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento agua residual domestica (PTAR).
<https://sig.unillanos.edu.co/phocadownload/MN-GCL-02%20MANUAL%20DE%20OPERACION%20Y%20MANTENIMIENTO%20DE%20LA%20PTAR.pdf>
- Wood, S. A., Kuhajek, J. M., de Winton, M., y Phillips, N. R. (2012). Species composition and cyanotoxin production in periphyton mats from three lakes of varying trophic status. *FEMS Microbiology Ecology*, 79(2), 312-326. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2011.01217.x>
- Zapata, J., Yáñez, M., y Rudolph, E. (2008). Tecamebianos (Protozoa: Rhizopoda) de una turbera del Parque Nacional Puyehue (40°45' S; 72°19' W), Chile. *Gayana*, 72(1), 9-17.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0717-65382008000100002>
- Zea-Cano, M., y Aguilar-Carrera, F. D. (2017). Análisis del crecimiento de algas generadas en agua residual del efluente de un filtro percolador. *Agua, Saneamiento y Ambiente*, 12(1), 15-21.
<https://doi.org/10.36829/08ASA.v12i1.1425>

Zhou, Y., Hallis, S. A., Vitko, T., y Suffet, I. (2016). Identification, quantification and treatment of fecal odors released into the air at two wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*, 180, 257-263. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.046>

1 Especialista en Gestión Ambiental Sostenible. Docente, Universidad de los Llanos; Instituto de Ciencias Ambientales de la Orinoquia Colombiana. Villavicencio, Meta, Colombia. Correo electrónico: yarincon@unillanos.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2717-8082> Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=bD9YtUMAAAAJ&hl=es>

2 Magister en Gestión Ambiental Sostenible. Investigador, Universidad de los Llanos; Instituto de Ciencias Ambientales de la Orinoquia Colombiana. Villavicencio, Meta, Colombia. Correo electrónico: jose.rojas.pena@unillanos.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4005-0825> Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=JZEGRg8AAAAJ&hl=es>

3 Magister en Gestión Ambiental Sostenible. Investigador, Universidad de los Llanos; Instituto de Ciencias Ambientales de la Orinoquia Colombiana. Villavicencio, Meta, Colombia. Correo electrónico: cristian.ojeda.garcia@unillanos.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8378-9969> Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=CsSnIIIAAAJ>

4 Magister en Gestión Ambiental Sostenible. Investigador, Universidad de los Llanos; Instituto de Ciencias Ambientales de la Orinoquia Colombiana. Correo electrónico: yair.zapata@unillanos.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3323-1943> Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=TzyqY4gAAAAJ&hl=es>

5 Doctor en Química Agrícola. Docente, Universidad de los Llanos. Villavicencio, Meta, Colombia. Correo electrónico: jtrujillo@unillanos.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9612-4080> Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=JA7UUKwAAAAJ&hl=es>

6 Doctor en Investigación en Tecnologías Energéticas y Ambientales para el Desarrollo. Docente, Universidad de los Llanos. Correo electrónico: marcotorres@unillanos.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3824-5412> Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=DOdnUZcAAAAJ&hl=es>

Para citar este artículo: Rincón Blanquicet, Y. A., Rojas Peña, J. I., Ojeda García, C. D., Zapata Muñoz, Y. L., Trujillo González, J. M., Y Torres Mora, M. A. (2026). Sucesión del perifiton e identificación de metabolitos como indicadores de degradación orgánica en una planta de tratamiento de aguas residuales. *Revista Luna Azul*, (63), 104-127. <https://doi.org/10.17151/luaz.2026.63.6>

Esta obra está bajo una [Licencia de Creative Commons Reconocimiento CC BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Código QR del artículo

