

Bioplásticos a base de cáscaras de *Musa paradisiaca* para tratamiento de aguas residuales domésticas

Bioplastics based on *Musa paradisiaca* peels for domestic wastewater treatment

Bioplásticos à base de cascas de *Musa paradisiaca* para tratamento de águas residuais domésticas

Recibido: 01/03/2025 | Revisado: 10/03/2025 | Aceptado: 11/03/2025 | Publicado: 16/03/2025

Andrea Vargas

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2314-4399>

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “Manuel Félix López”. Ingeniería Ambiental, Ecuador

E-mail: andrea.vargas@espam.edu.ec

Derlyn Zambrano

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6167-3759>

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “Manuel Félix López”. Ingeniería Ambiental, Ecuador

E-mail: derlyn.zambrano@espam.edu.ec

Carlos Banchón

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0388-1988>

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “Manuel Félix López”. Ingeniería Ambiental, Ecuador

E-mail: carlos.banchon@espam.edu.ec

Resumen

El objetivo de este estudio es presentar una revisión de la literatura que analiza cómo la baja relación carbono/nitrógeno (C/N) en aguas residuales domésticas limita la actividad microbiana en procesos como la digestión anaerobia, afectando la degradación de contaminantes. Se propone la incorporación de bioplásticos derivados de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) como aporte de carbono orgánico biodegradable para optimizar la relación C/N y mejorar la desnitrificación. Los bioplásticos, ricos en almidón y nutrientes, aumentan la eficiencia del tratamiento, valorizando residuos agrícolas y alineándose con la economía circular, reduciendo el impacto ambiental y la dependencia de recursos fósiles. Además, los bioplásticos funcionan como coagulantes, floculantes y sustratos biodegradables, facilitando la remoción de contaminantes y la producción de biogás. Aunque su implementación mejora los tratamientos biológicos, requiere un equilibrio adecuado de nutrientes como nitrógeno y fósforo para maximizar la actividad microbiana. Los resultados de la presente revisión sistemática destacan la viabilidad económica y sostenibilidad, posicionando a los bioplásticos como una alternativa prometedora como coadyuvantes de procesos de tratamiento de aguas residuales, contribuyendo a la gestión eficiente de desechos y al desarrollo de tecnologías verdes.

Palabras clave: Co-sustratos; Digestión; Nutrientes; Plátano; Nitrificación; Desnitrificación.

Abstract

The objective of this study is to present a literature review that analyzes how the low carbon/nitrogen (C/N) ratio in domestic wastewater limits microbial activity in processes such as anaerobic digestion, affecting the degradation of contaminants. The incorporation of bioplastics derived from banana peel (*Musa paradisiaca*) is proposed as a contribution of biodegradable organic carbon to optimize the C/N ratio and improve denitrification. Bioplastics, rich in starch and nutrients, increase treatment efficiency, valorizing agricultural waste and aligning with the circular economy, reducing environmental impact and dependence on fossil resources. In addition, bioplastics function as coagulants, flocculants and biodegradable substrates, facilitating the removal of contaminants and the production of biogas. Although their implementation improves biological treatments, it requires an adequate balance of nutrients such as nitrogen and phosphorus to maximize microbial activity. The results of this systematic review highlight the economic viability and sustainability, positioning bioplastics as a promising alternative as adjuvants in wastewater treatment processes, contributing to efficient waste management and the development of green technologies.

Keywords: Co-substrates; Digestion; Nutrients; Banana; Nitrification; Denitrification.

Resumo

O objetivo deste estudo é apresentar uma revisão de literatura que analise como a baixa relação carbono/nitrogênio (C/N) em águas residuais domésticas limita a atividade microbiana em processos como a digestão anaeróbica, afetando a degradação de contaminantes. A incorporação de bioplásticos derivados da casca de banana (*Musa paradisiaca*) é proposta como contribuição de carbono orgânico biodegradável para otimizar a relação C/N e melhorar a desnitrificação. Os bioplásticos, ricos em amido e nutrientes, aumentam a eficiência do tratamento, valorizando os resíduos agrícolas e alinhando-se à economia circular, reduzindo o impacto ambiental e a dependência de recursos

fósseis. Além disso, os bioplásticos funcionam como coagulantes, floculantes e substratos biodegradáveis, facilitando a remoção de contaminantes e a produção de biogás. Embora sua implementação melhore os tratamentos biológicos, ela requer um equilíbrio adequado de nutrientes como nitrogênio e fósforo para maximizar a atividade microbiana. Os resultados desta revisão sistemática destacam a viabilidade econômica e a sustentabilidade, posicionando os bioplásticos como uma alternativa promissora como adjuvantes em processos de tratamento de águas residuais, contribuindo para a gestão eficiente de resíduos e o desenvolvimento de tecnologias verdes.

Palavras-chave: Co-substratos; Digestão; Nutrientes; Banana; Nitrificação; Desnitrificação.

1. Introducción

A nivel mundial, la contaminación del agua es un problema ambiental crítico: el 80% de las aguas residuales se vierte sin tratar, exponiendo a 1800 millones de personas a fuentes contaminadas y causando enfermedades como hepatitis, cólera, disentería, fiebre tifoidea y polio en humanos y animales (Goddard et al., 2020; UN Water, 2020). En Ecuador, la problemática de las aguas residuales ocupa un lugar relevante en las políticas sanitarias y ambientales del país, a tal punto de constituirse en una de las principales actividades (Coba & Carmona, 2021). Torske (2019) manifiesta que en Ecuador aproximadamente se trata el 12% de las aguas residuales domésticas dejando un gran 88% sin tratamiento que está canalizado directo a quebradas y ríos. A nivel provincial, en Manabí, las aguas residuales son tratadas mediante metodologías de lagunas de oxidación y de estabilización, cuyo proceso culmina con la disposición a través de mecanismo de descarga hacia el cauce de los ríos (Zambrano et al., 2022).

Según Villa (2022), las aguas residuales mantienen altas concentraciones de urea lo cual conlleva a un aumento de disponibilidad de nitrógeno, reduciendo de tal manera la concentración proporcional del carbono. Además, la ausencia de un equilibrio adecuado entre carbono y nitrógeno (C/N) obstaculiza la capacidad de los microorganismos presentes para llevar a cabo los procesos esenciales de degradación de contaminantes orgánicos (Mammen et al., 2022). Esto se da debido a que los microorganismos aeróbicos dependen de la materia orgánica rica en carbono como fuente de energía para su crecimiento y metabolismo, así como también la falta de un balance óptimo entre carbono y nitrógeno (Jacobó et al., 2019).

Shi *et al.* (2022) manifiestan que las aguas residuales domésticas generalmente tienen características de fuentes de carbono insuficiente y una baja relación C/N afluente. Esto se ha visto afectado por el vertido de nitrato en los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales (Xin et al., 2022). Por lo tanto, cuando el C/N en las aguas residuales es bajo, para garantizar una desnitrificación eficiente, es necesario utilizar una fuente de carbono adicional como donante de electrones para la desnitrificación y de esa manera reducir la concentración de nitrato (Guo *et al.*, 2019).

En relación con lo expuesto, existen estudios que han demostrado que se puede utilizar diversas sustancias como fuentes externas de carbono para el proceso de desnitrificación (Fathali *et al.*, 2019). No obstante, debido a los altos costos de las fuentes tradicionales de carbono líquido, se han desarrollado nuevas fuentes externas a manera de polímeros biodegradables o bioplásticos a partir de materiales renovables, como ácido poliláctico, almidón y compuestos orgánicos para la disolución de concentración de carbono orgánico y absorción de contaminantes en el agua residual (Gracia *et al.*, 2019).

De la misma forma en una investigación realizada en China por Jia *et al.* (2018) expusieron que los sustratos de biomasa agrícola con aireación intermitente, especialmente la paja de trigo, demostraron ser altamente efectivos, ostentando mejoras en la relación C/N y la eliminación de nitrógeno en aguas residuales. Esto sugiere que la adición de biomasa agrícola como la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) puede intensificar significativamente el proceso de desnitrificación, generando modificaciones a las tecnologías convencionales e innovaciones en los procesos (Fu *et al.*, 2022).

Una de las diferentes alternativas para la producción de bioplásticos como fuente externa de carbono, es a partir de la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*), debido a que este residuo orgánico puede ser aprovechado para ser aplicado en el tratamiento de aguas residuales y de esa manera mejorar la relación C/N (Brito y Vera, 2018). Este residuo orgánico contiene nutrientes como calcio, hierro, almidón, potasio y sodio, lo cual la hacen eficaz para la preparación de bioplásticos (Montoya *et*

al., 2022). Asimismo, el grupo funcional OH presente en la cáscara de plátano se utiliza para absorber contaminantes (Paytan, 2021).

El objetivo de este estudio es presentar una revisión de la literatura que analiza cómo la baja relación carbono/nitrógeno (C/N) en aguas residuales domésticas limita la actividad microbiana en procesos como la digestión anaeróbica, afectando la degradación de contaminantes. La implementación de un bioplástico a partir del residuo de la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) se basa en trabajos previamente publicados, dado el aporte de polisacáridos, lo cual promueve la disolución de concentración de carbono orgánico en el agua residual.

2. Metodología

Este estudio realiza una revisión sistemática (Cordeiro & Soares, 2019), un estudio cualitativo (Pereira et al., 2018), para analizar las limitaciones en el tratamiento de aguas residuales por la falta de materia orgánica biodegradable, afectando procesos como la digestión anaerobia y los lodos activados. Examina cómo co-sustratos, como residuos ricos en carbono o aceites vegetales, potencian la biodegradabilidad y la actividad microbiana al aportar energía para degradar contaminantes. Su objetivo es evaluar la eficacia de estos co-sustratos en la optimización de procesos biológicos de depuración, recopilando y analizando críticamente literatura de artículos y libros.

El estudio incluye investigaciones relevantes sobre bioplásticos en el tratamiento de aguas residuales domésticas, enfocándose en tecnologías y metodologías específicas. Se consideraron estudios experimentales, observacionales y revisiones de los últimos 20 años, priorizando los recientes, pero incluyendo clásicos fundamentales. Se limitó a publicaciones en inglés y español, valorando estudios altamente citados o con innovaciones significativas, incluso si no son los más referenciados.

El artículo aplica criterios de exclusión para una revisión sistemática, eliminando estudios irrelevantes o de baja calidad. Se descartaron publicaciones de más de 20 años sin relevancia actual, informes técnicos, editoriales y comentarios sin investigación original, así como fuentes no revisadas por pares (ej. tesis de pregrado o maestría). También se excluyeron estudios con metodologías débiles, como muestras pequeñas, datos insuficientes o descripciones vagas, y aquellos sin acceso completo (no Open Access). Esto asegura rigor científico, validez y relevancia, priorizando artículos científicos, revisiones sistemáticas y tesis doctorales.

Para la identificación de literatura relevante, se emplearon las bases de datos Scopus, Web of Science, Google Scholar, PubMed y ScienceDirect. Los términos de búsqueda se definieron mediante un listado de palabras clave en español e inglés, específicas al tema (e.g., "tratamiento de aguas residuales", "co-sustratos", "materia orgánica biodegradable"). Se utilizaron operadores booleanos (AND, OR, NOT) para optimizar la precisión y amplitud de los resultados, asistidos por herramientas de inteligencia artificial en la generación y combinación de dichos términos.

3. Resultados y Discusión

3.1 Bioplásticos

Los bioplásticos son una familia de materiales con diferentes propiedades y aplicaciones, que se producen a partir de diversas fuentes de biomasa renovable, como restos vegetales, ácidos grasos y aceites, que se convierten en sustancias que se estabilizan y adquieren apariencia de un plástico tradicional (Mangal *et al.*, 2023; Wijaya *et al.*, 2022). Estos pueden clasificarse en dos tipos principales: biodegradables y no biodegradables (Rahman & Boi, 2021). Los bioplásticos biodegradables son derivados de recursos biológicos, que son biodegradables e incluyen poli (ácido láctico) (PLA), poli (hidroxialcanoato) (PHA) y poli (succinato de butileno) de origen biológico (Bio-PBS), mientras que, los bioplásticos no biodegradables incluyen poli (etileno) de origen biológico (Bio-PE), poli (propileno) de origen biológico (Bio-PP) y poli (tereflato de etileno) de origen biológico (Bio-PET), que no son biodegradables, a pesar que se derivan de recursos

renovables (Rosenboom et al., 2022; Kong et al., 2023). En la Tabla 1, se resumen los tipos de bioplásticos:

Tabla 1 - Tipos de bioplásticos.

Tipos de bioplásticos	De base biológica	En base de petróleo
Biodegradable	Ácido poliláctico	Succinato de polibutileno
	Alcanoatos polihidroxilados	Tereftalato de adipato de polibutileno
	Celulosa	Policaprolactona
	Almidón	
No biodegradable		Polipropileno
	Bio-polipropileno	Poliétileno
	Bio-poliétileno	Poliestireno
		Cloruro de polivinilo

Fuente: Sidek et al. (2019).

Autores como Mostafa *et al.* (2018) afirman que existen diversos materiales a partir de residuos agrícolas con los cuales se pueden elaborar bioplásticos, mismos que pueden emplearse para el tratamiento de las aguas residuales. A continuación, en la Tabla 2 se exponen algunos estudios relacionados con la elaboración del bioplásticos:

Tabla 2 - Estudios sobre la elaboración de bioplásticos.

Recursos	Resultados	Autores
Almidón de maíz	Los resultados indicaron que se obtuvo un rendimiento de 5,72% y un porcentaje de degradación del bioplástico de 89,40% para un período de 42 días de experimentación, siendo este último un resultado bastante satisfactorio.	Avellán <i>et al.</i> (2019)
Almidón del fruto de pan	El mayor contenido de almidón se obtiene en la etapa intermedia de desarrollo del fruto con un 10% de rendimiento. Se realizaron pruebas modificando variables como glicerol que permitieron obtener materiales termoplásticos con mejores propiedades.	De La Cruz <i>et al.</i> (2020)
Cáscara de coco y papaya	Los resultados indicaron que se logró elaborar un bioplástico con color anaranjado claro, traslúcido, de textura lisa, con una buena flexibilidad y resistencia, el cual tiene las siguientes propiedades: humedad de 16.157% y humedad relativa de 19.271%, porcentaje de cenizas de 10.78%, también, presentó un alto grado de biodegradabilidad.	Macías <i>et al.</i> (2023)
Quitina, cáscara de coco, aceite de resino	El biopolímero se degradó en 15 días en condiciones aerobias, la solubilidad es baja gracias a las propiedades del aceite de resino, lo que indica que es ideal para el empaque de alimentos. La proporción ideal de los materiales son: 60% de quitina, 25% cáscara de coco y 15% aceite de resino.	Seenuvasan <i>et al.</i> (2021)

Fuente: Avellán et al. (2019), Madrigal et al. (2023), Giler et al. (2023) y Seenuvasan et al. (2021).

Los almidones extraídos de diversas fuentes vegetales, tales como el maíz, papa, trigo, yuca, cebada y arroz, pueden emplearse en la industria de polímeros como materia prima para la preparación de biopolímeros o como aditivo para mejorar las propiedades de los polímeros convencionales (Acevedo *et al.*, 2015; Salehizadeh *et al.*, 2018; Patra *et al.*, 2022). Los biopolímeros basados en almidón son los más prometedores gracias a sus bajos costos y a la alta disponibilidad de materia prima, que pueden obtenerse de las actividades agrícolas (Cañigueral *et al.*, 2009; Navarrete *et al.*, 2022).

Entre estas fuentes alternativas de almidón, el plátano destaca como una opción viable para la producción de bioplásticos, gracias a su abundancia a nivel global (Macedo *et al.*, 2022); mismos que tienen diversas aplicaciones como en las industrias, adhesivos, alimentos, tratamientos de agua (como coagulante) y polímeros (Hernández *et al.*, 2017). El almidón también puede extraerse de los desechos del plátano, para su comercialización directa o para otras aplicaciones como el tratamiento de agua residuales, debido a que, el contenido del almidón en el fruto del plátano es de aproximadamente 70 a 80% (base seca), mientras que, la cáscara puede contener hasta el 50% (Rebello *et al.*, 2014). Con respecto al fruto, el almidón se descompone en azúcares siendo el plátano verde más rico en almidón y el maduro son ricos en azúcares (Hernández *et al.*,

2017).

Macedo *et al.* (2022) manifiestan que el almidón de plátano verde exhibe características fisicoquímicas funcionales y de digestibilidad diferentes a las de fuentes convencionales como maíz, trigo, arroz y papa. Este almidón posee una alta concentración de fracción de almidón indigerible o resistente, convirtiéndole en más nutritivos y comercialmente viable. A continuación, se presentan diversos estudios de bioplástico a partir del uso del plátano (*Musa paradisiaca* L.):

Tabla 3 - Estudios relacionados con la elaboración de bioplástico a base de plátano.

Bioplástico	Resultados	Fórmula	Autores
Almidón a partir de desechos de cáscara de plátano	La extracción de almidón de los desechos de cáscara de plátano demostró tener potencial para el uso de desechos y la obtención de productos con valor agregado. El rendimiento promedio de almidón fue de 29% de masa seca, mientras que la pureza, alcanzó casi el 70%.	<ul style="list-style-type: none"> • 10 kg de cáscara de plátano de verde (<i>Musa paradisiaca</i>) 	Hernández et al. (2017)
Cáscaras de <i>Mangifera indica</i> y <i>Musa Paradisiaca</i>	Se determinó que el bioplástico elaborado con cáscara de mango tuvo una reducción del 93,06 % y el bioplástico elaborado con cáscara de plátano un 73,16 %. Con base a los diferentes volúmenes en la adición de glicerol para la preparación del bioplástico se determinó que tiene una relación directa con la biodegradabilidad de la lámina ya que, al aumentar la cantidad de glicerol, aumenta la biodegradabilidad de las láminas.	<ul style="list-style-type: none"> • 10 g de harina • 3 mL vinagre blanco • 60 mL agua destilada • 10 g cáscaras de <i>M. paradisiaca</i> y <i>M. indica</i> • 130 °C 	Sernaqué et al. (2020)
Almidón de plátano (<i>M. paradisiaca</i> L.) + Compuestos celulósicos de café (<i>Coffea arabica</i> L.)	Se utilizó almidón en las concentraciones de 9, 12 y 15 % y celulosa en las concentraciones de 2, 4 y 6 % mezclándolos con glicerina, ácido acético, cloruro de calcio y agua destilada. El bioplástico con mayor tracción fue 15% almidón y 6% celulosa.	<ul style="list-style-type: none"> • 70 g de cascarilla • 10 mL glicerina • 1 mL ácido acético • 2-6 g celulosa • 9-15 g almidón • 560 mL NaOH (10%) • 600 mL agua • 800 mL NaClO (2%) 	Cabrejos et al. (2024)

Fuente: Hernández et al. (2017), Sernaqué et al. (2020) y Cabrejos et al. (2024).

Los autores llevaron a cabo una experimentación con la producción de bioplásticos a base de cáscara de *M. paradisiaca* con 20 g de harina de plátano, 50 mL de agua destilada, 7 mL de ácido acético (vinagre) y 10 mL de glicerina, para la obtención del bioplástico (Figura 1). Los bioplásticos poseen características y/o propiedades que incluyen flexibilidad, resistencia y rigidez de la película de bioplástico (Wijaya et al., 2022; Kong et al., 2023). Con base a una encuesta realizada para valorar las propiedades del bioplástico obtenido, se determinó que el 60% de 20 encuestados indicaron que la dureza del bioplástico a escala numérica fue considerada mediana. En cuanto a la flexibilidad, el 30% señaló que esta flexibilidad fue alta, seguido del 10% que estableció que la dureza fue muy alta.

Los autores realizaron un experimento para producir bioplásticos utilizando cáscara de *Musa paradisiaca*. La formulación incluyó 20 g de harina de plátano, 50 mL de agua destilada, 7 mL de ácido acético (vinagre) y 10 mL de glicerina como plastificante. El bioplástico obtenido exhibió propiedades mecánicas como flexibilidad, resistencia y rigidez, consistentes con reportes previos (Wijaya et al., 2022; Kong et al., 2023).

Para caracterizar las propiedades físicas del bioplástico producido por los autores, se administró una encuesta a 30 participantes, quienes evaluaron dureza, flexibilidad, elasticidad, densidad y porosidad en escalas numéricas. Respecto a la dureza, el 60% la clasificó como mediana, el 30% como alta y el 10% como muy alta, reflejando heterogeneidad en las percepciones. En cuanto a la flexibilidad, el 83% la consideró muy altamente flexible. La elasticidad fue calificada como medianamente baja por el 67% y muy alta por el 33%. Sobre la densidad, el 90% la percibió entre mediana y muy alta, mientras que el 10% la evaluó como baja. Finalmente, el 100% describió la porosidad como superior a mediana, alcanzando

niveles muy altos, indicando una textura altamente porosa.

Figura 1 - Producción de bioplástico a partir de cáscaras de *Musa paradisiaca*.

(a) Cáscaras de plátano



(b) Bioplástico



(c) Medición de propiedades



Fuente: Datos de investigación.

3.2 Tratamientos de aguas residuales

Los tratamientos de aguas residuales tradicionales se centran principalmente en procesos bioquímicos, físicos y biológicos, que contribuyen considerablemente a mejorar el rendimiento de los efluentes como la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), los sólidos suspendidos totales (SST) y la turbidez (Saravanan *et al.*, 2022). No obstante, los métodos convencionales de tratamiento como el uso de lagunas, floculación-coagulación, sedimentación y procesos de cribado, por lo general son ineficientes en la eliminación de nitrógeno (Nici *et al.*, 2017). Desde este contexto, Chelangat *et al.* (2022) señalan que, en la actualidad se han desarrollado diversas investigaciones acerca de los desechos y subproductos domésticos y agroindustriales que han sido eficientes para los procesos de nitrificación-desnitrificación.

Vivanco *et al.* (2019) manifiestan que los tratamientos anaerobios son considerados como una de las tecnologías más antiguas que se emplean para la estabilización de las aguas residuales; el cual es un proceso biológico en ausencia de oxígeno que se basa en la utilización consiste en utilizar microorganismos para descomponer la materia biodegradable (Sánchez & Vizcón, 2017; Gandarillas *et al.*, 2017; Salazar *et al.*, 2019). Bisschops *et al.* (2024) señalan que estos tratamientos pueden aplicarse a temperaturas ambiente superiores a 20 ° C, especialmente, por la bioquímica de los procesos anaeróbicos y las concentraciones baja de aguas residuales. Luo *et al.* (2015) mencionan que para el tratamiento de aguas residuales con alta concentración (DQO > 4000 mg/L) se emplean procesos anaeróbicos, dado a que tiene como ventaja la recuperación de recursos mediante la generación de bioenergía a través de la producción de biogás (Kleerebezem & Macarie, 2003).

Parra *et al.* (2014) sostienen que el valor de pH es más eficiente con valores próximos a la neutralidad, aunque, no se puede generalizarse, debido a características fisicoquímicas del sustrato, implicando en la degradación anaerobia un rango de pH óptima de entre 5,5 y 6,5 unidades. En la Tabla 4, se indican los valores de la calidad inicial y final para los tratamientos anaerobios:

Los tratamientos aerobios se dan en presencia de oxígeno y se emplean microorganismos (aerobios) para la eliminación de compuestos orgánicos como DBO o DQO (Cazorla *et al.*, 2021; Córdova *et al.*, 2021). El tratamiento aeróbico es el más adecuado para el tratamiento de aguas residuales de baja de concentración (DQO < 1000 mg/L) proporcionando una alta calidad de efluente con una remoción de hasta < 30 mg/L (Ranade y Bhandari, 2014; Mishra *et al.*, 2023). Cajigas *et al.*

(2005) describen que, en este tratamiento, el pH presenta un rango de entre 6,0 y 7,5 y la capacidad buffer es dependiente del sistema Gas Carbónico/Alcalinidad. En la Tabla 4 se indican los valores de la calidad inicial y final de los tratamientos aerobios y, en la Tabla 5 se visualiza los tiempos de operación:

Tabla 4 - Calidad inicial y final de los tratamientos aeróbios.

Parámetros	Turbidez	pH	DQO	DBO	Amonio (NH ₄ ⁺)	Fósforo total (P _T)
Calidad inicial	335 NTU	7,42	1629,05 mg/L	250 mg/L	79,55 mg/L	59 mg/L
Calidad final	100 NTU	6 – 9	500 mg/L	80 mg/L	2,39 mg/L	15 mg/L

Fuente: Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA) (2015)

En la Tabla 5, se indican los parámetros de operación:

Tabla 5 - Parámetros de operación y tiempos en tratamientos anaerobios y aeróbios.

Tratamientos anaerobios		Tratamientos aerobios	
Detalle	Período	Detalle	Período
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	12 y 24 horas	Tiempo de aireación mínimo	2 a 4 horas
Concentración de oxígeno disuelto	0,2 a 2,0 mg/l	Tiempo de aireación óptimo	12 horas
Canales de aireación	1,2 a 1,8 m	Tiempo de aireación máximo	16 horas
Aireación	30 min		

Fuente: Caldera *et al.* (2003) y Vargas *et al.* (2020).

3.3 Uso de co-sustratos en tratamientos biológicos

En el contexto de los tratamientos biológicos, esencialmente en procesos como la digestión anaerobia, los co-sustratos son materiales orgánicos que se integra a un sustrato principal para optimizar la eficiencia del proceso. Chow *et al.* (2020) sostiene que la codigestión anaeróbica es reconocido como un tratamiento eficaz de efluentes para desechos industriales; gracias a su capacidad para contrarrestar la insuficiencia de nutrientes y por su viabilidad económica (Yang *et al.*, 2019). Para que un sistema biológico funcione adecuadamente necesita de cantidades apropiadas de nutrientes, ya que, en el medio en que se desarrollan los microorganismos encargados de la depuración actúa directamente en el rendimiento del proceso, siendo, la presencia de macro y micronutrientes el medio principal para un progreso adecuado de las poblaciones biológicas (Cabrera *et al.*, 2021). La adición de nutrientes estimula la densidad de microorganismos, que optimiza el proceso de biodegradación (Vallejo *et al.*, 2016).

Un factor limitante son el nitrógeno y el fósforo cuando no existen cantidad suficientes presentes en el agua residual. Por tanto, es fundamental controlar el proceso a través de la adición de cantidades de nutrientes esenciales para que la depuración biológica se desarrolle debidamente (Cabrera *et al.*, 2021). Los principales nutrientes añadidos en el tratamiento de aguas residuales son el nitrógeno y el fósforo (Saldarriaga *et al.*, 2011). El fósforo es el componente más utilizado para la adición de nutrientes en aguas residuales, especialmente, en mezcla de 50/50% de K₂HPO₄/KH₂PO₄ y H₃PO₄ con control de pH; mientras que, la adición de nitrógeno controlada puede garantizar la eficiencia del tratamiento (Cabrera *et al.*, 2021).

3.4 Adición de nitrógeno

En los tratamientos biológicos, la suplementación de nitrógeno junto con co-sustratos es una práctica común para

optimizar la eficiencia y estabilidad de los procesos. El nitrógeno constituye un nutriente esencial para el crecimiento y la actividad microbiana, ya que los microorganismos lo emplean en la biosíntesis de ácidos nucleicos, proteínas y otros compuestos fundamentales (Geisseler *et al.*, 2010). Según Guananga *et al.* (2024), la incorporación de co-sustratos incrementa la eficacia del tratamiento; sin embargo, la presencia de nitrógeno es crucial para mantener un equilibrio óptimo en la relación carbono/nitrógeno, asegurando el desempeño adecuado de las poblaciones microbianas involucradas.

$$N = \frac{(Carga\ orgánica \times Factor\ de\ conversión \times Relación\ C/N)}{100} \quad (Ec\ 1)$$

Donde:

- **N**= cantidad de nitrógeno que debe añadirse (kg/día)
- **Carga orgánica**= carga de materia orgánica que debe tratarse (kg/día)
- **Factor de conversión**= factor que depende de reactor y eficiencia del tratamiento
- **Relación C/N**= relación entre el carbono y nitrógeno en el reactor

3.5 Adición de carbono

El carbono desempeña un papel clave como fuente de energía para microorganismos que degradan materia orgánica, incrementando la eficiencia de los procesos biológicos (Skouteris *et al.*, 2015). Brotons *et al.* (2024) indican que sustratos ricos en carbono proveen carbono orgánico disuelto, generando moléculas simples y energéticas que son fácilmente metabolizadas por microorganismos, promoviendo su proliferación. Asimismo, Vásquez *et al.* (2020) destacan las propiedades adsorbentes del carbono, que facilitan la captura de contaminantes. Adicionalmente, Guerrero *et al.* (2016) subrayan beneficios como la mejora del equilibrio de nutrientes, efectos sinérgicos microbianos, aumento de materia orgánica biodegradable, estabilización de la alcalinidad, mantenimiento de la humedad y optimización de la relación carbono/nitrógeno.

$$C = \frac{(Carga\ orgánica \times Factor\ de\ conversión)}{Relación\ C/N/P} \quad (Ec\ 2)$$

Donde:

- **N**= cantidad de nitrógeno que debe añadirse (kg/día)
- **Carga orgánica**= carga de materia orgánica que debe tratarse (kg/día)
- **Factor de conversión**= factor que depende de reactor y eficiencia del tratamiento
- **Relación C/N**= relación entre el carbono, nitrógeno y fósforo en el reactor

3.6 Propuesta de incorporación de bioplásticos en tratamientos biológicos

Actualmente, la elaboración de bioplásticos a partir de productos o residuos agrícolas surgen como una alternativa sostenible y de bajo impacto en función con los plásticos tradicionales (Kumar *et al.*, 2024; Sawant *et al.*, 2024). Por tanto, incorporar bioplásticos en tratamientos biológicos se ha convertido en un tema de gran relevancia en el contexto de la sostenibilidad y la economía circular (Fiallos *et al.*, 2022). Al combinar los bioplásticos con los tratamientos biológicos, surge un abanico de posibilidades para abordar los desafíos que enfrenta la gestión de residuos y la producción de productos sostenibles. En la presente revisión bibliográfica, agregar bioplásticos a base de plátano (*Musa paradisiaca*) en el tratamiento de aguas residuales se consolida como una propuesta innovadora. Desde este contexto, surgen las siguientes alternativas:

- **Coagulante:** los coagulantes a base de plátano son una alternativa sostenible y económicamente viable para el tratamiento de aguas residuales, ya que, ayuda a eliminar contaminantes presentes en el agua logrando resultados eficientes de remoción (Kakoi et al., 2016).
- **Agentes floculantes:** pueden ayudar a aglomerar las partículas suspendidas en las aguas residuales, lo que permite la sedimentación y separación de contaminantes.

La producción de bioplásticos a partir de residuos agrícolas, como los derivados de productos o subproductos, emerge como una alternativa sostenible frente a los plásticos convencionales derivados del petróleo, reduciendo la huella de carbono y el impacto ambiental (Kumar *et al.*, 2024; Sawant *et al.*, 2024). Este enfoque no solo disminuye la dependencia de recursos fósiles, sino que también valoriza desechos orgánicos, alineándose con los principios de la economía circular (Fiallos *et al.*, 2022). Integrar bioplásticos en tratamientos biológicos amplía las posibilidades para enfrentar desafíos en la gestión de residuos y la producción sostenible, al combinar biodegradabilidad con funcionalidad técnica en procesos de depuración.

En esta revisión bibliográfica, se propone la incorporación de bioplásticos derivados de cáscaras de plátano (*Musa paradisiaca*) en el tratamiento de aguas residuales como una solución innovadora. Esta estrategia aprovecha las propiedades fisicoquímicas de las cáscaras plátano, un recurso abundante y renovable en regiones tropicales, para desarrollar materiales biodegradables con aplicaciones específicas. A continuación, se detallan y amplían las alternativas planteadas:

Coagulante: Los coagulantes derivados de desechos de plátano representan una opción sostenible y económicamente viable para el tratamiento de aguas residuales. Estos compuestos, ricos en polisacáridos como el almidón, y polifenoles, facilitan la agregación de partículas coloidales y contaminantes, mejorando su remoción con alta eficiencia (Kakoi *et al.*, 2016). Además, su origen natural reduce el uso de coagulantes químicos sintéticos, minimizando residuos tóxicos y costos operativos, lo que los hace particularmente atractivos para comunidades con recursos limitados.

Agentes floculantes: Los bioplásticos a base de plátano también actúan como agentes floculantes, promoviendo la aglomeración de partículas suspendidas en aguas residuales. Este proceso facilita la sedimentación y separación de contaminantes, optimizando la clarificación del agua (Kakoi *et al.*, 2016). Su capacidad para formar estructuras poliméricas naturales mejora la estabilidad de los flocs, incrementando la eficiencia en comparación con floculantes tradicionales. Además, su biodegradabilidad asegura una menor acumulación de residuos sólidos post-tratamiento, contribuyendo a un sistema más limpio y sostenible.

Sustrato biodegradable: Los bioplásticos a partir de desechos de plátano pueden servir como co-sustratos en procesos biológicos como la digestión anaerobia, aportando carbono orgánico biodisponible. Esto estimula la actividad microbiana, incrementando la degradación de contaminantes orgánicos y la producción de biogás, un subproducto energético valioso (Brotons *et al.*, 2024). Esta aplicación no solo mejora la eficiencia del tratamiento, sino que también genera un beneficio energético colateral.

Reducción de impacto ambiental: Al sustituir materiales sintéticos por bioplásticos de plátano, se disminuye la generación de microplásticos y la contaminación a largo plazo, un problema crítico en los sistemas de tratamiento convencionales (Sawant *et al.*, 2024). Este enfoque refuerza la sostenibilidad al cerrar el ciclo de vida de los residuos agrícolas en un marco de economía circular.

4. Conclusiones

La presente revisión evidencia que la baja relación C/N en aguas residuales domésticas restringe la actividad microbiana clave para la degradación de contaminantes, como en la digestión anaerobia, afectando la eficiencia de los tratamientos biológicos. La incorporación de bioplásticos derivados de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) se posiciona

como una solución innovadora, al proporcionar carbono orgánico biodegradable que optimiza la relación C/N y potencia la desnitrificación. Los bioplásticos, ricos en almidón y nutrientes, incrementan la eficacia del tratamiento y, al valorizar residuos agrícolas, reducen el impacto ambiental, integrándose a los principios de la economía circular. Asimismo, la adición de co-sustratos mejora la remoción de contaminantes, consolidando esta propuesta como una alternativa sostenible, eficiente y económicamente viable para mitigar la crisis de las aguas residuales, contribuyendo significativamente a la sostenibilidad ambiental y al desarrollo de tecnologías verdes.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la ESPAM-MFL por su valioso apoyo en la gestión de este trabajo, con especial reconocimiento a la Dra. Miryam Elizabeth Félix López por su destacada contribución.

Referencias

- Acevedo, E., Nuñez, M., Alvarez, J. & Bello, L. (2015). Physicochemical, digestibility and structural characteristics of starch isolated from banana cultivars. *Carbohydrate Polymers*, 124. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.02.003>
- Avellán, A., Díaz, D., Mendoza, A., Zambrano, M., Zamora, Y. & Riera, M. (2020). Obtención de bioplástico a partir de almidón (*Zea mays* L.). *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 7(1). Obtenido de <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/215/215974004/index.html>
- Bisschops, I., Kragic, D., Seghezzi, L. & Zeeman, G. (2024). El tratamiento anaeróbico como tecnología central para un saneamiento más sostenible. *IWA*. doi:[10.2166/9781789064261_0009](https://doi.org/10.2166/9781789064261_0009)
- Brito, M. & Vera, B. (2018). Uso de la cascara de banano (*Musa Paradisiaca*) modificada con Quitosano, como agente biosorbente de plomo en aguas residuales sintéticas. Obtenido de Universidad de Guayaquil.
- Brotos, M., Perujo, N., Romaní, A. & Gómez, R. (2024). Advantages of using a carbon-rich substrate in a constructed wetland for agricultural water treatment: Carbon availability and biota development. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 360. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108792>
- Cabrejos, K., Maluquis, J. & Minchán, H. (2024). Caracterización de las propiedades mecánicas del bioplástico de almidón de plátano (*Musaparadisiaca* L.) y compuestos celulósicos de café (*Coffea arabica* L.). *Revista Científica PAKAMUROS*, 12(2), 88 - 101. doi:<https://doi.org/10.37787/rft0ar53>
- Cabrera, I., Arbona, M. & García, M. (2021). Evaluación de la aplicación de nutriente biológico para tratamiento de aguas residuales de la textilera "Desembarco del Granma". *Centro Azúcar*, 48(1). Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612021000100001
- Cajigas, A., Pérez, A. & Torres, P. (2005). Importancia del pH y la alcalinidad en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. *Scientia Et Technica*, XI(27). Obtenido de <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/6955/4079>
- Caldera, Y., Madueño, P., Griborio, A., Gutiérrez, E. & Fernández, N. (2003). Efecto del tiempo de retención hidráulica en el funcionamiento de un reactor UASB tratando efluentes cárnicos. *Multiciencias*, 3(1).
- Cañigueral, N., Vilaseca, F., Méndez, J., López, J., Barberá, L., Puig, J. & Mutjé, P. (2009). Behavior of biocomposite materials from flax strands and starch-based biopolymer. *Chemical Engineering Science*, 64(11). doi:<https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.02.006>
- Cazorla, X., López, J., Zambrano, G. & Ríos, I. (2021). Tratamiento biológico de aguas residuales como un proyecto de emprendimiento comunitario del Tejar Balbanera. *Revista Dominio de las Ciencias*, 7(4), 1767 - 1787. doi:<http://dx.doi.org/10.23857/dc.v6i3.1383>
- Chelangat, E., Mbuci, K., Chaker, M., Odhiambo, V., Olisah, C., Ongulu, R. & Sillanpaa, M. (2022). Sustainable re-utilization of waste materials as adsorbents for water and wastewater treatment in Africa: Recent studies, research gaps, and way forward for emerging economies. *Environmental Advances*, 9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100282>
- Chow, W., Chong, S., Lim, J., Chan, Y., Chong, M., Tiong, T. & Pan, G. (2020). Anaerobic Co-Digestion of Wastewater Sludge: A Review of Potential Co-Substrates and Operating Factors for Improved Methane Yield. *Processes*, 8(1). doi:<https://doi.org/10.3390/pr8010039>
- Coba, N. & Carmona, C. (2021). Análisis crítico de la problemática ambiental como desafío al currículo ecuatoriano. *Digital Publisher*, 6(4), 5 - 19. doi:<https://doi.org/10.33386/593dp.2021.4.522>
- Córdova, P., Oriole, T., Cristel, I. & Navarrete, R. (2021). Tratamiento de aguas residuales domesticas mediante reactor anaerobio para la reutilización del efluente en cultivos agrícolas. *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria*, 5(14). doi:<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i14.114>
- De La Cruz, P., Madrigal, F., Montañez, C., Bolio, G., Hernández, M., Cárdenas, C. & Velásquez, M. (2020). Preparación y caracterización de bioplástico a partir de almidón del fruto de pan de sopa (*Artocarpus altilis* (s. park) fosberg). *Agro Productividad*, 13(1). doi:<https://doi.org/10.32854/agrop.vi0.1569>
- Fathali, D., Mehrabadi, A., Mirabi, M. & Alimohammadi, M. (2019). Investigation on nitrogen removal performance of an enhanced post-anoxic membrane bioreactor using disintegrated sludge as a carbon source: An experimental study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(6). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103445>

- Fiallos, M., Pérez, S. & Ramírez, A. (2022). Prospectives for the development of a circular bioeconomy around the banana value chain. *Sustainable Production and Consumption*, 30. doi:<https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.014>
- Fu, X., Hou, R., Yang, P., Qian, S., Feng, Z., Chen, Z. & Zhou, B. (2022). Application of external carbon source in heterotrophic denitrification of domestic sewage: A review. *Science of The Total Environment*, 817. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153061>
- Gandarillas, V., Saavedra, O., Escalera, R. & Montoya, R. (2017). Revisión de las experiencias en el tratamiento de aguas residuales domésticas mediante reactores UASB en Cochabamba - Bolivia comparadas con las de Latinoamérica, India y Europa. *Investigación & Desarrollo*, 1(17), 83 - 98. Obtenido de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2518-44312017000100008&script=sci_abstract
- Geisseler, D., Horwarth, W., Joergensen, R. & Ludwing, B. (2010). Pathways of nitrogen utilization by soil microorganisms – A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(12). doi:<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.08.021>
- Goddar, F., Pickering, A., Ercumen, A., Brown, J., Chang, H. & Clasen, T. (2020). Faecal contamination of the environment and child health: a systematic review and individual participant data meta-analysis. *The Lancet Planet Health*, 4(9), 405 - 415. doi:[https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30195-9](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30195-9)
- Gomes, I., & Caminha, I. (2014). Guia para estudos de revisão sistemática: uma opção metodológica para as Ciências do Movimento Humano. *Movimento*, 20(1), 395 - 411. doi:<https://doi.org/10.22456/1982-8918.41542>
- Gracia, J., Mosquera, J., Montenegro, C., Suarez, L., Acevedo, P. & Cabeza, I. (2019). Evaluación de la transformación de aguas residuales en productos de valor agregado: producción de Polihidroxyalkanoates (PHAS). *Encuentros con semilleros*, 1(1), 188 - 192. doi:<https://doi.org/10.15765/es.v1i1.1615>
- Guananga, N., Guevara, L., González, M. & Freytez, E. (2024). Procesos biológicos aplicados a las aguas residuales. Grupo Compás.
- Guerrero, I., Peláez, C. & Molina, F. (2016). Evaluación de la co-digestión anaerobia de lodos de aguas residuales municipales con residuos de alimentos. *Revista ION*, 29(1), 63 - 70. doi:<http://dx.doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016005>
- Guo, X., Li, B., Zhao, R., Zhang, R., Lin, L., Zhang, G. & Li, X. (2019). Performance and bacterial community of moving bed biofilm reactors with various biocarriers treating primary wastewater effluent with a low organic strength and low C/N ratio. *Bioresource Technology*, 287. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121424>
- Hernández, F., Morales, Y., Lambis, H. & Pasqualino, J. (2017). Starch extraction potential from plantain peel wastes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(5). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.09.034>
- Jacobo, A., Esparza, M., Chávez, M. & Fall, C. (2019). Tratamiento de un agua residual industrial a temperatura Psicoflítica con un reactor UASB. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 35(4), 905 - 915. doi:<https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.04.10>
- Jia, L., Wang, R., Feng, L., Zhou, X., Lv, J. & Wu, H. (2018). Intensified nitrogen removal in intermittently-aerated vertical flow constructed wetlands with agricultural biomass: Effect of influent C/N ratios. *Chemical Engineering Journal*, 345, 22 - 30. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.03.087>
- Kakoi, B., Kaluli, J., Ndiba, P. & Thiong, G. (2016). Banana pith as a natural coagulant for polluted river water. *Ecological Engineering*, 95. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.07.001>
- Kleerebezem, R. & Macarie, H. (2003). Treating industrial wastewater: anaerobic digestion comes of age: anaerobic treatment systems offer important advantages over conventionally applied aerobic processes for removing organic pollutants from water-based streams. (Cover Story). *Chemical Engineering*, 110(4).
- Kong, U., Mohammad, N. & Seng, G. (2023). The potential applications of reinforced bioplastics in various industries: A Review. *Polymers*, 15(10). doi:<https://doi.org/10.3390/polym15102399>
- Kumar, R., Lalnundiki, V., Shelare, S., Abhishek, G., Sharma, S., Sharma, D. & Abbas, M. (2024). An investigation of the environmental implications of bioplastics: Recent advancements on the development of environmentally friendly bioplastics solutions. *Environmental Research*, 244. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117707>
- Luo, J., Qian, G., Liu, J. & Ping, Z. (2015). Anaerobic methanogenesis of fresh leachate from municipal solid waste: A brief review on current progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.053>
- Macedo, E., Leite, N., Souza, J., Ferreira, M., Eloi, C., Vilela, J. & Martins, C. (2022). Development of starch-based bioplastics of green plantain banana (*Musa paradisiaca* L.) modified with heat-moisture treatment (HMT). *Food Packaging and Shelf Life*, 31. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100776>
- Macías, E., Anchundia, O., García, S., García, G. & Giler, S. (2023). Obtención y caracterización de un bioplástico a base de cáscara de coco y papaya. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*, 6(12), 79 - 92.
- Mammen, M., Khatana, K., Vaidehi, C., Dhanker, R., Kumar, R., Uwe, H. & Shiou, J. (2022). Enfoques biológicos que integran algas y bacterias para la degradación de contaminantes de aguas residuales: una revisión. *Fronteras en microbiología*, 12. doi:<https://translate.google.com/website?sl=en&tl=es&hl=es&client=srp&u=https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.801051>
- Mangal, M., Bose, S. & Banerjee, T. (2023). Innovations in applications and prospects of non-isocyanate polyurethane bioplastics. *Biopolymers*, 114(12). doi:<https://doi.org/10.1002/bip.23568>
- Mishra, S., Singh, V., Ormeci, B., Hussain, A., Cheng, L. & Venkiteshwaran, K. (2023). Anaerobic-aerobic treatment of wastewater and leachate: A review of process integration, system design, performance and associated energy revenue. *Journal of Environmental Management*, 327. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116898>
- Montoya, M., Espinal, M., Bello, I., López, C., Mendoza, E., Bravo, C. & López, P. (2022). Elaboración de bioplásticos a base de cáscara de plátano (*musa paradisiaca*) y almidón de maíz (*zea mays*). *Ciencia Latina Revista Multidisciplinar*, 6(4), 2385 - 2401. doi:https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i4.2763

- Mostafa, N., Farag, A., Abo-dief, H. & Tayeb, A. (2018). Production of biodegradable plastic from agricultural wastes. *Arabian Journal of Chemistry*, 11(4). doi:<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.04.008>
- Navarrete, C., Mezones, J., Ponce, W., Brito, B., Viera, W., Córdova, A. & Riera, M. (2023). Obtención y caracterización de bioplásticos a partir de almidón acetilado de semillas de aguacate. *Avances en Química*, 18(1), 29 - 38.
- Parra, B., Torres, P., Marmolejo, L., Cárdenas, L., Vásquez, C., Torres, W. & Ordóñez, J. (2014). Influence of pH on anaerobic digestion of municipal bio-wastes. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 17(2), 553 - 562. Obtenido de <https://revistas.udca.edu.co/index.php/ruadc/article/view/421/363>
- Patra, B., Nanda, S. & Dalai, A. (2022). Innovations in applications and prospects of bioplastics and biopolymers: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20, 379 - 395. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/S10311-021-01334-4>
- Paytan, T. (2021). Adsorción de plomo (II) usando cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) en aguas contaminadas. Obtenido de Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Pereira, A., A., Shitsuka, D., Parreira, F. & Shitsuka, R. (2018). Metodologia da pesquisa científica. Santa Maria/RS: UAB/NTE/UFSM.
- Rahman, H. & Bhoi, P. (2021). An overview of non-biodegradable bioplastics. *Journal of Cleaner Production*, 294. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126218>
- Ranade, V. & Bhandari, V. (2014). Chapter 1 - Industrial Wastewater Treatment, Recycling, and Reuse: An Overview. *Industrial Wastewater Treatment, Recycling and Reuse*, 1- 80. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099968-5.00001-5>
- Rebello, L., Ramos, A., Pertuzatti, P., Barcia, M., Muñoz, N. & Gutiérrez, I. (2014). Flour of banana (*Musa AAA*) peel as a source of antioxidant phenolic compounds. *Food Research International*, 55. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.11.039>
- Rosenboom, J., Langer, R. & Traverso, G. (2022). Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews Materials* volume, 7, 117 - 137. doi:<https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>
- Salazar, L., Uribe, L., Gómez, L. & Zafra, C. (2019). Analysis of the efficiency of UASB reactors in a municipal wastewater treatment plant. *Revista DYNA*, 86(209), 319 - 326. doi:<https://doi.org/10.15446/dyna.v86n209.70332>
- Saldarriaga, J., Hoyos, D. & Correa, M. (2011). Evaluación de procesos biológicos unitarios en la remoción simultánea de nutrientes para minimizar la eutrofización. *Revista EIA*(15), 129 - 140. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n15/n15a11.pdf>
- Salehizadeh, H., Yan, N. & Farnood, R. (2018). Recent advances in polysaccharide bio-based flocculants. *Biotechnology Advances*, 36(1). doi:<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.10.002>
- Sánchez, F. & Vizcón, R. (2017). La Codigestión de Residuos Orgánicos Municipales: una contribución energética, ambiental y de salud humana. *Revista de Ingeniería Energética*, XXXVIII(3), 213 - 223. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/rie/v38n3/rie08317.pdf>
- Saravanan, A., Thamarai, P., Kumar, P. & Rangasamy, G. (2022). Recent advances in polymer composite, extraction, and their application for wastewater treatment: A review. *Chemosphere*, 308. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136368>
- Sawant, S., Bhapkar, S., Song, J. & Seo, H. (2024). Sustainable bioplastics: harnessing pear agro-industrial waste for polyhydroxyalkanoates production: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21, 7341 – 7352.
- Seenuvasan, M., Geor, C. & Growther, L. (2021). Production of a biopolymer film from biological wastes and its statistical analysis. *Bioresource Technology Reports*, 13. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100610>
- Sernaqué, F., Huamán, L., Pecho, H. & Chacón, M. (2020). Biodegradabilidad de los bioplásticos elaborados a partir de cáscaras de *Mangifera indica* y *Musa paradisiaca*. *Centro Agrícola*, 47(4). Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/cag/v47n4/0253-5785-cag-47-04-22.pdf>
- Shi, Y., Liu, T., Yu, H. & Quan, X. (2022). Enhancing anoxic denitrification of low C/N ratio wastewater with novel ZVI composite carriers. *Journal of Environmental Sciences*, 112, 180 - 191. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.05.021>
- Sidek, I., Draman, S., Abdullah, S. & Anuar, N. (2019). Current development on bioplastics and its future prospects: An Introductory Review. *i TECM MAG*, 1, 03-08. doi:<http://doi.org/10.26480/itechmag.01.2019.03.08>
- Skouteris, G., Saroj, D., Melidis, P. & Ouki, S. (2015). The effect of activated carbon addition on membrane bioreactor processes for wastewater treatment and reclamation – A critical review. *Bioresource Technology*, 185. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.010>
- Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA). (2015). Edición Especial N° 387 - Registro Oficial.
- Torske, M. (2019). La realidad de las aguas servidas en Ecuador. Obtenido de YAKUNINA.
- UN Water. (2020). The United Nations World Water Development Report 2020 Water and Climate Change.
- Vallejo, V., Sandoval, J., Garagoa, S. & Bastos, J. (2016). Evaluación del efecto de la bioestimulación sobre la biorremediación de hidrocarburos en suelos contaminados con alquitrán en Soacha, Cundinamarca – Colombia. *Acta Agronómica*, 65(4), 354 - 361. doi:<http://dx.doi.org/10.15446/acag.v65n4.51013>
- Vargas, A., Calderón, J., Velásquez, D., Castro, M. & Núñez, D. (2020). Análisis de los principales sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales domésticas en Colombia. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 28(2), 315 - 322.
- Vásquez, N., Martínez, R., Banda, J., Espejel, F., García, J., Godínez, L. & Robles, I. (2020). Estudio de la viabilidad del uso de carbón activado de residuos agroindustriales en un filtro electro-fenton como alternativa al carbón activado comercial para el tratamiento de agua residual textil. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 40, 565 - 574.

Villa, J. (2022). Evaluación de un reactor aerobio/anóxico para la eliminación biológica de nitrógeno en lixiviados de relleno sanitario Pichacay. Obtenido de Biblioteca Digital ODUICAL.

Vivanco, E. & Yaya, R. (2019). Manual técnico sobre tecnologías biológicas anaerobias aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales. Obtenido de CYTED: <http://nbcpucv.cl/wp-content/uploads/2019/02/Tratamiento%20anaerobio%20de%20aguas%20residuales-2.pdf>

Wijaya, C., Marta, H., Sukri, N., Cahyana, Y. & Mohammad, M. (2022). A comprehensive study on starch nanoparticle potential as a reinforcing material in bioplastic. *Polymers*, 14(22). doi:<https://doi.org/10.3390/polym14224875>

Xin, G., Leng, J., Zhu, J., Zhang, K., Zhao, J., Wu, P. & Hu, B. (2022). Influence mechanism of C/N ratio on heterotrophic nitrification- aerobic denitrification process. *Bioresource Technology*, 343. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126116>

Yang, Q., Wu, B., Yao, F., He, L., Chen, F., Ma, Y. & Li, X. (2019). Biogas production from anaerobic co-digestion of waste activated sludge: co-substrates and influencing parameters. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 18, 771 - 793.

Zambrano, J., Delgado, A., Zambrano, E. & Peñaherrera, S. (2022). Contaminantes biológicos presentes en fuentes de agua del centro-sur de la provincia de Manabí, Ecuador. *Siembra*, 9(2). doi:<https://doi.org/10.29166/siembra.v9i2.4011>