

## **Artículo de Revisión**

# **FUNCIONALIZACIÓN DE POLÍMEROS A PARTIR DE SUBPRODUCTOS AGROINDUSTRIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

## **FUNCTIONALIZATION OF POLYMERS FROM AGROINDUSTRIAL BY PRODUCTS FOR WASTEWATER TREATMENT**

Carmen María Moreira Vásquez<sup>1,2\*</sup> <https://orcid.org/0009-0002-2609-4941>  
Liceth Janina Solorzano Zambrano<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6964-0696>  
Ely Fernando Sacón Vera<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0001-9625-3413>  
Alex Alberto Dueñas Rivadeneira<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8603-0694>

<sup>1</sup>Maestría Profesional en Química, Mención Química Ambiental, Facultad de Postgrado,  
Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.

<sup>2</sup>Departamento de Procesos Agroindustriales, Facultad de Agrociencias,  
Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.

<sup>3</sup>Carrera de Agroindustria. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí  
Manuel Félix López. Manabí, Ecuador.

Recibido: Julio 7, 2026; Revisado: Julio 10, 2026; Aceptado: Agosto 13, 2026

## **RESUMEN**

### **Introducción**

La funcionalización de polímeros mediante subproductos agroindustriales como bagazo de caña, cáscaras de maní, naranja, café y palma, paja de trigo y arroz, se ha presentado como alternativa de tratamiento y sostenibilidad ambiental para la remoción de contaminantes como colorantes aniónicos y catiónicos, metales como Cd<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup> y Cr (VI) y antibióticos (SMX) presentes en aguas residuales.

### **Objetivo**

Evaluar el efecto de la funcionalización de polímeros a partir de subproductos agroindustriales para su aplicación en el tratamiento de aguas residuales.

### **Materiales y Métodos**

Esta investigación se efectuó mediante un enfoque de revisión bibliográfica descriptiva y



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

\* Autor para la correspondencia: Carmen M. Moreira, Email: [carmen.moreira@utm.edu.ec](mailto:carmen.moreira@utm.edu.ec)



analítica bajo el método de PRISMA, se seleccionaron 34 investigaciones para la base y síntesis de evidencias disponibles en la inclusión de la temática de estudio.

### **Resultados y Discusión**

La funcionalización de polímeros tiene eficacia ya que el bagazo de caña sulfonado permitió la remoción de 127-166 mg/g para colorantes catiónicos, el biochar de la cáscara de maní acompañado de un hidrogel permitieron la remoción de 164,83 mg/g para  $\text{Cd}^{2+}$  el bagazo de caña dopado con Fe(III) removi6 57 mg/g para ( $\text{Pb}^{2+}$ ), el OBC/TOCNF + PEI espuma a partir de bagazo + paja de arroz demuestra remoci6n de 70-90% para  $\text{Cd}^{2+}$ , el biochar de cáscara de café y naranja acompañado de quitosano logr6 remover 14,73 mg/g de antibiótico sulfametoxazol SMX y el quitosano combinado con un biochar de bagazo de caña (SCNC) alcanz6 una remoci6n de 98% para colorantes ani6nicos.

**Palabras clave:** Biopolímero; funcionalizaci6n de polímeros; tratamiento de aguas residuales.

### **ABSTRACT**

#### **Introduction:**

The functionalization of polymers using agro-industrial by-products such as sugarcane bagasse, peanut shells, orange peels, coffee residues, oil palm residues, wheat straw, and rice straw has emerged as a sustainable and environmentally friendly alternative for the removal of contaminants from wastewater, including anionic and cationic dyes, heavy metals such as  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ , and Cr(VI), as well as antibiotics such as sulfamethoxazole (SMX).

#### **Objective**

To evaluate the effect of polymer functionalization using agro-industrial by-products for wastewater treatment applications.

#### **Materials and Methods**

This study was conducted through a descriptive and analytical literature review following the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) methodology. A total of 34 scientific studies were selected to support the synthesis and analysis of the available evidence related to the study topic.

#### **Results and Discussion**

The analyzed studies demonstrated that polymer functionalization is an effective strategy for wastewater treatment. Sulfonated sugarcane bagasse achieved adsorption capacities ranging from 127 to 166 mg/g for cationic dyes. Peanut shell-derived biochar combined with a hydrogel exhibited an adsorption capacity of 164.83 mg/g for  $\text{Cd}^{2+}$ . Fe(III)-doped sugarcane bagasse removed up to 57 mg/g of  $\text{Pb}^{2+}$ . OBC/TOCNF + PEI foam produced from bagasse and rice straw achieved cadmium removal efficiencies between 70% and 90%. Chitosan combined with orange peel and coffee-derived biochar adsorbed 14.73 mg/g of the antibiotic sulfamethoxazole (SMX). Furthermore, chitosan functionalized with sugarcane bagasse biochar (SCNC) reached a removal efficiency of 98% for anionic dyes

**Keywords:** Biopolymer; polymer functionalization; wastewater treatment.

---

## **1. INTRODUCCIÓN**

Actualmente la industrialización ha favorecido la presencia de contaminantes emergentes, metales pesados, colorantes y compuestos orgánicos persistentes, mismos que presentan riesgo ambiental, frente a esta problemática se da la búsqueda de tecnologías de tratamientos eficientes, sostenibles y con viabilidad económica. Entre estas innovaciones tecnológicas se encuentra la funcionalización de polímeros a través de subproductos agroindustriales como cáscaras, bagazos, semillas, almidones, entre otros, mismos que se encuentran enriquecidos por compuestos bioactivos como lignina, celulosa y taninos, los cuales ofertan propiedades considerables para la remoción de contaminantes de diferentes tipos, por eso indican Vargas & Rodríguez, (2021) que dentro de los campos de estudio en los que se ha expandido la funcionalización se encuentra la nanocelulosa donde la producción de hidrogeles ha encontrado aplicaciones en áreas como la biomedicina y se ha explorado como inhibidor de emulsiones. Sin embargo, su mayor desarrollo se ha observado en el tratamiento de aguas, donde se utiliza para eliminar bacterias, colorantes, compuestos orgánicos y otros contaminantes.

Habitualmente, los métodos de tratamiento de aguas residuales se han basado en procesos físicos, químicos y biológicos ya que estos permiten la remoción de sólidos y polucionantes de tipo tóxicos. Sin embargo, la creciente complejidad de los contaminantes emergentes, como los compuestos farmacéuticos, los microplásticos y los contaminantes orgánicos persistentes, han impulsado la búsqueda de soluciones más avanzadas y sostenibles debido a que como indican (Duré et al., 2022) estos durante mucho tiempo han sido ignorados por su baja concentración en el orden de mg/L o ng/L, por esta manera se han implementado sistemas de biorremediaciones que contienen un amplio espectro de procesos que van desde técnicas convencionales hasta innovaciones tecnológicas.

Dentro de este contexto se considera que los subproductos agroindustriales son residuos que tienen ventajas frente a la adsorción y existe una cantidad considerable de los mismos que no es aprovechada y lo afirman (Aguiar et al., 2021) donde indican que Ecuador genera un estimado de 2,2 millones de toneladas anuales de residuos agroindustriales, que en su mayoría son desechos lignocelulósicos o compuestos de almidón, para ejemplo de ello Vargas et al. (2023) muestran en su investigación la caracterización química del rastrojo de piña y el raquis de aceite de palma africana sometidos a degradación química y tratamientos mecánicos para la obtención de nanofibras de celulosa, mismas que fueron utilizadas como material adsorbente y membranas filtrantes en tratamientos de aguas residuales.

A pesar del creciente número de investigaciones sobre la funcionalización de polímeros obtenidos a partir de subproductos agroindustriales para el tratamiento de aguas residuales, la información disponible permanece dispersa y presenta una alta heterogeneidad en cuanto a las materias primas utilizadas, los métodos de funcionalización, los grupos funcionales incorporados, las condiciones experimentales y las eficiencias de remoción reportadas. Esta situación dificulta la comparación entre estudios y limita la identificación de las estrategias más eficaces para la eliminación de diferentes contaminantes y su potencial aplicación a mayor escala. En este contexto, la presente revisión tiene como objetivo evaluar el efecto de la funcionalización de polímeros a partir de subproductos agroindustriales para su aplicación en el tratamiento

---

de aguas residuales.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta revisión bibliográfica se efectuó mediante un enfoque de revisión bibliográfica descriptiva y analítica bajo el método de PRISMA, la literatura científica relacionada con la funcionalización de polímeros a partir de subproductos agroindustriales para su aplicación en el tratamiento de aguas residuales se localizó a partir de los descriptores en español e inglés, tales como: “residuos agroindustriales”, “funcionalización de polímeros”, “biopolímeros”, “tratamiento de aguas residuales”, “*agro-industrial waste*”, “*polymer functionalization*” y “*wastewater treatment*”.

Inicialmente se realizó una búsqueda generalizada en bases de datos reconocidas como Scopus, *Web of Science*, Redalyc y Scielo, donde inicialmente se recopilaron 7437 investigaciones relacionados con el tema, se aplicaron criterios de inclusión como artículos científicos, revisiones, tesis y documentos técnicos publicados preferentemente en los últimos 5 años quedando un total de 110 investigaciones en idioma español e inglés, y como criterios de exclusión se establecieron documentos duplicados y publicaciones sin acceso al texto completo, generando un total de 34 documentos que aportaban en la síntesis de la revisión. La información recopilada fue sometida a un análisis comparativo y crítico que permitió diferencias de eficiencia entre los estudios.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Subproductos agroindustriales

Según Yoplac et al. (2021) el incremento en la producción de alimentos para atender las demandas de una población en constante crecimiento ha generado un volumen significativamente mayor de subproductos, que pueden representar hasta el 90% del peso total del producto cosechado, por eso Aguiar et al. (2021) indican que el empleo de subproductos puede resultar una opción económicamente accesible. También Salazar et al., (2021) enfatizan durante su investigación que diversos estudios han documentado la incorporación de subproductos agrícolas en matrices poliméricas, como el bagazo de caña, agave, fique y yute, entre otros. Esto se debe a características como la hidrofiliidad y el débil entrecruzamiento de las fibras, que favorecen la adhesión interfacial dentro de la matriz polimérica.

### 3.2 Tipos de subproductos agroindustriales

Según Gámez-Villazana, (2020) los subproductos derivados de diversos alimentos también se clasifican como predominantes de diferentes compuestos bioactivos, por esta razón decidió agruparlos de la siguiente manera:

- Subproductos de cosecha: Abarcan pajas, hojas, cáscaras y tallos que resultan de la cosecha de diferentes cultivos.
  - Subproductos de procesamiento: Son aquellos que se generan durante la industrialización de productos agrícolas, como pulpa de diferentes frutas, bagazo de distintos productos, entre otros.
  - Subproductos líquidos: Los residuos líquidos son de tipo agroindustrial, aguas residuales, lixiviados, efluentes de sistemas de riego, entre otros.
-

Estos subproductos contienen cantidades significativas de compuestos bioactivos presentes en la remoción de diferentes contaminantes como se menciona a continuación en la tabla 1.

**Tabla 1.** Relación entre los compuestos bioactivos, los grupos funcionales y los mecanismos de remoción presentes en subproductos agroindustriales

| <i><b>Compuestos bioactivos</b></i> | <i><b>Grupo funcional</b></i>                                              | <i><b>Mecanismo de remoción</b></i>                                     | <i><b>Referencia</b></i>                               |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Polifenoles                         | Hidroxilo fenólico (-OH)                                                   | Complejación de compuestos                                              | (Chañi-Paucar et al., 2021)<br>(Cardullo et al., 2021) |
| Celulosa y hemicelulosa             | Hidroxilo(-OH), carbonilo(C=O) y carboxilo(-COOH)                          | Complejación e intercambio iónico                                       | (Lescano, 2024)                                        |
| Lignina                             | Hidroxilo fenólico (-OH)                                                   | Complejación e intercambio iónico                                       | (Zhang et al., 2022)                                   |
| Pectina                             | Carboxilo (-COOH), hidroxilo (-OH)                                         | Floculación y coagulación                                               | (Sagar et al., 2018)                                   |
| Taninos                             | Hidroxilo fenólico (-OH)                                                   | Quelación y formación de puentes de hidrogeno.                          | (Elshafie et al., 2023)                                |
| Proteínas                           | Amino(-NH <sub>2</sub> ), carboxilo(-COOH), amida(-CONH-) e hidroxilo(-OH) | Coagulación floculación                                                 | (Lee & Stuckey, 2022)                                  |
| Aceites esenciales y terpenos       | Grupos hidroxilo(-OH), carbonilo (C=O), aldehído(-CHO), éter(-O-)          | Actividad antimicrobiana                                                | (Pathania et al., 2022)<br>(de Medeiros et al., 2022)  |
| Ácidos orgánicos                    | Carboxilo(-COOH)                                                           | Regulación del pH, coagulación y floculación                            | (Perez, 2024)                                          |
| Las nanopartículas naturales        | Silanol(-SiOH), siloxano(-Si-O-Si-)                                        | Adsorción superficial, complejación                                     | (Jain et al., 2021)                                    |
| El almidón                          | Hidroxilo (-OH)                                                            | Formación de puentes de hidrógeno, adsorción física, intercambio iónico | (Chaemiso, 2019)                                       |
| Quitina y quitosano                 | Amino(-NH <sub>2</sub> ), hidroxilo(-OH)                                   | Complejación e intercambio iónico                                       | (González & Silva, 2023)                               |
| Caucho natural                      | Poliisopreno(C=C)                                                          | Flexibilidad, resistencia a la tracción y biodegradabilidad.            | (Basak et al., 2024)                                   |

|                   |                                  |                                                                        |                        |
|-------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Los Alginatos     | Carboxilo(COOH) e hidroxilo(-OH) | Intercambio iónico, complejación y gelificación                        | (Montes et al., 2021)  |
| Ácido poliláctico | Éster(-COO-) y carbonilo(C=O)    | Filtración por membranas y biodegradación controlada en biorreactores. | (Rosales et al., 2021) |

### 3.3 Grupos funcionales involucrados en la bioadsorción

Los grupos funcionales en química orgánica son una propiedad base ya que determinan familias de compuestos que permiten características de acidez, polaridad y capacidad de formación de enlaces permitiendo clasificar compuestos, anticipar reacciones químicas y diseñar rutas sintéticas eficaces como se muestra a continuación.

- El Carboxilo (–COOH), Hidroxilo (–OH) y Carbonilo (C=O) tienen mayor afinidad con subproductos agroindustriales que tienen presencia de celulosa, hemicelulosa, lignina, pectinas y biocarbones (Chakma et al., 2026).
- El Amino (–NH<sub>2</sub>) está relacionado con subproductos que tiene presencia de quitosano, quitina, proteínas y biomasa microbiana trabajando mediante quelación, complejación y atracción electrostática (Biswas et al., 2025).
- El Sulfhídrico (–SH) tiene mayor empatía con biomasa microbiana y materiales funcionalizados relacionados a subproductos agroindustriales (Tewari et al., 2026).

Luego de observar la afinidad de los grupos funcionales con los subproductos de origen agroindustrial se muestra el efecto de remoción frente a diferentes metales mencionados en la tabla 2.

**Tabla 2.** Efectos de polímeros funcionalizados a partir de subproductos agroindustriales

| <b>Polímero funcionalizado + material</b> | <b>Tipo de contaminante</b>      | <b>Porcentaje de remoción</b>       | <b>Grupo funcional dominante</b>                 | <b>Subproducto agroindustrial</b> | <b>Fuente</b>              |
|-------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| Chitosán + biochar bagazo de caña (SCNC)  | Colorantes aniónicos (Congo Red) | 98,4% / q <sub>max</sub> 170 mg/g   | –NH <sub>3</sub> <sup>+</sup>                    | Bagazo de caña                    | (Akl & Serage, 2024)       |
| Bagazo de caña sulfonado (SCB@SA)         | Colorantes catiónicos            | q <sub>max</sub> 127,48-166,75 mg/g | –SO <sub>3</sub> H/–SO <sub>3</sub> <sup>–</sup> | Bagazo de caña                    | (Abd-Elhamid et al., 2024) |
| Bagazo dopado con Fe (III) (SBFB)         | Metales (Pb <sup>2+</sup> )      | 100% Pb / q <sub>max</sub> 57 mg/g  | Fe–OH                                            | Bagazo de caña                    | (Praipipat et al., 2023)   |

|                                                      |                    |                                 |                                      |                           |                            |
|------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Hidrogel<br>AM/CMC/B +<br>biochar cáscara<br>de maní | $\text{Cd}^{2+}$   | $q_{\text{max}}$ 164,83<br>mg/g | $-\text{COOH} / -$<br>$\text{COO}^-$ | Cáscara de<br>maní        | (Du et al., 2023)          |
| Chitosán +<br>biochar<br>magnético trigo             | Cr (VI)            | $q_{\text{max}}$ 121,8<br>mg/g  | $-\text{NH}_3^+$                     | Paja de trigo             | (Yu et al., 2024)          |
| OBC/TOCNF +<br>PEI espuma                            | $\text{Cd}^{2+}$   | 70-90%                          | $-\text{NH}_2$                       | Bagazo + paja<br>arroz    | (EL-Sayed et al.,<br>2025) |
| Chitosán-biochar<br>naranja / café                   | Antibiótico<br>SMX | $q_{\text{max}}$ 14,73 mg/g     | $-\text{NH}_2$                       | Cáscara<br>naranja / café | (Son Tran et al.,<br>2023) |

Los resultados evidenciados en la tabla 2 muestran que la funcionalización de los polímeros manifiesta efectividad en remoción de contaminantes, el quitosano combinado con un biochar derivado de bagazo de caña (SCNC), alcanzó una remoción superior al 98% para colorantes aniónicos, donde la concentración inicial del colorante fue de 100 mg/L, una dosis de adsorbente de 0,05 g, manejando un tiempo de contacto de 200 minutos con un pH cercano a 3, el biocompuesto logró remover más del 95% del colorante específicamente para Congo Red ya que alcanzó una capacidad máxima de adsorción de 170 mg/g (Akl & Serage, 2024) afirman que la incorporación de los grupos funcionales que son procedentes del biochar, incrementan la densidad de sitios activos significativamente, lo que permite un mejoramiento de las interacciones electrostáticas que existen entre el contaminante y el polímero funcionalizado.

En la remoción de los colorantes catiónicos trabajaron con intervalo de pH inicial de 2 a 8 ya que este influye principalmente en el grado de ionización de los colorantes, lograron alcanzar la capacidad máxima de adsorción de 127,48 mg/g para el azul de metileno y 166,75 mg/g para el Bismarck Brown R, indicando que las modificaciones químicas dirigidas son decisivas en la eficiencia de adsorción (Abd-Elhamid et al., 2024).

Mencionan Praipipat et al. (2023) que la inserción de los grupos sulfonatos y la dopación metálica permite un aumento considerable de la densidad de carga superficial y la similitud electrostática, en este estudio trabajaron el efecto de la dosis inicial del adsorbente (0,1–0,6 g), el tiempo de contacto (1–6 h), el pH (1, 3, 5, 7, 9 y 11) y la concentración inicial de plomo (5–30 mg/L), donde se obtuvieron los siguientes resultados 6,161 mg/g para SB, 27,027 mg/g para SBF, 23,697 mg/g para SBB y 57,471 mg/g para SBFB siendo este último el 100% de remoción de ( $\text{Pb}^{2+}$ ) como se lo muestra en la tabla 2.

De la misma manera mencionan (Du et al., 2023) que la integración de los subproductos que son de tipo lignocelulósicos tienen la función de mejorar la porosidad y la retención de cargas, se puede apreciar en este estudio que se inició trabajando con 10 mg/kg de Cd y al final del proceso el material presentó una capacidad máxima de adsorción de 164,83

mg/g para  $\text{Cd}^{2+}$  con un pH de 5 lo que beneficia mecanismos combinados de quimiosorción y complejación.

En el caso del Cr(VI) la adsorción favorable fue en condiciones ácidas pH 1, con un valor de 121,8 mg/g debido a la protonación de los grupos amino del quitosano, que adquieren carga positiva y promueven la atracción electrostática de las especies aniónicas de Cr(VI), pero también evidenciaron que la capacidad de adsorción disminuyó gradualmente a medida que aumentó el pH, alcanzando 35,9 mg/g a pH 7 (Yu et al., 2024).

El efecto de la incorporación del biochar oxidado a partir de la paja de arroz en diferentes proporciones, alcanzo eficiencia de remoción del 70% y 90% después de 1 y 2 horas de contacto, respectivamente, utilizando 0,15 g del compuesto BCC3 en 50 mL de una solución de Cd(II) de 100 mg/L a pH 7,0 (EL-Sayed et al., 2025).

El biocompuesto de quitosano y biochar a partir de cáscaras de naranja y café presentó una capacidad máxima de adsorción de 14,73 mg/g para el antibiótico sulfametoxazol (SMX), las condiciones más favorables para la remoción se dieron a un pH 7, con una dosis de adsorbente de 2 g/L, un tiempo de contacto de 90 minutos y una temperatura de 25 °C (Son et al., 2023).

#### 4. CONCLUSIONES

1. La funcionalización de polímeros obtenidos a partir de subproductos agroindustriales incrementó la capacidad de adsorción al incorporar grupos funcionales como  $-\text{NH}_3^+$ ,  $-\text{SO}_3\text{H}/-\text{SO}_3^-$ ,  $\text{Fe}-\text{OH}$ ,  $-\text{COOH} / -\text{COO}^-$ ,  $-\text{NH}_2$ , los cuales favorecen la interacción con los contaminantes mediante mecanismos de complejación, intercambio iónico y atracción electrostática.
2. Los mejores resultados se observaron en la remoción de metales pesados, especialmente  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  y Cr (VI), así como de colorantes catiónicos y aniónicos, entre ellos azul de metileno y el congo red, alcanzando considerables eficiencias de adsorción bajo condiciones óptimas de operación.
3. Estos hallazgos evidencian que la funcionalización mejora las propiedades fisicoquímicas de los bioadsorbentes y amplía su aplicabilidad en el tratamiento de aguas residuales. No obstante, la mayoría de los estudios se desarrollaron a escala de laboratorio, por lo que aún se requieren investigaciones que evalúen su desempeño en sistemas continuos y a escala piloto para validar su viabilidad técnica y económica.

#### REFERENCIAS

- Abd-Elhamid, A. I., Mostafa, A. G., Nayl, A. A., & Akl, M. A. (2024). Novel sulfonic groups grafted sugarcane bagasse biosorbent for efficient removal of cationic dyes from wastewater. *Scientific Reports*, 14(1), 19129. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60193-5>
- Aguiar, S., Arboleda, L., & Uvidia, H. (2021). Aprovechamiento de residuos agroindustriales como alternativa en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Alfa*, 5(15), 649-660. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i15.145>
- Akl, M. A., & Serage, A. A. (2024). Chitosan impregnated sugarcane bagasse biochar for removal of anionic dyes from wastewater. *Scientific Reports*, 14(1), 27097.
-

<https://doi.org/10.1038/s41598-024-77708-9>

- Basak, S., Shakyawar, D. B., Samanta, K. K., & Bhowmick, M. (2024). Hemp fibre reinforced natural rubber bio-macromolecule based biodegradable engineered leather. *International Journal of Biological Macromolecules*, 282, 137280. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137280>
- Biswas, S., Nayak, A. K., & Pal, A. (2025). Surfactant-influenced biosorption as a sustainable and effective way for the eradication of environmental pollutants: A review. *RSC Sustainability*, 3(1), 112-133. <https://doi.org/10.1039/D4SU00574K>
- Cardullo, N., Leanza, M., Muccilli, V., & Tringali, C. (2021). Valorization of agri-food waste from pistachio hard shells: Extraction of polyphenols as natural antioxidants. *Resources*, 10(5), 45. <https://doi.org/10.3390/resources10050045>
- Chaemiso, T. D. (2019). Removal methods of heavy metals from laboratory wastewater. *Journal of Natural Sciences Research*, 9(2), 36. <https://www.iiste.org/Journals/index.php/JNSR/article/view/46050>
- Chakma, S., Hasan, M., Rakshit, S. K., Kozinski, J., & Kang, K. (2026). Review of recent advances in the design, synthesis, and modification of biochar for remediation of heavy metal pollution in water. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 104(4), 1769-1795. <https://doi.org/10.1002/cjce.25693>
- Chañi-Paucar, L. O., Silva, J. W. L., Maciel, M. I. S., & Lima, V. L. A. G. (2021). Simplified process of extraction of polyphenols from agroindustrial grape waste. *Food Science and Technology*, 41(suppl 2), 723-731. <https://doi.org/10.1590/fst.31120>
- de Medeiros, A. D. M., Silva Junior, C. J. G. da, Amorim, J. D. P. de, Durval, I. J. B., Costa, A. F. de S., & Sarubbo, L. A. (2022). Oily wastewater treatment: methods, challenges, and trends. *Processes*, 10(4), 743. <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/4/743>
- Du, F., Liu, L., Pan, Y., Wu, C., Wang, R., Zhao, Z., Fan, W., Song, H., Shi, Y., & Wang, J. (2023). A novel biochar-based composite hydrogel for removing heavy metals in water and alleviating cadmium stress in tobacco seedlings. *Scientific Reports*, 13(1), 15656. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41946-0>
- Duré, G. M., Medina, L., Rodríguez, S., Ferreira, F., Sezerino, P. H., & López, T. (2022). Fitorremediación de contaminantes emergentes de origen farmacéutico en humedales flotantes. *Reportes científicos de la FACEN*, 13(2), 153-159. <https://doi.org/10.18004/rcfacen.2022.13.2.153>
- EL-Sayed, N. S., Dacrory, S., El-Sakhawy, M., Hassan, E. B., & Kamel, S. (2025). Fabrication of nanocomposite based on oxidized biochar and oxidized cellulose nanofibers and its potential cd(II) adsorption. *Adsorption*, 31(3), 56. <https://doi.org/10.1007/s10450-025-00610-x>
- Elshafie, H. S., Camele, I., & Mohamed, A. A. (2023). A comprehensive review on the biological, agricultural and pharmaceutical properties of secondary metabolites based-plant origin. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(4), 3266. <https://doi.org/10.3390/ijms24043266>
- Gámez-Villazana, J. (2020). Avances en la determinación de compuestos bioactivos en alimentos. *Revista de Ciencia y Tecnología Agrollanía*, 19, 7-17. <http://bdigital2.ula.ve:8080/xmlui/654321/5843>
-

- González, M., & Silva, J. (2023). Síntesis de nanopartículas de magnetita recubiertas de quitosano para la adsorción de cromo hexavalente. *Perfiles*, 1(29), 78-89. [https://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S2477-91052023000100078&script=sci\\_arttext](https://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S2477-91052023000100078&script=sci_arttext)
- Jain, K., Patel, A. S., Pardhi, V. P., & Flora, S. J. S. (2021). Nanotechnology in Wastewater Management: A new paradigm towards wastewater treatment. *Molecules*, 26(6), 1797. <https://doi.org/10.3390/molecules26061797>
- Lee, S. Y., & Stuckey, D. C. (2022). Separation and biosynthesis of value-added compounds from food-processing wastewater: Towards sustainable wastewater resource recovery. *Journal of Cleaner Production*, 357, 131975. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131975>
- Lescano, J. G. (2024). Aerogeles a partir de nanocelulosa: Aplicaciones en la agroindustria. *AgroScience Research*, 2(2), 57-63. <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-privada-del-norte/filosofia-y-pensamiento-contemporaneo/aerogeles-de-nanocelulosa-aplicaciones-en-agroindustria-agroscience-research/127985221?sid=c7a8f7ea-84b7-4df8-8124-309d4882f01d1787157923>
- Montes, L., Gisbert, M., Hinojosa, I., Sineiro, J., & Moreira, R. (2021). Impact of drying on the sodium alginate obtained after polyphenols ultrasound-assisted extraction from *Ascophyllum nodosum* seaweeds. *Carbohydrate Polymers*, 272, 118455. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118455>
- Pathania, D., Kumar, S., Thakur, P., Chaudhary, V., Kaushik, A., Varma, R. S., Furukawa, H., Sharma, M., & Khosla, A. (2022). Essential oil-mediated biocompatible magnesium nanoparticles with enhanced antibacterial, antifungal, and photocatalytic efficacies. *Scientific Reports*, 12(1), 11431. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14984-3>
- Perez, G. A. (2024). Tratamiento de lodos residuales provenientes de la PTAR PROVISUR del departamento de Lima a través de fermentación láctica [Universidad Científica del Sur, Perú]. <https://doi.org/10.21142/tl.2024.3378>
- Praipipat, P., Ngamsurach, P., & Sanghuayprai, A. (2023). Modification of sugarcane bagasse with iron(III) oxide-hydroxide to improve its adsorption property for removing lead(II) ions. *Scientific Reports*, 13(1), 1467. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28654-5>
- Rosales, A., García, F., Storaci, V., & Medina, J. (2021). Obtaining polylactic acid as an input for the production of biopolymeric material from whey. *Ciencia en Revolución*, 7(22), 101-112. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6428019>
- Sagar, N. A., Pareek, S., Sharma, S., Yahia, E. M., & Lobo, M. G. (2018). Fruit and vegetable waste: bioactive compounds, their extraction, and possible utilization. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(3), 512-531. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12330>
- Salazar, R., Francisco, B. A., Vidal, I. M., Maldonado, Y. I., Jiménez, J., Flores, V., & Arámbula, G. (2021). Efecto de la adición de subproductos agroindustriales en las propiedades físicas de un biopolímero almidón-gelatina. *Biotecnia*, 23(1), 52-61. <https://biotecnia.unison.mx/index.php/biotecnia/article/view/1324/484>
- Son, V., Hao, H., Guo, W., Ha, T., Mai, T., Huan, X., Lan, T., Trong, V., Phuong, M., &
-

- Khai, M. (2023). New chitosan-biochar composite derived from agricultural waste for removing sulfamethoxazole antibiotics in water. *Bioresource Technology*, 385, 129384. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129384>
- Vargas, J., & Rodríguez, K. (2021). Funcionalización de nanocelulosa a partir de rastrojo de piña y raquis de palma africana. *Científica*, 25(2), 1-19. <https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v25n2a08>
- Vargas, J., Rodríguez, K., Jirón, E., & Bernal, C. (2023). Producción de nanocelulosa a partir de rastrojo de piña y raquis de palma africana. *UNED Research Journal*, 15(2), e4593. <https://revistas.uned.ac.cr/index.php/cuadernos/es/article/view/4593>
- Yoplac, I. J., Goñas, K., Bernal, W., Vásquez, H. V., & Maicelo, J. L. (2021). Caracterización química y digestibilidad in vitro de semillas y subproductos agroindustriales amazónicos con potencial para alimentación animal. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 32(3), e18765. <https://doi.org/10.15381/rivep.v32i3.18765>
- Yu, Y., Liu, W., Zhang, Y., Zhang, B., Jin, Y., Chen, S., Tang, S., Su, Y., Yu, X., & Chen, G. (2024). Chitosan/magnetic biochar composite with enhanced reusability: Synergistic effect of functional groups and multilayer structure. *Arabian Journal of Chemistry*, 17, 1057436. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105746>
- Zhang, L., Larsson, A., Moldin, A., & Edlund, U. (2022). Comparison of lignin distribution, structure, and morphology in wheat straw and wood. *Industrial Crops and Products*, 187, 115432. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115432>
- Tewari, S., Kaur, J., Tandon, S., & Das, D. K. (2026). Recent advances in functionalized nanocarbon adsorbents for toxic pollutant removal: challenges and future perspectives. *Discover Nano*, 21(1), 57. <https://doi.org/10.1186/s11671-026-04473-1>

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

## CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Ing. Carmen María Moreira Vásquez. Redacción-primera redacción, redacción, revisión y edición.
- Dr.C. Liceth Janina Solorzano Zambrano. Supervisión, validación.
- Dr.C. Ely Fernando Sacón Vera. Redacción, revisión y edición.
- Dr.C. Alex Alberto Dueñas Rivadeneira. Supervisión, análisis formal, validación.