

Aprovechamiento de nutrientes presentes en agua residual como una alternativa sostenible a los fertilizantes

Utilization of nutrients present in wastewater as a sustainable alternative to fertilizers

Por Cristina Morales Figueroa, Ivonne Linares Hernández y Elia Alejandra Teutli Sequeira

Resumen: La recuperación de nutrientes presentes en las aguas residuales genera productos con valor agronómico. Los métodos de tratamiento más recientes se basan en procesos fisicoquímicos, biológicos y un conjunto de métodos integrados; este último es una técnica eficaz en aguas residuales porque es de bajo costo y respetuoso con el medio ambiente. El presente artículo explora los principales métodos de tratamiento para la recuperación de fósforo y nitrógeno con objetivos específicos en la cogeneración de biofertilizantes.

Palabras clave: nutrientes, biofertilizantes, tratamiento, agua residual.

Abstract : The recovery of nutrients in wastewater generates products with agronomic value. The most recent treatment methods are based on physicochemical, biological and set of integrated processes; The latter is an effective wastewater treatment technique, as it is low cost and environmentally friendly. This article examines the main treatment methods in phosphorus and nitrogen recovery, with specific objectives in the co-generation of biofertilizers.

Keywords: nutrients, biofertilizers, treatment, wastewater.

El acelerado crecimiento de la industria, la urbanización y las actividades antropogénicas en el mundo generó, en 2020, más de 350 mil millones m³ de aguas residuales: aproximadamente 80% de estas se descargó ambiente sin previo tratamiento. En el Estado de México, en 2021, se registraron 37 millones 443 mil 484 m³ de aguas residuales municipales e industriales; la situación aún representa un importante desafío debido a la presencia de contaminantes críticos (orgánicos e inorgánicos) en altas concentraciones (Operador y Operagua, 2021).

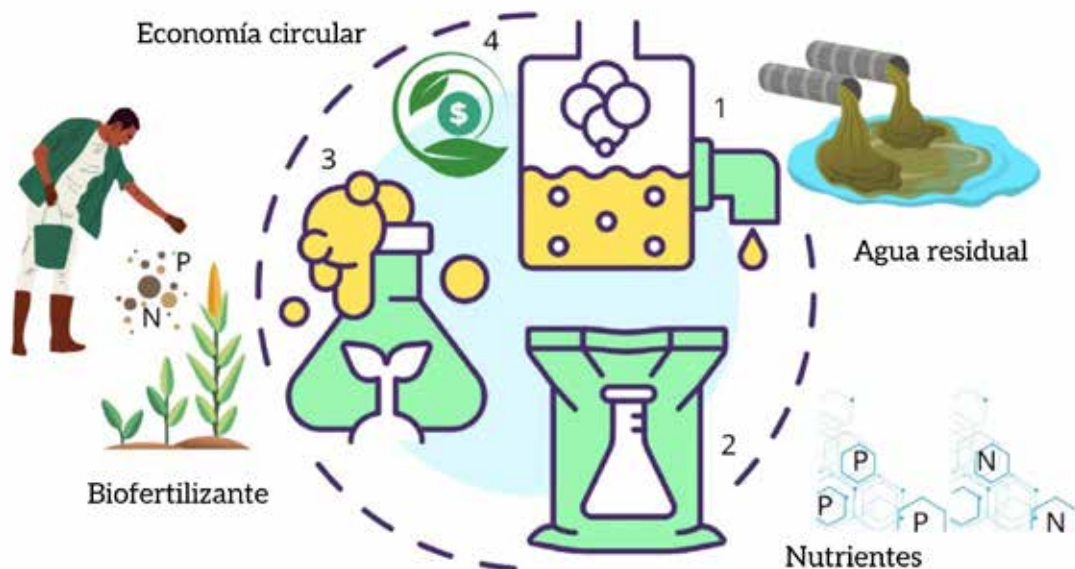
Las aguas residuales constituyen un recurso vital para la producción sostenible de biofertilizantes; principalmente, la recuperación de nitrógeno (N) y fósforo (P), mediante nuevas tecnologías de tratamiento, ayuda a mitigar el impacto negativo en los ecosistemas y la salud

humana (Lakshmikandan et al., 2024), además de que este proceso es parte de una economía circular (Figura 1).

El uso de fertilizantes comerciales en la agricultura demanda una gran cantidad de recursos hídricos (69% del agua dulce en el mundo) y un apresurado agotamiento del suelo (Santos et al., 2024). Además, su producción industrial consume demasiada energía y depende de recursos fósiles cada vez más escasos. Por esta razón, es fundamental que el sector agrícola adopte prácticas



Figura 1. Recuperación de nutrientes presentes en agua residual para la cogeneración de biofertilizantes



sostenibles (Shafaghat *et al.*, 2024). Los tratamientos comúnmente aplicados en agua residual para la recuperación de nutrientes son fisicoquímicos, biológicos y tratamientos integrados.

Los procesos fisicoquímicos son prometedores por su simplicidad y duración. En el caso de los electroquímicos, mediante el uso de electrodos de hierro y aluminio, estos reportan eficiencias mayores a 80% en recuperación de nitrógeno (N) y fósforo (P). Sin embargo, esta tecnología puede verse limitada por la formación de amoníaco y nitrito como subproducto durante la reducción de nitrato. Mientras que los tratamientos de coagulación-floculación son comúnmente utilizados por su alta eficiencia en la eliminación de nutrientes (80-95%), materia orgánica, turbidez y color,

aunque la toxicidad de los lodos residuales por presencia de hierro y aluminio hace difícil reutilizarlos en los campos de cultivo. Recientemente, el uso de coagulantes naturales (morinda, nirmali, cactus e hidroxiapatita) se ha convertido en una opción prometedora para el tratamiento de aguas residuales por su alta sostenibilidad ambiental (Chu *et al.*, 2025).

En comparación con otros procesos fisicoquímicos, la precipitación química es el más competente en aguas residuales con alto contenido de nutrientes, debido a la reutilización del subproducto del lodo y a su aplicación simple y de bajo costo. La precipitación de fosfato de calcio y estruvita, por ejemplo, son productos de interés por su aplicabilidad como biofertilizantes. Se ha demostrado que la

hidroxiapatita y la estruvita aumentan la productividad de cultivos de romero, lechuga y maíz (Wang *et al.*, 2023).

Por su parte, los procesos biológicos emplean técnicas como la biosorción y la biodegradación mediante humedales artificiales, biopelículas y digestión anaerobia. Recientemente, se ha incorporado el método bioelectroquímico en estos procesos para recuperar nutrientes de aguas residuales, el más favorecido en remoción es el nitrógeno (N) (80-90 %), aunque estos procesos suelen ser sensibles al pH, temperatura y sustancias tóxicas (Hu *et al.*, 2020). Una de las principales ventajas de los procesos biológicos es la reutilización de la biomasa como alimento para peces y animales, o la cosecha de la vegetación que se usa como fuente importante de fertilizante.

te natural. No obstante, la aplicación de esta biomasa no es común debido a la retención de otros microcontaminantes.

Finalmente, la optimización de los procesos físico-químicos y biológicos se puede realizar mediante una combinación conocida como método integrado, el cual se realiza en aguas residuales con un contenido equilibrado de nutrientes (aguas residuales mixtas) y menor presencia de otros microcontaminantes, lo que permite lograr una calidad específica del fertilizante obtenido (Wu et al., 2024).

Esta revisión muestra que el método integrado es una estrategia eficiente y económica. Por un lado, el proceso de precipitación facilita recuperar fósforo con bajo consumo de productos químicos (menor costo), por otro, un método biológico es preferible por su sostenibilidad y respeto al medio ambiente.

En conclusión, el tratamiento integrado juega un papel fundamental para la rescatar nutrientes de aguas residuales municipales e industriales, pues se generan biofertilizantes con alto valor agronómico como parte de una economía circular en el tratamiento de aguas residuales. 

Referencias

- Chu, Feng Jen et al. (2025). "The prospect of various applied methods for nutrient recovery in cattle wastewater: The case of precipitation, biological, and integrated method", en *Journal of Water Process Engineering*, vol. 74, 107807. Doi: 10.1016/j.jwpe.2025.107807.
- Hu, Hao et al. (2020). "Sustainable livestock wastewater treatment via phytoremediation: Current status and future perspectives", en *Bioresource Technology*, vol. 315, 123809. Doi: 10.1016/j.biortech.2020.123809.
- Lakshmikandan, Manogaran et al. (2024). "Enhancing nutrient removal of agricultural and agro-industrial wastewater utilizing symbiotic microalgal co-cultivation systems to optimize sustainable resource recovery", en *Journal of Water Process Engineering*, vol. 63, 105524. Doi: 10.1016/j.jwpe.2024.105524.
- Operador, O. y Operagua, D. A. (2021) 'Programa presupuestario: Manejo de Aguas Residuales, Drenaje y Alcantarillado Organismo'.
- Santos, Ounisia et al. (2024) "Wastewater as a nutrient source for hydroponic production of lettuce: Summer and winter growth", en *Agricultural Water Management*, vol. 301. Doi: 10.1016/j.agwat.2024.108966.
- Shafaghat, Amirhossein et al. (2024). "From waste to high-value fertilisers: Harvesting nutrients from liquid anaerobic digestate for a circular bioeconomy", en *Desalination*, vol. 596, 118266. Doi: 10.1016/j.desal.2024.118266.
- Śniatała, Bogna et al. (2024). "Advancing sustainable wastewater management: A comprehensive review of nutrient recovery products and their applications", en *Science of the Total Environment*, vol. 937. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.173446.
- Wang, Lei et al. (2023). "Applying struvite as a N-fertilizer to mitigate N₂O emissions in agriculture: Feasibility and mechanism", en *Journal of Environmental Management*, vol. 330. Doi: 10.1016/j.jenvman.2022.117143.
- Wu, Xiaomei et al. (2024). "Environmental health hazards of untreated livestock wastewater: potential risks and future perspectives", en *Environ Science Pollution Research*, vol 31, núm. 17, pp. 24745–24767. Doi: 10.1007/s11356-024-32853-6.



Cristina Morales Figueroa es Doctora en Ciencias Ambientales. Forma parte del programa Cátedras-Comecyt en el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, de la UAEMÉX. Su línea de investigación es el tratamiento de aguas residuales y agua de lluvia.



Ivonne Linares Hernández es Doctora en Ciencias Ambientales y profesora investigadora de tiempo completo en Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, adscrita a la UAEMÉX. Su línea de investigación en el control y tratamiento de agua.



Elia Alejandra Teutli Sequeira es Doctora en Ciencias del Agua. Forma parte del programa Cátedra-Conacyt en el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, adscrita a la UAEMÉX. Su línea de investigación es control y tratamiento de agua.