

Lodos aerobios granulares: una tecnología de tratamiento de aguas residuales para Costa Rica

Mary Luz Barrios-Hernández

Carrera de Ingeniería Ambiental
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ mbarrios@itcr.ac.cr

Resumen

La gestión de aguas residuales en Costa Rica, centrada principalmente en la regulación de la eliminación de materia orgánica, requiere una inversión en tecnologías para abordar una mayor gama de contaminantes. Como institución académica, el TEC está promoviendo la tecnología de Lodos Aeróbicos Granulares, basada en aglomerados de bacterias que se forman de manera natural estimulando la actividad biológica desde el centro hacia el exterior del gránulo, asegurando así la remoción simultánea de materia orgánica, nitrógeno y fósforo. Este enfoque ha impulsado la creación de prototipos de sistemas adaptados a las necesidades de las comunidades costarricenses, utilizando modelos matemáticos que garantizan la eliminación completa de contaminantes. Además, se está avanzando a través de investigaciones de laboratorio y colaboración nacional e internacional para implementar esta tecnología en el contexto del país y promover su adopción a gran escala.

Palabras claves: lodo aerobio granular, remoción de nutrientes, nitrógeno, fósforo.

Introducción

La preservación del medio ambiente y la salud pública requiere poner en primer plano el tratamiento de aguas residuales. En naciones como la nuestra, con una rica biodiversidad y ecosistemas delicados, resulta imperativo mantener la calidad de los recursos hídricos, incluyendo ríos, lagos y acuíferos.

Costa Rica ha avanzado en la gestión de aguas residuales en los últimos años mediante la introducción de nuevos sistemas de recolección y tratamiento, así como el desarrollo de regulaciones y políticas ambientales que garantizan un manejo adecuado de las mismas [1]. Se ha apostado mayormente a sistemas de tratamiento biológico diseñados bajo la configuración más simple de los lodos activados, constituida por un tanque de reacción biológico para la eliminación de materia orgánica y un clarificador para separar físicamente el agua tratada [2]. La idea está sustentada y protegida por el Reglamento de vertido y reúso de aguas residuales que se centra en la regulación de la remoción de materia orgánica y sólidos presentes en el agua excedente doméstica [3]. No obstante, es esencial que el país realice inversiones en tecnologías de tratamiento que eliminen otros contaminantes de gran importancia, como los nutrientes presentes en el agua residual, específicamente el nitrógeno y el fósforo.

Como academia se busca cooperar en el fortalecimiento de ese conocimiento y ofrecer con sustento sistemas que tengan la capacidad de remover de manera completa y simultánea la mayoría de esos contaminantes. Actualmente existe a nivel internacional un proceso descendiente de los lodos activados, llamado Lodos Aeróbicos Granulares, el cuál por medio de una configuración más simple logra el objetivo de un tratamiento completo [4] [5]. Esta tecnología apenas da sus primeros pasos en Costa Rica y esto ha sido gracias a las investigaciones que se han estado desarrollando a escala laboratorio en el Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA), que busca reforzar los conocimientos para su futura aplicación a nivel nacional con la colaboración de estudiantes de la carrera Ingeniería Ambiental de la Escuela de Química del Tecnológico de Costa Rica (Figura 1).

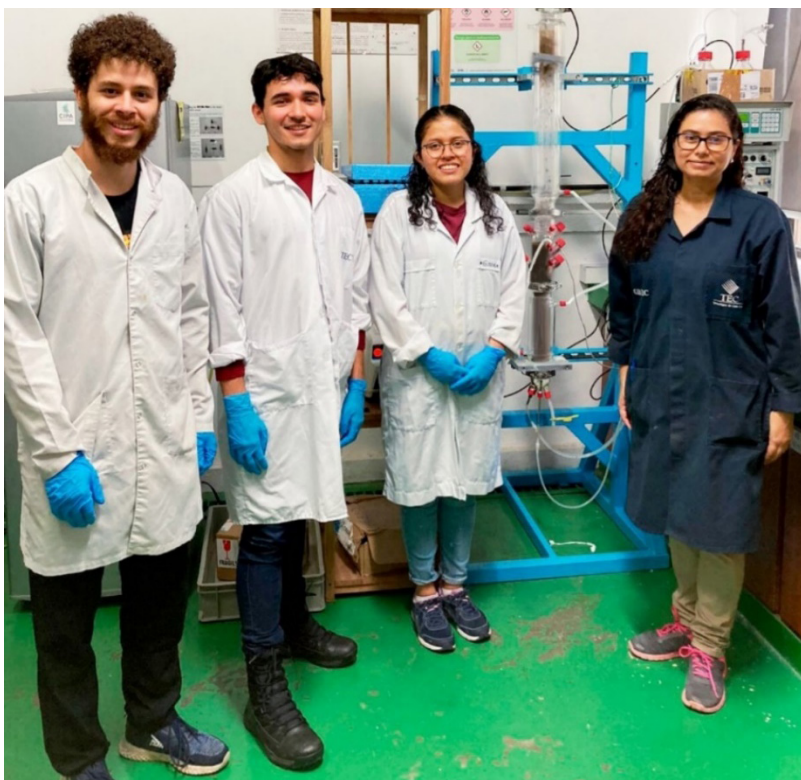


Figura 1. Participantes de la investigación en lodos aerobios granulares (LAG) en Costa Rica llevada a cabo en el CIPA-TEC. De izquierda a derecha estudiantes de Ingeniería Ambiental: Joshua Valverde, Fernando Molina y Gissel Hernández; seguida por la asistente de laboratorio del CIPA: Sofía Infante. Fuente: grupo de investigación LAG-CIPA-TEC 2023-2025.

Lodos aeróbicos granulares

Los lodos aeróbicos granulares son un grupo de bacterias aglomeradas naturalmente bajo condiciones de operación específicas, formando estructuras esféricas o gránulos [6]. Su estructura porosa permite la penetración limitada de oxígeno y nutrientes que favorece la actividad bacteriana en su interior [5]. Además, toman su aspecto dependiendo del sustrato con el que se alimenta, por ejemplo, en la Figura 2.a se muestra un gránulo de color oscuro cultivado con agua residual doméstica; en la Figura 2.b se exponen gránulos formados con agua residual sintética, preparada con acetato de sodio y nutrientes, dándole normalmente un color blancuzco a la biomasa. Indiferente del sustrato con el que se les nutre, su composición está basada en bacterias aglomeradas, estas se pueden apreciar en la Figura 2.c; y si el sustrato se carga de material particulado, se podrá observar una proliferación de organismos de mayor tamaño como lo son los protozoos ciliados que se adhieren a la superficie granular (Figura 2.d).

Las bacterias formadoras de gránulos son generalmente: *Candidatus Accumulibacter*, las cuales se agrupan en la parte interna del gránulo y su trabajo es almacenar polifosfato en su interior, por lo que son ideales para la remoción biológica del fósforo. Adicionalmente, en la parte externa del gránulo las *Nitrosomonas* oxidan de amonio a nitritos y nitratos; mientras que los *Nitrobacter*, organismos desnitrificantes, se esconden en la zona intermedia de los gránulos para laborar en la conversión de los nitratos producidos en nitrógeno gaseoso. Con esta organización bacteriana y condiciones operacionales específicas de un reactor secuenciado en lotes (SBR por sus siglas en inglés, sequencing batch reactor) se puede obtener remoción completa de la materia orgánica y nutrientes en ciclos y una mejor capacidad de sedimentación en un solo tanque bilógico [4] [5].

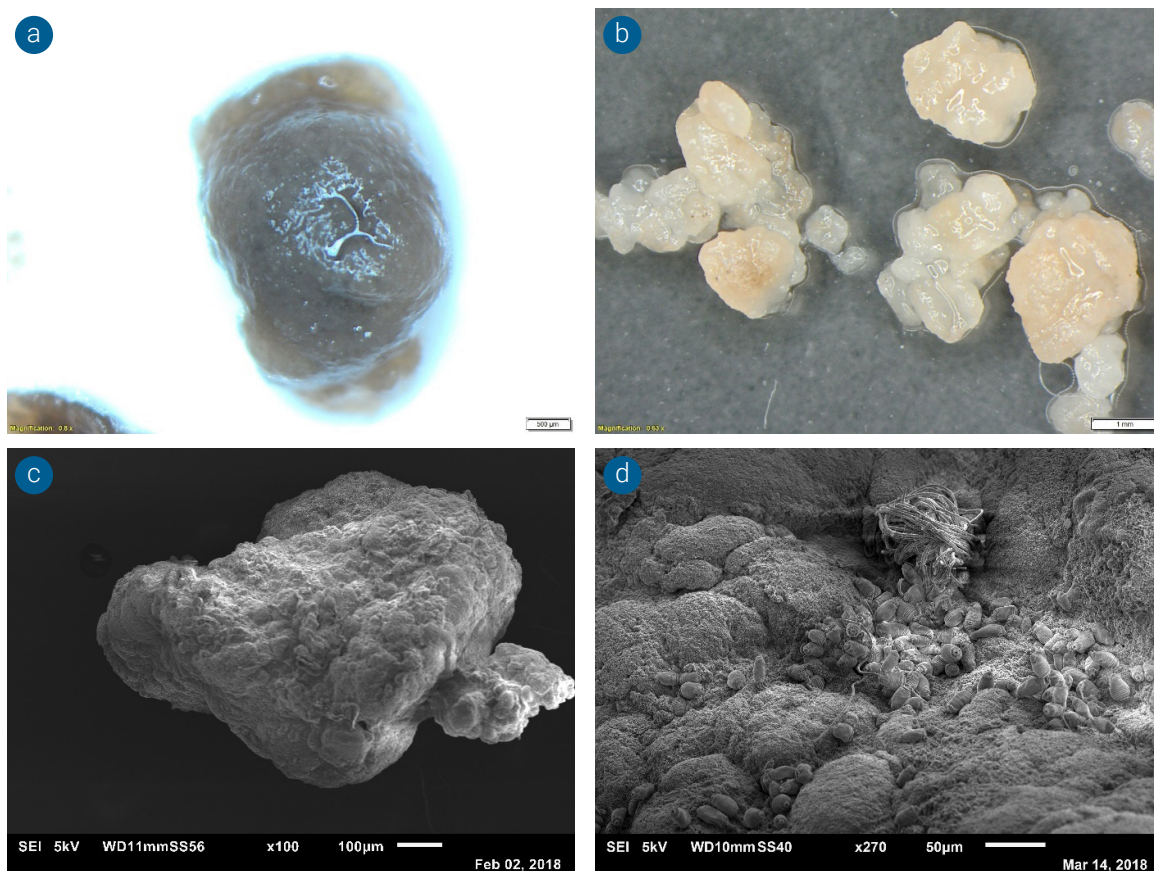
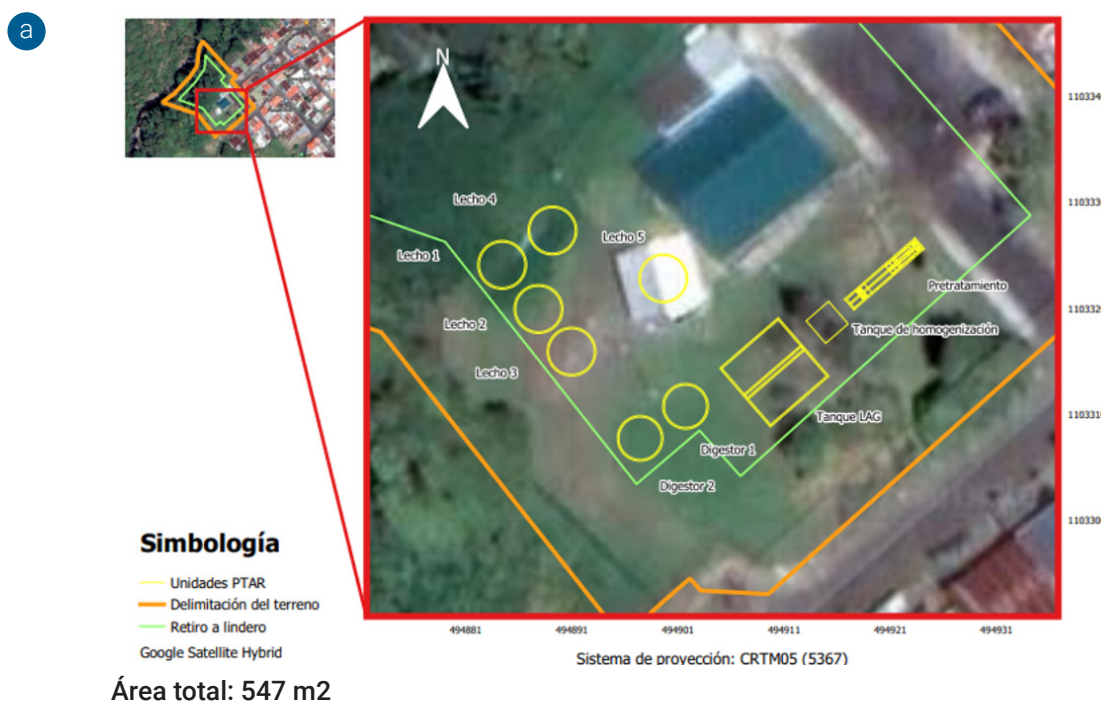


Figura 2. Apariencia de los lodos aerobios granulares. a) Gránulos cultivados en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas observado con microscopía óptica, escala 500 µm; b) Gránulos cultivados en un reactor de laboratorio con agua sintética, microscopía óptica escala 500 µm; c) Gránulo fijado utilizando microscopía de barrido electrónica, escala 100 µm y d) Acercamiento de un gránulo fijado utilizando microscopía de barrido electrónica, escala 10 µm. **Fuente:** elaboración propia.

Avances en Costa Rica

A nivel de diseño se han elaborado pequeños prototipos de lodos aerobios granulares para comunidades costarricenses en conjunto con entidades privadas y gubernamentales. Por ejemplo, en la Figura 3 se muestra el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) basada en la tecnología granular que fue adaptada a las necesidades de la comunidad y al espacio disponible de una PTAR existente en Costa Rica. Con su elaboración, se crearon memorias de cálculo preliminares que permiten la adaptación de sistemas de tratamiento a las necesidades específicas de cada comunidad, ya que, utilizan modelos matemáticos estandarizados basados en la cinética microbiana y calidad del agua afluente.



b **Características del reactor**

Volumen (m ³)	250
Altura (m)	5
Área superficial (m ²)	50
Tasa de intercambio (%)	11
Relación comida/microorganismo (kg DQO/ kg SSML día)	0.1
Velocidad ascendente (m/s)	0.6
Concentración de la biomasa (g/L)	8



Figura 3. PTAR de Lodos Aerobios Granulares para el tratamiento de las aguas residuales de una urbanización en Costa Rica. a) Esquema de la planta; b) Diseño renderizado. Fuente: tomado con permiso de [7].

A escala laboratorio los primeros pasos en la investigación aplicada están ayudando a entender la capacidad de los lodos aerobios en la remoción simultánea de contaminantes y su potencial evolución a partir de los lodos activados. La eficacia de gránulos aerobios maduros fue probada al comparar el tratamiento de agua residual doméstica proveniente de una urbanización cercana a la sede central

del TEC con cargas orgánicas forzadas preparadas a partir de una mezcla de agua residual con 1% v/v y 4% v/v lodos previamente digeridos de tanques sépticos [8]. Los experimentos se ejecutaron en contenedores abiertos siguiendo métodos operacionales meramente aerobios no comunes de la tecnología, por lo que no se buscaba alcanzar remociones completas de contaminantes, sino mejorar la comprensión de la operación interna del gránulo.

En general, el monitoreo en la eliminación de contaminantes mostró que a medida que aumentaba la concentración de lodos sépticos, la calidad del efluente disminuía para tres de los parámetros medidos entre ellos, remoción de materia orgánica utilizando como medida la demanda química de oxígeno (DQO) soluble, ortofosfatos (PO_4^{3-}) y la remoción de amoníaco ($\text{NH}_4\text{-N}$); permitiendo además determinar factores limitantes de operación que eventualmente pueden afectar la estabilidad y actividad de los gránulos. Se demostró que a pesar de que los gránulos son muy resistentes a agentes externos, se requiere su formación y crecimiento a nivel local. Por lo tanto, el enfoque en la investigación de laboratorio será fundamental para comprender el rendimiento y los desafíos asociados con esta tecnología.

Futuras investigaciones serán posibles gracias a la red de trabajo que se ha desarrollado coordinada por el CIPA-TEC en el tema de lodos aerobios granulares, incluyendo colaboradores del Departamento de Saneamiento de Aguas Residuales de la Municipalidad de La Unión, personas investigadoras nacionales como el Instituto de Investigaciones en Salud de la Universidad de Costa Rica (INISA-UCR); e internacionales como el Departamento de Abastecimiento de Agua, Saneamiento e Ingeniería Ambiental del IHE Delft Institute of Water Education, con quienes se estará trabajando en conjunto en los temas de formación de gránulos a partir de lodos activados a gran escala y la potencial recuperación de subproductos como el fósforo de la matriz granular. Próximos comunicados proporcionarán mayor información de los progresos logrados en esta colaboración.

Referencias

- [1] Programa Estado de la Nación, "Vigesimosexto informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible," 2020.
- [2] D. Ramírez-Morales *et al.*, "Occurrence of pharmaceuticals, hazard assessment and ecotoxicological evaluation of wastewater treatment plants in Costa Rica," *Science of the Total Environment*, vol. 746, p. 141200, 2020.
- [3] MINAE, *Decreto N° 33601-S – Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales*. Costa Rica: www.gaceta.go.cr, 2007.
- [4] M. Pronk, A. Giesen, A. Thompson, S. Robertson, and M. Van Loosdrecht, "Aerobic granular biomass technology: Advancements in design, applications and further developments," *Water Pract Technol*, vol. 12, no. 4, pp. 987–996, Dec. 2017, doi: 10.2166/WPT.2017.101.
- [5] M. K. De Kreuk, J. J. Heijnen, and M. C. M. Van Loosdrecht, "Simultaneous COD, nitrogen, and phosphate removal by aerobic granular sludge," *Biotechnol Bioeng*, vol. 90, no. 6, pp. 761–769, Jun. 2005, doi: 10.1002/BIT.20470.
- [6] M. K. de Kreuk, N. Kishida, and M. C. M. van Loosdrecht, "Aerobic granular sludge - State of the art," *Water Science and Technology*, vol. 55, no. 8–9, pp. 75–81, 2007, doi: 10.2166/WST.2007.244.
- [7] M. J. Peralta-Brenes, "Diseño de una planta de Lodos Aerobios Granulares para el tratamiento de las aguas residuales de la urbanización André Challé, Trinidad de Moravia, Costa Rica," *Tecnológico de Costa Rica*, Cartago, 2022.
- [8] A. Brenes-Porras, "Cotratamiento de lodo fecal por medio de ensayos de laboratorio mediante la tecnología de Lodos Aerobios Granulares," Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2023.

Sobre el autor

Mary Luz Barrios-Hernández

La Dra. ir. Mary Luz Barrios Hernández, es profesora de la carrera de Ingeniería Ambiental e investigadora del Centro de Investigación para la Protección Ambiental (CIPA) de la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Cartago. Es Ingeniera Ambiental del Instituto Tecnológico de Costa Rica y cuenta con una maestría en Ingeniería Sanitaria con especialidad en Agua Urbana y Saneamiento del UNESCO-IHE Delft Institute of Water Education. Además, cuenta con un doctorado en el tratamiento biológico de aguas residuales de la Universidad Técnica de Delft (TU Delft). <https://orcid.org/0000-0002-4399-6333>