

Microorganismos del ciclo del nitrógeno en el tratamiento de lixiviados de residuos orgánicos municipales

Miguel Ángel Martínez-Jardines, Roberto Carlos Moreno-Quirós, Sergio Martínez-Hernández *

Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada, INBIOTECA, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México

* Autor de correspondencia: sermartinez@uv.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 28 de octubre de 2024

Aceptado: 27 de noviembre de 2024

Publicado: 30 de diciembre de 2024

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.302>

Resumen: Los lixiviados contienen altos niveles de materia orgánica y compuestos nitrogenados peligrosos para el ambiente. Los procesos biológicos microbianos asociados al ciclo del nitrógeno han mostrado altas eficiencias de remoción de materia orgánica y amonio, marcando un avance clave en la protección de los ecosistemas. Este estudio revela como una diversidad de bacterias ha sido identificada en laboratorio durante el tratamiento de lixiviados provenientes del centro de compostaje de la ciudad de Xalapa, Veracruz utilizando procesos como la nitrificación, desnitrificación y anammox (oxidación anaerobia del amonio), en los cuales, las bacterias son capaces de transformar los compuestos contaminantes en otros inocuos. Durante la investigación se emplearon diferentes configuraciones de reactores, logrando remociones de materia orgánica superiores al 75% y de nitrógeno mayores al 69%. Diversos géneros de bacterias como *Nitrosomonas*, *Nitrospira*, *Pseudomonas* y *Candidatus kuenenia* pudieron ser detectadas en estos procesos. Los avances de estas investigaciones resaltan el potencial de tecnologías basadas en microorganismos para el tratamiento de lixiviados de los residuos orgánicos municipales.

Palabras clave: Lixiviados; ciclo del nitrógeno; anammox; desnitrificación; nitrificación

Introducción

Actualmente, los problemas ambientales como la deforestación, la pérdida de la biodiversidad, el cambio climático, el manejo inadecuado de los residuos sólidos municipales (RSM), la contaminación de cuerpos de agua y suelos amenazan la estabilidad de los ecosistemas y la calidad de vida de las personas. En este contexto, un asunto crítico es la generación de los RSM que ha alcanzado cantidades alarmantes debido al crecimiento de la población y los patrones de consumo actuales (UNEP, 2024). En muchas ciudades, incluida la ciudad de Xalapa, en el Estado de Veracruz, México, la acumulación de estos residuos plantea serios problemas para su adecuada gestión. Si bien una considerable fracción está compuesta por materiales reciclables (INEGI, 2021), la fracción orgánica representa uno de los mayores desafíos, ya que su descomposición emite gases de efecto invernadero y lixiviados, los cuales, sin un tratamiento adecuado pueden contaminar cuerpos de agua y suelos.

El tratamiento de la fracción orgánica de los RSM ha ganado relevancia en los últimos años, con el compostaje y la biodigestión como alternativas sostenibles para su manejo. Sin embargo, en estos procesos la producción de lixiviados es una preocupación que requiere atención especial. Los lixiviados son líquidos que emanan de la descomposición de la materia orgánica y usualmente contienen concentraciones elevadas de compuestos nitrogenados que representan una amenaza para los ecosistemas si llegan a cuerpos de agua sin un tratamiento adecuado (Luo *et al.*, 2020). No obstante, la propia naturaleza ofrece alternativas de solución eficaces, a través del mundo microbiano, unos pequeños aliados que están por todas partes. Los microorganismos desempeñan un papel importante en la oxidación de compuestos nitrogenados, como el amonio, transformándolo en compuestos menos perjudiciales. Mediante procesos biológicos como la nitrificación, desnitrificación y anammox se puede lograr la depuración de lixiviados de manera eficiente, contribuyendo a la salud del entorno y la sostenibilidad ambiental.

El presente artículo examina el papel fundamental de los microorganismos en los procesos de tratamiento, explicando su participación en los sistemas de eliminación de nitrógeno. A partir de un estudio local, que aborda el tratamiento de lixiviados provenientes del centro de compostaje de la ciudad de Xalapa (Figura 1), se busca mostrar como las interacciones entre diversos grupos microbianos es crucial para una eficiente eliminación de compuestos nocivos para el ambiente y los seres vivos.



Figura 1. Centro de compostaje municipal de la ciudad de Xalapa, Veracruz, México.

Desarrollo

Microorganismos en la naturaleza

Los microorganismos son seres vivos diminutos, tan pequeños que no se pueden observar a simple vista; solo con la ayuda de un microscopio. Pueden encontrarse en casi cualquier lugar del planeta: en el agua, en el suelo, en el aire, en nuestro cuerpo, y hasta en ambientes extremos, como aguas profundas de océanos o zonas volcánicas. Abarcan una amplia variedad de formas de vida, como hongos, virus, protozoos, algas, arqueas y bacterias. Todos ellos tienen una gran diversidad de formas y funciones, y aunque pueden causar enfermedades, la mayoría de los microorganismos son inofensivos e incluso beneficiosos para los seres humanos, animales y plantas. En el planeta desempeñan un papel fundamental para la vida. Ayudan a descomponer la materia orgánica del medio ambiente, permitiendo la recirculación de nutrientes. Además, muchos microorganismos son esenciales en la producción de alimentos, medicamentos, agricultura y en el tratamiento de aguas residuales (Higa & Parr, 2013). En nuestro cuerpo, existen cientos, miles, billones de microorganismos, especialmente en el intestino. Estos forman la microbiota intestinal, que es esencial para la digestión, sin ellos, nuestro cuerpo tendría dificultades para absorber algunos nutrientes y defenderse de diferentes infecciones. Solo una pequeña parte de ellos son patógenos, es decir, aquellos que pueden causar enfermedades. Desde hace muchos años se han utilizado para la producción de alimentos y bebidas, como el queso, yogur, cerveza y pan otorgando aspecto, sabor y textura característicos dependiendo del microorganismo (Ostos-Ortíz *et al.*, 2019).

Las bacterias en el medio ambiente

Los microorganismos también se han utilizado para resolver problemas ambientales. Por ejemplo, las bacterias se emplean en procesos biotecnológicos de biorremediación, una técnica que aprovecha su capacidad metabólica para descomponer y eliminar contaminantes en el suelo, el agua y el aire. Por ejemplo, algunas bacterias pueden degradar hidrocarburos presentes en derrames de petróleo, transformando estas sustancias peligrosas en compuestos menos tóxicos. Otras ayudan en el tratamiento de aguas residuales, donde descomponen materia orgánica y eliminan compuestos nitrogenados que son tóxicos para el ambiente, limpiando el agua antes de que regrese a lagos, ríos o mares. Además, estas bacterias pueden capturar metales pesados en el agua, evitando que se acumulen y dañen los ecosistemas acuáticos. Así, las bacterias no solo son fundamentales para mantener los ciclos naturales, sino que también son una herramienta poderosa en la lucha contra la contaminación ambiental.

El ciclo del nitrógeno es un proceso natural primordial en el planeta. Se refiere a la transformación continua del nitrógeno en diferentes formas químicas, permitiendo que este elemento, esencial para la vida, sea utilizado por plantas, animales y microorganismos. El nitrógeno, que constituye alrededor del 78% del aire que respiramos, no puede ser absorbido directamente por la mayoría de los seres vivos en su forma gaseosa (N_2). Así, bacterias y otros microorganismos lo convierten en compuestos como el amonio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-) y nitrato (NO_3^-), que las plantas pueden absorber. Las bacterias que participan en el ciclo del nitrógeno son esenciales para mantener el equilibrio ecológico y para mitigar la contaminación ambiental. Este ciclo involucra la transformación de compuestos nitrogenados

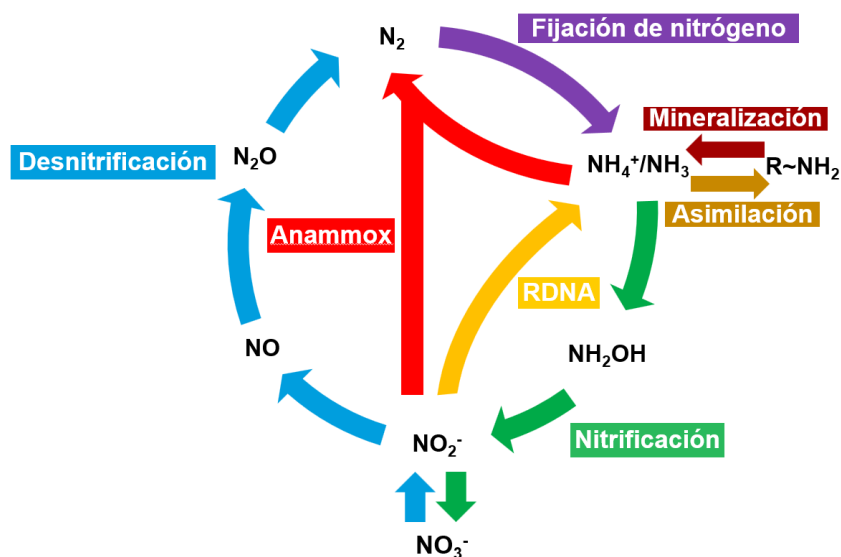


Figura 2. Procesos biológicos del ciclo del nitrógeno (Stein & Klotz, 2016).

a través de varios procesos, incluyendo la nitrificación, desnitrificación, anammox, fijación del nitrógeno, reducción desasimilatorio de nitrito a amonio (RDNA), asimilación y mineralización (Robertson & Groffman, 2024) (Figura 2). Estos, se pueden aplicar en tecnologías para tratar contaminantes en agua, suelo y aire y se llevan a cabo por diferentes grupos de microorganismos (Remmas *et al.*, 2023).

Nitrificación

La nitrificación es un proceso aerobio (que requiere oxígeno) en donde bacterias específicas convierten el NH_4^+ , en NO_2^- y luego en NO_3^- . Este proceso se lleva a cabo en dos etapas: oxidación del amonio a nitrito: el cual es realizado por géneros bacterianos como *Nitrosomonas* y *Nitrosococcus*. Estas bacterias toman el NH_4^+ presente en aguas residuales y lo transforman en NO_2^- , un compuesto menos tóxico. Posteriormente se realiza la oxidación del nitrito a nitrato por géneros bacterianos como *Nitrobacter* y *Nitrococcus*. Este proceso es crucial en plantas de tratamiento de aguas residuales, ya que el amonio en altas concentraciones puede ser letal para la vida acuática y terrestre. Las bacterias comammox, que realizan la nitrificación completa (desde el amonio hasta el nitrato en un solo paso), también juegan un papel fundamental. Estas bacterias (principalmente del género *Nitrospira*) descubiertas recientemente, son especialmente útiles en tratamientos de aguas residuales conteniendo bajas concentraciones de amonio.

Desnitrificación

La desnitrificación es el proceso mediante el cual las bacterias transforman el NO_3^- en N_2 , que se libera a la atmósfera. Este proceso ocurre en condiciones anóxicas o anaerobias (nula o baja concentración de oxígeno disuelto) y es llevado a cabo por diversos géneros bacterianos como *Pseudomonas*, *Thauera* y *Thiobacillus*. La desnitrificación es esencial en el tratamiento de aguas residuales, ya que evita que los nitratos se acumulen en el agua, lo que podría causar eutrofización, un fenómeno que desencadena el crecimiento excesivo de algas y la muerte de organismos acuáticos por falta de oxígeno. En plantas de tratamiento, se crean ambientes óptimos para favorecer la acción de estas bacterias. Los procesos desnitrificantes se usan para reducir eficientemente los niveles de nitratos, cerrando el ciclo del nitrógeno y permitiendo que las aguas tratadas cumplan con la normatividad para ser descargadas en los cuerpos de agua.

Anammox (Oxidación Anaerobia del Amonio)

Las bacterias del proceso anammox, como *Candidatus brocadia*, *Candidatus kuenenia* y *Candidatus anammoxoglobus* de la familia Planctomycetaceae, han revolucionado el tratamiento de aguas residuales, incluyendo lixiviados. Estas bacterias realizan un proceso clave en el ciclo del nitrógeno en donde el NH_4^+ y el NO_2^- se combinan en ausencia de oxígeno generando principalmente N_2 y una pequeña fracción de NO_3^- . Las bacterias anammox se han evaluado en el

tratamiento de aguas residuales, empleando diversas configuraciones de reactores, donde se manejan diversos parámetros con el propósito de maximizar su actividad metabólica (Kuenen, 2008).

Fijación del nitrógeno

La fijación del nitrógeno es un proceso crucial mediante el cual las bacterias convierten el N_2 a NH_4^+ , un compuesto que las plantas y otros organismos pueden utilizar. Las bacterias fijadoras de nitrógeno juegan un papel esencial en la agricultura y en los ecosistemas naturales, promoviendo la disponibilidad de este elemento y contribuyendo a la fertilidad del suelo, buscando evitar la adición de fertilizantes químicos, cuyo uso excesivo genera emisiones de gases de efecto invernadero y contaminación de los cuerpos de agua. Las principales bacterias que participan en la fijación del nitrógeno pueden ser simbióticas (asociadas a las raíces de ciertas plantas) como *Rhizobium*, *Bradyrhizobium* y *Frankia* o de vida libre en el suelo y otros ambientes como *Azotobacter* y *Cyanobacterias*.

Reducción desasimilatorio de nitrito a amonio (RDNA)

La reducción desasimilatoria de nitrito a amonio (RDNA), es un proceso en el que bacterias convierten el NO_2^- o NO_3^- en NH_4^+ en lugar de transformar estos compuestos en nitrógeno gaseoso, como ocurre en la desnitrificación. Este proceso también ocurre en condiciones anaerobias y es llevado a cabo por bacterias de géneros como *Desulfovibrio*, *Clostridium*, *Geobacter* y *Wolinella*. Estas bacterias suelen estar presentes en una variedad de ambientes, como suelos saturados de agua, sedimentos acuáticos, humedales, plantas de tratamiento de aguas residuales y el tracto digestivo de algunos animales. La actividad de estas bacterias es crucial para el reciclaje del nitrógeno en ecosistemas donde la conservación del nitrógeno es esencial para la productividad y estabilidad del sistema (Robertson & Groffman, 2024).

Asimilación y mineralización.

La asimilación de amonio es el proceso por el cual las plantas absorben el NH_4^+ a través de sus raíces y lo incorporan a sus proteínas y ácidos nucleicos. La mineralización de nitrógeno es el proceso por el cual los microorganismos del suelo transforman el nitrógeno orgánico en formas inorgánicas como el amonio.

Como se ha mencionado, en el ciclo del nitrógeno se encuentran diferentes microorganismos (Holmes *et al.*, 2019) y existen diversas técnicas para identificar y caracterizar a estas bacterias que van desde métodos tradicionales como cultivo en medios selectivos, técnicas bioquímicas, microscopía; hasta técnicas de biología molecular como la metagenómica y metatranscriptómica. Estas técnicas son útiles para conocer los grupos bacterianos presentes, comprender su papel y optimizar su uso en aplicaciones como el tratamiento de aguas residuales o la mejora de la fertilidad del suelo.

Bacterias aliadas en el tratamiento de lixiviados

En el Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada (INBIOTECA) de la Universidad Veracruzana en la ciudad de Xalapa, por medio de un análisis metagenómico de secuenciación masiva de alto rendimiento se han identificado diferentes microorganismos asociados al ciclo del nitrógeno durante el tratamiento de lixiviados de residuos orgánicos municipales de una planta de compostaje de Xalapa, Veracruz (Tabla 1). Estos hallazgos se llevaron a cabo empleando diferentes tipos de reactores biológicos (unidades experimentales que se utilizan para mantener condiciones ambientales específicas para las bacterias). Estos sistemas, inoculados con lodos también llamados consorcios microbianos se alimentan con aguas contaminadas como los lixiviados que funcionan como sustrato para que las bacterias puedan crecer y reproducirse, obteniendo a la vez aguas tratadas, menos contaminantes.

En estos trabajos, diferentes reactores biológicos se alimentaron con diferentes concentraciones iniciales de amonio y DQO (Tabla 1). Por ejemplo, se empleó un reactor de lotes secuenciado (SBR) de 3 L con un volumen de trabajo de 2 L a 250 rpm, 30 °C y un pH de 7.0 para realizar un proceso nitrificante, obteniendo porcentajes de remoción de amonio y DQO mayores que 95%, encontrando bacterias nitrificantes como *Nitrosomonas* y *Nitrospira*, a las cuales se les asocia la transformación de amonio y DQO a productos menos contaminantes. Por otro lado, empleando un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA) de 900 mL con un VT de 800 mL, operado a un tiempo de residencia hidráulica de 2.9 días, 30 °C y un pH inicial de 7.1 en un proceso desnitrificante se lograron porcentajes de remoción de nitrato, nitrito y DQO

del 81, 64 y 97%, respectivamente y se detectaron bacterias como *Pseudomonas*, *Cecembia* y *Thauera*. En otro estudio, se llevó a cabo un proceso simultáneo nitrificante-desnitrificante en un reactor SBR, donde se pudo lograr la transformación de amonio hasta N_2 por bacterias como *Nitrosomonas*, *Nitrospira*, *Azoarcus*, *Pseudomonas* y *Rhodobacter* con porcentajes de remoción del 92% tanto para amonio como para DQO. También, la remoción de nitrato alcanzó porcentajes del 79%. En un proceso de nitrificación parcial en ensayos batch se obtuvieron consumos de amonio superiores al 50% y consumos de materia orgánica mayores que 80%, teniendo como principales bacterias al género *Nitrosomonas*. Finalmente, durante evaluaciones bajo condiciones anammox, se han encontrado remociones de DQO superiores al 75% y de amonio mayores al 85%, donde se han identificado microorganismos relacionados con los géneros *Candidatus kuenenia* y *Candidatus brocadia*.

Tabla 1. Detección de bacterias asociadas a procesos biológicos del ciclo del nitrógeno durante el tratamiento de lixiviados de residuos orgánicos municipales.

Proceso	Tipo de reactor	Compuestos nitrogenados y DQO	Remoción de nitrógeno	Remoción de DQO	Bacterias detectadas
Nitrificación	SBR*	76.26 mg N-NH ₄ ⁺ /L 6070.28 mg DQO/L	95% de NH ₄ ⁺	97%	<i>Nitrosomonas</i> <i>Nitrospira</i> <i>Nitrolancea</i>
Desnitrificación	RAFA**	17.68 mg N-NO ₃ ⁻ /L 55.20 mg N-NO ₂ ⁻ /L 1139.21 mg DQO/L	81% de NO ₃ ⁻ 64% de NO ₂ ⁻	97%	<i>Pseudomonas</i> <i>Cecembia</i> <i>Thauera</i>
Nitrificación y desnitrificación simultánea	SBR*	62.93 mg N-NH ₄ ⁺ /L 4845 mg DQO/L	92% de NH ₄ ⁺ 79% de NO ₃ ⁻	92%	<i>Nitrosomonas</i> <i>Nitrospira</i> <i>Azoarcus</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Rhodobacter</i>
Anammox	Batch	65.3 mg N-NH ₄ ⁺ /L 4556.5 mg DQO/L	86% de NH ₄ ⁺ 99% de NO ₂ ⁻	77%	<i>C. Kuenenia</i> <i>C. Brocadia</i>
Nitrificación parcial	Batch	138.1 mg N-NH ₄ ⁺ /L 7315.7 mg DQO/L	69% de NH ₄ ⁺	82%	<i>Nitrosomonas</i> <i>Nitrospira</i> <i>Labilithrix</i> <i>Actinobacteria</i>

* SBR=reactor de lotes secuenciado. ** RAFA=reactor anaerobio de flujo ascendente.

El uso de estos procesos microbianos en tecnologías de tratamiento de aguas tiene un impacto positivo en la reducción de la contaminación y en la gestión sostenible de recursos. Los sistemas basados en el uso de bacterias nitrificantes, anammox y desnitrificantes se pueden llevar a cabo por separado o combinados para maximizar la eficiencia del proceso y minimizar el uso de energía.

Conclusiones

La creciente preocupación por la generación de residuos sólidos municipales está estrechamente relacionada con la producción de lixiviados que se generan en los sitios de tratamiento o de disposición final. Los lixiviados generados de estos residuos, especialmente los orgánicos, representan un desafío dado su alto contenido de materia orgánica y compuestos nitrogenados. Este estudio resalta el papel que juegan los microorganismos, en especial las bacterias asociadas al ciclo del nitrógeno, como agentes al servicio de la humanidad para la mitigación de sustancias contaminantes de los lixiviados, a través de procesos biológicos como la nitrificación, la desnitrificación, la oxidación parcial del amonio y el proceso anammox.

Los resultados obtenidos a través de distintas configuraciones de reactores (SBR, RAFA y batch) aplicados al tratamiento de lixiviados generados en el centro de compostaje de la ciudad de Xalapa mostraron una alta eficiencia de remoción de materia orgánica, medida como DQO, superior al 77%, así como una remoción de nitrógeno mayor al 69%.

El éxito en la investigación sugiere que la aplicación de tecnologías basadas en bacterias nitrificantes, desnitrificantes y anammox tienen el potencial para tratar aguas residuales y lixiviados, y ofrece una alternativa para enfrentar el desafío del manejo de los residuos sólidos municipales.

Agradecimientos y financiamiento: H. Ayuntamiento de Xalapa Veracruz, Departamento de limpia pública, Personal del Centro de Compostaje. Moreno-Quirós agradece beca doctoral (CONAHCYT, CVU: 1035411). Martínez-Jardines agradece beca postdoctoral (CONAHCYT, CVU: 485058). Proyecto Ciencia de Frontera, CF-2023-I-345.

Bibliografía

- Higa, T., & Parr, J. F. (2013). Microorganismos Benéficos y efectivos para una agricultura y medio ambiente sostenibles. *Maryland (USA): Centro internacional de Investigación de Agricultura Natural, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos*, 13(2), 128-135.
- Holmes, D. E., Dang, Y., & Smith, J. A. (2019). Nitrogen cycling during wastewater treatment. *Advances in applied microbiology*, 106, 113-192. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2018.10.003>.
- INEGI. (2021). Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2021. Base de datos residuos sólidos: <https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2021/>.
- Kuenen, J. G. (2008). Anammox bacteria: from discovery to application. *Nature Reviews Microbiology*, 6(4), 320-326. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1857>.
- Luo, H., Zeng, Y., Cheng, Y., He, D., & Pan, X. (2020). Recent advances in municipal landfill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity assessment. *Science of the Total Environment*, 703, 135468. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135468>.
- Ostos-Ortíz, O. L., Rosas-Arango, S. M., & González-Devia, J. L. (2019). Aplicaciones biotecnológicas de los microorganismos. *Nova*, 17(31), 129-163. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-24702019000100129&lng=en&nrm=iso.
- Remmas, N., Manfe, N., Zerva, I., Melidis, P., Raga, R., & Ntougias, S. (2023). A critical review on the microbial ecology of landfill leachate treatment systems. *Sustainability*, 15(2), 949. <https://doi.org/10.3390/su15020949>.
- Robertson, G. P., & Groffman, P. M. (2024). Chapter 14—Nitrogen transformations. En E. A. Paul & S. D. Frey (Eds.), *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry* (Fifth Edition) (pp. 407-438). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822941-5.00014-4>.
- Stein, L. Y., & Klotz, M. G. (2016). The nitrogen cycle. *Current Biology*, 26(3), R94-R98. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.12.021>.
- International Solid Waste Association. (2024). Global waste management outlook 2024: beyond an age of waste, turning rubbish into a resource. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44939>.