

Concientifica

Emisiones de óxido nitroso en plantas de tratamiento de aguas residuales

Nitrous oxide emissions in wastewater treatment plants

Resumen

Aunque las plantas de tratamiento de aguas residuales buscan proteger el medio ambiente, no todas logran el mismo desempeño. Algunas son causantes de emitir emisiones contaminantes como el óxido nitroso, un gas de efecto invernadero que deteriora la capa de ozono. Dichos contaminantes son producidos por procesos biológicos incompletos realizados por microbios encargados de procesar la materia orgánica presente en aguas residuales. Para fomentar procesos biológicos completos se han desarrollado distintas estrategias de diseño operativo e implementación tecnológica como el reacondicionamiento de biorreactores que promueven una operación más estable y reducen las emisiones de óxido nitroso.

Palabras clave: Tratamiento de aguas, emisiones, óxido nitroso.

Summary

Although wastewater treatment plants aim to protect the environment, their performance varies widely. Some of them are responsible for releasing pollutants such as nitrous oxide, a potent greenhouse gas that contributes to ozone depletion. These emissions are produced by incomplete biological processes carried out by microorganisms that degrade the organic matter found in wastewater. To enhance complete biological processes, different strategies of operational design and technology implementation have been developed, including the retrofitting of bioreactors, which promotes a more stable operation and reduces nitrous oxide emissions.

Keywords: Wastewater treatment, emissions, nitrous oxide.

Alba C. Macedo-Sánchez

Paloma Barajas-Álvarez*

Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Ave. Eugenio Garza Sada 2501, 64700, Monterrey, México.

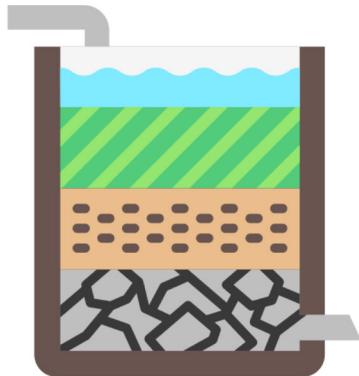
*Autor para la correspondencia:
paloma.barajas@tec.mx

Introducción

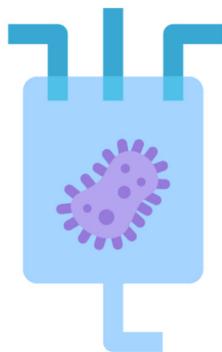
Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) municipales son las principales responsables de que los desechos provenientes de los hogares sean procesados y eliminados del agua. Estos sistemas se encargan de tratar la fracción líquida de los residuos, actuando como restauradores del agua, con el objetivo principal de devolverla al medio ambiente como un recurso nuevamente funcional, aunque no con el mismo propósito original, pero sí menos contaminada.

Dentro de dichas plantas ocurren diferentes procesos encargados de cumplir este objetivo. De manera muy simple, el proceso se divide en tres etapas (Figura 1): 1) el tratamiento primario, el cual es un proceso de clarificación que elimina los sólidos flotantes presentes en el agua residual. En esta etapa se utiliza la sedimentación, que consiste en que las partículas más grandes y pesadas se depositan al fondo por acción de la gravedad. 2) Posteriormente, el líquido pasa al tratamiento secundario, en donde se realizan procesos químicos y biológicos destinados a descomponer la materia

PROCESO



Tratamiento Primario



Tratamiento Secundario



Tratamiento Terciario

Figura 1. Proceso representativo del tratamiento de aguas residuales [1].

orgánica. En esta etapa se emplean biorreactores, recipientes que albergan comunidades de microorganismos encargados de transformar los contaminantes presentes en el agua mediante reacciones biológicas. Sin embargo, esta actividad microbiana también representa una de las principales fuentes de emisiones contaminantes de una PTAR. 3) Finalmente, el proceso concluye con el tratamiento terciario, en el cual se realizan diferentes procesos fisiocoquímicos como la desinfección por radiación UV, la cloración o la ozonificación, los cuales se utilizan para eliminar microbios patógenos (los responsables de enfermarnos) y purificar el agua antes de su descarga en distintos cuerpos de agua [1].

Desarrollo

Ahora, la parte que más nos interesa de todo esto son los procesos biológicos que ocurren dentro de los biorreactores de una PTAR. Estos procesos biológicos tienen como propósito descomponer la materia orgánica en compuestos más simples, remover nutrientes como fósforo y nitrógeno, y agrupar los sólidos que flotan en la superficie en forma de grumos de

microorganismos. Principalmente, se llevan a cabo tres tipos de mecanismos biológicos: nitrificación, desnitrificación y digestión anaerobia. El proceso de nitrificación sucede en dos pasos: primero, el ion de amonio (NH_4^+) se transforma en nitrito (NO_2^-) gracias a bacterias oxidantes de amonio; después, el nitrito (NO_2^-) se convierte en nitrato (NO_3^-) mediante bacterias oxidantes de nitrito. La principal característica de este proceso es que requiere oxígeno, por lo que los microorganismos que hacen posible este mecanismo actúan en condiciones aeróbicas. Por otro lado, el proceso de desnitrificación ocurre en condiciones anóxicas, es decir, en ausencia de oxígeno. En este caso, el nitrato (NO_3^-) se reduce a gas de nitrógeno (N_2) mediante la acción de bacterias desnitrificantes (Figura 2). Por último, la digestión anaerobia consiste en la remoción o degradación de materia orgánica con la ayuda de bacterias anaerobias, que son microorganismos que no necesitan oxígeno para sobrevivir. Como resultado de este proceso, se genera biogás, que es una mezcla compuesta principalmente por gases como metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), y trazas de otros gases como hidrógeno

Nitrificación Desnitrificación

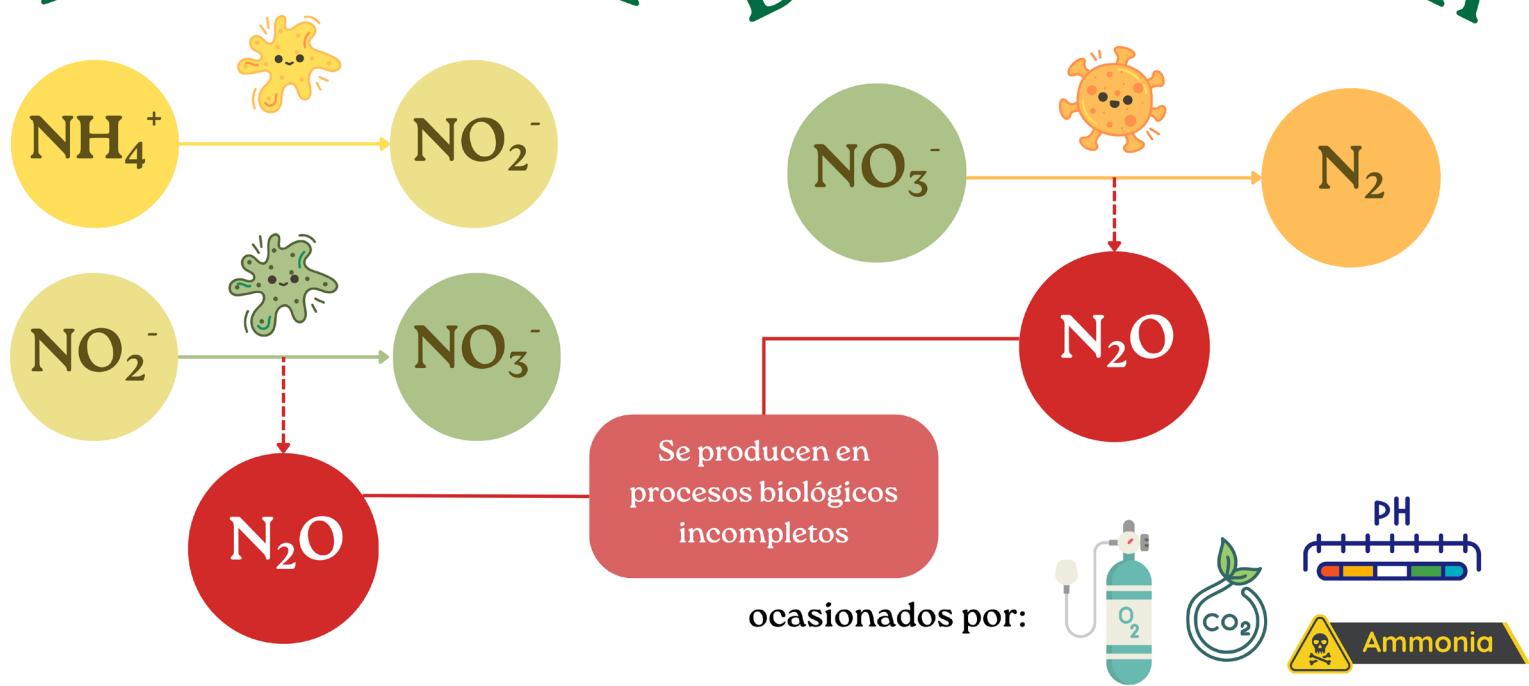


Figura 2. Proceso representativo del tratamiento de aguas residuales [1].

(H_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S) [2].

Pero entonces, ¿por qué es importante conocer los mecanismos biológicos que suceden dentro de una PTAR? Bueno, esto se debe a que, cuando los procesos de nitrificación o desnitrificación no se completan adecuadamente, pueden generarse emisiones de óxido nitroso (N_2O), que es un gas de efecto invernadero muy potente del cual hablaremos después (Figura 2). Antes de hablar sobre estas emisiones, es fundamental entender por qué ocurre un proceso incompleto de estos mecanismos biológicos. Entre los principales factores que promueven este fenómeno, se encuentran niveles bajos de oxígeno durante la nitrificación, recordando que los microorganismos involucrados en este mecanismo requieren de oxígeno para sobrevivir! De la misma manera, otro factor es la falta de una fuente de carbono orgánico (nutriente y fuente de energía para las bacterias) en la desnitrificación, lo que evita la conversión completa del nitrato a nitrógeno. Entre otros factores relevantes se pueden men-

cionar un pH fuera del rango ideal, variaciones en la cantidad de materia orgánica que entra al sistema y concentraciones altas de amonio. Estas condiciones pueden estresar a los microorganismos y dificultar que mantengan el equilibrio necesario para que los procesos biológicos funcionen correctamente [3].

De la misma manera, cuando la nitrificación o desnitrificación no se completan adecuadamente, la concentración de nitrógeno en el agua resultante aumenta, es decir, el líquido que sale después de todo el proceso de tratamiento tiene altos niveles de nitrógeno. Esto puede ser perjudicial para los cuerpos de agua donde se recibe dicha agua, ya que provoca un fenómeno conocido como eutrofización, que es el enriquecimiento excesivo de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, que favorece el crecimiento descontrolado de algas y plantas acuáticas. Como consecuencia, se reduce la cantidad de oxígeno disuelto, lo que afecta la vida acuática, provoca la muerte masiva de peces y deteriora la calidad del agua [4].

Ahora que ya comprendimos por qué pueden ocurrir reacciones incompletas, retomemos el tema de las emisiones de óxido nitroso. No todas las emisiones tienen el mismo impacto, algunas pueden dañar al medio ambiente más que otras (Figura 3). Las PTAR contribuyen a las emisiones de óxido nitroso (N_2O), dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4). Se estima que entre el 5 y el 10% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero provienen de la industria de aguas residuales, y de este porcentaje, ¡el 70% es generado en PTAR! Asimismo, se ha reportado que las emisiones de óxido nitroso poseen un potencial de calentamiento global 273 veces mayor que el dióxido de carbono. En palabras sencillas, emitir una pequeña cantidad de óxido nitroso calienta al planeta tanto como emitir una gran cantidad de dióxido de carbono. Por lo tanto, es evidente que las emisiones generadas durante el tratamiento del agua contribuyen al calentamiento global y también al agotamiento de la capa de ozono [5].

No obstante, las emisiones de óxido nitroso son altamente variables, porque dependen de la estación del año, las condiciones climáticas locales y los parámetros operativos de cada planta. En otras palabras, cada PTAR produce cantidades diferentes de óxido nitroso, lo cual significa que las soluciones implementadas para mitigar o reducir estas emisiones deben diseñarse de manera específica para cada caso.

Por eso, es de suma importancia desarrollar estrategias individualizadas para mitigar de forma efectiva las emisiones de óxido nitroso. Una de ellas involucra promover una operación del sistema de tratamiento más estable, lo que implica evitar cambios bruscos en la carga orgánica de alimentación, la temperatura y el oxígeno, ya que, como discutimos anteriormente, estas variaciones pueden alterar el equilibrio de los microorganismos en los biorreactores. También se ha demostrado que ciertas características de diseño pueden reducir las emisiones, como recircular gran parte del agua tratada al

Intensidad de los GASES de EFECTO INVERNADERO

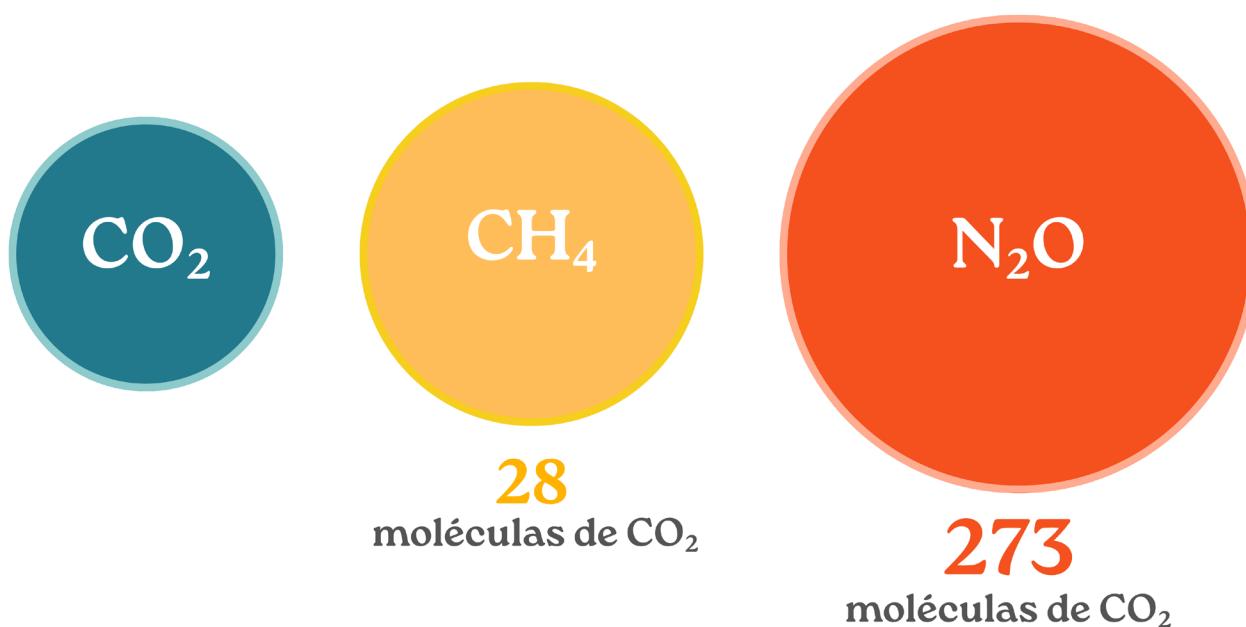


Figura 3. Imagen representativa de la intensidad de los gases de efecto invernadero [6].

inicio del proceso, usar volúmenes mayores de biorreactores y permitir que los microorganismos permanezcan más tiempo en el sistema [7].

Por otra parte, un enfoque implementado en PTAR de países desarrollados como China, Noruega y Australia consiste en la modernización y reacondicionamiento de biorreactores. Algunas de estas estrategias incluyen la modificación o aplicación de tanques ya existentes, evitando la inversión elevada de capital. Estas modernizaciones pueden incluir la creación de zonas con distintos niveles de aireación, la incorporación de pequeñas piezas de plástico que favorecen la formación de biofilms o biopelículas, que son comunidades de microorganismos que se adhieren a la superficie de estas piezas como si fuera su “casita” dentro del biorreactor, o la integración de sistemas automatizados que ajusten las condiciones de operación de forma más precisa [7].

Conclusión

Este análisis abre una reflexión sobre la dualidad que representan las PTAR, creadas con el propósito de proteger la salud humana y el medio ambiente, pero que también pueden producir un impacto negativo si no se gestionan adecuadamente. Una operación poco óptima, un mantenimiento deficiente, o la falta de sistemas de monitoreo continuo de las emisiones contaminantes pueden provocar un efecto contraproducente, convirtiendo las plantas en fuentes involuntarias de contaminación. Esto evidencia la necesidad urgente de fortalecer la investigación científica y promover la inversión en tecnologías limpias, capaces de reducir las emisiones de óxido nitroso y de optimizar los procesos biológicos que se llevan a cabo, avanzando hacia un tratamiento de aguas que realmente sea sostenible.

Cuestionar esta realidad nos invita no solo a repensar la verdadera eficiencia de las PTAR sino también el sentido de su existencia dentro del sistema ambiental y social. En este sentido, las emisiones de óxido nitroso revelan las fragilidades de sistemas que creímos contro-

lados, pero al mismo tiempo abren una ventana de oportunidad para impulsar soluciones más responsables, guiadas por la ética, la ciencia y la innovación. **iBIO**

Referencias

- [1] Metcalf & Eddy, Inc. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4th ed.). McGraw Hill.
- [2] Campos, J. L., Valenzuela-Heredia, D., Pedrouso, A., Val del Río, A., Belmonte, M., & Mosquera-Corral, A. (2016). Greenhouse Gases Emissions from Wastewater Treatment Plants: Minimization, Treatment, and Prevention. *Journal of Chemistry*, 2016(1), 1-12. <https://doi.org/10.1155/2016/3796352>
- [3] Thakur, I. S., & Medhi, K. (2019). Nitrification and denitrification processes for mitigation of nitrous oxide from waste water treatment plants for biovalorization: Challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, 282, 502–513. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.069>
- [4] Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2020, 8 de junio). *La eutrofización de cuerpos de agua: Un síntoma antropogénico que requiere atención*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/imta/articulos/la-eutrofizacion-de-cuerpos-de-agua-un-sintoma-antropogenico-que-requiere-atencion>
- [5] Studio Republic. (2025, June 2). *Tackling nitrous oxide in wastewater: new strategies for decarbonising AMP8 and beyond*. CIWEM. <https://www.ciwem.org/news/tackling-nitrous-oxide-in-wastewater-new-strategies-for-decarbonising-amp8-and-beyond>
- [6] Climate Matters. (2016, October 24). *WMO Greenhouse Gas Bulletin*. Climate Central. <https://www.climatecentral.org/climate-matters/wmo-greenhouse-gas-bulletin>
- [7] Law, Y., Ye, L., Pan, Y., & Yuan, Z. (2012). Nitrous oxide emissions from wastewater treatment processes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 367(1593), 1265–1277. <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0317>