

ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO DE LAS AGUAS RESIDUALES (DESNITRIFICACIÓN)



L'eliminación eficiente del nitrógeno de las aguas residuales representa un imperativo crucial, dictado por importantes desafíos relacionados con la preservación del medio ambiente y la protección de la salud pública. El nitrógeno, en forma de nitratos y amoníaco, ejerce una influencia significativa en los ecosistemas acuáticos y puede plantear riesgos graves para la fauna, la flora e incluso la salud humana.

En este InfoDBO, exploraremos las razones esenciales por las cuales la eliminación del nitrógeno de las aguas residuales se ha convertido en una prioridad incuestionable, destacando las implicaciones ambientales y las amenazas potenciales para la salud pública. También examinaremos los procesos biológicos clave, como la nitrificación y la desnitrificación, que desempeñan un papel central en el tratamiento de las aguas residuales para eliminar el nitrógeno, antes de concluir sobre la importancia crucial de la recirculación en este proceso, especialmente en el contexto de las soluciones propuestas por DBO International.

MEDIO AMBIENTE

La eliminación del nitrógeno de las aguas residuales es de vital importancia en la prevención de la eutrofización de lagos y fuentes de agua potable, un fenómeno ecológico perjudicial. Cuando el nitrógeno, principalmente en forma de nitratos y amoníaco, ingresa a los ecosistemas acuáticos, actúa como un fertilizante, fomentando un crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas. Esta proliferación vegetal crea una capa densa en la superficie, obstruyendo la luz solar e inhibiendo la fotosíntesis de las plantas sumergidas. Como resultado, estas plantas se descomponen, consumiendo una cantidad significativa de oxígeno disuelto en el agua. Este proceso reduce considerablemente los niveles de oxígeno disponibles, poniendo en peligro la supervivencia de los peces y otros organismos acuáticos. Las “zonas muertas”, donde la vida acuática ya no puede subsistir, a menudo son el resultado directo de este fenómeno. Así, al eliminar el nitrógeno de las aguas residuales, se controla el suministro de nutrientes en los entornos acuáticos, preservando su equilibrio ecológico y evitando la degradación de estos hábitats vitales.

El nitrógeno, especialmente en forma de amoníaco, es extremadamente tóxico para la fauna acuática. Incluso a bajas concentraciones, el amoníaco puede causar daños significativos a los peces y otros organismos acuáticos. Afecta principalmente las branquias de los peces, obstaculizando su capacidad para respirar y regular el equilibrio entre el agua salada y el agua dulce. Esta toxicidad puede provocar un estrés severo, una disminución del crecimiento, una reproducción alterada y, en casos graves, la muerte. Además, el amoníaco y los nitratos pueden perturbar los procesos biológicos esenciales de los organismos acuáticos, afectando su capacidad para alimentarse, reproducirse y mantener un equilibrio fisiológico saludable. Al eliminar el nitrógeno de las aguas residuales, se reducen considerablemente estos riesgos, contribuyendo así a la salud y viabilidad de los ecosistemas acuáticos. Esto es especialmente importante en áreas donde las aguas residuales tratadas se vierten en ríos, lagos o estuarios, donde pueden tener un impacto directo en la fauna local.

SALUD PÚBLICA

La presencia de nitratos en el agua potable, proveniente de la contaminación por aguas residuales, representa un riesgo importante para la salud humana, especialmente para los lactantes. Los nitratos se convierten en nitritos en el cuerpo humano, y estos últimos pueden interferir con la capacidad de la hemoglobina para transportar oxígeno. En los lactantes, esto puede llevar a la metahemoglobinemia, o “síndrome del bebé azul”, una condición potencialmente mortal caracterizada por una disminución en la oxigenación de la sangre. Los síntomas incluyen una coloración azulada de la piel y dificultades respiratorias. Los adultos también pueden verse afectados, aunque con menos frecuencia. Además, algunas investigaciones sugieren una relación entre la exposición prolongada a niveles elevados de nitratos y un mayor riesgo de ciertos tipos de cáncer, así como otros problemas de salud. Por lo tanto, tratar las aguas residuales para eliminar el nitrógeno es esencial para garantizar la seguridad del agua potable y proteger la salud pública.

Los nitratos provenientes de las aguas residuales pueden infiltrarse en el suelo y contaminar los acuíferos, que son una fuente importante de agua potable para muchas comunidades. Esta contaminación representa un riesgo grave para la salud humana, como se mencionó anteriormente, y también puede tener un impacto económico, ya que el tratamiento del agua contaminada por nitratos es costoso y complejo. Además, una vez que los nitratos están presentes en los acuíferos, es muy difícil eliminarlos. Pueden persistir durante largos períodos, extendiendo el riesgo de contaminación mucho más allá de la fuente inicial. Por lo tanto, tratar eficientemente las aguas residuales para eliminar el nitrógeno antes de ser vertidas en el medio ambiente es una medida preventiva esencial para proteger los recursos de agua subterránea y asegurar la disponibilidad de agua potable segura para las generaciones actuales y futuras.



TRATAMIENTO

La nitrificación y la desnitrificación son dos procesos biológicos clave en el tratamiento de aguas residuales, especialmente para eliminar el nitrógeno, un contaminante importante.

NITRIFICACIÓN

La nitrificación es un proceso aerobio (que requiere oxígeno) en el cual las bacterias nitrificantes convierten el amoníaco (NH_3) en nitritos (NO_2^-) y luego en nitratos (NO_3^-). Este proceso ocurre en dos etapas: la oxidación del amoníaco a nitritos y la conversión de los nitritos a nitratos. Estas dos etapas se llevan a cabo durante el paso del agua residual a través de los sistemas de tratamiento de DBO International.

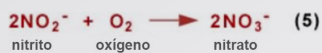
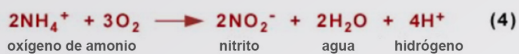
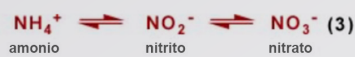


Figura 2: Fórmulas de nitrificación (Bourque, 1997)

La transformación de amoníaco a nitrato, que constituye la segunda fase de la nitrificación, es principalmente realizada por bacterias de los géneros *Nitrobacter* y *Nitrospira*. Esta etapa, al igual que la primera, genera energía que luego se utiliza para sintetizar ATP. Los organismos involucrados en la nitrificación son quimioautótrofos, utilizando dióxido de carbono como fuente de carbono para su crecimiento. Algunas bacterias que oxidan amoníaco tienen la enzima ureasa, que facilita la descomposición de la urea en dos moléculas de amoníaco y una molécula de dióxido de carbono. Se ha observado que *Nitrosomonas europaea*, así como otras poblaciones de bacterias que oxidan amoníaco presentes en el suelo, utilizan el dióxido de carbono producido por esta reacción para generar biomasa a través del ciclo de Calvin. Simultáneamente, capturan energía convirtiendo el amoníaco (el otro producto de la ureasa) en nitrito. Esta capacidad podría explicar por qué las bacterias que oxidan amoníaco experimentan un crecimiento aumentado en presencia de urea, especialmente en entornos ácidos.

En ecología, las bacterias nitrificantes forman un grupo taxonómico específico y son particularmente abundantes en ambientes ricos en amoníaco, como áreas de descomposición proteica intensa y plantas de tratamiento de aguas residuales. Estas bacterias prosperan en aguas de lagos y ríos, especialmente donde hay un aporte significativo de aguas residuales. Su proliferación en estos entornos se ve favorecida por la alta concentración de amoníaco en las aguas residuales y en agua dulce.

En el System O)) (Enviro))septic), se encuentran las bacterias que oxidan amoníaco presentes en las aguas residuales, así como los diversos microorganismos presentes en el suelo circundante. Por lo tanto, un conjunto de microorganismos es responsable del proceso de nitrificación.

En el System O)) (Enviro))septic), se encuentran las bacterias que oxidan amoníaco presentes en las aguas residuales, así como los diversos microorganismos presentes en el suelo circundante. Por lo tanto, un conjunto de microorganismos es responsable del proceso de nitrificación.

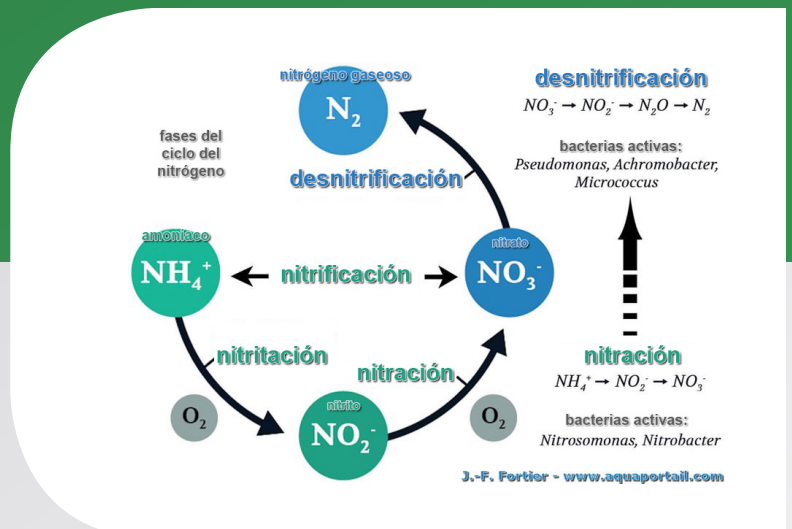


Figura 1: Ciclo del nitrógeno (Fortier, 2006)

Tres categorías de organismos son responsables de la transformación del amoníaco a nitrito: las bacterias que oxidan el amoníaco, las arqueas que oxidan el amoníaco y las bacterias que oxidan nitritos. Las bacterias que oxidan nitritos y las arqueas que oxidan amoníaco presentan similitudes notables. Las bacterias que oxidan amoníaco se encuentran principalmente entre las beta-proteobacterias y las gamma-proteobacterias. Hasta ahora, se han aislado y caracterizado dos especies de arqueas que oxidan amoníaco: *Nitrosopumilus maritimus* y *Nitrososphaera viennensis*. En los suelos, las bacterias que oxidan amoníaco más estudiadas pertenecen a los géneros *Nitrosomonas* y *Nitrosococcus*. Aunque en los suelos, la oxidación

DESNITRIFICACIÓN

La desnitrificación es un proceso anaerobio (que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno) en el cual las bacterias desnitrificantes convierten los nitratos en nitrógeno gaseoso (N₂) o en óxidos de nitrógeno. El proceso consta de dos etapas: la reducción de los nitratos y la liberación de nitrógeno gaseoso.

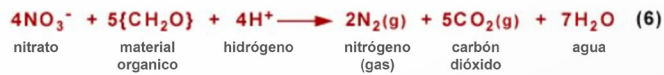


Figura 3: Fórmula de desnitrificación (Bourque, 1997)

El origen de la oxidación de sustancias orgánicas o inorgánicas implica la transferencia de electrones (e⁻) o de hidrógeno resultante (H). Estos electrones son transportados por transportadores específicos de electrones e hidrógeno, que varían

según las diferentes enzimas y bacterias involucradas. En general, los citocromos y las quinonas sirven como portadores de electrones o hidrógeno. El transporte de electrones conduce a la síntesis de ATP mediante el acoplamiento quimiosmótico y, por lo tanto, a la conservación de energía. Además de N₂, se libera una cantidad menor de N₂O (óxido nitroso) como intermediario gaseoso. Este proceso ocurre naturalmente en todas partes donde el nitrato y materia orgánica oxidable están disponibles en condiciones anóxicas o hipóxicas, como en pantanos, suelos, sedimentos en ríos y lagos. Algunas bacterias pueden utilizar componentes adicionales como el hidrógeno molecular (H₂), el sulfuro de hidrógeno (H₂S), el amonio (NH₄⁺), los iones de hierro (II) (Fe²⁺) y el metano (CH₄). Estos componentes, junto con el nitrato (NO₃⁻), son oxidados para formar nitrógeno molecular (N₂). El nitrógeno gaseoso se libera luego en la atmósfera mediante difusión gaseosa.

EN CONCLUSIÓN

Por eso, es crucial contar con un proceso de recirculación para eliminar completamente el nitrógeno de las aguas residuales. Durante la recirculación, los nitratos son devueltos al tanque primario, donde se exponen a numerosas bacterias desnitrificantes en condiciones anaeróbicas, facilitando así su conversión en nitrógeno gaseoso. Nuestro equipo de ingeniería en DBO International tiene el conocimiento necesario para calcular el porcentaje de agua que debe ser recirculado para cumplir con los requisitos de cada país. Esto permitirá lograr el rendimiento previsto y mantener el nivel de rendimiento del tratamiento durante muchos años.

Ahn, Y.-H. (2006). Sustainable nitrogen elimination biotechnologies : A review. *Process Biochemistry*, 41(8), 1709-1721. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2006.03.033>

Bourque, P.-A. (1997). Cycle de l'azote. Planète Terre. <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/cycle.azote.html>

Centre national de la recherche scientifique. (s. d.). Ecosysteme aquatique : Eutrophisation. L'eutrophisation. Consulté 15 décembre 2023, à l'adresse <https://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/ecosys/eutrophisat.html>

Environnement et Changement climatique Canada. (2009, août 10). Liste des substances toxiques : Ammoniac dissous dans l'eau [Description de programme, page de navigation]. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/gestion-substances-toxiques/liste-loi-canadienne-protection-environnement/ammoniac-dissous-dans-eau.html>

Fortier, J.-F. (2006). Bactérie nitrifiante : Définition et explications. AquaPortail. <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/12858/bacterie-nitrifiante>

Holmes, D. E., Dang, Y., & Smith, J. A. (2019). Chapter Four—Nitrogen cycling during wastewater treatment. In G. M. Gadd & S. Sariaslani (Éds.), *Advances in Applied Microbiology* (Vol. 106, p. 113-192). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2018.10.003>

Karine Chaussé, Denise Phaneuf, Patrick Levallois, & Groupe scientifique sur l'eau de l'Institut national de santé publique du Québec. (2003, juillet). Nitrates / Nitrites | INSPQ. Institut national de santé publique du Québec. <https://www.inspq.qc.ca/eau-potable/nitrates>

notre-environnement. (2023, décembre 15). Les nitrates, le principal polluant des eaux souterraines. <http://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/sante/la-pollution-de-l-eau-douce-ressources/article/les-nitrates-le-principal-polluant-des-eaux-souterraines>

Organisme de bassin versant Abitibi-Jamésie. (2021). L'eutrophisation. OBVAJ. <https://obvaj.org/citoyens/les-bonnes-pratiques/eutrophisation/>