

De la Química al Campo: El Impacto de los Inhibidores de la Nitrificación

Avendaño-Morales, Berenice^{1*}; Hidalgo-Moreno, Claudia M.¹; Etchevers-Barra, Jorge D.¹

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, C.P. 56264.

* Autor para correspondencia: avendano.berenice@colpos.mx

Problema

El nitrógeno es un nutriente esencial para las plantas, ya que es componente clave de aminoácidos, clorofila y ácidos nucleicos, entre otros. Aunque el nitrógeno abunda en la atmósfera como N₂, las plantas no pueden asimilarlo directamente en esa forma, requiriendo su conversión a formas utilizables (NH₄⁺ y NO₃⁻) mediante el proceso de la nitrificación, un paso bioquímico mediado por microorganismos como: bacterias, hongos y arqueas. Este proceso ocurre en dos etapas principales: primero, el amonio es transformado en hidroxilamina y nitrito por la acción de las enzimas amoníaco monooxigenasa (AMO) y la hidroxilamina oxidorreductasa (HAO) (Shears y Wood, 1985; Basu *et al.*, 2003). Luego la enzima nitrito oxidorreductasa promueve la oxidación del nitrito a nitrato. El nitrógeno en forma de amonio frecuentemente es retenido en el suelo, mientras que el nitrato se lixivia por su alta movilidad pudiendo contaminar cuerpos de agua. Además, en condiciones de alta humedad y temperatura, el nitrato puede transformarse en gases como N₂ y N₂O, mediante el proceso de la desnitrificación. Este último es un gas de efecto invernadero con un impacto climático significativo, ya que es aproximadamente 300 veces más potente que el CO₂ en cuanto a su capacidad para absorber energía (Frye, 2005). Por ello, la gestión eficiente de los fertilizantes nitrogenados es crucial para maximizar su disponibilidad para las plantas y minimizar el impacto ambiental.

Inhibidores de la nitrificación

El uso de inhibidores de la nitrificación es una estrategia que ha demostrado ser eficaz para ralentizar el proceso de la conversión de amonio a nitrato (Figura 1). Estos compuestos prolongan la posibilidad de que el nitrógeno permanezca más tiempo en el suelo, lo que hace más eficiente su uso (Patra *et al.*, 2006; Minet *et al.*, 2013; Lan *et al.*, 2022) y su aprovechamiento por las plantas (Rodgers, 1986).

Esto es especialmente relevante porque se ha demostrado que cerca de 90% del nitrógeno aplicado en forma de amonio se convierte en nitrato en tan solo cuatro semanas (Sahrawat, 1980; Goring, 1962).

Con objeto de hacer más eficiente el uso de fertilizantes nitrogenados, a mediados del siglo XX se desarrollaron inhibidores de la nitrificación sintéticos. El primero que se comercializó fue la nitrapirina. Posteriormente, se desarrollaron otros inhibidores como la dicianidamida (DCD), el 1H-1,2,4-triazol (TZ) y el 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP) que

Cómo citar: Avendaño-Morales, B., Hidalgo-Moreno, C. M., & Etchevers-Barra, J. D. De la Química al Campo: El Impacto de los Inhibidores de la Nitrificación. *Agro-Divulgación*, 5(2). <https://doi.org/10.54767/ad.v5i2.500>

Editores académicos: Dra. Ma. de Lourdes C. Arévalo Galarza y Dr. Jorge Cadena Iniguez.

Publicado en línea: Octubre, 2025.

Agro-Divulgación, 5(2). Marzo-Abril. 2025. pp: 63-68.

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International



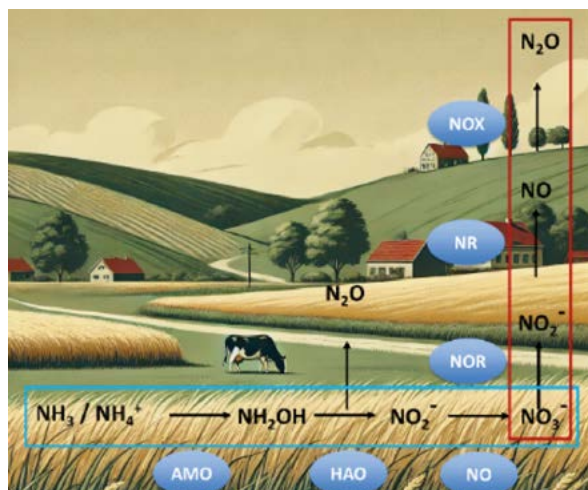


Figura 1. Proceso nitrificante (azul), desnitrificante (rojo) y enzimas involucradas en el proceso (●) en suelos agrícolas. AMO: amoníaco monooxigenasa, HAO: hidroxilamina oxidoreductasa, NO: nitrito oxidoreductasa, NOR: nitrato reductasa, NR: nitrito reductasa, NOX: óxido nítrico reductasa, NX: óxido nitroso reductasa. Modificado de OpenAI (2023).

son reconocidos por su efectividad en diversas condiciones de suelo y cultivo estudiados (Papadopoulou *et al.*, 2020).

La nitrapirina ($\text{ClC}_5\text{H}_3\text{NCCl}_3$) se introdujo en 1960 bajo el nombre de N-Serve y fue etiquetada para su uso en maíz, trigo, sorgo, canola y remolacha azucarera (Corteva agriscience, EUA). Produce la muerte de las bacterias nitrificantes *Nitrosomonas*, cuya población decrece en los suelos después de su uso (Huffman, 1996; Sturm *et al.*, 1994; Zerulla, 1996). En suelos con temperaturas $\geq 20^\circ\text{C}$ se descompone en 30 días o menos, mientras que en suelos fríos es muy persistente y estable por lo que se recomienda aplicarlo durante la fertilización de otoño o invierno (Subbarao *et al.*, 2006; Trenkel, 2010).

La DCD ($\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4$), se aprobó como fertilizante nitrogenado en 1917 y posteriormente como inhibidor de la nitrificación. Contiene 65% de N (AAPFCO, 1985) y se puede combinar con fertilizantes amoniacales. Se descompone en urea y amoníaco, por lo que no representa ningún riesgo para la salud humana (Trenkel, 2010; Zerulla, 2008). Se ha probado en experimentos de laboratorio y de campo que la mezcla DCD+TZ reduce significativamente la emisión de N_2O (Michel *et al.*, 2004; Weber *et al.*, 2004; Wozniak *et al.*, 2001).

El DMPP ($\text{C}_5\text{H}_{11}\text{N}_2\text{O}_4\text{P}$) desarrollado por BASF en 1995, fue comercializado por la empresa química Compo Expert (IFA, 2010), entre muchas otras (Thermo Fisher Scientific, Sigma Aldrich, Alfa Chemical). De acuerdo con su hoja de seguridad este producto es nocivo en caso de ingestión, tras exposiciones prolongadas o repetidas puede provocar daños que afectan la fertilidad. Su tasa de aplicación es sustancialmente menor que la del DCD (Zerulla *et al.*, 2001). En el suelo presenta una movilidad muy baja comparada con la del amonio (Fettweis *et al.*, 2001; Gutser, 1999; Linzmeier *et al.*, 2001). A elevadas temperaturas (32°C) como aquellas que se alcanzan en verano en el sur de Europa, el DCD retrasa el proceso de oxidación a nitratos por varias semanas y por ende su probabilidad de lixiviación (Bañuls *et al.*, 2000; Serna *et al.*, 2000).

Se conoce que las raíces de ciertas plantas exudan compuestos que favorecen la absorción de nitrógeno presente en el suelo (Stiven, 1952; Munro, 1966; Rice y Pancholy, 1972), sin embargo, no se contaba con las evidencias necesarias para demostrarlo. A inicios del siglo XXI estudios realizados con la gramínea *Brachiaria humidicola* indicaron que ésta posee la capacidad de competir eficientemente por nutrientes en suelos pobres en nitrógeno. A partir de esas observaciones se demostró que algunas moléculas presentes en los exudados de su raíz son compuestos que inhiben la nitrificación (Subbarao *et al.*, 2006). Ello promovió las investigaciones sobre inhibidores biológicos que pueden ser generados en la rizosfera, los exudados radicales, los tejidos vegetales, y la hojarasca (Xin *et al.*, 2021). También estudios del impacto de éstos en las comunidades nitrificantes (Zhou *et al.*, 2024), así como su aplicación en diversos cultivares y tipos de suelo (Mawan y Kaewpradit, 2024; Leon y Nedumaran, 2024).

Los inhibidores biológicos de la nitrificación, como los liberados en el entorno de la raíz de plantas, como *Brachiaria humidicola*, reducen la actividad de los microorganismos nitrificantes. Estas sustancias mantienen en el suelo por más tiempo el nitrógeno amoniacal y retrasan su transformación a nitrato. Si bien, hasta este momento aún no se conoce el mecanismo de acción, se ha sugerido que estos compuestos interaccionan con las enzimas AMO y HAO, cuya acción es clave del proceso de la nitrificación (Wendeborn, 2019).

La biodegradabilidad de los inhibidores biológicos representa una alternativa prometedora respecto a los inhibidores sintéticos, porque reduce significativamente el riesgo a la salud humana y a la de los sistemas naturales (suelo, agua), donde éstos se pueden acumular. Es el caso de la nitrapirina, que provoca irritación cutánea, de acuerdo con lo que indica su hoja de seguridad. Tampoco se ha investigado suficiente y claramente la afectación al hábitat de organismos biológicos no objetivo, como es el caso de los polinizadores, que pudiesen estar presentes en áreas adyacentes a las zonas de aplicación.

También se ha reportado que los inhibidores biológicos requieren dosis de aplicación más bajas que los sintéticos para lograr efectos similares, lo que disminuye costos de aplicación y posibles impactos ambientales asociados con su uso (Subbarao *et al.*, 2008). Su origen natural y su compatibilidad ambiental permiten integrarlos de manera más armónica en los sistemas agrícolas, respetando los ciclos naturales de los nutrientes y fomentando la sostenibilidad de los sistemas de producción. Los inhibidores biológicos son tanto hidrofóbicos como hidrofílicos y presentan modos de acción multifuncionales. Por ejemplo, el ácido linoleico no solo inhibe la nitrificación, también actúa sobre la actividad de la ureasa, enzima clave en la descomposición de la urea en amoníaco y dióxido de carbono, contribuyendo así a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Subbarao *et al.*, 2009; 2013).

Entre los inhibidores biológicos más Investigados se incluyen al ácido linolénico ($C_{18}H_{30}O_2$), la braquiolactona ($C_{20}H_{30}O_4$) y la sorgoleona ($C_{22}H_{30}O_4$), esta última molécula derivada del sorgo que combina propiedades inhibitorias alelopáticas con las malezas.

Entre las limitaciones que presentan los inhibidores de la nitrificación tanto biológicos como sintéticos se destaca su sensibilidad a distintas condiciones químicas, como el pH y su solubilidad. Por ejemplo, el DMPP muestra un mayor efecto inhibitor en suelos con pH 10, mientras que su efectividad disminuye a pH 4 y 7 (Xue *et al.*, 2012). Por otro lado, la

DCD es altamente soluble en agua (32 g/L a 20 °C) (AAPFCO, 1985), lo que puede facilitar su lixiviación y reducir su impacto en la inhibición de la nitrificación.

Los inhibidores de la nitrificación también son sensibles a condiciones ambientales, como temperaturas extremas. Por ejemplo, el ácido linoleico se oxida en contacto con el aire a 50 °C (Yang *et al.*, 2000) lo que puede llevar a su degradación y un nulo o bajo impacto sobre las comunidades nitrificantes. Además, ciertos microorganismos del suelo pueden metabolizar estos inhibidores como fuente de energía, como ocurre con la sorgoleona (Gimsing *et al.*, 2009). Ante estas condiciones la encapsulación de inhibidores de la nitrificación emerge como una tecnología prometedora propuesta para paliar esta limitante.

Encapsulación de inhibidores de nitrificación

La encapsulación se presenta como una estrategia innovadora y eficaz para proteger a los inhibidores de la nitrificación, tanto sintéticos como biológicos, que afectan su desempeño y disminuyen su efectividad debido a condiciones presentes en el suelo. Estas condiciones pueden ser el pH, la porosidad, la presencia de materia orgánica, así como la diversidad y población de microorganismos nitrificantes (principalmente bacterias). Además de factores abióticos, como la temperatura y la humedad. Todos estos factores afectan la solubilidad, volatilidad y estabilidad química de los inhibidores de la nitrificación (Subbarao *et al.*, 2006a).

El encapsulado es un procedimiento físico que consiste en recubrir los compuestos activos con materiales que forman una barrera física, química o biológica, prolongando su acción en el suelo y reduciendo pérdidas por lixiviación o volatilización. Los materiales usados como recubrimiento pueden ser tanto biodegradables, como son quitosano, alginato y celulosa, o no biodegradables, como poliuretano y polietileno (Liang y Liu 2006), entre otros. La tecnología a emplearse depende del tamaño de las partículas a encapsular:

- La macroencapsulación genera partículas con tamaño mayor a 1 mm, son visibles a simple vista. Este tipo de encapsulación es ideal para aplicaciones agrícolas que requieren una liberación controlada y prolongada de los nutrientes. Los compuestos activos liberados durante semanas o incluso meses, se deben ajustar a las necesidades de los cultivos a lo largo de su ciclo de crecimiento (Shaviv, 2001).
- La microencapsulación genera partículas de menor tamaño que la macroencapsulación, generalmente inferiores a 1000 μm . Esas pueden ser aplicadas de manera foliar o al suelo. La liberación controlada y prolongada de nutrientes de un fertilizante microencapsulado aplicado por Tolescu *et al.* (2014) a cultivos de maíz y girasol, favoreció su rendimiento (granos y semillas, respectivamente) comparado con fertilizantes convencionales. Además, este fertilizante microencapsulado permitió reducir el impacto ambiental asociado al uso de fertilizantes químicos aplicados directamente al suelo, ya que disminuye la lixiviación de los nutrientes encapsulados (N, P y K) (Tolescu *et al.*, 2014).

Por su parte, los compuestos nanoencapsulados son partículas menores a 100 nm. El tamaño nanométrico estas partículas les confiere propiedades únicas. Debido a su elevada

superficie específica pueden liberar compuestos activos directamente en las hojas y rizosfera, optimizando su biodisponibilidad y reduciendo pérdidas por lixiviación o volatilización (Kah *et al.*, 2018). Además, la nanoencapsulación ha abierto nuevas posibilidades para el desarrollo de sistemas de liberación inteligente, capaces de responder a estímulos ambientales como pH, humedad o temperatura (Saurabh *et al.*, 2024) (Figura 2).

Fertilizantes con inhibidores sintéticos de la nitrificación cuyas partículas son de tamaño micro y macro-métricos se comercializan actualmente bajo el nombre de Yodel y Dd-Meister® (Chisso Asahi Fertilizer Co., Ltd., Japón), son una mezcla de N, P, K y DCD, y urea recubierta de poliolefina con diciandiamida, respectivamente (Tachibana, 2007; Trenkel, 2010; Mimaki, 2003), Entec® (EuroChem, Bélgica) que contiene una mezcla de fertilizantes con los inhibidores DMPP y el 2-(N-3,4-dimetilpirazol) succínico, NovaTec® Solub 21, fertilizante con N, P, S, microelementos y DMPP (Compo Expert, Alemania) y Ennnè 21, un fertilizante de lenta liberación con DMPP (Mugavero, Italia). Sin embargo, se debiera preferir el uso de inhibidores biológicos por su inocuidad y biodegradabilidad.

La disponibilidad de nanofertilizantes con inhibidores de la nitrificación es limitada. Empresas como Wonder Corporation están explorando el desarrollo de fertilizantes denominados de nanomalla, también conocidos como fertilizantes nanohíbridos. Éstos son nanopartículas de óxido de hierro o de zinc, o de compuestos orgánicos como quitosano y ácidos húmicos (Yadav *et al.*, 2023). Estos productos buscan mejorar la eficiencia en la liberación de nutrientes y reducir el impacto ambiental (wonder-corporation.com).

La encapsulación de inhibidores biológicos de la nitrificación juntamente con fuentes de nitrógenos es muy escasa. Esferas de alginato con urea y ácido linoleico han sido encapsuladas con éxito (Avendaño *et al.*, 2023) (Figura 3) pero aún se requiere mucha investigación al respecto, la cual está siendo desarrollada por la misma autora. La encapsulación conjunta del inhibidor biológico con fertilizante representa una vía prometedora para mejorar la gestión del nitrógeno en los sistemas agrícolas y contribuir a una agricultura más sostenible.



Figura 2. Uso de macro, micro y nano cápsulas para mejorar el crecimiento de los cultivos. Modificado de OpenAI (2023).

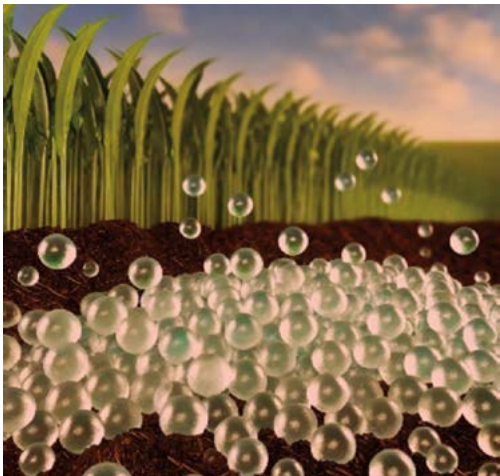


Figura 3. Uso de esferas de alginato con urea y ácido linoleico en el suelo (OpenAI, 2023).

La encapsulación de inhibidores de la nitrificación y el uso de inhibidores biológicos representan avances cruciales en la búsqueda del uso más eficiente de los fertilizantes nitrogenados para lograr una agricultura sostenible. Esta tecnología mitiga las pérdidas de nitrógeno lixiviado a cuerpos de agua y reducen las emisiones de gases de efecto invernadero. Los inhibidores sintéticos encapsulados conocidos y ya comercializados aseguran una liberación controlada y prolongada, pero no han sido usados como se esperaría. Los inhibidores biológicos destacan por su origen natural y compatibilidad ambiental, por lo que ofrecen una expectativa que debe continuarse investigando. El futuro de la agricultura dependerá de la integración de estas herramientas innovadoras con prácticas agrícolas responsables y el desarrollo de nuevas tecnologías que potencien su efectividad y accesibilidad.

Innovaciones, Impactos e Indicadores

Nivel de Innovación	Descripción	Transferido	Impacto		Indicador General de Políticas Públicas	Indicadores Específicos	Subindicador
			Sector	Ámbito			
Incremental	Busca mejorar los sistemas que ya existen haciéndolos mejores, más rápidos, más baratos, etc.	Asociaciones de Productores Gobierno de los Estados	Primario: Agricultura, Ganadería, Pesca, Explotación forestal, Minería	Social Económico Ambiental Conocimiento	Ciencia y Tecnología Económico Educación Responsabilidad Ambiental Salud Pública	Competitividad Recursos Humanos Comercio Generación de empleos Capacitación	Registro Numero de tesis Número de egresados (Lic. M.C., D.C.) Número de publicaciones Transferencias tecnológicas Aplicación de técnicas y conocimientos tecnológicos para el desarrollo social y económico
Procesos	Implementación de una nueva o significativa mejora de un método de producción o de suministro.	Productores independientes Comunidades Agrarias	Secundario: Actividades económicas que transforman las materias primas en productos elaborados (Agroindustria)				
Innovación sostenible	Desarrollo de productos y procesos que contribuyen al desarrollo sostenible		Procesos de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i)				