

FACTORES DETERMINANTES DE LA VOLATILIZACIÓN DE AMONIACO



INTRODUCCIÓN

La volatilización del amoníaco es un mecanismo que ocurre naturalmente en todos los suelos, por mineralización del Nitrógeno orgánico. No obstante, las pérdidas provenientes de fertilizantes químicos amoniacales como la urea (46-0-0), cuando son aplicados en la superficie del suelo, son considerablemente mayores que las del suelo.

Las pérdidas de nitrógeno (N) por volatilización dependen de diversos factores de suelo, clima y

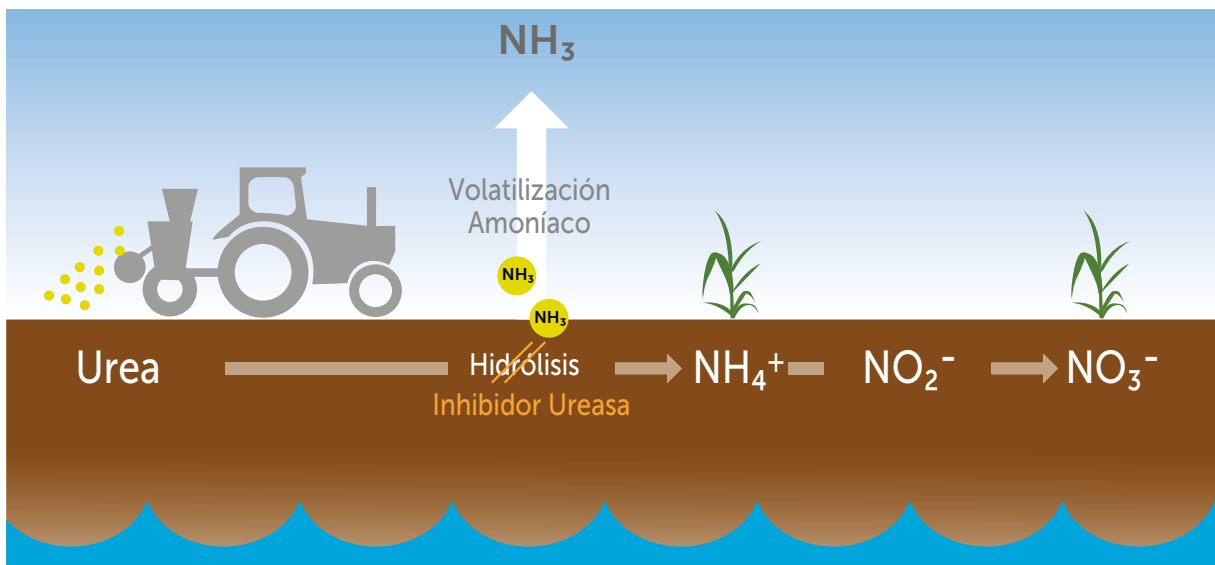
de manejo de cultivo como de las interacciones que ocurren entre ellos durante el proceso de transformación de fuentes amoniacales. Ya que dichas pérdidas son el resultado de numerosos procesos químicos, físicos y biológicos en los que intervienen factores tales como el pH, la capacidad de intercambio catiónico, la materia orgánica, la presencia de restos en la superficie, la temperatura, el viento, la evaporación de agua de la superficie del suelo y la cantidad y método de aplicación del fertilizante.

CICLO DE LA UREA EN EL SUELO

Cuando se aplica la urea en el suelo, ésta reacciona con el agua y comienza un proceso de hidrólisis, el cual está catalizado por la enzima ureasa, producida por microorganismos del suelo y plantas (Kot *et al.*, 2001). El proceso de transformación de la urea continua, y pasa de

amonio (NH_4^+) a nitrito (NO_2^-) y luego a nitrato (NO_3^-) por la oxidación biológica producida por bacterias nitrificadoras representadas por los géneros *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*, respectivamente (*Figura 1*).

FIGURA 1: *Ciclo de la urea en el suelo*



PROCESO DE VOLATILIZACIÓN

Cuando comienza el proceso de hidrólisis de la urea se produce amonio (NH_4^+) y hay consumo de protones (H^+), con el consiguiente aumento del pH a valores de 9 o superiores alrededor del granulo de urea (Chien *et al.*, 2009).

El NH_4^+ formado entra en una reacción de equilibrio con el NH_3 de la solución del suelo, la cual es gobernada por el pH edáfico. Con pH mayores a 8, el equilibrio químico favorece la formación de NH_3 , aumentando la concentración del mismo en la solución y la probabilidad de volatilización (*Figura 2*).

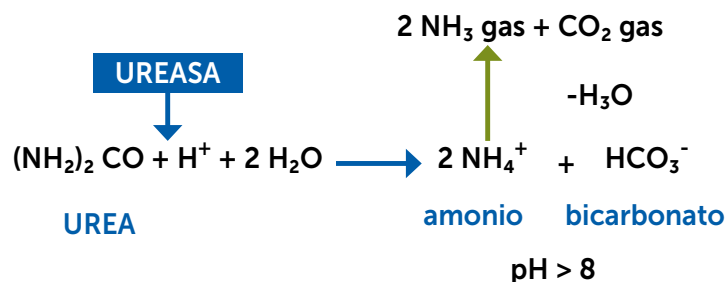
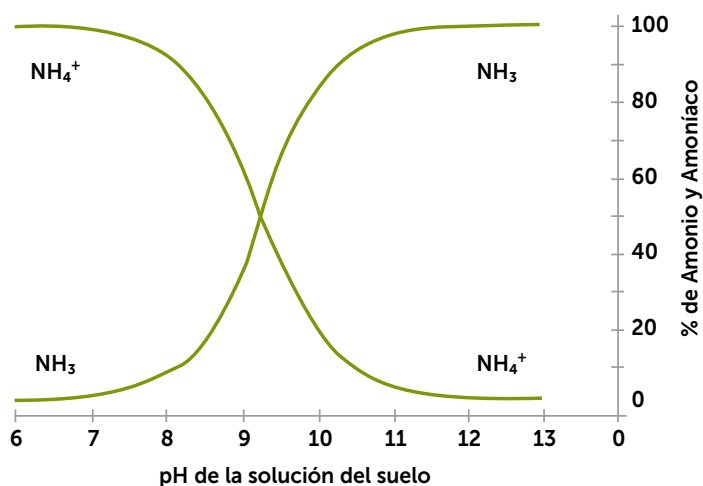


FIGURA 2: *Equilibrio químico entre el amonio y amoniaco según el pH de la solución del suelo.*

Fuente: John L. Havlin et al., 1999.



La cantidad de NH_3 perdido depende del pH, capacidad buffer, temperatura y contenido de humedad del suelo y puede incrementarse con la presencia de residuos de plantas que aumentan la actividad ureásica en los suelos (Hargrove, 1988).



Los factores edáficos que más influyen son:

- **Capacidad de intercambio catiónico (CIC).** Cuanto mayor es la CIC, mayor será la capacidad del suelo para retener al NH_4^+ producido por la hidrólisis de la urea y, en consecuencia, menor será la volatilización de NH_3 .
- **Textura.** Hay una correlación negativa entre las pérdidas de NH_3 y el contenido de MO, limo y arcilla, y la misma es positiva con el contenido de arena y el pH del suelo (Martens y Bremner, 1989).

- **Poder buffer del suelo.** Es la capacidad de resistirse a cambios en su pH lo cual también influye en el proceso de volatilización. A mayor poder buffer, más rápidamente el suelo retornará a su nivel inicial de pH, disminuyendo las posibilidades de volatilización.

Los factores ambientales que más se destacan:

- **Temperatura.** Las pérdidas por volatilización son más elevadas cuando las temperaturas del suelo se incrementan en un rango de 10 a 50°C (Hargrove, 1988).
- **Humedad del suelo.** La humedad del suelo y la tasa de evaporación también afectan la tasa de volatilización. La pérdida de humedad del suelo es un prerrequisito para la liberación de NH₃. Si la urea se incorpora

en el perfil del suelo debido a una lluvia o riego; la misma se hidroliza rápidamente a amonio, que es retenido por el complejo de intercambio siendo así menos susceptible a la volatilización.

Los factores de manejo principales son:

- **Dosis de nitrógeno (N).** Cuanto mayor es la dosis aplicada mayor va a ser la pérdida de N por volatilización, ya que hay mayor concentración de N en la superficie del suelo.
- **Rastrojo.** La presencia de residuos de plantas aumenta la actividad ureásica en los suelos (Hargrove, 1988) y hace más lenta la incorporación del fertilizante con las precipitaciones.



Varios trabajos en la región pampeana han evaluado el efecto de la dosis y la fuente de N sobre las pérdidas por volatilización (Sainz Rosas *et al.*, 1997; Barbieri *et al.*, 2005; Salvagiotti 2005; Fontanetto *et al.*, 2006; Ferraris *et al.*, 2009, 2015; Romano *et al.*, 2012).

En los gráficos se puede observar la típica curva de pérdida por volatilización, en donde el pico de pérdida de amoníaco ocurre entre los 2 ó 3 días después de la fertilización el cual se incrementa con la dosis (*Gráfico 1*) y la temperatura (*Gráfico 2*).

GRÁFICO 1: *Evaluación de las pérdidas por volatilización de amoníaco a partir de la urea, aplicada al maíz bajo SD. Campaña 2004-05.*

Fuente: Barbieri et al., 2005.

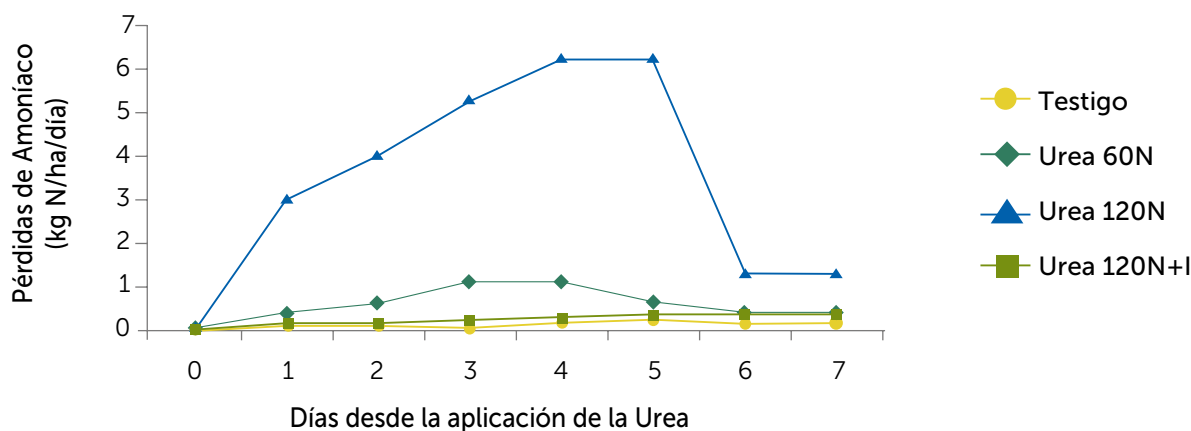
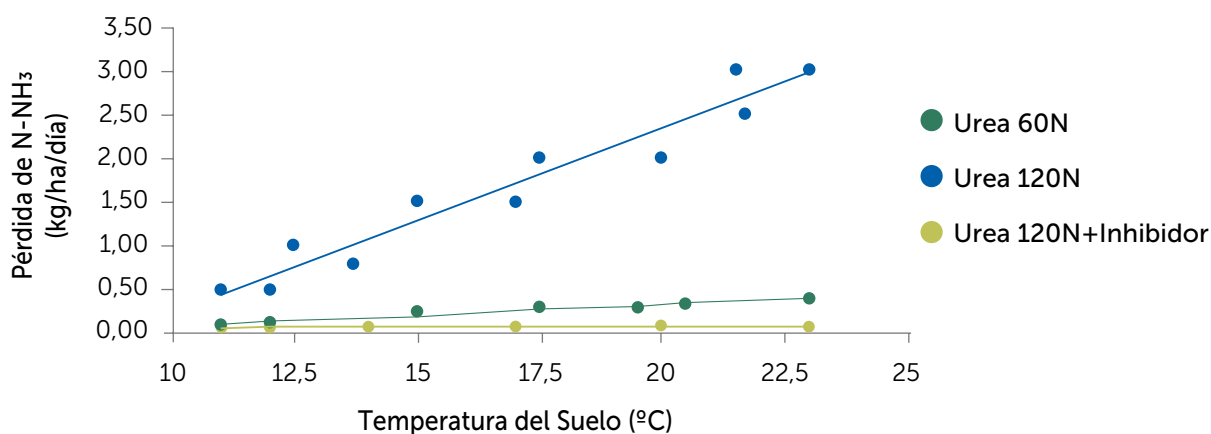


GRÁFICO 2: *Evaluación de las pérdidas por volatilización del amoníaco en el cultivo de maíz, a partir de diferentes dosis de urea según temperatura del suelo a 5 cm.*

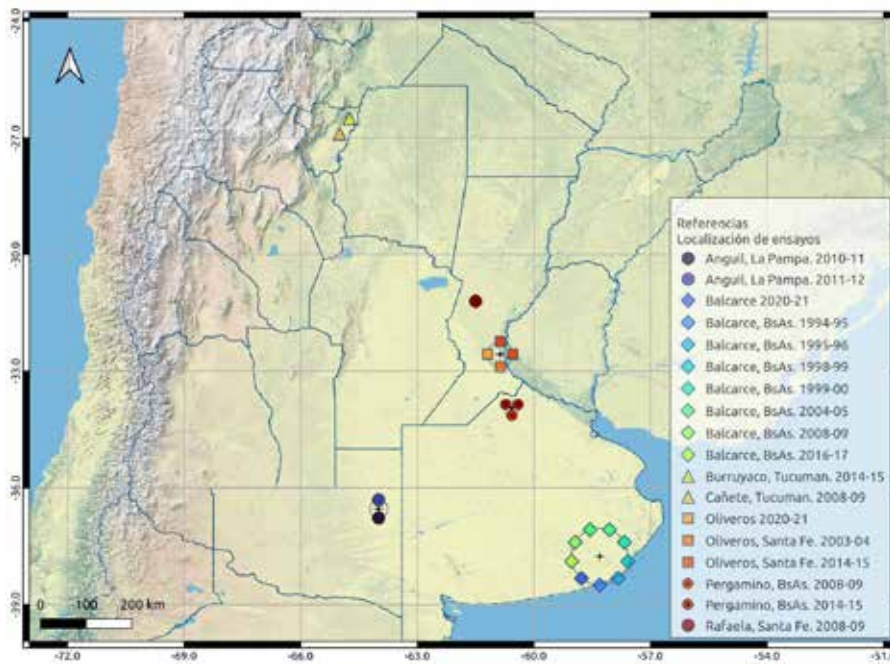
Fuente: Barbieri et al., 2005.



En un meta-análisis realizado en el 2022 (Toribio et al., 2023 en prensa) se evaluó el efecto de variables de suelo, clima y de manejo sobre las pérdidas de N-Urea por volatilización en maíz. La base de datos usada fueron 21 experimentos (Figura 3) en donde se midió volatilización de forma diaria utilizando un sistema estático semi-abierto (adaptado Nomnik, 1973).

FIGURA 3: *Meta-análisis sobre las pérdidas de N-Urea por volatilización en maíz.*

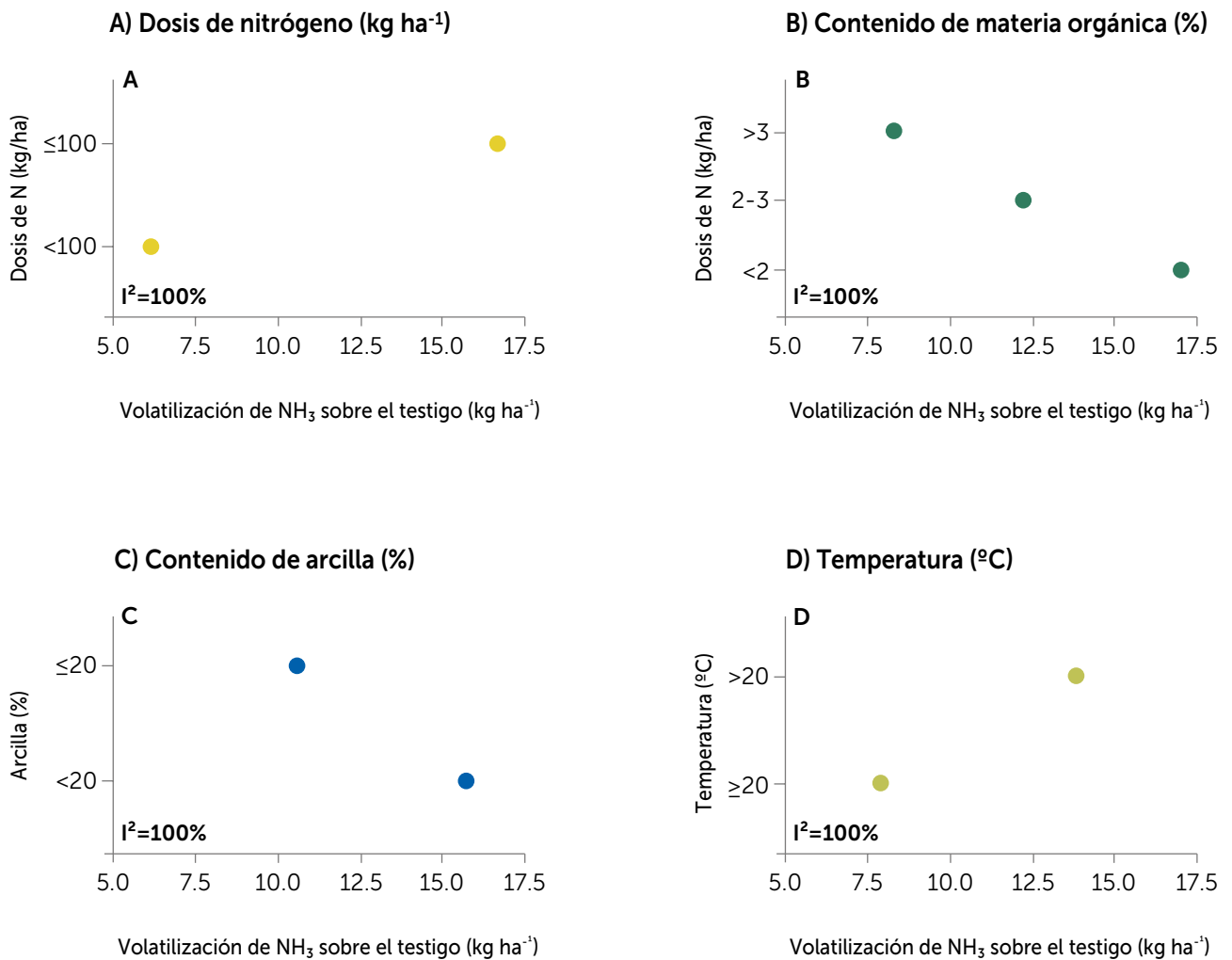
Fuente: Toribio et. al. (2023 en prensa).



Algunos de los resultados de este meta-análisis se observan en los siguientes gráficos (*Gráfico 3A, B, C y D*) en donde se evaluó las pérdidas de N por volatilización de amoníaco según condiciones de suelo (%arcilla y %MO), temperatura y dosis de N. Los resultados se re-transformaron a unidades de pérdida de N por volatilización respecto del tratamiento testigo (kg ha^{-1}).

GRÁFICO 3: Pérdidas de N por volatilización sobre el testigo en función de: A) dosis de nitrógeno, B) contenido de materia orgánica, C) contenido de arcilla (%) y D) temperatura post-aplicación.

Fuente: Toribio et al. (2023 en prensa).



Como se observa en **Gráfico 3A**, la dosis de N se dividió en 2 clases (<100 kg ha⁻¹ y ≥100 kg ha⁻¹), siendo importantes las pérdidas de N por volatilización cuando las dosis superaron los 100 kg ha⁻¹.

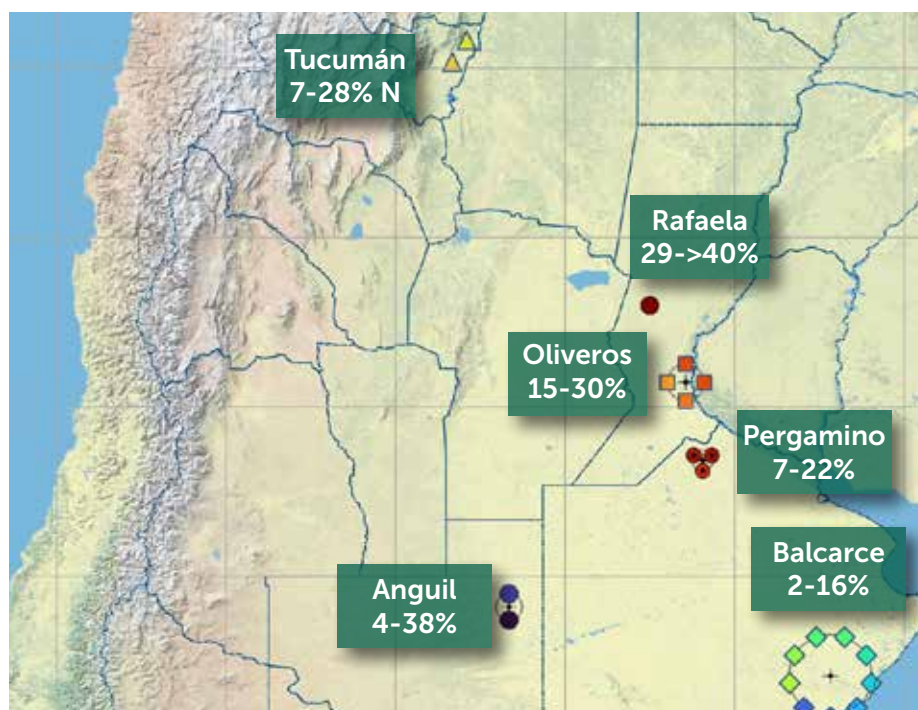
El contenido de MO fue dividido en 3 clases (<2%; 2-3% y >3%) (**Gráfico 3B**). Las pérdidas de N sobre el testigo fueron en promedio de 17,6, 12,5 y 8,6 kg ha⁻¹ para las clases <2, 2-3 y >3 % de MO, respectivamente. Estos resultados evidencian la importancia de la MO y su efecto amortiguador, sobre las pérdidas de N del sistema.

Respecto a la variable arcilla, la misma fue clasificada en dos clases (<20% y ≥20 %) (**Gráfico 3C**). Observándose que cuando el contenido de arcilla fue menor de 20% tuvo un efecto directo negativo con las pérdidas de N por volatilización.

Para las variables climáticas, la temperatura del aire fue dividida en dos clases (≤20 y >20°C). Se determinaron diferencias significativas en las pérdidas de nitrógeno por volatilización, siendo de 7,9 y 13,8 kg ha⁻¹ cuando la temperatura fue menor de 20 °C y mayor de 20°C, respectivamente (**Gráfico 3D**).

FIGURA 4: Pérdidas de N por volatilización del amoníaco (%) encontradas en ensayos de maíz según localización geográfica.

Fuente: adaptado de Toribio et al. (2023 en prensa).



En la **Figura 4** se muestran el rango de pérdidas de N por volatilización de amoníaco encontradas en diferentes ensayos de investigación en Argentina (Toribio et al., 2023 en prensa). Vemos claramente como los % de pérdidas varían y las localizaciones geográficas más proclives a pérdidas, corresponden a condiciones de mayor temperatura y humedad como en Oliveros, Tucumán y Rafaela y en donde los suelos son más arenosos y con menor CIC y MO como en Anguil.

INHIBIDORES DE LA UREASA

Las pérdidas de amoníaco por volatilización se reducen significativamente si la urea se incorpora inmediatamente al suelo tras su aplicación, bien por acción de maquinarias (sembradoras, incorporadoras), o por las precipitaciones o riego. No obstante, bajo muchas circunstancias esto no es posible. En ese caso, para reducir las emisiones de amoníaco los fertilizantes a base de urea se tratan con inhibidores de la ureasa (IU).

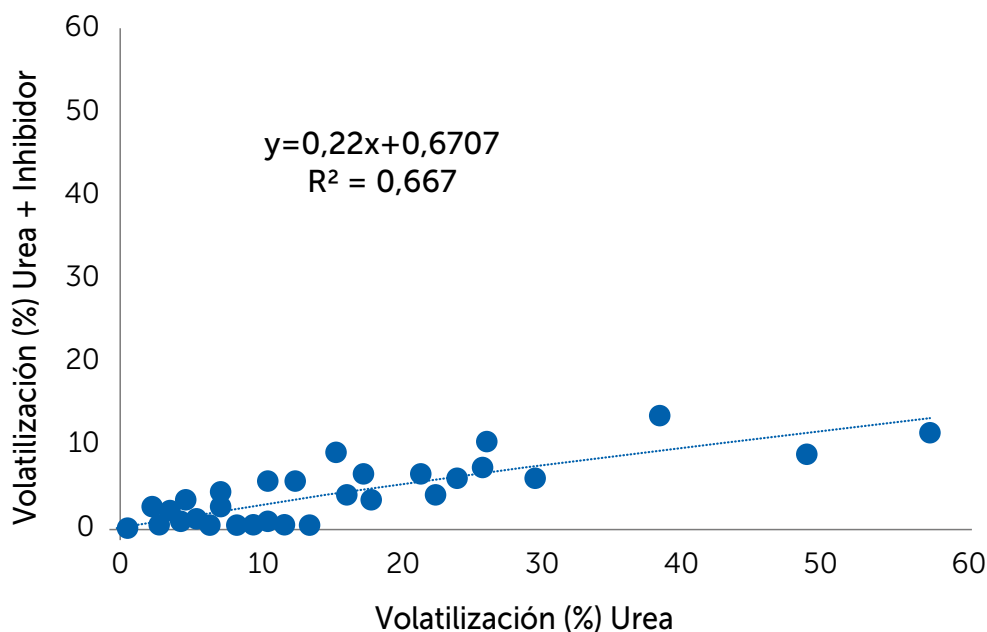
Varios trabajos han reportado que el uso de inhibidores que retardan o inhiben la hidrólisis de la urea son efectivos para reducir las

pérdidas de N por volatilización del amoníaco del fertilizante (Sainz Rozas et al., 1999; Barbieri et al., 2003, 2009; Ferraris et al., 2009; Silva et al., 2017; Toribio et al., 2023 en prensa).

En el **Gráfico 4** se presenta la relación entre las pérdidas de N por volatilización de la urea con y sin inhibidor expresadas en %. Se observa que el porcentaje de pérdida de NH_3 se reduce cerca del 70% cuando se utiliza la fuente con inhibidor de la ureasa. Es decir, que por cada 10% de pérdida de N por volatilización con Urea solo se pierde 3% si se emplea urea + inhibidor.

GRÁFICO 4: *Relación entre el porcentaje de pérdidas por volatilización de amoníaco de dos fuentes de N (Urea + Inhibidor y Urea).*

Fuente: adaptado de Toribio et al. (2023 en prensa).



CONSIDERACIONES FINALES

- El proceso de volatilización es un proceso natural de los suelos y una de las causas de disminución de la eficiencia de uso del N (EUN) de fertilizantes amoniacales como la urea.
- El % de pérdida por volatilización aumenta cuando tenemos condiciones de temperaturas $> 20^{\circ}\text{C}$, $\% \text{MO} < 3\%$, arcilla $< 20\%$, dosis de $\text{N} \geq 100 \text{ kg ha}^{-1}$ y sin precipitaciones o menores de 15 mm, dentro de los primeros días desde la aplicación en superficie de la urea.
- Considerando que la mayor proporción de los suelos de la Región Pampeana presentan valores de MO menores a 3% (Sainz Rozas et al., 2011) y que en Argentina el 52% de los maíces se realiza bajo planteos de siembra de segunda o tardía, con temperaturas a 20°C (ReTTA, 2021), es necesario considerar diferentes estrategias de manejo para reducir las pérdidas gaseosas de N del sistema y, por ende, maximizar la EUN.
- Es recomendable usar fuentes estabilizadas (con inhibidor de la ureasa) en aplicaciones en superficie y cuando las condiciones son propicias para el proceso de volatilización, ya que está comprobada su eficiencia.

BIBLIOGRAFÍA:

- Barbieri, P. A., Echeverría, H. E. y Sainz Rozas, H. (2003). Respuesta del cultivo de maíz bajo siembra directa a la fuente y al método de aplicación de nitrógeno. *Ciencia del Suelo* 21:18-23.
- Barbieri, P. A., Echeverría, H. E. y Sainz Rosas, H. (2005). Cuantificación de las pérdidas de nitrógeno por volatilización en el cultivo de maíz en función de la fuente, dosis y métodos de colocación del fertilizante. (Convenio INTA Balcarce - Profertil, 2005).
- Barbieri, P. A., Echeverría, H. E. y Sainz Rosas, H. (2009). Pérdidas de amoníaco por volatilización desde urea con inhibidor de la actividad ureásica y de la nitrificación en maíz bajo siembra directa. EEA INTA Balcarce. Datos inéditos.
- Chien, S. H., Prochnow, L. I., Cantarella, H. Chapter 8 recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. *Adv. Agron.* 2009, 102, 267–322.
- Ferraris, G. N., Couretot, L. A. y Toribio, M. (2009). Pérdidas de nitrógeno por volatilización y su implicancia en el rendimiento del cultivo de maíz: Efectos de fuente, dosis y uso de inhibidores. *Inf. Agron.* 43. *Int. Plant Nutr. Inst.*, Buenos Aires. p. 19–22.
- Ferraris, G. N., Toribio, M., Pitton, J. y Galetto, M. L. (2015). Fuentes nitrogenadas en maíces tempranos y tardíos: pérdidas de nitrógeno por volatilización y efectos sobre los rendimientos en Pergamino (Bs AS). EEA INTA Pergamino.
- Fontanetto, H. y Keller, O. (2006). Manejo de la fertilización en Maíz. Experiencias en la Región Pampeana Argentina. En: *Información Técnica de Cultivos de Verano. Campaña 2006. Publicación Miscelánea N° 106.* pp 85-113 INTA EEA Rafaela.
- Hargrove, W. L. (1988). Soil, Environmental, and management factors influencing ammonia volatilization under field conditions. In B. R. Bock and D. E. Kissel (ed.). *Bulletin Y-206. National Fertilizer Development Center, Tennessee Valley Authority, Muscle Shoals, Alabama.* 2:17-36.
- Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L. and Nelson, W.L. (1999) *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management.* 6th Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Kot, M., Zaborska, W. & Orlinska, K. (2001). Inhibition of jack bean urease by N-(n-butyl) thiophosphoric triamide and N-(n-butyl) phosphoric triamide: Determination of the inhibition mechanism. *J. Enzyme Inhib.* 16:507–516. doi:10.1080/14756360127569.
- Martens, D. A. & Bremner, J. M. (1989). Soil properties affecting volatilization of ammonia from soils treated with urea. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 20:1645–1657. doi:10.1080/00103628909368173.
- Nommik, H. (1973). The effect of pellet size on the ammonia loss from urea applied to forest soil. *Plant Soil.* 39:309-318.
- ReTAA. (2021). Relevamiento de Tecnología Agrícola Aplicada. Informe mensual N°51. Maíz 2020/21. Diciembre 2021. bolsadecereales.org/retaa ISSN 2591-4871.
- Romano N. y Bono, A. (2012). Pérdidas por volatilización y eficiencias de uso del nitrógeno en maíz tardío. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata 16 al 20 de abril de 2012.
- Sainz Rozas, H., Echeverría, H. E., Studdert, G. A. y Andrade, F. H. (1997). Volatilización de amoníaco desde urea aplicada al cultivo de maíz bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 15: 12-16.
- Sainz Rozas, H. R., Echeverría, H. E., Studdert, G. A. y Andrade, F. H. (1999). No-tillage corn nitrogen uptake and yield: effect of urease inhibitor and application time. *Agron. J.* 91: 950-955.
- Sainz Rozas, H. R., Echeverría, H. E., Angelini, H. P. (2011). Niveles de Carbono organico y pH en Suelos Agrícolas de las Regiones Pampeana y Extrapampeana. *Ciencia del Suelo*, 29 (1): 29-37, 2011.
- Salvaggiotti, F. (2005). Cuantificación de las pérdidas de nitrógeno por volatilización y su efecto en el rendimiento del cultivo de maíz. EEA INTA Oliveros. (Convenio INTA Oliveros - Profertil, 2003/04).
- Silva, A. G. B., Sequeira, C. H., Sermarini, R. A. & Otto, R. (2017). Urease Inhibitor NBPT on Ammonia Volatilization and Crop Productivity: A Meta-Analysis. *Review & Interpretation. Agron. J.* 109: 1-13.
- Toribio, M., Iglesias, P., Correndo, A., Wyngaard, N., Reussi Calvo, N. (2023). Factores determinantes de las pérdidas de nitrógeno por volatilización y su efecto sobre el rendimiento del maíz. *Rev. Ciencia del Suelo.* *Ciencia del Suelo*, 41 (2). En prensa.

