

## FACTORES DETERMINANTES DE LA VOLATILIZACIÓN DE AMONÍACO Y SU EFECTO SOBRE EL RENDIMIENTO DEL MAÍZ

Mirta Toribio<sup>1</sup>, María Paula Iglesias<sup>2\*</sup>, Adrián Correndo<sup>3</sup>, Nicolás Wyngaard<sup>2,4</sup>, Nahuel Reussi Calvo<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> Profertil S.A. Argentina

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Argentina

<sup>3</sup> Kansas State University. EEUU

<sup>4</sup> Centro Científico Tecnológico Conicet. Mar del Plata, Argentina

### RESUMEN

El proceso de volatilización es un mecanismo de pérdida de nitrógeno (N). Identificar y jerarquizar sus principales factores determinantes es esencial hacia una agricultura más sostenible en términos económicos y ambientales. Los objetivos del trabajo son: a) integrar información existente sobre las pérdidas por volatilización y su impacto sobre el rendimiento de maíz (*Zea mays* L.), b) jerarquizar los principales factores que controlan dichas pérdidas en Argentina y c) evaluar el efecto del inhibidor de la ureasa sobre las pérdidas de amoníaco (NH<sub>3</sub>), el rendimiento y la eficiencia agronómica de N (EAN). Para ello, se llevó a cabo una revisión sistemática que incluyó un total de 21 experimentos conducidos entre 1997 y 2021. Se utilizaron técnicas de análisis de senderos para examinar la ruta causal de los principales factores que controlan las pérdidas por volatilización y de meta-análisis para evaluar la magnitud del efecto de las variables de manejo y edafoclimáticas sobre las pérdidas por volatilización. La principal variable que presentó un efecto directo sobre las pérdidas fue la dosis de N aplicada ( $r=0,66$ ), mientras que el contenido de arcilla ( $r=-0,59$ ) resultó la variable edafoclimática más relevante. Además, se determinó un efecto indirecto y negativo del contenido de materia orgánica (MO) a través del contenido de arcilla ( $r=-0,39$ ), siendo el efecto directo de la MO de baja magnitud ( $r=-0,01$ ). Las mayores pérdidas de N por volatilización ocurrieron con dosis  $\geq 100$  kg N ha<sup>-1</sup>, contenido de MO  $< 20$  g kg<sup>-1</sup> y de arcilla  $< 200$  g kg<sup>-1</sup>, temperaturas  $> 20^{\circ}\text{C}$  y  $< 10$  días para precipitaciones mayores a 10 mm. El empleo de inhibidores de la ureasa redujo en un 73% las pérdidas de NH<sub>3</sub>, sin aumentar significativamente el rendimiento ni la EAN. Estos resultados brindan una base sólida sobre cuáles son los principales factores determinantes de las pérdidas por volatilización.

**Palabras clave:** N-amonio, eficiencia agronómica de nitrógeno, inhibidor de la ureasa.

## DETERMINANTS OF AMMONIA VOLATILIZATION LOSSES AND THEIR EFFECT ON MAIZE YIELD

### ABSTRACT

Volatilization is a process by which nitrogen (N) is lost. Identifying the main factors determining this process is essential for a more economically and environmentally sustainable agriculture. The objectives of this work were to: a) integrate existing information about volatilization losses and their effect on maize yield (*Zea mays* L.), b) identify the main factors that control such losses in Argentina, and c) evaluate the effect of urease inhibitor on ammonia volatilization, yield and nitrogen agronomic efficiency (NAE). A systematic review, including a total of 21 experiments carried out between 1997 and 2021, was performed. A path analysis was used to examine the causal pathway of the factors that determine N volatilization rates, and a meta-analysis was carried out to evaluate the magnitude of the effect of management and edaphoclimatic

\* Autor de contacto:  
nahuelreussicalvo@mdp.edu.ar

Recibido:  
08-08-23

Recibido con revisiones:  
06-10-23

Aceptado:  
06-10-23

variables on N volatilization. The main variable presenting a direct effect on ammonia losses was the N rate ( $r = 0.66$ ), while clay content ( $r = -0.59$ ) was the most relevant edaphoclimatic variable. An indirect and negative effect of organic matter (OM) was determined through the clay percentage ( $r = -0.39$ ), while the direct effect of OM presented a low magnitude ( $r = -0.01$ ). The highest N losses by volatilization occurred with N rates  $\geq 100 \text{ kg N ha}^{-1}$ , OM  $< 20 \text{ g kg}^{-1}$  and clay content  $< 200 \text{ g kg}^{-1}$ , temperature  $> 20^\circ\text{C}$  and  $< 10$  days of precipitations greater than 10 mm. The use of urease inhibitors reduced losses by 73%, without increasing yield or EAN. These results bring a solid foundation on which are the main determinants of volatilization losses.

**Keywords:** ammonium, nitrogen agronomic efficiency, urease inhibitor

## INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es el principal nutriente que limita el rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en Argentina. No obstante, la tasa de recuperación de dicho nutriente por parte de los cultivos durante la estación de crecimiento no supera el 50% del N aplicado (Herrera et al., 2016; Norton & Ouyang, 2019). Esto se debe a procesos de pérdidas por lavado de nitrato o en formas gaseosas que incluyen al amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y el óxido nitroso. El cultivo de maíz alcanza la máxima tasa de acumulación de N en el período que transcurre entre el estadio  $V_{5.6}$  (Ritchie & Hanway, 1982) y los 15-20 días después de floración (Russelle et al., 1983; Uhart & Andrade, 1995). Por lo tanto, retrasar las aplicaciones de N a momentos posteriores a la siembra, mejoraría la sincronización entre la oferta y la demanda de N (Sainz Rozas et al., 2004; Scharf et al., 2002) y disminuiría los riesgos de pérdidas de N por lavado y desnitrificación (Burzaco et al., 2013; Echeverría et al., 2015; Pawlick et al., 2019). Sin embargo, el incremento en la temperatura del suelo, en la medida que se demora el momento de aplicación, favorecería las pérdidas por volatilización de  $\text{NH}_3$ , disminuyendo la eficiencia de recuperación del fertilizante y, en consecuencia, el rendimiento del cultivo (Bonelli et al., 2018; Sainz Rozas et al., 1997).

La volatilización del  $\text{NH}_3$  es un mecanismo que ocurre naturalmente en todos los suelos y se incrementa por la aplicación en superficie de fertilizantes amoniacales como la urea (46-0-0). Las pérdidas de N por volatilización dependen de diversos factores edafoclimáticos, así como de manejo del cultivo y de las interacciones que ocurren entre ellos (Cantarella et al., 2018). Algunos de dichos factores son el pH, la capacidad buffer, la presencia de residuos de plantas (Hargrove, 1988), la capacidad de intercambio catiónico, el contenido de materia orgánica (MO) y la textura del suelo (Ernst et al. 1960; Fenn & Kissel 1974; Ferguson et al., 1984; Sainz Rozas et al., 1997). Se ha demostrado que valores de pH menores a 8 y/o suelos con mayor poder buffer, reducen las pérdidas por volatilización (Havlin et al., 1999). Por otra parte, según Martens and Bremner (1989), las pérdidas de  $\text{NH}_3$  se correlacionan de manera negativa con el contenido de MO, limo y arcilla, y directamente con el contenido de arena y el pH del suelo.

En cuanto a los factores ambientales que determinan la magnitud del proceso de volatilización de N, se destacan la temperatura y el contenido de humedad del suelo (Ernst et al., 1960; Fenn & Kissel, 1974; Sainz Rozas et al., 1997). Las pérdidas por volatilización son más elevadas cuando las temperaturas del suelo se incrementan en un rango de 10 a  $50^\circ\text{C}$  (Hargrove, 1988). Por otra parte, si la urea se incorpora en el perfil del suelo debido a una lluvia mayor a 10-15 mm (Craig & Wollum, 1982) o al riego, la misma se hidroliza rápidamente a amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), que es retenido por el complejo de intercambio siendo así menos susceptible a la volatilización (Holcomb et al., 2011; Kissel & Cabrera, 1988).

Diversos trabajos en la Región Pampeana Argentina (RP) han evaluado el efecto de la dosis y la fuente de N sobre las pérdidas por volatilización (Barbieri et al., 2005; Ferraris et al., 2009, 2015; Fontanetto et al., 2006; Romano y Bono, 2012; Sainz Rosas et al., 1997; Salvagiotti, 2005). En general, incrementos en las dosis de N aumentan las pérdidas de  $\text{NH}_3$  (Silva et al., 2017). Por lo tanto, una estrategia para reducir dichas pérdidas sería la incorporación de la urea por debajo de los rastros (Bandel et al., 1980; Fox et al., 1986; Howar & Tyler, 1989; Steker et al., 1993). Otra alternativa eficiente sería el empleo de productos que retarden o inhiban la hidrólisis de la urea (Barbieri et al., 2009; Sainz Rozas et al., 1999; Watson et al., 1994). Por lo tanto, el empleo de fertilizantes con inhibidores de la actividad de la enzima ureasa sería una estrategia eficiente para reducir las pérdidas (Silva et al., 2017), siendo variable el efecto sobre el rendimiento y la eficiencia agronómica de nitrógeno (EAN) de maíz (Barbieri et al., 2010; Sainz Rozas et al., 1997; Salvagiotti, 2005).

En Argentina, existen escasas revisiones de experimentos donde se integre información y se jerarquicen los principales factores edafoclimáticos y de manejo de N que gobiernan las pérdidas por volatilización y su

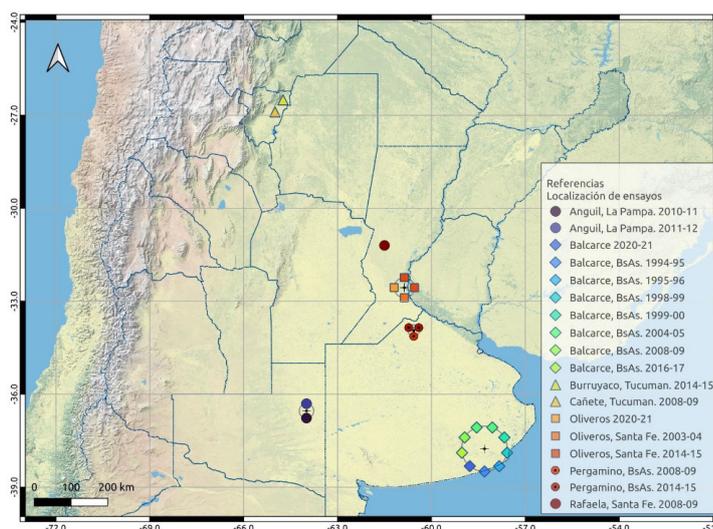
impacto en el rendimiento y la EAN en maíz. Además, las pérdidas por volatilización es uno de los procesos responsable de las emisiones indirectas de óxido nítrico (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable [MAyDS], 2022). Por lo tanto, contar con dicha información permitiría incluir en el cálculo de factores de emisión de gases de efecto invernadero aspectos de manejo (cultivo, labranza, fertilizante, dosis), condiciones edafoclimáticas locales y diferencias metodológicas de medición o diseño de los ensayos, que no son considerados por el IPCC (Said et al., 2023).

Los objetivos de este trabajo son: a) integrar la información existente sobre las pérdidas de N por volatilización y su impacto sobre el rendimiento del cultivo de maíz, b) jerarquizar los principales factores que controlan las pérdidas por volatilización en Argentina y c) evaluar el efecto del inhibidor de la ureasa sobre las pérdidas de N por volatilización, sobre el rendimiento de maíz y la EAN.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Revisión de experimentos y confección de base de datos

Se procedió al armado de una base de datos correspondientes a ensayos de fertilización con N en maíz. En primer lugar, se realizó la búsqueda de información a través del motor de búsqueda Scholar Google™. Se utilizaron distintas combinaciones de las palabras: maíz, nitrógeno, fertilización, inhibidores, región pampeana, Argentina. También se exploraron sitios web de instituciones como el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Instituto Internacional para la Nutrición de Plantas (IPNI), Fertilizar Asociación Civil, Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACs), y se sumó una base de datos (no publicada) de Profertil S.A. (Departamento Comercial - Área de Planeamiento Comercial y Desarrollo). La base de datos final consistió de un total de 21 experimentos desde 1997 hasta 2021 (Tabla 1 y Figura 1), los cuales cumplían con una serie de requisitos mínimos: 1) experimentos que hayan medido volatilización de  $\text{NH}_3$  de forma diaria utilizando un sistema estático semiabierto [adaptado del propuesto por Nommik (1973)], 2) contar con, al menos, dos niveles de tratamientos: un testigo o control, y un tratamiento fertilizado, 3) que la diferencia entre el tratamiento testigo o control respecto del/los tratamiento/s fertilizado/s, sólo incluya el nutriente en cuestión (N), 4) informar la dosis utilizada del nutriente evaluado, preferentemente acompañada del detalle de fuente, forma y/o momento de aplicación del fertilizante, 5) contar con un tratamiento que incluya la utilización de un inhibidor de la actividad ureásica, específicamente N-(n-butyl) tiamida tío fosfórica (NBPT), el cual es el principio activo más conocido en el mercado (Gioacchini et al., 2002; Upadhyay, 2012; Watson et al., 2009) y 6) contar con información relativa a la ubicación geográfica (*i.e.*, localidad, partido, coordenadas) y temporal (campaña) del ensayo. Por lo tanto, la base de datos incluyó características de los experimentos a través de variables relacionadas a suelo, clima, y prácticas de manejo del cultivo.



**Figura 1:** Distribución geográfica de los experimentos empleados para el análisis de las pérdidas de nitrógeno por volatilización en maíz.

**Figure 1:** Geographical distribution of the experiments used to evaluate nitrogen losses by volatilization in maize.

### Cálculos

Para cada sitio experimental se calculó la EAN según la siguiente ecuación:

**Ecuación 1**

$$EAN = \frac{\text{Rendimiento del tratamiento fertilizado (kg ha}^{-1}\text{)} - \text{Rendimiento del testigo (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Dosis de N del tratamiento fertilizado (kg ha}^{-1}\text{)}}$$

En base a las variables climáticas se calculó: a) temperatura media del aire durante los diez días post-fertilización ( $Temp_{10}$ ), b) suma de precipitaciones durante los 14 días desde la aplicación (Pp14) y c) días hasta eventos de precipitaciones mayores a 10 mm (Días Pp>10mm). Se calcularon los factores de volatilización según la metodología propuesta por Said et al. (2023), donde la volatilización acumulada de  $NH_3$  (kg N- $NH_3$  ha<sup>-1</sup>) se dividió por el total de N aplicado (kg N ha<sup>-1</sup>), resultado que se multiplicó por 100 para su expresión en porcentaje (%).

**Caracterización de base de datos**

El rango promedio de MO fue de 11 g kg<sup>-1</sup> a 56 g kg<sup>-1</sup>. Por su parte, el contenido de arcilla y el pH variaron de 20 g kg<sup>-1</sup> a 270 g kg<sup>-1</sup> y de 5,1 a 6,8, respectivamente. La  $Temp_{10}$  varió entre 12°C y 28°C, siendo la media de 21°C. Las Pp14 fueron variables, desde no presentar eventos hasta registrarse 38 mm a los 2 días de la fertilización. El rendimiento varió desde 3953 hasta 15400 kg ha<sup>-1</sup>, mientras que la EAN varió desde 1 hasta 88 kg grano kg N aplicado<sup>-1</sup>. Esto demuestra el amplio rango de condiciones edafoclimáticas y de rendimiento del cultivo explorado.

**Análisis estadísticos**

Selección de variables y análisis de senderos: mediante el análisis *Stepwise* se identificaron los principales factores que controlan las pérdidas por volatilización. Luego, se realizó un análisis de senderos para examinar la ruta causal de las variables seleccionadas, mediante el empleo del software InfoStat (Di Rienzo et al., 2020). Se calcularon los efectos directos e indirectos de las variables seleccionadas sobre las pérdidas por volatilización (Basta et al., 1993; Williams, Jones & Demmert, 1990). Para cuantificar la variación de volatilización no explicada por las variables, se calculó el residuo no correlacionado (U) a partir del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de la regresión múltiple entre la volatilización y las variables significativas (Ecuación 2).

**Ecuación 2:**

$$U = \sqrt{(1 - R^2)}$$

Meta-análisis: Las variables de interés fueron dosis de N, contenido de MO y arcilla, temperatura media durante los 10 días posteriores a la fertilización ( $Temp_{10}$ ), días hasta precipitaciones mayores a 10 mm luego de la fertilización (Días Pp>10mm) y rendimiento. Se definieron dos clases empleando como principal criterio de clasificación la mediana; excepto para el contenido de MO que se dividió en tres categorías según la distribución de valores. Las clases establecidas fueron <100 y ≥100 kg N ha<sup>-1</sup> para dosis de N y, ≤10,5 y >10,5 t ha<sup>-1</sup> para rendimiento. En cuanto a las variables edáficas, las mismas se dividieron en < 20, 20-30 y > 30 g kg<sup>-1</sup> para contenido de MO y en < 200 y ≥ 200 g kg<sup>-1</sup> para contenido de arcilla. Asimismo, las variables climáticas se clasificaron en dos clases, siendo estas para  $Temp_{10} \leq 20^\circ C$  y  $> 20^\circ C$  y para Días Pp>10 mm ≤ 10 días y > 10 días; las cuales se analizaron durante el período comprendido entre el día de la fertilización y el día 14 post fertilización. Tanto el nivel de corte utilizado para la clasificación de las variables climáticas como así también para el período de análisis se establecieron en base a Silva et al. (2017). A su vez, se calculó la heterogeneidad entre los estudios a partir de  $I^2$  (Higgins et al., 2003). Para el análisis estadístico de volatilización de  $NH_3$  los valores se expresaron a log-ratios (Hedges, 1999) y los resultados se re-transformaron a unidades de pérdida de N por volatilización respecto del tratamiento testigo (kg ha<sup>-1</sup>). El meta-análisis se llevó a cabo con el paquete metafor (Viechtbauer, 2010) en el software R (R Core Team, 2020).

Efecto de inhibidor: Para comparar la volatilización (%), el rendimiento y la EAN entre Urea y Urea + inhibidor se utilizó el siguiente modelo lineal bivariado:

*Ecuación 3:*

$$y = \beta_0 + \beta_1 x,$$

donde se asume que ambas  $x$  e  $y$  son variables aleatorias que siguen distribución normal con media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$ , y los parámetros  $\beta_0$  (ordenada al origen) y  $\beta_1$  (pendiente) describen una regresión de eje principal estandarizado (SMA por sus siglas en inglés), (Warton et al., 2006). La pendiente y ordenada al origen fueron comparadas con test  $t$  de Student para evaluar el efecto del inhibidor sobre la volatilización (%), el rendimiento y la EAN. La igualdad del intercepto y la pendiente a cero y uno, respectivamente, fue probado a través de test  $t$ . Las regresiones alométricas se obtuvieron mediante el paquete *smart* (Warton et al., 2006) para el software R.

**Tabla 1:** Resumen de estudios empleados para el análisis de la volatilización de NH<sub>3</sub> y rendimiento (Rto) de maíz utilizando urea y urea + inhibidor de la actividad ureasa. As: arcilla, MO: materia orgánica, Vol: volatilización, U: urea, UI: urea con inhibidor. S: siembra, V<sub>3</sub>: tres hojas desarrolladas, V<sub>6</sub>: seis hojas desarrolladas.

**Table 1:** Description of experimental data to evaluate nitrogen losses by volatilization and maize yield (Rto) using urea and urea + urease inhibitor. As: clay, MO: organic matter, Vol: volatilization, U: urea, UI: urea with inhibitor, S: sowing, V<sub>3</sub>: third leaf stage, V<sub>6</sub>: sixth leaf stage.

N°	Referencia	Localidad	Año	Suelo	Fuente	Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )	Momento	As (g kg <sup>-1</sup> )	MO (g kg <sup>-1</sup> )	pH	Disponibilidad de datos	
											Rto	Vol
1	Sainz Rozas et al. (1997)	Balcarce, Bs As.	1994	Argiudol típico	U, UI	70, 140	S y V <sub>6</sub>	230	56	5,8		x
2	Sainz Rozas et al. (1997)	Balcarce, Bs As.	1995	Argiudol típico	U, UI	70, 140, 210	S y V <sub>6</sub>	230	56	5,8		x
3	Sainz Rozas et al. (1999)	Balcarce, Bs As.	1998	Paleudol Petrocalcico	U	70	S	300	59	5,9	x	x
4	Sainz Rozas et al. (1999)	Balcarce, Bs As.	1999	Paleudol Petrocalcico	U	70	S	300	59	5,9	x	x
5	Salvagiotti (2005)	Oliveros, Santa Fe.	2003	Argiudol típico	U	60, 120	V <sub>6</sub>	220	24	5,3	x	x
6	Barbieri et al. (2005)	Balcarce, Bs As.	2004	Argiudol típico	U, UI	60, 120	V <sub>6</sub>	230	49	5,6	x	x
7	Barbieri et al. (2005)	Balcarce, Bs As.	2004	Argiudol típico	Urea	60, 120	V <sub>6</sub>	230	49	5,6	x	x
8	Fontanetto et al. (2010)	Rafaela, Santa Fe.	2008	Argiudol típico	U, UI	60, 120	V <sub>6</sub>	270				
9	Sanchez (2009)-IP	Cañete, Tucumán.	2008	Haplustol típico	U, UI	60, 120	V <sub>6</sub>	130	21	6,2	x	x
10	Barbieri et al. (2009)-IP	Balcarce, Bs As.	2008	Argiudol típico	U, UI	60, 120	V <sub>6</sub>	230	54	5,7	x	x
11	Ferraris et al. (2009)	Pergamino, Bs As.	2008	Argiudol típico	U, UI	60, 120	V <sub>6</sub>	230	25	5,8	x	x
12	Bono et al. (2011)	Anguil, La Pampa.	2010	Haplustol entico	U, UI	50, 100	V <sub>6</sub>	70	11	6,1	x	x
13	Andrada y Elizalde (2013)	Anguil, La Pampa.	2011	Ustipsament típico	U, UI	50, 100	V <sub>6</sub>	20	13	6,8	x	x
14	Salvagiotti (2015)-IP	Oliveros, Santa Fe.	2014	Argiudol típico	U, UI	60, 120	V <sub>6</sub>	220	22	5,2	x	x
15	Salvagiotti (2015)-IP	Oliveros, Santa Fe.	2014	Argiudol típico	U, UI	60, 120	V <sub>6</sub>	220	19	5,1	x	x
16	Romero (2015)-IP	Burruyaco, Tucumán.	2014	Ustortentes típicos	U, UI	30, 70	V <sub>6</sub>	200	33	6,4	x	x
17	Ferraris et al. (2015)-IP	Pergamino, Bs As.	2014	Argiudol típico	U, UI	60, 120	V <sub>6</sub>	230	29	5,8	x	x
18	Ferraris et al. (2015)-IP	Pergamino, Bs As.	2014	Argiudol típico	U, UI	60, 120	V <sub>6</sub>	230	34	5,5	x	x
19	Barbieri et al. (2018)	Balcarce, Bs As.	2016	Paleudol Petrocalcico	U	60, 120	V <sub>3</sub> , V <sub>6</sub>	300	53	5,6	x	x
20	Reussi Calvo et al. (2021)-IP	Balcarce, Bs As.	2020	Argiudol típico	U, UI	50, 100	V <sub>6</sub>	230	53	5,5	x	x
21	Salvagiotti (2021)-IP	Oliveros, Santa Fe.	2020	Argiudol típico	U, UI	50, 100	V <sub>6</sub>	220	27	5,8	x	x

IP = informe de Profertil.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Factores determinantes de las pérdidas de nitrógeno por volatilización

El porcentaje de pérdida de  $\text{NH}_3$  varió entre 0 y 57% (0 a  $38 \text{ kg ha}^{-1}$ ), ubicándose dentro del rango citado en la bibliografía internacional (Cantarella et al., 2018; Silva et al., 2017). Resultados similares fueron reportados por Said et al. (2023), quienes determinaron factores de volatilización entre 0 y 33,6 % para Argentina. En promedio, el factor de volatilización fue del 8%; valor inferior al propuesto por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2019) para urea (50%).

El análisis de senderos explicó el 77% de la variación de la pérdida de N por volatilización de  $\text{NH}_3$  ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), con un U igual a 0,47. Los coeficientes de dicho análisis indicaron que 4 de las 6 variables predictoras tuvieron efectos significativos sobre las pérdidas de N (Tabla 2).

La principal variable que presentó un efecto directo y positivo sobre las pérdidas por volatilización fue la dosis de N aplicada ( $r= 0,66$ ). Es decir que, a mayor dosis de N, mayor fue la volatilización del  $\text{NH}_3$ . A su vez, se determinó un efecto indirecto (fuera de la diagonal) y positivo ( $r= 0,34$ ) a través del rendimiento (Tabla 2). Esto indica que ambientes con mayores rendimientos, debido al empleo de dosis superiores de N, presentan mayores pérdidas de  $\text{NH}_3$ , lo cual coincide con estudios previos (Barbieri et al., 2003; Fontanetto et al., 2010; Sainz Rosas et al., 1997).

Dentro de las variables de suelo, el principal efecto fue del contenido de arcilla ( $r= -0,59$ ), siendo este directo y negativo (Tabla 2), por lo que, a mayor contenido de arcilla, menores son las pérdidas. Además, se determinó un efecto indirecto y negativo del contenido de MO a través del contenido de arcilla ( $r= -0,39$ ), siendo el efecto directo de la MO de baja magnitud ( $r= -0,01$ ). Dicha correlación negativa entre la volatilización de  $\text{NH}_3$  y el porcentaje de arcilla y de MO fue informada por Martens and Bremner (1989), quienes, además, detectaron una correlación positiva con el contenido de arena y pH. No obstante, Vahed et al. (2011) determinaron una mayor actividad ureásica en suelos con elevado contenido de carbono. A su vez, el mayor contenido de MO y arcilla se asocia a una mayor capacidad de intercambio catiónico lo cual incrementa la capacidad del suelo para retener al  $\text{NH}_4^+$  producido por la hidrólisis de la urea, y en consecuencia, se reducen las pérdidas por volatilización (Sunderlage & Cook, 2018).

Por último, respecto a las variables climáticas, sólo la temperatura media durante los 10 días posteriores a la fertilización presentó un efecto directo y positivo ( $r= 0,18$ ) sobre las pérdidas de N (Tabla 2). Se han reportado aumentos en las pérdidas de N por volatilización frente a incrementos en la temperatura media (Hargrove, 1988; Romano et al., 2012), siendo  $40^\circ\text{C}$  la temperatura óptima para la máxima actividad ureásica (Kissel & Cabrera, 1988). Por su parte, Sainz Rozas et al. (1997) determinaron un aumento en las pérdidas de  $0,24 \text{ kg N-NH}_3 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$  por cada  $1^\circ\text{C}$  de aumento de la temperatura media del suelo. Además, se ha observado un incremento en la tasa de disolución de la urea ante aumentos en la temperatura (Wahl et al., 2006) y un efecto sobre la disociación del  $\text{NH}_4^+$  en la solución del suelo (Kissel et al., 2008).

Para cada una de las clases en las cuales se clasificaron las variables analizadas se determinó el índice  $I^2$ , el cual indica la proporción de la variación entre estudios respecto de la variación total, es decir, la proporción de la variación total que es atribuible a la heterogeneidad (Tabla 3). Higgins et al. (2003), categorizaron el  $I^2$  como bajo, moderado y alto en valores del 25%, 50% y 75%, respectivamente. En el presente trabajo, sólo para el contenido de arcilla la heterogeneidad fue menor al 25%, lo cual sugiere que hay una mayor inconsistencia del efecto entre los grupos testeados respecto a las demás variables. No obstante, el  $I^2$  es sólo informativo y no es un criterio de selección.

**Tabla 2:** Efecto directo (diagonal) e indirecto (fuera de la diagonal) de variables edafoclimáticas y agronómicas sobre las pérdidas de nitrógeno por volatilización (kg ha<sup>-1</sup>).

**Table 2:** Direct (diagonal) and indirect (off diagonal) effect of edaphoclimatic and agronomic variables on N losses by volatilization (kg ha<sup>-1</sup>).

	Dosis N	Arcilla	MO	Temp <sub>10</sub>	Días Pp > 10mm	Rendimiento	r	R <sup>2</sup> <sub>ajustado</sub>	U
Dosis N	0,66	0,03	<0,01	0,01	-0,07	-0,12	0,51*	0,77	0,47
Arcilla	-0,03	-0,59	<-0,01	-0,06	0,08	-0,02	-0,63*		
MO	-0,01	-0,39	-0,01	-0,13	0,04	-0,01	-0,51*		
Temp <sub>10</sub>	0,03	0,19	<0,01	0,18	-0,05	-0,02	0,34#		
Días Pp > 10mm	-0,14	-0,14	<-0,01	-0,03	0,33	-0,02	<-0,01		
Rendimiento	0,34	-0,06	<-0,01	0,01	0,03	-0,23	0,09		

\*Significativo al p<0,05. #Significativo al p<0,10.

**Tabla 3:** Resumen del meta-análisis para pérdidas de N por volatilización.

**Table 3:** Meta-analysis of N volatilization losses.

Variable	Clase	N° Observac.	Volatilización testigo	Volatilización sobre testigo	IC <sub>LI 95%</sub>	IC <sub>LS 95%</sub>
			----- (kg ha <sup>-1</sup> ) -----			
<b>Dosis de N (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	< 100	26	0,5	6,2	6,1	6,3
	≥ 100	23	0,5	16,7	16,5	16,9
<b>Materia Orgánica (g kg<sup>-1</sup>)</b>	< 20	3	0,2	17,0	16,3	17,6
	20-30	6	1,1	12,2	11,8	12,5
	> 30	13	0,4	8,3	8,1	8,6
<b>Arcilla (g kg<sup>-1</sup>)</b>	< 200	3	0,8	15,7	15,3	16,2
	≥ 200	20	0,5	10,6	10,2	11,0
<b>Temp<sub>10</sub> (°C)</b>	≤ 20	10	0,4	7,9	7,6	8,2
	> 20	13	0,6	13,8	13,3	14,4
<b>Días Pp &gt;10 mm</b>	≤ 10	15	0,5	12,1	11,6	12,5
	> 10	8	0,6	9,3	9,0	9,6
<b>Rendimiento (t ha<sup>-1</sup>)</b>	≤ 10.5	45	0,9	12,0	11,5	12,5
	> 10.5	14	0,3	11,0	10,3	11,7

IC = intervalo de confianza; LI = límite inferior; LS = límite superior.

Para cada variable analizada se observaron diferencias significativas en las pérdidas de N por volatilización entre clases, excepto cuando se analizó el rendimiento (Tabla 3). En cuanto a los factores de manejo, las pérdidas de N por volatilización fueron de 6,2 y 16,7 kg ha<sup>-1</sup> para las dosis <100 y ≥100 kg N ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Tabla 3). Es válido mencionar que la dosis media de N utilizada en maíz en Argentina es de 71 kg N ha<sup>-1</sup> (Relevamiento de Tecnología Agrícola Aplicada [ReTAA], 2021), lo cual implicaría una baja pérdida de N del sistema por volatilización.

Las pérdidas de N sobre el testigo fueron en promedio de 17,6, 12,5 y 8,6 kg ha<sup>-1</sup> para las clases < 20, 20-30 y > 30 g kg<sup>-1</sup> de MO, respectivamente (Tabla 3). Estos resultados evidencian la importancia de la MO y su efecto amortiguador sobre las pérdidas de N del sistema (Kissel et al., 2008). No obstante, la mayoría de los suelos de la RP presentan menos del 3% de MO (Sainz Rozas et al., 2011), por lo tanto, es necesario implementar estrategias de manejo que reduzcan las pérdidas gaseosas de N del sistema y, por ende, maximicen la EAN.

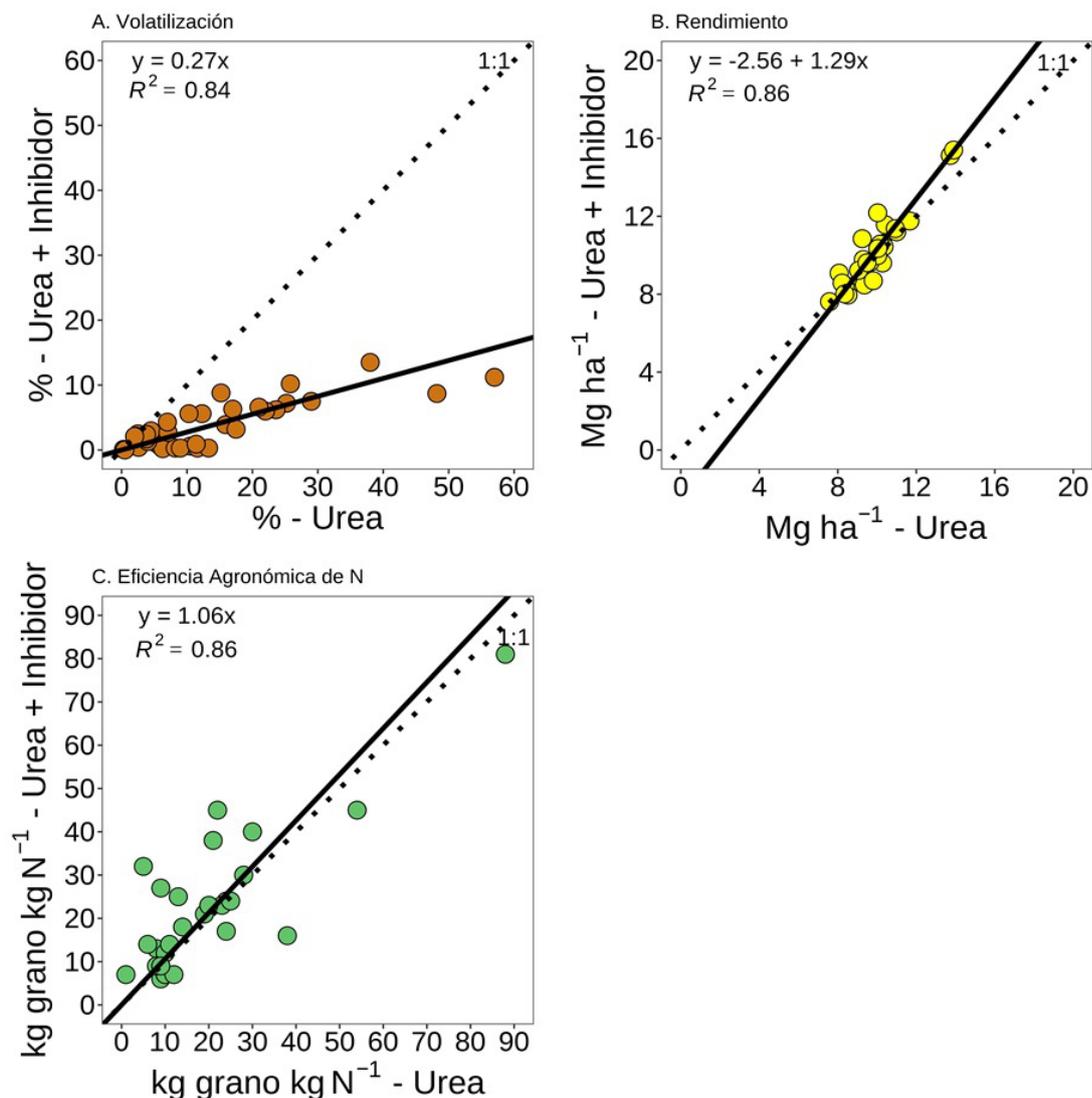
Respecto a la variable arcilla, las pérdidas promedio de N por volatilización fueron de 15,7 y 10,6 kg ha<sup>-1</sup> para las clases < 200 g kg<sup>-1</sup> y ≥ 200 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Tabla 3). Este resultado coincide con el análisis de senderos en donde el contenido de arcilla tuvo un efecto directo negativo con las pérdidas de N por volatilización. Se han determinado mayores respuestas a N en rendimiento y EAN en suelos de clase textural fina respecto a suelos de textura gruesa (Correndo et al., 2021), mientras que Chivenge et al. (2011) y Tremblay et al. (2012, 2015) reportaron mayores respuestas a N en los suelos de textura fina en comparación con texturas media y gruesa.

Para las variables climáticas, las pérdidas de N por volatilización fueron de 7,9 y 13,8 kg ha<sup>-1</sup> con temperaturas menores o iguales a 20 °C y mayores 20°C, respectivamente (Tabla 3). Es válido remarcar que en Argentina el 52% de la producción de maíz se realiza bajo planteos de siembra de segunda o tardía, con temperaturas mayores a 20°C (ReTAA, 2021), lo cual representa una condición predisponente para la pérdida de N del sistema. Para la variable "Días Pp>10 mm", las pérdidas de N por volatilización sobre el testigo variaron entre 12,1 y 9,3 kg ha<sup>-1</sup> para la clase ≤ 10 días y > 10 días, respectivamente (Tabla 3). Se ha observado que precipitaciones de 14 mm afectaban la emisión de NH<sub>3</sub>. No obstante, Van Der Weerden and Jarvis (1997) en un ensayo con pasturas y suelos de diferente textura, observaron que cuando el evento ocurrió 3 días post-aplicación el total de pérdida alcanzó el 20%, lo cual se explicaría por la hidrólisis de gran parte de la urea. En cambio, en sistemas forestales, Craig and Wollum (1982), determinaron que precipitaciones menores a 15 mm favorecían las pérdidas por volatilización debido a un incremento en la tasa de hidrólisis de la urea. En síntesis, las pérdidas por volatilización se relacionaron no sólo con la cantidad de precipitaciones sino también con el tiempo transcurrido desde la aplicación del fertilizante hasta que ocurre la precipitación. No obstante, es válido mencionar que el contenido de agua del suelo al momento de la aplicación del fertilizante es otro factor que afecta la difusión de la urea y el contacto de la misma con la enzima ureasa (Vlek & Carter, 1983).

Para finalizar, el rendimiento del cultivo se dividió en 2 clases (>10,5 y ≤10,5 t ha<sup>-1</sup>), siendo no significativa la diferencia (Tabla 3). En general, se observan menores pérdidas en ambientes de mayor potencial de rendimiento, los cuales se caracterizan por una mayor demanda de N durante todo el ciclo del cultivo y, por ende, se ve reflejado en aumentos en la EAN (Correndo et al., 2021; Salvagiotti et al., 2011). Una mayor EAN se asocia a menores pérdidas totales de N del sistema (Sainz Rozas et al., 2004).

#### Inhibidor de la ureasa

En la Figura 2 A se presenta la relación entre las pérdidas de N por volatilización de la urea con y sin inhibidor expresadas en porcentaje. Las pérdidas de NH<sub>3</sub> se redujeron en un 73% cuando se utilizó una fuente con inhibidor de la actividad ureásica. La pendiente de la ecuación indica que, por cada 1 % de pérdida de N por volatilización con urea, sólo se pierde 0,27 % si se emplea el inhibidor. Similar tendencia se observó cuando las pérdidas se expresaron en kg ha<sup>-1</sup> ( $y = -0,48 + 0,31x$ ;  $R^2 = 0,60$ ;  $p$ -valor < 0,001). En promedio, las pérdidas fueron de 11,7 y 2,8 kg N ha<sup>-1</sup> para urea sin y con inhibidor, respectivamente. Estos resultados confirman que dichos inhibidores son efectivos para reducir las pérdidas de N por volatilización del NH<sub>3</sub> del fertilizante (Barbieri et al., 2003; Ferraris et al., 2009; Sainz Rozas et al., 1999; Watson et al., 1994).



**Figura 2:** Relación entre A) el porcentaje de pérdidas por volatilización, B) el rendimiento y C) la eficiencia agronómica de nitrógeno con y sin inhibidor (Urea + Inhibidor y Urea). La línea punteada indica la relación 1:1.

**Figure 2:** Association between A) percentage of volatilization losses, B) yield, and C) nitrogen agronomic efficiency observed with or without inhibitor (urea + inhibitor and urea). The dashed line indicate 1:1 relation.

El rendimiento promedio del cultivo de maíz fertilizado con urea fue de 10430 kg ha<sup>-1</sup> y urea con inhibidor de 10981 kg ha<sup>-1</sup>, siendo la diferencia no significativa ( $p > 0,05$ ). Sin embargo, la relación entre fuentes mostró como tendencia mayores rendimientos con el empleo del inhibidor en ambientes de mayor potencial ( $p < 0,05$ ) (Figura 2 B). En cultivos de maíz tardío, el empleo del inhibidor redujo un 13% las pérdidas por volatilización en aplicaciones superficiales de urea, sin embargo, no afectó el rendimiento (Zubillaga et al., 2021). Asimismo, Silva et al. (2017), determinaron incrementos en rendimiento promedio de un 5,3%, en los tratamientos con urea + inhibidor comparado con los tratamientos con urea. Esta tendencia fue observada para la mayoría de las clases texturales, contenidos de MO y dosis de N.

Para finalizar, la EAN fue en promedio de 19 y 22 kg kg<sup>-1</sup> para el tratamiento con urea y urea con inhibidor, respectivamente. Si bien se observó un aumento del 6% en la EAN, respectivamente; el mismo no fue significativo ( $p > 0.05$ ) (Figura 2 C). Por lo tanto, la utilización de inhibidores de la volatilización brinda una herramienta de manejo adicional a las ya conocidas (incorporación mecánica, proximidad de lluvias, etc.), ampliando el espectro de fuentes nitrogenadas que pueden utilizarse en forma segura y confiable (Bono y Romano, 2011; Ferraris et al., 2009, 2015).

## CONCLUSIONES

La principal variable que afectó la magnitud de las pérdidas de N por volatilización fue la dosis de N aplicada. No obstante, el porcentaje de arcilla fue la variable edafoclimática que reguló en mayor medida las pérdidas. Si bien el empleo de inhibidores de la actividad ureásica redujo las pérdidas de N por volatilización, el mismo no afectó significativamente el rendimiento ni la EAN. Los resultados del presente trabajo permitieron identificar los principales factores determinantes de las pérdidas por volatilización en la Región Pampeana, lo cual contribuye al desarrollo de estrategias de fertilización que minimicen dicho proceso de pérdida.

## REFERENCIAS

- Bandel, V. A., Dzenia, S. & Stanford, G. (1980). Comparison of fertilized for no-till corn. *Agronomy Journal*, 72, 37-341.
- 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). <https://www.profertil.com.ar/wp-content/uploads/2020/08/cuantificacion-de-las-perdidas-de-nitrogeno-por-volatilizacion-y-su-efecto-sobre-el-cultivo-de-maiz-desde-urea-de-liberacion-controlada-2004-5.pdf>
- 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.
- Basta, N. T., Pantone, D. J. & Tabatabai, M. A. (1993). Path analysis of heavy metal adsorption by soil. *Agronomy Journal*, 85, 1054-1057. <https://doi.org/10.2134/agronj1993.00021962008500050018x>
- Bonelli, L. E., Sainz Rozas, H., Echeverría, H. y Barbieri, P. (2018). Fuente y momento de aplicación de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en Balcarce. *Ciencia del Suelo*, 36(1), 88-98.
- Bono, A. y Romano, N. (2011). Evaluación de pérdidas de N-NH<sub>3</sub> por volatilización y rendimiento en maíz utilizando distintas fuentes nitrogenadas en la región semiárida pampeana. EEA INTA Anguil.
- Bono, A. & Álvarez, R. (2012). Nitrogen mineralization in a coarse soil of the semi-arid Pampas of Argentina. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59(2), 1-14. DOI:10.1080/03650340.2011.625413.
- Burzaco, J. P., Smith, D. R., & Vyn, T. J. (2013). Nitrous oxide emissions in Midwest US maize production vary widely with band-injected N fertilizer rates, timing and nitrapyrin presence. *Environmental Research Letters*, 8, 035031. DOI: 10.1088/1748-9326/8/3/035031.
- Cantarella, H., Otto, R., Rodrigues Soares, J. & Gomes de Brito Silva, A. (2018). Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: A review. *Journal of Advanced Research*, 13, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2018.05.008>
- Chivenge, P., Vanlauwe, B. & Six, J. (2011). Does the combined application of organic and mineral nutrient sources influence maize productivity? A meta-analysis. *Plant and Soil*, 342(1-2), 1–30. <http://doi.org/10.1007/s11104-010-0626-5>
- Correndo, A. A., Gutiérrez-Boem, F. H., García, F. O., Álvarez, C., Álvarez, C., Angeli, A., Barbieri, P., Barraco, M., Berardo, A., Boxler, M., Calviño, P., Capurro, J. E., Carta, H., Caviglia, O., Ciampitti, I. A., Díaz-Zorita, M., Díaz-Valdéz, S., Echeverría, H. E., Espósito, G., ..., Salvagiotti, F. (2021). Attainable yield and soil texture as drivers of maize response to nitrogen: A synthesis analysis for Argentina. *Field Crops Research*, 273, 108299. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108299>.
- Craig, R. & Wollum, A. G. (1982). Ammonia volatilization and soil nitrogen changes after urea and ammonium nitrate fertilization of Pinus-taeda (L). *Soil Science Society of America Journal*, 4, 409-414. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600020040x>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C. W. (2020). InfoStat versión 2020. (Centro de Transferencia InfoStat, Facultad de Ciencias Agrarias FCA, Universidad Nacional de Córdoba: Córdoba, Argentina). Available at: <http://www.infostat.com.ar> [Verified 5 May 2020].
- Echeverría, H. E. y Sainz Rozas, H. R. (2015). Nitrógeno. En: Echeverría, HE y FO García (eds.) 2ª edición. *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. (pp. 189-228). INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Ernst, J. W. & Massey, J. F. (1960). The effects of several factors on volatilization of ammonia formed from urea in the soil. *Soil Science Society of America. Proc.* 24, 87-90.
- Fenn, L. B. & Kissel, D. E. (1974). Ammonia volatilization from surface applications of ammonia compounds on calcareous soils: II. Effects of temperature and rate of ammonia nitrogen applications. *Soil Science Society of America. Proc.* 38, 606-610.
- Ferguson, R. B., Kissel, D. E., Koelliker, J. K. & Basel, W. (1984). Ammonia volatilization from surface-applied urea: Effect of hydrogen ion buffering capacity. *Soil Science Society of America Journal*, 2, 578-582. DOI: 10.2136/sssaj1984.03615995004800030022x
- 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. *Informaciones Agronómicas. Int. Plant Nutr. Inst.*, Buenos Aires. 43, 19-22.
- Ferraris, G. N., Elias, G. y Galetto, M. L. (2014). Pérdidas de Nitrógeno por Volatilización en Maíces Tardíos en Pergamino (Bs As). Efectos de Fuente y Dosis. En. *Actas MAIZ HD - X Congreso Nacional de Maíz. Comisión 3. Suelos y Fertilización*. Rosario, septiembre de 2014.

- 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.
- Fontanetto, H., Gambaudo, S., Keller, O., Albrecht, J., Gailevra, D., Negro, C., Belotti, L. y Boschetto, H. (2010). Efecto de un inhibidor de la ureasa sobre la fertilización nitrogenada en Maíz de segunda. Publicación Miscelánea N° 118. INTA EEA Rafaela.
- Fox, R. H., Kern, J. M. & Piekielek, W. P. (1986). Nitrogen fertilizer source, and method and time of application effects on no-till corn yield and nitrogen uptake. *Agronomy Journal*, 78, 741-746.
- Fox, R. H. & Piekielek, W. P. (1993). Management and urease inhibitor effect on nitrogen use efficiency in no-till corn. *Journal of Production Agriculture*, 6, 195-200. DOI: 10.2134/jpa1993.0195
- Gioacchini, P., Natri, A., Marzadori, C., Giovannini, C., Antisari, L. V. & Gessa, C. (2002). Influence of urease and nitrification inhibitors on N losses from soils fertilized with urea. *Biology and Fertility of Soils*, 36, 129–135. DOI:10.1007/s00374-002-0521-1.
- 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., Tisdale, S. L., Nelson, W. L. & Beaton, J. D. (2016). *Soil Fertility and Fertilizers*, 8th edition. Editorial: PEARSON.
- Hedges, L. V., Gurevitch, J. y Curtis, P. S. (1999). The Meta-Analysis of Response Ratios in Ecology. *Ecology*, 80, 1150–1156.
- Herrera, J. M., Rubio, G., Häner, L. L., Delgado, J. A., Lucho-Constantino, C. A., Islas-Valdez, S. & Pellet, D. (2016). Emerging and established technologies to increase nitrogen use efficiency of cereals. *Agronomy*, 6 (2) (25), 1-19. DOI: 10.3390/agronomy6020025.
- Higgins, J. P. T., Thompson, S. G., Deeks, J. J. & Altman, D. G. (2003). Measuring inconsistency in meta-analyses. *BMJ*, 327, 557-560.
- Holcomb, J. C., Sullivan, D. M., Horneck, D. A. & Clough, G. H. (2011). Effect of irrigation rate on ammonia volatilization. *Soil Science Society of America Journal*, 75 (6), 2341–7.
- Howar, D. D. & Tyler, D. D. (1989). Nitrogen source, rate, and application method for no-tillage corn. *Soil Science Society of America Journal*, 53, 1573-1577.
- Kissel, D. E. & Cabrera, M. L. (1988). Factor affecting urea hydrolysis. In: B. R. Bock, D. E. Kiessel. *Ammonia volatilization from urea fertilizers*. (pp. 53–66). (National Fertilizer Development Center, TVA: Muscle Shoals).
- Kissel, D., Cabrera M. & Paramasivam S. (2008). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 677 S. Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA. Nitrogen in Agricultural Systems, Agronomy Monograph 49.
- Martens, D. A. & Bremner, J. M. (1989). Soil properties affecting volatilization of ammonia from soils treated with urea. *Communications In Soil Science and Plant Analysis*, 20, 1645–1657. DOI: 10.1080/00103628909368173.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable. (2022). Informe del Inventario Nacional del Cuarto Informe Bienal de Actualización de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC). <https://unfccc.int/documents/461141>.
- Nommik, H. (1973). The effect of pellet size on the ammonia loss from urea applied to forest soil. *Plant and Soil*, 39, 309-318.
- Norton, J. & Ouyang, Y. 2019. Controls and adaptive management of nitrification in agricultural soils. *Frontiers in Microbiology*, 10, 1931. DOI: 10.3389/fmicb.2019.01931.
- Pawlick, A. A., Wagner-Riddle, C., Parkin, G. W. & Berg, A. A. (2019). Assessment of nitrification and urease inhibitors on nitrate leaching in corn (*Zea mays* L.). *Canadian Journal of Soil Science*, 99, 80-91. DOI: 10.1139/CJSS-2018-0110
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, 2020, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Relevamiento de Tecnología Agrícola Aplicada. (2021). Informe mensual N°51. Maíz 2020/21. Diciembre 2021. [www.bolsadecereales.org/retaa](http://www.bolsadecereales.org/retaa)
- Ritchie, S. W. & Hanway, J. J. (1982). How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service, Iowa, EEUU. Special Report N°48 pp. 24.
- 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.
- Russelle, M. P., Hauck, R. D. & Olson, R. A. (1983). Nitrogen Accumulation Rates of Irrigated Maize. *Agronomy Journal*, 75, 593-598.
- Said, A., Posse, G., Vangeli, S. Y Popper, A. (2023). ¿Podemos mejorar las estimaciones de las emisiones de N<sub>2</sub>O en Argentina? *Ciencia del Suelo*, 41(1), 99-115.
- 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. & Andrade, F. H. (1999). No-tillage corn nitrogen uptake and yield: effect of urease inhibitor and application time. *Agronomy Journal*, 91, 950-955.
- Sainz Rozas, H. R., Echeverría, H. E. y Barbieri, P. A. (2004). Nitrogen balance is affected by application time and nitrogen fertilizer rate in irrigated no-tillage maize in Argentina. *Agronomy Journal*, 96, 1622-1631.
- Sainz Rozas, H. R., Echeverría, H. E. y Angelini, H. P. (2011). Niveles de Carbono orgánico y pH en Suelos Agrícolas de las Regiones Pampeana y Extrapampeana. *Ciencia del Suelo*, 29 (1), 29-37.
- Salvagiotti, 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).
- Salvagiotti, F., Castellarín, J. M., Ferraguti, F. J. y Pedrol, H. M. (2011). Dosis óptima económica de Nitrógeno en maíz según potencial de producción y disponibilidad de nitrógeno en la Región Pampeana norte. *Ciencia del Suelo*, 29(2), 199-212.
- Scharf, P. C., Wiebold, W. J. & Lory, J. A. (2002). Corn Yield Response to Nitrogen Fertilizer Timing and Deficiency Level. *Agronomy Journal*, 94, 435-441.
- 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 y Interpretation. *Agronomy Journal*, 109, 1-13.
- Stecker, J. A., Buchholz, D. D., Hanson, R. G., Wollenhaupt, N. C. & McVay, K. A. (1993). Application placement and timing of nitrogen solution for no-tillage corn. *Agronomy Journal*, 85, 645-650.
- Sunderlage, B. & Cook, R. L. (2018). Soil Property and Fertilizer Additive Effects on Ammonia Volatilization from Urea. *Soil Science Society of America Journal*, 82, 253-259. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.05.0151>
- Tremblay, N., Bouroubi, M. Y., Belec, C. & Fallon, E. (2015). Meta-Analyses on an Eastern Canada Database of in-Season Corn Nitrogen Response Trials. Symposium: Meta-Analysis Applications in Argicultural Research. Synergy in Science: Partnering for Solutions. 2015 ASA-CSSA-SSSA y ESA Annual Meeting, Nov. 15-18, Minneapolis, MN. Disponible en: <https://scisoc.confex.com/scisoc/2015am/web-program/Paper92938.html>
- Tremblay, N., Bouroubi, Y. M., Bélec, C., Mullen, R. W., Kitchen, N. R., Thomason, W. E. & Ortiz-Monasterio, I. (2012). Corn response to nitrogen is influenced by soil texture and weather. *Agronomy Journal*, 104(6), 1658-1671. <http://doi.org/10.2134/agnonj2012.0184>
- Uhart, S. A. & Andrade, F. H. (1995). Nitrogen Deficiency in Maize: II. Carbon-Nitrogen interaction effects on kernel number and grain yield. *Crop Science*, 35, 1384-1389.
- Upadhyay, L. S. B. (2012). Urease inhibitors: A review. *Indian Journal of Biotechnology*, 11, 381-388.
- Vahed, H. S., Shahinroksar, P. & Rezaei, M. (2011). Influence of some soil properties and temperature on urease activity in wetland rice soils. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 11, 310-313.
- Van der Weerden, T. J. & Jarvis, S. C. (1997). Ammonia emission factors for N fertilisers applied to two contrasting grassland soils. *Environmental Pollution*, 95, 205-211.
- Viechtbauer, W. (2010). Conducting meta-analyses in R with the metafor package. *Journal of Statistical Software*, 36(3), 1-48. <https://doi.org/10.18637/jss.v036.i03>.
- Vlek, P.L.G. & Carter, M.F. (1983). The effect of soil environment and fertilizer modifications on the rate of urea hydrolysis. *Soil Science Society of America Journal*, 136, 56-63.
- Wahl, M., Kirsch, R., Brockel, U., Trapp, S. & Bottlinger, M. (2006). Caking of urea prills. *Chemical Engineering y Technology*, 29, 674-678.
- Warton, D. I., Wright, I. J., Falster, D. S. & Westoby, M. (2006). Bivariate line-fitting methods for allometry. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 81(2), 259-291. <http://doi:10.1017/S1464793106007007>.
- Watson, C. J., Miller, H., Poland, P., Kilpatrick, D. J., Allen, M. D. B., Garrett, M. K. & Christianson, C. B. (1994). Soil properties and the ability of the urease inhibitor N-(n-Butyl) thiophosphoric triamide (nBPTP) to reduce ammonia volatilization from surface-applied urea. *Soil Biology and Biochemistry*, 9, 1165-1169.
- Watson, C. J., Laughlin, R. J. & McGeough, K. L. (2009). Modification of nitrogen fertilisers using inhibitors: Opportunities and potentials for improving nitrogen use efficiency. Proc. 658. Int. Fert. Soc., Colchester, UK.
- Williams, W. A., Jones, M. B. & Demmert, M. W. (1990). A concise table for path analysis. *Agronomy Journal*, 82, 1022-1024.
- Zubillaga, M. M., Zubillaga, M. S., y Álvarez, R. (2021). Aplicación de fertilizantes en cultivos extensivos. Capítulo 21. En: *Fertilidad de suelos y Fertilización en la Región Pampeana*. CABA, Editorial Facultad de Agronomía. 2da edición febrero 2021.