FACTORES DETERMINANTES DE LAS PÉRDIDAS DE NITRÓGENO POR VOLATILIZACIÓN Y SU EFECTO SOBRE EL RENDIMIENTO DEL MAÍZ

Mirta Beatriz Toribio

Ing. Agrónoma UNS – Bahía Blanca

Director: Ing. Agr. Dr. Nahuel Reussi Calvo

Co-Director: Ing. Agr. Msc. PhD. Adrián Correndo

EPG | FAUBA

ESPECIALIZACION FERTILIDAD DE SUELOS Y FERTILIZACION

Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

RESUMEN

El nitrógeno (N) es el principal nutriente que limita el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays L.*) en Argentina. Este nutriente está sujeto a pérdidas como nitrato o en formas gaseosas que incluyen amoníaco (NH_3) y óxido nitroso (N_2O), llevando a una baja eficiencia de uso de N (EUN) con tasas de recuperación del N por parte de los cultivos durante la estación de crecimiento no mayor al 50%. Esto puede llevar a consecuencias ambientales negativas. Una manera de mitigar estas pérdidas es con el uso de inhibidores, siendo el inhibidor de la actividad ureásica una alternativa para reducir las pérdidas de NH_3 del sistema. El objetivo del presente trabajo fue integrar la información existente sobre las pérdidas de N-Urea por volatilización y su impacto sobre el rendimiento del cultivo de maíz y jerarquizar los principales factores que la controlan en Argentina. Además, evaluar el efecto del inhibidor de la ureasa sobre las pérdidas de N por volatilización, el rendimiento e indicadores de EUN. Se realizó una revisión de experimentos, tanto publicados como inéditos, seguida del armado y análisis de bases de metadatos. Se realizó el análisis *Stepwise* para identificar los principales factores que controlan las pérdidas de N por volatilización, un *Path* análisis para examinar la ruta causal de las variables seleccionadas y un meta-análisis para categorizar las diferentes variables. El análisis de caminos propuesto explicó el 77% de la variación de la pérdida de N por volatilización. Las variables seleccionadas fueron: dosis de N (r= 0,66), contenido de arcilla (r= -0,59), porcentaje de materia orgánica (r= -0,01) y temperatura media durante los 10 días siguientes a la aplicación (r= 0,18). El meta-análisis indicó que las mayores pérdidas de N por volatilización se dan en dosis de N ≥100 kg ha^{-1}, suelos con contenido de MO <2% y de arcilla <20%, $Temp_{10}$ >20 y menos de 10 días para precipitaciones mayores a 10mm. Por otra parte, el empleo de inhibidores de la actividad ureásica redujo en un 69% las pérdidas de N por volatilización y no aumentó (p> 0,05) el rendimiento ni los indicadores de EUN. Sin embargo, la respuesta promedio fue de 6% y 2% para EUN y productividad parcial del factor, respectivamente. Los resultados del presente estudio permitieron identificar y jerarquizar los principales factores que controlan las pérdidas de N por volatilización, el efecto de los inhibidores de la ureasa y su impacto en el rendimiento del cultivo de maíz en Argentina.

Palabras clave: N-amonio, revisión, eficiencia de uso de nitrógeno, inhibidor de la ureasa.

1. INTRODUCCION

El nitrógeno (N) es el principal nutriente que limita el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays L*.) en Argentina. No obstante, la tasa de recuperación por parte de los cultivos durante la estación de crecimiento no supera el 50% del N aplicado. Este nutriente está sujeto a pérdidas como nitrato o en formas gaseosas que incluyen amoníaco (NH_3) y óxido nitroso (N_2O), las cuales representan un detrimento económico para los productores y una baja eficiencia de uso de N (EUN) con consecuencias ambientales negativas.

En la actualidad, la fertilización inicial con N se realiza en el periodo que va desde la emergencia del cultivo hasta el estadio de 4 a 6 hojas (V_4-V_6) del maíz (Ritchie *et al.,* 1982), con el objetivo de sincronizar la oferta con la demanda del nutriente (Barbieri *et al.,* 2003; Bonelli *et al.,* 2018). Es válido mencionar, que el cultivo de maíz alcanza la máxima tasa de acumulación de N en el período que transcurre entre el estadío V_{5-6} y los 15-20 días después de floración (Russelle *et al*., 1983; Uhart & Andrade, 1995). Varios trabajos han reportado que es factible retrasar las aplicaciones de N a momentos posteriores a la siembra con el objetivo de lograr una mayor sincronía entre la oferta y la demanda de N (Scharf *et al*., 2002, Sainz Rozas *et al.,* 2004). Esto permitiría disminuir los riesgos de pérdidas de N por lavado y desnitrificación que ocurren principalmente al inicio de la estación de crecimiento debido a la mayor humedad del suelo (Echeverría *et al*., 2015). Sin embargo, el incremento de temperatura del suelo, en la medida que se demora el momento de aplicación, favorecería las pérdidas por volatilización de NH_3, disminuyendo la eficiencia de recuperación del fertilizante y, en consecuencia, el rendimiento del cultivo (Bonelli *et al.,* 2018). La eficiencia de recuperación del N no supera el 55-61% del N aplicado para fertilizaciones en V_6 (Echeverría & Sainz Rozas, 2001). Esto sugiere que existiría un margen de mejora con aplicaciones de N demoradas y/o utilizando fertilizantes de eficiencia mejorada (fertilizantes con inhibidores de la ureasa o nitrificación). Las pérdidas globales de NH_3 en la agricultura y ganadería se estiman en 37 Mt de N (Sutton *et al.,* 2013).

La volatilización del amoníaco es un mecanismo que ocurre naturalmente en todos los suelos, por mineralización del N 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. La urea es el principal fertilizante nitrogenado producido a nivel mundial, representando en el año 2018/2019 el 55% de la industria global (IFA, 2021). El pico de pérdida de amoniaco ocurre entre los 2 ó 3 días después de la fertilización en suelos cálidos y húmedos (Ferguson *et al*., 1984; Hargrove *et al*., 1988; Sainz Rosas *et al.,* 1997; Cantarella *et al.,* 2018). Esta puede ser la principal causa de la baja EUN de dichos fertilizantes (Keller *et al.,* 1986; Fox *et al.*, 1993; Garcia *et al*., 1999; Ferraris *et al*., 2009).

Las pérdidas de 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. Cuando se aplica la urea en el suelo, ésta comienza un proceso de hidrólisis catalizado por la enzima ureasa, la cual es producida por microorganismos del suelo y plantas (Kot *et al.,* 2001). Por lo tanto, un mayor volumen de residuos vegetales en superficie se ve reflejado en un incremento del contenido y actividad de la ureasa en el sistema. A su vez, los residuos también reducen el contacto de la urea con el suelo (Sangoi *et al*.; 2003; Da Ros *et al*., 2005; Okumura and Mariano, 2012), disminuyendo la adsorción de NH_4^+ en el complejo de intercambio e incrementando las potenciales pérdidas de NH_3 (Silva *et al*. 2017).

La hidrólisis de la urea produce amonio (NH_4^+) y 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; Ernst and Massey, 1960). 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 (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; Terman, 1979).

En los suelos de la Región Pampeana (pH= 6 - 7), la mayor proporción del N se encuentra en la forma de NH_4^+ (molécula poco móvil en el suelo). Si bien, las pérdidas están mayormente gobernadas por el pH inicial del suelo, hay otros factores como la capacidad de intercambio catiónico, el contenido de

materia orgánica (MO) y la textura del suelo que pueden afectar la intensidad del proceso de volatilización (Ernst et al. 1960; Fenn *et al.,* 1974; Ferguson *et al.,* 1984, Sainz Rozas *et al.,* 1997). Cuanto mayor sea la capacidad de intercambio catiónico, 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. Según Martens y Bremner (1989), las pérdidas de NH_3 se correlacionan de manera negativa con el contenido de MO, limo y arcilla, y por otro lado directamente con el contenido de arena y el pH del suelo. El poder buffer del suelo, que es la capacidad de resistirse a cambios en su pH 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.

En cuanto a los factores ambientales que afectan las pérdidas de NH_3 se destacan la temperatura y la humedad del suelo (Ernst *et al.,* 1960; Fenn *et al.,* 1974; Sainz Rozas *et al.,* 1997). El efecto principal del aumento de la temperatura es la disminución del pKa del equilibrio NH_3-NH_4^+ en la solución del suelo. El pKa es el pH al cual el 50% del N está como NH_3 y el 50% como NH_4^+. El pKa es 9.72 a 10ºC y baja a 8.8 a 40ºC (Kissel *et al.,* 2008). A raíz de este efecto las pérdidas por volatilización son más elevadas cuando las temperaturas del suelo se incrementan en un rango de 10 a 50°C (Hargrove, 1988). Por ende, cuando el fertilizante es aplicado a la siembra o en 6 hojas (V_6) del cultivo de maíz, es de esperar que las pérdidas de N varíen según los cambios en la temperatura del suelo. Sainz Rozas *et al.* (1997), determinaron que cuando se realizaron aplicaciones de N en el estadio de V_6 bajo siembra directa, las pérdidas de NH_3 se incrementaban significativamente respecto de aplicaciones a la siembra, diferencia explicada por el incremento en la temperatura 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 NH_3. 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 (Kissel *et al.,* 1988; Holcomb *et al.,* 2011). Craig y Wollum (1982) determinaron que precipitaciones menores a 10-15 mm favorecían las pérdidas por volatilización debido a un incremento en la tasa de hidrólisis de la urea.

Varios trabajos en la Región Pampeana (RP) 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 general, incrementos en las dosis de N aumentan las pérdidas de NH_3 (Silva *et al.*, 2017). Por lo tanto, se han propuesto el empleo de fuentes alternativas de N a la urea que se caracterizan por presentar pérdidas por volatilización de escasa magnitud, como el nitrato de amonio y nitrato amónico calcáreo (Fox *et al.,* 1986; García *et al.,* 1999). La incorporación de la urea por debajo de los rastrojos sería una alternativa eficiente para reducir las pérdidas de NH_3 (Bandel *et al.,* 1980; Fox *et al.,* 1986; Howar *et al.,* 1989; Steker *et al.,* 1993). Sin embargo, dados los mayores costos que implica la utilización de dicha práctica y el mayor tiempo operativo, la aplicación en superficie constituye la alternativa más difundida entre los productores de la RP.

Otra alternativa que ha demostrado ser un método eficiente para reducir las pérdidas por volatilización desde el fertilizante es la utilización de productos que retarden o inhiban la hidrólisis de la urea (Beyrouty *et al.,* 1988; Joo *et al.,* 1992; Fox *et al.,* 1993; Watson *et al.,* 1994; Sainz Rozas *et al.,* 1999; *Barbieri et al*., 2010). Estos inhibidores que actúan a nivel de la enzima ureasa, la cual cataliza la hidrólisis de la urea, disminuyen la velocidad de conversión de la urea a amonio. Se han estudiado distintos inhibidores, siendo el N-(n-butil) tiamida tío fosfórica (NBPT) el principio activo más conocido en el mercado (Carmona *et al.,* 1990; Gioacchini *et al.,* 2002; Chien *et al.,* 2009, 2014; Watson *et al.,* 2009; Upadhyay, 2012; Halvorson *et al*.; 2013; Singh *et al*., 2013). Bajo condiciones aeróbicas, el NBPT es rápidamente transformado a su análogo oxigenado, en el suelo (NBPTO) (McCarty *et al.,* 1989; Creason *et al.,* 1990; Hendrickson and Douglass, 1993). Luego, la forma NBPTO con su triple enlace se une a los sitios activos de la enzima ureasa (Manunza *et al.,* 1999), reduciendo la hidrólisis de urea y, en consecuencia, la potencial pérdida de NH_3 (Engel *et al.,* 2011, 2013). La inhibición de la enzima se produce porque estos compuestos son análogos estructurales de la urea. En los últimos años también se comenzó a comercializar un inhibidor con dos principios activos, el NBPT y el N-(n-propil) tiamida tio fosfórica (NPPT), el cual ha sido evaluado con éxito (Li *et al.,* 2015).

En un metanálisis realizado por Silva *et al.* (2016), observaron que el uso de NBPT retrasó las pérdidas de NH_3. Se necesitaron 4,8 y 8,3 días para que se produjera el 50% de la pérdida total de NH_3 con urea y urea tratada con NBPT, respectivamente. La urea-NBPT redujo la pérdida por volatilización en todas las clases de pH, de textura, contenido de carbono orgánico del suelo, dosis de N y concentraciones de NBPT. Además, determinaron aumentos promedio de rendimiento del 5,3% para la urea tratada con NBPT en comparación con la urea sin tratar. No obstante, trabajos realizados en la RP determinaron que la utilización de dichos inhibidores no produjo incrementos de rendimiento, del contenido de N en grano ni de la EUN del cultivo de maíz (Sainz Rozas *et al.,* 1997; Salvagiotti 2005; Barbieri *et al.,* 2010).

En síntesis, para Argentina, existen escasas revisiones de experimentos, tanto publicados como inéditos, donde se integre información y se jerarquicen los principales factores de suelo, clima y de manejo de N que gobiernan las pérdidas por volatilización y su impacto en el rendimiento de maíz. Esta información seria de utilidad a nivel de los sistemas reales de producción dado que ayudaría a definir la fuente y dosis de N en el cultivo de maíz. Esto permitiría disminuir la incertidumbre en la toma de decisión para el uso de las mejores prácticas de manejo para la fertilización nitrogenada, cuidando así el medioambiente y contribuyendo a una agricultura intensificada sustentable.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Jerarquizar los principales factores que controlan las pérdidas de volatilización del N-Urea y estimar su impacto sobre el rendimiento del cultivo de maíz en Argentina.

Objetivos específicos:

1) Evaluar el efecto de variables de suelo (materia orgánica, textura, etc.), clima (precipitaciones, temperatura medía) y de manejo (dosis) sobre las pérdidas de N-Urea por volatilización en maíz.

2) Evaluar la incidencia de la pérdida de nitrógeno por volatilización sobre el rendimiento del cultivo de maíz.

3) Evaluar el efecto del inhibidor de la ureasa sobre las pérdidas de nitrógeno por volatilización, el rendimiento e indicadores de eficiencia de uso de nitrógeno.

HIPOTESIS

Para las condiciones de Argentina, se plantean las siguientes hipótesis:

1) La temperatura media del aire explica en mayor medida las pérdidas de nitrógeno por volatilización, respecto a las precipitaciones y variables de suelo.

2) El incremento en la dosis de nitrógeno explica en mayor medida las pérdidas de N por volatilización, respecto a variables de suelo y clima.

3) El empleo de inhibidores de la ureasa reduce las pérdidas de nitrógeno por volatilización de la urea e incrementa el rendimiento, la eficiencia de uso y la productividad parcial de N.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. Revisión de experimentos desde 1997 a la actualidad con aplicación de urea en maíz en Argentina.

Se procedió al armado de una base de datos correspondientes a ensayos de fertilización con N en maíz. Para cumplir con los objetivos y poner a prueba las hipótesis, además de incluir la información del manejo de la fertilización, tratamientos y los rendimientos de cada experimento, las bases de datos incluyeron características de los experimentos a través de variables relacionadas a suelo, clima, y prácticas de manejo del cultivo. Esta caracterización resultó variable en cuanto al grado de detalle brindado por los investigadores y/o reportado en las publicaciones. Por tanto, se utilizó un protocolo de revisión con el objeto de estandarizar los datos para su posterior análisis.

2.2. Procedimientos de búsqueda y recopilación de datos

i) Fuentes de información

El proceso de búsqueda de información se apoyó en la utilización de internet a través del motor de búsqueda Scholar Google™ para hallar artículos científicos, técnicos y de divulgación sobre fertilización con N en maíz realizados en Argentina. Se utilizaron distintas combinaciones de las palabras: *maíz, nitrógeno, fertilización, inhibidores, región pampeana*, *argentina* y en algunos casos, *nombres de investigadores* referentes en la materia. También se exploraron sitios web de instituciones como el INTA, Instituto Internacional para la Nutrición de Plantas, Fertilizar Asociación Civil, Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, y se sumó una base de datos del departamento Comercial - área de Planeamiento Comercial y Desarrollo de Profertil S.A. Estos ensayos se realizaron con rigurosidad científica por personal especializado del INTA.

ii) Estructura de la base de datos

La confección de las bases de datos se realizó bajo el formato de planillas, mediante el empleo del software Microsoft Excel®. Las bases de datos contaron con una estructura dividida en secciones según el tipo de información a detallar en cada una de ellas.

iii) Criterios de selección de ensayos

Una vez finalizada la recolección de datos, se realizó una revisión para descartar ensayos repetidos y aquellos que no cumplieran con una serie de requisitos mínimos:

1) Experimentos que hayan medido volatilización de forma diaria utilizando un sistema estático semiabierto [adaptado del propuesto por Nommik (1973)].

2) Provenir de un experimento con, al menos, dos repeticiones por tratamiento.

3) Contar con, al menos, dos niveles de tratamientos: un testigo o control, y un tratamiento fertilizado.

4) Que la diferencia entre el tratamiento testigo o control respecto del/los tratamiento/s fertilizado/s, solo incluya el nutriente en cuestión (N).

5) Contar con un valor de rendimiento en grano absoluto (kg ha^{-1} o equivalente) para cada tratamiento evaluado.

6) Contar con un valor de análisis de suelo de MO, superficial (0-20 cm).

7) Informar la dosis utilizada del nutriente evaluado, preferentemente acompañada del detalle de fuente, forma y/o momento de aplicación del fertilizante.

8) Contar con información relativa a la ubicación geográfica (i.e. localidad, partido, coordenadas) y temporal (campaña) del ensayo.

En base a los criterios citados se trabajó con una base constituida por 21 experimentos de maíz (***Tabla 1***). La ubicación geográfica de cada uno de los ensayos se presenta en la ***Figura 1***.

iv) Cálculos

Para cada sitio experimental se calculó la EUN y la Productividad Parcial del Factor (PPF) según las siguientes ecuaciones:

Ecuación 1: $EUN = \frac{Rendimiento\ del\ tratamiento\ x\ \ (kg\ ha^{-1}) - Rendimiento\ del\ testigo\ \ (kg\ ha^{-1})}{Dosis\ de\ N\ del\ tratamiento\ x\ (kg\ ha^{-1})}$

Ecuación 2: $PPF = \frac{Rendimiento\ (kg\ ha^{-1})}{Dosis\ de\ N\ (kg\ ha^{-1})}$

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 10mm (Días Pp>10mm). El periodo de análisis pos fertilización se definió en función de que las pérdidas son muy bajas o nulas luego de los 10 a 14 días desde la fertilización (Silva *et al.,* 2017).

2.3. Análisis estadísticos

Para cada variable se calcularon las siguientes estadísticas descriptivas: el promedio, la mediana, el desvío estándar, coeficiente de variación, los valores mínimos y máximos y los percentiles. Además, para la comparación de medias entre fuentes se utilizó el test t por medio del software InfoStat (Di Rienzo *et al.,* 2020). También se realizó un *Forest Plot* para resumir los efectos de las variables de interés (Lewis y Clarke, 2001). La heterogeneidad entre los estudios se calculó mediante la estadística I^2 para detectar si todos evalúan el mismo efecto. Basado en Higgins *et al.* (2003), el valor I^2 define el porcentaje de variación total entre estudios que se puede atribuir a la heterogeneidad en lugar del error experimental.

Se utilizó un proceso de selección paso a paso para identificar los factores más influyentes que controlan las pérdidas por volatilización (Vol). Después de esto, se examinó la ruta causal de las variables seleccionadas. Los efectos directos de las variables seleccionadas se denominan "coeficientes de ruta", que son coeficientes de regresión parcial estandarizados para cada variable en una regresión lineal múltiple contra Vol (Basta *et al.,* 1993). Por otro lado, los efectos indirectos de las propiedades del suelo sobre cada Vol se calcularon como el producto del coeficiente de correlación simple entre variables y su coeficiente de trayectoria (coeficientes de regresión parcial que representan el efecto de una variable sobre otra, controlando el resto de las variables) (Williams, Jones y Demmert, 1990). Además, se calculó un residuo no correlacionado (U) a partir del coeficiente de determinación de la regresión múltiple entre la Vol y las

variables significativas (R^2) (Ecuación 3) para tener en cuenta la variación de la Vol no explicada por las variables en el modelo de ruta.

Ecuación 3: $U = \sqrt{(1 - R^2)}$

La relación entre Vol. (% o kg ha^{-1}), rendimiento, EUN y PPF con Urea y Urea + inhibidor fue descripta por el siguiente modelo lineal:

$y = a + b\,x$

donde x e y son ambas variables aleatorias, y los parámetros a (ordenada al origen) y b (pendiente) describen una relación alométrica, método mejor conocido como regresión de eje principal estandarizado (Warton *et al.,* 2006). La pendiente y ordenada fueron comparadas para evaluar el efecto del inhibidor sobre volatilización (% o kg ha^{-1}), el rendimiento, la EUN y la PPF. La igualdad del intercepto y la pendiente a cero y uno, respectivamente, fue probado a través de pruebas F, tanto por separado como simultáneamente. Para la confección de las figuras y estimaciones de estadística descriptiva se utilizó el software GraphPad Prism® en su versión 8.0c para Mac®.

Tabla 1. Resumen de estudios empleados para el análisis de las pérdidas de nitrógeno por volatilización 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. V_3: tres hojas desarrolladas, V_6: seis hojas desarrolladas.

											Disponibilidad de datos	
N°	**Referencia**	**Localidad**	**Año**	**Suelo**	**Fuente**	**Dosis N (kg ha^{-1})**	**Momento de fertilización**	**As (%)**	**MO (%)**	**pH**	**Rto**	**Vol (kg/ha)**
1	Sainz Rozas et al. (1997)	Balcarce, Bs As.	1994	Argiudol tipico	U, UI	70, 140	siembra y V_6	23	5,6	5,8		x
2		Balcarce, Bs As.	1995	Argiudol tipico	U, UI	70, 140, 210	siembra y V_6	23	5,6	5,8		x
3	Sainz Rozas et al. (1999)	Balcarce, Bs As.	1998	Paleudol Petrocalcico	U	70	siembra	30	5,9	5,9	x	x
4		Balcarce, Bs As.	1999	Paleudol Petrocalcico	U	70	siembra	30	5,9	5,9	x	x
5	Salvagiotti (2005)	Oliveros, Santa Fe.	2003	Argiudol tipico	U	60, 120	V_6	22	2,4	5,3	x	x
6	Barbieri et al. (2005)	Balcarce, Bs As.	2004	Argiudol tipico	U, UI	60, 120	V_6	23	4,9	5,6	x	x
7		Balcarce, Bs As.	2004	Argiudol tipico	Urea	60, 120	V_6	23	4,9	5,6	x	x
8	Fontanetto et al. (2010)	Rafaela, Santa Fe.	2008	Argiudol tipico	U, UI	60, 120	V_6	27				
9	Sanchez (2009)-IP[#]	Cañete, Tucumán.	2008	Haplustol tipico	U, UI	60, 120	V_6	13	2,1	6,2	x	x
10	Barbieri et al. (2009)-IP	Balcarce, Bs As.	2008	Argiudol tipico	U, UI	60, 120	V_6	23	5,4	5,7	x	x
11	Ferraris et al. (2010)	Pergamino, Bs As.	2008	Argiudol tipico	U, UI	60, 120	V_6	23	2,5	5,8	x	x
12	Bono et al. (2011)	Anguil, La Pampa.	2010	Haplustol entico	U, UI	50, 100	V_6	7	1,1	6,1	x	x
13	Andrada y Elizalde (2013)	Anguil, La Pampa.	2011	Ustipsament tipico	U, UI	50, 100	V_6	2	1,3	6,8	x	x
14	Salvagiotti (2015)-IP	Oliveros, Santa Fe.	2014	Argiudol tipico	U, UI	60, 120	V_6	22	2,2	5,2	x	x
15		Oliveros, Santa Fe.	2014	Argiudol tipico	U, UI	60, 120	V_6	22	1,9	5,1	x	x
16	Romero (2015)-IP	Burruyaco, Tucumán.	2014	Ustortentes tipicos	U, UI	30, 70	V_6	20	3,3	6,4	x	x
17	Ferraris et al. (2015)-IP	Pergamino, Bs As.	2014	Argiudol tipico	U, UI	60, 120	V_6	23	2,9	5,8	x	x
18		Pergamino, Bs As.	2014	Argiudol tipico	U, UI	60, 120	V_6	23	3,4	5,5	x	x
19	Barbieri et al. (2018)	Balcarce, Bs As.	2016	Paleudol Petrocalcico	U	60, 120	V_3, V_6	30	5,3	5,6	x	x
20	Reussi Calvo et al. (2021)-IP	Balcarce, Bs As.	2020	Argiudol tipico	U, UI	50, 100	V_6	23	5,3	5,5	x	x
21	Salvagiotti (2021)-IP	Oliveros, Santa Fe.	2020	Argiudol tipico	U, UI	50, 100	V_6	22	2,7	5,8	x	x

[#]**IP =** informe de Profertil.

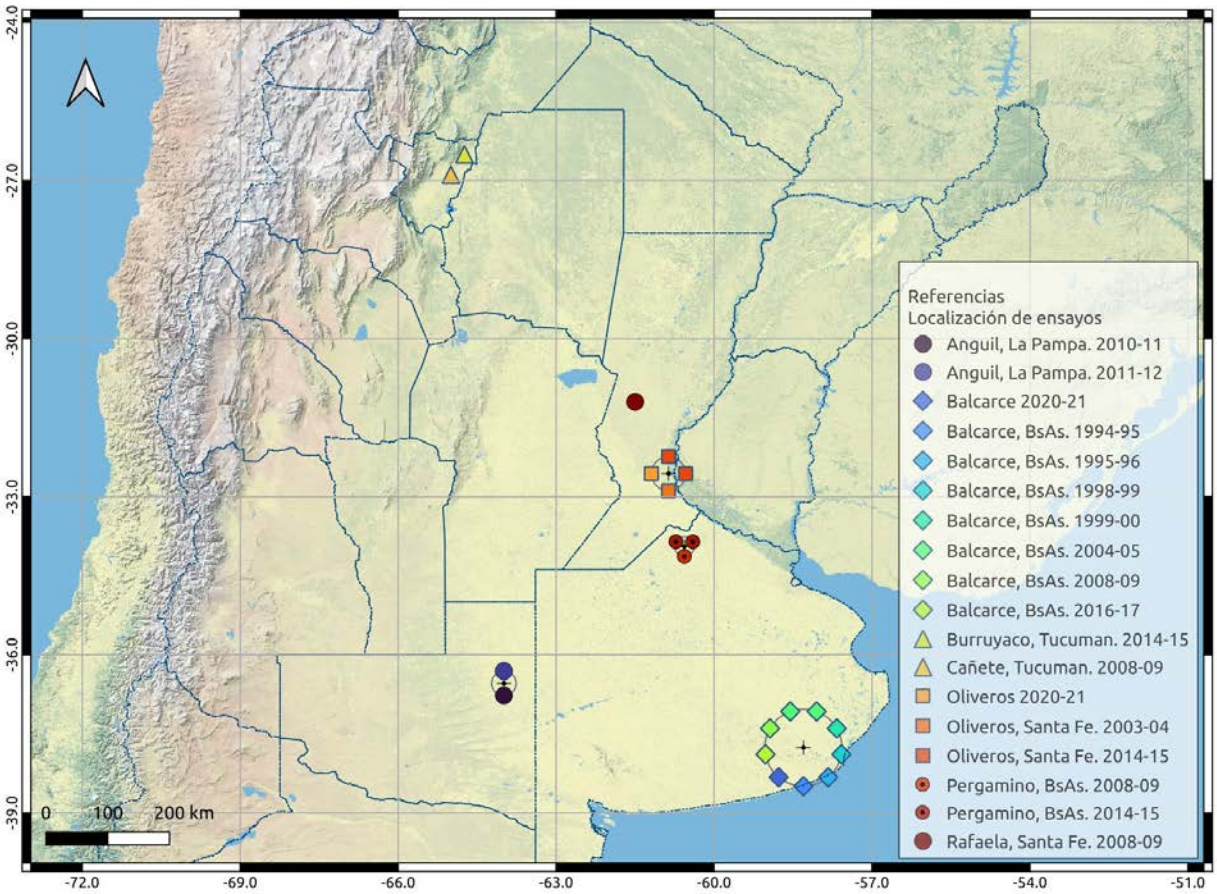

Figura 1. Distribución geográfica de los experimentos empleados para el análisis de las pérdidas de nitrógeno por volatilización en maíz.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Base de datos

Los estadísticos descriptivos de las diferentes variables de suelo, clima, cultivo y pérdidas de nitrógeno por volatilización de los 21 experimentos de maíz se presentan en la ***Tabla 2***. El contenido promedio de MO fue de 3,7% con valores mínimos de 1,1 y máximos de 5,6%. Estos valores coinciden con los niveles típicos de la Región Pampeana (RP) (Sainz Rozas *et al.,* 2019). El porcentaje de arcilla y el pH variaron de 2 al 27% y 5,1 a 6,8, respectivamente. En un relevamiento de suelo, Sainz Rozas *et al.*, (2011) reportaron que los suelos de la mayor parte de los partidos o departamentos de las provincias de Buenos Aires, La Pampa, Santa Fe, Córdoba, Entre Ríos, Santiago del Estero, Salta y Tucumán presentaron valores de pH dentro del rango de 6,0 a 7,5. La temperatura media dentro de los 10 días después de la aplicación del fertilizante varió entre 12°C y 28°C, siendo la media de 21°C. Sainz Rozas *et al*. (1997) determinaron pérdidas de 0,24 kg N-NH_3 ha^{-1} $día^{-1}$ por cada 1 °C de aumento de la temperatura media del suelo. Las lluvias dentro de los 14 días post-fertilización fueron variables, donde se observaron casos sin eventos de precipitaciones y otros en donde a los 2 días de la fertilización se registraron 38 mm. Holcomb *et al.* (2011) reportaron pérdidas acumuladas de N por volatilización de solo 2,8% con eventos de riego de 21,6 mm post-fertilización.

El rendimiento promedio de la base fue de 9.639 kg ha^{-1} con valores mínimos de 3.900 kg ha^{-1} y máximos de 15.000 kg ha^{-1}. La EUN y la PPF fueron en promedio de 21 y 137 kg kg^{-1}, respectivamente. Estos valores se ubican dentro los citados para la RP por Bono y Álvarez (2012), los cuales determinaron que la eficiencia agronómica promedio fue de 28 kg grano/kg de N para un rango de dosis de N que se encuentra entre 40 y 60 kg ha^{-1} en la Región Semiárida y Subhúmeda Pampeana. En un reciente síntesis-análisis para la RP, Correndo *et al.* (2021) observaron valores de PPF que varían desde 31 hasta 188 kg grano por kg de N aplicado en función del potencial del ambiente y la disponibilidad inicial de N.

El porcentaje de pérdida de NH_3 varió entre 0 y 57% (0 a 38 kg ha^{-1}), ubicándose dentro del rango citado en la bibliografía internacional (Silva *et al.,* 2016, Cantarella *et al.,* 2018). Estos resultados ponen en evidencia el gran rango

de situaciones edafo-climáticas exploradas con la presente revisión de experimentos.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos para las diferentes variables de suelo, clima, cultivo y pérdidas por volatilización. MO: materia orgánica, As: arcilla; Temp 10: temperatura media del aire durante los 10 días desde la fertilización (DDF), Pp 14: precipitaciones acumuladas durante los 14 DDF, Días Pp > 10mm: días hasta precipitaciones mayores a 10 mm luego de la fertilización, Rto: rendimiento, PPF: productividad parcial del factor, EUN: eficiencia de uso del nitrógeno. DE: desvió estándar, CV: coeficiente de variación.

Estadístico	**MO (%)**	**As (%)**	**pH**	**$Temp_{10}$**	**Pp_{14}**	**Días Pp > 10mm**	**Rto (kg ha^{-1})**	**PPF (kg kg^{-1})**	**EUN (kg kg^{-1})**	**Volatilización NH_3 (%)**	**Volatilización NH_3 (kg ha^{-1})**
Promedio	3,7	20	5,8	21	16	9	9.639	137	21	8	7
DE	1,6	6	0,4	6	11	6	1.857	55	17	11	9
Mínimo	1,1	2	5,1	12	0	2	3.953	66	1	0	0
Máximo	5,6	27	6,8	28	38	25	15.400	307	88	57	38
Percentil (0,25)	2,2	22	5,6	14	10	5	8.454	95	9	1	1
Percentil (0,50)	3,3	23	5,8	23	15	7	9.421	132	18	4	3
Percentil (0,75)	5,6	23	5,8	26	21	14	10.429	173	25	10	8
CV (%)	44	30	7	27	65	63	19	39	78	131	130

3.2. Factores determinantes de las pérdidas de nitrógeno por volatilización

El análisis de camino propuesto (Path análisis) presentó un U de 0,47 y un R^2 de 0,77, demostrando que el análisis explicó el 77% de la variación de la pérdida de N por volatilización del amoníaco (kg ha^{-1}). Los coeficientes del Path análisis indicaron que 4 de las 6 variables predictoras tuvieron efectos significativos sobre las pérdidas de N, siendo éstas las dosis de N, el porcentaje de arcilla, contenido de MO y la temperatura media del aire durante los diez días post-fertilización (***Tabla 3***).

El principal factor que influyó en la pérdida de N por volatilización del amoníaco fue la dosis de N (0,66), siendo el efecto directo y positivo, es decir a mayor dosis de N mayor volatilización del NH_3. A su vez, se determinó un efecto indirecto (fuera de la diagonal) positivo de 0,34 a través del rendimiento (***Tabla 3***). Esto indicaría que ambientes con mayores rendimientos, debido a incrementos en la dosis de N, presentaron mayores pérdidas por volatilización. Varios autores han determinado incrementos en las pérdidas de N por volatilización frente a aumentos en la dosis de fertilizante aplicados en superficie (Abascal *et al.,* 2004; Barbieri *et al.,* 2003; Fontanetto *et al.,* 2001; Sainz Rosas *et al.,* 1997 y Videla *et al.,* 1994). Además, Sainz Rozas *et. al.* (1997) concluyeron que la magnitud de las pérdidas por volatilización depende de la cantidad de N aplicado y del momento de fertilización. Según estos autores, aplicaciones de N en seis hojas generaban pérdidas de hasta el 15% en el sudeste bonaerense.

Dentro de las variables de suelo, tanto el efecto del contenido de arcilla como el de MO fueron directos y negativos con valores de -0,59 y -0,01, respectivamente (***Tabla 3***). Esto indicaría que suelos con mayores niveles de MO y arcilla presentaron menores pérdidas por volatilización. Si bien el efecto directo de la MO fue de baja magnitud, su efecto indirecto a través de la arcilla fue mayor (-0,39). Esto evidencia el rol de las fracciones finas del suelo sobre la acumulación de MO y, por ende, sobre la capacidad buffer de este. Martens y Bremner (1989) informaron que las pérdidas por volatilización presentan una correlación negativa con el contenido de arcilla y materia orgánica y positiva con el contenido de arena y pH. No obstante, otros autores han determinado un

incremento de la actividad ureásica en suelos con mayor contenido de carbono (Vahed *et al*., 2011).

Por último, respecto a las variables climáticas, solo la temperatura media presentó un efecto directo positivo (0,18) sobre las pérdidas de N del fertilizante (***Tabla 3***). Esto indicaría que los sitios donde hubo mayor temperatura en los días posteriores a la fertilización presentaron mayores pérdidas. Varios trabajos han determinado aumentos en las pérdidas de N por volatilización frente a incrementos en la temperatura media (Hargrove, 1988; Romano *et al.,* 2011; Sainz Rozas *et al., 1997*), siendo no significativas con temperaturas del suelo entre 5 y 10 °C. Kissel y Cabrera (1988) reportaron valores relativos de actividad ureásica entre 0,15 a 0,40 con temperaturas menores de 10°C, siendo la temperatura óptima para la máxima actividad ureásica de 40°C. Además, Wahl *et al.* (2006) observaron un incremento en la tasa de disolución de la urea frente a aumentos en la temperatura y Kissel *et al,* (2008) observaron el efecto de la temperatura sobre el equilibrio NH_4-NH_3 en la solución del suelo y NH_3 solución – NH_3 aire, encontrando que, a un pH de 8,5, solo alrededor del 5,5 % del N está en forma de NH_3 a 10°C, mientras que aproximadamente el 33% existe como NH_3 a 40°C.

Tabla 3. Efecto directo e indirecto (diagonal y fuera de la diagonal, respectivamente) de variables edafoclimáticas y productivas sobre las pérdidas de nitrógeno por volatilización (kg ha^{-1}). Los efectos directos ("coeficientes de trayectoria") son coeficientes de regresión parcial estandarizados mientras que los efectos indirectos son el producto del coeficiente de correlación simple entre las variables y su coeficiente de trayectoria.

	Dosis N	**Arcilla**	**MO**	**$Temp_{10}$**	**Días Pp > 10mm**	**Rendimiento**	**r**	**$R^2_{ajustado}$**	**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*		
$Temp_{10}$	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.*

Para profundizar en el análisis de las distintas variables se llevó a cabo un meta-análisis, el cual permite identificar patrones de respuesta combinando múltiples fuentes de información (Borenstein *et al.,*2009; Philibert *et al*., 2012). Cada variable de interés se clasificó en niveles arbitrarios dependiendo de la unidad de expresión (***Tabla 4***). Aunque para el análisis se utilizaron respuestas en log-ratios por sus mejores propiedades estadísticas respecto de la variable original (Hedges, 1999), por razones de practicidad, los resultados se re-transformaron a unidades de pérdida de N por volatilización respecto del tratamiento testigo (kg ha^{-1}). El meta-análisis se llevó a cabo con el paquete metafor (Viechtbauer, 2010) en el software R (R Core Team, 2020).

En la ***Figura 2***, los círculos representan estimaciones puntuales y los bigotes representan su respectivo intervalo de confianza (IC) del 95 %. Para cada una de las clases se determinó el índice I^2 el cual indica en forma fácil y sencilla de interpretar, 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 4***). 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, solo para el contenido de arcilla la heterogeneidad fue menor al 25%, lo cual sugiere una elevada magnitud de efectos aleatorios entre experimentos.

Tabla 4. Resumen del meta-análisis para pérdidas de N por volatilización.

Variable	Clase	N° Observac.	Volatilización testigo	Volatilización sobre testigo	$IC_{LS\ 95\%}$	$IC_{LI\ 95\%}$
			----------(kg ha^{-1})----------			
Dosis de N (kg ha^{-1})	< 100	26	0,5	6,2	6,3	6,1
	≥ 100	23	0,5	16,7	16,9	16,5
Materia Orgánica (%)	< 2	3	0,2	17,0	17,6	16,3
	2-3	6	1,1	12,2	12,5	11,8
	> 3	13	0,4	8,3	8,6	8,1
Arcilla (%)	< 20	3	0,8	15,7	16,2	15,3
	≥ 20	20	0,5	10,6	11,0	10,2
$Temp_{10}$ (°C)	≤ 20	10	0,4	7,9	8,2	7,6
	> 20	13	0,6	13,8	14,4	13,3
Días Pp >10 mm	≤ 10	15	0,5	12,1	12,5	11,6
	> 10	8	0,6	9,3	9,6	9,0
Rendimiento (t ha^{-1})	≤ 10.5	45	0,9	12,0	12,5	11,5
	> 10.5	14	0,3	11,0	11,7	10,3

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

En cuanto a los factores de manejo, para la dosis de N, se determinaron diferencias significativas entre clases (***Figura 2 A***). Las pérdidas de N por volatilización sobre el testigo fueron de 6,2 y 16,7 kg ha^{-1} para <100 y ≥100 kg ha^{-1}, respectivamente. Es válido mencionar, que las dosis medias de N utilizadas en el cultivo de maíz en Argentina son en promedio de 71 kg N ha^{-1} (ReTAA, 2021), lo cual implicaría en promedio una baja pérdida de N del sistema vía volatilización.

El contenido de MO fue dividido en 3 clases (< 2%; 2-3% y > 3%), siendo significativas las diferencias en las pérdidas de N por volatilización (***Figura 2 C***). 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. Considerando que la mayor proporción de los suelos de la RP presentan valores de MO menores a 3% (Sainz Rozas *et al*., 2011), es necesario considerar diferentes estrategias de manejo para reducir las pérdidas gaseosas de N del sistema y, por ende, maximizar la EUN.

Respecto a la variable arcilla, la misma fue clasificada en dos clases (< 20% y ≥ 20 %). Las pérdidas de N por volatilización fueron en promedio de 15,7 a 10,6 kg ha^{-1}, respectivamente (***Figura 2 E***). Este resultado coincide con el Path análisis en donde el contenido de arcilla tuvo un efecto directo negativo con las pérdidas de N por volatilización. Además, Correndo *et al*. (2021), determinaron mayores respuestas en rendimiento y EUN en suelos de clase textural fina respecto a suelos de textura gruesa. Otros autores reportaron mayores respuestas a N en los suelos de textura fina en comparación con texturas media y gruesa (Tremblay *et al*., 2012; 2015 y Chivenge *et al*., 2011).

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 (***Figura 2 B; Tabla 4***). Es válido remarcar que en Argentina el 52% de los maíces se realiza bajo planteos de siembra de 2da o tardía, con temperaturas mayores a 20°C (ReTTA, 2021), lo cual representa una condición predisponente a la pérdida de N del sistema. Al igual que para la temperatura, la variable “días hasta una precipitación mayor de

10 mm”, se dividió en 2 clases (≤10 días y >10 días). Para esta variable se observaron diferencias significativas entre clases, con pérdidas de N por volatilización sobre el testigo que variaron entre 12,1 y 9,3 kg ha^{-1} para la clase ≤ 10 días y > 10 días, respectivamente (***Figura 2 D***). Van Der Weerden y Jarvis (1997) determinaron que la emisión de NH_3 fue afectada por precipitaciones de 14 mm, no obstante, cuando el evento ocurrió 3 días post-aplicación el total de pérdida alcanzó el 20%. Estos resultados se explicarían por la hidrólisis de gran parte de la urea. En forestales, Kissel *et al.* (2004) reportaron que las pérdidas por volatilización de NH_3 se incrementaron luego de la simulación de precipitaciones de 4, 11 y 40 mm al cuarto día desde la fertilización. Resultados opuestos fueron observados por Craig y Wollum (1982), quien 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, el efecto de las precipitaciones sobre las pérdidas por volatilización estaría relacionado no solo a la cantidad registrada sino también al tiempo transcurrido desde la aplicación.

Para finalizar, según la distribución de los datos, el rendimiento del cultivo se dividió en 2 clases (>10,5 y ≤10,5 t ha^{-1}). No se determinaron diferencias significativas en las pérdidas de N por volatilización entre grupos (***Figura 2 F***). No obstante, se observó cómo tendencia, una menor pérdida de N en ambientes de mayor rendimiento (***Tabla 4***). Otros trabajos han determinado aumentos en la EUN en ambientes de mayor potencial de rendimiento de maíz (Salvagiotti *et al.* 2011; Correndo *et al.,* 2021), lo cual ayudaría a explicar los resultados del presente estudio. En general, una mayor EUN es producto de una menor pérdida de N del sistema por diferentes vías (Sainz Rozas *et al.,* 2004).

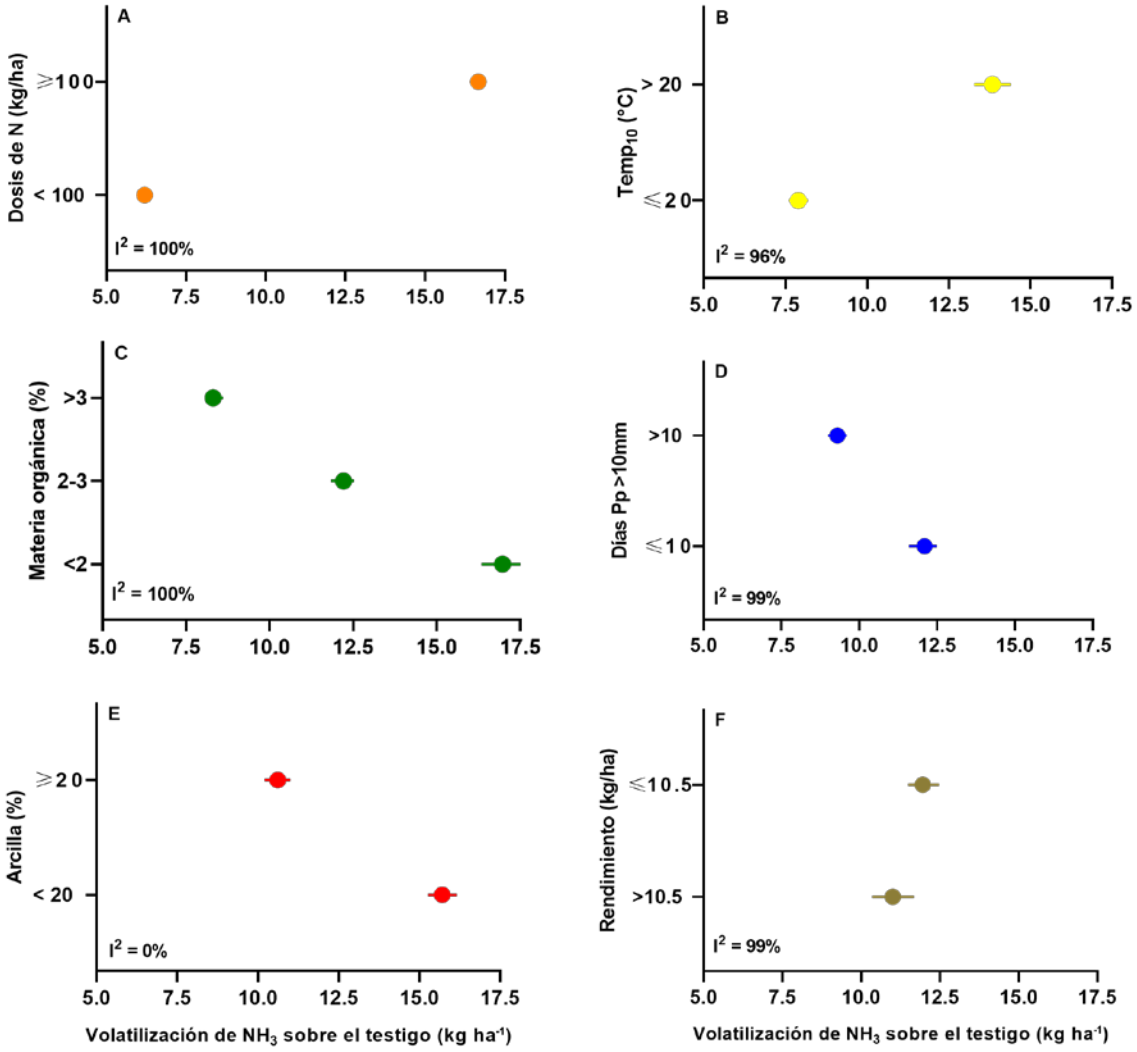

Figura 2. Pérdidas de N por volatilización sobre el testigo en función de: **A)** dosis de nitrógeno, **B)** temperatura post-aplicación, **C)** contenido de materia orgánica **D)** días hasta lluvias mayores a 10 mm, **E)** contenido de arcilla (%) y **F)** rendimiento (kg ha^{-1}). Las líneas indican el intervalo de confianza al 95%. I^2 = estadístico I cuadrado.

3.3. Inhibidor de la ureasa

En la ***Figura 3 y 4*** se presentan la relación entre las pérdidas de N por volatilización de la urea con y sin inhibidor expresadas en % y kg N ha^{-1}. En la ***Figura 3*** se observa que el porcentaje de pérdida de NH_3 se redujo en un 69% cuando se utilizó la fuente con inhibidor de la actividad ureásica. La pendiente de la ecuación indica que, para cultivos de maíz por cada 1 % de pérdida de N por volatilización con urea, solo se pierde 0,31 % si se emplea un inhibidor. Similar tendencia se observó cuando se expresó en kg ha^{-1} (***Figura 4***). En promedio, las pérdidas fueron de 11,7 y 2,8 kg N ha^{-1} para urea sin y con inhibidor, respectivamente. 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 amoniaco del fertilizante (Watson *et al.,* 1994; Sainz Rozas *et al.,* 1999; Barbieri *et al.,* 2003; Ferraris *et al.,* 2010).

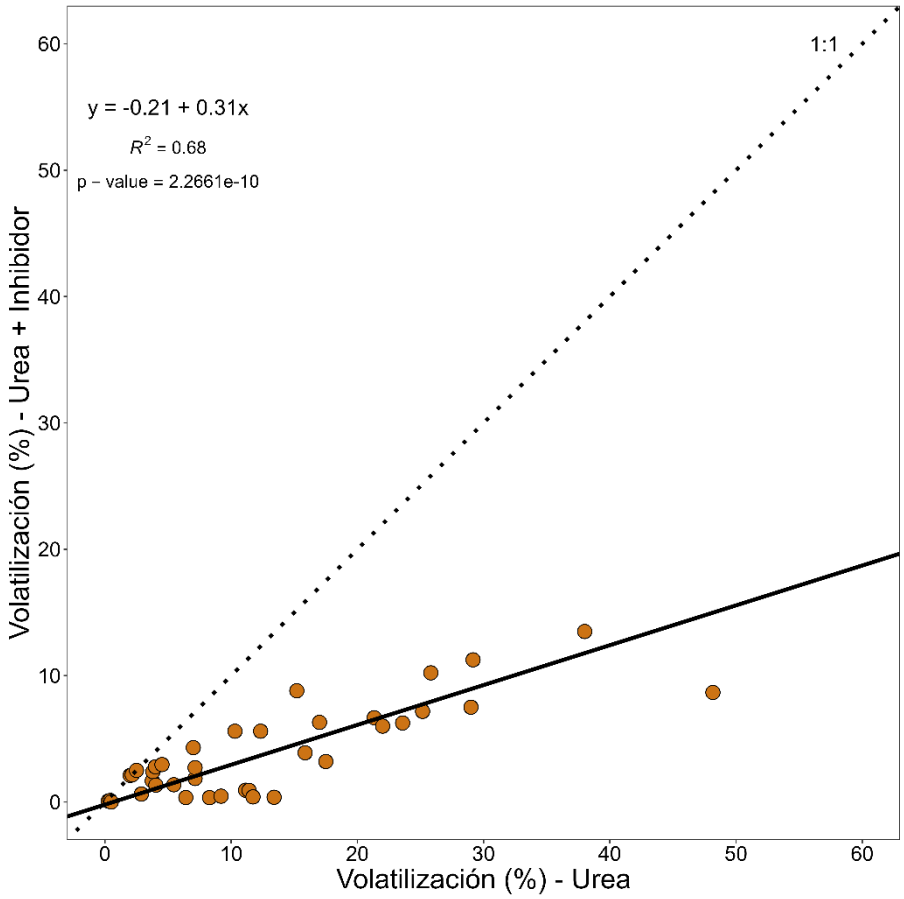

Figura 3. Relación entre el porcentaje de pérdidas por volatilización con y sin inhibidor (Urea + Inhibidor y Urea)**.** La línea punteada indica la relación 1:1.

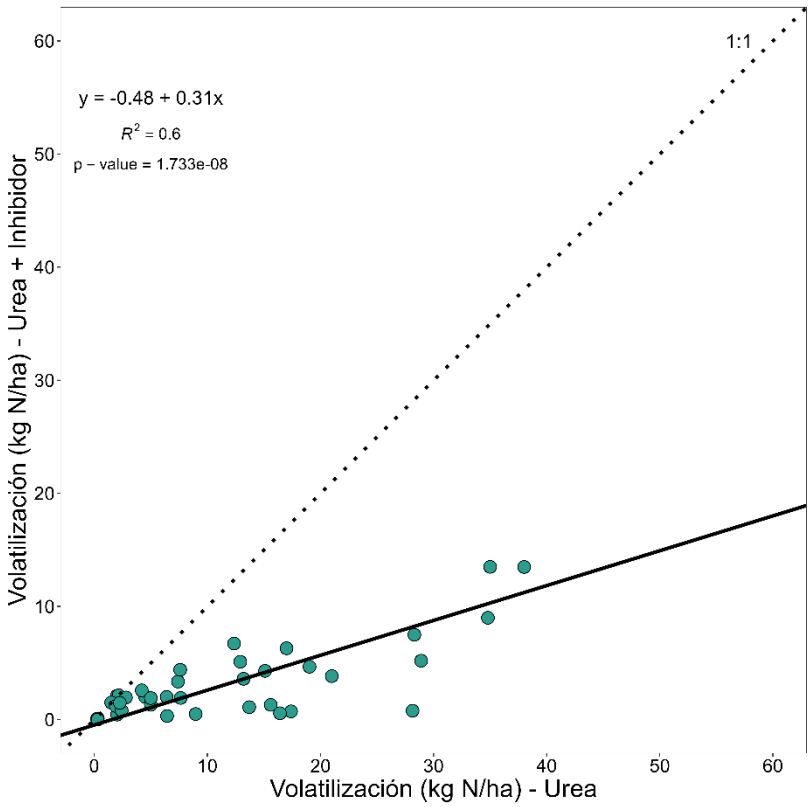

Figura 4. Relación entre la perdida de N por volatilización (kg N ha^{-1}) con y sin inhibidor (Urea + Inhibidor y Urea)**.** La línea punteada indica la relación 1:1.

El rendimiento promedio del cultivo de maíz fertilizado con urea fue de 10.430 kg ha^{-1} y urea con inhibidor de 10.981 kg ha^{-1}, 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 ***(Figura 5***). Cuando se testeo la pendiente y la ordenada al origen las mismas difirieron de 1 y 0, respectivamente (p< 0,05). En maíces tardíos, Zubillaga *et al*. (2021), determinaron para aplicaciones superficiales de urea reducciones del 13% en las pérdidas por volatilización por efecto del empleo del inhibidor, sin embargo, las diferencias en rendimiento fueron no significativas. Asimismo, en un metanálisis realizado por 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.

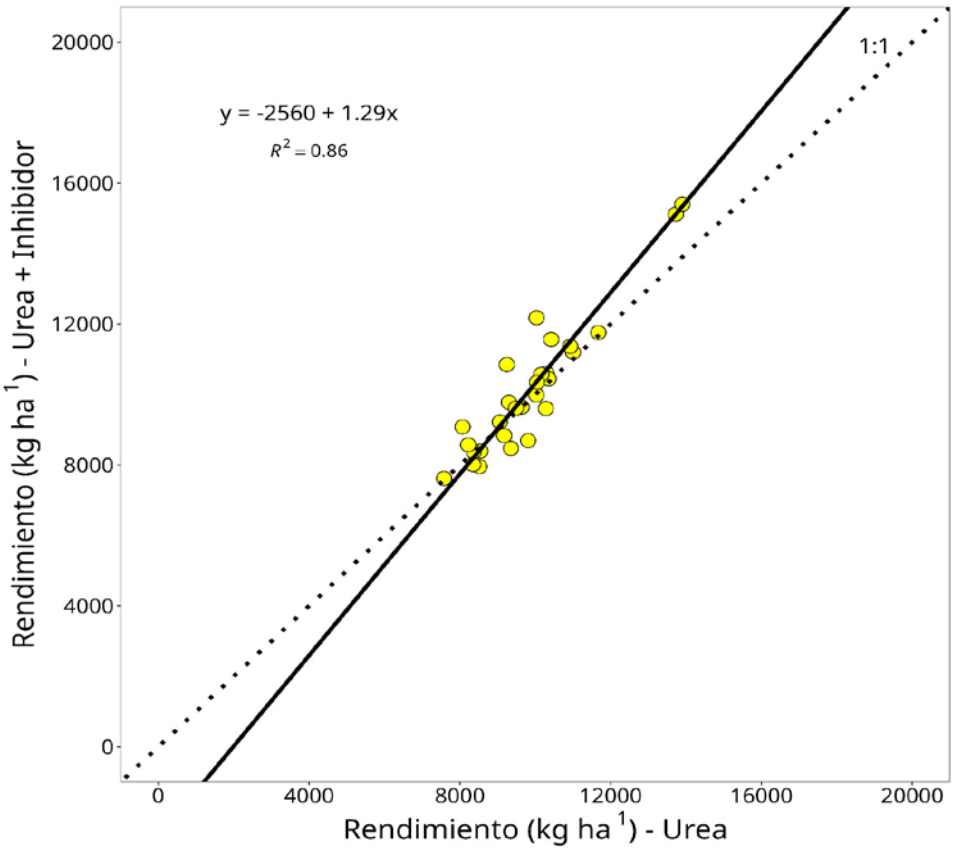

Figura 5. Relación entre el rendimiento del cultivo de maíz por efecto de la fertilización nitrogenada con y sin inhibidor (Urea + Inhibidor y Urea)**.** La línea punteada indica la relación 1:1.

Para finalizar, la PPF y la EUN fueron en promedio de 136 y 138 kg kg^{-1} y 19 y 22 kg kg^{-1} para el tratamiento con urea y urea con inhibidor, respectivamente. Para ambos indicadores de eficiencia de uso, el efecto del inhibidor fue no significativo ($p > 0.05$). Además, la PPF solo aumentó en un 2% por efecto del inhibidor (***Figura 6***). Para el caso de la EUN, la misma fue solo un 6% mayor cuando la urea se trató con el inhibidor (***Figura 7***). 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 (Ferraris *et al.,* 2010; Bono *et al.,* 2011; Ferraris *et al.,* 2015).

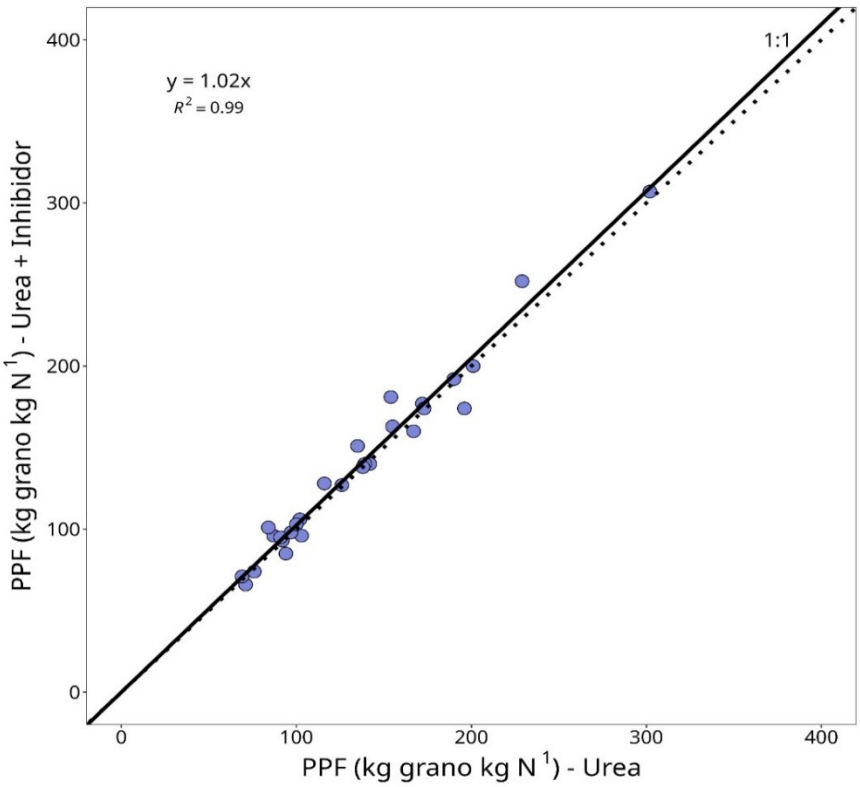

Figura 6. Relación entre la productividad parcial del factor (PPF) de maíz fertilizado con y sin inhibidor (Urea + Inhibidor y Urea)**.** La línea punteada indica la relación 1:1.

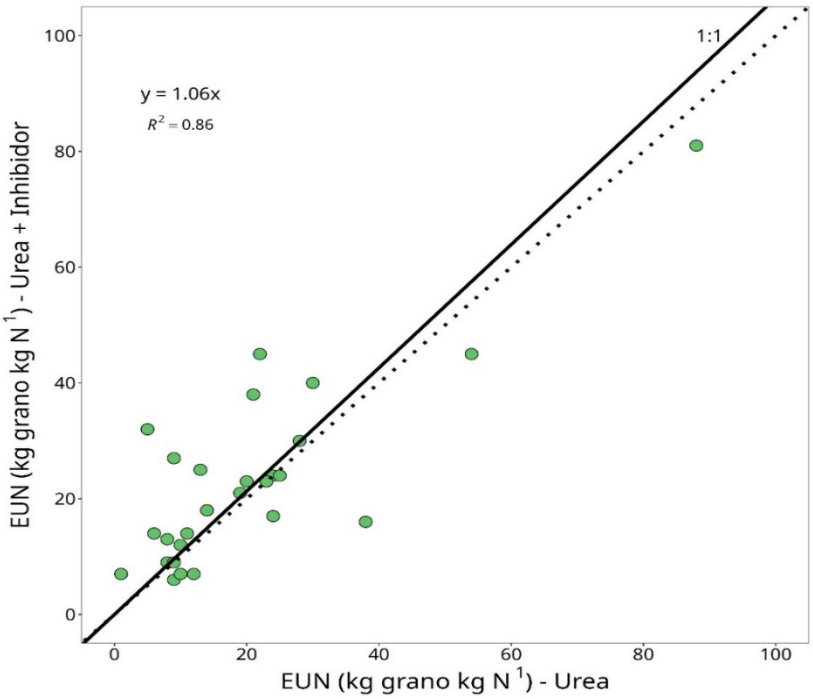

Figura 7. Relación entre la eficiencia de uso de nitrógeno en maíz fertilizado con y sin inhibidor (Urea + Inhibidor y Urea)**.** La línea punteada indica la relación 1:1.

4. CONCLUSIONES

Se recopilaron evidencias suficientes para rechazar la hipótesis 1, dado que, si bien la temperatura media del aire explicó las pérdidas de nitrógeno por volatilización, la contribución del porcentaje de arcilla y materia orgánica fue superior. No rechazar la hipótesis 2, dado que la dosis de nitrógeno es la variable que en mayor medida explica las pérdidas de N por volatilización de amoniaco. Rechazar parcialmente la hipótesis 3, dado que, si bien el empleo de inhibidores de la actividad ureasa reduce las pérdidas de N por volatilización, el mismo no afectó el rendimiento ni los indicadores de EUN.

Los resultados del presente trabajo contribuyen a la toma de decisión sobre una correcta fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz, ya que minimizan la incertidumbre de la fuente a aplicar, momento y forma de aplicación (superficial o incorporado). Además, la jerarquización de los factores de suelo y clima ayudan al productor a tomar decisiones de manejo, según el momento de aplicación del N en el cultivo de maíz e incluso la importancia de la determinación de la dosis de N a aplicar. La agricultura sustentable, implica entre otros factores, brindar información que el productor agropecuario necesita para la implementación de las mejores prácticas de manejo de los nutrientes, sabiendo que con ello se mejora la eficiencia de uso y se reducen las externalidades del sistema.

BIBLIOGRAFIA

Andrada, D. y Elizalde, L. (2013). Fertilización nitrogenada en maíces de siembras tardías en la región semiárida pampeana: Perdidas de N-NH3 por volatilización y eficiencia de uso de nitrógeno. Trabajo Final de graduación. UNLP 2013.

Bandel, V. A., Dzienia, S. & Stanford, G. (1980). Comparison of fertilized for no-till corn. Agron. J 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 amoniaco por volatilización desde urea con inhibidor de la actividad ureásica y de la nitrificación en maíz bajo siembra directa. EEA INTA Balcarce. Datos inéditos.

Barbieri, P. A., Echeverría, H. E., y Sainz Rosas, H. (2018). Pérdidas por volatilización y eficiencia de uso de nitrógeno en maíz en función de la fuente, dosis y momento de aplicación. Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata (2018) Vol. 117 (1): 111-116.

Basta, N. T., Pantone, D. J. & Tabatabai, M. A. (1993). Path analysis of heavy metal adsorption by soil. Agron. J. 85, 1054-1057. DOI: https://doi.org/10.2134/agronj1993.00021962008500050018x.

Beyrouty, C. A., Sommers, L. E. & Nelson, D. W. (1988). Ammonia volatilization from surface-applied urea as affected by several phosphoroamide compounds. Soil Soc. Am. J. 52: 1173-1178.

Black, A. S., Sherlock, R. R., Cameron, K. C., Smith, N. P. & Goh, K. M. (1985). Comparison of three field methods for measuring ammonia volatilization from urea granules broadcast on to pasture. Eur. J. Soil Sci. 36:271–280. doi:10.1111/j.1365-2389.1985. tb 00331x.

Bolsa de Cereales Bs. As. (2021). Informe Cierre de Campaña Maíz 2020-21. PAS. Septiembre 2021.

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-NH3 por volatilización y rendimiento en maíz utilizando distintas fuentes nitrogenadas en la región semiárida pampeana. 2011. EEA INTA Anguil.

Bono, A. y Álvarez, R. (2012). Nitrogen mineralization in a coarse soil of the semi-arid Pampas of Argentina. Archives of Agronomy and Soil Science DOI:10.1080/03650340.2011.625413.

Borenstein, C., Hedges, L. V., Higgins, J. P. T. & Rothstein, H. R. (2019). Chapter 12: Random-effects model. In: Introduction to meta-analysis. John Wiley & Sons, Ltd, 2009, 69-75. https://doi.org/10.1002/978470743386.

Buschiazzo, D. E., Aimar, S. & Zobeck, T. (1999). Wind erosion in soils of the semiarid Argentinean Pampas. Soil Science 164. Pp 133-138.

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

Carmona, G., Christianson, C. B. & Byrnes, B.H. (1990). Temperature and low concentration effects of the urease inhibitor N-(nbutyl) thiophosphoric triamide (nBTPT) on ammonia volatilization from urea. Soil Biol. Biochem. 22: 933–937. doi:10.1016/0038-0717(90)90132-J.

Chien, S. H., Edmeades, D., McBride, R. & Sahrawat, K. L. (2014). Review of maleic–itaconic acid copolymer purported as urease inhibitor and phosphorus enhancer in soils. Agron. J. 106: 423–430. doi:10.2134/agronj2013.0214.

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.

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., Alvarez, 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., Ferrari, M., Ferraris, G. N., Gambaudo, S., Gudelj, V., Loeleu, J. P., Melchiori, R. J. M., Molinow, J., Orcellet, J. M., Pagani, A., Pautasso, J. M., Reussi Calvo, N. I., Redel, M., Rillo, S., Rimski-Korsakov, H., Sainz-Rozas, H. R., Saks, M., Tellería, M. G., Ventimiglia, L., Zorzín, J. L., Zubillaga, Ma. M. y Salvagiotti, F. (2021). Attainable yield and soil texture as drivers of maize response to nitrogen: A synthesis analysis for Argentina. Field Crops Research 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 Sci. Soc. Am. J. 4:409-414.

Creason, G. L., Schmitt, M. R., Douglass, E. A. & Hendrickson, L. L. (1990). Urease inhibitor activity associated with N-(n-butyl)thiosphosphoric triamide is due to the formation of its oxon analog. Soil Biol. Biochem. 22:209–211. doi:10.1016/0038-0717(90)90088-H.

Da Ros, C. O., Aita, C. & Giacomini, S. J. (2005). Ammonia volatilization after urea surface applied in corn no-tillage. (In Portuguese, with English abstract.) Cienc. Rural 35:799–805. doi:10.1590/S0103-84782005000400008.

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. (2001). Eficiencia de recuperación del nitrógeno aplicado al estadio de seis hojas del maíz bajo riego en siembra directa y labranza convencional. Ciencia del Suelo. 19:57-66.

Echeverría, H. E. y Sainz Rozas, H. R. (2015). Nitrógeno. En: Echeverría, HE & FO García (eds.) 2ª edición. Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. INTA, Buenos Aires, Argentina. pp. 189-228.

Engel, R. E., Jones, C. & Wallander, R. (2011). Ammonia volatilization from urea and mitigation by NBPT following surface application to cold soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 75:2348–2357. doi:10.2136/sssaj2011.0229.

Engel, R. E., Willians, E., Wallander, R. & Hilmer, J. (2013). Apparent persistence of N-(n-butyl) thiophosphoric triamide is greater in alkaline. Soil Sci. Soc. Am. J. 77:1424–1429. doi:10.2136/sssaj2012.0380.

Ernst, J. W. & Massey, J. F. (1960). The Effects of several factors on volatilization of ammonia formed from urea in the soil. Soil Sci. Soc. Am. 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 aplications. Soil Sci. Soc. Am. 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 Sci. Am. J. 2:578-582.

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., 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 Nº 106. pp 85-113 INTA EEA Rafaela.

Fontanetto, H., Gambaudo, S., Keller, O., Albrecht, J., Giailevra, 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 Nº 118. INTA EEA Rafaela.

Fox, R. H. & Bandel, V. A. (1986). Nitrogen utilization with no-tillage In: No-Tillage and Surface-Tillage Agriculture. He Tillage Revolution, M A Sprage and G B Triplett, ed. pp. 117-255. John Wiley and Sons. USA.

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. Agron. J. 78:741-746.

Fox, R. H. & Piekielek, W. P. (1993). Management and urease inhibitor effect on nitrogen use efficiency in no-till corn. J. Prod. Agr. 6:195-200.

Garcia, F. O., Fabrizzi, K. P., Picone, L. I. y Justel, J. F. (1999). Volatilización de amonio a partir de fertilizantes nitrogenados aplicados superficialmente bajo siembra directa y labranza convencional en Argentina. XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Pucón. Actas en CD.

Gioacchini, P., Nastri, 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. Biol. Fertil. Soils 36:129–135. doi:10.1007/s00374-002-0521-1.

Halvorson, A.D., Snyder, C.S., Blaylock, A.D. & Del Grosso, S.J. (2013). Enhanced-efficiency nitrogen fertilizers: Potential role in nitrous oxide emission mitigation. Agron. J. 105:715–722. doi:10.2134/ agronj2013.0081.

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.

Hargrove, W. L., Bock, B. R. & Urban, W. J. (1988). Comparison of nitrogen sources for surface application to winter wheat. Journal Fertilizer Issues.5:45-49.

Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L. & Beaton, J. D. (2016). Soil Fertility and Fertilizers, 8th edition. Editorial: PEARSON, 2016.

Hedges, L. V., Gurevitch, J. & Curtis, P. S. (1999). The Meta-Analysis of Response Ratios in Ecology. Ecology 1999, 80, 1150–1156.

Hendrickson, L. L. & Douglass, E. A. (1993). Metabolism of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT) in soils. Soil Biol. Biochem. 25:1613–1618. doi:10.1016/0038-0717(93)90017-6.

Higgins, J. P. T., Thompson, S. G., Deeks, J. J. & Altman, D. G. (2003). Measuring inconsistency in meta−analyses. BMJ, Sep 2003; 327: 557 − 560

Holcomb, J. C., Sullivan, D. M., Horneck, D. A. & Clough, G. H. (2011). Effect of irrigation rate on ammonia volatilization. Soil Sci. Soc. Am J 2011: 75 (6):2341–7.

Howar, D. D. & Tyler, D. D. (1989). Nitrogen source, rate, and application method for no-tillage corn. Soil. Sci. Soc. Am. J. 53:1573-1577.

IFA International Fertilizer Association. Fertilizer outlook 2017–2021. IFA annual conference – 22–24 May 2017 Marrakech (Marocco). Paris: IFA International Fertilizer Association, Services PITaA; 2017 June 2017.

Joo, Y. K., Christians, N. E., Spear, G. T. & Bremner, J. M. (1992). Evaluation of urease inhibitors as urea amendments for use on Kentuky Bluegrass turf. Crop Sci. 32: 1397-1401.

Keller, G. D. & Mengel, D. B. (1986). Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers surface applied to no-till corn. Soil Sci. Am. J. 50:1060-1063.

Kissel, D. E. & Cabrera, M. L. (1988). Factor affecting urea hydrolysis. In ‘Ammonia volatilization from urea fertilizers’. (Eds BR Bock, DE Kiessel) pp. 53–66. (National Fertilizer Development Center,TVA: Muscle Shoals).

Kissel, D., Cabrera, M., Vaio, N., Craig, J., Rema, J. & Morris, L. (2004). Rainfall timing and ammonia loss from urea in a loblolly pine plantation. Soil Sci. Soc. Am. J. 68:1744-1750.

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.

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.

Lewis, S. & Clarke, M. (2001). Forest plots: trying to see the wood and the trees. Br. Med. J. 322, 1479–1480.

Li, S., Li, J., Lu, J. & Wang, Z. (2015). Effect of mixed urease inhibitors on N losses from surface-applied urea. Int J Agric Sci Technol 2015;3(1):23–7.

Li, Q., Yang, A., Wang, Z., Roelcke, M., Chen, X. & Zhang, F. S. Effect of a new urease inhibitor on ammonia volatilization and nitrogen utilization in wheat in north and northwest China. Field Crop Res 2015;175:96–105.

Manunza, B., Deiana, S., Pintire, M. & Gessa, C. (1999). The binding mechanism of urea, hydroxamic acid and N-(N-butyl)-phosphoric triamide to the urease active site: a comparative molecular dynamics study. Soil Biol. Biochem. 31:789–796. doi:10.1016/S0038-0717(98)00155-2.

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.

Martínez, F., Cordone, G. y Buschittari, D. (2006). Alternativas de manejo según la capacidad productiva del suelo. Combinación del híbrido y la dosis de N. En: Para Mejorar la Producción Nº 32. EEA Oliveros INTA. 103 – 105 pp.

McCarty, G. W., Bremner, J. M. & Chai, H. S. (1989). Effect of N-(n-butyl) thiophosphoric triamide on hydrolysis of urea by plant, microbial, and soil urease. Biol. Fertil. Soils 8:123–127. doi:10.1007/BF00257755.

McInnes, K. J., Ferguson, R. B., Kissel, D. E. & Kanemasu, E. T. (1986). Field measurements of ammonia loss surface applications of urea solution to hare soil. Agron. J. 78:192-196.

Melgar, R. (2012). Guía de fertilizantes, enmiendas y productos nutricionales. Fertilizar asociación civil. ISBN: 978-987-27584-0-0 Argentina. 201 pp. https://fertilizar.org.ar/publicaciones/#iLightbox[gallery-rw-2]/6

Nommik, H. (1973). The effect of pellet size on the ammonia loss from urea applied to forest soil. Plant Soil. 39:309-318.

Okumura, R. S. e Mariano, D., C. (2012). Agronomic aspects of urease inhibitor-treated urea. (In Portuguese, with English abstract.) Ambiencia 8:403–414. doi:10.5777/ambiencia.2012.02.02rb.

Philibert, A., Loyce, C. & Makowski, D. (2011). Assessment of the quality of meta-analysis in agronomy. Agric. Ecosyst. Environ. 2012, 148, 72–82. https://doi.org/10.1016/j.agee2011.12.003.

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/.

ReTAA. (2021). Relevamiento de Tecnología Agrícola Aplicada. Informe mensual N°51. Maíz 2020/21. Diciembre 2021. bolsadecereales.org/retaa ISSN 2591-4871.

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 Nº48 pp. 24.

Romano N y A Bono 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. Agron. J. 75: 593-598.

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. y Barbieri, P. A. (2004). Nitrogen balance is affected by application time and nitrogen fertilizer rate in irrigated no-tillage maize in Argentina. Agron. J. 96: 1622-1631.

Sainz Rozas, H. R., Echeverría, H. E., Angelini, H. P. (2011). Niveles de Carbono organico y pH en Suelos Agricolas de las Regiones Pampeana y Extrapampeana. Ciencia del Suelo, 29 (1): 29-37, 2011.

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 optima 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.

Sangoi, L., Ernani, P. R., Lech, V. A. & Rampazzo, C. (2003). Volatilization of N-NH3 influenced by urea application forms, residue management and soil type in lab conditions. (In Portuguese, with English abstract.) Cienc. Rural 33:687–692. doi:10.1590/S0103-84782003000400016.

Scharf, P. C., Wiebold, W. J. & Lory, J. A. (2002). Corn Yield Response to Nitrogen Fertilizer Timing and Deficiency Level. Agron. J. 94:435-441.

Schraml, M., Gutser, R., Maier, H. & Schmidhalter, U. (2016). Ammonia loss from urea in grassland and its mitigation by the new urease inhibitor 2-NPT. J Agric Sci;154(8):1453–62.

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.

Singh, J., Kunhikrishnan, A., Bolan, N. S. & Saggar, S. (2013). Impact of urease inhibitor on ammonia and nitrous oxide emissions from temperate pasture soil cores receiving urea fertilizer and cattle urea. Sci. Total Environ. 465:56–63. doi:10.1016/j. scitotenv.2013.02.018

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. Agron. J. 85: 645-650.

Sutton, M. A., Bleeker, A., Howard, C. M., Bekunda, M., Grizzetti, B. & de Vries, W. (2013). Our Nutrient World: the challenge to produce more food and energy with less pollution... Edinburgh, NERC/Centre for Ecology & Hydrology, 114 pp.

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/webprogram/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. Agron. J., 104(6):1658–1671. http://doi.org/10.2134/agronj2012.0184

Uhart, S. A. y Andrade, F. H. (1995). Nitrogen Deficiency in Maize: II. Carbon-Nitrogen interaction effects on kernel number and grain yield. Crop Sci. 35: 1384-1389.

Upadhyay, L. S. B. (2012). Urease inhibitors: A review. Indian J. Biotechnol. 11:381–388.

Vahed, H. S., Shahinrokhsar, P. & Rezaei, M. (2011). Influence of some soil properties and temperature on urease activity in wetland rice soils. Am.-Eurasian J. Agric. Environ. Sci. 11:310–313.

Van der Weerden, T. J. & Jarvis, S. C. (1997). Ammonia emission factors for N fertilisers applied to two contrasting grassland soils. Environ. Poll. 95: 205–211.

Viechtbauer, W. (2010). Conducting meta-analyses in R with the metafor package. J. Stat. Softw. 2010, 36(3), 1-48.. https://doi.org/10.18637/jss.v036.i03.

Wahl, M., Kirsch, R., Brockel, U., Trapp, S. & Bottlinger, M. (2006). Caking of urea prills. Chem. Eng. Tech. 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 tha abilty of the urease inhibitor N-(n-Butyl) thiophosphoric triamide (*nBPTP*) to reduce ammonia volatilization from surface-applied urea. Soil. Biol. Biochem. 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. Agron. J. 82: 1022-1024.

Zubillaga, M. M., M. S. Zubillaga y R. Álvarez. (2021). Aplicación de fertilizantes en cultivos extensivos. Capítulo 21. En libro Fertilidad de suelos y Fertilización en la Región Pampeana. CABA, Editorial Facultad de Agronomía. 2da edición febrero 2021.