

Pérdidas de nitrógeno por volatilización y eficiencia de uso en maíz desde urea aplicada en diferentes momentos

April 26, 2023

Barbieri, P.A.¹; Echeverría, H.E.¹; Saínz Rozas, H.R.^{1,2}

RESUMEN

La volatilización de amoníaco ($N-NH_3$) es una importante vía de pérdida de nitrógeno (N) desde fertilizantes nitrogenados. En tal sentido, existe la necesidad de desarrollar estrategias de manejo que maximicen la eficiencia de uso de N (EUN). El objetivo de este trabajo fue evaluar las pérdidas por volatilización, rendimiento, N en grano, EUN y sus componentes: eficiencia fisiológica (EF) y de recuperación (ER) en el cultivo de maíz bajo SD, al momento de aplicación (siembra, V3 y V6) y dosis de N (0, 60 y 120 kg N ha⁻¹). Para las condiciones en las cuales se desarrolló esta experiencia, las pérdidas por volatilización de $N-NH_3$ se extendieron por un período de 7 días desde la fertilización para los momentos de siembra y V3, mientras que para V6 fue de 6 días desde la fertilización. En general, las pérdidas de $N-NH_3$ se incrementaron con la dosis de N, siendo mayores desde el tratamiento 120 kg N ha⁻¹, mientras las pérdidas desde el tratamiento 60 kg N ha⁻¹ no difirieron de las del tratamiento 0N. Las pérdidas totales de $N-NH_3$ no fueron afectadas por el momento de aplicación (7,0; 9,2 y 10,6% del N aplicado para los momentos de siembra, V3 y V6, respectivamente) y se incrementaron significativamente por la dosis de N (6,5 y 13,8% del N aplicado para las dosis de 60 y 120 kg ha⁻¹, respectivamente). El rendimiento, N en grano, EUN y sus componentes no fueron afectados por el momento de aplicación, solamente se determinó efecto significativo de la dosis de N sobre estas variables (9327, 10413 y 10800 kg ha⁻¹ de rendimiento para 0, 60 y 120 kg ha⁻¹, respectivamente y 99, 122 y 146 kg ha⁻¹ de N en grano para 0, 60 y 120 kg ha⁻¹, respectivamente). En síntesis, para las condiciones en que se desarrolló esta experiencia, las pérdidas por volatilización de $N-NH_3$ solamente se incrementaron significativamente por la dosis de N, sin efecto del momento de aplicación.

Palabras clave: nitrógeno, volatilización de $N-NH_3$, siembra directa, dosis, momento de aplicación.

ABSTRAC

Ammonia volatilization losses ($N-NH_3$) is an important way of nitrogen (N) losses from fertilizer. Therefore, is imperative to determine management practice to increase N use efficiency (EUN). The objective was to evaluate ammonia volatilization losses, grain yield, grain N content, EUN and its components: physiological efficiency (EF) and recovery efficiency (ER) to fertilization time (Showing, V3 and V6) and N rate (0, 60 and 120 kg N ha⁻¹) in no-till corn. Ammonia volatilization losses were extended for a period of 7 day after fertilization for showing and V3 fertilization time while for V6 fertilization time was 6 day after fertilization. In general, volatilization losses were increased with N rate, greater volatilization were determined from treatment 120 Kg N ha⁻¹, while ammonia volatilization losses from treatment 60 kg N ha⁻¹ was not different from treatment 0N. Total $N-NH_3$ volatilization losses were not affected by fertilization time (7.0; 9.2 and 10.6% of N applied for Showing, V3 and V6 fertilization time, respectively), and were increased by N rate (6.5 and 13.8% of N applied for 60 and 120 kg ha⁻¹ N rate, respectively). Corn grain yield, grain N content, N use efficiency (EUN) and its components were not affected by fertilization time, and only were significantly increased by N rate (9327,

¹Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Balcarce, Unidad Integrada Balcarce (UIB), Ruta Nac. 226 km 73.5, (4620), CC276 Balcarce, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: barbieri.pablo@inta.gob.ar

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Godoy Cruz 2290 (1425) Buenos Aires, Argentina.

10413 and 10800 kg ha⁻¹ grain yield for 0, 60 and 120 kg ha⁻¹, respectively and 99, 122 and 146 kg ha⁻¹ grain N content for 0, 60 and 120 kg ha⁻¹, respectively). In synthesis, for the experimental conditions, N-NH₃ volatilization losses only were increased by N rate between without effect of N application time.

Keywords: nitrogen, N-NH₃ volatilization, no-till, N rate, fertilization time.

INTRODUCCIÓN

La intensificación de la agricultura y la utilización de variedades de mayor potencial productivo, entre otros factores, han incrementado las dosis de fertilizantes, especialmente con nitrógeno (N). El N es el nutriente que en mayor medida condiciona el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Echeverría y Sainz Rozas, 2015). El N debe estar bien provisto en cantidad y oportunidad como para asegurar un óptimo estado fisiológico de los cultivos durante el período crítico, momento en el cual se define el rendimiento de estos. El sistema de siembra directa (SD) produce una serie de cambios en el ambiente edáfico, el más relevante es la menor disponibilidad de N mineral durante los primeros años de su implementación (Fox y Bandel, 1986). Por lo tanto, la fertilización nitrogenada con dosis mayores es una práctica necesaria para la obtención de similares rendimientos que bajo labranza convencional (Dominguez et al., 2001).

Normalmente, bajo SD los fertilizantes nitrogenados son aplicados sobre la superficie del suelo. En estas condiciones, las fuentes de N que contienen urea, pueden resultar menos eficientes debido a las pérdidas por volatilización bajo la forma de amoníaco (N-NH₃) (Barbieri et al., 2003; Sainz Rozas et al., 2004; Barbieri et al., 2018). En el suelo, la urea es hidrolizada a amonio (NH₄⁺) por la enzima ureasa. La hidrólisis resulta en el consumo de protones con el consiguiente aumento del pH alrededor del gránulo de fertilizante, lo que a su vez favorece la formación de NH₃ por un desplazamiento en el equilibrio NH₄⁺ a NH₃, provocando pérdidas por volatilización de N-NH₃ aun en suelos ácidos.

La magnitud de las pérdidas en sistemas de SD es afectada por factores ambientales (humedad, temperatura y viento), de suelo (pH, capacidad buffer, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica) y de cultivo (cantidad y tipo de residuos de cosecha y fuente y dosis de N) (Ferguson et al., 1984; Sainz Rozas et al., 1999; Barbieri et al., 2003 y 2010). A su vez, una rápida hidrólisis de la urea resulta en mayores pérdidas potenciales de N-NH₃; dado que la velocidad de hidrólisis depende de la actividad ureásica, factores que la modifican como la concentración de urea, el pH, la temperatura y el contenido de agua (Kiessel y Cabrera, 1988) afectarán la magnitud de las pérdidas. A su vez, la actividad de la ureasa está directamente relacionada con el contenido de C orgánico, presencia de re-

siduos de cosecha y N total del suelo (Reynolds et al., 1985; McInnes et al., 1986).

Las pérdidas por volatilización son más elevadas cuando las temperaturas del suelo se incrementan en un rango de 10 a 50 °C (Hargrove, 1988). En tal sentido, las pérdidas por volatilización son más importantes para cultivos de verano. Por ende, cuando el fertilizante es aplicado al cultivo de maíz al momento de la siembra o en V6, se producirán pérdidas variables de N como consecuencia de cambios en la temperatura del suelo. En Balcarce, para aplicaciones de urea al momento de la siembra (promedio de dos años) se determinaron pérdidas por volatilización del 2,5 y 5,5% del N aplicado para las dosis de 70 y 140 Kg N ha⁻¹, respectivamente. Sin embargo estas fueron del 7,1 y 11,5% del N aplicado para el estadio de V6, esto es debido a las mayores temperaturas de suelo que predominan en diciembre. Cuando la humedad del suelo no limita el proceso de pérdida, la cantidad de amoníaco volatilizado se relaciona con la temperatura del suelo, con temperaturas inferiores a 7 °C no existen pérdidas relevantes por volatilización (Sainz Rozas et al., 1997). Evaluaciones realizadas en Rafaela (región central de la provincia de Santa Fe, Argentina) mostraron pérdidas de N por volatilización del 36% para aplicaciones de urea sobre superficie en V6 bajo SD (Fontanetto y Keller, 2006). Mientras que en maíces tardíos para Pergamino las pérdidas fueron de hasta el 40% (Ferraris et al., 2014). Para Balcarce (SE bonaerense) se han determinado pérdidas por volatilización inferiores al 15% (Sainz Rozas et al., 1997) y escasas o nulas diferencias en rendimiento y eficiencia de uso de N (EUN, kg grano kg N disponible⁻¹) (Sainz Rozas et al., 1999; Barbieri et al., 2018). La menor temperatura y la mayor capacidad buffer de los suelos del SE bonaerense explicarían las diferencias observadas entre localidades.

Las pérdidas por volatilización a partir de urea en el cultivo de maíz bajo SD son dependientes de la dosis utilizada y del momento de aplicación (Sainz Rozas et al., 1997). Si bien las pérdidas por volatilización son mayores a medida que se incrementa la temperatura, otros mecanismos como la desnitrificación y el lavado de N se ven poco afectados (Sainz Rozas et al., 2004). En estadio de V6 el maíz comienza su mayor actividad de crecimiento y consecuentemente incrementa su demanda de agua y N (Ritchie y Hanway, 1982). Esto afectaría la EUN siendo mayor en estadios avanzados V3 o V6 respecto de aplicaciones a la siembra.

Profundidad	Textura	pH	P	MO	N-NO ₃ ⁻
			mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹	kg ha ⁻¹
0-20	Franca	5,7	17,2	52,8	17,2
20-40					11,6
40-60					10,9

Tabla 1. Características edáficas del sitio experimental.

La fertilización nitrogenada es una práctica de manejo necesaria para la obtención de elevados rendimientos. Actualmente, las dosis de N aplicadas se han incrementado, en consecuencia, existe una creciente preocupación sobre las consecuencias ambientales que tiene el empleo de elevadas dosis de N. Por lo tanto, existe la necesidad de evaluar prácticas de manejo que produzcan incrementos en la EUN con el menor impacto ambiental. Dado que en maíz el momento de aplicación de N afecta en gran medida las pérdidas de N-NH₃ por volatilización y en consecuencia la EUN, existe la necesidad de explorar la aplicación de N en diferentes momentos con el objetivo de evaluar cuál produce la máxima EUN.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento fue realizado en la Estación Experimental Agropecuaria del INTA Balcarce, sobre un cultivo de maíz en un lote de prolongada historia agrícola (más de 30 años) y bajo SD en los últimos 5 años, con una cobertura de rastrojo del 80%. El suelo donde se implantó el ensayo fue un Paleudol Petrocálcico con limitación de profundidad por tosca a los 100 cm, algunas de las características se encuentran en la tabla 1.

Para la caracterización climática de la estación de crecimiento se utilizaron registros de las precipitaciones medidas por la Estación meteorológica de la EEA INTA Balcarce, así como registros de la temperatura y radiación media mensual durante el ciclo de crecimiento del cultivo.

A la siembra del cultivo de maíz se aplicaron 100 kg de superfosfato triple con el objeto de que el fósforo (P) no limitara el crecimiento del cultivo. La densidad de plantas logradas fue de 70.000 plantas ha⁻¹, las malezas y los insectos fueron controlados en forma adecuada.

El diseño experimental utilizado fue en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones con un arreglo factorial 3 x 2; tres momentos de aplicación de N (siembra, estadio vegetativo de 3 hojas; V3 y estadio vegetativo de 6 hojas; V6) y dos dosis de N (60 y 120 kg ha⁻¹) aplicadas al voleo en cobertura

total. Además se incorporó un tratamiento control (0 kg N ha⁻¹). Las unidades experimentales fueron de cuatro surcos (2,8 m de ancho por 12 m de longitud).

El método para estimar el N-NH₃ volatilizado consistió en un sistema de absorción semiabierto estático, adaptado del propuesto por Nommik (1973) y utilizado en suelos de la zona por Videla (1994). Este permitió atrapar el NH₃ por medio de un cilindro de polietileno de 30 cm de diámetro por 50 cm de altura que tiene en su parte superior dos planchas de poliuretano (goma espuma) de 1,5 cm de espesor (bandeja con ácido y sumergir la esponja adentro). Estas están embebidas con H₂SO₄ 1 N y separadas 12 cm entre sí. El NH₃ es atrapado por la plancha inferior, mientras que la superior evita que se contamine con NH₃ proveniente de otros lugares. Las planchas se cambiaron cada 24 h y fueron lavadas con 1,5 l de agua desmineralizada. Una alícuota de 25 ml fue alcalinizada con 5 ml de NaOH al 40% y el NH₃ producido se recogió por microdestilación (Keeney y Nelson, 1982) en ácido bórico al 2% hasta completar un volumen de 35 ml. Este fue titulado con H₂SO₄ 0,005 N para determinar la cantidad de N-NH₃ desprendida. Se colocó una cámara por parcela, la que se distribuyó aleatoriamente dentro de esta. Las trampas fueron enterradas en su parte inferior unos 5 a 7 cm dentro del suelo para ser fijadas al suelo y evitar escapes de NH₃ hacia la atmósfera.

Las determinaciones de NH₃ volatilizado se realizaron desde la aplicación del fertilizante hasta la ocurrencia de una precipitación superior a los 10 mm. Durante este período las temperaturas de suelo, a 5 cm de profundidad, fueron estimadas por medio de la siguiente ecuación: $Y = -1,13 + 1,23X$ (Navarro Duymovich, comunicación personal).

en donde Y= temperatura estimada

X= temperatura media diaria del aire

Se realizó muestreo de suelo a la siembra para determinar pH, P disponible y MO. El ensayo se condujo sin limitaciones hídricas durante la floración a fin de poder expresar las eventuales pérdidas de N del sistema. En madurez fisiológica se realizó la cosecha de las espigas, se determinó el rendimiento

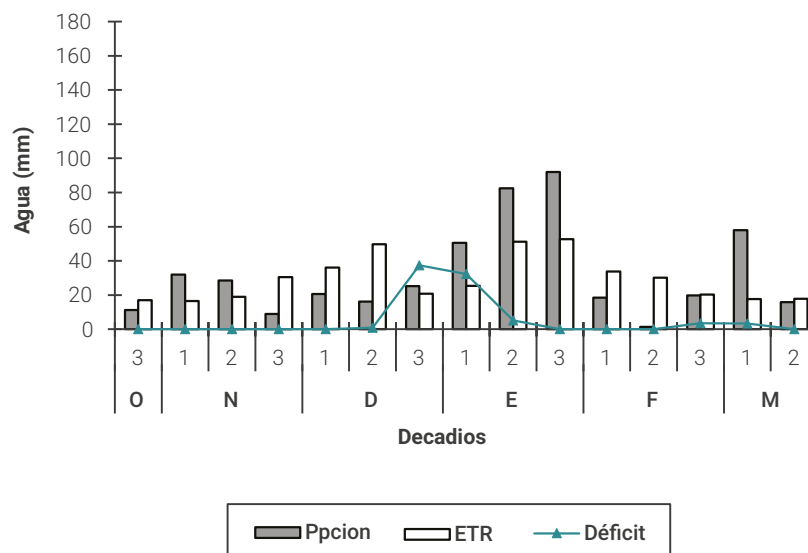


Figura 1. Balance de agua del cultivo de maíz irrigado bajo SD. La línea de triángulos representa los momentos durante el ciclo del cultivo en donde se produjeron deficiencias hídricas.

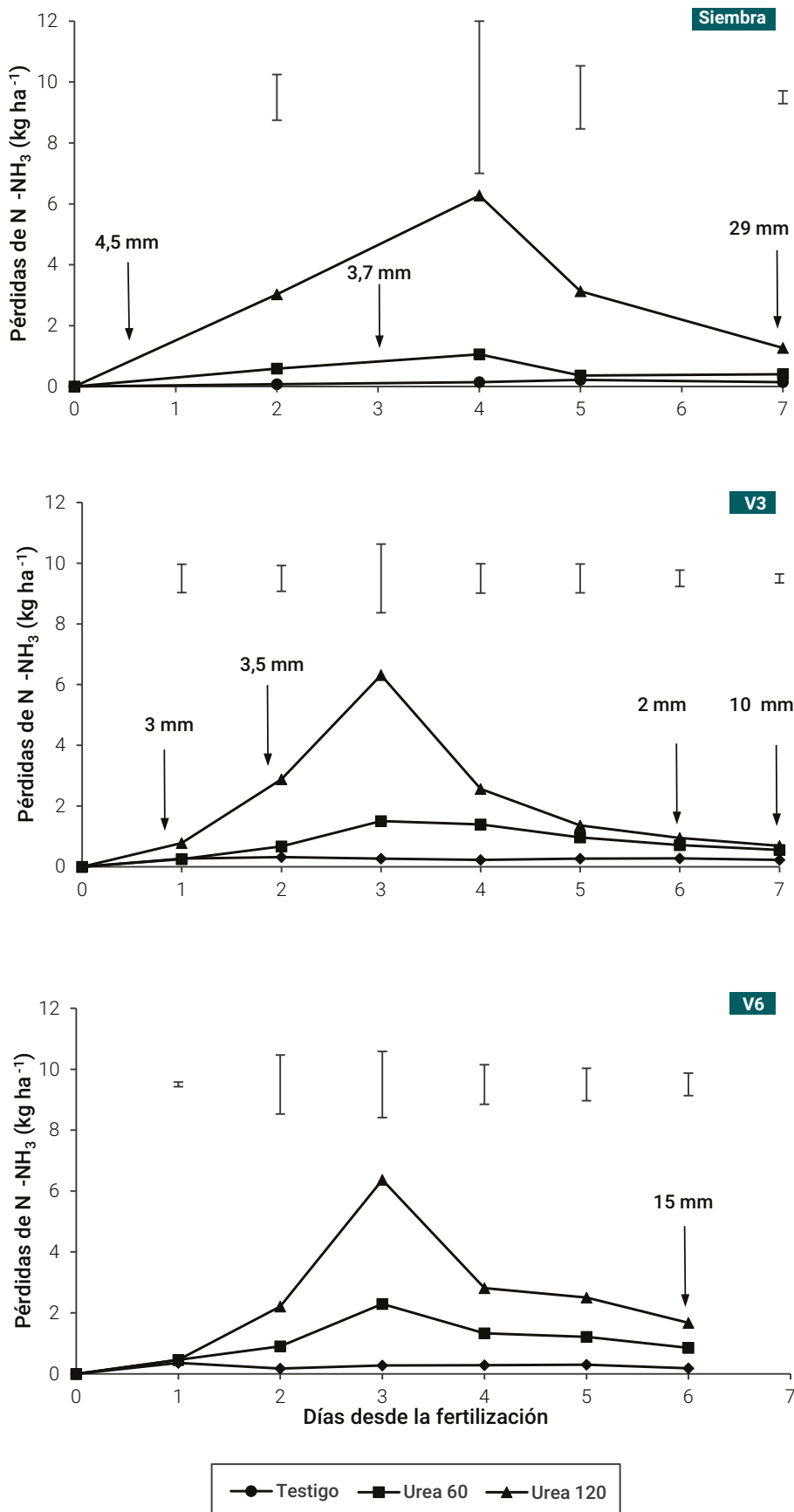


Figura 2. Evolución de las pérdidas por volatilización de N-NH₃ en función del momento de fertilización para el cultivo de maíz bajo SD. Las líneas verticales indican el valor de DMS (5%).

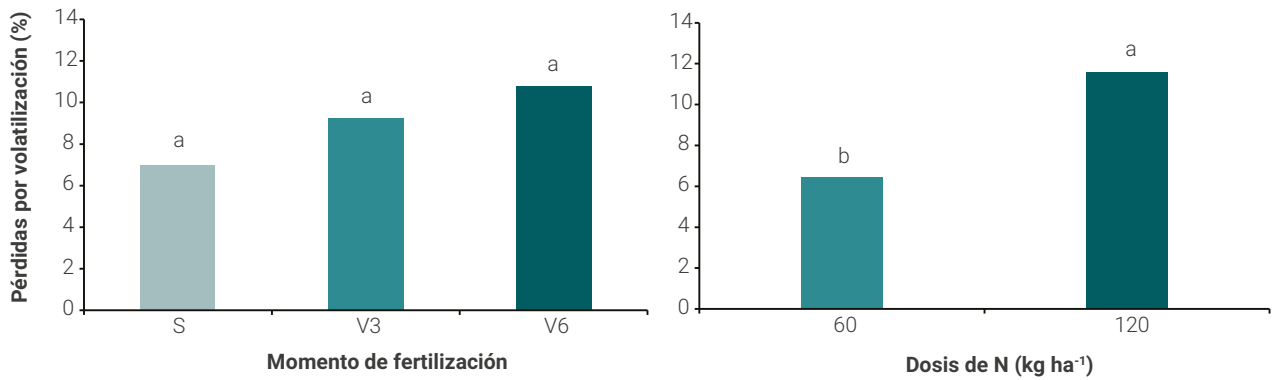


Figura 3. Pérdidas totales de N-NH₃ por volatilización en función del momento de fertilización y la dosis de N para el cultivo de maíz bajo SD. Letras similares sobre las barras indican falta de diferencia entre ellas, según el test de DMS (5%).

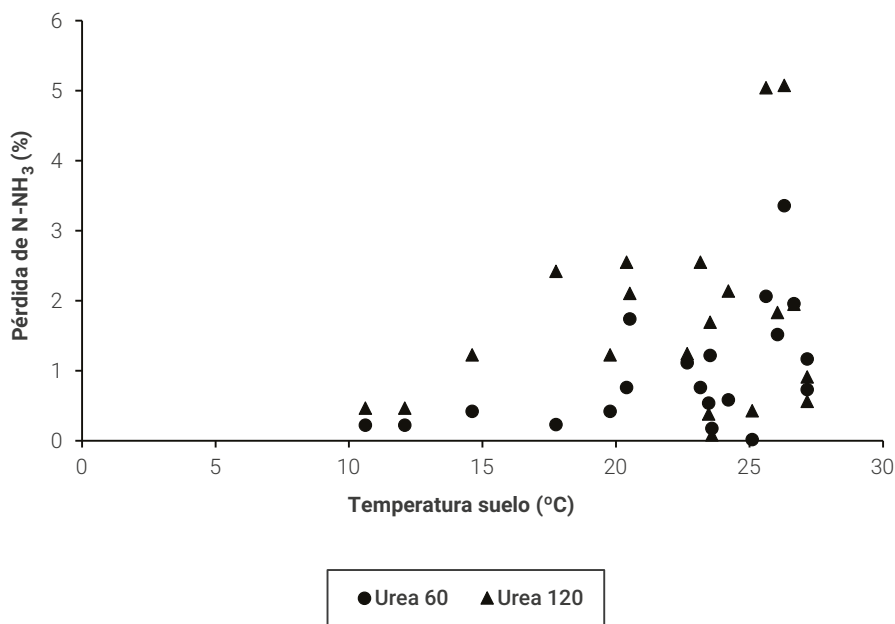


Figura 4. Relación entre las pérdidas diarias de N-NH₃ por volatilización en función de la temperatura de suelo (5 cm).

ajustándose al 14% de humedad. El N orgánico reducido acumulado en grano se determinó por combustión seca (LECO, 2009) utilizando un equipo LECO TruSpec CN. La acumulación de N en grano se calculó multiplicando el rendimiento (0% de humedad) y la concentración de N en grano. Se realizó el cálculo de la eficiencia de uso de N en grano (EUN) [rendimiento en grano (kg)/ N disponible (kg)] como el producto de la eficiencia fisiológica (EF) [rendimiento en grano (kg)/N absorbido en planta o grano (kg)] y la eficiencia de recuperación (ER) [N absorbido en grano (kg)/ N disponible (kg)] (Moll *et al.*, 1982) en general cuando se habla de eficiencia de recuperación se refiere a lo que absorbió el total de la planta. El N disponible se calculó como la suma del N proveniente del suelo (N final - N inicial), el mineralizado y el aplicado como fertili-

zante. El N del suelo fue el determinado previo a la siembra y a la cosecha; para el N mineralizado se utilizó el N absorbido en grano por el testigo (Meisinger *et al.*, 1992).

El análisis de la varianza fue realizado usando el procedimiento GLM incluido en las rutinas del programa Statical Analysis System (SAS) (SAS Institute Inc, 2008). Las diferencias entre medias de tratamiento fueron comparadas usando el test de diferencias mínimas significativas (5%).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones meteorológicas

Las precipitaciones registradas durante el ciclo del cultivo totalizaron 331 mm, este valor es inferior a la evapotranspi-

Tratamientos	Dosis de N	Vol Total	Rend	N en grano
Momento	-----kg ha ⁻¹ -----			
Siembra	0	0,6	9764	112,2
	60	2,4	10230	115,9
	120	13,7	10967	148,3
V3	0	1,8	8454	83,1
	60	6,1	10347	114,3
	120	15,5	10777	146,4
V6	0	1,6	9764	101,9
	60	7,0	10661	135,6
	120	16,0	10655	142,0
Prom. Momento	Siembra	5,6 a	10598 a	132,0 a
	V3	7,8 a	10562 a	130,3 a
	V6	8,2 a	11262 a	138,8 a
Prom. Dosis	0	1,3 b	9327 b	99,1 c
	60	5,2 b	10413 a	121,9 b
	120	15,1 a	10800 a	145,6 a
Análisis de la varianza				
Momento (M)		ns	ns	ns
Dosis (D)		**	**	**
M x D		ns	ns	ns

Tabla 2. Pérdidas totales por volatilización, rendimiento y contenido de N en grano del cultivo de maíz bajo SD.

ración del cultivo determinada para la zona (530 mm) por Andrade y Gardiol (1995), el déficit hídrico calculado mediante balance hídrico fue de 193 mm. Sin embargo, debido a los riegos aplicados durante la floración y la variación de agua útil del suelo, probablemente no se haya producido déficit hídrico. En consecuencia, el rendimiento del maíz no debería haberse afectado por estrés hídrico (fig. 1).

Evolución de las pérdidas por volatilización de amoníaco

Las pérdidas por volatilización de N-NH₃ se extendieron por un período de 7 días para las aplicaciones al momento de la siembra y V3, mientras que para V6 las pérdidas se produjeron por un período de 6 días luego de la aplicación de N (fig. 2). La interrupción del proceso de volatilización de N-NH₃ fue consecuencia de la ocurrencia de precipitaciones superiores a 10 mm que incorporaron el N del fertilizante en el perfil de suelo (Fox *et al.*, 1986) (fig. 2). Para todos los momentos de aplicación, las máximas tasas de pérdida de N-NH₃ se observaron a partir del tercer o cuarto día después de la fertilización (fig. 2), dichas pérdidas de N se corresponderían con los mayores valores de pH registrados en el suelo (Ferguson *et al.*, 1984). Para todos los momentos de fertilización las máximas tasas de pérdida de N-NH₃ fueron determinadas desde el tratamiento con la dosis de 120 kg N ha⁻¹. Las pérdidas desde este tratamiento en gene-

ral difirieron de 60 kg de N ha⁻¹ y el testigo, y a su vez la dosis de 60 kg de N ha⁻¹ no fue estadísticamente diferente del tratamiento testigo en ningún momento de aplicación de N (fig. 2).

No se determinó interacción significativa momento por dosis de N para las pérdidas totales expresadas en kg ha⁻¹ teniendo en cuenta el testigo (tabla 2) o expresadas como porcentaje del N aplicado (fig. 3). Las pérdidas totales por volatilización de N-NH₃ (kg ha⁻¹ o como porcentaje del N aplicado), si bien aumentaron con la demora en el momento de fertilización, no fueron afectadas significativamente. Se determinó efecto significativo de la dosis de N, siendo las pérdidas desde el tratamiento 120 kg N ha⁻¹ significativamente mayores a las pérdidas desde el tratamiento testigo y 60 kg N ha⁻¹ (tabla 2). Las pérdidas totales, promedio de todos los momentos de fertilización, fueron de 3,9 (6,5% del N aplicado) y 13,8 kg N ha⁻¹ (11,5% del N aplicado) para la dosis de 60 y 120 kg de N ha⁻¹, respectivamente. Estos resultados ponen de manifiesto la importancia de las dosis de N sobre las pérdidas por volatilización de N-NH₃. Los valores de pérdida de N determinados en esta experiencia fueron similares a los ya informados para el sudeste bonaerense (Sainz Rozas *et al.*, 1999; Barbieri *et al.*, 2003).

Si bien las pérdidas por volatilización de N-NH₃ son más elevadas cuando las temperaturas del suelo se incrementan en un rango de 10 a 50 °C (Hargrove, 1988), para las condiciones

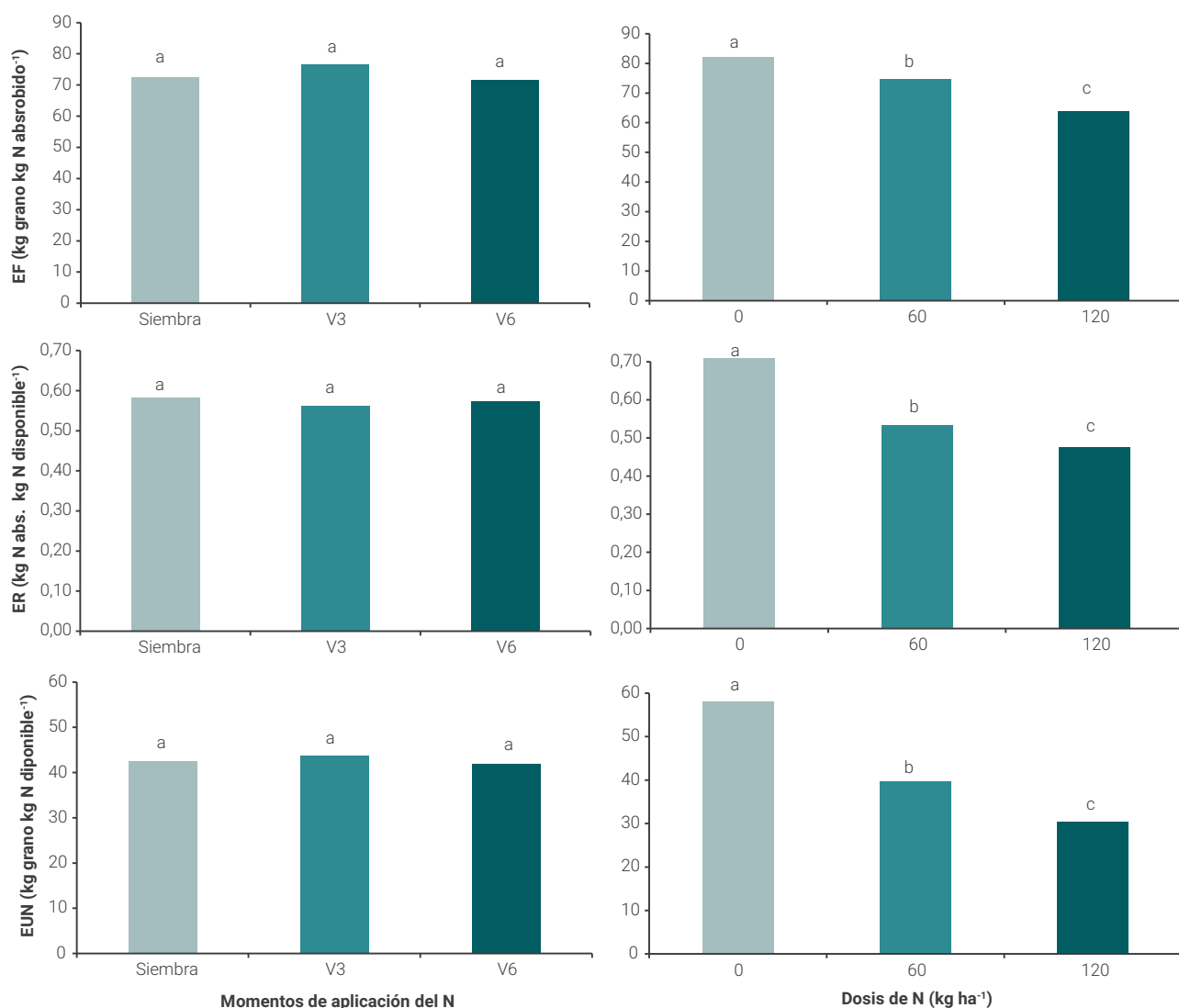


Figura 5. Eficiencia de uso de N y sus componentes: eficiencia fisiológica (EF) y de recuperación (ER) en función del momento de fertilización y la dosis de N para el cultivo de maíz bajo SD. Letras similares sobre las barras indican falta de diferencia entre ellas, según el test de DMS (5%).

ambientales en que se desarrolló esta experiencia, el momento de aplicación del fertilizante no afectó significativamente las pérdidas (tabla 2). La diferencia en la temperatura promedio del suelo durante el período experimental, principal variable que explica las pérdidas por volatilización (Sainz Rozas *et al.*, 1999), fueron de 16,9 25,6 y 23,8 °C para los momentos de siembra V3 y V6, respectivamente. Esto sugiere que la temperatura es importante, pero no determinante de las pérdidas de N-NH₃ por volatilización. No obstante, las pérdidas N-NH₃ por volatilización se incrementaron con el aumento de la temperatura del suelo (fig. 4). Es válido mencionar que para el sudeste bonaerense existen reportes en donde se determinaron mayores pérdidas por volatilización de N-NH₃ en V6 respecto a la siembra de maíz, cuando la temperatura del suelo aumentó entre dichos momentos de fertilización (Sainz Rozas *et al.*, 1997). Los incrementos de la temperatura en nuestra experiencia fueron de 8,7 y 6,9 °C para los períodos siembra-V3 y

siembra-V6, respectivamente, mientras que en el trabajo de Sainz Rozas *et al.* (1997) las diferencias de temperatura entre siembra-V6 fueron de aprox. 11 °C. Estas diferencias en la temperatura del suelo podrían explicar los resultados obtenidos. No obstante, cuando el fertilizante es aplicado a la siembra, en V3 o en V6, se producirán pérdidas variables de N como consecuencia de cambios en la temperatura del suelo (fig. 4, tabla 2).

Rendimiento y contenido de N en grano

No se determinó interacción significativa entre los factores de tratamiento (momento de aplicación y dosis de N) para el rendimiento en grano o para el contenido de N en grano (tabla 2). El rendimiento del cultivo no se incrementó significativamente por efecto del momento de aplicación de N mientras que la dosis de N incrementó significativamente el rendimien-

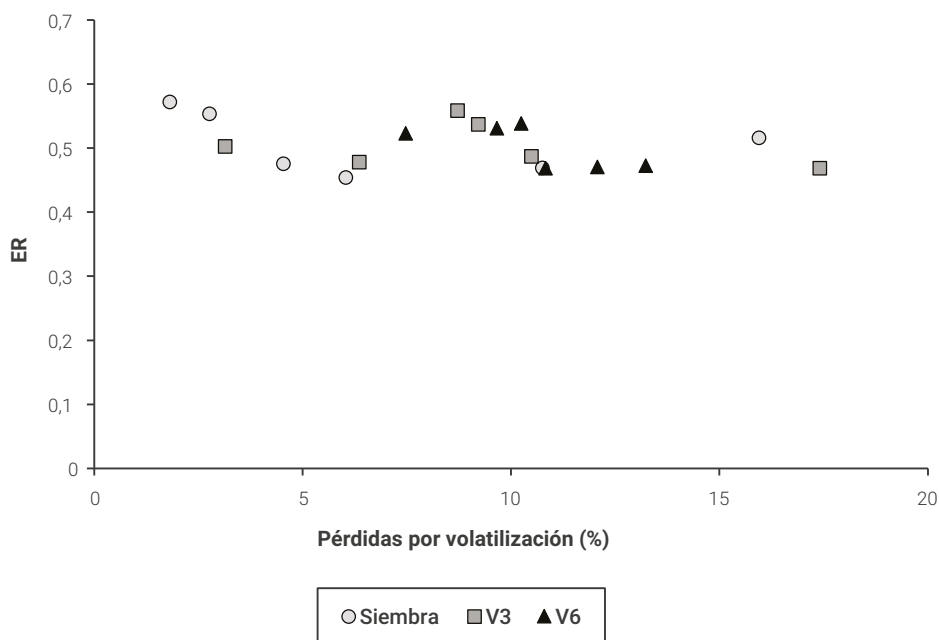


Figura 6. Relación entre la eficiencia de recuperación del N aplicado (ER) y las pérdidas totales pérdidas de N-NH₃ por volatilización en el cultivo de maíz bajo SD.

to en grano del cultivo (tabla 2). Los tratamientos fertilizados no difirieron entre sí y estos últimos lo hicieron con el tratamiento testigo, la respuesta en rendimiento a N promedio de ambas dosis fue de 1279 kg ha⁻¹ (14%).

El contenido de N en grano, al igual que el rendimiento, no se incrementó significativamente por efecto del momento de aplicación de N. El contenido de N en grano fue afectado significativamente por la dosis de N (tabla 2). Los incrementos en el contenido de N en grano fueron de 23 (23%) y 24 (19%) kg de N ha⁻¹ entre el tratamiento testigo vs. 60 y 60 vs. 120 Kg N ha⁻¹. El momento de aplicación del N no afectó el contenido de N en grano, estos resultados difieren de los reportados por Sainz Rozas *et al.* (1999) para maíz bajo SD con aplicaciones de N en V6 respecto de la siembra. Siendo la principal consecuencia a que las pérdidas de N del sistema, para la campaña evaluada, no habrían sido de gran magnitud. Durante los estadios iniciales (siembra-V6) si bien se registraron precipitaciones que permitieron incorporar el fertilizante y finalizar las pérdidas por volatilización de N-NH₃, estas no fueron suficientes para producir el lavado de N-NO₃⁻ (fig. 1), principal mecanismo de pérdida de N del sistema en el sudeste bonaerense (Sainz Rozas *et al.*, 2004).

Eficiencia de uso de N

La eficiencia de uso de N ni sus componentes EF y ER fueron afectadas significativamente por la interacción momento de aplicación y dosis de N. El momento de aplicación del N tampoco afectó significativamente la EUN, EF o ER, mientras que el incremento de la dosis de N disminuyó significativamente la EUN y sus componentes (fig. 5). Estos resultados coinciden con los informados por Sainz Rozas *et al.* (2004), Barbieri *et al.*

(2010), Barbieri *et al.* (2018), quienes establecieron que la ER disminuye con el incremento de la dosis de N.

Para las condiciones en las cuales se desarrolló esta experiencia, la falta de diferencias en la EUN o sus componentes al momento de aplicación del N sería debido a que las pérdidas de N del sistema no fueron de gran magnitud. Las pérdidas por volatilización de N-NH₃ se extendieron por un período no mayor de 7 días, ya que las lluvias incorporaron el N en el perfil del suelo deteniendo el proceso de pérdida (fig. 2). Las pérdidas de N-NH₃ por volatilización fueron de 7, 9 y 11% del N aplicado promedio de dosis para los momentos de siembra V3 y V6, respectivamente y no se asociaron significativamente con la ER (fig. 6). Estos resultados coinciden con los informados por Bonelli *et al.* (2018) quienes no determinaron diferencias en la ER para diferentes momentos de fertilización (siembra, V6 y V10) ni fuentes de N (urea y UAN). En tal sentido, el uso de pronósticos meteorológicos de corto plazo permitiría programar la fertilización previo a una lluvia para lograr una rápida incorporación del N al suelo.

CONCLUSIONES

Para las condiciones en las cuales se desarrolló este experimento, las pérdidas de N-NH₃ por volatilización se incrementaron por efecto de la dosis de N y no por el momento de aplicación. Esto sería debido a que las precipitaciones ocurridas (>10 mm) una semana después de la fertilización incorporaron el N en el perfil del suelo, impidiendo que se expresaran las pérdidas de N-NH₃ por volatilización. El rendimiento y el contenido de N en grano se incrementaron por la dosis de N; el momento de aplicación del fertilizante no produjo efectos sobre estas variables. Esto sería debido a que en esta estación

de crecimiento las pérdidas de N del sistema fueron de escasa magnitud. En función de esto, se determinó que aplicaciones de N retrasadas respecto de la siembra no incrementaron la EUN, y dosis mayores a 60 kg N ha⁻¹ no afectan el rendimiento, pero sí la concentración de N en grano.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDRADE, F.H.; GARDIOL, J. 1995. Sequía y producción de los cultivos de maíz, girasol y soja. INTA Est. Ex. Agr. Boletín Técnico 132. 15 p.
- BARBIERI, P.A.; ECHEVERRÍA, H.E.; SAINZ ROZAS, H.R. 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.; SAINZ ROZAS, H.R.; MARRINGOLO, M. 2010. Fertilización de maíz con urea de liberación lenta: pérdida por volatilización y eficiencia de uso de nitrógeno. *Ciencia del Suelo* 28: 57-66.
- BARBIERI, P.A.; ECHEVERRÍA, H.E.; SAINZ ROZAS, H.R. 2018. Pérdidas por volatilización y eficiencia de uso de nitrógeno en maíz en función de la fuente, dosis y momento de aplicación. *Rev. Fac. Agron.* 117(1), 111-116.
- BONELLI, L.E.; SAINZ ROZAS, H.R.; ECHEVERRÍA, H.E.; BARBIERI, P.A. 2018. Fuente y momento de aplicación de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en Balcarce. *Ciencia del Suelo* Vol. 36, N.º 1.
- DOMINGUEZ, G.F.; STUDDERT, G.A.; ECHEVERRÍA, H.E.; ANDRADE, F.H. 2001. Sistemas de cultivo y fertilización nitrogenada en maíz. *Ciencia del Suelo* 19:47-56.
- ECHEVERRÍA, H.E.; SAINZ ROZAS, H.R. 2015. Nitrógeno. En: ECHEVERRÍA, H.E.; GARCIA, F.O. (eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Ediciones INTA. Bs. As., Argentina. 189-228 pp.
- FERGUSON, R.B.; KIESSEL, 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, 578-585.
- FERRARIS, G.N.; ELIAS, G.; GALETTO, M.L. 2014. Pérdidas de nitrógeno por volatilización en maíces tardíos en Pergamino (Bs. As.). Efectos de fuente y dosis. *Actas x Congreso Nacional de maíz*. Rosario, Santa Fe.
- FONTANETTO, H.; KELLER, O. 2006. Manejo de la fertilización en maíz. Experiencias en la Región Pampeana Argentina. *Información Técnica de Cultivos de Verano Campaña 2006*. INTA EEA Rafaela. Publicación Miscelánea N.º 106. 85-113 pp.
- FOX, R.H.; BANDEL, V.A. 1986. Nitrogen utilization with no-tillage. En: SPRAGE, M.A.; TRIPLETT, G.B. (ed.). *No-Tillage and Surface-Tillage Agriculture. The Tillage Revolution*, John Wiley and Sons. EUA. 117-255 pp.
- HARGROVE, W.L. 1988. Soil, environmental, and management factors influencing ammonia volatilization under field conditions. En: BOCK, B.R.; KISSEL, D.E. (ed). *Bulletin Y-206*. National fertilizer Development Center, Tennessee Valley Authority, Muscle Shoals, Alabama. 2:17-36.
- KEENEY, D.R.; NELSON, W.D. 1982. In *Methods of Soil Analysis*. Part. 2. Chemical and Microbiological properties, A.L. Page ed. American Society of agronomy, Madison, Wisconsin (EUA). 643-693 pp.
- KIESSEL, D.E.; CABRERA, M.L. 1988. Factor affecting urea hydrolysis. En: BOCK, B.R.; KIESSEL, D.E. (ed.). *Ammonia volatilization from urea fertilizers*. Eds. National Fertilizer Development Center, TVA: Muscle Shoals. 53-66.
- LECO. 2009. Organic application notes. (Disponible: <http://www.leco.com/> verificado 18 de febrero de 2009).
- MCLNNES, K.J.; FERGUSON, R.B.; KIESSEL, D.E.; KANEMASU, E.T. 1986. Field measurements of ammonia loss from surface applications of urea solution to bare soil. *Agron. J.* 78: 192-196.
- MEISINGER, J.J.; MAGDOFF, F.R.; SCHEPERS, J.S.; WELLS, K.L.; BITZER, M.J. 1992. Nitrogen management in the no fertilizer needs for maize in humid regions: underlying principles. En: BOCK, B.R.; KELLEY, K.R. (editors), *Predicting N fertilizer needs for maize in humid regions*, Fertilizer Development Ctr., TVA, Muscle Shoals, AL, EUA. 8-26 pp.
- MOLL, R.H.; KAMPRATH, E.J.; JACKSON, W.A. 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agron. J.* 74:562-564.
- NOMMIK, H. 1973. The effect of pellet size on the ammonia loss from urea applied to forest soil. *Plant Soil.* 39:309-318.
- REYNOLDS, C.; WOLF, D.; ARMBRUSTER, J. 1985. Factors related to urea hydrolysis in soils. *Soil Sci Am. J.* 49: 104-108.
- RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J. 1982. How a corn plant develops. *Iowa State Univ. Coop. Ext. Serv. Spec. Rep.* 48.
- SAINZ ROZAS, H.R.; ECHEVERRÍA, H.E.; STUDDERT, G.A.; 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. *Agron. J.* 91: 950-955.
- SAINZ ROZAS, H.R.; ECHEVERRÍA H.E.; BARBIERI, P.A. 2004. Nitrogen Balance as affected by application time and nitrogen fertilizer rate in irrigated no-tillage maize. *Agron. J.* 96: 1622-1631.
- SAS. 2008. The SAS system for windows. Version 9.2. SAS Institute, Cary, NC.