

INTRODUCCIÓN

La pérdida de Nitrógeno por volatilización del gas amoníaco (NH₃) puede ser la principal causa de la baja eficiencia de algunos fertilizantes amoniacales en situaciones muy particulares como pueden ser suelos calizos cuando son aplicados superficialmente y del amoníaco anhidro cuando se inyecta de manera defectuosa. Dichas pérdidas son el resultado de numerosos procesos químicos, físicos y biológicos en los que intervienen numerosos factores tales como el pH, la capacidad de intercambio catiónico, la materia orgánica, la presencia de restos en la superficie, la temperatura, el viento, la evaporación de agua de la superficie del suelo y la cantidad y el método de aplicación del fertilizante.

Los cambios introducidos por el laboreo de conservación tienden a favorecer la volatilización. Por extender el uso de la aplicación superficial y por la presencia de abundantes restos orgánicos que pueden dificultar el contacto del fertilizante con el suelo.

El objetivo de este trabajo es clarificar aspectos relacionados al proceso de volatilización y poner a disposición una variada y fehaciente información, que va a eliminar la percepción que existe de que las pérdidas ocurridas por este proceso siempre son elevadas y afectan el rendimiento del cultivo.

PROCESO DE VOLATILIZACIÓN DEL AMONÍACO

El Nitrógeno (N) en el suelo está sujeto a un conjunto de transformaciones y procesos de transporte que se denomina "Ciclo del Nitrógeno". Debido a las interacciones que existen entre todas las partes de este sistema, para poder reducir las pérdidas de N, es necesario conocer cómo influyen las prácticas agrícolas y los factores ambientales en los diversos procesos de este ciclo.

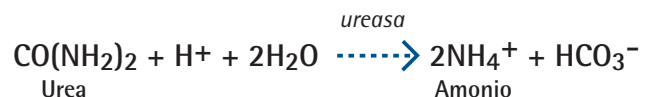
La volatilización del amoníaco es un mecanismo que ocurre naturalmente en todos los suelos, por mineralización de Nitrógeno orgánico. Pero las pérdidas provenientes de



fertilizantes químicos son considerablemente mayores que las provenientes del Nitrógeno del suelo.

La volatilización del amoníaco depende de diversas causas. Pero para entender cómo interactúan estas causas, hay que conocer las reacciones químicas de los fertilizantes en el suelo.

La Urea está sujeta a hidrólisis catalizada por la enzima ureasa, de amplia difusión en el suelo, y que responde a la siguiente ecuación:



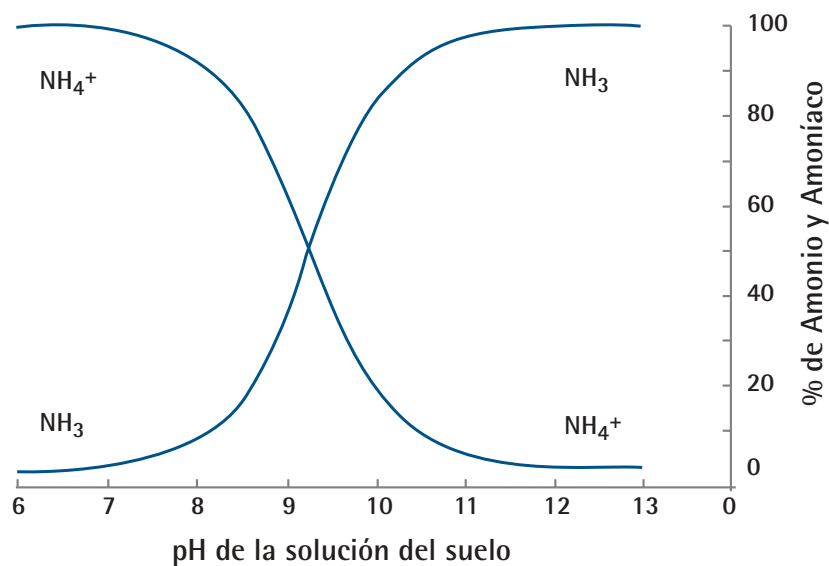
Esta reacción causa áreas de alto pH en el sitio de la hidrólisis. El Amonio (NH₄⁺) formado entra en una reacción de equilibrio con el Amoníaco (NH₃) de la solución del suelo.



Esta ecuación está gobernada por el pH del suelo.



Figura 1: Variación de la proporción de amonio y amoníaco en el suelo según el pH de la solución del suelo.



Fuente: John L. Havlin y otros.1999.

Como se ve en la Figura 1, cuanto mayor es el pH, mayor será la proporción de Nitrógeno en forma de Amoníaco (N-NH₃) con respecto al Nitrógeno en forma de Amonio (N-NH₄⁺). A los valores normales de pH de los suelos de la Región Pampeana (pH= 6 - 7), la mayor proporción del Nitrógeno estará en la forma de Amonio (NH₄⁺) (molécula poco móvil en el suelo).

A pesar de estar mayormente gobernada por el pH inicial del suelo, hay otros factores que afectan las pérdidas de Nitrógeno como Amoníaco, ya que esta puede ser alta en suelos ácidos o baja en suelos alcalinos. Otros factores pueden ser la capacidad de intercambio catiónico, el contenido de materia orgánica y la textura del suelo.

Cuanto mayor sea la capacidad de intercambio catiónico (CIC), mayor será la capacidad del suelo para retener en sus sitios de carga negativa al Amonio (NH₄⁺) producido por la hidrólisis de la Urea y en consecuencia menor será la volatilización de Amoníaco.

El poder buffer del suelo, que es la capacidad de resistirse a cambios en su pH también influye en las

posibilidades de volatilización. A mayor poder buffer, más rápidamente el suelo retornará a su nivel inicial de pH, disminuyendo las posibilidades de volatilización.

La temperatura también afecta la volatilización. A mayor temperatura, más rápido será el pasaje de Amoníaco disuelto en la solución del suelo a Amoníaco en el aire.

La humedad del suelo y la tasa de evaporación juegan un papel importante. La pérdida de humedad es un pre-requisito para la pérdida de Amoníaco. Si la Urea penetra en el perfil debido a una lluvia, se hidroliza rápidamente a Amonio y es retenido por el complejo de intercambio y por ello menos susceptible a la volatilización.

El viento por otro lado genera una diferencia de concentración de Amoníaco cercano al suelo y favorece las pérdidas.

Todo esto indica que el proceso de volatilización está gobernado por muchos factores, que si se los considera aisladamente pueden llevar a predicciones erróneas.



RESULTADOS

SOBRE % DE PÉRDIDA DE LA VOLATILIZACIÓN EN BASE A LA RECOPIACIÓN DE ENSAYOS REALIZADOS EN PAMPA HÚMEDA.

SUDESTE DE LA PROVINCIA DE BS. AS.

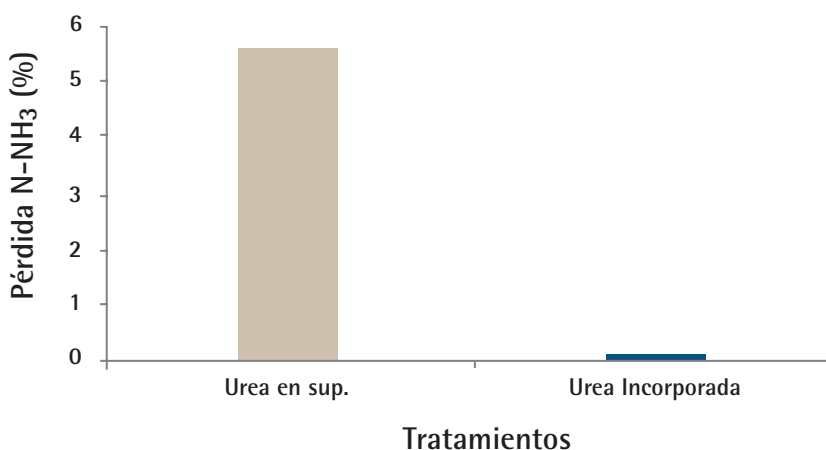
TRIGO

- ▶ En suelos del Sudeste de la provincia de Buenos Aires, las pérdidas de Nitrógeno por volatilización del amoníaco del fertilizante en el cultivo de trigo, resultan pequeñas (<1,5 kg N/ha para aportes de 120 kg N/ha) debido al alto poder buffer del suelo. Estos suelos, con un contenido de materia orgánica (MO) superior a 5,5%, moderan el aumento de pH generado por la hidrólisis de la Urea. Para el caso de aplicaciones al voleo en macollaje, las bajas temperaturas imperantes y la ocurrencia de precipitaciones determinan la incorporación de la Urea y la disminución de las pérdidas por volatilización (Videla y otros, 1996).

Maíz

- ▶ En suelos del Sudeste de la provincia de Buenos Aires para el cultivo de maíz, aplicaciones al voleo de Urea sin incorporación determinaron pérdidas inferiores al 10% para aplicaciones de hasta 210 kg N/ha (Sainz Rosas y otros, 1999).
- ▶ En otro ensayo de maíz, realizado por Echeverría y otros (2000) en la misma zona (sudeste de Buenos Aires), las pérdidas de Amoníaco observadas en el tratamiento con Urea Granulada incorporada (150 kg/ha de Urea Granulada) muestra un comportamiento similar al testigo. En la [Figura 2](#) se observan las pérdidas por volatilización bajo distintas formas de aplicación de Urea Granulada (150 kg/ha de Urea Granulada), en superficie e incorporada, las pérdidas en éste último son escasas, inferiores al 0,1% del N aplicado, mientras que el tratamiento con Urea Granulada en superficie alcanzó el 5,6% del Nitrógeno aplicado.

Figura 2: Porcentaje de pérdidas totales por volatilización de Amoníaco (N-NH₃) debidas al fertilizante para los tratamientos Urea Granulada en superficie e incorporada. Sudeste de la Provincia de Bs. As. Campaña 1999/2000.

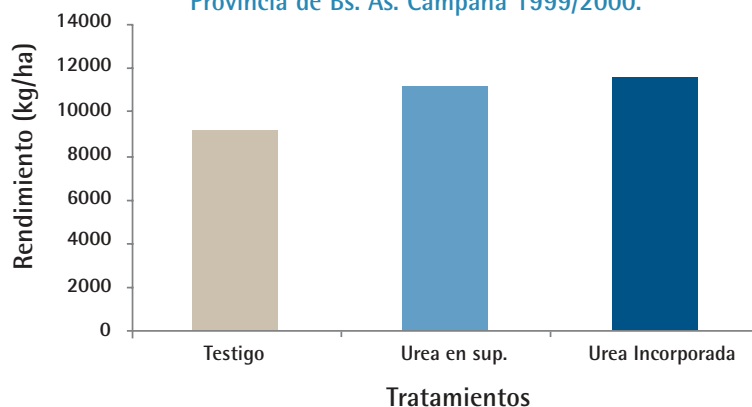


Fuente: INTA Balcarce. Echeverría y otros. 2000.

Para las condiciones en que se desarrolló este ensayo se determinó una elevada respuesta al agregado de Nitrógeno como Urea Granulada. Esto fue evidenciado a través de la mayor concentración de clorofila, número y peso de granos. Los rendimientos para estos dos tratamientos no muestran diferencias significativas (Figura 3).



Figura 3: Rendimiento del cultivo de maíz con diferentes métodos de aplicación de Urea Granulada. Sudeste de la Provincia de Bs. As. Campaña 1999/2000.



Fuente: INTA Balcarce. Echeverría y otros. 2000.

► En un reciente ensayo de maíz, realizado por Barbieri y colaboradores (2005) en la EEA del INTA Balcarce, en un lote con una prolongada historia agrícola (25 años de agricultura continua en forma convencional y los últimos 5 años bajo siembra directa), se encontró que las pérdidas totales de Nitrógeno en forma de Amoníaco (N-NH₃), fueron mayores en los tratamientos con 120

kg/ha de Urea Granulada, mientras que las pérdidas en los tratamientos con 60 kg/ha de Urea Granulada no difirieron significativamente del resto de los tratamientos (Tabla 1).

En cuanto al rendimiento, no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos por efecto de la fuente, dosis o método de aplicación del fertilizante.

Tabla 1: Pérdida total de Nitrógeno en forma de Amoníaco (N-NH₃) por volatilización (kg/ha) y rendimiento (kg/ha), en función de la fuente, dosis y formas de aplicación de Nitrógeno. Campaña 2004/05.

TRATAMIENTOS			PÉRDIDA TOTAL DE N-NH ₃	RENDIMIENTO
Fuente	Dosis de N	Método	(kg/ha)	(kg/ha)
Urea	60	Superficie	7,04 b	11868,3 a
	60	Incorporado	1,62 b	10937,3 a
	120	Superficie	16,02 a	10906,0 a
	120	Incorporado	1,47 b	11287,3 a
UAN	60		1,38 b	11501,6 a
	120		2,73 b	10655,3 a
CAN	60		1,98 b	10746,6 a
	120		2,00 b	11777,6 a
Promedio, Fuente	Urea		11,53 a	11261,8 a
	UAN		2,06 b	10826,3 a
	CAN		1,99 b	11359,7 a
Promedio, Dosis	0		1,21 b	9764,0 b
	60		3,47 b	11425,3 a
	120		6,93 a	11059,9 a

Letras iguales indican que no hay diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo al test de Tukey ($p > 0,05$).
Fuente: EEA INTA Balcarce, Barbieri y col, 2005.



CENTRO DE SANTA FE

► En la Estación Experimental de Rafaela del INTA se realizó un ensayo en el cultivo de trigo en Siembra Directa, durante la campaña 1999/2000 (Fontanetto y otros), donde el lote tenía un contenido de materia orgánica de 3,07%; Nt de 0,146%; P extractable de 48 ppm y pH=5,9. En el mismo se evaluaron las pérdidas por volatilización de N (Kg/ha y %) bajo distintas fuentes y dosis de aplicación.

Como resultado se encontró que las pérdidas totales por volatilización, para dosis de 40 y 80 kg N/ha, fueron mayores con Urea Granulada (5,1 y 7,3% del N), luego con UAN (2,6 y 3,32% del N) y muy bajas con el CAN (0,80 y 0,93% del N). No se registraron diferencias significativas de volatilización entre los diferentes tratamientos hasta el tercer día (Tabla 2) coincidiendo con lo informado por otros autores (Ferguson et al, 1984; Hargrove et al, 1988 y Sainz Rosas et al, 1997).

Tabla 2: Estimaciones de la pérdidas medias y total acumulado de N-NH₃ en función de las fuentes nitrogenadas en trigo. Rafaela, Provincia de Santa Fe. Campaña 1999/2000.

Tratamientos	DÍAS DESDE LA APLICACIÓN DEL FERTILIZANTE						TOTAL DE PÉRDIDAS	
	1	3	5	7	9	11	Kg/ha de N-NH ₃	% de N perdido
	KG DE N/HA							
Urea 40 kg N/ha	0,16 a	1,02 c	0,37 b	0,26 ab	0,12 a	0,11 a	2,04 d	5,10
Urea 80 kg N/ha	0,34 a	2,95 d	0,98 d	0,82 c	0,48 b	0,22 a	5,79 f	7,30
UAN 40 kg N/ha	0,05 a	0,44 b	0,22 ab	0,16 a	0,10 a	0,06 a	1,03 c	2,60
UAN 80 kg N/ha	0,12 a	1,12 c	0,68 c	0,44 b	0,21 a	0,09 a	2,66 e	3,32
CAN 40 kg N/ha	0,02 a	0,11 a	0,07 a	0,05 a	0,04 a	0,03 a	0,32 ab	0,80
CAN 80 kg N/ha	0,05 a	0,24 ab	0,17 a	0,11 a	0,11 a	0,06 a	0,74 bc	0,93
Testigo	0,02 a	0,03 a	0,02 a	0,01 a	0,01 a	0,01 a	0,10 a	-----

Valores para cada columna y momento de medición, seguidos por la misma letra no difieren significativamente entre sí (P< 0,05)
Fuente: EEA INTA Rafaela, Fontanetto y otros, 2001.

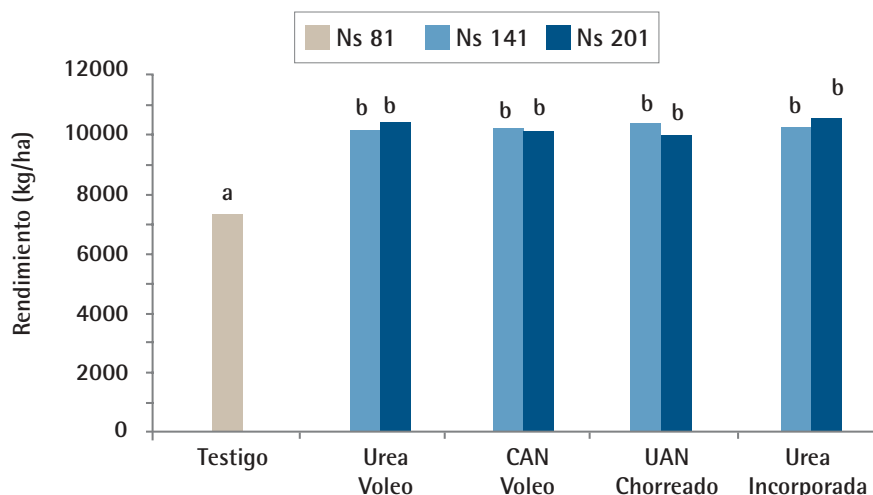
SUR DE SANTA FE

► En un trabajo realizado en la EEA del INTA Oliveros por el Ing. Salvaggiotti (2005) en el cultivo de maíz, se evaluó la eficiencia de uso del Nitrógeno según fuente, dosis y forma de aplicación, con el objetivo de cuantificar las pérdidas de N por volatilización y su efecto sobre el rendimiento del cultivo. Como resultado, se encontró que durante los 5 días que se realizaron las mediciones se observaron pérdidas por volatilización desde 0,5 kg/ha de N (aplicaciones de CAN) hasta 30 kg/ha de N (Urea al voleo), según fuente y forma de aplicación.

Sin embargo el ensayo no mostró diferencias significativas en el rendimiento del cultivo entre formas, dosis y fuentes de aplicación. El rendimiento promedio de los tratamientos con fertilizante fue de 10.255 kg/ha y el testigo sin fertilizar rindió 7.325 kg/ha. La respuesta a la fertilización nitrogenada incrementó significativamente los rendimientos (p<0.05) en un 40% (Figura 4).



Figura 4: Rendimiento en grano (kg/ha) de las diferentes alternativas de fertilización nitrogenada (combinaciones fuente, dosis y formas de aplicación). Oliveros, Provincia de Santa Fe. Campaña 2004/05.



Ns: Nitrógeno a la siembra.

Ns81: contenido de N (0 – 60 cm) a la siembra = 81 kg/ha de N

Ns141: contenido de N a la siembra (81kg/ha) + 60 kg/ha de N como fertilizante.

Ns201: contenido de N a la siembra (81 kg/ha) + 120 kg/ha de N como fertilizante.

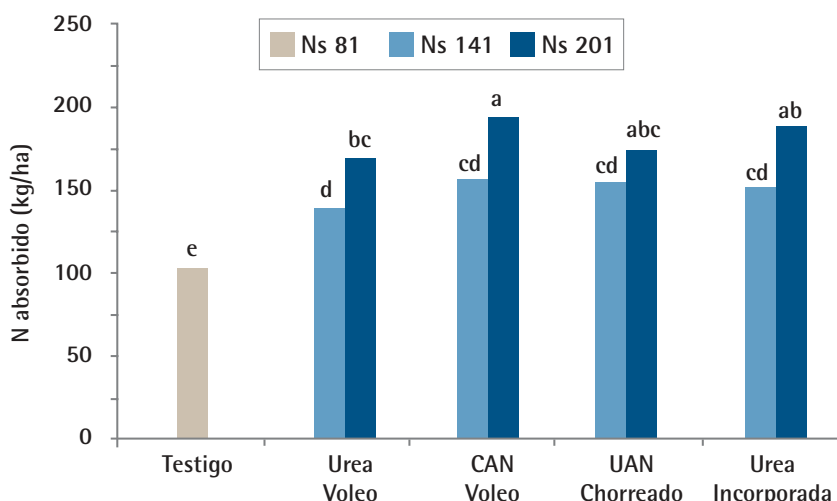
Medias seguidas por las mismas letras no difieren entre si de acuerdo al test LSD al 10%.

Fuente: EEA INTA Oliveros, Salvagiotti, 2005.

En cuanto a la cantidad de N absorbida por el cultivo en madurez fisiológica, en promedio, los tratamientos fertilizados absorbieron un 58% más de N que el tratamiento testigo. A la dosis de 60 kg de N/ha, no se

registraron diferencias significativas entre fuentes ni formas de aplicación; con la dosis de 120 kg de N/ha se encontraron diferencias de hasta un 10% entre CAN y Urea al voleo (Figura 5).

Figura 5: Nitrógeno absorbido por el cultivo en madurez fisiológica (kg/ha) con diferentes alternativas de fertilización nitrogenada (combinaciones fuente, dosis y forma de aplicación). Oliveros, Provincia de Santa Fe. Campaña 2004/05.



Ns: Nitrógeno a la siembra.

Ns81: contenido de N (0 – 60 cm) a la siembra = 81 kg/ha de N

Ns141: contenido de N a la siembra (81kg/ha) + 60 kg/ha de N como fertilizante.

Ns201: contenido de N a la siembra (81 kg/ha) + 120 kg/ha de N como fertilizante.

Medias seguidas por las mismas letras no difieren entre si de acuerdo al test LSD al 10%.

Fuente: EEA INTA Oliveros, Salvagiotti, 2005.



► En dos ensayos de maíz realizados por Gudelj y otros, en el INTA Marcos Juárez (Córdoba), durante dos campañas (2000/01 y 2001/02), con distintas fuentes y formas de aplicación de Nitrógeno con una dosis de 50 kg de N/ha en el primer año y distintas fuentes, formas de aplicación y dosis en el segundo (60, 120 y 180 kg N/ha), se observó que en los dos años bajo condiciones de baja humedad relativa, altas

temperaturas medias y poco rocío, *no hubo diferencias significativas entre fuentes de Nitrógeno, ni entre distintas formas de aplicación. Sí hubo diferencias significativas con respecto al testigo sin fertilizar en el primer año, y diferencias altamente significativas (5%) entre dosis en el segundo año, mostrándose una alta eficiencia de uso de Nitrógeno (Tabla 3).*

Tabla 3: Rendimiento del cultivo de maíz (kg/ha) bajo distintas fuentes y formas de aplicación de Nitrógeno. Oliveros, Provincia de Santa Fe. Campaña 2000/01 y 2001/02.

TRATAMIENTOS	RENDIMIENTO (KG/HA)			
	2000/01	2001/02		
	dosis	dosis		
	50 kg N/ha	60 kg N/ha	120 kg N/ha	180 kg N/ha
Solución UAN incorporada	11491 a	12609 a	13800 a	13990 a
Urea Granulada en superficie total	11126 a	11838 a	13242 a	13466 a
Urea Granulada incorporada	11035 a	11914 a	13400 a	14009 a
Solución UAN en superficie chorreado en el entresurco	10957 a	12795 a	13133 a	13761 a
Nitrato de Amonio Calcáreo en superficie total	10919 a	11952 a	12404 a	14442 a
Nitrato de Amonio Calcáreo incorporado	10805 a	12947 a	13676 a	13952 a
Testigo sin fertilizar	8838 b	7876 b	7876 b	7876 b

Valores para cada columna y momento de medición, seguidos por la misma letra no difieren significativamente entre sí ($P < 0,05$)
Fuente: INTA Marcos Juárez, Gudelj y otros, 2002.

CONCLUSIONES

- El Proceso de Volatilización es un proceso que lo sufren todos los fertilizantes nitrogenados en mayor o menor medida;
- El porcentaje de pérdida por volatilización depende principalmente de las condiciones climáticas y de suelo;
- Para la mayoría de los ensayos con Urea Granulada, en distintos suelos de la Región Pampeana, la volatilización es menor al 10%;
- Las diferencias de pérdidas de Nitrógeno entre fuentes, no necesariamente se traducen en diferencias significativas en los Rendimientos de los cultivos.



Actualmente en Argentina los niveles de reposición de Nitrógeno extraído en los cuatro cultivos principales (trigo, maíz, soja y girasol) son del orden del 30% (García F. 2005). Si analizamos la dosis promedio de N utilizada en Pampa Húmeda en el cultivo de maíz, es de 55 kg N/ha y en trigo es de 50 kg N/h; esto demuestra que todavía estamos muy lejos del óptimo de aplicación (Fertilizar Asociación Civil - ICASA. 2005).

Para el manejo eficiente de la fertilización nitrogenada, la elección de la fuente y su adecuado manejo son sólo una parte de una serie de aspectos a tener en cuenta entre los que podemos considerar:

- ▶ Costo por unidad de nutrientes;
- ▶ Calidad de origen de los fertilizantes utilizados;
- ▶ Disponibilidad y ventajas logísticas para maximizar el sentido de oportunidad de la aplicación;
- ▶ Factibilidad de mezclas con otros nutrientes para

una fertilización balanceada.

- ▶ Correcta calibración de las máquinas de aplicación;
- ▶ Utilización de dosis óptimas económicas para lo cual debemos enmarcar todos estos aspectos en una fertilización racional y planificada que incluya desde la fijación de una meta de rendimientos acordes a cada situación, monitoreos con Análisis de Suelos, hasta el estudio de la probabilidad de respuesta con ensayos locales o modelos de simulación.

Todo esfuerzo que pongamos en el manejo eficiente del Nitrógeno nos permitirá obtener mayores rendimientos, lo que en definitiva disminuye el costo por tonelada producida, es decir, la incidencia de los costos fijos de nuestra explotación, incluso y con mayor razón aún, en situaciones de relaciones de precios grano/fertilizante más ajustadas.

REFERENCIAS

- ▶ 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, 2004/05)
- ▶ Echeverría, H. E.; Barbieri, P. A. 2000. "Ensayos de Fertilización de maíz en Siembra Directa". Convenio INTA Balcarce-Profertil.
- ▶ Enzo Cástino. Fertilizar Asociación Civil e ICASA - Mora & Araujo. 2005. "Tendencias en el uso de fertilizantes en Argentina". Presentado en el Simposio "Fertilidad 2005".
- ▶ Equipo del Proyecto Fertilizar - INTA Pergamino. "Reacción de los fertilizantes en el suelo. Volatilización de amoníaco a partir de la urea".
- ▶ Ferguson, R. B.; Kissel, D. E.; Koelliker, J. K. and Basel, W. 1984. "Ammonia volatilization from surface-applied urea: Effect of hydrogen ion buffering capacity". Soil Science Society American Journal. 48:578-582.
- ▶ Fontanetto, H.; Vivas, H.; Keller, O. y Llambías, F. "Volatilización de amoníaco desde diferentes fuentes nitrogenadas aplicadas en trigo con siembra directa". Anuario 2001. INTA Rafaela.
- ▶ García, F. O. 2005. "Balance de nutrientes y necesidades de fertilización del cultivo de trigo". INPOFOS Cono Sur. Trabajo presentado en la 1a. Jornada de Trigo de la Región Centro.
- ▶ Gudelf, V.; Vallone, P.; Galarza, C. y Masiero, B. "Evaluación de diferentes fuentes y formas de aplicación del nitrógeno en post emergencia del maíz implantado en Siembra Directa". Publicado en el Informe para Extensión N° 68 de la EEA INTA Marcos Juárez. Julio 2001.
- ▶ Gudelf, V.; Vallone, P.; Galarza, C. y Masiero, B. "Evaluación de diferentes fuentes y formas de aplicación del nitrógeno en post emergencia del maíz implantado en Siembra Directa". Trabajo publicado en el Informe para Extensión N° 73 de la EEA INTA Marcos Juárez. Julio 2002.
- ▶ Hargrove, W. L.; Bock, B. R. and Urban, W. J. 1988. "Comparison of nitrogen sources for surface application to winter wheat". Journal Fertilizer Issues. 5:45-49.
- ▶ Sainz Rosas, 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 Rosas, H.; Echeverría, H. E.; Studdert, G.A. and Andrade, F. H. 1999. "No-till maize nitrogen uptake and yield: effect of urease inhibitor and application time". Agron. J. 91:950-955.
- ▶ Salvagioti, 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, 2004/05)
- ▶ Videla, C. C.; Ferrari, J. L.; Echeverría, H. E. y Travaso, M. I. 1996. "Transformaciones del nitrógeno en el cultivo de trigo". Ciencia del Suelo 14:1-6.

