

## EMISIONES DE AMONIACO DE OPERACIONES AGRICOLAS

Robert Mikkelsen\*

### Introducción

Es necesario obtener todo el beneficio de los nutrientes aplicados en las operaciones agrícolas para maximizar la eficiencia de los materiales utilizados. El seleccionar la fuente adecuada del nutriente en una situación en particular requiere considerar los objetivos económicos, ambientales y sociales. Uno de los objetivos ambientales es mantener al mínimo las pérdidas de nutrientes del sistema. Algunos fertilizantes portadores de nitrógeno (N) están sujetos a pérdidas por volatilización. Las agencias de regulación han puesto mayor interés en el papel de los gases de N en la atmósfera y sus potenciales efectos negativos.

Aun cuando en muchos sitios las operaciones ganaderas son las principales fuentes de emisión de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), las pérdidas de  $\text{NH}_3$  provenientes de los fertilizantes nitrogenados también contribuyen significativamente a las emisiones totales de este gas. Cuando ocurre una pérdida significativa de  $\text{NH}_3$ , después de la fertilización, es posible que los cultivos no estén recibiendo la cantidad necesaria de N debido a esta pérdida no intencional de este nutriente.

Varias propiedades químicas del suelo interactúan con ciertas condiciones ambientales en el sitio de aplicación para determinar la magnitud de la pérdida de  $\text{NH}_3$  (Figura 1). Este artículo discute los principales factores que contribuyen a la pérdida de  $\text{NH}_3$  proveniente de los fertilizantes.

### Fuentes de N

Todos los fertilizantes que contienen amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) están teóricamente expuestos a pérdidas por volatilización. Sin embargo, las propiedades particulares de cada fertilizante y sus reacciones después de entrar en contacto con el suelo pueden promover grandes diferencias en términos de pérdida de N. El potencial de volatilización de  $\text{NH}_3$  está gobernado principalmente por la alcalinidad (pH) del suelo alrededor de gránulo de fertilizante. Muchos fertilizantes que contienen  $\text{NH}_4^+$ , como el nitrato de amonio o el sulfato de amonio, forman inicialmente una solución ligeramente ácida cuando se disuelven en el suelo (pH entre 4.5 y 5.5). En la mayoría de los casos, estas formas de N no tienen una pérdida significativa de  $\text{NH}_3$ .

\* El Dr. Mikkelsen es el Director de la Oficina Regional del IPNI en el Oeste de los Estados Unidos, ubicada en Merced, California. Correo electrónico: rmikkelsen@ipni.net.

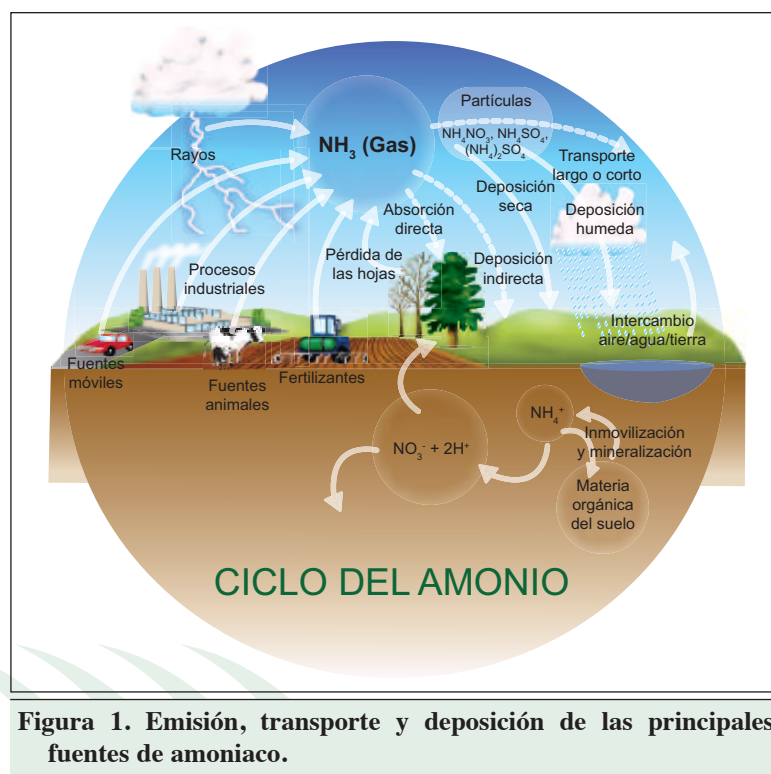


Figura 1. Emisión, transporte y deposición de las principales fuentes de amoníaco.

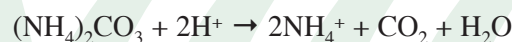
Cuando se aplica urea al suelo, esta reacciona con el agua (se hidroliza) y con la enzima ureasa para producir carbonato de amonio, un compuesto inestable que rápidamente se descompone liberando el gas  $\text{NH}_3$ . El uso de carbonato de amonio es común en las sales aromáticas porque liberan fácilmente  $\text{NH}_3$ .

### Reacciones de hidrólisis de la urea

Sin importar si se aplica en forma sólida o líquida, la urea pasa por las siguientes reacciones cuando se aplica al suelo:



Urea                      Carbonato de amonio



(Reacción que consume acidez y eleva el pH)



Las condiciones de campo que favorecen la volatilización de  $\text{NH}_3$  de la urea aplicada a la superficie del suelo son:

- Falta de lluvia, una ligera llovizna o riego luego de la aplicación.
- Residuos de cultivos en la superficie del suelo.

- Altas temperaturas.
- Alto pH del suelo.
- Bajo contenido de arcilla o materia orgánica (baja capacidad de intercambio catiónico, CIC).
- Suelo inicialmente húmedo que se seca rápidamente.

Existe un alto potencial de pérdida de N como  $\text{NH}_3$  cuando se aplica urea líquida, urea sólida o mezclas o fórmulas que contengan urea a la superficie del suelo. Existen reportes que indican que la urea líquida es más susceptible a volatilización que la urea sólida, mientras que otros reportes indican lo contrario. Esta aparente contradicción se explica cuando se toma en cuenta las condiciones específicas de campo que influyen el movimiento y la incorporación de la urea al suelo, donde queda protegida contra la volatilización.

### Localización de la urea

Generalmente, los fertilizantes se aplican al voleo en la superficie del suelo, en banda superficial o en banda sub-superficial. El dejar la urea sobre la superficie del suelo sin incorporación (por labranza o riego/lluvia) incrementa el riesgo de volatilización de  $\text{NH}_3$  en los días posteriores a la aplicación. Debido a que la urea se mueve libremente con el agua hasta que se hidroliza y cambia a  $\text{NH}_4^+$ , en lo posible se la debe aplicar antes de un evento de lluvia o riego para permitir que la urea se mueva con el agua por debajo de la superficie del suelo.

El aplicar urea al voleo sobre las hojas de los cultivos (como pastos y bosques) puede resultar en pérdidas significativas de  $\text{NH}_3$ . La aplicación en bandas superficiales en zonas concentradas puede reducir las pérdidas de  $\text{NH}_3$  en comparación con la aspersión de urea en todo el campo. En suelos forestales, las pérdidas de  $\text{NH}_3$  después de la aplicación de urea puede ser mayor en suelos desnudos que en suelos cubiertos por una capa de humus debido a la capacidad amortiguadora de este material.

Las pérdidas de  $\text{NH}_3$  son una preocupación en siembra directa (labranza cero) donde comúnmente se aplica N en la superficie. La siembra directa acumula una capa de residuos en la superficie que puede incrementar el riesgo de pérdidas de N como  $\text{NH}_3$ , en comparación con labranza convencional. Las pérdidas por volatilización pueden ser significativas en estas circunstancias debido a que 1) la actividad de la ureasa es alta en los residuos, 2) los residuos forman una barrera que puede prevenir el contacto de la urea con el suelo, y 3) el mulch puede mantener el suelo más húmedo.

Cuando no es posible aplicar en sub-superficie, la aplicación de urea en una banda superficial es superior a la aplicación al voleo para minimizar las pérdidas de  $\text{NH}_3$ . Esto ocurre porque la concentración de urea en la banda excede la capacidad del suelo para hidrolizarla,



Foto 1. La humedad es el principal mecanismo para mover la urea aplicada en la superficie al interior del suelo.

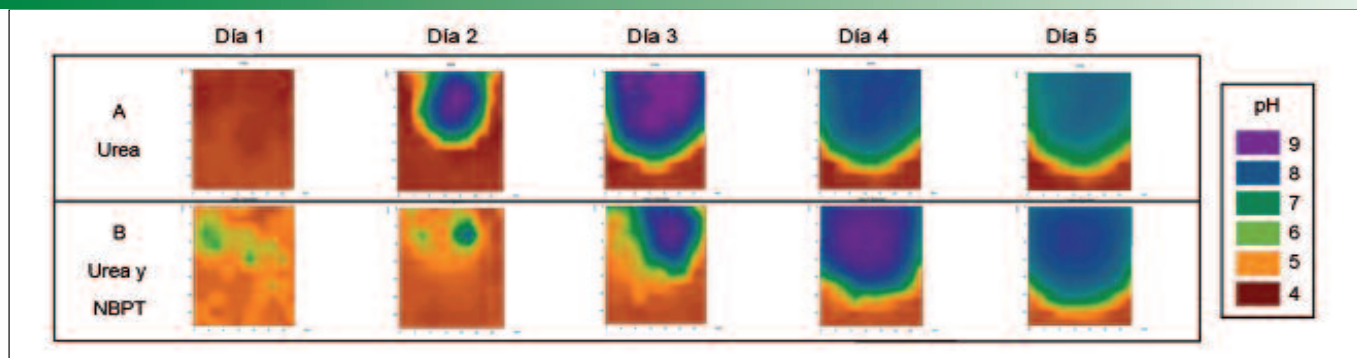
lo que permite más tiempo para que la urea se mueva hacia abajo y se ponga en contacto con el suelo donde está protegida contra volatilización. Por estas razones, la manera más efectiva de conservar el N de la urea es poner el material en el interior del suelo y no dejarlo en la superficie por un periodo prolongado de tiempo (Foto 1).

Las estimaciones de la volatilización de amonio varían ampliamente debido a las muy diferentes condiciones de los sitios donde se usa urea como fuente de N. Los reportes publicados en la literatura sobre la volatilización de  $\text{NH}_3$  de la urea aplicada a la superficie del suelo van de cerca a cero a 100 % en condiciones extremas. Normalmente se pueden esperar pérdidas de 10 a 40 % cuando la urea, o los materiales que contienen urea, permanecen en la superficie del suelo por un prolongado periodo de tiempo. Se debe siempre utilizar buenas prácticas de manejo como la fuente adecuada, en la dosis, época y localización adecuadas para mantener las pérdidas a  $\text{NH}_3$  al mínimo.

### pH del suelo

La conversión de  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NH}_3$  está gobernada por el pH. Varias reacciones ocurren después de la fertilización con urea que pueden afectar el pH del micrositio. Durante la hidrólisis, el pH alrededor del gránulo de urea se incrementa ( $\text{pH} > 8$ ) a medida que se forma el carbonato de amonio (Figura 2). Es durante este periodo de hidrólisis e incremento del pH donde es más probable la pérdida de N como  $\text{NH}_3$ . Varios factores ambientales como la concentración de urea, actividad de la enzima ureasa, temperatura, humedad y la presencia de residuos de cultivo pueden influenciar la tasa de hidrólisis. Durante la época de temperaturas altas es común que la hidrólisis de la urea se complete en una semana.

Las pérdidas de amonio ocurren aun en suelos ácidos debido a que la hidrólisis de la urea eleva el pH en el



**Figura 2.** Efecto de urea sola (A) y urea con el inhibidor de ureasa NBPT (B) en el pH del suelo en un periodo de 4 días después de la aplicación. El pH se incrementó de 4.6 a más de 9 alrededor del gránulo durante el primer día de la aplicación de la urea sola. Cada imagen representa un cuadrado de suelo de 25 mm. Datos de Stephan Bossfeld y Agrotain International.

sitio de reacción de gránulo y forma  $\text{NH}_3$ . El ejemplo de la **Figura 2** muestra el incremento del pH de suelo de 4.6 a más de 9 después de la aplicación de urea. Una mayor capacidad de amortiguación del suelo está relacionada con una menor pérdida de N por volatilización. Los suelos que tienen altos contenidos de arcilla y materia orgánica tienen una mayor capacidad de amortiguamiento.

El proceso bacteriano de nitrificación oxida el  $\text{NH}_4^+$  a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), liberando acidez en el proceso y reduciendo el pH del suelo al pH que tenía antes de aplicar la urea. El riesgo de pérdidas por volatilización se reduce a medida que el  $\text{NH}_4^+$  se oxida a  $\text{NO}_3^-$ . Sin embargo, una vez que se ha formado  $\text{NO}_3^-$  es probable que otros procesos como la denitrificación y la lixiviación promuevan la pérdida de N.

### Humedad del suelo

Cuando se aplica urea, o fertilizantes que contienen urea, a suelo seco la disolución es lenta y las reacciones químicas y biológicas no ocurren rápidamente. La hidrólisis de la urea también se vuelve muy lenta o se detiene cuando el suelo está muy seco. La probabilidad de que las pérdidas de  $\text{NH}_3$  sean más altas se presenta cuando la humedad relativa del aire es mayor que la humedad crítica de la urea. Sin embargo, la humedad es el principal mecanismo de movimiento de la urea aplicada en la superficie al interior del suelo y es esencial para hacer que los nutrientes sean disponibles para absorción por la planta desde la solución del suelo.

### Propiedades del suelo

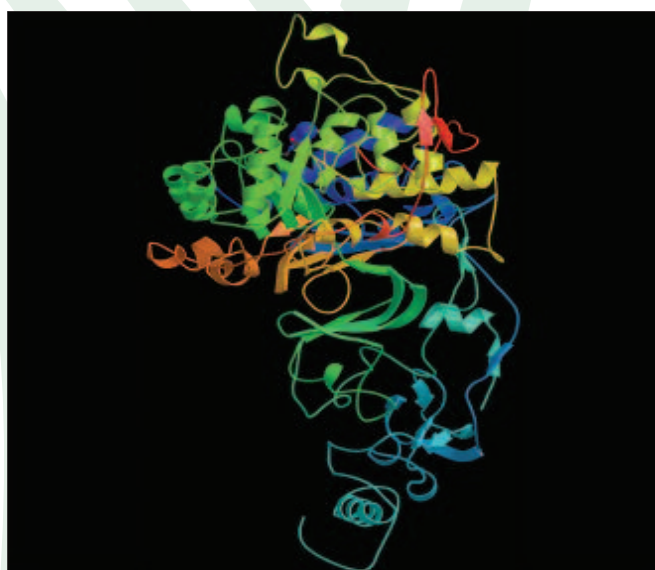
La atracción a los sitios de intercambio es el principal mecanismo de remoción de  $\text{NH}_4^+$  de la solución del suelo. Generalmente, los suelos con mayor CIC tienen la habilidad de retener más  $\text{NH}_4^+$  y reducir las pérdidas por volatilización. Los suelos arenosos tienen una baja CIC y baja capacidad de amortiguamiento, en consecuencia, el efecto del pH del suelo es mayor y las pérdidas de  $\text{NH}_3$  pueden ser significativas.

### Velocidad del viento

Generalmente, las pérdidas de  $\text{NH}_3$  proveniente de la urea aplicada a la superficie del suelo se incrementan en condiciones de mucho viento. Las condiciones de vientos fuertes están relacionadas con el secamiento del suelo y ambos factores tienden a incrementar el potencial de volatilización de  $\text{NH}_3$ .

### Temperatura

Las pérdidas de  $\text{NH}_3$  generalmente se incrementan con el aumento de temperatura debido al efecto en las reacciones químicas y biológicas. Las temperaturas altas aceleran la hidrólisis de la urea lo que incrementa el pH del suelo y la concentración de  $\text{NH}_3$ . Las altas temperaturas cambian también el equilibrio a favor del gas  $\text{NH}_3$  sobre el  $\text{NH}_4^+$ . Por esta razón, las pérdidas de  $\text{NH}_3$  pueden ser ligeramente mayores durante las épocas más calientes del año, pero también pueden presentarse picos diarios de pérdidas durante los periodos de alta temperatura durante el día. Sin embargo, debido a que el secamiento del suelo también favorece las pérdidas de  $\text{NH}_3$ , este factor a menudo interacciona con la temperatura y la velocidad del viento.



**Figura 3.** Modelo químico de la enzima ureasa responsable de la hidrólisis de la urea (Ha et al, 2001).

### Hidrólisis de la urea

La enzima ureasa es producida por casi todas las plantas, animales y microorganismos. Casi nunca está ausente y por lo tanto no representa un factor limitante en la transformación de la urea a  $\text{NH}_4^+$  (Figura 3).

### Suelos inundados

Las pérdidas de  $\text{NH}_3$  por volatilización en el agua de riego y en el agua de inundación pueden ser altas. Una alta concentración de  $\text{NH}_3$ , alto pH del agua, alta temperatura y elevada velocidad del viento pueden contribuir estas pérdidas. Cuando se aplica al voleo sobre el agua de inundación, la urea es más susceptible a volatilización que otros fertilizantes como el sulfato de amonio, debido a que el pH del agua se incrementará por la hidrólisis de la urea. La fotosíntesis de plantas y algas en el agua también incrementan el pH porque deprimen la concentración de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) durante el día, lo que hace que el pH del agua llegue hasta 9. Durante la noche, se libera  $\text{CO}_2$  durante la respiración de las plantas y algas y el pH se reduce nuevamente. En estas condiciones, la localización de la urea bajo la superficie del suelo elimina en gran parte las pérdidas por volatilización de  $\text{NH}_3$ .

Se pueden producir significativas pérdidas cuando se añade  $\text{NH}_3$  líquido al agua de riego, debido a que el agua se aplica al campo por medio de aspersores o por surcos. La utilización de UAN (mezcla 1:1 de urea y nitrato de amonio) reduce la volatilización ya que solamente la mitad del material es urea.

### Modificaciones de los fertilizantes

En ocasiones se deben aplicar los fertilizantes aun cuando las condiciones no sean óptimas. Se han utilizado diferentes métodos para reducir las pérdidas de  $\text{NH}_3$  de los fertilizantes en estas circunstancias. Estos métodos incluyen inhibidores de la ureasa, cobertura de los gránulos, acidificación o la adición de sales de calcio.

Se han estudiado varios compuestos para identificar formas efectivas de bloquear o retardar la hidrólisis de la urea. El producto de uso más común es el N-(n-Butil)-triamida tiofosfórica (NBPT por sus siglas en inglés) que se comercializa bajo el nombre de Agrotain. Este producto se combina con la urea para inhibir la acción de la enzima ureasa por un periodo de pocos días a dos semanas, dependiendo de la dosis de aplicación (Figura 2). El NBPT es particularmente beneficioso para ganar tiempo y esperar las lluvias o el riego que son los agentes que moverán la urea aplicada a la superficie al interior del suelo, sitio donde ya no es susceptible a volatilización (Foto 2).

Se ha utilizado con éxito una variedad de materiales para recubrir el gránulo y controlar la solubilidad de la



Foto 2. La cubierta de los fertilizantes de liberación controlada pueden reducir efectivamente la cantidad de área soluble expuesta al ambiente y minimiza la pérdida de  $\text{NH}_3$ .

urea. Los recubrimientos pueden ser efectivos para reducir la cantidad de urea soluble expuesta al ambiente, lo que en muchas circunstancias reduce significativamente las pérdidas de N.

Se puede reaccionar la urea con varios ácidos fuertes para mantener un bajo pH en la vecindad del gránulo o solución de urea. En el mercado se puede encontrar urea-ácido sulfúrico y urea-ácido fosfórico para manejo especializado.

Se ha demostrado que la adición de sales solubles de calcio, como el cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) a la urea reduce la pérdida de  $\text{NH}_3$  tanto en suelos ácidos como en suelos alcalinos al deprimir el pH y al reaccionar con las moléculas de carbonato formadas durante la hidrólisis. También se puede encontrar en el mercado urea que contiene compuestos de boro y cobre que inhiben parcialmente la actividad de la ureasa y urea con una cobertura de fosfato monocálcico ácido que también ayuda a minimizar las pérdidas de  $\text{NH}_3$ .

La volatilización del N de los fertilizantes representa una pérdida económica de un recurso valioso y una preocupación por la calidad del aire. Con manejo cuidadoso y con el conocimiento de las condiciones que conducen a pérdidas, se puede manejar apropiadamente los fertilizantes nitrogenados apropiadamente para minimizar el potencial de pérdidas por volatilización.

### Bibliografía

- Ha, N.C., S.T. Oh, J.Y. Sung, K.A. Cha, M. Hyung Lee, and B.H. Oh. 2001. Protein data bank (PDB 1E9Z) supramolecular assembly and acid resistance of *Helicobacter Pylori* ureasa. Nat. Struc. Biol. 8:480.❖