

Eficiencia del uso de nitrógeno y optimización de la fertilización nitrogenada en la agricultura de conservación

Nele Verhulst, Isabelle François, Kathrin Grahmann,
Rachael Cox, Bram Govaerts



Eficiencia del uso de nitrógeno y optimización de la fertilización nitrogenada en la agricultura de conservación

Nele Verhulst, Isabelle François, Kathrin Grahmann,
Rachael Cox, Bram Govaerts



Este material didáctico fue redactado por el Programa de Agricultura de Conservación del CIMMYT de México. Dirija sus comentarios para mejorarlo a Bram Govaerts (b.govaerts@cgiar.org).

El Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, CIMMYT® (www.cimmyt.org), es una organización de investigación y capacitación sin fines de lucro con socios en más de 100 países. El centro trabaja para incrementar de manera sustentable la productividad de los sistemas del maíz y del trigo sistemas y, por lo tanto, asegurar la seguridad alimentaria global y reducir la pobreza.

Los productos y servicios del centro incluyen variedades mejoradas de maíz y trigo, y sistemas de cultivo, la conservación de los recursos genéticos del maíz y del trigo, y el desarrollo de la capacidad. El CIMMYT pertenece y es financiado por el Grupo Consultivo sobre la Investigación Agrícola Internacional (*Consultative Group on International Agricultural Research, CGIAR*) (www.cgiar.org) y también recibe apoyos de gobiernos nacionales, fundaciones, bancos de desarrollo y otros organismos públicos y privados. El CIMMYT está particularmente agradecido por el generoso financiamiento sin restricciones que ha mantenido al centro fuerte y eficiente durante tantos años.

© Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) 2015. Todos los derechos reservados. Las denominaciones utilizadas en la presentación de los materiales en esta publicación no implican la opinión en absoluto o en parte del CIMMYT o sus organizaciones contribuyentes respecto a la situación legal de cualquier país, territorio, ciudad o área, o de sus autoridades o respecto a la delimitación de sus fronteras. El CIMMYT promueve el uso justo de este material. Se solicita que sea citado apropiadamente cuando corresponda.

Eficiencia del uso de nitrógeno y optimización de la fertilización nitrogenada en la agricultura de conservación

Nele Verhulst^a, Isabelle François^b, Kathrin Grahmann^{a, c}, Rachael Cox^a, Bram Govaerts^a

^a Centro Internacional de Mejoramiento del Maíz y Trigo, Apdo. Postal 6-641, 06600 México, D.F., México

^b Consultor independiente

^c Producción de vegetales Orgánicos e Investigación en Agroecosistemas en los Trópicos y Subtrópicos, Universidad de Kassel, Witzenhausen, Alemania.

1. Introducción

La población mundial se incrementa y las dietas van cambiando para incluir más carne. Debido a que el ganado tiene una dieta mayoritariamente basada en cereales, esto significa que la producción mundial de cereales debe duplicarse para el año 2050 para cumplir con las demandas de la población en aumento y los cambios en las dietas. Durante los últimos 50 años, la aplicación de fertilizantes nitrogenados se ha incrementado 20 veces y se prevé que su aplicación se incremente a 180 millones de toneladas para 2030. Asimismo, los precios de los fertilizantes nitrogenados han subido más de 2.5 veces en la última década. El uso y eficiencia de los fertilizantes nitrogenados es muy diferente dependiendo del tipo de medio ambiente:

- **En ambientes de altos insumos**, para el uso de fertilizantes minerales, es esencial un modelo eficiente y que no contamine para prevenir la fertilización nitrogenada excesiva. Los excesos pueden causar la lixiviación de $\text{NO}_3\text{-N}$, lo que da como resultado la eutrofización de cuerpos de agua (crecimiento vegetal excesivo o descomposición debida a nutrientes extra en el agua) y la destrucción de ecosistemas acuáticos. La aplicación excesiva de fertilizantes nitrogenados también incrementa las emisiones ambientalmente dañinas de $\text{NO}_x/\text{N}_2\text{O}$. En todo el mundo, la eficiencia del uso de nitrógeno (EUN, véase más adelante) promedia 33 % en cereales, lo que indica un importante potencial para mejorar.
- **En ambientes de temporal de baja productividad**, en donde el uso de fertilizantes es marginal y la productividad de cereales es baja, el enfoque debería estar sobre el incremento en el rendimiento y la calidad mediante la aplicación de fertilizantes nitrogenados moderada y eficiente más que en la aplicación excesiva. La calidad de los granos pequeños es determinada principalmente por la concentración de nitrógeno en el grano. Mientras más alta sea la concentración de nitrógeno, mayor será la ganancia del agricultor, con la condición de que los agricultores sean remunerados por la mayor calidad, lo cual no siempre es el caso.

Se ha propuesto a la agricultura de conservación como una combinación de principios de manejo para mejorar la eficiencia en el uso del agua, reducir la erosión del

suelo y conservar recursos tales como el tiempo, trabajo y combustibles fósiles de los agricultores. Esto se basa en tres componentes importantes:

1. Movimiento mínimo del suelo, menos o ninguna operación de labranza.
2. Retención parcial de residuos de las cosechas como cobertura del suelo.
3. Rotación de cultivos económicamente viables.

Se ha encontrado que la agricultura de conservación cambia la calidad física, química y biológica del suelo en comparación con las prácticas convencionales que incluyen labranza y, por lo tanto, afectan el ciclo del nitrógeno en el suelo (véase también el material *Agricultura de conservación, ¿mejora la calidad del suelo a fin de obtener sistemas de producción sustentables?*). Por lo tanto, es probable que la fertilización nitrogenada tenga un efecto diferente sobre los cultivos que crecen en condiciones de agricultura de conservación y, por lo tanto, se tenga que ajustar la fertilización en los sistemas de cultivo basados en la agricultura de conservación.

2. El ciclo del nitrógeno

La cantidad y formas del nitrógeno en el suelo cambian de manera constante debido a procesos edáficos físicos, químicos y biológicos. Las formas orgánicas de nitrógeno disponibles incluyen aminoácidos, proteínas y aminoazúcares. Las formas inorgánicas de nitrógeno son las formas absorbibles por las plantas, amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-), y las formas tóxicas para las plantas, amoniaco (NH_3) y nitrito (NO_2^-). El nitrógeno en la solución del suelo está presente de manera predominante como $\text{NO}_3\text{-N}$, el cual escasamente se absorbe en el suelo y, por lo tanto, se ve más afectado por la lixiviación, así como el $\text{NH}_4\text{-N}$, el cual, no obstante, está en su gran mayoría unido a las partículas del suelo.

El nitrógeno puede entrar en el suelo desde la atmósfera mediante la deposición seca y húmeda del nitrógeno, fertilizantes orgánicos y sintéticos, y fijación del nitrógeno. A través de la descomposición de residuos de los cultivos, se agrega nitrógeno a la reserva de nitrógeno orgánico. Algunos procesos tal como la **volatilización** del amoniaco (NH_3), en la cual el $\text{NH}_3\text{-N}$ gaseoso se pierde en la atmósfera, y la emisión de productos de la desnitrificación (N_2 , N_2O , NO) pueden

reducir el contenido de nitrógeno en el suelo. En caso de un exceso de humedad, el nitrógeno mineral (particularmente el NO_3^-) puede lixiviarse más allá del alcance de los cultivos de raíces comestibles (**lixiviación**, movimiento hacia abajo del NO_3^- a través del suelo por infiltración y flujo del agua, figura 1). El nitrógeno mineral en el suelo también puede agotarse mediante la absorción del nitrógeno por el cultivo.

El ciclo del nitrógeno en el suelo se ve muy afectado por la **mineralización**, la transformación del nitrógeno orgánico en materia orgánica del suelo (MOS) y abono en nitrógeno inorgánico, lo que finalmente forma amonio, por medio de la actividad de hongos y bacterias (figura 1). Las condiciones climáticas cálidas y húmedas aumentan los procesos de mineralización, los cuales se intensifican en suelos bien aireados. La **inmovilización** describe la extracción del nitrógeno inorgánico de la solución del suelo por microorganismos. Estos microorganismos degradan los residuos del cultivo con una alta relación carbono/nitrógeno (C/N) y satisfacen su demanda de energía al utilizar los componentes del residuo de carbono. Sin embargo, los microorganismos también utilizan el residuo del cultivo disponible y el fertilizante nitrogenado para formar proteínas para su propio crecimiento. Una relación C/N de > 30 en los residuos del cultivo lleva a una extensa inmovilización del nitrógeno.

La **nitrificación** es el proceso biológico en el suelo en el que el $\text{NH}_4\text{-N}$ es convertido en $\text{NO}_3\text{-N}$ por las bacterias *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*. La **desnitrificación** es el proceso biológico opuesto a la fijación biológica en la cual

los óxidos de nitrógeno (NO_3^- y NO_2^-) son reducidos paso a paso por la enzima reductasa a óxidos gaseosos (óxido nítrico, NO; óxido nitroso, N_2O ; y nitrógeno molecular, N_2).

La dinámica del nitrógeno en los sistemas agrícolas se ve muy afectada por las grandes cantidades que se agregan como fertilizantes nitrogenados. El suministro de nitrógeno a los suelos incrementa la productividad y la biomasa a corto plazo; sin embargo, los incrementos en la MOS pudieran acelerar la dinámica del nitrógeno y, por lo tanto, la emisión de N_2O , un gas con efecto invernadero.

Los diferentes pasos en la absorción, asimilación y reciclaje del nitrógeno a la deposición final en el grano pueden dividirse en dos etapas generales para el uso del nitrógeno en el ciclo de vida del cultivo:

- **Fase vegetativa:** El nitrógeno es absorbido mayoritariamente en su forma inorgánica por las raíces de la planta. Después de ingresar en la planta, inicia la fase vegetativa. En esta etapa vegetativa, las hojas jóvenes y las raíces sirven como sumidero para la captura de nitrógeno inorgánico.
- **Fase reproductiva:** El nitrógeno acumulado en los tallos, hojas y raíces se vuelve a movilizar mediante hidrólisis de proteínas. Así, los aminoácidos son exportados al grano. Se puede incrementar la disponibilidad de nitrógeno durante el periodo de llenado de granos mediante la adición de nitrógeno en combinación con un nivel de humedad del suelo adecuado, lo cual en zonas áridas podría requerir riego adicional. La mayor parte de la removilización del nitrógeno se lleva a cabo durante la senescencia. Sin embargo, este tipo de reciclaje del nitrógeno también puede presentarse antes de la floración para la síntesis de nuevas proteínas en los órganos en desarrollo, lo cual resalta la simplicidad de separar el ciclo del nitrógeno de la planta en solo dos fases.

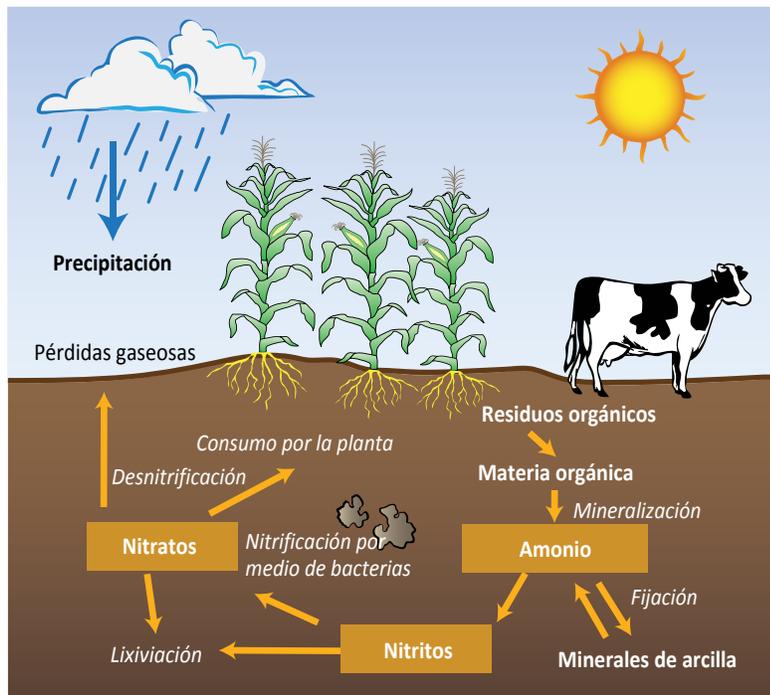


Figura 1: El ciclo del nitrógeno. La principal reserva de nitrógeno está en el suelo en forma de nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-) y amonio (NH_4^+). (adaptado de www.windows2universe.org)

3. Efectos de los cambios en las propiedades y procesos del suelo en sistemas de agricultura de conservación sobre el ciclo del nitrógeno

El sistema de labranza determina la colocación de los residuos del cultivo. Los residuos del cultivo se incorporan en el suelo mediante labranza convencional, mientras que en un sistema de agricultura de conservación, los residuos del cultivo permanecen en la superficie del suelo, lo cual influye en los procesos químicos, físicos y biológicos. Por lo general, la incorporación de los residuos vegetales por medio de la labranza en el suelo acelera la mineralización del carbono y del nitrógeno haciendo que la MOS dentro de los macroagregados esté más disponible para los microorganismos. Si los residuos se quedan en la parte superior del suelo, son menos susceptibles a la degradación microbiana.

A continuación se aborda el efecto de la agricultura de conservación sobre los procesos que causan la pérdida de nitrógeno después de la fertilización.

- **Inmovilización del nitrógeno:** Los residuos del cultivo con bajas concentraciones de nitrógeno ($C/N > 30$) causan una inmovilización temporal neta del nitrógeno después de la cual el crecimiento microbiano es limitado. Se ha encontrado que los sistemas de agricultura de conservación incrementan de manera temporal la inmovilización del nitrógeno debido a una descomposición de los residuos más lenta. Se puede compensar la inmovilización del nitrógeno a corto plazo mediante un aumento en la aplicación de fertilizantes nitrogenados, especialmente en los primeros años de conversión a agricultura de conservación.
- Se estima que las pérdidas promedio globales de nitrógeno por **volatilización** son del 7 % para los países industrializados y 18 % para los países en desarrollo. Se registra que los sistemas de agricultura de conservación tienen mayores pérdidas de nitrógeno debido a un aumento en la volatilización del NH_3-N y una insuficiente incorporación del fertilizante.
- La retención de residuos del cultivo y la labranza afectan procesos que llevan a efectos positivos y negativos sobre la **desnitrificación**. Por una parte, la retención de residuos de la agricultura de conservación con frecuencia incrementa el agua en el suelo y el contenido de MOS en comparación con la labranza convencional. Esto favorece las emisiones de N_2O . Por la otra parte, la retención de residuos también da como resultado un descenso en la temperatura del suelo y una mejor estructura edáfica y, por lo tanto, mejora la aireación, lo cual significa menos lugares anaeróbicos en el suelo. Esto puede reducir las emisiones de N_2O .
- Los suelos con cero labranza o camas permanentes combinadas con retención de residuos han mejorado la estabilidad de los agregados, lo cual da como resultado

mayores tasas de infiltración. Esto podría incrementar las **pérdidas por lixiviación de nitrógeno**. Las pérdidas por lixiviación en los sistemas de agricultura de conservación también pueden incrementarse debido al aumento en el número de túneles (bioporos) de lombrices de tierra. Por otra parte, la nitrificación más lenta durante los periodos sin cultivo en suelos de cero labranza puede reducir el potencial de lixiviación del NO_3 .

El elemento importante en estos procesos parece ser la biomasa orgánica del suelo. A largo plazo, la agricultura de conservación incrementa la MOS y, por lo tanto, la biomasa microbiana en el suelo. La biomasa microbiana en el suelo tiene un importante papel en la mineralización, movilización e inmovilización de nutrientes, y funciona como fuente y sumidero de la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Sin embargo, se debe resolver el problema de una menor mineralización del nitrógeno en los sistemas de agricultura de conservación. Se pueden considerar dos acciones con respecto a los residuos que se mantiene en el campo, pero estos necesitan ser evaluados dentro del contexto del sistema de producción:

- El uso de residuos en trozos más pequeños o desmenuzados, los cuales se descompondrán más rápido debido a que las poblaciones microbianas pueden colonizar y descomponer la paja con mayor rapidez si se incrementa la superficie del sustrato.
- Ajustar la cantidad de residuos retenidos.

4. Eficiencia del uso de nitrógeno (EUN)

4.1. Definición

Existen diferentes definiciones y perspectivas para la EUN y sus componentes. Una de las definiciones establece que la EUN es la proporción de rendimiento del grano por unidad de nitrógeno disponible en el suelo, incluido el nitrógeno del suelo residual presente y el fertilizante nitrogenado. Sin embargo, no todo el nitrógeno disponible en la planta viene del fertilizante nitrogenado. La EUN es una función de la estructura edáfica, condiciones climáticas, interacciones entre el suelo y procesos bacterianos y la naturaleza de las fuentes de nitrógeno orgánicas e inorgánicas, lo cual no está incluido en la siguiente fórmula. La forma más sencilla de calcular la EUN es con base en un balance parcial de nitrógeno:

$$EUN = \frac{\text{(nitrógeno exportado del campo a los cultivos)}}{\text{(nitrógeno aplicado)}}$$

Para resumir más formas de definir la EUN, nos referiremos a Grahmann *et al.* (2013).

4.2. Métodos para determinar la EUN

Se pueden usar estudios fisiológicos combinados con experimentos utilizando fertilizante marcado con ^{15}N , de preferencia en campo, para identificar los componentes

importantes de la EUN y la variabilidad genética de la dinámica de la distribución del nitrógeno dentro de la planta.

Como se mencionó anteriormente, varios procesos como las pérdidas de nitrógeno no están incluidos en la fórmula para la EUN. Las pérdidas más importantes en los sistemas de agricultura de conservación son la lixiviación y volatilización de nitratos.

- **La lixiviación de nitratos** puede medirse usando cartuchos de resina de intercambio iónico, lo cual determina las pérdidas acumulativas por lixiviado en escala de parcela. Se instalan los cartuchos de resina por debajo de la zona de enraizamiento excavando una zanja junto a la parcela y haciendo un túnel horizontal a aproximadamente 50 cm de profundidad para tener acceso a una parte de la parcela que no ha sido perturbada. La resina se mantiene en el lugar durante todo el ciclo de cultivo y proporciona un valor acumulado de la pérdida de nitratos a través del perfil edáfico. Después de la cosecha, se retiran los cartuchos de resina del suelo y se analiza su contenido en los iones unidos.
- **Las pérdidas por volatilización** de los compuestos nitrogenados gaseosos se pueden medir con sistemas de cámaras cerradas. Los gases colectados pueden analizarse directamente en el campo con dispositivos portátiles o se pueden extraer con una jeringa para posteriormente inyectarlos en viales al vacío, los cuales se cierran con un tapón de hule. Posteriormente, se analizan las concentraciones de gas de estos viales mediante cromatografía.

Los modelos de simulación representan una herramienta prometedora para identificar las prácticas de manejo con una EUN mejorada, un avanzado manejo de nutrientes y pérdidas de nitrógeno reducidas, a la vez que se reduce el número de experimentos necesarios en campo. Los modelos de simulación se basan en, y se elaboran con, datos de experimentos en campo. Una vez calibrado, se puede usar el modelo en otras condiciones climáticas, agronómicas o ambientales. Un modelo adecuado debe incluir datos del suelo, agua y climáticos para evaluar los procesos de mineralización, inmovilización y volatilización del ciclo del nitrógeno para identificar alternativas para reducir las pérdidas de nitrógeno por lixiviación, emisiones gaseosas o escurrimientos superficiales. Cada modelo debe ser configurado y calibrado para las condiciones únicas del lugar y sistema de cultivo. Para las técnicas de modelaje del manejo del nitrógeno, la información previa sobre el tipo de suelo, variedad del cultivo, $\text{NO}_3\text{-N}$ residual en el suelo y otros parámetros edáficos tal como el contenido de agua, MOS, pH o la capacidad de intercambio catiónico y las prácticas de manejo son una condición importante para una simulación exitosa. Los ejemplos de modelos usados para sistemas de labranza reducidos incluyen al PASTIS (Predicción

de transferencia de solutos agrícolas en el suelo) y NDICEA (Dinámica del nitrógeno en las rotaciones de cultivo en la agricultura ecológica).

5. Eficiencia del uso de nitrógeno en la agricultura de conservación

5.1. Estudios más recientes

Solo hay disponibles pocos estudios recientes de la EUN y el manejo de fertilizantes nitrogenados en sistemas de agricultura de conservación. En la agricultura de conservación, se pueden notar los efectos de los fertilizantes nitrogenados en las siguientes temporadas de cultivo durante varios años. Este es especialmente el caso cuando se aplica el fertilizante en combinación con la retención de residuos debido a que esto puede incrementar la inmovilización temporal del fertilizante, el cual es liberado en los años siguientes. Los resultados de la investigación sobre el efecto de la rotación en sistemas de agricultura de conservación sobre la EUN no son uniformes, pero en la mayoría de los estudios se encontraron efectos negativos del monocultivo sobre el rendimiento y la EUN, y efectos positivos de las leguminosas incluidas en la rotación.

5.2. Ajuste del manejo de los fertilizantes nitrogenados en la agricultura de conservación para mejorar la EUN

Se puede dividir el manejo de los fertilizantes nitrogenados en cuatro diferentes componentes: cantidad, tipo, momento de la aplicación y colocación del fertilizante nitrogenado.

5.2.1. Dosis de aplicación del nitrógeno

La dosis de fertilizante nitrogenado aplicado es el principal factor para determinar el rendimiento, seguido por la fuente de nitrógeno, momento de la aplicación y método de aplicación. Se puede calcular la dosis óptima de fertilizante nitrogenado a través del análisis de muestras de suelo colectadas antes de la siembra o con el uso de sensores. La dosis óptima varía con el potencial de rendimiento del sistema de producción. Una evaluación válida de la dosis de nitrógeno considera:

- el potencial de productividad del suelo
- cultivos previos
- relación del precio de los fertilizantes nitrogenados al valor del cultivo
- minimizar pérdidas ambientales.

En todos los casos, se deberá evitar una aplicación excesiva de compuestos nitrogenados. Los síntomas del exceso son rendimientos reducidos debido a que el cultivo está más susceptible a plagas y enfermedades y así como al acame. Por lo general, las plantas reducen la removilización del nitrógeno al grano y continúan con su crecimiento vegetativo.

El manejo del nitrógeno basado en sensores forma parte de la agricultura de conservación de precisión, la cual se refiere a la combinación de un movimiento de suelo mínimo, retención de residuos, rotación de cultivos y siembra de variedades mejoradas con tecnologías espaciales tales como sistema de posicionamiento global (SPG o GPS, por sus siglas en inglés), percepción remota y sistema de información geográfica (SIG o GIS, por sus siglas en inglés) para ajustar la aplicación del fertilizante a la demanda de las plantas con base en la verificación del crecimiento del cultivo para aumentar la EUN y el rendimiento. Se puede utilizar un sensor del índice diferencial de vegetación normalizado (IDVN o NDVI, por sus siglas en inglés) para seguir el desarrollo del cultivo durante la temporada tal como el sensor portátil GreenSeeker® (NTech Industries, Inc., Ukiah, California, EE. UU.). En combinación con un cultivo de referencia bien fertilizado, el sensor del NDVI puede ser útil para proporcionar información precisa acerca de la demanda de nitrógeno del cultivo que ayude a reducir los costos del fertilizante y las pérdidas de nitrógeno.

5.2.2. Tipo de fertilizante

Los fertilizantes nitrogenados varían en la concentración de nitrógeno y en la forma en la que se agregan al suelo y los cultivos. La elección del fertilizante depende del pH y contenido de humedad del suelo, nitrógeno disponible en el suelo, disponibilidad del fertilizante, disponibilidad del equipo de aplicación del fertilizante y costos por unidad de $N\ ha^{-1}$. No hay una recomendación universal disponible para el mejor tipo y cantidad de fertilizante. Los agricultores necesitan evaluar cuál fuente de nitrógeno es la adecuada para sus condiciones específicas para minimizar las pérdidas por volatilización y para superar los efectos de la inmovilización del nitrógeno.

La urea es un fertilizante muy común, pero puede causar mayores pérdidas de nitrógeno en la agricultura de conservación debido al aumento de la actividad de la ureasa en los residuos del cultivo. La aplicación foliar de urea en o después de la antesis demostró ser muy eficiente al incrementar la proteína en el grano y, por lo tanto, la calidad de la panificación en sistemas convencionales. Desafortunadamente, la literatura sobre el efecto de la aplicación foliar de compuestos nitrogenados en la agricultura de conservación es escasa.

El abono animal puede ser un recurso generado en el campo alternativo para compensar el aumento en los costos del nitrógeno mineral y, por lo tanto, ayudar a obtener un valor a partir de los desechos del campo. Se necesita más investigación para optimizar los métodos de aplicación y el momento de la aplicación para reducir las pérdidas por volatilización cuando se usa abono animal en los sistemas de agricultura de conservación.

5.2.3. Momento de la aplicación de nitrógeno

Se pueden reducir las pérdidas de nitrógeno con una mejor sincronización de la aplicación de los compuestos nitrogenados

y necesidades de absorción del cultivo. Si se aplica el fertilizante de nitrógeno mineral durante la máxima demanda de nitrógeno de la planta, se pueden reducir la inmovilización y las pérdidas del sistema suelo-planta y, por lo tanto, se puede incrementar la EUN.

Desde hace mucho tiempo, se ha supuesto que las aplicaciones de compuestos nitrogenados al inicio de la temporada optimizan el rendimiento del grano y las aplicaciones tardías proporcionan y optimizan la concentración de proteína en el grano. La mayor parte de las investigaciones disponibles se han realizado en condiciones de labranza. Sin embargo, el momento de la aplicación y la tasa de fertilización nitrogenada afectan de manera significativa el rendimiento, la EUN y sus componentes tales como las pérdidas de nitrógeno.

Asimismo, el riego puede contribuir a una absorción eficiente del fertilizante nitrogenado tardío. En sistemas de riego, es más probable que la aplicación tardía de compuestos nitrogenados contribuya con una absorción del nitrógeno más eficiente en comparación con los sistemas de producción de temporal. Los residuos del cultivo que ayudan a incrementar la humedad del suelo también podrían contribuir a mejorar la distribución del fertilizante nitrogenado en el suelo y la absorción del nitrógeno por las plantas, a menos que los residuos inmovilicen el nitrógeno. En resumen, la eficiencia en el uso de fertilizantes nitrogenados debe incrementarse al aplicar los compuestos nitrogenados durante los periodos con mayor demanda de nitrógeno de la planta y al retrasar la aplicación temprana o previa a la siembra de compuestos nitrogenados. Sin embargo, para los sistemas de cultivo de agricultura de conservación, falta mucha investigación con respecto a la optimización del momento de la aplicación para la fertilización nitrogenada.

5.2.4. Método de aplicación del fertilizante

Los cereales de grano pequeño absorben hasta el 90 % del nitrógeno antes de la etapa de hoja bandera. Los residuos aplicados en la superficie con una relación C/N de > 30 atrapan al nitrógeno del fertilizante durante el proceso de descomposición realizado por microorganismos cuando se aplica el fertilizante al voleo, mientras que la colocación del fertilizante debajo de la superficie del suelo evita el contacto directo del nitrógeno del fertilizante con los residuos del cultivo y puede ser útil para reducir el potencial para la volatilización, desnitrificación e inmovilización. La aplicación en bandas de compuestos nitrogenados en el subsuelo en la agricultura de conservación parece ser un método de aplicación eficiente para mejorar la recuperación del fertilizante en comparación con la aplicación de compuestos nitrogenados por medio de voleo. La reducida EUN en la agricultura de conservación que se observó en algunos estudios puede deberse a la aplicación al voleo del fertilizante nitrogenado. Hay una falta de fertilizadoras adecuadas y baratas para la aplicación del fertilizante debajo de la superficie del suelo en la agricultura de conservación. Los agricultores pequeños y medianos pueden usar estos

implementos para una aplicación suficiente y eficiente de su fertilizante nitrogenado. Los científicos y fabricantes de maquinaria locales deben combinar esfuerzos para idear la maquinaria necesaria y para promover nuevos métodos de aplicación de fertilizantes nitrogenados. La aplicación debajo de la superficie del suelo por medio de inyección con disco superficial, inyección con cincel, inyección a presión de abono de ganado vacuno y porcino puede reducir la volatilización del NH_3 y reducir las pérdidas de nutrientes en el escurrimiento pero potencialmente puede incrementar las emisiones de N_2O .

6. Calidad nutricional de los productos agrícolas

La mayoría de los estudios se centra en el rendimiento y con frecuencia no se presta atención a la calidad nutricional del cultivo en la investigación. La calidad del grano de cereal, correlacionada con la concentración de proteína del grano, es de particular importancia para los agricultores en pequeña escala que cultivan cereales como cultivos para la venta inmediata y son remunerados por la calidad. Existen diferentes factores que pueden afectar la concentración de proteína en el grano:

- Se puede incrementar mediante **la aplicación de fertilizantes nitrogenados** por arriba de la dosis de fertilizante que supere al nitrógeno como el principal factor limitante para el rendimiento del cultivo.
- **El método de labranza** puede afectar el contenido de proteína y calidad del trigo, debido a que afecta el contenido de humedad en el suelo, disponibilidad de nutrientes, evaporación y temperatura del suelo.
- **El incremento en la complejidad de la rotación**, al introducir leguminosas, debe de producir mayores rendimientos y concentraciones de proteína en el grano en los regímenes de fertilidad del suelo, particularmente en ambientes con insumos reducidos.

Los resultados de los pocos estudios acerca del efecto de la agricultura de conservación sobre la calidad del trigo no son consistentes. Se pueden encontrar en la literatura comparaciones entre las prácticas de agricultura de conservación y labranza convencional con respecto a las concentraciones de proteína en el grano y otros rasgos de la calidad. La explicación de los cambios en la calidad del grano de trigo entre ambos sistemas requiere un análisis exhaustivo del ciclo del nitrógeno, el cual es influenciado especialmente por el manejo de residuos.

7. Compuestos químicos que retrasan y estabilizan la liberación del nitrógeno de los fertilizantes

Se propusieron aditivos para fertilizante sintéticos tales como inhibidores de la ureasa o la nitrificación y fertilizantes de liberación lenta para mejorar la EUN. Los inhibidores de la ureasa pueden potencialmente reducir las pérdidas por volatilización al prevenir la degradación de la urea e incrementar la probabilidad de que el fertilizante sea absorbido en el suelo justo después de una lluvia. Una vez más, la mayoría de los estudios fueron realizados en condiciones convencionales y no hay estudios sobre agricultura de conservación.

8. Conclusiones y retos futuros

Los datos disponibles demuestran que las interacciones entre los componentes de la agricultura de conservación, y sus efectos sobre el rendimiento y calidad del cultivo, son complejas y con frecuencia específicas de cada lugar. Con base en los pocos datos disponibles, la agricultura de conservación parece tener menores tasas de EUN que los sistemas convencionales, lo cual se debe en gran medida a la inmovilización de los fertilizantes nitrogenados por medio de los residuos del cultivo y el aumento en las tasas de fertilización con la agricultura de conservación. Se necesita más investigación para confirmar estos resultados en diferentes sistemas de cultivo y ambientes. Los estudios en campo a largo plazo pueden brindar un mejor conocimiento del efecto de las tecnologías basadas en la agricultura de conservación sobre el ciclo del nitrógeno. También hay una clara necesidad de investigación aplicada sobre cómo ajustar el manejo de los fertilizantes nitrogenados, y la maquinaria, y traducir los resultados en recomendaciones al agricultor. Las recomendaciones serán específicas para cada lugar y parcela y dependerán de factores abióticos tales como el clima, tipo de suelo, cantidad de lluvia y temperatura, así como en las prácticas agronómicas tales como la rotación, intensidad de la labranza (cero-reducida-mínima), la cantidad de residuos del cultivo que se dejan en el campo y finalmente los objetivos del agricultor para producir mayores rendimientos del cultivo o mejorar la calidad del cereal.

Este material está basado en:

Grahmann, K., Verhulst, N., Buerkert, A., Ortiz-Monasterio, I., Govaerts, B., 2013. Nitrogen use efficiency and optimization of nitrogen fertilization in conservation agriculture. CAB Reviews 8, No. 053, en línea ISSN 1749-8848.

Agradecimientos

Esta publicación es un material de divulgación del CIMMYT que se realiza en el marco de la Estrategia de Intensificación Sustentable de los Sistemas de Producción de Granos en Latinoamérica. La estrategia recibe el apoyo del gobierno mexicano a través de la Sagarpa, de los programas de investigación del CGIAR MAIZE, WHEAT y CCAFS, USAID, Syngenta, Kellogg's y la Agencia Alemana de Cooperación Internacional (GIZ). K. Grahmann recibió una beca de PhD del Servicio de Intercambio Académico de Alemania (DAAD).

