

Uso Eficiente de Nutrientes



**Memorias del Simposio “Uso Eficiente de
Nutrientes”** presentado por el IPNI
en el XVIII Congreso Latinoamericano
de la Ciencia del Suelo

**San José, Costa Rica
16-20 de Noviembre del 2009**

Editores

**Dr. José Espinosa
Dr. Fernando García**

PRESENTACION

El Instituto Internacional de Nutrición de Plantas (IPNI) considera que uno de los logros globales de su trabajo es el beneficio que la humanidad recibe del manejo responsable de la nutrición vegetal. Los beneficios económicos, ambientales y sociales derivados del uso de los nutrientes hacen que la eficiencia de uso sea un indicador crítico del éxito del manejo de los mismos en los sistemas agrícolas. A medida que se incrementan los costos, el uso rentable de los nutrientes requiere de alta eficiencia. De igual forma, a medida que se intensifican las preocupaciones por el cambio climático, la calidad del agua y del aire y la biodiversidad, el lograr niveles aceptables de pérdidas de nutrientes de los ecosistemas requiere de alta eficiencia en el manejo de la tierra cultivada y de la producción de rendimientos altos para reducir la necesidad de utilizar tierra frágil. Además, para entregar a la sociedad los alimentos en la cantidad y calidad proyectadas y a un precio razonable es necesario que los costos de producción permanezcan relativamente bajos y que al mismo tiempo se incremente la productividad. Se ha estimado que la demanda de alimentos a mediados de este siglo será el doble de la producción actual.

Los beneficios del uso de nutrientes hacen evidente la necesidad de que la eficiencia sea un objetivo del manejo, pero, de igual forma, se requiere que la efectividad de los nutrientes sea un objetivo crítico del mismo manejo para lograr satisfacer las demandas de producción. De hecho, el incremento de los rendimientos a metas más altas, nunca antes obtenidas, es un elemento imprescindible de la producción sostenida de cultivos. En el futuro, el manejo de nutrientes debe ser eficiente y efectivo para lograr alcanzar los beneficios esperados del uso de nutrientes.

En este Simposio, el IPNI resume el estado del conocimiento con respecto a la eficiencia de uso de nutrientes en las Américas y discute el contexto contemporáneo dentro del cual se deben manejar los nutrientes. Debido a que los principios del manejo apropiado de nutrientes son universales, la primera parte del Simposio se enfoca en los principios generales, sin geografía específica. Debido a que las mejores prácticas de manejo, como manifestaciones de campo del apropiado uso de los nutrientes, son específicas para el sitio, la segunda parte del Simposio se enfoca en regiones específicas de América Latina.

La eficiencia del uso de los nutrientes tendrá una creciente importancia en el futuro ya sea en las grandes extensiones del Cerrado en Brasil, en las Pampas de Argentina o en las fincas de pequeños agricultores en Centro y Sud América. El IPNI espera que este Simposio, y sus respectivas memorias, sean una herramienta importante en el avance del manejo eficiente y efectivo de nutrientes en toda América latina.

Dr. Paul Fixen

Vicepresidente IPNI

TABLA DE CONTENIDO

1	Eficiencia del uso de nutrientes en el contexto de agriculturas sostenible - - - - -	1
	<i>Paul E. Fixen</i>	
2	Eficiencia de uso del nitrógeno: Desafíos mundiales, tendencias futuras - - - - -	11
	<i>Cliff S. Snyder</i>	
3	Principios básicos de la eficiencia de fósforo y potasio - - - - -	20
	<i>T. Scott Murrell</i>	
4	Eficiencia de uso de nutrientes en Brasil - - - - -	26
	<i>Luís Ignacio Prochnow, Valter Casarin, Nand Kumar Fageria y Milton Ferreira Moraes</i>	
5	Eficiencia de uso de nutrientes en sistemas agrícolas del Cono Sur de Latinoamerica - - - - -	37
	<i>Fernando O. García y Fernando Salvagiotti</i>	
6	Herramientas para mejorar la eficiencia de uso de nutrientes en maíz - - - - -	49
	<i>José Espinosa y Juan Pablo García</i>	

EFICIENCIA DE USO DE NUTRIENTES EN EL CONTEXTO DE AGRICULTURA SOSTENIBLE

Paul E. Fixen¹

Resumen

Una meta esencial de la agricultura, considerando la creciente demanda de la sociedad por alimentos, fibra y combustibles, la difícil situación económica mundial y las crecientes preocupaciones sobre la calidad del agua y el aire, es el mejoramiento simultáneo de la eficiencia de la productividad y de la eficiencia de uso de los recursos, incluyendo la eficiencia de uso de los nutrientes (EUN). Las mejores prácticas de manejo (MPM) se pueden definir como acciones, aplicadas a los recursos, que han sido probadas con investigación y que entregan el mejor desempeño combinado de aspectos económicos, sociales y ambientales, los tres pilares de la sostenibilidad. Existen herramientas básicas para mejorar la EUN que al mismo tiempo cumplen con las demandas de sostenibilidad de la sociedad. Para los nutrientes, las MPM son manifestaciones en el campo, de los cuatro fundamentos (4Fs) del manejo de nutrientes en los cultivos: aplicación de la fuente correcta del nutriente, en la dosis, época y localización correctas. Para ser verdaderamente correctas, estas manifestaciones de campo deben ser específicas para el cultivo, para el lote y, a menudo, para una zona dentro del lote. Sin embargo, la base científica sobre la cual se levantan los 4Fs lleva a MPM universales. Por esta razón, a pesar de que las MPM son específicas para un sitio, un marco global para desarrollarlas, estudiarlas e implementarlas puede facilitar mejoramiento de manejo de nutrientes dentro de sistemas de producción sostenibles.

Contexto global del manejo de nutrientes contemporáneo

Las mejores prácticas de manejo (MPM) se pueden definir como acciones, aplicadas a los recursos, que han sido probadas con investigación y que entregan el mejor desempeño combinado de aspectos económicos, sociales y ambientales (IPNI, 2009). Se han presentado otras definiciones con énfasis en ciertos aspectos de las MPM incluyendo la protección ambiental (Sharpley et al., 2006; Tandon y Roy, 2004), ahorro de recursos (Anónimo, 2006), optimización del crecimiento y minimización de los efectos ambientales adversos (Lilly, 2009) o evaluación a través de la implementación con agricultores

(Griffith y Murphy, 1991). Las MPM son la manifestación de campo de los cuatro fundamentos (4Fs) de la nutrición de plantas: aplicación de la fuente correcta, en la dosis, época y localización correctas (Roberts, 2007; Bruulsema et al., 2009).

Debido a que los nutrientes influyen muchos aspectos críticos dentro y fuera de los límites del lote, es importante revisar el contexto global del manejo contemporáneo de nutrientes antes de discutir aspectos específicos. Los tres aspectos que engloban las principales preocupaciones que la humanidad enfrentará en las próximas décadas son nutrición humana, carbono y tierra (**Figura 1**). Dos de estos factores, carbono y tierra, fueron recientemente discutidos en un muy interesante artículo presentado por el Dr. Henry Janzen en el Simposio Internacional de Dinámica de la Materia Orgánica en el Suelo (Janzen, 2009). Asuntos relacionados con el carbono incluyen el cambio climático, energía de bajo costo y bioenergía. Los asuntos de tierra incluyen el uso del recurso tierra, calidad del suelo y manejo de residuos. El Dr. Janzen inteligentemente indica que la materia orgánica del suelo es uno de los aspectos comunes entre estos factores. La adición de la nutrición humana como un tercer factor trae a escena aspectos de calidad, cantidad y costo de los alimentos. Un aspecto crítico en la discusión del manejo de nutrientes es reconocer que existen componentes significativos y comunes para los tres grandes factores: la fertilidad del suelo y la forma como el manejo de los nutrientes puede afectar el suplemento de alimentos, la tierra y el ciclo del carbono.

Se ha estimado que la necesidad de alimentos se duplicará en los próximos 30 años (Glenn et al., 2008). Esto equivale a mantener una tasa de incremento mayor al 2.4 % durante ese periodo de tiempo. El enfrentar esa demanda desde el punto de vista de sostenibilidad es un reto inmenso que requerirá estrecha colaboración entre disciplinas, geografías y sectores público y privado. La magnitud de este reto se aprecia mejor cuando esta tasa de incremento se compara con la tasa de incremento histórico del rendimiento de cereales que ha sido lineal por cerca de medio siglo con pendientes de solamente 1.2 a 1.3 % (**Figura 2**; FAO, 2009).

¹ International Plant Nutrition Institute, pfixen@ipni.net

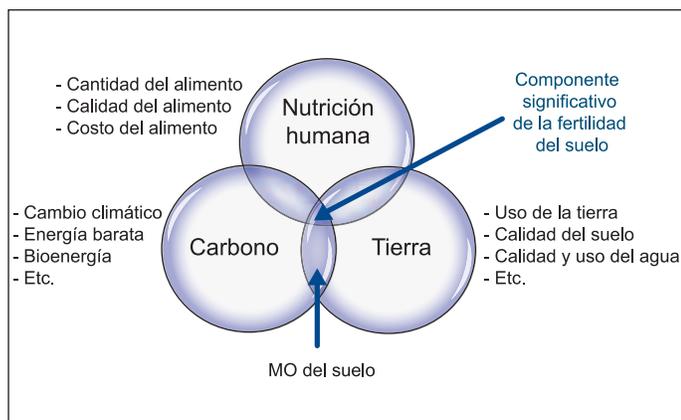


Figura 1. Principales preocupaciones y desafíos de las próximas décadas (Conceptos de carbono y tierra de Janzen, 2009).

El manejo de nutrientes debe tener en cuenta sistemas de cultivo que contribuyan económica, social y ambientalmente a la sostenibilidad. Considerando la creciente demanda de la sociedad por alimentos, fibra y energía, la difícil situación económica mundial y las crecientes preocupaciones sobre la calidad del agua y el aire, el mejoramiento simultáneo de la eficiencia de la productividad y de la eficiencia de uso de los recursos, incluyendo la eficiencia de uso de los nutrientes (EUN), es una meta esencial para la agricultura (Fixen, 2009a). La globalización ha unido los retos de incrementar la productividad e incrementar la eficiencia. Mejorar solamente la eficiencia sin incrementar la productividad, simplemente incrementa la presión para producir más en nueva tierra que no es adecuada para producción eficiente.

El Dr. Norman Borlaug recientemente hizo un llamado para una segunda "Revolución Verde" como una más extensa lucha contra el hambre en el mundo. El Dr. Borlaug tenía la esperanza que el Acto de Seguridad Alimentaria de los Estados Unidos, implementado en el año 2009, pueda liderar el camino. El Senador Richard Lugar, corresponsable de la ley, indicó que "este mandato es un esfuerzo más enfocado para unirnos con otras naciones en un esfuerzo por incrementar los rendimientos, crear oportunidades económicas para los pobres en áreas rurales y para ampliar el conocimiento ..." (TAMU, 2009).

A principios de este año, el Secretario de Agricultura de los Estados Unidos comentó lo siguiente: "debemos encontrar la forma de hacer más de lo que hemos hecho, esto significa un mayor esfuerzo del Departamento de Agricultura para concertar con el sector privado y las Universidades en formas de como se puede ser más productivo, de como se pueden usar menos recursos naturales para producir ..." (USDA, 2009).

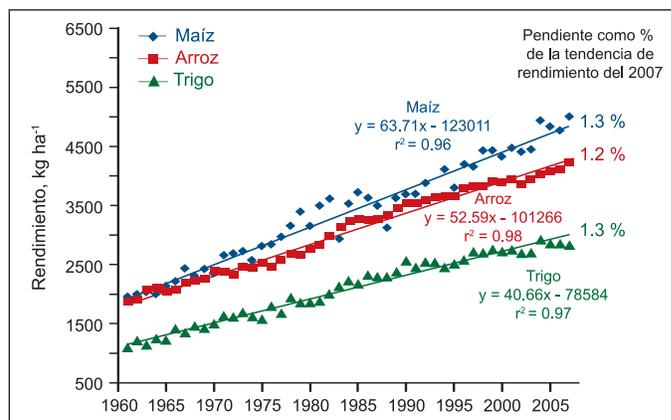


Figura 2. Tendencias globales del rendimiento de cereales, 1961 - 2007 (Datos de la FAO, 2009).

La necesidad de incrementar simultáneamente la productividad y eficiencia ha llamado la atención de la industria privada. Monsanto (2008) ha anunciado su compromiso de desarrollar para el año 2030 semillas que puedan duplicar el rendimiento y que utilicen un tercio de los recursos, como nitrógeno (N) y agua, requeridos para la producción. Dupont (2009) ha indicado que gracias a su esfuerzo global en investigación, Pioneer está trabajando para incrementar el rendimiento de maíz y soya en 40 % para el año 2018, duplicando la actual tasa anual de incremento en rendimiento.

Como en el pasado, los futuros incrementos en rendimiento no estarán solamente basados en el mejoramiento genético, sino también en los cambios en algunos factores de producción que interactúan entre sí. Por ejemplo, la evaluación del rendimiento de grano de maíz de los híbridos liberados en el cinturón maicero de los Estados Unidos por Pioneer Hi-Bred Internacional de 1930 al 2007 muestra una tasa anual de incremento de solamente 0.014 t ha⁻¹ a una población de 10 000 plantas ha⁻¹ y de 0.107 t ha⁻¹ a 79 000 plantas ha⁻¹ (Hammer et al., 2009). De la misma forma, se deben considerar los ajustes en las prácticas de manejo de nutrientes a medida que aparecen los cambios en genética, densidad de plantas y otras prácticas culturales, con o sin alteraciones genéticas que se enfoquen específicamente hacia la EUN. Con el mayor contenido de nutrientes en los cultivos de alto rendimiento y con un mayor potencial de uso de insumos para reemplazar la creciente remoción, existe el riesgo de que más nutrientes se pierdan del sistema. Por esta razón, el reto de incrementar la productividad y la EUN se incrementa. Estos factores han motivado a la industria de fertilizantes a desarrollar una familia de fertilizantes mejorados diseñados para entregar más efectivamente los nutrientes a las plantas, minimizando al mismo tiempo las pérdidas al ambiente (Motavalli et al., 2008).

Marco de los 4Fs de la nutrición vegetal

Para que la ciencia de nutrición de plantas trabaje bien a través de las diferentes disciplinas, entre los sectores público y privado y a través de las diferentes geografías, es necesario un marco común de metas, prácticas e indicadores de desempeño. Las bases para este marco global fueron desarrolladas hace más de 20 años por Thorup y Stewart (1988) cuando ellos indicaron que "... esto significa usar el adecuado tipo de fertilizante, en la cantidad adecuada, en el sitio adecuado y en la época adecuada." La **Figura 3** es una representación esquemática de los 4Fs para nutrientes basándose en los conceptos descritos por Thorup y Stewart (Bruulsema et al., 2008). En su núcleo están los 4Fs – aplicación de la fuente correcta, en la dosis, época y localización correctas. Las MPM son las manifestaciones de campo de estos 4Fs.

Los 4Fs se presentan dentro de un sistema de cultivos por que se integran con las MPM agronómicas para lograr los objetivos planteados por el manejo. Estos objetivos de manejo a nivel de finca contribuyen a lograr un mayor desarrollo económico, social y ambiental en forma sostenible. Más aún, los 4Fs no pueden ejecutarse efectivamente si existen problemas en otros aspectos del sistema de producción. Darst y Murphy (1994) escribieron sobre las lecciones de la tormenta de polvo en los Estados Unidos y de la abundante investigación que demuestra los méritos de la fertilización apropiada y otras nuevas tecnologías de producción, catalizando de esta forma el fusionamiento de la conservación con las MPM. La ciencia y la experiencia demuestran claramente que el impacto de las MPM de los fertilizantes en el rendimiento, calidad y rentabilidad del cultivo, así como en el control de la pérdida de nutrientes al agua o al aire, están profundamente influenciadas por otras prácticas agronómicas (población, cultivar, labranza, manejo de plagas, etc.) y las prácticas de conservación (terrazas, cultivos en fajas,

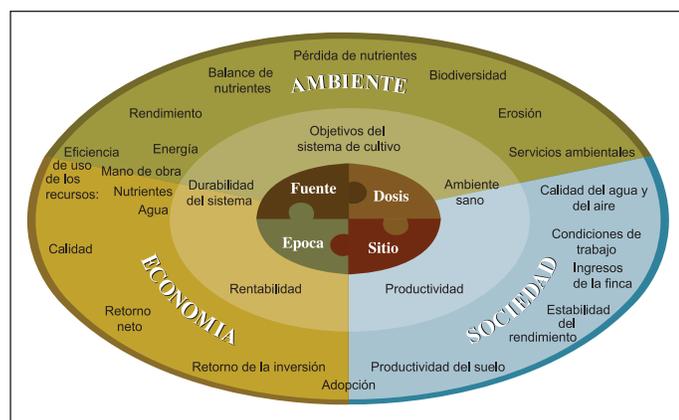


Figura 3. Marco global de los 4Fs (Adaptado de Bruulsema et al., 2008).

caminos y desviaciones de agua, etc.). Las prácticas definidas con suficiente especificidad para ser útiles para tomar decisiones sobre uso de fertilizantes en la finca son, a menudo, “mejores” prácticas solamente cuando están en el apropiado contexto con otras MPM agronómicas y de conservación. Las MPM de fertilizantes pueden ser totalmente inefectivas si el sistema de cultivo en el cual se emplean tiene otras limitaciones.

El enfoque de este artículo es sobre la eficiencia de uso de los fertilizantes y las asociadas MPM de los fertilizantes, en contraste con las MPM de nutrientes que son un tópico más amplio. Las MPM de nutrientes incluyen el manejo de los residuos de ganadería y las prácticas diseñadas para capturar los nutrientes antes que ellos se pierdan del agroecosistema (cultivos de cobertura, manejo de residuos, siembra en contorno y control de drenaje). Estas prácticas, que se extienden más allá del manejo eficiente de los fertilizantes, son a menudo esenciales para que los agricultores logren muchos de los objetivos del manejo de nutrientes, especialmente aquellos relacionados con el ambiente. El enfoque sobre las MPM de los fertilizantes presentado aquí no debe tomarse como que reduce la importancia de las prácticas de manejo de nutrientes. Como se indicó anteriormente, el no seguir las MPM en estas otras áreas puede hacer fallar también las MPM de los fertilizantes.

Alrededor del círculo exterior de marco de las 4Fs están ejemplos de indicadores de desempeño. Un complemento balanceado de estos indicadores puede reflejar la influencia de las MPM sobre las metas de desarrollo sostenible. El marco global muestra claramente que la sostenibilidad del sistema incluye más factores que solamente el rendimiento y la EUN, aun cuando éstos son indicadores críticos. La intervención de los usuarios y actores relacionados con el sistema en los indicadores de desempeño es parte esencial del proceso.

Determinación de la EUN como un indicador de desempeño de las MPM

El mirar a la EUN como uno de los varios indicadores de desempeño, incluyendo la productividad del sistema, ofrece la oportunidad de medir esta eficiencia. Los métodos para determinar la EUN y su interpretación fueron recientemente revisados por Dobermann (2007) y un resumen aplicado fue compilado por Snyder y Bruulsema (2007). Dobermann también resumió el estado actual de la EUN de los principales cultivos del mundo, indicando que el promedio simple anual de la eficiencia de recuperación de N en lotes de agricultores es a menudo menor que 40 %, pero que los agricultores con mejor manejo operan a eficiencias más altas. Dobermann utilizó los datos de un

Tabla 1. Eficiencia de uso de N en un experimento a largo plazo en maíz continuo bajo riego, manejado con la recomendación regional y con niveles intensos de población y fertilización (Dobermann, 2007).

2000-2005, Lincoln, Nebraska	Recomendado	Intensivo
Promedio de rendimiento de maíz, t ha ⁻¹ año ⁻¹	14.0	15.0
Fertilizante nitrogenado, kg N ha ⁻¹	1 005	1 495
N removido en el grano, kg N ha ⁻¹	880	970
Cambio medido del N en el suelo, kg ha ⁻¹	139	404
N no contabilizado, kg ha ⁻¹	14	121
EUN 1: Productividad parcial del factor de N, kg de grano kg ⁻¹ de N aplicado	70	50
EUN 2: kg de N en el grano kg ⁻¹ de N aplicado	0.88	0.65
EUN 3: (kg de N en el grano + cambio de N en el suelo) kg ⁻¹ de N aplicado	1.01	0.92

estudio, conducido por 6 años en Nebraska, con maíz continuo bajo riego manejado con la recomendación normal y con altos niveles de población y fertilización, para ilustrar como las expresiones de la EUN pueden ser mal interpretadas fácilmente (**Tabla 1**). En este estudio, que compara un sistema de altos rendimientos intensamente manejado con un sistema que usa la recomendación de la región, se observó que la productividad parcial del factor de N (PPF, grano producido por unidad de N aplicado) del sistema intensivo fue considerablemente menos eficiente en N que el sistema de la recomendación regional. Sin embargo, cuando se tomó en cuenta el hecho de que el fertilizante nitrogenado contribuyó a la acumulación de materia orgánica del suelo en el sistema intensivo, y cuando estos cambios en N del suelo se incluyeron en el cálculo, los dos sistemas tenían casi el mismo nivel de eficiencia de N. Dobermann indicó que a través del tiempo este incremento en suplemento de N por el suelo debería eventualmente reducir la necesidad de fertilizantes nitrogenados, resultando en un incremento del PPF. Estos efectos son particularmente valiosos para los investigadores que están tratando de incrementar la productividad con métodos intensivos, donde se implementan nuevas prácticas que difieren de la historia de investigación en estaciones experimentales o campos de agricultores. Si los cambios en las prácticas culturales son tales que hacen que la materia orgánica del suelo se incremente, los cambios temporales en la inmovilización o mineralización neta de los nutrientes pueden impactar la EUN aparente.

El fósforo (P) y el potasio (K), que se acumulan fácilmente en el suelo en formas disponibles para la planta, tienen retos especiales cuando se trata de evaluar sistemas basados tanto en la productividad como en la EUN. La **Figura 4** resume estudios conducidos en Argentina en trigo que ilustran este reto (García, 2004). Mientras más bajo fue el nivel de fertilidad del suelo más alta fue la

eficiencia agronómica [(rendimiento del tratamiento - rendimiento del testigo)/(dosis del nutriente)]. Al nivel más bajo de P en el suelo la eficiencia de recuperación (por el método de la diferencia) fue de 28 % y declinó a cerca de cero a medida que el contenido de P en el suelo llegaba a niveles que no eran limitantes. De esta forma, ni la eficiencia agronómica, ni la eficiencia de recuperación, calculada por el método de diferencia ofrecen un indicativo directo de si la eficiencia de P es apropiada para el sistema. Lo mismo ocurre con K. Por esta razón, se debe considerar también la productividad en el proceso.

En una reciente revisión global de la eficiencia de P en el suelo y en los fertilizantes, Syers y colaboradores (2008) indicaron que preferían el cálculo de la eficiencia de recuperación por el método del balance, donde el P removido por el cultivo se divide para el P aplicado. Esta expresión también se la conoce como balance parcial de nutrientes o relación remoción : uso (Snyder y Bruulsema, 2007). Syers y colaboradores, concluyeron que para muchos suelos que están en el rango adecuado de P en el

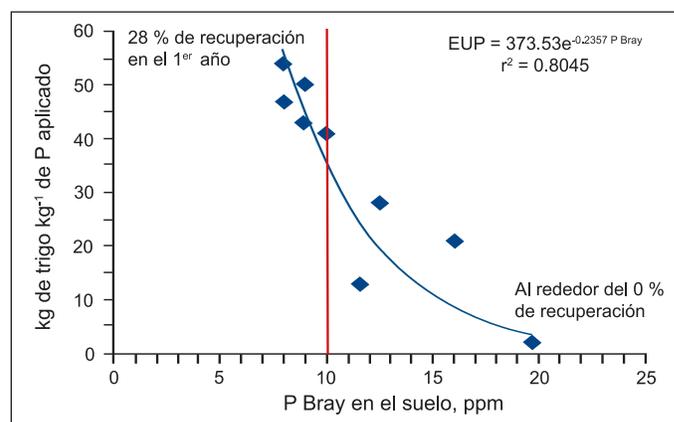
**Figura 4. Influencia de la fertilidad del suelo en la eficiencia agronómica del P en experimentos de trigo en Argentina (García, 2004).**

Tabla 2. Ingresos y salidas de N y P en diferentes regiones del mundo (Vitousek et al., 2009).

	----- Balances de nutrientes por región, kg ha ⁻¹ año ⁻¹ -----					
	Oeste de Kenia (maíz de bajos insumos)		Norte de China (trigo/maíz en doble cultivo)		Medio oeste Estados Unidos (maíz/soya)	
Entradas y salidas	N	P	N	P	N	P
Fertilizante	7	8	588	92	93	14
Fijación biológica del N					62	
Total de ingresos agronómicos	7	8	588	92	155	14
Remoción en el grano	23	4	361	39	145	23
Remoción en otros productos cosechados	36	3				
Total de salidas agronómicas	59	7	361	39	145	23
Ingresos menos salidas	-52	+1	+227	+53	+10	-9
Relación remoción : uso¹	8.4	0.88	0.61	0.42	0.94	1.64

¹ Datos calculados por Fixen

suelo (donde los rendimientos de los cultivos son máximos) la aplicación de P en dosis similares a aquellas removidas por el cultivo mantienen esos niveles en el suelo, indicando que existe una muy alta eficiencia de recuperación, a menudo mayor al 90 %. La verificación de este método no requiere medición continua del estado de la fertilidad del suelo, cosa que no puede ser posible en los países de desarrollo.

El método de la relación remoción : uso para la estimación de la EUN sugerida por Syers y colaboradores, para P puede aplicarse también a una región geográfica. Los datos requeridos para este cálculo fueron recientemente presentados por Vitousek y colaboradores (2009) para N y P en sistemas de maíz de bajos insumos en el oeste de Kenia, en sistemas dobles trigo/maíz en el norte de China y en sistemas maíz/soya del medio oeste de los Estados Unidos. Las relaciones remoción: uso se añadieron a los datos de balance de nutrientes reportados (Tabla 2). Estas tres regiones tienen relaciones marcadamente diferentes. Algunas observaciones sobre estos datos se presentan a continuación:

- El sistema de Kenia remueve 8 veces más N del que es aplicado, indicando que existe un sustancial agotamiento de N en los suelos de la región, condición que reduce el capital de nutrientes para cultivos futuros. En este caso, se podría decir que la EUN para N es de 800 %, pero el sistema claramente no es sostenible porque muchos de los otros indicadores de desempeño no son aceptables.

- La relación remoción : uso de los sistemas del norte de China son más bien bajos, sugiriendo que probablemente la EUN puede mejorarse a través de cambios en el manejo. Sin embargo, se debería conocer primero el estado de P en el suelo y su dirección, así como otros indicadores de desempeño de N, antes de hacer una interpretación definitiva.
- En el medio oeste de los Estados Unidos, la relación remoción : uso para N es cercana a uno, pero aquí nuevamente el determinar si ésta es apropiada o no depende de otros indicadores de desempeño de N, incluyendo el cambio en materia orgánica del suelo y pérdidas específicas de N de los sistemas de cultivo. La relación para P parece muy alta para ser sostenible, sin embargo, esta es una región en Illinois con una historia de altos niveles de P de modo que las relaciones posiblemente podrían mantenerse por un significativo número de años antes de que la productividad pueda declinar. Las relaciones para N y P reportadas en Illinois son muy similares a estimaciones independientes para este estado hechas por el IPNI en una evaluación de los balances de nutrientes de los Estados Unidos.

En los tres casos descritos arriba, el marco de las MPM es una herramienta útil para interpretar un indicador específico de desempeño y para señalar la necesidad de considerar un conjunto de indicadores de desempeño cuando se evalúa cualquier sistema.

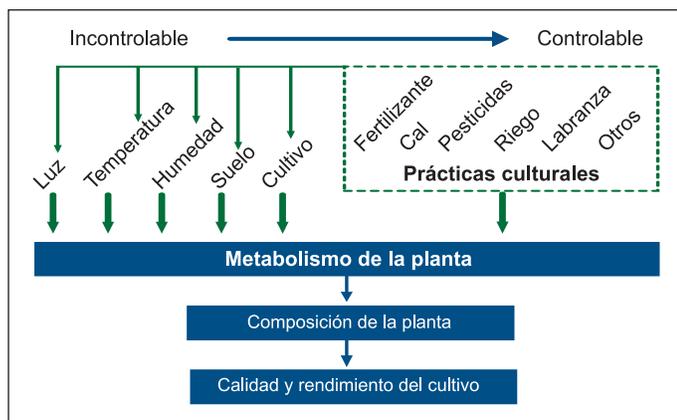


Figura 5. Complejidad de los sistemas de cultivo que implica incertidumbre (Adaptado de Beaufils, 1973).

Universalidad del marco global basado en principios científicos

El marco de los 4Fs se basa en principios científicos universales que conducen hacia las MPM. Los principios sirven como una guía de las prácticas con la mayor probabilidad de lograr los objetivos de manejo impuestos al sistema y, más ampliamente, del desarrollo sostenible de sus metas económicas, sociales y ambientales. Los objetivos comunes del manejo de los sistemas de cultivo generalmente envuelven la productividad, rentabilidad, durabilidad e impacto ambiental del sistema (IFA, 2009).

Es importante presentar las MPM de fertilizantes como la posibilidad que ofrece la más alta probabilidad de lograr los objetivos, antes que indicar que éstas garantizan que los objetivos se cumplan. La **Figura 5** ilustra la complejidad de los sistemas de cultivo en los cuales se manejan fertilizantes. Muchos de los factores influyen notablemente el crecimiento y metabolismo de las plantas y la necesidad de nutrientes tienen considerable incertidumbre con respecto a la fuente, dosis, época y localización correctas en un sitio específico y en un ciclo de cultivo específico. Lo mejor que puede hacer una persona encargada del manejo es emplear las prácticas que tengan la más alta probabilidad de lograr los objetivos. La ciencia permite definir estas prácticas.

Los principios basados en ciencia de los ciclos de nutrientes, fertilidad de suelos y nutrición de plantas son universales. La forma como se manifiestan en prácticas específicas de manejo varían con el clima, suelo, acceso a la tecnología, condiciones económicas locales y cultura. Sin embargo, el mapa global de suelos (**Figura 6**; USDA, 2005) hace recordar que existe un orden predecible en los suelos que puede ser muy valioso para definir la inferencia global del espacio asociada con los resultados de investigación específica, pudiendo de esta forma refinar

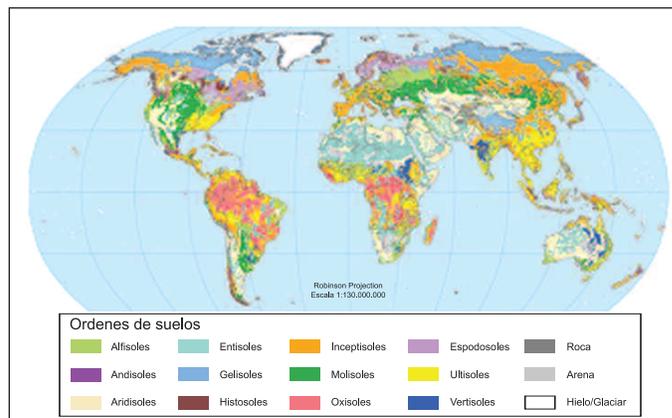


Figura 6. La clasificación de suelos ayuda a definir dominios globales de relevancia para afinar los principios generales (USDA, 2005).

las MPM a las condiciones locales. En el “mundo plano” descrito por Thomas Friedman (2005), los usuarios globales de nutrientes pueden conectarse con la ciencia global de la nutrición de plantas ... en tiempo casi real.

Los principales principios científicos, relevantes para cada uno de los cuatro fundamentos y para todos los nutrientes, se presentan a continuación (Bruulsema et al., 2008).

Manejo de nutrientes:

- Ser consistente con el razonamiento de los mecanismos de los procesos.
- Reconocer las interacciones con otros factores del sistema de cultivo.
- Reconocer las interacciones entre fuente, dosis, época y localización.
- Evitar efectos nocivos a las raíces, hojas y plántulas.
- Reconocer los efectos en la calidad así como en el rendimiento del cultivo.
- Considerar los aspectos económicos.

Fuente:

- Suplementar los nutrientes en formas disponibles para la planta.
- Manejar las propiedades físicas y químicas del suelo.
- Reconocer los sinergismos entre nutrientes y fuentes.
- Conocer la compatibilidad de las mezclas.
- Reconocer los beneficios y sensibilidades de otros elementos.
- Controlar los efectos de los elementos no nutritivos.

Dosis:

- Usar métodos adecuados para determinar el suplemento de nutrientes.
- Determinar todas las fuentes de nutrientes nativas del suelo disponibles para la planta.
- Determinar la demanda de nutrientes del cultivo.
- Predecir la eficiencia del uso de fertilizantes.
- Considerar los impactos en el recurso suelo.
- Considerar el aspecto económico del uso de determinada dosis.

Epoca:

- Determinar la época de absorción del cultivo.
- Determinar la dinámica del suplemento de nutrientes del suelo.
- Reconocer el efecto de los factores climáticos en la pérdida de nutrientes.
- Evaluar la logística de las operaciones de campo.

Localización:

- Reconocer la dinámica raíz-suelo.
- Manejar la variabilidad espacial entre lotes y entre fincas.
- Encajar en las necesidades del sistema de labranza.
- Limitar el potencial transporte de nutrientes hacia afuera del lote.

Manejo adaptativo de nutrientes para mejorar la EUN

Las verdades científicas rara vez son permanentes, éstas más bien cambian a medida que se desarrolla el conocimiento. De igual forma, las MPM son dinámicas y evolucionan a medida que la ciencia y la tecnología expanden el conocimiento y las oportunidades y la experiencia práctica enseña al buen observador que es lo que trabaja y que no, bajo las condiciones específicas del sitio. Thorup y Stewart, en el mismo artículo mencionado anteriormente, escribieron en 1988: “La investigación conducida en las estaciones experimentales y en las fincas de agricultores por investigadores profesionales es valiosa. Sin embargo, esta investigación no necesariamente está relacionada directamente con cada uno de los lotes de los agricultores. Los suelos tienen una tremenda

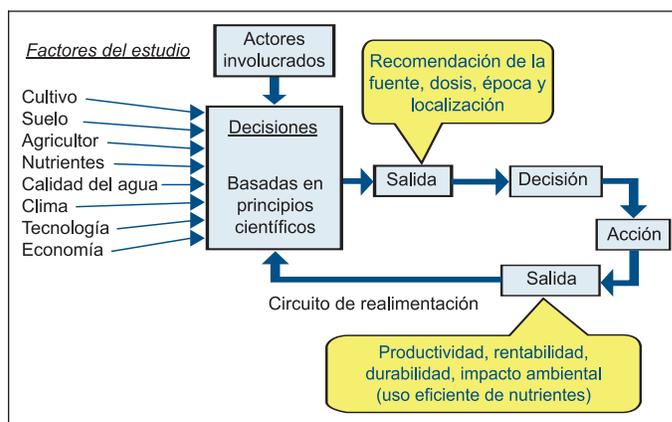


Figura 7. Naturaleza específica del sitio de la MPM hacen que el manejo adaptativo sea importante en su identificación (Fixen, 2005).

variabilidad de una finca a otra y las prácticas culturales también varían marcadamente de una finca a otra. Hasta los factores climáticos pueden variar significativamente en pequeñas distancias. Todos estos factores afectan la posible respuesta de los programas de fertilización. Todo esto significa que el agricultor que opere en estos tiempos tiene que experimentar un poco por propia cuenta, debe mantener buenos registros, ser flexible con los programas gubernamentales, con la fluctuación de los precios internacionales y con las necesidades de conservación de suelo y agua”. A pesar de que el término no existía, estos agrónomos estaban describiendo el manejo adaptativo de nutrientes.

La **Figura 7** (Fixen, 2005) ilustra esquemáticamente el proceso del manejo adaptativo de nutrientes, donde las decisiones basadas en ciencia facilitan la integración de múltiples factores específicos para el sitio, en una recomendación para fuente correcta en la dosis, época y localización correctas. Esta recomendación lleva a una decisión de manejo y a una acción asociada. Con el tiempo se conocen los impactos en la productividad, rentabilidad y el ambiente y con esto se puede determinar la eficiencia del uso de los recursos, incluyendo la EUN. Con más tiempo, la durabilidad del sistema que utiliza estas prácticas se hace evidente y esta experiencia colectiva es reintroducida en el proceso de toma de decisiones permitiendo una mejor predicción de las adecuadas fuente, dosis, época y localización. En teoría, cada paso del ciclo tiene el potencial de desarrollar mejores decisiones y acciones más apropiadas.

La consideración de los muchos posibles factores del sitio que pueden influenciar la exacta naturaleza de las MPM de los fertilizantes revela la razón por la cual la flexibilidad local es muy importante. A continuación se describen estos factores (Fixen, 2007):

- **Factores del cultivo:** generalmente incluyen el potencial de rendimiento y el valor del cultivo y en algunos casos la concentración de nutrientes en las hojas o el color de la hoja, ya que muchas prácticas culturales pueden influenciar el manejo de nutrientes.
- **Factores del suelo:** a menudo incluyen índices de suplemento de nutrientes u otras propiedades físicas, químicas o biológicas que influyen en el ciclo de nutrientes y el crecimiento del cultivo.
- **Factores del agricultor:** que pueden incluir la propiedad de la tierra, la disponibilidad de capital, el costo de oportunidad, la experiencia/educación del agricultor y de los consultores locales o la filosofía del manejo de nutrientes.
- **Factores de los nutrientes utilizados:** incorpora la información de las fuentes disponibles en las formas comerciales o el contenido de nutrientes en los residuos y el costo del material y su aplicación.
- **Factores de la calidad del agua:** pueden incluir las restricciones en aplicación de nutrientes en las riveras de los ríos o cerca de los cuerpos de agua, o consideraciones de la calidad de la napa de aguas.
- **Factores climáticos:** que promueven el uso de ciertos tipos de sistemas basados en modelos u otros que utilizan información climática cercana al tiempo real para un ciclo de crecimiento específico y predicción de corto plazo del clima.
- **Factores tecnológicos:** que tecnologías relevantes están disponibles en el sitio que puedan influenciar la definición de las mejores prácticas. Por ejemplo, el refinamiento de las dosis y de la época de la aplicación de N durante el ciclo de crecimiento puede lograrse con un sensor electrónico en unos casos y con el uso de la tabla de comparación de colores en otros.
- **Factores económicos:** que pueden ir más allá de aquellos ligados directamente al agricultor y que pueden impactar las decisiones de manejo de nutrientes.

La naturaleza dinámica y específica para el sitio de las MPM de los fertilizantes y la importancia de la flexibilidad local presentan un reto significativo cuando se busca su adopción por mandato. Los mandatos pueden hacer más rápida la adopción, pero pueden también resultar en la pérdida del beneficio del afinamiento basado en la experiencia local y de los procesos de manejo adaptivo.

Cuidado de los recursos

Una de las responsabilidades de la agricultura es el inteligente uso de las materias primas de las cuales se producen los fertilizantes. El desarrollo e implementación de las MPM de fertilizantes basadas en los 4Fs son importantes no solamente en el corto plazo económico y por razones ambientales, sino también por la necesidad del inteligente cuidado de las fuentes no renovables de nutrientes de las cuales dependen la producción de alimentos, fibra y energía.

Reportes de la industria y del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) indican que las reservas de los recursos de N, P, K y azufre (S) parecen adecuadas para el futuro a mediano plazo. El USGS estima reservas para cerca de 100 años bajo las actuales condiciones de mercado y de cerca de 300 años en condiciones mejoradas (Fixen, 2009b). Otros estudios indican que los recursos globales de P, en las condiciones actuales de producción, pueden durar hasta 700 años (Sheldon, 1987). El USGS ha estimado que las reservas de potasa son de 235 años bajo las condiciones actuales y más de 500 si éstas mejoran (Fixen, 2009b). Sin embargo, algunos estudios recientes sugieren que la producción de roca fosfórica llegarán a su pico en el año 2030 después de lo cual se producirá un incremento en costo debido a la escasez del material (Cordell et al., 2009). Un reciente comentario en la revista *Scientific American* se ha referido a la falta de P como “una amenaza para el suplemento de alimentos (Vaccadi, 2009). Claramente, estas estimaciones son inciertas.

Más allá de los exactos niveles de reservas de los recursos, el costo de los nutrientes se incrementará con el tiempo a medida que se consuman los materiales fácilmente extraíbles. Por esta razón, la implementación y el refinamiento de las MPM de los fertilizantes es un incentivo adicional promovido por la mejor EUN que hará que el incremento de precios no sea tan drástico. El inteligente cuidado de los recursos es una responsabilidad crítica de la agricultura.

Referencias

- Anonymous. 2006. Take the BMP Challenge. On line at http://www.bmpchallenge.org/Nutrient_BMP_CHALLENGE.htm
- Beaufils, E.R. 1973. Diagnosis and recommendation integrated system(DRIS). A general scheme for experimentation and an extension of the physiological diagnosis techniques. *Soil Sci. Bull.* No. 1, University of Natal, Pietermaritzburg.

- Bruulsema, T.W., C. Witt, F. García, S. Li, T.N. Rao, F. Chen, and S. Ivanova. 2008. A global framework for fertilizer BMPs. *Better Crops* 92(2):13-15.
- Bruulsema, T.W., L. Jerry, and H. Bill. 2009. Know your fertilizer rights. *Crops and Soils* 42(2):13-18.
- Cordell, D., J. Drangert, and S. White. 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change* 19: 292-305.
- Darst, B.C. and L.S. Murphy. 1994. Keeping agriculture viable: Industry's viewpoint. *J. Soil and Water Conservation* 46(2):8-14.
- Dobermann, A. 2007. Nutrient use efficiency – measurement and management. 2007. In *Fertilizer Best Management Practices*. International Fertilizer Industry Assoc., Paris, France.
- Dupont. 2009. Agriculture is up to global productivity challenge (News release 4/16/2009). On line at <http://www.pioneer.com/web/site/portal/menuitem>
- FAO. 2009. FAOSTAT. FAO Statistics Division. On line at <http://faostat.fao.org/>
- Fixen, P.E. 2005. Decision Support Systems in Integrated Crop Nutrient Management. Proceedings No. 569. International Fertilizer Society, York, UK. 1-32.
- Fixen, P.E. 2007. Can we define a global framework within which fertilizer best management practices can be adapted to local conditions. In *Fertilizer Best Management Practices*, First Edition. IFA, Paris.
- Fixen, P.E. 2009a. Maximizing (productivity and efficiency) in contemporary agriculture. In *Proceedings of the International Plant Nutrition Colloquium XVI*. U. of California – Davis. On-line at <http://repositories.cdlib.org/ipnc/xvi/1291>
- Fixen, P.E. 2009b. World fertilizer nutrient reserves. Proceedings of the Soil Fertility 2009 Symposium, Rosario, Argentina. May 12-13. International Plant Nutrition Institute, Buenos Aires (Spanish).
- Friedman, T.L. 2005. *The World is Flat: a Brief History of the Twenty-first Century*. Farrar, Straus and Giroux, New York.
- García F. 2004. Advances in nutrition management of wheat. Proceedings Wheat National Symposium. Mar del Plata, 13-14 May 2004. Federation of Grain Traders of Argentina.
- Glenn J.C., T.J. Gordon, and E. Florescu. 2008. *The Millenium Project: State of the Future*. World Federation of UN Associations, Washington, DC.
- Griffith, W.K. and L.S. Murphy. 1991. *The development of crop production systems using best management practices*. Potash & Phosphate Institute.
- Hammer GL, D. Zhanshan, G. McLean, A. Doherty, C. Messina, J. Schussler, C. Zinselmeier, S. Paszkiewicz, and M. Cooper. 2009. Can changes in canopy and/or root system architecture explain historical maize yield trends in the U.S. Corn Belt? *Crop Sci.* 49:299-312.
- IFA. 2009. *The Global “4R” Nutrient Stewardship Framework for Developing and Delivering Fertilizer Best management Practices*. International Fertilizer Industry Association. Paris.
- IPNI. 2009. *4R Nutrient Stewardship Style Guide*. International Plant Nutrition Institute. Ref. # 09068. June, 2009. Norcross, GA.
- Janzen, H. 2009. SOM research in 2030: what scientists then might ask of us now. In *Program and Abstracts for the International Symposium on Soil Organic Matter Dynamics: Land Use, Management and Global Change*. Colorado State University, Fort Collins. p. 114.
- Lilly, J.P. 1991. *Soil Facts: Best management practices for agricultural nutrients*. North Carolina Cooperative Extension Service. AG-439-20.
- Monsanto. 2008. *New Initiative Focuses on Water Quality Improvement in the Mississippi River Basin and Gulf of Mexico* (News release 12/8/2008). <http://www.prnewswire.com/comp/114341.html/>.
- Motavalli, P.P., K.W. Goyne, and R.P. Udawatta. 2008. Use of enhanced-efficiency fertilizers for improved agricultural nutrient management: Introduction to the symposium. Online. *Crop Management* doi:10.1094/CM-2008-0730-01-PS.
- North Carolina State University (NCSU). 2007. *Best management Practices*. <http://www.ces.ncsu.edu>
- Roberts, T.L. 2007. Right product, right rate, right time, right place. The foundation of BMPs for fertilizer. IFA Workshop on Fertilizer Best Management Practices (FBMPs), 7-9 March 2007, Brussels, Belgium.
- Sheldon, R.P. 1987. Industrial minerals – with emphasis on phosphate rock. P. 347-361. In D.J. McLaren and B.J. Skinner (ed.). *Resources and World Development*. John Wiley & Sons, New York.

Sharpley, A.N., T. Daniel, G. Gibson, L. Bundy, M. Cabrera, T. Sims, R. Stevens, J. Lemunyon, P. Kleinman, and R. Parry. 2006. Best Management Practices to Minimize Agricultural Phosphorus Impacts and Water Quality. USDA-ARS 163, Washington, D.C.

Snyder, C.S. and T.W. Bruulsema. 2007. Nutrient Use Efficiency and Effectiveness in North America: Indices of Agronomic and Environmental Benefit. International Plant Nutrition Institute, Norcross, GA.

Syers, J.K., A.E. Johnston, and D. Curtin. 2008. Efficiency of Soil and Fertilizer Phosphorus Use. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

TAMU. 2009. Borlaug calls for second “Green Revolution”. Texas A&M University Agricultural Communications. Mar. 16, 2009.

Tandon, H.L.S. and R.N. Roy. 2004. Integrated Nutrient Management – A Glossary of Terms. FAO-UN and the Fertilizer Development and Consultation Organization, Rome, Italy.

Thorup, J.T. and J.W.B. Stewart. 1988. Optimum fertilizer use with differing management practices and changing government policies. In Proceedings of the 25th Anniversary Symposium of Division S-8, Advances in Fertilizer Technology and Use. Published for the Soil Sci. Soc. A. by the Potash & Phosphate Institute (now the International Plant Nutrition Institute, Norcross, GA).

USDA. 2005. Global Soil Regions Map. USDA-NRCS. <http://soils.usda.gov/use/worldsoils/mapindex>.

USDA. 2009. TRANSCRIPT: Keynote Address by Agriculture Secretary Tom Vilsack at the U.S. Department of Agriculture’s Agricultural Outlook Forum, Feb. 26, 2009. Release No. 0048.09. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC.

Vaccari, D.A. 2009. Phosphorus: A looming crisis. Scientific American, June 3.

Vitousek, P.M., R. Naylor, T. Crews, M. B. David, L. E. Drinkwater, E. Holland, P. J. Johnes, J. Katzenberger, L. A. Martinelli, P. A. Matson, G. Nziguheba, D. Ojima, C. A. Palm, G. P. Robertson, P. A. Sanchez, A. R. Townsend, and F. S. Zhang. 2009. Nutrient imbalances in agricultural development. Science 324:1519-1520.

EFICIENCIA DE USO DEL NITROGENO: DESAFIOS MUNDIALES, TENDENCIAS FUTURAS

Cliff S. Snyder¹

Resumen

La demanda de la humanidad por alimentos, fibra y biocombustibles se ha incrementado junto con el crecimiento de la población mundial. Se espera que la fertilización con nitrógeno (N) se incremente también para satisfacer esta creciente demanda. Los riesgos de pérdidas de N por lixiviación, escorrentía, volatilización y denitrificación, que podrían estar asociados con el incremento global de la utilización de N, son una preocupación para agricultores, agrónomos, ecologistas y políticos. Las decisiones futuras sobre el manejo de los fertilizantes nitrogenados deberán tomarse con creciente énfasis en las metas económicas, sociales y ambientales identificadas por los diversos actores involucrados. La eficiencia de uso de N a nivel de finca y su efectividad pueden mejorarse a través del manejo de las fuentes de N y de la dosis, época y lugar de aplicación. Se considera que la meta de incrementar la eficiencia del uso del N en 25 % es alcanzable en los Estados Unidos y podría también serlo en muchos países en vías de desarrollo. Se ha logrado progreso optimizando el rendimiento por unidad de N aplicado en varios cereales en diferentes regiones del mundo y algunos indicadores ambientales demuestran estas mejoras. El incremento en eficiencia y efectividad del N, a través de mejores sistemas de cultivos y de mejor manejo de los fertilizantes portadores de N, puede satisfacer las demandas de la sociedad por alimento, fibra y biocombustible, protegiendo al mismo tiempo el aire, el agua y el recurso suelo para generaciones presentes y futuras. El éxito en la búsqueda de sostenibilidad dependerá del compromiso con la ciencia básica del manejo de N y de la educación de los consumidores de fertilizantes nitrogenados.

Introducción

Las demandas mundiales de alimentos, fibra y biocombustibles asociadas con el crecimiento de la población hacen necesario un énfasis en el incremento de la producción mundial de cultivos. A medida que se incrementa el uso de fertilizantes nitrogenados se incrementará también la preocupación por los efectos ambientales de dicho aumento (Beman et al., 2005; Galloway y Cowling, 2002; Galloway et al., 2002, 2003, 2004, 2008; Schlesinger, 2009).

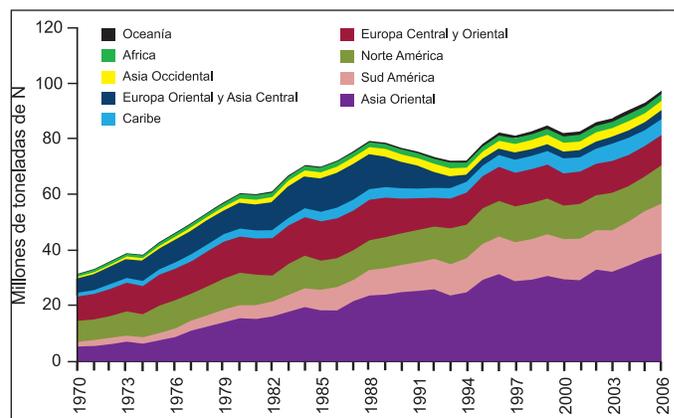


Figura 1. Consumo global de fertilizantes nitrogenados (IFA Statistics, 2007).

Se estima que mucho del crecimiento en el uso de fertilizantes portadores de N ocurrirá en regiones tropicales y subtropicales del planeta (Figura 1) y en consecuencia se espera que las futuras deposiciones de N aumenten en estas regiones (Galloway y Cowling 2002). Por esta razón, existe una urgente necesidad de incrementar la eficiencia de uso y la efectividad de los fertilizantes nitrogenados en los sistemas de cultivo, especialmente en estas regiones del mundo.

Gruber y Galloway (2008) percibieron la importancia de las interacciones “nitrógeno-carbono-clima” y plantearon inquietudes acerca de los efectos de la disponibilidad del nitrógeno (N) en el secuestro de carbono (C) en la biósfera terrestre y las implicaciones de este proceso en la mitigación del cambio climático. Si se considera el vínculo entre el N y C en la materia orgánica del suelo y el vínculo entre el ciclo del N y del C, es claro en que los agrónomos y los científicos del suelo juegan un importante papel frente a los significativos desafíos provenientes de las presiones agronómicas y ambientales asociadas con el crecimiento de la población mundial, tanto desde la perspectiva económica de corto plazo, como de la perspectiva de sostenibilidad a largo plazo. Se necesita conducir más investigación agrícola para cuantificar de mejor manera los efectos del manejo de los cultivos y del manejo del N en la magnitud de las pérdidas de este elemento del sistema suelo-cultivo por medio de los procesos de volatilización, lixiviación, denitrificación y escorrentía.

¹ International Plant Nutrition Institute, csnyder@ipni.net

Pérdidas de N por flujo en los ríos

El flujo o descarga de N a las aguas costeras por los ríos alrededor del mundo se ha duplicado desde los tiempos pre-industriales, elevándose aproximadamente de 21 Tg año⁻¹ a más de 40 Tg año⁻¹, de acuerdo con la simulación efectuada por Green y colaboradores (2004). La exportación de N por los ríos varía entre 7 a 13 % del total de N que ingresa al sistema en los países en desarrollo, industrializados y en transición (Bouwman et al., 2005), pero el ingreso total y la exportación total de N en los ríos se ha incrementado desde 1970 y se proyecta que continúe aumentando hasta el 2030 (Figura 2), especialmente en los países en desarrollo. El ingreso total de N de fuentes naturales (posiblemente proveniente principalmente de la fijación biológica de N), domina el balance de N en América Latina (72 %), África (79 %) y Oceanía (79 %), mientras que la contribución de fuentes antropogénicas de N es mayor que las fuentes naturales en Europa y la Antigua Unión Soviética (59 %), América del Norte (61 %) y Asia (74 %) (Boyer et al., 2006).

Utilizando un modelo empírico, Boyer y colaboradores (2006) estimaron que el transporte global de N de los afluentes puede ser mayor que en 80 % de la carga del río,

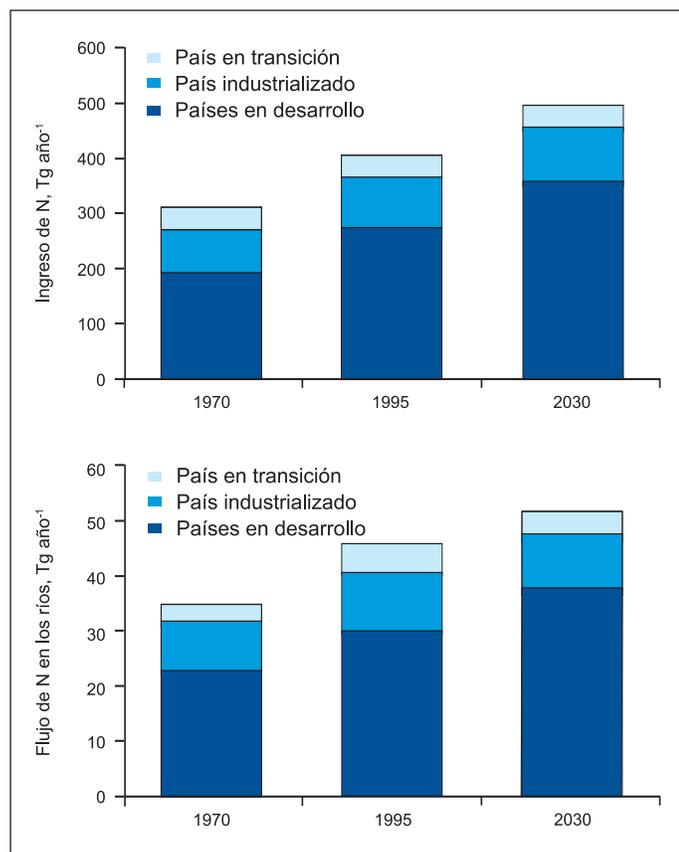


Figura 2. Estimación global de los ingresos totales y de los flujos fluviales de N en países en desarrollo, industrializados y en transición (Adaptado de Bouwman et al., 2005).

pero también reportaron que la entrega de N a las aguas costeras varía sustancialmente entre países. Sin embargo, existe mucha incertidumbre con respecto a estos flujos porque de acuerdo a la base de datos de GEM/UNESCO, solo alrededor del 40 % de los ríos tienen reportes confiables del N disuelto y la confiabilidad de los reportes de N orgánico es todavía menor, alrededor del 33 % (Subramanian, 2008). El mismo autor solicitó se conduzcan estudios de carga y de exportación de N en las cuencas hidrográficas y sistemas fluviales en el Sur de Asia, debido a que los ríos de esta región exportan al menos 6 % de la escorrentía y 10 % del flujo total de sedimentos del mundo y al hecho de que el uso de fertilizantes nitrogenados se está incrementando en esa región.

La construcción de canales para transporte y para reducir el riesgo de inundaciones locales en muchos sistemas fluviales ha alterado el flujo del N en muchos ríos y sistemas fluviales (Goolsby et al., 1999). El incremento anual y estacional del flujo de agua y de N asociado a incrementos en la cantidad e intensidad de las precipitaciones podrían poner en alto riesgo la salud y funcionamiento de las aguas costeras, más allá de los riesgos presentes de eutrofización e hipoxia (Rabalais, 2009).

Pérdidas de N vía óxido nitroso

De los tres gases de efecto invernadero (GEI) [dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O)] más prominentes, el CO₂ producido por todos los sectores económicos es el dominante con 77 % del total. Las emisiones de CH₄ representan el 15 % y las del N₂O el 8 % de las emisiones globales de CO₂ equivalente (EPA, 2006). Estos tres GEI difieren en la capacidad para atrapar calor y en la tasa de descomposición en la atmósfera. Se considera que las unidades de masa de CH₄ y de N₂O tienen 23 y 296 veces el potencial de calentamiento global (PCG), respectivamente, de una unidad de CO₂ por un periodo de tiempo de 100 años (IPCC, 2001).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) estimó las emisiones de GEI distintos del CO₂ (N₂O y CH₄) por países. China, Brasil, India y los Estados Unidos presentaron los incrementos absolutos más altos en las proyecciones de las emisiones de GEI distintos del CO₂ entre 1990 y el año 2020 (EPA, 2006) (Figura 3).

La agricultura contribuyó con el 32 % (13 360 Tg o millones de toneladas) de los 41 382 Tg de emisiones de CO₂ equivalente de GEI en el año 2000. Se considera que el 63 % de los GEI de la agricultura son gases distintos al CO₂ (EPA, 2006). Baumert y colaboradores (2005)

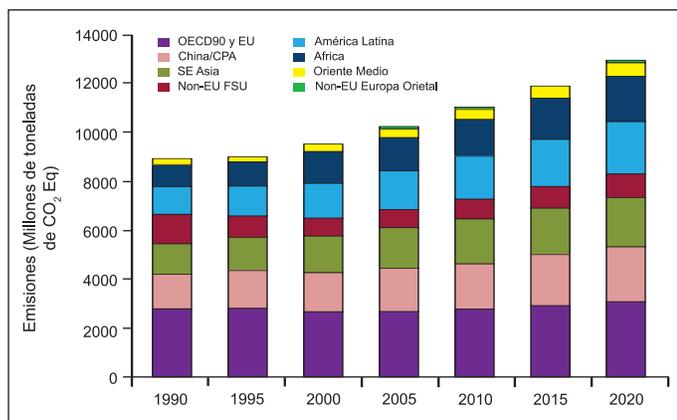


Figura 3. Contribuciones regionales al total de emisiones de GEI diferentes al CO₂ (EPA, 2006). OECD es la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (incluye a los Estados Unidos y Canadá), UE es la Unión Europea y la FSU es la antigua Unión Soviética.

reportaron que en el año 2004, alrededor del 15 % de los GEI estuvieron asociados con la agricultura. Los países que tuvieron el porcentaje más alto del sector agrícola global fueron: China 18 %, India 11 %, Unión Europea 9 %, Estados Unidos 9 % y Brasil 8 %. Cada uno de los países incluidos en el siguiente grupo: Pakistán, Indonesia, Argentina, Rusia, Francia, Australia y Alemania tuvieron una contribución individual de alrededor de 2 % de las emisiones de GEI provenientes de agricultura. Todos los otros países contribuyeron individualmente con 1 % o menos. Se considera que las actividades de manejo del suelo contribuyeron con el 40 % de las emisiones de GEI provenientes de la agricultura. De este porcentaje, el 45 % corresponde a emisiones de N₂O y 46 % a emisiones de CH₄, en base a CO₂ equivalente (Baumert et al., 2005). Se conoce que las emisiones de GEI varían dependiendo del uso y manejo del suelo (Bellarby et al., 2008; Snyder et al., 2009).

En general, en los países desarrollados la contribución de la agricultura es pequeña en comparación con la contribución total de emisiones de GEI de los otros sectores económicos, pero las emisiones causadas por actividades agrícolas pueden representar un alto porcentaje del total de las emisiones de GEI en los países en desarrollo. Por ejemplo, el sector agrícola de India fue responsable del 24 % (aproximadamente 412 Tg de equivalentes de CO₂) de las emisiones del país en el año 2005 (Garg et al., 2006), mientras que ésta fue menor a 7 % (aproximadamente 413 Tg de equivalentes de CO₂) en los Estados Unidos, en el año 2007 (EPA, 2009). Se proyecta que las emisiones de N₂O de los suelos agrícolas se incrementen hasta el 2020 (**Figura 4**), siendo China, América Latina, África y el Sureste Asiático responsables

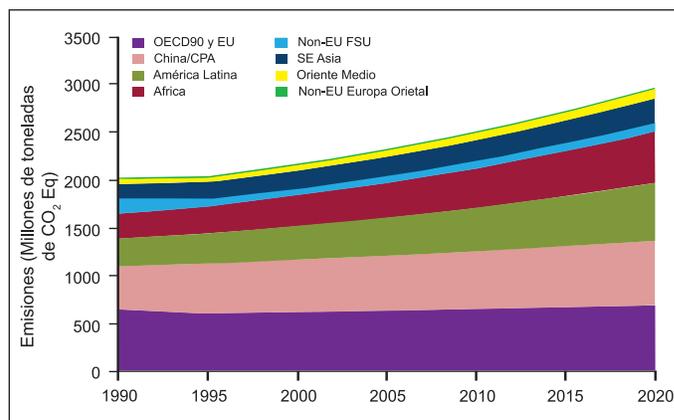


Figura 4. Emisiones de óxido nitroso (N₂O) de suelos agrícolas, 1990-2020 (EPA, 2006). OECD es la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (incluye a los Estados Unidos y Canadá), UE es la Unión Europea y la FSU es la antigua Unión Soviética.

de la mayor parte de este incremento (EPA, 2006). Los factores que causan este incremento en emisiones de N₂O son las actividades agrícolas y ganaderas y el incremento en el uso de fertilizantes nitrogenados, necesario para cubrir las demandas impuestas por el aumento de la población.

Pérdidas de N vía volatilización

La urea es la fuente de N que más se utiliza en el mundo y las pérdidas por volatilización del N en forma de amoníaco (NH₃) pueden ser superiores al 45 %, cuando la urea se aplica a la superficie del suelo en condiciones de alta temperatura y humedad (Watson, 2005). Se estima que la volatilización de NH₃ proveniente de los fertilizantes nitrogenados es de 18 % en los países en desarrollo (basándose en las fuentes de N utilizadas y en las condiciones ambientales prevalentes), mientras que las pérdidas por volatilización de NH₃ en los países industrializados es de 7 % (Bouwman et al., 2002). La mediana mundial de las pérdidas de NH₃ proveniente de los fertilizantes nitrogenados es de 14 %, mientras que las pérdidas de los residuos de corral (estiércol y orina) es de 23 %.

Cuando se aplica urea o residuos de corral a la superficie del suelo y no se incorporan, especialmente en ambientes húmedos y cálidos, buena parte del N puede perderse por volatilización de NH₃ (Follett, 2001; Kissel, 1988). Estas pérdidas pueden ser superiores al 50 % cuando se aplica urea a arroz de transplante en Asia. Las mayores pérdidas ocurren durante las primeras tres semanas después del transplante, de 7 a 10 días después de la aplicación del N. Las pérdidas son mucho menores al momento de la iniciación de la panícula, estimándose que son de 10 a 15 % (Buresh y Witt 2008). La volatilización de NH₃ puede

ser mayor al 30 % del N aplicado en arroz sembrado directamente y manejado bajo inundación al sur de los Estados Unidos, si se demora la inundación por más de 14 días luego de la aplicación de la urea a la superficie del suelo. La mayor pérdida de NH_3 se presenta también entre los 7 y 10 días luego de la aplicación de la urea si el riego se demora, pero si la inundación ocurre inmediatamente luego de la fertilización, para incorporar la urea aplicada en la superficie de suelo seco, se minimizan las pérdidas y optimiza la recuperación del N aplicado por el cultivo (Griggs et al., 2007)

A pesar que la aplicación de urea en banda sub-superficial en cereales de grano pequeño es una práctica común en las zonas de producción más secas (por ejemplo las planicies de los Estados Unidos y Canadá), se ha encontrado que en suelos ácidos secos puede ocurrir un incremento en la hidrólisis de la urea que eleva el pH (hasta 8.7) alrededor de la banda, incrementando de este modo las pérdidas de NH_3 (Rochette et al., 2009). Estos investigadores reportaron que las pérdidas de NH_3 fueron de 16 % cuando la urea se aplicó al voleo y luego se incorporó y del 27 % cuando la urea se colocó en banda sub-superficial en suelos arcillo limosos. Sin embargo, las pérdidas de NH_3 fueron menores al 5 % cuando se utilizó urea recubierta con polímeros o con inhibidores de la ureasa y se aplicó el material a la superficie y no se incorporó (Rochette et al., 2009).

Los resultados de estos estudios de volatilización de NH_3 en ambientes contrastantes enfatizan la importancia de conocer los factores que gobiernan la volatilización del NH_3 y la necesidad de recomendaciones de manejo desarrolladas localmente, que sean específicas para el sitio, en lugares donde se manejan mezclas de fertilizantes que contienen urea.

Reducción de las pérdidas de N reactivo al ambiente

Galloway y colaboradores (2004) estimaron que del total de aproximadamente 268 Tg N año⁻¹ de N reactivo (Nr) recientemente formado (esencialmente todo el N que no es N_2) que entra en los continentes, alrededor de 81 Tg N año⁻¹ se transfirieron a los ambientes marinos vía deposiciones atmosféricas y por el flujo de los ríos, mientras que aproximadamente 12 Tg año⁻¹ se emitieron como N_2O a la atmósfera. Los autores estimaron que de los sobrantes 175 Tg año⁻¹, alrededor de 115 Tg año⁻¹ se convierten en N_2 y cerca de 60 Tg año⁻¹ podrían estar acumulándose en los sistemas terrestres. Se ha sugerido que existen cuatro acciones principales para reducir las cantidades de Nr en el ambiente (Galloway et al., 2008b):

- Control de las emisiones de NO_x ocasionadas por el uso de combustibles fósiles implementando las mayores reducciones de uso posibles (esto permitiría una reducción de 18 Tg N año⁻¹).
- Incrementar la eficiencia de adquisición del N por los cultivos (disminuiría la creación de Nr en cerca de 15 Tg año⁻¹).
- Mejorar el manejo de los animales (reduciría la creación de Nr en aproximadamente 15 Tg año⁻¹).
- Proveer de acceso a tratamiento de residuos municipales a la mitad de los 3.2 mil millones de personas que viven en las ciudades (convertiría 5 Tg de N año⁻¹ a N_2). Se considera que cuando se combinan estas cuatro estrategias, el potencial de reducir la cantidad de Nr en el ambiente es de 53 Tg año⁻¹, aproximadamente el 28 % de la cantidad de Nr creado desde el 2005.

Schlesinger (2009) estimó que el flujo de N a los ríos fue de 27 Tg año⁻¹ en los tiempos pre-industriales y que el flujo actual es cercano a 61.5 Tg año⁻¹. Sugirió además que los gobiernos deberían enfocar sus políticas en acciones que incrementen la eficiencia de uso del N utilizado en la fertilización de los cultivos para reducir el transporte de Nr a los ríos y el agua subterránea y para maximizar desnitrificación del N a su producto final N_2 .

Reducción de las pérdidas al ambiente mejorando la eficiencia y efectividad de los nutrientes

Existen varias definiciones de eficiencia de uso de los nutrientes en la literatura (Dobermann 2007; Ladha et al., 2005). La eficiencia en el uso del N proveniente de los fertilizantes (EUN) está generalmente influenciada por tres factores (Ladha et al., 2005):

- Suministro de N del suelo, fertilizantes y otras entradas.
- Adquisición del N por el cultivo.
- Pérdidas del sistema suelo-planta.

Cada uno de estos factores está afectado por el sistema de manejo del cultivo y las condiciones ambientales. Debido al riesgo de confusión entre los términos de eficiencia, Snyder y Bruulsema (2007) recomendaron el uso de cuatro términos simples que pueden utilizarse fácilmente en el trabajo de campo por extensionistas, consultores y agricultores para evaluar y monitorizar la eficiencia de uso de un nutriente (por ejemplo N) (**Tabla 1**).

El PPF_N para el maíz en los Estados Unidos ha mejorado continuamente desde mediados de los años 70 (**Figura 5**),

Tabla 1. Definiciones simples de eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) (Snyder y Bruulsema, 2007).

Término EUN	Cálculo	Ejemplos reportados
PPF_N Productividad parcial del factor N	R/D	40 a 80 unidades de grano de cereal por unidad de N
EA_N Eficiencia agronómica del N aplicado	$(R-R_0)/D$	10 a 30 unidades de granos de cereal por unidad de N aplicado
BPN_N Balance parcial de N (relación de remoción a uso de N)	U_C/D	0 a más de 1.0: depende de la fertilidad del suelo y de los objetivos de mantenimiento de esta fertilidad <1: sistemas deficientes en nutrientes (mejoramiento de la fertilidad) >1: condiciones de exceso en el sistema Ligeramente menos que 1 a 1 (sostenibilidad del sistema)
ER_N Eficiencia aparente de recuperación del N	$(U-U_0)/D$	0.3 a 0.5: típica recuperación de N en cereales 0.5 a 0.8: recuperación de N en cereales con mejor manejo

D = cantidad de N aplicada (como fertilizante, residuos, etc.)

R = rendimiento de la porción cosechada del cultivo con la aplicación de N

R_0 = rendimiento del tratamiento control sin la aplicación de N

U_C = contenido de N de la porción cosechada del cultivo

U = acumulación total de N en la biomasa aérea del cultivo con la aplicación de N

U_0 = acumulación total de N en la biomasa aérea del cultivo sin aplicación de N

reflejando el efecto de la utilización de mejores prácticas de manejo de los fertilizantes, mejores prácticas de manejo del sistema de cultivo y mejoras a la genética del maíz.

Aun cuando el PPF_N para el maíz ha mejorado en los Estados Unidos en las tres últimas décadas (**Figura 5**), existe preocupación de que el incremento en el consumo de fertilizantes nitrogenados en la cuenca hidrográfica del río Mississippi, en la que se produce más del 80 % del maíz y que consume más del 80 % del fertilizante del país, pueda provocar un incremento en el flujo del N por el río Mississippi al Golfo de México. Se considera que este incremento en el flujo de N es parcialmente culpable de la eutrofización de la costa y del desarrollo de hipoxia estacional en el norte del Golfo de México (EPA, 2008). Sin embargo, gracias en gran medida al incremento en rendimiento y la consecuente absorción de N por esta mayor cosecha de maíz en la sub cuenca del alto Mississippi y en la sub cuenca Ohio-Tennessee, el flujo de N que llega al Golfo de México se ha reducido en 21 % desde el año 2001 hasta el 2005, en comparación con el período de 1980 a 1996 (EPA, 2008). Estas dos sub cuencas reciben más del 70 % del total de N que se descarga en el río Mississippi (EPA, 2008; Snyder, 2008b).

Si se mejora la eficiencia de uso y la efectividad del N, serían de esperarse reducciones correspondientes en

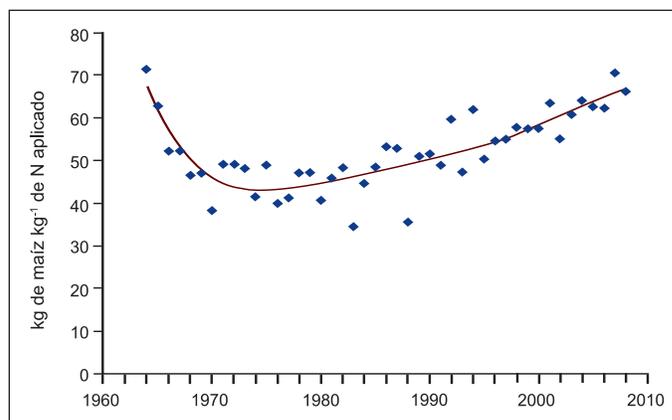


Figura 5. Productividad parcial del factor N (PPF_N) para el maíz basado en el N aplicado con los fertilizantes utilizados en los Estados Unidos. Datos proveídos por el Servicio de Estadísticas para la Agricultura del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). El USDA no recolectó información sobre la aplicación de fertilizantes en maíz en el año 2003 y en el periodo 2006-2008. El valor mostrado para el 2003 es el promedio entre el 2002 y 2004 y los valores para 2006 hasta el 2008 fueron extrapolados en base a relaciones anteriores entre las ventas totales de fertilizantes nitrogenados N y fertilizantes aplicados en 15 estados productores de maíz (comunicación personal de Tom Bruulsema, International Plant Nutrition Institute).

muchas de las pérdidas de N al ambiente, especialmente en términos de pérdidas de N por unidad de cultivo cosechada. Por ejemplo, la EPA indica que mejorar en 25 % la eficiencia de absorción de N por el cultivo sería una de las más importantes acciones para reducir la carga de Nr (reporte preliminar no publicado del Panel Consultivo de Ciencia para el Comité de Manejo Integrado del Nitrógeno: Nitrógeno reactivo en los Estados Unidos; un análisis de entradas, flujos, consecuencias y opciones de manejo. Junio 22, 2009. <http://yosemite.epa.gov/sab>).

Una comparación del PPF_N entre maíz de todos los Estados Unidos con el flujo total de N de la cuenca del río Mississippi al Golfo de México muestra que existe una correlación negativa entre las dos variables (**Figura 6**). A medida que el PPF_N se incrementa, la cantidad total de N que se descarga al Golfo de México se reduce. Es importante notar que esta correlación no necesariamente implica causa y efecto, ya que existen numerosos factores que influyen en el PPF_N del maíz. Por ejemplo, es posible que tanto el PPF_N como el flujo del N de sistemas que drenan zonas agrícolas se muevan en la misma dirección. Si se aplica N a un suelo que ha recibido altas cantidades de residuos ricos en carbono (alta relación C/N), mucho de este N se inmovilizará en el suelo, lo que puede reducir los rendimientos de maíz y bajar los valores del PPF_N , sin embargo, al mismo tiempo se pueden reducir las pérdidas de N por lixiviación, escorrentía superficial y drenaje interno en el campo. Existen otros factores que también influyen la respuesta del cultivo al N y afectan la ER_N incluyendo la rotación de cultivos, cambios en el material genético, intensidad y estacionalidad de la lluvia, incidencia y manejo de plagas, precio y uso de los insumos, eficiencia de la cosecha, clima durante la cosecha, etc. Sin embargo, este ejemplo a gran escala (**Figura 6**) ilustra el hecho de que podría ser posible relacionar las reducciones en algunas de las pérdidas de N (por ejemplo el flujo de N a las zonas costeras) con una mejora en la eficiencia de uso y efectividad del N asociadas con incrementos en el rendimiento y con la remoción del N con la cosecha (EPA, 2008).

El adecuado manejo de los fertilizantes (Roberts, 2007), aplicando los cuatro fundamentos básicos de la nutrición: fuente correcta, en la dosis, época y localización correctas (4Fs), conduce a una mejor y más económica producción de cultivos y minimiza los efectos en el ambiente. La adopción de los 4Fs (Bruulsema et al. 2009), la implementación de las mejores prácticas de manejo de fertilizantes (MPMF) (Bruulsema et al., 2008; IFA, 2007) y el manejo de nutrientes por sitio específico (MNSE) ayudan a conseguir los resultados económicos y ambientales esperados (Adviento-Borbe et al., 2007;

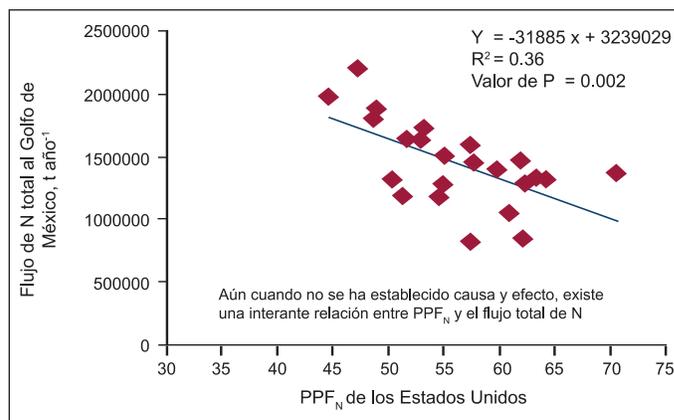


Figura 6. Relación entre el flujo total del N de la cuenca del río Mississippi al Golfo de México y productividad parcial del factor N (PPFN) para el maíz de todos los Estados Unidos, 1984-2007.

Dobermann y Fairhurst, 2000; Dobermann y Cassman, 2002; Fixen et al., 2005; Snyder, 2008a; Snyder et al., 2007, 2009).

A pesar de que el N del suelo y el N proveniente de los fertilizantes y residuos de corral es utilizado, en términos globales, en forma relativamente ineficiente por la mayoría de los cultivos, con una eficiencia de uso de 50 % o menos (Balasubramanian et al., 2004; Ladha et al., 2005), esta eficiencia de uso se puede incrementar a 60 o 70 % con mejor manejo en muchos sistemas de cultivo del mundo (Cassman et al., 2002; Kitchen y Goulding, 2001; Ladha et al., 2005; Raun y Johnson, 1999). Estudios de Dobermann y Cassman (2002) reportaron que la típica ER_N a nivel de finca era de solamente 30 % en arroz y del 37 % en el maíz, pero que con buen manejo la ER_N puede llegar a un rango entre 50 y 80 %. Se espera que el incremento en ER_N de los cultivos pueda reducir las pérdidas potenciales de N que amenazan los recursos agua y aire y que reducen la rentabilidad del cultivo.

Información reportada en la literatura de estudios que utilizaron fertilizante marcado con ^{15}N indica que la máxima recuperación de N lograda en trigo (*Triticum aestivum* L.) con riego en parcelas experimentales fue del 96 % (Balasubramanian et al., 2004), 87 % para maíz con riego y 83 % en parcelas de investigación con arroz el año de aplicación (Krupnik et al., 2004). La recuperación del N residual por los siguientes cultivos fue de 5 % o menos, lo que indica que muchas de las pérdidas al ambiente ocurren durante o inmediatamente después del año de aplicación del N (Krupnik et al., 2004). Investigación conducida con cereales por Dobermann (2007) demostró que la ER_N total de una aplicación individual de N es, en promedio, de 50 a 60 % en condiciones experimentales y que en condiciones de finca es de 40 a 50 %, en la mayoría

de los casos. A pesar de que varios otros factores, además del manejo del N, influyen en el crecimiento del cultivo y la respuesta a la aplicación de fertilizantes nitrogenados, los datos de los artículos revisados demuestran la considerable diferencia entre la ER_N en muchos campos de agricultores y la ER_N que se puede conseguir en parcelas de investigación.

La porción de N que no fue tomada por el cultivo, o por el sistema de cultivos, puede almacenarse en el suelo o perderse del sistema. El uso de dosis de N económicamente óptimas reduce la acumulación de nitrato (NO_3^-) residual en el perfil del suelo (Hong et al., 2007). Un estudio de largo plazo conducido en las planicies de Norte América en el que se compararon las respuestas del maíz al N, con y sin adición de P, demostró que una adecuada fertilización con P para cubrir las demandas de una adecuada nutrición aumentó los rendimientos en 42 %, mejorando los retornos económicos y reduciendo en 66 % las pérdidas de NO_3^- del perfil (Schlegel et al., 1996). Se ha demostrado que una adecuada nutrición con K también puede mejorar la ER_N y reducir las pérdidas de NO_3^- (Johnson et al., 1997). Estudios de maíz de alto rendimiento conducidos por Gordon (2005) en el estado de Kansas, Estados Unidos, demostraron que la utilización de cantidades adecuadas de los nutrientes principales nutrientes esenciales, incluyendo el azufre (S) puede incrementar de manera significativa el rendimiento y la ER_N .

Conclusiones

El manejo de N en los sistemas de producción de cultivos se debe basar en principios científicos. Los principios fundamentales de la nutrición, fuente correcta del nutriente, en la dosis, época y localización correctas (4Fs), debe ser la base de cada decisión de uso de nutrientes tanto en países desarrollados como en países en vías de desarrollo. Los investigadores en universidades e instituciones de investigación, los líderes en extensión, las agencias gubernamentales, los asesores, los representantes de la industria de fertilizantes y los agricultores necesitan trabajar conjuntamente para implementar una estrategia de mejor manejo del N. La eficiencia de uso del N puede mejorarse con un enfoque de los "4Fs" y así elevar los valores de ER_N del rango típico de menos del 50 % a 60 - 70 % o más. Los esfuerzos para mejorar el manejo del N pueden simultáneamente reducir las pérdidas de N al ambiente. A medida que el crecimiento poblacional promueve la reducción de áreas naturales y limita la disponibilidad de tierra con vocación para la producción agrícola, el manejo de nutrientes por sitio específico utilizando el enfoque de los "4Fs" se vuelve cada vez más importante.

Referencias

- Adviento-Borbe, M.A.A., M.L. Haddix, D.L. Binder, D.T. Walters, and A. Dobermann. 2007. Soil greenhouse gas fluxes and global warming potential in four high-yielding maize systems. *Glob. Change Biol.* 13:1972-1988
- Balasubramanian, V., B. Alves, M. Aulakh, M. Bekenda, Z. Cai, L. Drinkwater, D. Mugendi, C. van Kessel, and O. Oenema. 2004. Ch. 2, pp. 19-43. Crop environmental, and management factors affecting nitrogen use efficiency. In: Mosier, A.R., J.K. Syers and J.R. Freney (eds.). *Agriculture and the Nitrogen Cycle: Assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment*. Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), of the International Council for Science. Island Press. Washington, DC, USA.
- Baumert, K.A., T. Herzog, and J. Pershing. 2005. *Navigating the Numbers: Greenhouse Gas Data and International Climate Policy*. World Resources Institute. Washington, DC. 122 pp. <http://www.wri.org>
- Bellarby, J., B. Foreid, A. Hastings, and P. Smith. 2008. *Cool Farming: Climate impacts of agriculture and mitigation potential*. Greenpeace. Amsterdam, The Netherlands., 43 pp.
- Beman, M.J., K.R. Arrigo, and P.A. Matson. 2005. Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas of the ocean. *Nature* 434:211-214
- Bouwman, A.F., L.J.M. Boumans, and N.H. Batjes. 2002. Estimation of global NH_3 volatilization loss from synthetic fertilizers and animal manure applied to arable lands and grasslands. *Global Biogeochem. Cycles* 16 (2):1024, doi:10.1029/2000GB00138.
- Bouwman, A. F., G. Van Drecht, J.M. Knoop, A.H.W. Beusen, and C. R. Meinardi. 2005. Exploring changes in river nitrogen export to the world's oceans, *Global Biogeochem. Cycles*, 19, GB1002, doi:10.1029/2004GB002314.
- Boyer, E.W., R.W. Howarth, J.N. Galloway, F.J. Dentener, P.A. Green, and C.J. Vorosmarty. 2006. Riverine nitrogen export from the continents to the coasts. *Global Biogeochem. Cycles*. 20: GB1S91. doi:10.1029/2005GB002537.
- Bruulsema, T.W., C. Witt, F. Garcia, S. Li, T.N. Rao, F. Chen, S. Ivanova. 2008. A global framework for fertilizer BMPs. *Better Crops* 92(2):13-15.
- Bruulsema, T., J. Lemmon, B. Herz. 2009. Know your fertilizer rights. *Crops & Soils* March-April 2009. American Society of Agronomy. Madison, WI. pp. 13-18

- Buresh, R.J. and C. Witt. 2008. Balancing fertilizer use and profit in Asia's irrigated rice systems. *Better Crops* 92(1):18-22.
- Cassman, K.G., A. Dobermann and D.T. Walters. 2002. Agroecosystems, Nitrogen-use Efficiency, and Nitrogen Management. *Ambio* 31(2):132-140.
- Dobermann, A. 2007. Nutrient use efficiency – measurement and management. In: *Fertilizer Best Management Practices: General Principles, Strategy for their Adoption and Voluntary Initiatives vs Regulations*. 259 pp. Proc. IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices. 7-9 March 2007. Brussels, Belgium. International Fertilizer Industry Association. Paris, France. pp. 1-28.
- Dobermann, A. and K.G. Cassman. 2002. Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production systems of the United States and Asia. *Plant Soil* 247:153–175.
- Dobermann, A. and T.H. Fairhurst. 2000. *Rice: Nutrient Disorders and Nutrient Management*. 191 pp. International Rice Research Institute and Potash & Phosphate Institute.
- EPA. 2006. Global Anthropogenic non-CO₂ greenhouse gas emissions: 1990-2020. United States Environmental Protection Agency. EPA 430-R-06-003. June 2006 revised. Washington, DC, Available at <http://www.epa.gov/nonco2/econ-inv/downloads>.
- EPA SAB. 2008. Hypoxia in the northern Gulf of Mexico: an update by the EPA Science Advisory Board. 275 pp. Available on-line at: <http://yosemite.epa.gov/sab/sabpeople.nsf/Search?ReadForm&Query=hypoxia&committee=BOARD>.
- EPA. 2009. Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and sinks: 1990-2007. U.S. Environmental Protection Agency. 15 April 2009. EPA 430-R-09-004. Available at <http://epa.gov/climatechange>.
- Fixen, P.E., J.Jijun, K.N. Tiwari, and M.D. Stauffer. 2005. Capitalizing on multi-element interactions through balanced nutrition – a pathway to improve nitrogen use efficiency in China, India and North America. *Science in China Ser. C Life Sciences Special Issue* 48:780-790.
- Follett, R.F. 2001. Nitrogen transformation and transport processes. Ch. 2, pp. 17-44 In: Follett, R.F. and J.L. Hatfield (eds.) *Nitrogen in the Environment: Sources, Problems, and Management*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Galloway, J.N., E.B. Cowling, S.S. Seitzinger, and R.H. Socolow. 2002. Reactive Nitrogen: Too Much of a Good Thing? *Ambio* 31(2):60-63.
- Galloway, J.N. and E.B. Cowling. 2002. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *Ambio* 31(2):64-71.
- Galloway, J.N., J.D. Aber, J.W. Erisman, S.P. Seitzinger, R.W. Howarth, E.B. Cowling, and B.J. Cosby. 2003. The nitrogen cascade. *BioScience* 53:341-356.
- Galloway, J.N., F.J. Denter, D.G. Capone, E.W. Boyer, R.W. Howarth, S.P. Seitzinger, G.P. Asne, C.C. Cleveland, P.A. Green, E.A. Holland, D.M. Karl, A.F. Michaels, H. Porter, A.R. Townsend, and C.J. Vorosmarty. 2004. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochem* 70:153–226.
- Galloway, J.N., N. Raghuram, and Y.P. Abrol. 2008a. A perspective on reactive nitrogen in a global, Asian and Indian context. *Curr. Sci.* 94(11):1375-1381.
- Galloway, J.N., A.R. Townsend, J.W. Erisman, M. Bekunda, Z. Cai, JR., Freney, L.A. Martinelli, S. P. Seitzinger, and M. A. Sutton. 2008 b. Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions. *Science* 320:889-892.
- Goolsby, D.A., W.A. Battaglin, G.B. Lawrence, R.S. Artz, B.T. Aulenbach, R.P. Hooper, D.R. Keeney, and G.S. Stensland. 1999. Flux and sources of nutrients in the Mississippi–Atchafalaya River basin—Topic 3, Report for the integrated assessment of hypoxia in the Gulf of Mexico: National Oceanic and Atmospheric Administration Coastal Ocean Program Decision Analysis Series 17, 128 pp.
- Gordon, B. 2005. Maximizing irrigated corn yields in the Great Plains. *Better Crops* 89(2):8-10.
- Griggs, B.R. R.J. Norman, C.E. Wilson, Jr., and N.A. Slaton. 2007. Ammonia volatilization and nitrogen uptake for conventional and conservation tilled dry-seeded, delayed-flood rice. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71:745–751.
- Gruber, N. and J.N. Galloway. 2008. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature* 451(17): 293-296.
- Hong, N., P.C. Scharf, J.G. Davis, N.R. Kitchen, and K.A. Sudduth. 2007. Economically optimal nitrogen rate reduces soil residual nitrate. *J. Environ. Qual.* 36:354–362.
- IFA. 2007. *Fertilizer Best Management Practices: General Principles, Strategy for their Adoption and Voluntary Initiatives vs. Regulations*, Proc IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices. 7-9 March 2007. Brussels, Belgium. International Fertilizer Industry Association., Paris, France. 259 pp.

- IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.). Cambridge University Press. Cambridge, UK and New York, NY, USA. 881 pp.
- Johnson, J.W., T.S. Murrell, and H.F. Reetz. 1997. Balanced fertility management: a key to nutrient use efficiency. *Better Crops* 81:3-5.
- Kissel, D. 1988. Management of urea fertilizers. NCR 326, North Central Regional Extension Publication. Kansas State University. Manhattan, Kansas.
- Kitchen, N.R., and K.W.T. Goulding. 2001. On-farm technologies and practices to improve nitrogen use efficiency. In: Follett, R.F. and J.L. Hatfield (eds.) *Nitrogen in the Environment: Sources, Problems, and Management*. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. Ch. 13, pp. 335-370.
- Krupnik, T.J., J. Six, J.K. Ladha, M.J. Paine, and C. van Kessel. 2004. An assessment of fertilizer nitrogen recovery efficiency by grain crops. Ch. 14, pp. 193-207. In: Mosier, A.R., J.K. Syers and J.R. Freney (eds.). *Agriculture and the Nitrogen Cycle: Assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment*. Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), of the International Council for Science. Island Press. Washington, DC, USA.
- Ladha, J.K., H. Pathak, and T.J. Krupnik. 2005. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. *Adv. Agron.* 87:85-156.
- Rabalais, N.N., R.E. Turner, R.J., Díaz, and D. Justic. 2009. Global change and eutrophication of coastal waters. *ICES Journal of Marine Science* 66: 1528–1537.
- Raun, W.R. and G.V. Johnson. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agron. J.* 91:357–363.
- Rochette, P., J.D. MacDonald, D.A. Angers, M.H. Chantigny, M-O. Gasser, and N. Bertrand. 2009. Banding of urea increased ammonia volatilization in a dry acidic soil. *J. Environ. Qual.* 38:1383–1390.
- Schlegel, A.J., K.C. Dhuyvetter, and J.L. Havlin. 1996. Economic and environmental impacts of long-term nitrogen and phosphorus fertilization. *J. Produc. Agric.* 9:114-118.
- Schlesinger, W.H. 2009. On the fate of anthropogenic nitrogen. *Proc. Natl. Academy Sci.* 106(1):203-208.
- Snyder, C.S. 2008a. Fertilizer nitrogen BMPs to limit losses that contribute to global warming. Ref # 080507, International Plant Nutrition Institute. Norcross, GA, USA., 8 pp. [http://www.ipni.net/ipniweb/portal.nsf/0/9bbc50427c6469ae852574f200162796/\\$FILE/Nitrogen%20BMP.pdf](http://www.ipni.net/ipniweb/portal.nsf/0/9bbc50427c6469ae852574f200162796/$FILE/Nitrogen%20BMP.pdf)
- Snyder, C.S. 2008b. Nutrients and Hypoxia in the Gulf of Mexico- An Update on Progress, 2008. *Better Crops* 92(2):16-22.
- Snyder, C.S., and T.W. Bruulsema. 2007. Nutrient Use Efficiency and Effectiveness in North America: Indices of Agronomic and Environmental Benefit. International Plant Nutrition Institute. June 2007. Ref # 07076. 4 pp. International Plant Nutrition Institute. Norcross, GA, USA. <http://www.ipni.net>
- Snyder, C.S., T.W. Bruulsema, T.L. Jensen, and P.E. Fixen. 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agric. Ecosyst. Environ. Agric. Ecosyst. Environ.* 133 (2009) 247–266.
- Subramanian, V. 2008. Nitrogen transport by rivers of south Asia, *Curr. Sci.* 94(11):1413-1418.
- Watson, C. 2005. Urease Inhibitors. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers Frankfurt, Germany. 28-30 June 2005. 8 pp. International Fertilizer Industry Association. Paris, France.

PRINCIPIOS BASICOS DE LA EFICIENCIA DE FOSFORO Y POTASIO

T. Scott Murrell¹

Resumen

Dos medidas de la eficiencia de fósforo (P) y potasio (K) de interés para los agricultores son la eficiencia agronómica (EA) y el balance parcial de nutrientes (BPN). La EA considera la respuesta del cultivo a la aplicación de un nutriente mientras que el BPN mide la relación entre remoción y uso del nutriente. La adecuada evaluación de la EA requiere de monitoreo a largo plazo. Una sola aplicación de una alta cantidad de P o K, puede resultar, en el transcurso de varios años, en una EA similar a la lograda con pequeñas aplicaciones anuales. Una alta dosis inicial incrementará más el contenido del nutriente según el análisis de suelos que una pequeña dosis anual, lo que puede resultar en rendimientos más altos y sostenidos en un periodo más largo de tiempo, dependiendo de la fertilidad inicial del suelo. Las aplicaciones que reemplazan la cantidad de P y K removida por la cosecha se denominan aplicaciones de mantenimiento. Se puede demostrar que para que una aplicación de mantenimiento cubra al menos los costos en un ciclo de cultivo, la EA debe ser igual o mayor que la relación de costo del cultivo al costo del nutriente. Para que las aplicaciones en banda logren una constante mejora en la EA sobre las aplicaciones al voleo, a través de varias dosis de aplicación, se deben cumplir ciertas condiciones. Estas condiciones solo se han reportado en raras ocasiones. Las mejoras reportadas no presentan una figura completa del mejoramiento de la eficiencia y se limitan para uso en reportes de producción. Las mejoras en la eficiencia deben evaluarse en relación a los impactos en la sostenibilidad a largo plazo de los niveles de fertilidad del suelo.

Definición de los efectos residuales

El fósforo (P) y el potasio (K) son retenidos por el suelo y pueden, por esta razón, impactar el rendimiento de los cultivos y la fertilidad del suelo por varios años después de su aplicación. Este impacto se denomina efecto "residual". En consecuencia, la eficiencia de una aplicación puede evaluarse para un solo ciclo de cultivo o para varios. La evaluación adecuada de los efectos residuales requiere de periodos largos para capturar de forma adecuada el real impacto del proceso (Syers et al., 2008). Este artículo discute dos formas de evaluar la

eficiencia de nutrientes: la eficiencia agronómica (EA) y el balance parcial de nutrientes (BPN). Se seleccionaron estas eficiencias porque son parte central de los aspectos de manejo de P y K que más preocupan a los agricultores y consultores.

Eficiencia agronómica (EA)

La EA considera cuanto incremento en rendimiento se logra por unidad de nutriente aplicado. Se define como (Snyder y Bruulsema, 2007):

$$EA = (R - R_0) / D \quad [1]$$

Donde:

R es el rendimiento fertilizado (kg ha⁻¹), R₀ es el rendimiento sin fertilizar (kg ha⁻¹) y D es la dosis del nutriente aplicado (kg ha⁻¹). Por esta razón, la EA es una expresión sin unidades.

Para demostrar algunas de las diferentes formas de evaluar la EA de nutrientes como el P y K se presentan los datos de un estudio comparando los efectos en el rendimiento de maíz de la aplicación de una sola dosis de 146 kg P ha⁻¹ y

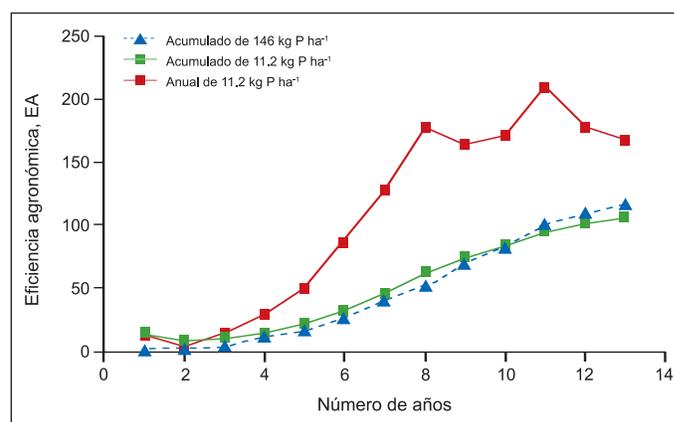


Figura 1. Eficiencia agronómica (EA) de una sola aplicación de 146 kg P ha⁻¹ y la aplicación anual de 11.2 kg P ha⁻¹. La EA de la aplicación anual se calculó de dos formas: 1) cada año considerado individualmente sin tomar en cuenta la historia previa de fertilización (dosis anual de 11.2 kg P ha⁻¹) y 2) EA basada en la suma acumulada de las dosis anuales hasta e incluyendo el año de interés (acumulado de la dosis anual de 11.2 kg P ha⁻¹) (Webb et al., 1992).

¹ International Plant Nutrition Institute, smurrell@ipni.net

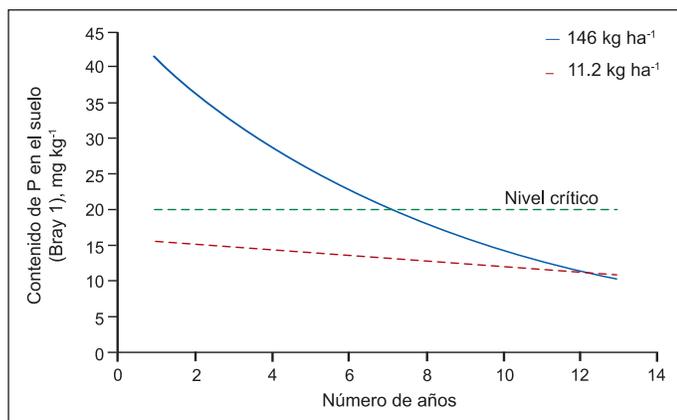


Figura 2. Efecto de la aplicación individual de una dosis alta de P y de una serie de aplicaciones anuales de cantidades más pequeñas en el contenido de P en el suelo. La cantidad total aplicada en el periodo de tiempo considerado fue la misma (Webb et al., 1992).

aplicaciones anuales de 11.2 kg P ha⁻¹ hechas en la misma unidad experimental a través del tiempo (Webb et al., 1992). Ambas dosis fueron aplicadas al voleo e incorporadas. Las prácticas de labranza incluyeron arado de vertedera en el otoño seguida de paso de disco en primavera. Se incluyó un testigo (R₀), lo que permite calcular la EA de la dosis única y de las dosis anuales de P. Para poder comparar los dos tratamientos se consideraron un total de 13 años de modo que el total acumulado de las pequeñas dosis anuales se iguale a la alta dosis aplicada una sola vez.

En la **Figura 1** se presentan los resultados de calcular la EA en forma diferente. La línea superior con la mayor EA se la calcula usando solamente el R - R₀ observado en un año dado con la dosis de 11.2 kg ha⁻¹. Por esta razón, esta EA representa una eficiencia anual que no toma en cuenta la historia de fertilización o rendimiento (corto plazo). En los otros dos casos, el R - R₀ es la respuesta total en rendimiento de todos los años hasta e incluyendo el año de interés. De igual forma, D representa la suma de las dosis de todos los años hasta e incluyendo el año de interés (largo plazo).

Los datos de la **Figura 1** demuestran que las evaluaciones de corto plazo que ignoran el historial de la fertilización y el historial de la respuesta en rendimiento pueden producir valores artificiales de EA. Adicionalmente, los datos demuestran también que una aplicación individual de una dosis alta de P produce una EA de largo plazo, esencialmente igual a la misma cantidad total de P dividida en dosis más pequeñas aplicadas anualmente. En consecuencia, la evaluación de aplicaciones anuales debe considerar la historia de fertilización para ser adecuadamente comparada con dosis más altas aplicadas en periodos más amplios.

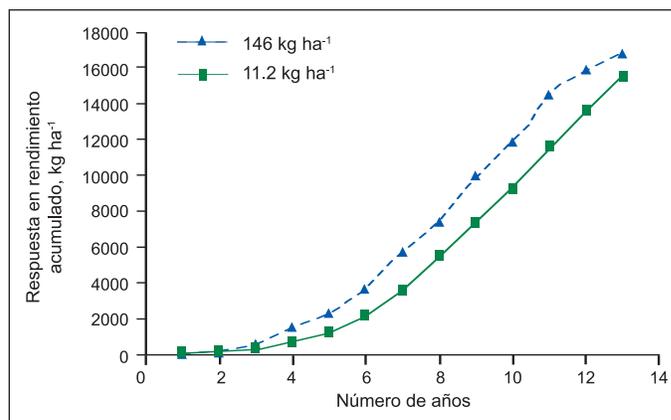


Figure 3. Respuesta en rendimiento acumulado a una sola dosis alta de P y a dosis anuales más pequeñas (Webb et al., 1992).

Otra importante diferencia entre la aplicación de una sola dosis alta de P y la aplicación anual de dosis más pequeñas es su efecto relativo en el contenido de P determinado por el análisis de suelos (**Figura 2**). En el mismo estudio citado arriba, la dosis de 146 kg ha⁻¹ incrementó inicialmente el contenido de P en el suelo a niveles superiores al nivel crítico (20 mg kg⁻¹ P, Bray 1). A contenidos de P por debajo del nivel crítico existen las más altas probabilidades de que los contenidos de P en el suelo sean muy bajos para satisfacer las necesidades del cultivo. A medida que transcurre el tiempo, sin la subsecuente aplicación de P, los niveles de P descendieron de manera exponencial y para el año 8 estuvieron por debajo del nivel crítico. Este tipo de caída exponencial ha sido observado por otros investigadores (McCollum, 1991; Syers et al., 2008). Por otro lado, las aplicaciones anuales de 11.2 kg ha⁻¹ nunca elevaron el contenido de P en el suelo a niveles mayores al nivel crítico. Al contrario, estos provocaron una constante reducción de la fertilidad del suelo. Al final del periodo considerado, ambas dosis generaron niveles bajos de P casi idénticos.

Una importante diferencia entre las dos dosis en el estudio de Webb y colaboradores (1992) se presenta en el rendimiento. La **Figura 3** muestra que la aplicación individual de una sola dosis alta resultó en rendimientos acumulados más altos en el año 4 y permanecieron altos por el resto de 13 años evaluados. El análisis económico del estudio evaluó solamente los retornos a corto plazo de las aplicaciones anuales. Sin embargo, existen implicaciones sobre la rentabilidad a largo plazo. Los rendimientos más altos obtenidos al principio son capaces de proporcionar ingresos que tienen un valor más alto cuando se consideran el periodo total de 13 años, debido a la tendencia de devaluación del dinero en el tiempo. Además, una sola compra de P podría hacerse coincidir

con una época de precios más favorables del cultivo y del fertilizante, si existe suficiente capital y si la tierra es de propiedad o arrendada por un periodo largo de tiempo. En algunos casos, una sola alta inversión en fertilizante hecha en la época apropiada puede ser más rentable a largo plazo que pequeñas compras anuales que están más sujetas a las fluctuaciones del mercado. El análisis de rentabilidad debe examinar estos factores a largo plazo para entregar una visión clara del riesgo.

Balance parcial de nutrientes (BPN)

El BPN es la relación entre la cantidad de nutriente removido en las partes cosechas del cultivo (U_C) y la cantidad de nutriente aplicado (Snyder y Bruulsema, 2007):

$$BPN = U_C / D \quad [2]$$

La precisión de la determinación del BPN se basa en:

- Determinación en el laboratorio, antes que la estimación de datos de la literatura, de la concentración del nutriente en las partes cosechadas del cultivo.
- Tener en cuenta todas las aplicaciones del nutriente, incluyendo las aplicaciones de residuos de corral y otros residuos y de fertilizantes minerales.

El objetivo principal de esta medición de eficiencia es determinar que tan cercano está el sistema a 1. Un valor de BPN cercano a 1 indica que existe un balance de masa (aplicación del nutriente a una unidad de superficie aproximadamente igual a la remoción de esa misma superficie). Este balance es necesario para sostener el nivel de fertilidad del suelo del sistema.

Sin embargo, un BPN de 1 no garantiza que el contenido del nutriente en el suelo, según el análisis, sea estático. En un estudio con alfalfa bajo riego conducido por Ludwick y Fixen (1983), en dos suelos diferentes, se encontró que para mantener los niveles de P en el suelo se necesitaban valores de BPN de 2.2 y 1.4. Para K los valores del BPN fueron de 0.75 y 0.22. Al inicio de este estudio se utilizaron dosis altas de fertilizante que se aplicaron al voleo y luego se incorporaron y que fueron seguidas por aplicaciones anuales que no se incorporaron. Moncrief y colaboradores (1985) demostraron que la misma cantidad de K aplicada a un suelo con labranza y otro sin labranza, la aplicación a la superficie sin incorporación en el suelo sin labranza incrementó el contenido de K en los primeros 15 cm del suelo. Estos dos estudios demuestran que la distribución del nutriente dentro del suelo puede determinar si el contenido del nutriente en el suelo permanece constante o cambia con las aplicaciones de mantenimiento hechas para mantener el BPN cerca de 1.

Eficiencia agronómica de una aplicación de mantenimiento rentable

A menudo es difícil interpretar las eficiencias calculadas. Cuánta eficiencia se puede razonablemente esperar. En esta sección se examina cuanta eficiencia se puede esperar para que una aplicación de mantenimiento sea rentable.

Como se discutió anteriormente, una dosis de mantenimiento es aquella que busca mantener el balance de masas, manteniendo el BPN cerca de 1. Esta dosis se puede definir como:

$$D_{\text{mant}} = rR_F \quad [3]$$

Donde:

D_{mant} es la dosis de mantenimiento, r es la cantidad de nutriente removido por unidad de producto cosechado y R_F es el rendimiento del cultivo fertilizado.

Cuando se considera solo un ciclo de cultivo. Para que la D_{mant} sea rentable en ese ciclo de cultivo, el ingreso por el incremento en rendimiento debido a la aplicación debe ser por lo menos igual al costo del nutriente. Esto se expresa de la siguiente manera:

$$P_C(R - R_0) \geq P_F(D_{\text{mant}})$$

Donde:

P_C es el precio del cultivo, R y R_0 son los rendimientos fertilizados y sin fertilizar, respectivamente, y P_F es el precio del nutriente aplicado a la dosis de mantenimiento. Arreglando la ecuación, y definiendo la nueva variable Q que es la relación entre el precio del fertilizante y el precio del cultivo ($Q = P_F/P_C$), que no tiene unidades, se obtiene la siguiente ecuación:

$$(R - R_0) / D_{\text{mant}} \geq Q, \text{ o } EA \geq Q \quad [4]$$

Entonces, para que una aplicación de mantenimiento sea neutral debe tener una EA que al menos sea igual a Q . Una EA mayor que Q es rentable en ese ciclo.

Esta relación se demuestra gráficamente en la **Figura 4**. En el primer incremento de adición del nutriente la BPN decrece rápidamente a medida que el R y la dosis del nutriente se incrementan. Cuando la dosis se acerca a D_{mant} , el BPN se reduce a 1. Simultáneamente, la EA se hace más pequeña a medida que los incrementos en dosis y la respuesta del cultivo empiezan a nivelarse, pero como se describe un escenario rentable, la EA se mantiene sobre Q cuando se llega a D_{mant} .

Las aplicaciones de mantenimiento son importantes para mantener el balance de masa de nutrientes en el suelo.

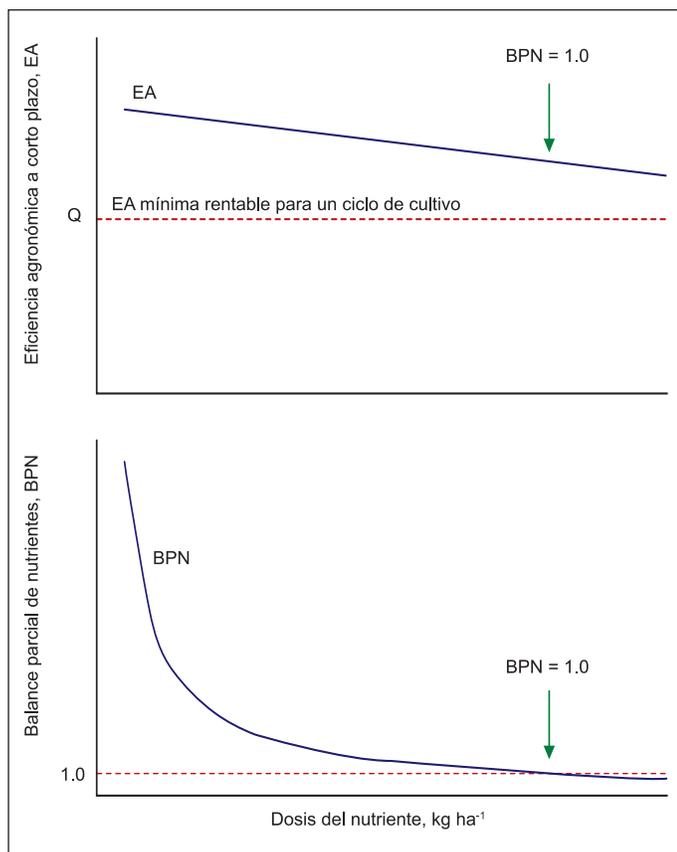


Figura 4. Relaciones teóricas entre la eficiencia agronómica (EA) y el balance parcial de nutrientes (BPN) para una situación donde la dosis de mantenimiento de un nutriente (BPN = 1) es rentable en un ciclo de crecimiento, resultando en una EA > Q.

Esta discusión demuestra que es posible definir al menos una EA mínima para una aplicación de mantenimiento que sea rentable en un ciclo individual de producción.

Efecto de la localización de los nutrientes en la EA y el BPN

En muchos estados del cinturón maicero de los Estados Unidos se recomienda reducir las dosis de fertilizantes si estos se aplican en banda en lugar de aplicarlas al voleo (Gerwing y Gelderman, 2002; Rehm et al., 2006; Shapiro et al., 2003). En ocasiones el grado de reducción varía con el contenido del nutriente en el suelo según el análisis (Rehm et al., 2006) y a veces no (Shapiro et al., 2003). A menudo, las dosis de aplicación en banda son la mitad de las dosis al voleo.

Esta recomendación asume que las aplicaciones en banda (B) son generalmente más eficientes que las aplicaciones al voleo (V) y que esencialmente producen la misma respuesta en rendimiento que las aplicaciones al voleo. Este razonamiento se presenta gráficamente en la **Figura 5** donde se escogió el popular modelo cuadrático-meseta

($R = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 D^2$ para $D \leq D_{\max}$; $R = R_{\max}$ para $D > D_{\max}$) para modelar la respuesta. Esta figura muestra que la EA es el doble cuando se hace la aplicación en banda en comparación con la aplicación al voleo ($EA_B = 2EA_V$, gráfico inferior). Este duplicamiento en EA se produce estrictamente por el hecho que se usa la mitad de la dosis con la aplicación en banda para producir el máximo rendimiento (R_{\max}) que con la aplicación al voleo ($D_{\max-B} = 0.5D_{\max-V}$, parte superior del gráfico). La mayor eficiencia de la aplicación en banda se puede expresar con la relación $D_{\max-B} / D_{\max-V}$, que en este caso es igual a 0.5.

Se puede demostrar que en el escenario de respuesta descrito arriba se pueden presentar las siguientes relaciones. En primer lugar, los interceptos (β_0) de las dos ecuaciones son los mismos:

$$\beta_{0V} = \beta_{0B} \quad [5]$$

Donde:

β_{0V} es el intercepto de la curva de respuesta a la aplicación al voleo y β_{0B} es el intercepto de la aplicación en banda. Luego, el coeficiente de la sección lineal de la pendiente (β_1) de la curva de respuesta para las dosis al voleo se puede describir de la siguiente forma:

$$\beta_{1V} = (D_{\max-B} / D_{\max-V}) \beta_{1B} \quad [6]$$

Donde:

β_{1V} es el coeficiente de la parte lineal de la curva de las dosis al voleo y β_{1B} es el mismo coeficiente para las dosis en banda. De igual manera, la curvatura (β_2) de las dos ecuaciones de respuesta se describe de la siguiente forma:

$$\beta_{2V} = (D_{\max-B} / D_{\max-V})^2 \beta_{2B} \quad [7]$$

Si estas relaciones se mantienen, el mejor desempeño de la EA de las aplicaciones en banda sobre las aplicaciones al voleo es una constante a través de todas las dosis de aplicación. La implicación práctica de esta relación es que si los agricultores tienen que reducir las dosis por debajo de aquellas necesarias para producir máximo rendimiento, las aplicaciones en banda de estas dosis reducidas todavía tendrán la misma eficiencia de aquellas que producen el máximo rendimiento.

Investigación para demostrar la mayor eficiencia de las aplicaciones en banda fue conducida previamente por varios grupos (Welch et al., 1966a; Welch et al., 1966b, Peterson et al., 1981). Todos estos investigadores compararon las aplicaciones al voleo con las aplicaciones en banda durante un solo ciclo de cultivo y no consideraron los efectos residuales. Todos estos estudios también reportaron que la respuesta a las aplicaciones era

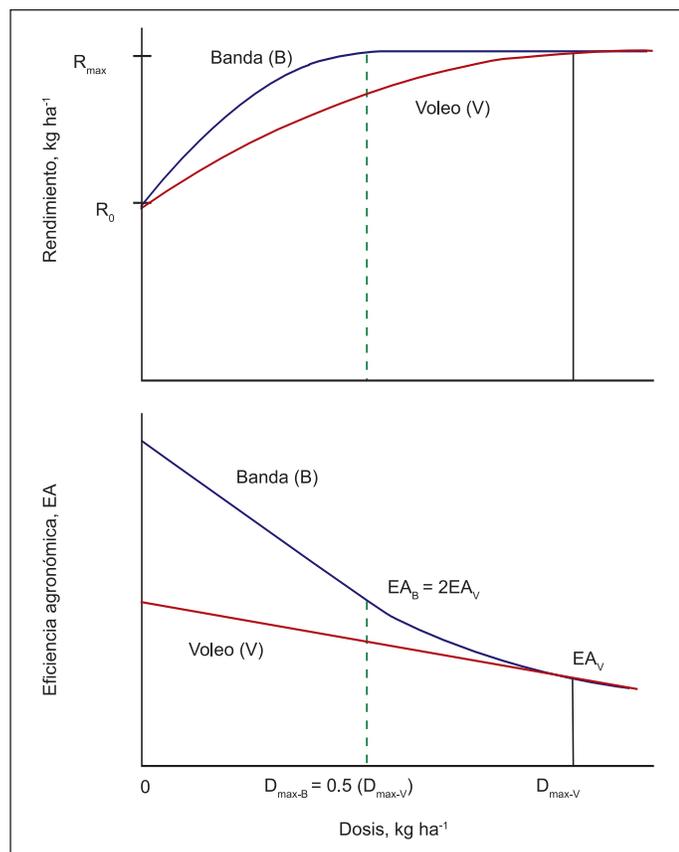


Figura 5. Relación teórica entre una aplicación voleo y otra en banda que es el doble de eficiente, pero que resulta en el mismo rendimiento que la aplicación al voleo.

cuadrática, permitiendo probar la relación teórica descrita arriba.

Se reportaron 12 sitios-año, 9 que investigaron P y 3 K. De estos 12 estudios, solamente un sitio-año se ajustó a la respuesta teórica descrita en la **Figura 5**. El estudio mostró una relación $D_{max-B} / D_{max-V} = 0.63$, demostrando en este sitio, que tenía un bajo contenido de P, que la aplicación en banda puede producir la misma respuesta en rendimiento con dos tercios de la dosis aplicada al voleo. En 5 sitios-año no se aplicaron dosis suficientes para maximizar la respuesta a ambos métodos de aplicación. En los 4 sitios-año restantes, los máximos rendimientos obtenidos por los métodos de aplicación fueron diferentes y en tres de ellos la aplicación en banda produjo rendimientos máximos más altos que las aplicaciones al voleo.

Los investigadores envueltos en estos estudios no usaron la relación teórica de la **Figura 5** para evaluar los dos tipos de aplicaciones. En lugar de esto, eligieron un nivel de rendimiento y se compararon las dosis necesarias para obtener ese rendimiento. Si bien se puede calcular la relación D_B / D_V de esta manera para un determinado juego de datos, esta relación no ofrece una visión

completa de las respuestas y puede ser engañosa. Por ejemplo, es importante que el agricultor conozca que sin importar la eficiencia, las aplicaciones al voleo no serán iguales en rendimiento a las respuestas de la aplicación en banda y viceversa. Además, si el incremento en EA de un método sobre el otro no es constante en todas las dosis del nutriente en cuestión, no se puede esperar que los rendimientos a obtenerse con la dosis escogida de la relación sean los rendimientos esperados.

El trabajo de Anghinoni y Barber (1980) demostró que cuando se aplican dosis bajas de fertilizante a un suelo deficiente, las aplicaciones en banda, que fertilizan un pequeño volumen de suelo producen rendimientos más altos que aquellos obtenidos con las mismas dosis incorporadas completamente en un volumen mayor de suelo. Sin embargo, a medida que se incrementa la dosis, se necesita fertilizar un mayor volumen de suelo para maximizar el rendimiento y el rendimiento obtenido con esta dosis más alta es mayor que el rendimiento obtenido con una dosis más baja aplicada en banda. Las aplicaciones conjuntas en banda y al voleo pueden ofrecer una nutrición más completa que cualquiera de las dos utilizadas en forma individual. Los nutrientes colocados en banda cerca de la semilla proveen de la disponibilidad posicional de una banda concentrada al inicio del ciclo (Mengel y Barber, 1974). La completa incorporación de la aplicación al voleo incrementa la cantidad del nutriente disponible para un sistema radicular más extenso más tarde en el ciclo.

En los casos en los cuales un método de localización del fertilizante mejora la EA, se debe examinar cuidadosamente los resultados de la dosis reducida para determinar que tan cerca está del BPN de 1 necesario para sostener los niveles de fertilidad del suelo. En los casos donde el BPN de una dosis más eficiente es menor a 1 es importante pensar si el mejoramiento en eficiencia a corto plazo es una buena alternativa frente a la posible reducción de la fertilidad del suelo a largo plazo si esta dosis se utiliza repetidamente.

Referencias

- Anghinoni, I. and S.A. Barber. 1980. Predicting the most efficient phosphorus placement for corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:1016-1020.
- Fixen, P.E. and A.E. Ludwick. 1983. Phosphorus and potassium fertilization of irrigated alfalfa on calcareous soils: I. Soil test maintenance requirements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47:107-112.

- Gerwing, J. and R. Gelderman. 2005. South Dakota fertilizer recommendations guide. Sep. 2005. EC750. South Dakota Coop. Ext. Serv., South Dakota State Univ., Brookings. Available online at <http://agbiopubs.sdstate.edu> (verified 14 Aug. 2009).
- McCullum, R.E. 1991. Buildup and decline in soil phosphorus: 30 year trends on a typic umprabult. *Agron. J.* 83:77-85.
- Mengel, D.B. and S.A. Barber. 1974. Rate of nutrient uptake per unit of corn root under field conditions. *Agron. J.* 66:399-402.
- Moncrief, J.F., P.M. Burford, and J.B. Swan. 1985. The effect of tillage on interpretation and response to soil K. *J. Fert. Iss.* 2:17-25.
- Peterson, G.A., D.H. Sander, P.H. Grabouski, and M.L. Hooker. 1981. A new look at row and broadcast phosphate recommendations for winter wheat. *Agron. J.* 73:13-17.
- Rehm, G., G. Randall, J. Lamb, and R. Eliason. 2006. Fertilizing corn in Minnesota. FO-3790-C. Rev. 2006. Minnesota Coop. Ext. Serv., St. Paul., MN. Available online <http://www.extension.umn.edu> (verified 14 Aug. 2009).
- Shapiro, C.A., R.B. Ferguson, G.W. Hergert, A.R. Dobermann, and C.S. Wortmann. 2003. Fertilizer suggestions for corn. G74-174-A. Rev. Nov. 2003. Nebraska Coop. Ext. Serv., Univ. Nebraska, Lincoln. Available online at <http://www.ianrpubs.unl.edu> (verified 14 Aug. 2009).
- Snyder, C.S., and T.W. Bruulsema. 2007. Nutrient use efficiency and effectiveness in North America: Indices of agronomic and environmental benefit. Ref # 07076. International Plant Nutrition Institute. Norcross, GA. Available at <http://www.ipni.net> (verified 11 Aug. 2009).
- Syers, J.K., A.E. Johnson, and D. Curtin. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. *FAO Fert. Plant Nutr. Bull.* 18. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Webb, J.R., A.P. Mallarino, and A.M. Blackmer. 1992. Effects of residual and annually applied phosphorus on soil test values and yields of corn and soybean. *J. Prod. Agric.* 5:148-152.
- Welch, L.F., P.E. Johnson, G.E. McKibben, L.V. Boone, and J.W. Pendleton. 1966a. Relative efficiency of broadcast versus banded potassium for corn. *Agron. J.* 58:618-621.
- Welch, L.F., D.L. Mulvaney, L.V. Boone, G.E. McKibben, and J.W. Pendleton. 1966b. Relative efficiency of broadcast versus banded phosphorus for corn. *Agron. J.* 58:283-287.

EFICIENCIA DE USO DE NUTRIENTES EN BRASIL

Luís Ignacio Prochnow¹, Valter Casarin², Nand Kumar Fageria³ y Milton Ferreira Moraes⁴

Resumen

Brasil tiene la mayor área con potencial agrícola del mundo que no ha sido explotada (alrededor de 100 millones de hectáreas). Las proyecciones de la Asociación Internacional de Fertilizantes (IFA) estiman que el país necesitará incrementar el área cultivada en 15 millones de hectáreas hasta el año 2015. Uno de los desafíos para sustentar este crecimiento y los necesarios incrementos en productividad es hacer que los fertilizantes sean usados en forma más eficiente, concordando con la preocupación de la sociedad por la sostenibilidad de la agricultura. El incremento de la producción de los cultivos por medio de la fertilización depende de las características físicas y químicas del suelo, del tipo de cultivo utilizado y de otros factores como disponibilidad de agua y control de enfermedades, plagas y malezas. La eficiencia de adquisición, transporte y utilización de nutrientes por las plantas está controlada por la capacidad del suelo para suplir nutrientes y la capacidad de la planta para absorber, utilizar y remover esos nutrientes. Estos factores varían con el tipo de suelo, el genotipo/cultivar y las condiciones climáticas. La eficiencia de uso de los nutrientes depende de las prácticas de manejo, especialmente aquellas que neutralizan la acidez, incrementan la capacidad de intercambio catiónico, reducen las pérdidas de nutrientes y promueven el incremento de la fracción orgánica y la actividad biológica del suelo. Los dos principales factores que limitan la productividad de los cultivos en los suelos de Brasil son la deficiencia hídrica y el estrés nutricional. La eficiencia de nutrientes en el primer ciclo de producción es de 50 % para N, 10 % para P, y 40 % para K. Para aumentar la eficiencia de uso de estos nutrientes es necesario entender mejor el efecto de los diversos factores en la absorción y utilización de los nutrientes por la planta.

Introducción

Brasil es el cuarto mayor consumidor de fertilizantes del mundo, lo que representa cerca del 6 % del consumo mundial. Proyecciones de la Asociación Internacional de Fertilizantes (IFA) indican que se producirá un incremento en la demanda de este insumo en países de Asia, Africa y las Américas. En Brasil, donde existe la

mayor área con potencial agrícola no explotada del mundo, alrededor de 100 millones de ha, la IFA estima que se producirá un crecimiento del área cultivada que podría resultar en un mercado de 30 millones de toneladas de fertilizantes hasta el año 2015. Uno de los principales desafíos para sustentar este crecimiento, y los necesarios incrementos en productividad, es hacer más eficientes los fertilizantes, situación que concuerda además con la creciente preocupación por la sostenibilidad de la agricultura en tiempos modernos (Horowitz, 2007). El aumento de la productividad por medio de la fertilización de los cultivos depende de las características físicas y químicas del suelo, del cultivo sembrado y de otros factores como la disponibilidad de agua y el control de enfermedades, plagas y malezas.

La eficiencia de adquisición, transporte y utilización de nutrientes por las plantas está controlada por la capacidad del suelo para suplir nutrientes y por la capacidad de las plantas para absorber, utilizar y remover los nutrientes (Baligar y Fageria, 1997). Estos factores varían con el tipo de suelo, los genotipos/cultivares de las diferentes especies y las condiciones climáticas. La eficiencia de uso de los nutrientes depende de las prácticas de manejo realizadas al suelo, especialmente las que ayudan a reducir o neutralizar la acidez, incrementan la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y reducen la capacidad de intercambio aniónico (CIA), reducen las pérdidas de nutrientes por lixiviación y volatilización y promueven la acumulación de materia orgánica y la actividad biológica del suelo (Goedert et al., 1997).

Los dos principales factores que limitan la productividad de los cultivos en los suelos de Brasil son la deficiencia hídrica y el estrés nutricional. Un ejemplo son los suelos del Cerrado que en condiciones naturales son pobres en nutrientes esenciales, principalmente fósforo (P) (Fageria, 1998). En estas condiciones, es extremadamente importante un enfoque agro ecológico de producción agrícola y la identificación de material genético que pueda absorber y utilizar P en forma eficiente. Esto posibilita la reducción de los costos de producción, utiliza una menor cantidad de nutrientes y conserva el ambiente (Machado, 1997). Además, la eficiencia de recuperación de nutrientes por los cultivos anuales, en el primer ciclo de producción, es

¹ International Plant Nutrition Institute, lprochnow@ipni.net

² International Plant Nutrition Institute, vcasarin@ipni.net

³ Centro Nacional de Pesquisa de Arroz, fageria@cnpaf.embrapa.br

⁴ CENA/USP, moaresmf@yahoo.com.br

Tabla 1. Area, producción total y rendimiento de los principales cultivos de Brasil (GCEA, IBGE, 2008).

Cultivo	Area ha	Producción t	Rendimiento kg ha ⁻¹
Soya	21 271 762	59 916 830	2 817
Maíz	14 443 337	59 011 703	4 086
Caña de Azúcar	8 141 228	648 973 981	79 715
Fríjol	3 779 449	3 460 067	915
Arroz	2 891 665	12 100 946	4 229
Trigo	2 373 572	5 886 009	2 480
Café	2 216 014	2 790 858	1 259
Algodón	1 057 032	3 971 090	3 757
Naranja	833 409	18 394 719	22 072

muy baja. Por ejemplo, la eficiencia de nitrógeno (N) es de 50 %, la de P de 10 % y la de potasio (K) 40 % (Baligar y Bennett, 1986). Para incrementar la eficiencia de los nutrientes es necesario entender mejor el efecto de los diversos factores que controlan la absorción y utilización de nutrientes por la planta.

Cultivo en Brasil: Area, producción y rendimientos

Las estadísticas divulgadas por el Instituto Brasileiro de Geografía y Estadística (IBGE, 2009) revelan que la producción nacional de cereales, leguminosas y oleaginosas del año 2008 fue de 148.8 millones de toneladas, 9.5 % superior a la obtenida en el 2007 (133.1 millones de toneladas). El área cosechada (47.2 millones de ha) se incremento en 4.1 % en relación al año 2007. La soya, maíz y arroz representan el 89.7 % de la producción nacional estimada de granos. Los cultivos de exportación que ocuparon la mayor área en el 2008 fueron la soya, el maíz y la caña de azúcar (**Tabla 1**).

La producción de caña de azúcar en el año 2008 fue de 648 973 981 toneladas, lo que representó un crecimiento del 19.2 % en relación al 2007. Este crecimiento fue producto de la expansión del área sembrada (12.5 %) como reflejo de los nuevos proyectos iniciados para atender la demanda de etanol. Los rendimientos del cultivo también se han incrementado en los últimos años con la introducción de nuevas variedades y nueva tecnología (IBGE, 2009).

Utilización de fertilizantes en Brasil

La producción de Brasil depende del mercado internacional de fertilizantes. El país importa una parte considerable de los componentes de las fórmulas NPK utilizadas, sobre todo de los Estados Unidos

(nitrogenados), Rusia (nitrogenados y potásicos) y Canadá (fosfatados y potásicos). La crisis económica mundial también afectó al sector agrícola, produciendo una reducción de las ventas de fertilizantes del año 2008 que totalizaron 22 429 toneladas de producto, lo que significa una reducción del 8.9 % en relación al año 2007.

La **Tabla 2** presenta la evolución del consumo de fertilizantes por los principales cultivos en el periodo 1991 – 2008. Se observa que la soya es el cultivo de más demanda, lo que representa cerca del 33 % del consumo nacional. Otros cultivos representativos son el maíz, caña de azúcar y café que en conjunto representan aproximadamente el 38 % del total. La evolución del consumo aparente de fertilizantes de Brasil se presenta en la **Figura 1**.

Balance de nutrientes en la agricultura de Brasil

Un estudio del balance de nutrientes en la agricultura brasilera conducido recientemente analizó la entrada y salida de macronutrientes en el año 2007. Como base para el cálculo de este balance de nutrientes se utilizaron los datos

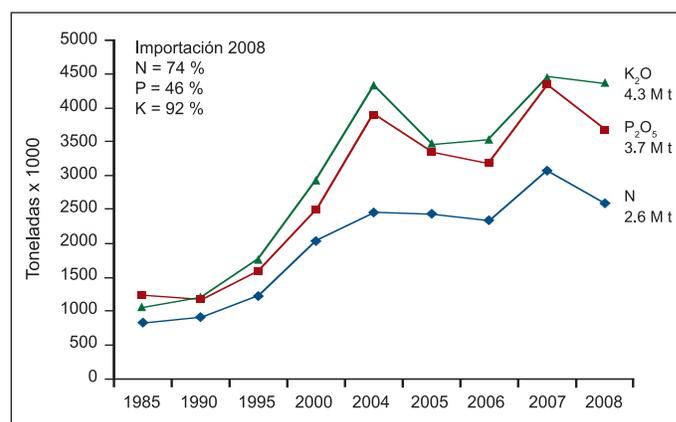


Figura 1. Consumo aparente de NPK en Brasil (1985-2008) (ANDA, 2009).

Tabla 2. Consumo de fertilizantes de los principales cultivos de Brasil (base porcentual) (ANDA, 2009).

Cultivo	1991	1996	2001	2006	2007	2008
	----- % del total -----					
Soya	17.2	22.8	32.6	33.9	34.0	33.2
Maíz	17.6	20.6	17.3	17.4	19.3	19.6
Caña de Azúcar	20.4	17.5	12.6	14.9	14.0	13.0
Café	6.3	6.8	6.8	7.6	6.3	5.7
Algodón	3.6	1.5	3.7	5.0	5.0	3.9
Total	8 510	12 248	16 737	20 982	24 609	22 429

Tabla 3. Balance de consumo de nutrientes en la agricultura Brasileña.

Balance	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Exportación por los principales cultivos (t)	5 506 516	1 616 368	2 647 697
Deducción del N proveniente de la fijación biológica de N por la soya y de 30 % del exportado por el frijón (t)	3 579 623	-	-
Deducción de 60 kg de N ha ⁻¹ proveniente de la fijación biológica de la soya y aprovechado por los cultivos de sucesión (t)	423 898	-	-
Deducción del 20 % del K proveniente de la vinaza en la caña de azúcar (t)	-	-	92 422
Exportación total	1 502 995	1 616 368	2 555 276
Entradas por fertilizantes (t)	2 557 647	3 402 224	3 881 656
Índice de eficiencia atribuido al uso de fertilizantes	59 %	48 %	66 %

de uso de fertilizantes publicados por el Anuario Estadístico 2007 de la Asociación para la Difusión de Fertilizantes (ANDA) y los datos de producción de 18 cultivos publicados en los informes del Instituto Brasileiro de Geografía y Estadística (IBGE). El consumo de fertilizantes de estos cultivos corresponde a aproximadamente el 93 % del total de las entregas de fertilizantes y en el cálculo de los balances se tomó en cuenta esta condición.

Para el cálculo del balance de N se dedujo de las cantidades exportadas todo el N proveniente de la fijación biológica de la soya y el 33 % del frijón. Se tomó en cuenta que el 20 % del área de caña de azúcar recibe vinaza y su respectivo aporte de K. Se consideró también el aporte de 60 kg de N ha⁻¹ que fueron fijados por la soya y aprovechados por los cultivos de sucesión (maíz, trigo y sorgo).

La **Tabla 3** presenta el balance de consumo de los nutrientes N, P y K. Los valores relativos de fijación biológica de la soya demuestran la importancia de este cultivo para la agricultura Brasileña. La fijación de N en este proceso simbiótico equivale a 1.56 veces todo el N consumido como fertilizante. El resultado final del

estudio de balance indica que existe una eficiencia de 59 % para N, 48 % para P y 66 % para K. Se reconoce que el manejo más eficiente de los sistemas agrícolas podría posibilitar un mejor desempeño de estos índices de eficiencia.

En la **Figura 2** se presentan otros parámetros para evaluar la eficiencia de uso de los fertilizantes:

- Cantidad de producto agrícola producido con un kg de fertilizante NPK.
- Cantidades de nutriente (kg) necesaria para producir 1 000 kg de producto agrícola.

Para este estudio se consideró como producción agrícola la producción de aquellos cultivos que poseen elevada masa de cosecha como la caña de azúcar, camote, naranja, yuca, banano y tomate. La producción de estos cultivos se combina en un total único de cosecha denominado producción agro-vegetal. Para el año 2007, el índice de eficiencia fue de 55 kg de NPK para producir 1 000 kg de producto agro-vegetal.

Ciclo de nutrientes en el sistema suelo-planta: Tópicos especiales para la región tropical

Diversos factores pueden afectar el rendimiento de los cultivos, desde el uso de semillas mejoradas hasta las prácticas del manejo de la cosecha. La producción es una función de diversos factores que interactúan hasta el momento de la cosecha y aún más allá pudiendo afectar la calidad del producto cosechado. Generalmente, los suelos de las regiones tropicales poseen baja fertilidad natural y no son capaces de producir rendimientos económicos altos. Según Sánchez y Salinas (1981), los principales limitantes de los suelos de América tropical son la presencia de aluminio (Al) tóxico y la deficiencia generalizada de N, P, K, azufre (S), boro (B) y zinc (Zn) en más de 50 % del área. En los suelos tropicales de Brasil es común observar estas deficiencias. En la **Tabla 4**, desarrollada por Malavolta (1992), se presentan datos que describen la fertilidad de suelos del Cerrado y de la Amazonía. En estas condiciones, son indispensables

prácticas de manejo destinadas a corregir la acidez (encalado y aplicación de yeso), incrementar el contenido de nutrientes en el suelo (a niveles suficientes para las plantas) y conservar y aumentar los componentes de la fertilidad física y biológica del suelo.

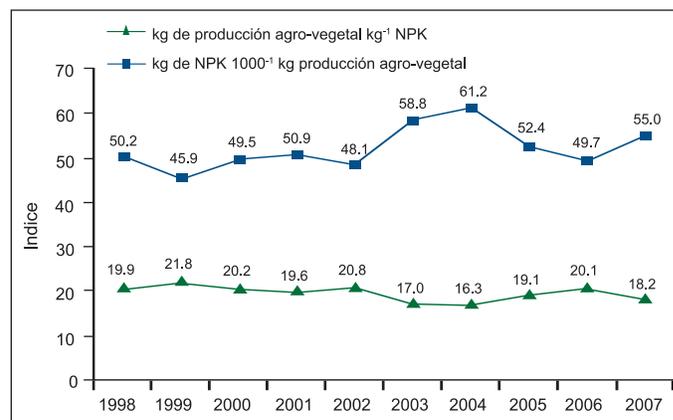


Figura 2. Relación entre el consumo de fertilizantes y la producción agro-vegetal.

Tabla 4. Comparación de la fertilidad de los suelos del Cerrado y de la Amazonía en relación al rango adecuado de fertilidad para los cultivos (Malavolta, 1992).

Característica	Rango adecuado	Cerrado	Amazonía ¹
N %	0.13-0.16	0.09	0.13
pH (H ₂ O)	6.0-6.5	5.0	4.5
P disponible, ppm ⁽²⁾	10-15	5.0	4.5
S-SO ₄ , ppm	10-15	7	?
Iones intercambiables			
K ⁺ cmol ₊ kg ⁻¹	0.20-0.30	0.08	0.10
Ca ²⁺ cmol ₊ kg ⁻¹	3-4	0.25	0.48
Mg ²⁺ cmol ₊ kg ⁻¹	1.0-1.5	0.09	0.23
Al ³⁺ cmol ₊ kg ⁻¹	< 0.6	0.6	0.5
Saturación de K ⁺ %	3.0-5.0	1.0	1.0
Saturación de Ca ²⁺ %	50-60	10	6
Saturación de Mg ²⁺ %	10-15	10	3
Saturación de bases %	50-70	30	10
Saturación de Al %	< 30	59	44
B mg kg ⁻¹ (2)	0.5-1.0	0.10	?
Cu mg kg ⁻¹ (3)	0.8-1.6	0.6	?
Fe mg kg ⁻¹ (3)	30-40	32	?
Mn mg kg ⁻¹ (3)	10-20	8	?
Zn mg kg ⁻¹ (3)	1-5	0.6	?

¹ Media ponderada, ² Agua caliente, ³ Mehlich 1

Tabla 5. Eficiencia agronómica de cultivares de arroz en condiciones de secano en un suelo del Cerrado (Fageria et al., 1997).

Cultivar/Línea	Producción de grano (kg ha ⁻¹)		Eficiencia de N kg grano kg ⁻¹ de N
	15 kg de N ha ⁻¹	50 kg de N ha ⁻¹	
IAC 114	2 319	2 800	14
CNA 790124	3 208	4 075	25
CNA 800160	2 929	3 142	6
IAC 136	2 198	2 278	2
IAC 165	1 232	1 578	10
IR 20	1 040	1 330	8
CN 770538	896	1 687	23
IR 144	1 405	1 483	2
IRAT 134	959	1 073	3

Eficiencia de uso de nutrientes: Conceptos y datos agronómicos para Brasil

La eficiencia de uso de nutrientes se define de varias maneras en la literatura. De acuerdo con Graham (1984), la eficiencia de uso de nutrientes se define como la producción relativa de un genotipo en un suelo deficiente comparado con su producción en el mismo suelo a un nivel óptimo de nutrientes. Cooke (1987) la define como el aumento de productividad por unidad de nutriente aplicado. Para Israel y Rufty Junior (1988), la eficiencia de uso de nutrientes es la relación entre biomasa total y la cantidad de nutriente absorbido. Maranville y colaboradores (1980), Siddiqi y Glass (1981), Craswell y Godwin (1984) y Fageria (1992) indican que la eficiencia nutricional se puede expresar y calcular de cinco maneras diferentes: eficiencia agronómica, eficiencia fisiológica, eficiencia de producción de granos, eficiencia de recuperación y eficiencia de utilización.

Eficiencia agronómica (EA): significa el rendimiento económico obtenido, granos en el caso de cultivos anuales, por unidad de nutriente aplicado. La EA se calcula de la siguiente forma:

$$EA \text{ (kg kg}^{-1}\text{)} = \frac{R - R_0}{D}$$

Donde:

R es el rendimiento con la aplicación del nutriente, R₀ es el rendimiento sin aplicación del nutriente y D es la dosis del nutriente. En ocasiones, la EA también se denomina eficiencia económica. La EA de N de algunos cultivares de arroz sembrados en Brasil Central en condiciones de secano se presenta en la **Tabla 5**.

Eficiencia fisiológica (EF): es el rendimiento biológico obtenido (grano más residuos) por unidad de nutriente acumulado. En ocasiones esta eficiencia también se conoce como eficiencia biológica y se calcula de la siguiente forma:

$$EF \text{ (kg kg}^{-1}\text{)} = \frac{MS - MS_0}{U - U_0}$$

Donde:

MS es la materia seca con fertilización, MS₀ es la materia seca sin fertilización, U es la acumulación del nutriente en la MS con fertilización y U₀ es la acumulación del nutriente en la MS sin fertilización. La acumulación se calcula multiplicando el peso de la materia seca de la parte aérea y del grano por el contenido del nutriente según el análisis.

Eficiencia de rendimiento de grano (ERG): es el rendimiento de grano obtenido por unidad de nutriente acumulado, se calcula de la siguiente forma:

$$ERG \text{ (kg kg}^{-1}\text{)} = \frac{RG - RG_0}{UG - UG_0}$$

Donde:

RG es el rendimiento de grano con fertilización, RG₀ es el rendimiento de grano sin fertilización, UG es la acumulación del nutriente en el grano con fertilización y UG₀ es la acumulación del nutriente sin fertilización. En la **Tabla 6** se presenta la eficiencia de rendimiento de grano de N, P y K de genotipos de arroz cultivados en condiciones de secano en el Cerrado.

Eficiencia de recuperación (ER): es la cantidad de nutriente acumulada por unidad de nutriente aplicado y se calcula usando la siguiente ecuación:

$$ER \text{ (kg kg}^{-1}\text{)} = \frac{U - U_0}{D}$$

Donde:

U es la acumulación de nutriente con fertilización, U_0 es la acumulación del nutriente sin fertilización y D es la dosis de nutrientes aplicado. La ER también se expresa en % y a veces se la conoce también como eficiencia de adquisición del nutriente.

Eficiencia de utilización (EU): se puede combinar la eficiencia fisiológica con la eficiencia de recuperación para calcular la eficiencia de utilización del nutriente y se expresa de la siguiente forma:

$$EU \text{ (kg kg}^{-1}\text{)} = EF \times ER$$

En ocasiones, la literatura denomina eficiencia de absorción (Eab) a la eficiencia nutricional (EN). Martínez y colaboradores (1993a,b), comparando tres variedades de soya notaron que la EN de la variedad UFV1 fue menor que la Doko en condiciones de bajo suplemento de P, dejando a la variedad Santa Rosa en posición intermedia. Los genotipos más eficientes en el uso de P tuvieron menor relación parte aérea:raíces, indicando mayor eficiencia de enraizamiento bajo condiciones de baja disponibilidad de P (**Tabla 7**).

Además de la eficiencia nutricional, se mencionan también la eficiencia de conversión de biomasa y la

eficiencia de enraizamiento. La eficiencia de conversión de biomasa es la producción de materia seca de la parte aérea por unidad de nutriente absorbida y la eficiencia de enraizamiento es la producción de materia seca de las raíces por unidad de nutriente absorbida.

En un suelo con baja fertilidad, la eficiencia de uso de nutrientes es más importante que la eficiencia de absorción. Sin embargo, Moll y colaboradores (1982) recomendaron que, en el desarrollo de genotipos que sobrelleven el estrés nutricional, es importante considerar la eficiencia de absorción y la eficiencia de utilización ya que ambas características deben incorporarse a los materiales para incrementar la eficiencia nutricional. Teóricamente, la eficiencia nutricional disminuye con la aplicación de niveles crecientes ya que la respuesta es menor a la sucesiva adición del nutriente. Teniendo en cuenta que el productor tiene mayor rentabilidad con alta productividad, la mejor eficiencia nutricional es aquella que se obtiene con nivel del nutriente que logra la mayor rentabilidad. Esta condición se debe tener en cuenta al interpretar los resultados de eficiencia nutricional.

Prácticas de manejo para aumentar la eficiencia de uso de los nutrientes en suelos tropicales

Para aumentar la eficiencia de uso de los nutrientes suplidos por el suelo o adicionados como fertilizantes/enmiendas es necesario adoptar prácticas de manejo considerando el tipo de suelo, cultivo, clima y sistema de rotación.

Se deben adoptar diversas estrategias de manejo una vez que los nutrientes entran en contacto con las raíces, cada uno de diferente manera. Cerca del 79 % del N entra en contacto con las raíces por flujo de masa, en el caso del P el

Tabla 6. Eficiencia de producción de grano de N, P y K en genotipos de arroz cultivados en condiciones de secano en un suelo del Cerrado (Fageria et al., 1994).

Genotipos	----- ERG (kg de grano kg ⁻¹ de nutriente acumulado) -----		
	N	P	K
CNA 7013-D	62	376	52
Araguaia	24	413	16
IAC 84-198	51	503	99
IAC 1175	47	458	33
CNA 6710	34	376	48
CNA 7024	37	858	38
CNA 7066	25	395	303
IAC 1176	41	288	46
Media	40	458	79

Tabla 7. Eficiencia nutricional (EN), eficiencia de adquisición (EAq), eficiencia de absorción (EAb) y eficiencia de enraizamiento (EER) de tres variedades de soya tratadas con diferentes dosis de fósforo (Martínez et al., 1993a,b).

Dosis de P (mg)	Variedades		
	Santa Rosa	Doko	UFV1
	EN (mg materia seca mg ⁻¹ P aplicado)		
30.4	275.22 aAB ¹	280.15 aA	253.40 aB
54.6	169.36 bA	164.16 bA	148.15 bA
78.9	112.00 cA	120.62 cA	98.99 cA
	EAq (mg P absorbido mg ⁻¹ P aplicado)		
30.4	0.697 aA	0.673 aA	0.603 aA
54.6	0.715 aA	0.726 aA	0.657 aA
78.9	0.691 aAB	0.744 aA	0.619 aB
	EAb (mg P absorbido mg ⁻¹ materia seca de raíz)		
30.4	0.011 cA	0.009 cA	0.012 cA
54.6	0.024 bA	0.024 bA	0.026 bA
78.9	0.034 aA	0.036 aA	0.034 aA
	EER (mg materia seca de raíz mg ⁻¹ P absorbido)		
30.4	65.57 aA ²	71.60 aA	53.62 aB
54.6	30.31 bA	30.74 bA	25.18 bB
78.9	19.90 cA	20.95 cA	18.21 cA

¹ Medias seguidas de la misma letra mayúscula, en la misma línea, y minúscula, en la misma columna, no son diferentes estadísticamente de acuerdo a la prueba de Duncan al 5 %

² Comparaciones realizadas con base a datos transformados

Coefficiente de variación de los datos: eficiencia nutricional x dosis de P = 7.29 %; eficiencia de adquisición x dosis de P = 9.60 %; eficiencia de absorción x dosis de P = 11.16 %; eficiencia de enraizamiento x dosis de P = 2.92 %

contacto se establece principalmente por difusión (92 %). En el caso del K, el contacto ocurre en mayor proporción por difusión (80 %), en parte por flujo de masa (18 %) y solamente 2 % por interceptación radicular (Barber, 1995).

La fertilización necesita satisfacer los requerimientos de nutrientes de la planta para la formación del rendimiento, complementando la contribución de nutrientes del suelo. Para mantener la fertilidad química, la fertilización debe compensar por lo menos las cantidades de macro y micronutrientes exportadas en el producto cosechado, más las irremediables pérdidas con la erosión y la escorrentía superficial. En la **Tabla 8** se describen diversas medidas destinadas a incrementar la eficiencia de uso de los nutrientes (Malavolta, 1996).

Debido a que las pérdidas por volatilización, lixiviación y fijación son irreversibles o casi irreversibles, nunca se aprovechan completamente los nutrientes aplicados con el fertilizante. Las eficiencias reportadas en la literatura indican valores de 60 - 70 % para N, 10 - 25 % para P y

60 - 70 % para K (Malavolta, 2008). En general, estos valores no toman en cuenta el efecto residual y eso hace que se subestime la eficiencia. Tres importantes prácticas de manejo para mejorar la eficiencia de P son la corrección de la acidez, la fertilización localizada y la adopción de sistemas de rotación de cultivos. Investigación conducida por Crusciol y colaboradores (2009) en la asociación maíz con *Brachiaria brizantha* encontró que existían mayores concentraciones de P y K disponibles en la capa superficial del suelo en relación al cultivo continuo de maíz. Este sistema recicla mejor estos nutrientes y en el caso de K posiblemente mejora la disponibilidad del K intercambiable.

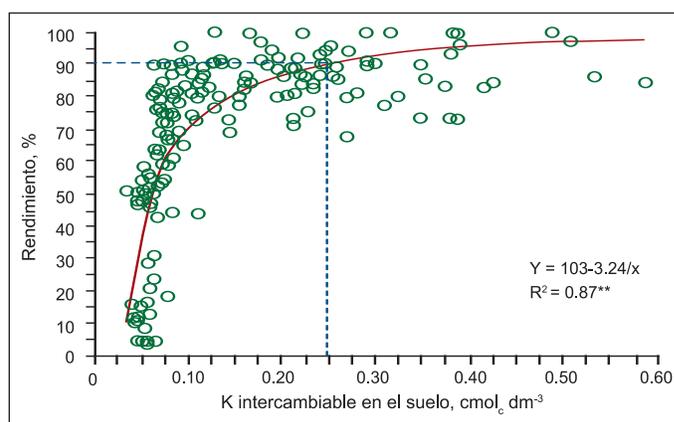
Al momento, uno de los nutrientes que causa preocupación es el K debido a su alto costo. Además del bajo contenido de K de los suelos de Brasil, otros factores como las altas precipitaciones y el bajo contenido de materia orgánica del suelo hacen que las pérdidas por lixiviación sean más altas y que se reduzca la eficiencia de los fertilizantes potásicos.

Tabla 8. Prácticas destinadas a aumentar la eficiencia de la fertilización y evitar los excesos que afectan la economía y contaminan el aire, el suelo y el agua (Malavolta, 1996).

Fertilizantes	Medida	Efecto o consecuencia
NPK	Análisis de suelo - superficie y subsuperficie	Determinar la dosis adecuada
	Análisis foliar	Ajuste y seguimiento del estado nutricional
N	Encalado y aplicación de yeso	Más raíces, mejor aprovechamiento
	Fraccionamiento, fertirrigación	Menores pérdidas por lixiviación y volatilización, mejor aprovechamiento
	Inhibidores de la ureasa y de nitrificación	Reducción de las pérdidas volatilización y lixiviación, mejor aprovechamiento
	Productos de liberación lenta	Mejor aprovechamiento (precio?)
P	Abonos verdes y reciclaje de residuos	Evitar desperdicio, economizar fertilizante mineral, mejorar las propiedades físicas
	Encalado	Menor fijación, dosis menores
	Aplicación de yeso	Raíces más profundas, mayor aprovechamiento
	Localización	Mayor contacto con las raíces y menor con los minerales del suelo
K	Micorrizas	Mayor aprovechamiento (superficie de contacto)
	Encalado	Más sitios de intercambio en suelos con carga dependiente del pH, menor lixiviación
	Aplicación de yeso	Raíces más profundas, mayor aprovechamiento
	Localización	Menor concentración de sales
NPK	Fraccionamiento	Siembra y coberturas
	Control de erosión	Evitar la pérdida de suelo y del fertilizante
	Especies y variedades eficientes	Absorción a bajas concentraciones, conversión del fertilizante en producto agrícola

Las respuestas a la aplicación de K son comunes en todas las regiones de Brasil, principalmente en los suelos del Cerrado, donde se cosecha la mayor cantidad de granos del país. La recomendación de fertilización con K en Brasil se realiza utilizando los análisis de suelos que han sido calibrados por medio de investigación que ha definido los niveles críticos (**Figura 3**) y los rangos en los cuales el contenido de K intercambiable permite rendimientos altos (**Tabla 9**). Cuando el contenido de K intercambiable del suelo se sitúa en un nivel considerado adecuado, se recomienda aplicar una dosis que solamente restituya la cantidad de K exportada en el grano, en el caso de soya, 21 kg de K por tonelada de grano cosechado.

No todo el K aplicado es utilizado por los cultivos en el mismo ciclo de crecimiento en el cual se hizo la aplicación. Parte de ese K continua retenido en el suelo y puede ser utilizado por las plantas en el siguiente ciclo. Para poder aprovechar el K residual es muy importante


Figura 3. Rendimiento relativo de soya en función del nivel de K intercambiable del suelo, datos de cinco años (Borkert et al., 2005).

determinar el contenido de K por medio del análisis de suelos y de plantas. En Brasil existen interesantes resultados de investigación que indican cuales son los

Tabla 9. Niveles de potasio intercambiable en el suelo y dosis correspondientes de K₂O para la soya¹ (Fundación MT, 2006).

Nivel de K	K en el suelo (mmol _c)	K ₂ O (kg ha ⁻¹)
Alto	> 1.53	72 ²
Medio	1.02 – 1.53	80 – 100
Bajo	0.51 – 1.02	100 – 120
Muy bajo	< 0.51	120 – 140

¹ Meta de rendimiento de 3 300 a 3 600 kg ha⁻¹.

² Cantidad de K exportada en el grano.

valores foliares de K necesarios para alta producción (**Figura 4**). El análisis foliar de año anterior, junto con el análisis de suelos, permite definir una dosis de fertilización para el ciclo siguiente. Es importante destacar que los experimentos de larga duración de fertilización con K en soya demostraron que el K residual no es suficiente para mantener altas producciones y que la productividad se reduce un año después de dejar de aplicar el elemento, lo que puede agotar el K del suelo (**Figura 5**).

En Brasil se ha observado respuesta a la aplicación superficial de K y muchos agricultores la efectúan junto con otras prácticas de manejo para reducir costos. Adicionalmente, el uso de plantas de cobertura, que protegen el suelo, promueve el mejor aprovechamiento de los fertilizantes potásicos al reducir las pérdidas por lixiviación. Las plantas de cobertura usan el K que luego lo devuelven al suelo después de su descomposición. Esto mantiene el elemento en el sistema e incrementa el contenido de materia orgánica, posibilitando una mayor retención de K en la fase de intercambio en el suelo.

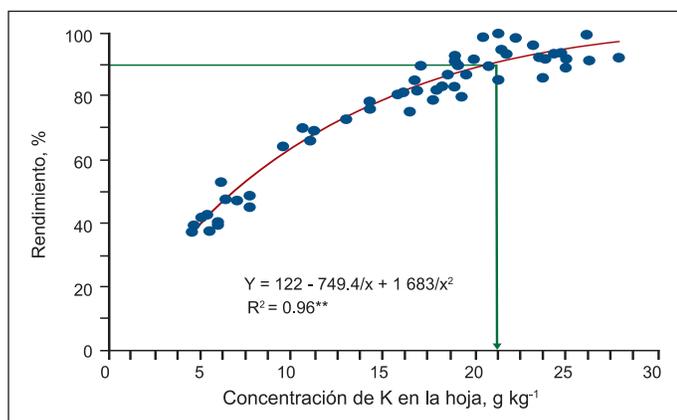


Figura 4. Rendimiento relativo de la soya en función de la concentración de K en las hojas, datos de cinco años (Borkert et al., 2005).

Para maximizar la eficiencia de uso de los fertilizantes potásicos es imprescindible determinar el contenido nutricional de suelos y plantas mediante los respectivos análisis de suelos y foliar. Basándose en esta información se deben utilizar recomendaciones de fertilización y manejo del cultivo que se basen en investigación local.

Se puede incrementar el uso eficiente de nutrientes con la adopción de mejores prácticas de manejo de fertilizantes (MPMF) (Heffer, 2007), las mismas que se basan en los fundamentos de manejo de la nutrición que son: fuente correcta, en la dosis, época y localización correctas. Estos cuatro fundamentos (4Fs) se describen a continuación:

- **Fuente correcta:** uso de fertilizantes (y otras fuentes de nutrientes) que concuerden con las necesidades del cultivo. Herramientas: análisis de suelo, fertilización equilibrada (macro y micronutrientes), uso de fertilizantes de mayor eficiencia.
- **Dosis correcta:** aplicación de fertilizantes de acuerdo a la exigencia del cultivo. Herramientas: análisis de suelos, análisis de la meta de producción, balance con la remoción del cultivo, análisis foliares, manejo específico de nutrientes, tecnología de aplicación de dosis variables, inspección del cultivo.

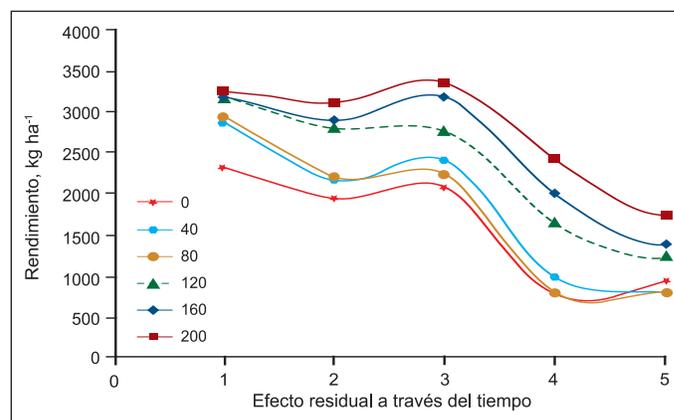


Figura 5. Resultados de experimentos de largo plazo evaluando el efecto del K residual en el suelo en el rendimiento de soya (Borkert et al., 2005).

- **Epoca correcta:** uso de los fertilizantes en la época de mayor necesidad del cultivo. Herramientas: momento de aplicación durante el ciclo de crecimiento del cultivo, uso de fertilizantes de liberación controlada, inhibidores de la ureasa y la nitrificación.
- **Localización correcta:** colocación del fertilizante en el sitio correcto para que esté disponible para las plantas. Herramientas: métodos de aplicación e incorporación del fertilizante.

Para que las MPMF sean efectivas es necesario adaptarlas a las condiciones específicas el lugar donde se van a utilizar. Esto permite que también se cumplan los objetivos sociales y ambientales establecidos para el sitio, pero quizá el desafío más crítico sea el desarrollar MPMF que sean atractivas para los agricultores para que puedan ser aceptadas ampliamente.

Tendencias generales para mejorar la eficiencia de uso de los nutrientes en los sistemas de producción de Brasil

Al momento, existe cierta tendencia hacia el uso de fertilizantes de liberación controlada y al uso de inhibidores de la ureasa y de la nitrificación. Estos materiales permiten mejor sincronización entre la disponibilidad del nutriente y la demanda de las plantas durante el ciclo de crecimiento.

El desarrollo de sistemas de manejo con rotaciones de cultivos en sistemas agro-silvo-pastoriles, por la capacidad de reciclar nutrientes y maximizar el uso de las tierras con vocación agrícola, serán cada vez más importantes para evitar la incorporación de nueva tierra a la agricultura.

Uso de cultivares mejorados de mejor respuesta y que utilicen mejor los nutrientes constituirá también una estrategia importante para el uso eficiente de nutrientes en la agricultura Brasileira.

Conclusiones

Los sistemas de producción deben ser viables desde los puntos de vista económico, social y ambiental. En este contexto, la aplicación de fertilizantes de forma correcta es vital para la agricultura moderna. Los programas de nutrición vegetal no solo incrementan la producción, sino que también son importantes para la sostenibilidad del sistema y la salud humana. Además de esto, el uso eficiente de fertilizantes reduce la degradación del suelo. Existen varias prácticas que conducen al incremento de la eficiencia de uso de los fertilizantes, pero todas son específicas para el suelo y el sistema de producción.

Referencias

- ANDA. Associação Nacional para Difusão de Adubos. 2009. Anuário estatístico do setor de fertilizantes 2009. São Paulo, 160 p.
- Baligar, V.C., O.L. Bennett. 1986. NPK-fertilizer efficiency - a situation analysis for the tropics. *Fertilizer Research*, Dordrecht, v. 10, p. 147-164.
- Baligar, V.C., N.K. Fageria. 1997. Nutrient use efficiency in acid soils: nutrient management and plant use efficiency. In: *International Symposium on Plant-Soil Interactions At Low pH*, 4., Belo Horizonte. *Proceedings...* Belo Horizonte : Brazilian Soil Science Society, p. 76-95.
- Barber, S.A. 1995. *Soil nutrient bioavailability*. New York: John Wiley & Sons, 414 p.
- Borkert, C.M., C. Castro, F.A. Oliveira, D. Klepker, A.O. Oliveira Junior. 2005. Potássio na cultura da soja. In: *Potássio na Agricultura Brasileira*. Piracicaba: POTAFOS, 2005. p. 671-722.
- Cooke, G.W. 1987. Maximizing fertilizer efficiency by overcoming constraints to crop growth. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v. 10, p. 1357-1369.
- Craswell, E.T., D.C. Godwin. 1984. The efficiency of nitrogen fertilizers applied to cereals in different climates. In: Tinker, P.B., A. Lauchi, (Eds.) *Advances in plant nutrition*. New York: Praeger, p. 1-55.
- Crusciol, C.A.C., R.P. Soratto, E. Borghi, G.P. Mateus. 2009. Integração lavoura-pecuária: benefícios das gramíneas nos sistemas de produção. *Informações Agrônomicas*, Piracicaba, n. 125, p. 2-15.
- Fageria, N.K. 1992. *Maximizing crop yields*. New York: Marcel Dekker, 274 p.
- Fageria, N.K. 1998. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 2, p. 6-16.
- Fageria, N.K., V.C. Baligar, C.A. Jones. 1997. Rice. In: Fageria, N.K., V.C. Baligar, C.A. Jones. *Growth and mineral nutrition of field crops*. 2.ed. New York : M. Dekker, 1997. p. 283-343.
- Fageria, N.K., E.P. Santana, E.M. Castro. 1994. de; Morais, O.P.; Moura Neto, F.P. de. Resposta diferencial de linhagens de arroz de sequeiro à fertilidade do solo. In: *Conferência Internacional de Arroz para América Latina e o Caribe*, 9, 1994, Goiânia. *Resumos...* Goiânia: EMBRAPA-CNPAF/CIAT.

- FUNDAÇÃO MT. 2006. Fundação Mato Grosso. Boletim de Pesquisa com Soja. Rondonópolis, 264 p.
- GCEA. 2008. Grupo de Coordenação de Estatísticas Agropecuárias. Systematic Analyses of Brazilian Agriculture Production, 2008. GCEA/IBGE.
- Goedert, W.J., E. Lobato, S. Lourenço. 1997. Nutrient use efficiency in brasilian acid soils: Nutrient management and plant efficiency. In: Moniz, A.C., A.M.C. Fulani, R.E. Schaffert, N.K. Fageria, C.A. Rosolem, H. Cantarella. Plant-soil interactions at low pH: sustainable agriculture and forestry production. Brasília: SBCS. p. 97-104.
- Graham, R.D. 1984. Breeding for nutritional characteristics in cereals. In: Tinker, P.B., A. Lauchi. (Eds.). Advances in plant nutrition. New York: Praeger, p. 57-102.
- Heffer, P. 2007. Iniciativas voluntárias da indústria para desenvolver e disseminar as melhores práticas de manejo de fertilizantes (FBMPs). In: Prochnow, L.I., S.R.S. Abdalla. A indústria de fertilizantes nitrogenados e o futuro. Informações Agronômicas, n. 120, p. 2-4.
- Horowitz, N. 2007. Desafios e perspectivas do uso de fertilizantes no Brasil. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 31., 2007, Gramado. Anais... Porto Alegre: UFRGS/SBCS. CD-ROM.
- IBGE. 2008. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Levantamento sistemático da produção agrícola. Pesquisa Mensal de Previsão e Acompanhamento das Safras Agrícolas no Ano Civil, 2008. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>
- IBGE. 2009. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Em 2009, safra deve atingir 137,3 milhões de toneladas. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>
- Israel, D.W., T.W. Ruffy Junior. 1988. Influence of phosphorus nutrition on phosphorus and nitrogen utilization efficiencies and associated physiological response in soybean. Crop Science, Madison, v. 28, p. 954-960.
- Machado, A.T. 1997. Perspectiva do melhoramento genético em milho (*Zea mays* L.) visando eficiência na utilização do nitrogênio. 1997. 219 p. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Curso de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Malavolta, E. 1992. Fertilizantes, corretivos e produtividade - mitos e fatos. In: Dechen, A.R., A.E. Boaretto, F.C. Verdade. (Coords.). XX Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas. Campinas: Fundação Cargill, p. 89-153.
- Malavolta, E. 1996. Adubação e seu impacto ambiental. In: XIII Congresso Latinoamericano de Ciência do Solo. Águas de Lindóia: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Malavolta, E. 2006. Manual de Nutrição Mineral de Plantas. São Paulo: Editora Agronômica Ceres. 631 p.
- Malavolta, E. 2008. O futuro da nutrição de plantas tendo em vista aspectos agronômicos, econômicos e ambientais. Informações Agronômicas, Piracicaba, n. 121, p. 1-10.
- Maranville, J.W., R.B. Clark, W.M. Ross. 1980. Nitrogen efficiency in grain sorghum. Journal of Plant Nutrition, New York, v. 2, p. 577-589.
- Martinez, H.E.P., R.F. Novais, L.A. Rodrigues, L.V.S. do Sacramento, 1993^a. Comportamento de variedades de soja cultivadas em diferentes doses de fósforo. I. Cinética de absorção de fósforo e ajustes morfológicos da planta. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 17, p. 231-238.
- Martinez, H.E.P., R.F. Novais, L.V.S. do Sacramento, L.A. Rodrigues. 1993^b. Comportamento de variedades de soja cultivadas sob diferente níveis de fósforo: II. Translocação do fósforo absorvido e eficiência nutricional. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 17, p. 239-244.
- Moll, R.H., E.J. Kamprath, W.A. Jackson. 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. Agronomy Journal, Madison, v. 74, p. 562-564.
- Sanchez, P., J.G. Salinas. 1981. Low-imput technology for managing Oxisols and Ultisols in tropical America. Advances in Agronomy, v. 34, p. 279-406.
- Siddiqi, M.Y., A.D.M. Glass. 1981. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. Journal of Plant Nutrition, New York, v. 4, p. 289-302.

EFICIENCIA DE USO DE NUTRIENTES EN SISTEMAS AGRICOLAS DEL CONO SUR DE LATINOAMERICA

Fernando O. García¹ y Fernando Salvagiotti²

Resumen

La región Cono Sur de América Latina incluye cinco países: Argentina, Bolivia, Chile, Paraguay y Uruguay. Aproximadamente 65 millones de hectáreas de la región se dedican a la agricultura, de las cuales un 57 % representan cultivos para grano, principalmente soya, trigo, maíz, girasol y arroz. La demanda global de alimentos, forrajes, fibras y biocombustibles en los últimos años ha impulsado un fuerte aumento en la producción de granos en la región. En el 2007, los cultivos de grano ocupaban 37 millones de ha de las cuales 55 %, 18 % y 14 % fueron sembradas con soya, trigo y maíz, respectivamente. Argentina encabeza la producción de granos en la región con un 82 % del área cosechada y 84 % de la producción. Este país ha demostrado incrementos constantes en la producción de cultivos durante los últimos 18 años. En este período se observó un incremento de 20-30 % en rendimiento de grano atribuible a mejoras no sólo en genética, sino también en manejo de los cultivos, en la adopción de siembra directa y en el uso de fertilizantes. Sin embargo, la expansión del área sembrada con soya explica mayormente el incremento en la producción de granos de los últimos años (60-70 % de incremento en el mismo período), la expansión incluye la apertura de ecosistemas frágiles, particularmente desde 1996 cuando se adoptaron variedades resistentes al glifosato. Dado que las posibilidades de expansión del área agrícola en el Cono Sur son escasas, la producción total de granos en esta región se basará en una intensificación sostenible de los sistemas de cultivo, es decir, en la búsqueda de rendimientos más altos para evitar la expansión de la agricultura a ecosistemas frágiles. Esta intensificación requiere una continua mejora en el uso de los recursos e insumos, en la cual los nutrientes desempeñan un papel esencial. El objetivo de este trabajo es discutir la eficiencia de uso de nutrientes en sistemas de producción en áreas templadas del Cono Sur, con énfasis en la región pampeana Argentina, la principal zona productora de la región.

Producción de cultivos en los países del Cono Sur

La región Cono Sur de América Latina incluye cinco países: Argentina, Bolivia, Chile, Paraguay y Uruguay. Aproximadamente 65 millones de hectáreas son dedicadas

a la agricultura, de las cuales un 57 % representan cultivos para grano, principalmente soya, trigo, maíz, girasol y arroz. Una gran parte del área agrícola (alrededor del 34 %), se encuentra bajo pasturas o pastizales, principalmente dedicadas a la producción de carne y leche vacuna. La fruticultura, horticultura y silvicultura ocupan el resto del área y tienen un rol significativo en la economía debido a sus altos valores de producción.

La demanda global de alimentos, forrajes, fibras y biocombustibles en los últimos años ha impulsado un fuerte aumento en la producción de granos en la región. En el 2007, los cultivos de grano ocuparon 37 millones de ha, de las cuales 55, 18 y 14 % fueron sembradas con soya, trigo y maíz, respectivamente (**Tabla 1**). Argentina encabeza la producción de granos en la región con un 82 % del área cosechada y 84 % de la producción. Este país ha demostrado incrementos constantes en la producción de cultivos durante los últimos 18 años (de 41 millones de toneladas en 1991 a 95 millones en 2007). En este período se observaron incrementos en rendimiento de 20-30 % en grano por unidad de área, atribuibles a mejoras no sólo en genética (nuevos híbridos y variedades, soya RR - resistente a glifosato-, maíz Bt, etc.), sino también en manejo de los cultivos (fechas de siembra, densidad, control de adversidades fitosanitarias), en la adopción de siembra directa y en el uso de fertilizantes. Sin embargo, la expansión del área sembrada con soya explica mayormente el incremento en la producción de granos de los últimos años (60-70 % de incremento en el mismo período), incluyendo la apertura de ecosistemas frágiles, particularmente desde 1996 cuando se adoptaron variedades resistentes al glifosato. Actualmente, el cultivo de soya ocupa el 51 % del total del área cultivada (**Figura 1**).

Dado que las posibilidades de expansión del área agrícola en el Cono Sur son escasas, la producción total de granos en esta región se basará en una intensificación sostenible de los sistemas de cultivo, es decir, en la búsqueda de rendimientos más altos para evitar la expansión de la agricultura a ecosistemas frágiles. Esta intensificación requiere una continua mejora en el uso de los recursos e insumos, en la cual los nutrientes desempeñan un papel esencial.

¹ International Plant Nutrition Institute, fgarcia@ipni.net

² EEA INTA Oliveros (Santa Fe, Argentina), fsalvagiotti@correo.inta.gov.ar

Tabla 1. Área, producción y rendimiento promedio de los principales cultivos en los cinco países de la región Cono Sur.

País Fuente y año		Soya	Trigo	Maíz	Sorgo	Girasol	Cebada	Total
Argentina SAGPyA 2007	Área ¹	16 500	5 850	4 000	825	2 650	436	30 261
	Producción ²	46 500	16 000	20 400	3 000	4 630	1 460	91 990
	Rendimiento ³	2 818	2 735	5 100	3 636	1 747	3 349	3 040
Bolivia INE 2007	Área	959	144	354	110	162	93	1 822
	Producción	1 596	165	770	372	173	73	3 149
	Rendimiento	1 665	1 147	2 175	3 385	1 070	778	1 729
Chile ODEPA 2007	Área	-	271	135	-	3.6	21	431
	Producción	-	1 238	1 365	-	7.6	96	2 707
	Rendimiento	-	4 570	10 140	-	2 110	4 640	6 286
Paraguay CAPECO 2007	Área	2 430	320	450	23	109	-	3 332
	Producción	5 581	800	2 048	27	183	-	8 640
	Rendimiento	2 297	2 500	4 552	1 172	1 679	-	2 593
Uruguay DIEA 2007	Área	578	243	87	68	55	138	1 169
	Producción	1 029	697	270	324	51	310	2 681
	Rendimiento	1 780	284	3 085	4 764	918	2 245	2 293
Total región	Área	20 467	6 828	5 026	1 026	2 980	688	37 015
	Producción	54 706	18 900	24 853	3 723	5 045	1 939	109 166
	Rendimiento	2 673	2 768	4 945	3 628	1 693	2 820	2 949

¹ Área = ha x 1000, ² Producción = t x 1000, ³ Rendimiento = kg ha⁻¹

Uso de fertilizantes en el Cono Sur

El consumo de fertilizantes en la región es de alrededor de 2.83 millones de toneladas de N + P₂O₅ + K₂O (**Tabla 2**). La relación N: P₂O₅: K₂O es 6:5:1. Argentina consume aproximadamente el 58 % del total, seguido por Chile (19 %), Uruguay (12 %), Paraguay (10 %) y Bolivia (1 %). En los últimos años se ha observado un fuerte aumento en el consumo de fertilizantes en Argentina y, en menor medida, en Paraguay y Uruguay. La mayor parte de este incremento se ha producido por la expansión del área agrícola y por incrementos en la dosis de fertilizantes en los cultivos. Chile es considerado un mercado maduro, mientras que Bolivia es aun un consumidor incipiente de fertilizantes. En Argentina, el uso de fertilizantes se acerca a las 1.75 millones de toneladas métricas de N+P₂O₅+K₂O+S (**Figura 2**).

Los cultivos de grano (trigo, maíz, soya y girasol) explican el 75 % del consumo total de fertilizantes (Melgar, 2005). Estimaciones recientes indican que el 95, 90, 50 y 60 % del área sembrada con trigo, maíz, soya y

girasol, respectivamente, reciben algún tipo de fertilización. La urea y la UAN son las principales fuentes de nitrogenadas, pero también se utiliza nitrato de amonio, nitrato de amonio calcáreo (CAN) y sulfato de amonio en menor medida. Entre los fertilizantes fosforados, el fosfato diamónico (FDA), fosfato monoamónico (FMA), superfosfato triple (SFT) y superfosfato simple (SFS) son los más comúnmente utilizados. En los últimos años, la utilización de mezclas granuladas se ha convertido en una práctica común en las Pampas. Los fertilizantes nitrofosforados y las mezclas se aplican comúnmente a la siembra.

La fertilización nitrogenada se realiza con frecuencia también en la siembra, pero a veces se lleva a cabo en pre-siembra o al voleo al macollaje en trigo, o en bandas en superficie durante los estadios V5-V6 en maíz. El azufre (S) se aplica como sulfato de calcio (yeso), superfosfato simple, solución UAN-ATS o sulfato de amonio, entre otras alternativas. Las aplicaciones de S se realizan en mezclas a la siembra, al voleo en pre-siembra o en estados tempranos de desarrollo de los cultivos.

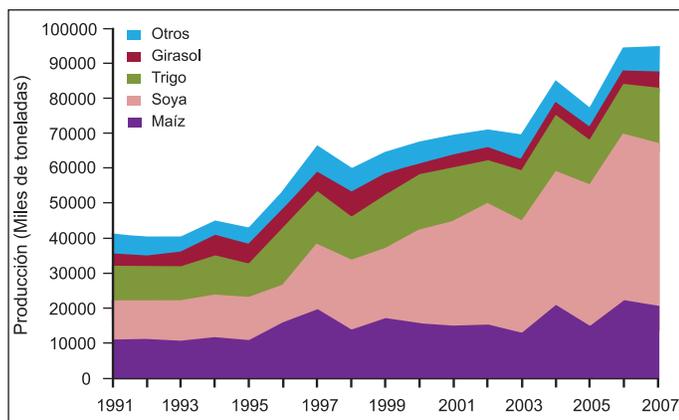


Figura 1. Producción de granos en Argentina, 1991-2007.
Fuente: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos (SAGPyA, 2007). www.sagpya.mecon.gov.ar/.

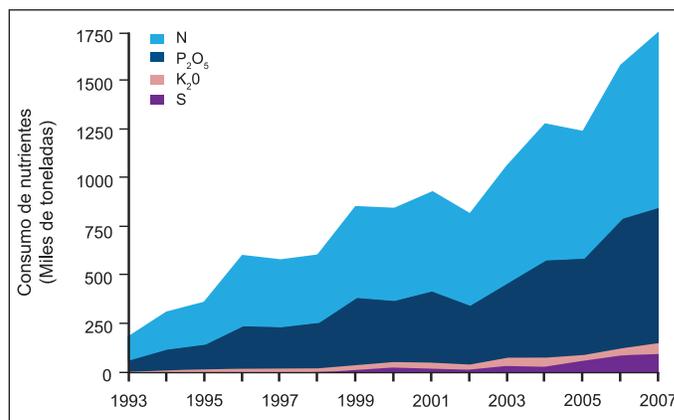


Figura 2. Consumo de nutrientes en Argentina, 1993-2007.
Fuente: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos (SAGPyA, 2007) y Fertilizar AC.

Balance de nutrientes en las regiones templadas del Cono Sur

Los balances de nutrientes para los cultivos varían entre países a causa de las diferencias en suelos, cultivos, prácticas de manejo, rendimientos y adopción de tecnología. Una característica común para la región, con excepciones en algunas áreas de Chile, Paraguay y Uruguay, son los altos niveles originales de potasio (K)

del suelo, lo que resulta en una baja o nula respuesta a la fertilización potásica.

La agricultura continua bajo labranza intensa y sin ninguna fertilización, situación que fue usual en la región pampeana hasta antes del final del siglo pasado, ha agotado en buena medida la materia orgánica y las reservas de nutrientes de los suelos (Andriulo y Cordone, 1998; Urricariet y Lavado, 1999). En Argentina, las

Tabla 2. Consumo estimado de nutrientes (N, P₂O₅ y K₂O) de los cinco países de la región Cono Sur. Fuente: Fertilizar Asociación Civil (Argentina); APIA (Bolivia); SQM (Chile); CAPASAGRO (Paraguay); y DF-DSA-MGAP (Uruguay).

País	Año	Consumo (miles de toneladas)			Total N+P ₂ O ₅ +K ₂ O
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
Argentina	2007	894	702	54	1 650
Bolivia	2007	13	12	4	29
Chile	2003	270	180	81	532
Paraguay	2007	42	167	82	291
Uruguay	2007	128.4	178.4	21	328
Total		1 347	1 241	242	2 829

Tabla 3. Utilización estimada de nutrientes para los principales cultivos de granos de Argentina en 2007.

Cultivo		N	P	S
Trigo	kg ha ⁻¹	46	15	10
	% área fertilizada	95	95	50
Maíz	kg ha ⁻¹	57	14	7
	% área fertilizada	90	90	40
Soya	kg ha ⁻¹	-	15	10
	% área fertilizada	-	50	50
Girasol	kg ha ⁻¹	15	9	5
	% área fertilizada	60	40	10

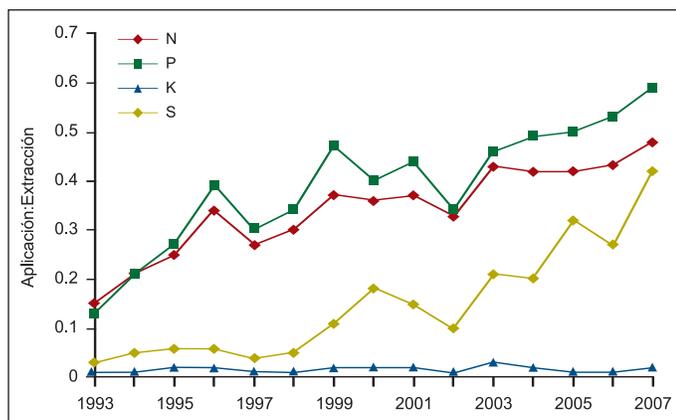


Figura 3. Relaciones Aplicación:Extracción para N, P, K y S en Argentina. 1993-2007.

relaciones aplicación:extracción para nitrógeno (N), fósforo (P), K y S en los cultivos han mejorado durante los últimos años (**Figura 3**), pero los balances de nutrientes siguen siendo negativos. Estimaciones de extracción en la cosecha y aplicación de nutrientes en los principales cultivos de grano indican que, para la campaña 2007-2008, se repuso vía fertilización el 48 %, 59 %, menos del 2 % y 42 % de N, P, K y S, respectivamente. Por otro lado, en Bolivia, una baja adopción de prácticas de fertilización ha resultado en bajas relaciones aplicación:extracción: 0.16, 0.30 y 0.05 para N, P y K, respectivamente. Por lo tanto, es de esperar una intensa degradación del suelo si la agricultura continúa en esta dirección.

La mayor parte de la producción agrícola de Paraguay se realiza en la mitad este del país sobre suelos lateríticos, caracterizados por bajos niveles originales y una alta retención de P. Estas condiciones explican la alta relación aplicación:extracción para P estimada en 1.38. Sin embargo, las relaciones para N y K son 0.19 y 0.49, respectivamente, mostrando una baja reposición del N y K al suelo.

En Uruguay, los balances de nutrientes muestran grandes cambios debido a la alta variabilidad de suelos y condiciones de manejo. Cano y colaboradores (2006)

Tabla 4. Balance de P en diferentes campos agrícolas, agrupados de acuerdo a la tecnología y manejo, en el oeste de Uruguay (Cano et al., 2006).

Grupo	Características	Cantidad	Cultivos/año	Cultivos fertilizados %	Balance de P de la rotación kg P ha ⁻¹
A	Alta frecuencia de fertilización	7	1.13	91.1	24.5
B	Alta frecuencia de fertilización, doble cultivo, rotaciones largas	6	1.97	86.7	11.0
C (a)	Baja remoción de P, rotaciones cortas	6	1.22	71.4	4.5
C (b)	Doble cultivo, sin fertilización	7	1.48	62.2	-9.6
D	Alto P Bray inicial, bajos niveles de fertilización	5	1.82	42.5	-40.2

estimaron balances de P de entre -40.2 y 24.5 kg P ha⁻¹ para diferentes grupos de agricultores en el área oeste del país, dependiendo del tipo de rotaciones y del uso de fertilizantes (**Tabla 4**).

Eficiencia de uso de nutrientes en los sistemas agrícolas del Cono Sur

Existen numerosos índices para determinar, en el corto y/o largo plazo, la eficiencia de uso de nutrientes (EUN) (Dobermann, 2007; Snyder y Bruulsema, 2007). Las estrategias de manejo orientadas a optimizar el uso de fertilizantes deben evaluar varios de estos índices en forma simultánea para comprender el impacto futuro de estas estrategias en la fertilización. Para esto, la EUN debe considerar no sólo el uso de nutrientes de un cultivo en particular, sino también la evolución del estado de los nutrientes del suelo en una rotación donde ese cultivo se encuentra incluido. En las siguientes secciones, se presentan diferentes estimaciones de los índices de EU para N y P en la región.

Análisis regional de la EUN para cultivos de grano en Argentina

La **Tabla 5** muestra estimaciones del balance parcial de nutrientes (BP_N) y la productividad parcial del factor (PPF) para N y P en los principales cultivos para grano de Argentina. Para maíz y trigo, el BP_N de N está cerca de 1 indicando que las aplicaciones del nutriente como fertilizantes son similares a la extracción por parte de dichos cultivos. En contraste, el BP_N para girasol muestra valores altos, indicando que la fertilización nitrogenada no compensa la extracción del nutriente. Otros índices, además del BP_N , deben ser incluidos para evaluar la eficiencia de uso del nitrógeno (EU_N) dado que la dosis óptima de N varía ampliamente en una región dependiendo de la capacidad de suministro de N del suelo y de la sincronización entre la absorción del cultivo y la aplicación del fertilizante nitrogenado. En maíz, la PPF_N

Tabla 5. Balance parcial de nutrientes (BPN) y productividad parcial del factor (PPF) para N y P en los cuatro principales cultivos de Argentina. Estimaciones para la campaña 2007-2008.

Cultivo	BPN -----		PPF -----	
	kg N extraído kg ⁻¹ N aplicado	kg P extraído kg ⁻¹ P aplicado	kg grano kg ⁻¹ N aplicado	kg grano kg ⁻¹ P aplicado
Maíz	1.14	0.78	87	296
Trigo	0.86	0.61	48	174
Soya	-	5.46	-	1011
Girasol	1.50	1.23	69	201

BPN: Entradas = fertilizante; Salidas = N o P extraído en grano

PPF: Producción nacional de granos/ Estimación nacional de aplicación de nutrientes para cada cultivo

Fuente: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos (SAGPyA) y Fertilizar AC, 2007-2008

en Argentina es de 87 kg de grano por kg de N aplicado, un 30 % mayor que los valores registrados en los Estados Unidos (Dobermann y Cassman, 2002). Por lo tanto, este alto valor de PPF_N y un BP_N por encima de 1 indicarían que el suministro de N para maíz es aún dependiente de la oferta de N del suelo.

El BP para P (BP_P) está muy por debajo de 1 en trigo y maíz, y los valores de PPF_P en maíz son aproximadamente un 20% inferiores a los registrados en los Estados Unidos (Dobermann y Cassman, 2002). Estos números sugieren que la reposición de P del suelo y/o la eficiencia de uso del P son bajas en dichos cultivos. Sin embargo, y en comparación con trigo y maíz, la soya, el cultivo dominante en los sistemas agrícolas de Argentina, muestra valores altos de BP_P y PPF_P , mayores a 5 y a 1000, respectivamente. Considerando la magnitud del área bajo producción de soya en Argentina, la reposición de P en la región sigue siendo negativa y la producción de cultivos se apoya en la oferta de P del suelo. Dado que el P es un nutriente con una alta residualidad en estos suelos, las mejores prácticas de manejo de fertilizantes (MPMF) para P deben tomar en cuenta la eficiencia de uso del nutriente no sólo en el cultivo fertilizado, sino también en el balance de P del suelo. Esto resultará en una mejor estimación de la eficiencia de uso del P en el sistema de cultivo.

Eficiencia de uso del P en experimentación a campo en Argentina y Bolivia

La **Tabla 6** muestra los índices de eficiencia de uso del P en soya para tres redes experimentales: 1.- Centro-Norte de la región pampeana argentina (Ferrari et al., 2005). 2.-Norte de Santa Fe (H. Fontanetto et al., com. pers.). 3.- Región Norte de Santa Cruz, Bolivia (Terrazas et al., com. pers.).

En todos los casos, la disponibilidad de P fue inferior a los niveles críticos (P Bray y P Olsen P menores a 20 y 15 mg kg⁻¹, respectivamente).

Se observaron índices similares de eficiencia de uso del P en las dos redes experimentales en Argentina. La menor dosis de P (P10), comúnmente aplicada por los productores, resulta en mayores eficiencias agronómicas (EA) y en mayores PPF_P y BP_P . Esta situación es muy común en sistemas de producción basados en soya en Argentina y da lugar a un saldo negativo de P del suelo, como se discutió anteriormente (**Tabla 5**). Los agricultores basan sus decisiones en el retorno inmediato de la inversión (alta EA), sin considerar la eficiencia del sistema en el mediano y largo plazo, la cual es afectada por el comportamiento de los nutrientes poco móviles en el suelo como el P. Estas decisiones reducen la fertilidad fosforada del suelo y podrían reducir la sostenibilidad del sistema en el largo plazo. Por otro lado, altas dosis de P pueden mejorar el BP_P , ya sea con balance neutro (P20) o positivo (P30), manteniendo adecuadas EAs. Por otra parte, dosis mayores a 40 kg P ha⁻¹ (Red N de Santa Fe, Argentina, **Tabla 6**) mostraron el menor BP_P (es decir, una mayor reposición de P al suelo), pero con una acentuada reducción en la EA.

Los datos de la red experimental en Bolivia mostraron similares índices de eficiencia de uso del P a los observados en las redes experimentales de la región pampeana argentina, lo que sugiere que estos índices podrían constituir una referencia preliminar para el uso de P en soya en la región Cono Sur.

Mejores prácticas de manejo para maximizar la EUN en regiones templadas del Cono Sur

Las MPMF están apoyadas en principios científicos y pueden definirse como la selección de la fuente correcta, en dosis, momento y ubicación correctos (Bruulsema et al., 2008). Fuente, dosis, momento, y ubicación, son interdependientes y se encuentran conectadas con todo el conjunto de mejores prácticas de manejo aplicadas en los sistemas de cultivo.

Tabla 6. Soya: Eficiencia agronómica (EA), balance parcial del factor P (BPP) y productividad parcial de factor P (PPF_P) en tres redes experimentales de Argentina y Bolivia. Adaptado de Ferrari et al. (2005); Fontanetto et al. (com. pers.); y Terrazas et al. (com. pers.).

Dosis kg P ha ⁻¹	Rendimiento en grano kg ha ⁻¹	EA kg grano kg ⁻¹ P aplicado	BPP kg P extraído kg ⁻¹ P aplicado	PPF _P kg grano kg ⁻¹ P aplicado
Región pampeana Centro-Norte 2003-2004 (Argentina) - 15 ensayos				
0	3 135	-	-	-
10	3 372	24	1.81	337
20	3 557	21	0.96	178
30	3 695	19	0.67	123
Norte de Santa Fe 2002-2006 (Argentina) - 28 ensayos				
0	3 230	-	-	-
10	3 465	24	1.89	347
20	3 680	23	0.99	184
30	3 735	17	0.67	125
40	3 715	12	0.50	93
Norte de Santa Cruz 2005 (Bolivia) - 4 ensayos				
0	2 754	-	-	-
20	3 263	25	0.88	163

Diagnóstico de deficiencias nutricionales y eficiencia de uso de nutrientes

La máxima eficiencia de uso de nutrientes se alcanza cuando se optimiza la oferta de nutrientes (suelo + fertilización) con el propósito de maximizar el rendimiento en grano. Por lo tanto, la evaluación del estado nutricional del suelo y los niveles de rendimiento son cruciales para comprender la EUN en el corto y largo plazo. En Argentina, se han evaluado varias herramientas de apoyo para decidir la dosis óptima de fertilización en maíz, trigo y soya.

El análisis de suelos es una práctica recomendable para el diagnóstico de la fertilización nitrogenada, en contraste con los análisis de plantas que ha mostrado poco éxito. Los balances de N son frecuentemente utilizados en la región pampeana como una primera aproximación para determinar las necesidades de N en trigo y maíz (Barberis et al., 1983; Berardo, 1994; Melchiori, 2002). Dicha aproximación cuantifica los principales componentes del ciclo de N en el suelo, sin embargo, a veces es difícil cuantificar la necesidad de fertilizante nitrogenado por la falta de información sobre la mineralización de N o sobre la eficiencia de uso del N en los diferentes compartimentos del suelo.

En los últimos años, numerosos investigadores de diferentes áreas de la región pampeana han calibrado el análisis y obtenido niveles críticos de disponibilidad de N en el suelo

(en forma inorgánica) en pre-siembra (N-NO₃ en 0-60 + N fertilizante) para trigo y maíz. Cuando el análisis detecta valores superiores a los del nivel crítico no hay repuesta a la fertilización. Los niveles críticos de disponibilidad de N muestran diferentes valores de acuerdo al cultivo, la meta de rendimiento y las condiciones edáficas y climáticas de la zona en cuestión (**Tabla 7**). La dosis de fertilizante nitrogenado se calcula como la diferencia entre el nivel crítico y el valor de N-NO₃⁻ determinado en pre-siembra. Las eficiencias agronómicas varían de 10 a 25 kg de trigo kg⁻¹ N, y de 20 a 35 kg de maíz kg⁻¹ N, cuando los niveles de disponibilidad de N-NO₃ están por debajo de los niveles críticos.

La calibración de metodologías para diagnosticar la fertilización nitrogenada durante el ciclo del cultivo puede incrementar la eficiencia de uso de N, debido a que con esta información se puede sincronizar las aplicaciones de fertilizantes con la demanda del cultivo. Estas determinaciones incluyen la estimación de los niveles críticos de disponibilidad de N del suelo al momento del macollaje en trigo (Barbieri et al., 2008), o la calibración de la prueba de nitratos a los estadios V5-V6 en maíz (García et al., 1997; Sainz Rozas et al., 2000; Salvagiotti, 2004a). En esta misma línea de trabajo, investigación en curso en Argentina está validando el desempeño de las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados en los cultivos de trigo y maíz utilizando sensores remotos en tiempo real (Melchiori, 2007).

Tabla 7. Niveles críticos de disponibilidad de N a la siembra (N-NO₃⁻, 0-60 cm) para trigo y maíz en distintas áreas de la Región Pampeana con diferentes metas de rendimiento.

Area	Nivel crítico (N-NO ₃ ⁻ , 0-60 cm + N fert)	Meta de rendimiento	Referencia
	----- kg ha ⁻¹ -----		
Trigo			
SE Buenos Aires	125	3 500	González Montaner et al., 1991
SE Buenos Aires	175	5 000 - 5 500	González Montaner et al., 2003
Centro y S de Santa Fe	92	3 500 - 4 000	Salvagiotti et al., 2004 ^a
S de Santa y S de Córdoba	100 - 150	3 200 - 4 400	García et al., 2006
Maíz			
N Buenos Aires	150	9 000	Ruiz et al., 2001
N Buenos Aires	150 - 170	10 000	Alvarez et al., 2003
Centro y S de Santa Fe	135	< 9 500	Salvagiotti et al., 2004b
	162	> 9 500	
S de Santa Fe y S de Córdoba	150 - 200	10 000 - 11 000	Red de Nutrición CREA S de Santa Fe, 2009

En adición al análisis de suelos, se pueden utilizar modelos de simulación para predecir metas de rendimiento ajustadas a diferentes estrategias de manejo. En Argentina se han validado las versiones calibradas de CERES-Trigo y CERES-Maize (Satorre et al., 2001; FAUBA-AACREA, 2005; Satorre et al., 2005).

La eficiencia con la que se utilizan los nutrientes poco móviles, como P, debe evaluarse no sólo en un determinado cultivo, sino también en la secuencia de rotación, debido a los efectos residuales de la fertilización en un ciclo en particular sobre cultivos sucesivos en la secuencia. Las recomendaciones de fertilización fosforada se basan en los niveles de P Bray 1 en los primeros 20 cm del perfil del suelo, medidos antes de la siembra. Los niveles críticos varían de acuerdo al cultivo (**Tabla 8**). La eficiencia agronómica es de 25-60, 30-70, y 20-40 kg de grano kg⁻¹ P para trigo, maíz y soya, respectivamente, cuando el P Bray está por debajo del nivel crítico. Estudios en diferentes suelos de Argentina indican que se deben usar dosis de 3 a 10 kg P ha⁻¹ para incrementar los niveles de P Bray 1 del suelo en 1 mg kg⁻¹ (Rubio et al., 2007; Ciampitti et al., 2009), dependiendo del nivel inicial de P Bray 1, textura del suelo, extracción en el grano o forraje y momento de fertilización. Esta información es importante para estimar los efectos de la fertilización fosforada sobre la eficiencia de uso del P en una rotación.

Deficiencias moderadas de S se empezaron a observar a partir de mediados de los años 90' en suelos con bajo contenido de materia orgánica, con larga historia agrícola,

alta frecuencia de soya en las rotaciones, bajo siembra directa y con adecuada fertilización con N y P (Martínez y Cordone, 2005). Existen varias herramientas para diagnosticar la fertilización azufrada. En trigo, trabajos recientes han mostrado que la concentración de S y la relación N:S en el grano y en toda la planta pueden ser utilizados para caracterizar lotes deficientes de S (Reussi Calvo y Echeverría, 2009). Algunos estudios han observado la ausencia de respuesta en rendimiento a la aplicación de S cuando las dosis fueron menores a 10 kg S ha⁻¹ en maíz y soja (Salvagiotti, 2004b; Ferraris et al., 2005). Con dichas dosis, la EA en maíz fue de 30-200 kg de maíz kg⁻¹ de S aplicado y la EA de soya de 47-93 kg kg⁻¹ S aplicado. Ensayos en trigo mostraron que la fertilización azufrada mejora la eficiencia de uso del N a través de incrementos en la eficiencia de recuperación del N (ER) y reduciendo así el riesgo de pérdida de N en una fertilización equilibrada (**Tabla 9**) (Salvagiotti et al., 2009).

Investigaciones en la región pampeana han mostrado altos efectos residuales de aplicaciones de P y S. Estos efectos pueden ser manejados para mejorar y/o mantener la fertilidad del suelo y para establecer las MPMs para lograr alta EUN, no sólo para el cultivo que se fertilice, sino también para la rotación. Como ejemplo, la aplicación de P y S para el doble cultivo trigo/soya, a la siembra del trigo, resulta en EU similares del P y el S, como si se hubiese aplicado ambos nutrientes a cada cultivo (Salvagiotti et al., 2004c). Investigaciones de largo plazo también han mostrado los efectos del manejo nutricional para diferentes rotaciones de cultivos de la región

Tabla 8. Niveles críticos de P Bray 1 (0-20 cm) para trigo, maíz, soya y girasol en la región pampeana Argentina.

Cultivo	Nivel crítico mg kg ⁻¹	Referencia
Trigo	15-20	Echeverría y García, 1998; García, 2007
Maíz	13-18	García et al., 1997; Ferrari et al., 2000; Berardo et al., 2001; Garcia et al., 2006
Soya	9-14	Echeverría y García, 1998; Gutiérrez Boem et al., 2002; Díaz Zorita et al., 2002; Fontanetto, 2004
Girasol	10-15	Díaz Zorita, 2004

pampeana. La Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe (Argentina) mostró efectos acumulativos de la fertilización sobre los rendimientos a lo largo de los años (**Figura 4**) (García et al., 2006). Las diferencias relativas entre los tratamientos NPS y Testigo, aumentaron de 47 % a 87 %, 58 % a 208 %, y 6 % a 89 % para maíz, trigo y soya de segunda, respectivamente. Además, indicadores de fertilidad del suelo como cobertura de rastrojos, contenido de material orgánica y P Bray 1 del suelo mejoraron bajo la fertilización balanceada NPS. El contenido de P Bray 1 aumento solamente con dosis de fertilización fosforada que superaron la extracción de P en el grano, pero este incremento relativo en respuesta a la aplicación de P depende de los niveles de P Bray 1 inicial en cada experimento (Ciampitti, 2009). El mantenimiento de niveles adecuados de P Bray 1 del suelo, ya sea mediante el aumento de P en los suelos con bajo contenido inicial o manteniendo el nivel óptimo en suelos no deficientes, contribuye a la sostenibilidad de los sistemas de cultivos, evitando limitaciones de rendimiento por falta de P, facilitando el manejo anual de P, optimizando la productividad, garantizando la rentabilidad y reduciendo la degradación del suelo

Manejo de la fertilización y eficiencia de uso de nutrientes

Una vez que la dosis de fertilización es determinada, los fertilizantes deben ser manejados con el objetivo de evitar pérdidas a fin de maximizar la EUN. El periodo entre la siembra y el final del macollaje es generalmente seco para la mayoría de la región triguera de Argentina. Por lo tanto,

aplicaciones tempranas generalmente resultan en mayores eficiencias de uso del N (Melchiori y Paparotti, 1996; Díaz Zorita, 2000). Sin embargo, en el SE de la región pampeana, las precipitaciones invernales pueden incrementar las pérdidas por lixiviación y en algunos años la eficiencia de uso del N puede mejorarse mediante aplicaciones al macollaje en lugar de fertilizar a la siembra o en pre-siembra (Barbieri et al., 2008). Se han observado eficiencias similares cuando el N se aplica como urea, CAN o UAN, en la superficie en pre-siembra, a la siembra o al macollaje en trigo. Algunos informes en la región pampeana mostraron que las pérdidas por volatilización de amoníaco se redujeron a menos del 10 % cuando se pasó de aplicar urea en la superficie y se aplicó UAN (García et al., 1999; Fontanetto et al., 2006).

En maíz, la fertilización con N se realiza antes de la siembra o alrededor de los estadios V5-V6. Las investigaciones han mostrado que esta última estrategia presenta, generalmente, mejor EU_N respecto de aplicaciones tempranas (Sainz Rozas et al., 1999). Se han observado diferencias en la eficiencia con el uso de diferentes fuentes nitrogenadas, especialmente en V5-V6, debido a las pérdidas por volatilización en aplicaciones superficiales con urea (García et al., 1999; Sainz Rozas et al., 1999; Salvagiotti y Vernizzi, 2006). Las pérdidas de N en forma de amoníaco son menores con aplicaciones de UAN en comparación con las pérdidas observadas con fertilización con urea en la superficie, mejorando la eficiencia de uso del N. Sin embargo, todas las fuentes nitrogenadas muestran eficiencias similares cuando son incorporadas al suelo (**Figura 5**) (Fontanetto, 2004).

Tabla 9. Eficiencia de uso del N (EU_N), eficiencia de recuperación del N (ER_N) y eficiencia fisiológica del N (EF_N) de cultivos de trigo fertilizados solo con N (N100) y N + S (N100 + S20). Cada valor es el promedio de 2 genotipos en 3 sitios experimentales (Salvagiotti et al., 2009).

Variable	Unidades	N100	N100 + S20
EU_N	kg grano kg ⁻¹ N aplicado	8.4	10.7
ER_N	kg N absorbido kg ⁻¹ N aplicado	0.35	0.47
EF_N	kg grano kg ⁻¹ N absorbido	22.7	22.5

La fertilización fosforada se realiza generalmente a la siembra, en bandas con la semilla o cerca de la misma, dependiendo de la sembradora. En años recientes, investigaciones han mostrado que aplicaciones al voleo en pre-siembra serían una alternativa eficiente en sistemas bajo siembra directa (**Figura 6**) (Bianchini, 2003; Echeverría et al., 2004). Los fertilizantes fosforados más comúnmente utilizados por los productores (FDA, FMA, SPT o SPS) presentan similares eficiencias de uso del P (Ciampitti et al., 2009).

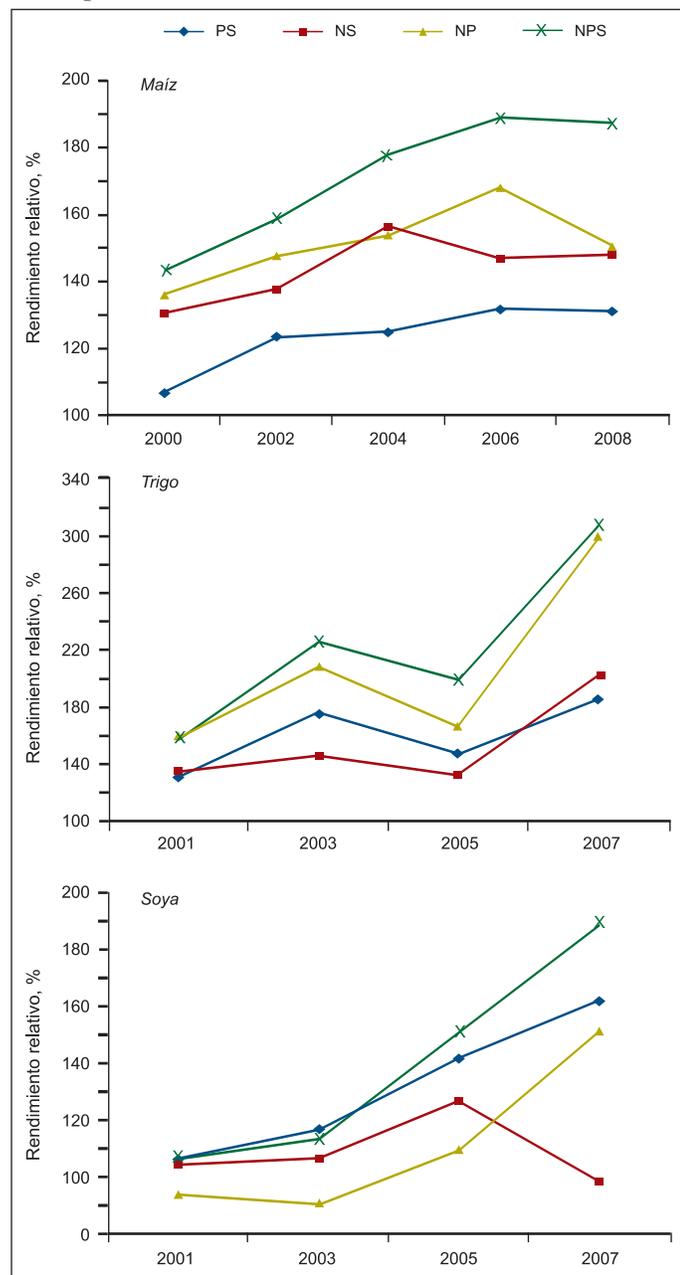


Figura 4. Evolución relativa del rendimiento en grano para maíz, trigo y soya, con diferentes manejos de fertilización NPS en rotación M-T/S. Promedio de cinco sitios de la Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe (Argentina), 2000-2008. Rendimientos relativos en relación al testigo (100 %).

Los fertilizantes portadores de S como el sulfato de amonio, superfosfato simple, sulfato de potasio-magnesio, tiosulfato de amonio y sulfato de magnesio, han mostrado similar eficiencia con respecto al S. Estas fuentes se aplican en pre-siembra o a la siembra, ya sea en una aplicación simple o en mezcla con fertilizantes fosforados o nitrogenados. El yeso es la fuente más común y su eficiencia de uso es altamente dependiente del tamaño de partícula. El yeso granulado o perlado (2-4 mm) ha mostrado similar eficiencia que otras fuentes, pero la eficiencia se reduce cuando se aplica en partículas grandes debido a la baja solubilidad del material. Esta última fuente de S es más indicada para fertilizaciones de largo plazo.

Perspectivas y necesidades de investigación para mejorar la EUN en el Cono Sur

El manejo de nutrientes es crucial para incrementar la producción de cultivos de grano en el Cono Sur debido a que las reservas de nutrientes se están agotando a medida que la agricultura se intensifica. La región presenta condiciones agro-ecológicas aptas para lograr rendimientos mayores a los actualmente alcanzados. Por lo tanto, el manejo de nutrientes sustentado en principios científicos (MPMFs) será la base para impulsar el logro de mayores rendimientos y la recuperación de la fertilidad química de los suelos degradados. El mejoramiento de la EUN es una meta obligada para hacer frente a otros múltiples objetivos en la producción de cultivos entre los que se incluye el mantener sistemas de producción sostenibles con mejor productividad (alimento, fibras, biocombustibles), con adecuada rentabilidad y al mismo tiempo eviten impactos negativos sobre el medio ambiente.

La evaluación de la EUN mediante diferentes índices no sólo permite un análisis de tendencias regionales y locales en el uso de los nutrientes, sino que además, da algunas ideas sobre los mecanismos y procesos que la gobiernan. Existen “brechas” entre los valores de los diferentes indicadores de EUN del Cono Sur y los observados en similares sistemas de cultivo en otros países. Estas diferencias no son más que una oportunidad de incrementar la EUN en la región. Herramientas para decidir la fuente, dosis, momento y ubicación correctos están siendo desarrolladas. Investigaciones futuras deberían orientarse en explorar aspectos que puedan incrementar la EUN: las brechas entre rendimientos y las limitaciones para la producción de grano en diferentes sistemas de cultivo. Las recomendaciones inherentes a la nutrición de los cultivos deben basarse en enfoques más mecanísticos, que integren los principios fisiológicos detrás de la respuesta de los cultivos a la fertilización con la capacidad de los suelos de suministrar nutrientes y con

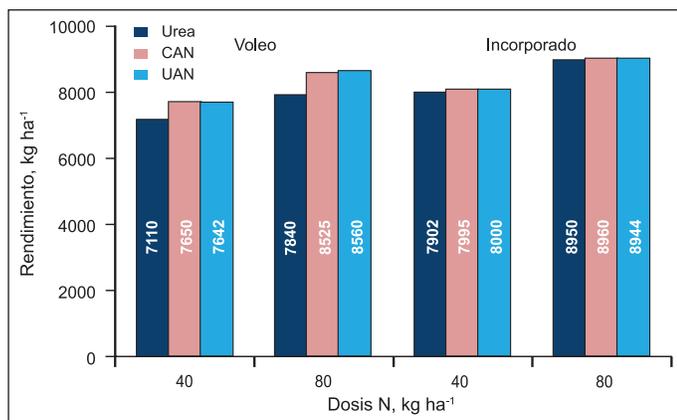


Figura 5. Efecto de la fuente nitrogenada y la forma de aplicación sobre el rendimiento en maíz en San Carlos (Santa Fe, Argentina). Aplicaciones realizadas en el estadio V5. El rendimiento sin N fue 6 720 kg ha⁻¹ (Fontanetto, 2004).

la eficiencia con la que los cultivos o la secuencia de cultivos utilizan los fertilizantes, teniendo en cuenta la movilidad y los efectos residuales de cada nutriente en particular. También es importante destacar la importancia de examinar el impacto del manejo de nutrientes sobre la eficiencia global del sistema, tanto en el corto, como en el mediano y largo plazo, estudiando no sólo al efecto directo de la aplicación de nutrientes, sino también a los efectos indirectos a través de incrementos en el contenido de materia orgánica del suelo.

Referencias

- Alvarez, R., H. Steinbach, C. Alvarez y S. Grigera. 2003. Recomendaciones para la fertilización nitrogenada de trigo y maíz en la pampa ondulada. *Informaciones Agronómicas* 18:14-19. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Andriulo, A. y G. Cordone. 1998. Impacto de labranzas y rotaciones sobre la material orgánica de suelos de la región pampeana húmeda. In *Siembra directa*. J. Panigatti, H. Marelli, D. Buschiazzi and R. Gil (Eds.). Ed. Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina. pp.65-96.
- Barberis, L., A. Nervi, H. del Campo, S. Urricariet, J. Sierra, P. Daniel, M. Vazquez y D. Zourarakis. 1983. Análisis de la respuesta del trigo a la fertilización nitrogenada en la Pampa Ondulada y su predicción. *Ciencia del suelo* 1:51-64.
- Barbieri, P. A., H.E. Echeverría y H.R. Sainz. 2008. Nitratos en el suelo a la siembra o al macollaje como diagnóstico de la nutrición nitrogenada en trigo en el sudeste bonaerense. *Actas CD XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. San Luis. AACCS.

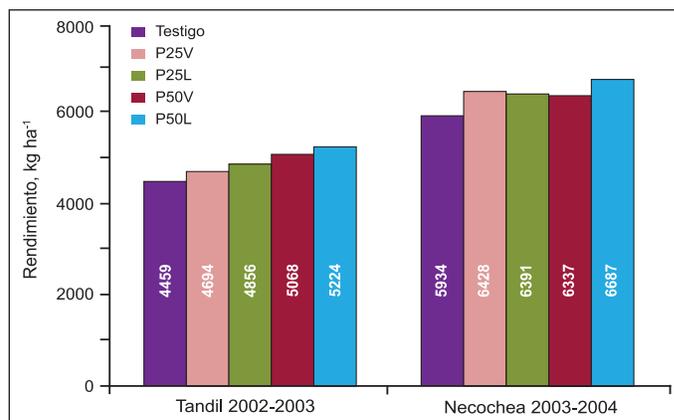


Figura 6. Rendimiento en grano de trigo en siembra directa, en dos sitios experimentales del S de la región pampeana Argentina. Las dosis están en kg P ha⁻¹. L = Localizado en en bandas a la siembra. V = al voleo 45-60 días desde la siembra (Echeverría et al., 2004).

- Berardo, A. 1994. Aspectos generales de fertilización y manejo de trigo en el área de influencia de la Estación Experimental INTA-Balcarce. *Boletín Técnico* No. 128. EEA INTA Balcarce. Argentina.
- Berardo, A., S. Ehrt, F. Grattone y F. García. 2001. Corn yield response to phosphorus fertilization in the southern Pampas. *Better Crops International* 15(1): 3-5.
- Bianchini, A. 2003. Localización de fósforo en siembra directa. *Actas XI Congreso Nacional de AAPRESID*. Rosario, Santa Fe. Pp. 309-314.
- Bruulsema, T., C. Witt, F. Garcia, S. Li, T.N. Rao, F. Chen y S. Ivanova. 2008. A Global Framework for Fertilizer BMPs. *Better Crops* 92 (2): 13-15. IPNI. Norcross, GA. USA.
- Cano, J., O. Ernst y F. Garcia. 2006. Balance aparente de fósforo en rotaciones agrícolas del litoral oeste del Uruguay. *Informaciones Agronómicas* 32:8-11. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- CAPECO. 2007. Available at <http://www.capeco.org.py/>
- Ciampitti, I. 2009. Dinámica del fósforo del suelo en rotaciones agrícolas en ensayos de nutrición a largo plazo. M.Sc. thesis. FA-UBA. Buenos Aires, Argentina. XX pag.
- Ciampitti, I., G. Rubio, L. Picone y F. Garcia. 2009. El fósforo en la agricultura: Mejores prácticas de manejo. In F. Garcia e I. Ciampitti (ed.). *Simposio Fertilidad 2009: Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos*. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. pag. 35-51. ISBN 978-987-24977-1-2.
- Diaz-Zorita, M. 2000. Urea fertilization timing effect on wheat grain yields in Drabble, Buenos Aires, Argentina. *Ciencia del Suelo* 18[2], 125-13.

- Díaz-Zorita M., F. García y R. Melgar. 2002. Fertilización en soja y trigo-soja: Respuesta de la fertilización en la región pampeana. Boletín Proyecto Fertilizar. EEA INTA Pergamino. 44 pág.
- Díaz-Zorita M. 2004. Importancia del fósforo en la nutrición mineral del girasol. En: www.fertilizar.org
- DIEA. 2007. Available at www.mgap.gub.uy/DIEA/.
- Dobermann A. y K.G. Cassman. 2002. Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production systems of the United States and Asia. *Plant Soil* 247: 153-175.
- Dobermann A. 2007. Nutrient Use Efficiency – Measurement and management. IFA International Workshop on fertilizer best management practices. 7-9 March, Brussels, Belgium.
- Echeverría H. y F. Garcia. 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. Boletín Técnico No.149. EEA INTA Balcarce.
- Echeverría H., H.R. Sainz, A. Bianchini y F. García. 2004. Utilización y residualidad de fósforo bajo siembra directa en la región pampeana. Actas XIX Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos. AACCS.
- FAUBA-AACREA. 2005. Software Triguero (CD). Facultad de Agronomía (UBA)-AACREA. Buenos Aires, Argentina. Available at www.aacrea.org.ar. Accessed January 22, 2007.
- Ferrari M., J. Ostojic, L. Ventimiglia, H. Carta y G. Ferraris. 2000. Fertilización de maíz: buscando una mayor eficiencia en el manejo del nitrógeno y el fósforo. Actas: “Fertilidad 2000” (IPNI Cono Sur) Rosario, pp. 23-37.
- Ferraris, G., B.F. Gutierrez, P. Prystupa, F. Salvagiotti, L. Couretot y D. Dignani. 2005. Fertilización azufrada en maíz. Actas VIII Congreso Argentino de Maíz. Rosario, Santa fe, Argentina
- Fontanetto, H. 2004. Nutrición de los cultivos y manejo de la fertilidad del suelo en la región central de Santa Fe. In Actas Fertilidad de Suelos para una Agricultura Sustentable. INPOFOS Cono Sur. Pag. 19-25.
- Fontanetto, H., O. Keller, C. Negro y L. Belotti. 2006. Perdidas por volatilización de amoníaco de diferentes fuentes nitrogenadas en trigo bajo siembra directa. Actas CD XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta-Jujuy. AACCS.
- García, F., K. Fabrizzi, M. Ruffo y P. Scarabicchi. 1997. Fertilización nitrogenada y fosfatada de maíz en el sudeste de Buenos Aires. Actas VI Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.
- García, F., K. Fabrizzi, L. Picone y F. Justel. 1999. Volatilización de amoníaco a partir de fertilizantes nitrogenados aplicados superficialmente bajo siembra directa y labranza convencional. 14°. Latinamerican Congress of Soil Science. Pucón, Chile. 8-12 November 1999.
- García, F., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Pozzi, L. Firpo, G. Deza y A. Berardo. 2006. La Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe: Resultados y conclusiones de los primeros seis años 2000-2005. AACREA. 32 pp. Buenos Aires, Argentina.
- García, F.O. 2007. Requerimientos nutricionales del cultivo: Respuestas a la fertilización. In E. Satorre (ed.). Producción de trigo. 1a. edición. AACREA. Buenos Aires, Argentina. pp. 37-42. ISBN 978-987-22576-8-2.
- González, M.J., G. Maddonni, N. Mailland y M. Porsborg. 1991. Optimización de la respuesta a la fertilización nitrogenada en el cultivo de trigo a partir de un modelo de decisión para la Subregión IV (Sudeste de la Provincia de Buenos Aires). *Ciencia del Suelo* 9:41-51.
- González, M.J., M. Di Nápoli, P. Calviño, N. Mailland, M. Posborg, F. Dodorico y J. Andenoche. 2003. Nitrógeno en trigo. *CREA Magazine*. 272:56-59.
- Gutiérrez, F.H., J.S. Scheiner, J. Moyano y R.S. Lavado. 2002. Cambio en la disponibilidad de fósforo del suelo por el agregado de fertilizante. Actas XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn. Versión CD.
- INE. 2007. Available at <http://www.ine.gov.bo/>.
- Martínez, F. y G. Cordone. 2005. Avances en el manejo de la fertilización de cultivos y fertilidad de suelos en el sur de Santa Fe. Simposio “Fertilidad 2005: Nutrición, Producción y Ambiente”. Rosario, 27-28 Abril. INPOFOS Cono Sur-Fertilizar A.C. pp. 3-11.
- Melchiori, R. 2002. Fertilización de trigo, soja y maíz en Entre Ríos. Proceedings “Fertility 2002”. PPI-PPIC Southern Cone. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. pp. 24-30.
- Melchiori, R. y O. Paporotti. 1996. Fertilización nitrogenada en trigo, evaluación de dosis y momento de aplicación. Jornada de Actualización Técnica en el cultivo de Trigo. Serie Extensión N°9. EEA INTA Paraná.
- Melchiori, R.. 2007. Estado actual del manejo sitio específico de nitrógeno en Argentina. Proceedings “Fertility 2007”. IPNI Cono Sur-Fertilizar A.C. pp. 74-78.

- Melgar, R. 2005. El mercado de fertilizantes en la Argentina y su relación con el sector agropecuario. In H. Echeverría y F. García (ed.). Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Ed. INTA. Buenos Aires, Argentina. pp. 489-502.
- ODEPA. 2007. Available at www.odepa.gob.cl
- Reussi, N.I. y H.E. Echeverría. 2009. Azufre: Marco conceptual para definir las mejores prácticas de manejo en los cultivos. In F. García e I. Ciampitti (ed.). Simposio Fertilidad 2009: Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-24977-1-2.
- Rubio, G., M.J. Cabello y F. Gutierrez. 2007. ¿Cuanto fósforo hay que aplicar para alcanzar el umbral crítico de fósforo disponible en el suelo? II. Cálculos para las zonas Sur y Norte de la Región Pampeana. *Informaciones Agronómicas* 35: 6-10. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Ruiz, R., E. Satorre, G. Maddoni, J. Carcova y M. Otegui. 2001. Umbrales de decisión para la fertilización nitrogenada en maíz. VII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.
- SAGPyA. 2007. Available at www.sagpya.mecon.gov.ar/.
- Sainz, H. y H. Echeverría. 1998. Relación entre las lecturas del medidor de clorofila (Minolta SPAD 502) en distintos estadios del ciclo del cultivo de maíz y el rendimiento en grano. *Rev. Fac. Agron. La Plata* 103 (1):37-44.
- Sainz, H., H. Echeverría, G. Studdert y F. Andrade. 1999. No-till maize nitrogen uptake and yield: Effect of urease inhibitor and application time. *Agron. J.* 91:950-955.
- Sainz, H., H. Echeverría, G. Studdert y G. Dominguez. 2000. Evaluation of the presidedress soil nitrogen test for no-tillage maize fertilized at planting. *Agron. J.* 92:1176-1183.
- Salvagiotti, F. 2004a. Estrategias en el manejo de nutrientes en el sur de Santa Fe. Actas Simposio Fertilidad 2004. Rosario, Argentina
- Salvagiotti, F. 2004b. Análisis de la respuesta a la fertilización con azufre en soja de primera. Para mejorar la producción - INTA Oliveros 27[SOJA], 80-83.
- Salvagiotti, F., G. Cordone, J.M. Castellarín, S. Bacigaluppo, J. Capurro, H.M. Pedrol, G. Gerster, F. Martínez, J. Méndez y N. Trentino. 2004a. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en trigo utilizando un umbral de disponibilidad de nitrógeno a la siembra. Para mejorar la producción - INTA Oliveros 25[TRIGO], 50-52.
- Salvagiotti, F., H.M. Pedrol, J.M. Castellarín, G. Cordone, J. Capurro, J.C. Felizia, A. Gargicevich, O. Gentile, F. Martínez, J. Méndez, G. Prieto y N. Trentino. 2004b. Umbrales de nitrógeno a la siembra para el diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz según el potencial de rendimiento. Para mejorar la producción - INTA Oliveros 26[MAIZ], 84-88.
- Salvagiotti, F., G. Gerster, S. Bacigaluppo, J. Castellarín, C. Galarza, N. González, V. Gudelj, O. Novello, H. Pedrol y P. Vallote. 2004c. Efectos residuales y directos de fósforo y azufre en el rendimiento de soja de segunda. *Ciencia del Suelo* 22(2):92-101.
- Salvagiotti, F. y A. Vernizzi. 2006. Pérdidas de nitrógeno por volatilización y su efecto en el rendimiento del cultivo de maíz. Para mejorar la producción - INTA Oliveros 32[MAIZ], 96-102.
- Salvagiotti, F., J.M. Castellarin, D.J. Miralles y H.M. Pedrol. 2009. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. *Field Crops Research* 113, 170-177.
- Satorre, E., R. Ruiz, D. Miralles, D. Calderini y G. Maddoni. 2001. Bases de decisión para la fertilización nitrogenada en las zonas Norte de Buenos Aires, Sur de Santa Fe y Centro de AACREA. Pp. 30-38. In *Wheat Tech. Bull. AACREA*. Buenos Aires, Argentina.
- Satorre, E., F. Menéndez y G. Tinghitella. 2005. El modelo Triguero: Recomendaciones de fertilización nitrogenada en trigo. Proceedings "Fertility 2005". Rosario, 27-28 April. INPOFOS Cono Sur-Fertilizar A.C. pp. 3-11.
- Snyder, C.S. y T.W. Bruulsema. 2007. Nutrient use efficiency and effectiveness in North America: Indices of Agronomic and Environmental Benefit. IPNI. Junio 2007. Ref. # 07076. Available at www.ipni.net
- Urricarriet, S. y R. Lavado. 1999. Indicadores de deterioro en suelos de la pampa ondulada. *Ciencia del suelo* 17 (1): 37-44.

HERRAMIENTAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE USO DE NUTRIENTES EN MAÍZ

José Espinosa¹ y Juan Pablo García²

Resumen

El maíz es un cultivo estratégico para todos los países de América tropical. La agresiva campaña de producción de etanol en Norteamérica en el año 2008 redujo significativamente la oferta de grano en el mercado internacional, sin embargo, los precios internacionales de maíz se redujeron nuevamente debido a la crisis económica que afectó el mundo durante el año 2009. Es consenso general que difícilmente los precios del maíz llegarán a los precios récord alcanzados en el año 2008, pero también se considera que los precios tampoco bajarán a los niveles vistos a inicios de esta década. El efecto de toda esta conmoción económica en el precio y disponibilidad del grano dejó inquietudes, la más preocupante, la posibilidad de sufrir desabastecimientos que afectarían la seguridad alimentaria. En estas condiciones, la única forma como los agricultores pueden transformar la producción de maíz en una actividad rentable y sostenible es incrementado la producción a niveles competitivos. El crecimiento vegetativo y el potencial de acumular rendimiento, y en consecuencia la necesidad de suplementar nutrientes, varían con las condiciones climáticas de los diferentes sitios donde se cultiva maíz, por esta razón, es necesario desarrollar recomendaciones de fertilización que permitan ajustes en la aplicación de nutrientes que se acomoden a las necesidades específicas de cada región agroclimática. Parte de este proceso es la determinación del rendimiento potencial y del rendimiento alcanzable de cada una de estas regiones. Las decisiones de manejo, como la elección del material genético a sembrarse, la fecha de siembra y la población pueden afectar el potencial de rendimiento en un sitio específico al afectar la utilización de la luz solar disponible y las reservas de humedad en el suelo durante el ciclo de producción. Este artículo demuestra el efecto del clima en el rendimiento potencia del cultivo del maíz en América tropical y discute el uso de la técnica de las parcelas de omisión para desarrollar recomendaciones de fertilización y mejorar la eficiencia de uso de los nutrientes.

Introducción

En América Latina se cultivan anualmente millones de hectáreas de maíz, pero solamente Brasil y Argentina producen suficiente grano para exportarlo en forma

constante. En los países ubicados en las zonas tropicales de América el grano se emplea para consumo de la población y para suministrar insumos a sectores avícolas, ganaderos y agroindustriales. Desde el punto de vista de seguridad alimentaria y de fuentes de trabajo, este cultivo es estratégico para todos los países de la región. Hasta hace poco tiempo el cultivo del maíz en las áreas tropicales de América no era visto con mucho interés por diversos sectores debido a la posibilidad de importar grano a bajo precio. Los costos de producción locales son relativamente altos debido, en la mayoría de los casos, a los bajos rendimientos consecuencia de la poca tecnología de producción. La agresiva campaña de producción de etanol en Norteamérica en el año 2008 redujo significativamente la oferta de grano en el mercado internacional, logrando que los precios del grano suban apreciablemente y que la posibilidad de importar grano se haga difícil. Esto representaba una excelente oportunidad para los productores de maíz locales que finalmente podían ver a la producción de maíz como un negocio rentable. Sin embargo, los precios internacionales de maíz se redujeron nuevamente debido a la crisis económica que afectó el mundo durante el año 2009. Es consenso general que difícilmente los precios del maíz llegarán a los precios récord alcanzados en el año 2008, pero también se considera que los precios tampoco bajarán a los niveles vistos a inicios de esta década. El efecto de toda esta conmoción económica en el precio y disponibilidad del grano dejó inquietudes entre los gobiernos de la región. Quizá la inquietud más preocupante era la posibilidad real de sufrir desabastecimientos que pondrían en peligro la seguridad alimentaria de varios países de la región. Este hecho ha estimulado el desarrollo de programas agronómicos y de mercadeo en organizaciones gubernamentales y privadas que buscan incrementar rendimientos y lograr rentabilidad con el cultivo de maíz. La única forma como los agricultores pueden transformar la producción de maíz en una actividad rentable y sostenible es incrementado la producción a niveles competitivos.

En los países de América tropical, el cultivo de maíz ha tenido problemas de productividad que se atribuyen a la pérdida de fertilidad del suelo, al uso de variedades de baja producción o al mal uso de los nuevos híbridos de gran potencial de rendimiento. Sin embargo, se ha

¹ International Plant Nutrition Institute, jespinosa@ipni.net

² Federación Nacional de Cultivadores de Cereales de Colombia, FENALCE, juanpagar@yahoo.com

demostrado con investigación en varios sitios en América tropical que los rendimientos se pueden incrementar apreciablemente con el uso de adecuada tecnología en el manejo general del cultivo, particularmente con el manejo de la población y la nutrición (Espinosa y García, 2008).

La experiencia de trabajo de campo en los últimos años ha demostrado que las recomendaciones de fertilización utilizadas en la producción de maíz no logran satisfacer adecuadamente las necesidades nutritivas de los cultivos para lograr rendimientos altos y rentables. Estas recomendaciones a menudo consisten en una dosis predeterminada de nutrientes para una vasta área de producción. Estas recomendaciones asumen que la necesidad de nutrientes es igual para grandes áreas de producción sin tomar en cuenta las diferencias de clima y suelo.

El crecimiento vegetativo y el potencial de acumular rendimiento, y en consecuencia la necesidad de suplementar nutrientes, varían con las condiciones climáticas de los diferentes sitios donde se cultiva maíz. Esto es particularmente cierto en las zonas productoras de maíz de América tropical donde las diversas condiciones de clima resultan en diferentes condiciones de crecimiento y en consecuencia en diferente potencial de rendimiento. En áreas tropicales, el efecto de la latitud y la altitud en el clima es un factor de fundamental importancia en la acumulación de rendimiento y estas condiciones cambian en cortas distancias. Si las recomendaciones de fertilización se basan solamente en el análisis de suelos, esta herramienta no puede detectar el efecto del clima en la magnitud del rendimiento y la necesidad total de nutrientes.

Manejo de nutrientes por sitio específico

El manejo de nutrientes en maíz en América tropical puede beneficiarse de nuevos métodos para desarrollar recomendaciones de fertilización que permitan ajustes en la aplicación de nutrientes que se acomoden a las necesidades específicas de cada región agroclimática y que hagan uso eficiente de los nutrientes aplicados. Una de estas metodologías es el Manejo de Nutrientes por Sitio Específico (MNSE). El MNSE es una metodología que busca entregar nutrientes a la planta como y cuando los necesita. Esta forma de manejo permite ajustar dinámicamente el uso de fertilizantes para llenar afectivamente el déficit que ocurre entre la necesidad total de nutrientes para obtener rendimientos altos y el aporte de los nutrientes provenientes de las fuentes nativas del suelo. Este déficit debe ser compensado con la aplicación de fertilizantes. Con esta forma de manejo se busca aplicar los nutrientes en dosis óptimas y al momento adecuado para obtener altos rendimientos y alta eficiencia de uso de los nutrientes por el cultivo. Para implementar un

programa de MNSE es necesario seguir los tres pasos que se discuten a continuación:

Determinación del rendimiento potencial y del rendimiento alcanzable

La determinación del rendimiento potencial en condiciones ideales se logra utilizando modelos que simulan el crecimiento asumiendo condiciones óptimas para el cultivo. El rendimiento potencial se define como el rendimiento de un cultivo que crece en un ambiente al cual está adaptado, sin limitaciones de nutrientes y agua y con un efectivo control de plagas, enfermedades y malezas (Evans, 1993). Por esta razón, el rendimiento potencial de una variedad o híbrido, en un ambiente específico de crecimiento, está determinado por la cantidad de radiación solar, temperatura y densidad de siembra (que controla la tasa a la cual las hojas se desarrollan bajo una particular condición de radiación solar y temperatura). Uno de los modelos de simulación más versátiles es el Hybrid Maize desarrollado por la Universidad de Nebraska (Haishun et al., 2006).

Las decisiones de manejo, como la elección del material genético a sembrarse, la fecha de siembra y la población pueden afectar el potencial de rendimiento en un sitio específico al afectar la utilización de la luz solar disponible y las reservas de humedad en el suelo durante el ciclo de producción. El potencial de rendimiento también fluctúa de año a año debido a la normal variación de la radiación solar y de la temperatura.

Como se ha mencionado anteriormente, para alcanzar el rendimiento potencial el cultivo debe tener un suplemento óptimo de agua y nutrientes y debe estar completamente protegido del ataque de plagas y enfermedades, invasión de malezas y de la incidencia de otros factores que puedan afectar el crecimiento. Es obvio que estas condiciones muy raras veces se encuentran en el campo, sin embargo, la determinación del rendimiento potencial de un sitio es un excelente marco de referencia que ayuda a identificar la magnitud de las brechas de rendimiento.

La diferencia entre el rendimiento potencial y el rendimiento alcanzable dimensiona la primera brecha de rendimiento. El rendimiento alcanzable para el sitio se logra utilizando toda la tecnología disponible para eliminar los factores limitantes, ya sea conduciendo investigación de campo o por compilación de datos del rendimiento obtenido en lotes de productores con muy buen manejo. Esta brecha será tan grande como lo determine el efecto del manejo en el rendimiento. El rendimiento alcanzable demostrado en un sitio establece la meta de rendimiento de áreas homogéneas (dominio de

recomendación) en el siguiente ciclo de producción. Con lo aprendido en el primer ciclo se afina el manejo para incrementar el rendimiento obtenible y reducir la primera brecha de rendimiento. Esto no solamente permite lograr más rendimiento, sino que permite una mejor eficiencia de utilización de los nutrientes y de otros insumos. El proceso continúa en los siguientes ciclos.

Es importante determinar el rendimiento alcanzable para cada dominio de recomendación porque la cantidad de nutrientes absorbida por el cultivo está directamente relacionada con el rendimiento. En otras palabras, el rendimiento alcanzable determina la cantidad total de nutrientes que el cultivo debe absorber para obtener ese rendimiento y establece claramente la real demanda de nutrientes. Esta información es imprescindible para desarrollar la recomendación de fertilización. El análisis de suelos no permite este tipo de análisis.

La segunda brecha de rendimiento es la que se produce entre el rendimiento actual de los agricultores en el campo y el rendimiento potencial y el rendimiento alcanzable. La meta final del MNSE es lograr que los productores reduzcan la brecha de rendimiento y logren acercarse con sus rendimientos al rendimiento alcanzable en un sitio. El esquema conceptual de las brechas de rendimiento se presenta en la **Figura 1** y en la **Tabla 1** se presenta el rendimiento potencial, rendimiento obtenible y el rendimiento actual de varios sitios localizados en importantes áreas de producción de maíz en América tropical.

Determinación del aporte de nutrientes provenientes del suelo

El MNSE hace uso efectivo de los nutrientes nativos del suelo. El suplemento de nutrientes nativos del suelo es aquel que proviene de otras fuentes menos los fertilizantes (materia orgánica, residuos del cultivo, agua de riego,

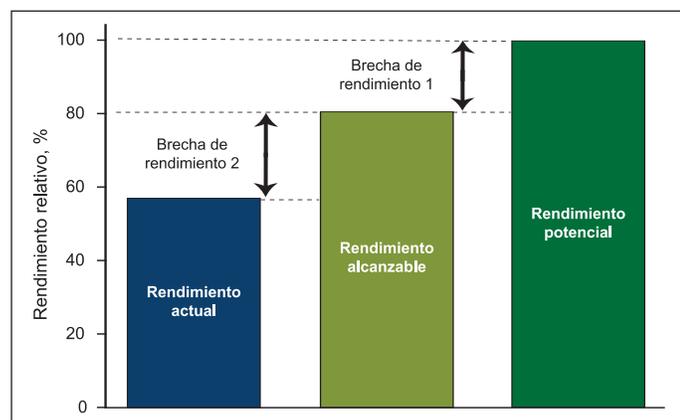


Figura 1. Representación esquemática del rendimiento potencial, rendimiento alcanzable y las brechas de rendimiento (adaptado de Haishun et al., 2006).

etc.). La evaluación del aporte de los nutrientes nativos del suelo se logra mediante la técnica de las parcelas de omisión. Esta técnica determina el suplemento de nutrientes nativos del suelo por su acumulación en el cultivo sin fertilizar con el nutriente de interés, pero fertilizado en cantidades suficientes con los otros nutrientes para asegurarse que la ausencia de éstos no limite el rendimiento.

Determinación de las dosis de nutrientes necesarias para completar el déficit entre las necesidades del cultivo y el suplemento de nutrientes nativos del suelo

Para establecer la meta de rendimiento es necesario aplicar fertilizantes para completar los requerimientos de nutrientes del cultivo que no son satisfechos por los nutrientes nativos del suelo. La dosis total de un nutriente aplicado con los fertilizantes depende del déficit entre la necesidad total del nutriente para obtener la meta de rendimiento y el suplemento del nutriente proveniente del suelo, determinado en la respectiva parcela de omisión. El esquema presentado en la **Figura 2** se resume los pasos necesarios para determinar las dosis de nutrientes utilizando la técnica de las parcelas de omisión (Witt et al., 2006).

Discusión del concepto de MNSE con ejemplos puntuales

Como se ha mencionado anteriormente, el MNSE es método basado en la planta que utiliza la técnica de las parcelas de omisión para determinar el rendimiento obtenible con las reservas del suelo (parcelas de omisión) y el rendimiento alcanzable cuando no existe limitación de nutrientes. El rendimiento alcanzable sin limitación de nutrientes pasa a ser la meta de rendimiento para el

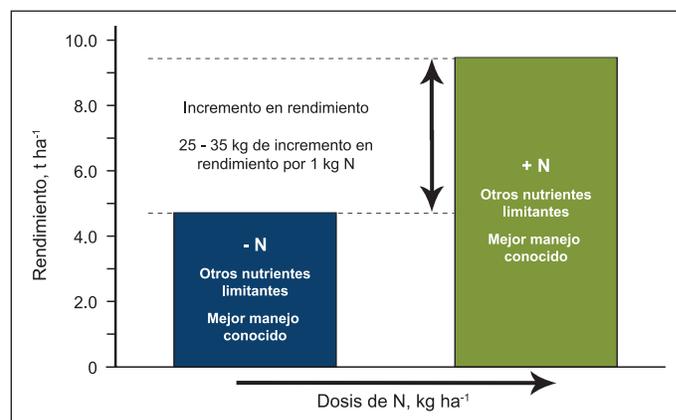


Figura 2. Representación esquemática de la determinación de las dosis de nutrientes utilizando la técnica de las parcelas de omisión (Witt et al., 2006).

Tabla 1. Rendimiento potencial determinado utilizando el Modelo de Simulación Hybrid Maize (Haishug et al., 2006) y rendimiento obtenible determinado por investigación de campo en algunos sitios en América Latina.

Sitio	Rend. potencial ⁴ t ha ⁻¹	Población simulada ⁵ Plantas ha ⁻¹	Rend. alcanzable ⁶ t ha ⁻¹	Población real ⁷ Plantas ha ⁻¹	Altít. msnm	Tipo de suelo	Text.	Híbrido	Fecha siembra ⁸	Madurez fisiol días
Granada ¹	8.10	75 000	4.41	60 000	322	Inceptisol	F	FNC3056	04-abr	87
Campoalegre ¹	8.50	75 000	6.84	75 000	526	Inceptisol	FA	FNC3056	04-abr	92
Obando ¹	8.90	75 000	7.74	75 000	940	Mollisol	F Ar	P 30F80	18-sep	91
Cañaveral ¹	9.30	75 000	5.56	55 000	222	Inceptisol	F Ar	FNC514	25-ago	85
Sopetran ¹	9.50	75 000	5.06	70 000	588	Vertisol	F Ar	FNC3056	26-mar	88
Espinal ¹	9.60	75 000	6.17	60 000	367	Inceptisol	FA	FNC3056	26-mar	90
Aguachica ¹	10.50	75 000	6.84	70 000	211	Inceptisol	ArA	FNC3056	16-mar	79
Bolívar ¹	10.52	75 000	9.61	70 000	1 052	Entisol	Ar	FNC3056	24-abr	94
Pichilingue ²	11.90	75 000	8.95	70 000	86	Andisol	F	AG-003	26-dic	105
Gualipe ²	12.10	75 000	10.86	70 000	131	Andisol	F	AG-003	12-ene	110
Come Gallo ²	11.80	75 000	10.92	70 000	92	Andisol	F	AG-003	09-ene	110
Cereté ¹	11.20	75 000	5.33	60 000	30	Inceptisol	Ar	FNC3056	15-abr	89
Buga ¹	11.50	75 000	6.20	75 000	946	Mollisol	Ar	FNC514	30-sep	92
Villanueva ¹	11.50	75 000	5.00	55 000	221	Inceptisol	F Ar	FNC514	23-ago	86
Toluca ³	13.74	75 000	10.00	75 000	2 372	Inceptisol	F Ar	H-47	26-may	140
Bugalagrande ¹	13.86	75 000	9.90	75 000	940	Mollisol	Ar	FNC3056	16-abr	95
Palestina ¹	14.10	75 000	13.51	60 000	1 690	Vertisol	F	FNC3056	08-sep	120
Montenegro ¹	15.50	75 000	8.11	65 000	1 224	Inceptisol	F	FNC514	20-sep	105
Celaya ³	24.00	120 000	17.00	120 000	1 800	Vertisol	F Ar	DK-2027	30-abr	150

¹ Colombia² Ecuador³ México⁴ Rendimiento potencial calculado usando el modelo de simulación Hybrid Maize y los datos climáticos de la NASA, promedio de 10 años⁵ Población utilizada en la simulación⁶ Rendimiento alcanzable en campo con la tecnología disponible⁷ Población en los experimentos de campo⁸ Todos los sitios son cultivo de temporal con excepción de Celaya que es totalmente irrigado

siguiente ciclo de crecimiento. Los requerimientos de nitrógeno (N) se calculan entonces de la diferencia de rendimiento entre la parcela de tratamiento completo y la parcela de omisión de N basándose en una eficiencia agronómica de N (EA_N) de 25 a 35 ($EA_N = \text{kg de grano por kg de N utilizado}$). Los requerimientos de fósforo (P) y potasio (K) se calculan basándose en la meta de rendimiento, respuesta en rendimiento a la aplicación del nutriente y remoción del nutriente. La recomendación obtenida en ese ciclo de producción es probada y ajustada en el siguiente ciclo de producción junto con otras prácticas de manejo (población, fraccionamiento de nutrientes, etc.) que pueden mejorar la eficiencia de uso de los fertilizantes. Sin embargo, esta dosis puede ser usada por los agricultores

localizados en el dominio de recomendación del sitio del experimento como una primera aproximación para evaluar una recomendación que se basa en una meta de rendimiento alcanzable para el sitio. Este es un método simple pero efectivo que permite obtener rendimientos altos y rentables en áreas donde no se utiliza con regularidad el análisis de suelos. Un ejemplo de la utilización del método en Colombia se presenta a continuación.

En la **Figura 3** se presenta el rendimiento potencial calculado con los datos climáticos de la NASA, el rendimiento con el tratamiento completo (rendimiento alcanzable), el rendimiento de las parcelas de omisión de N, P y K y el rendimiento del agricultor de tres sitios diferentes

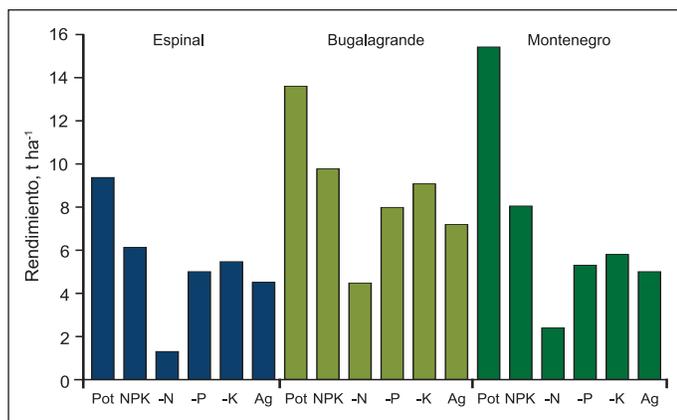


Figura 3. Rendimiento potencial, rendimiento alcanzable, rendimiento de las parcelas de omisión N, P, K y rendimiento del agricultor en tres sitios con diferente condición climática en Colombia.

en Colombia con diferente potencial de rendimiento. Esta situación es común en los trópicos donde los microclimas pueden influenciar marcadamente el potencial de rendimiento. El Espinal está localizado en el fondo del valle del río Magdalena y se caracteriza por tener altas temperaturas diurnas y nocturnas que limitan la acumulación de rendimiento. Los otros dos sitios, Bugalagrande y Montenegro, están ubicados a mayor altitud y tienen noches más frías, condiciones que permiten un mayor rendimiento potencial. Los rendimientos del tratamiento completo del año 2007 definen el rendimiento alcanzable que en turno define la meta de rendimiento para el siguiente ciclo de cultivo. Esta es una meta razonable porque refleja el efecto del clima en la acumulación de rendimiento. La meta de rendimiento también define la magnitud del requerimiento de nutrientes. En la **Tabla 2** se presenta el cálculo del requerimiento de nutrientes para lograr los rendimientos alcanzables en los tres sitios descritos.

Mejoramiento de la eficiencia del uso de nutrientes

Uno de los objetivos del MNSE es incrementar la eficiencia de uso de los nutrientes, en particular la del N. Esto únicamente se logra incrementando la EA, es decir, la cantidad de grano obtenida por unidad de nutriente utilizado.

En maíz, el número de hileras por mazorca y el número de granos por hilera (los que determinan la formación del número total de granos por mazorca) se definen durante las etapas vegetativas comprendidas entre la hoja 6 (V6) y la hoja 12 (V12) (Ritchie et al., 2002). El nivel nutricional, particularmente del N, que se presente durante este periodo es un importante regulador del número total de granos y en consecuencia de la acumulación total del rendimiento. Para hacer más eficiente la utilización del N es necesario

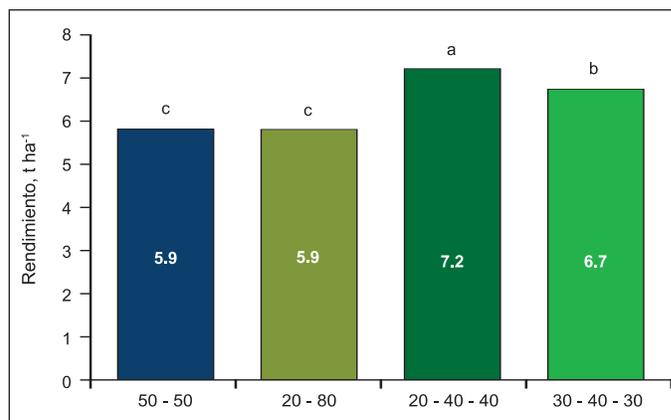


Figura 4. Análisis combinado del efecto de cuatro diferentes fraccionamientos de la dosis total de N, a través de localidades, en el rendimiento del híbrido FNC 3056 en Colombia.

fraccionar la dosis total de este nutriente durante el periodo de mayor absorción. La planta necesita de una pequeña cantidad de N para soportar el crecimiento inicial, pero demanda cantidades mayores durante el periodo comprendido entre V6 y V12. Aplicaciones posteriores de N no son económicas. Una vez definida la dosis de N a aplicarse, es importante conocer el número de fracciones a utilizarse y la época de aplicación de las mismas.

Investigación conducida en Colombia en 16 sitios de diferente potencial de rendimiento demostró el efecto claro del fraccionamiento de las aplicaciones de N en el rendimiento y en la eficiencia agronómica de N, P y K (García, 2009). Se probaron las siguientes formas de fraccionamiento de N:

- **Fraccionamiento 50-50.** Aplicación del 50 % de la dosis total al momento de la siembra en forma de banda incorporada y el restante 50 % al estado fisiológico V6 en forma de banda superficial.
- **Fraccionamiento 20-80.** Aplicaciones del 20 % de la dosis total al momento de la siembra en forma de banda incorporada y el restante 80 % al estado fisiológico V6 en forma de banda superficial.
- **Fraccionamiento 20-40-40.** Aplicaciones del 20 % de la dosis al momento de la siembra en forma de banda incorporada, 40 % de la dosis al estado fisiológico V6 y el restante 40 % al estado fisiológico V10 en forma de banda superficial.
- **Fraccionamiento 30-40-30.** Aplicaciones del 30 % de la dosis al momento de la siembra en forma de banda incorporada, 40 % de la dosis al estado fisiológico V6 y el restante 30 % al estado fisiológico V10 en forma de banda superficial.

Los resultados del análisis combinado de todas las

Tabla 2. Rendimiento de las parcelas de omisión, el tratamiento completo y los requerimientos de nutrientes calculados para tres sitios localizados en diferentes ecosistemas en Colombia.

Tratamientos	Rendimiento, t ha ⁻¹	Incremento en rendimiento, t ha ⁻¹ R - R ₀
Espinal		
-N	1.5	4.7
-P	5.0	1.2
-K	5.5	0.7
NPK	6.2	
Agricultor	4.4	
Meta de rendimiento = 6.2 t ha ⁻¹		
Recomendación para alcanzar la meta de rendimiento = 157 N – 61 P ₂ O ₅ – 56 K ₂ O		
Bugalagrande		
-N	4.5	5.4
-P	7.9	2.0
-K	9.3	0.6
NPK	9.9	
Agricultor	7.6	
Meta de rendimiento = 9.9 t ha ⁻¹		
Recomendación para alcanzar la meta de rendimiento = 180 N – 102 P ₂ O ₅ – 48 K ₂ O		
Montenegro		
-N	2.5	5.6
-P	5.2	2.9
-K	5.4	2.7
NPK	8.1	
Agricultor	4.0	
Meta de rendimiento = 8.1 t ha ⁻¹		
Recomendación para alcanzar la meta de rendimiento = 187 N – 148 P ₂ O ₅ – 217 K ₂ O		
EA _N = 30 (kg maíz kg ⁻¹ N)		
EA _P = 45 (kg maíz kg ⁻¹ P)		
EA _K = 15 (kg maíz kg ⁻¹ K)		
R = rendimiento del tratamiento completo		
R ₀ = rendimiento de la parcela de omisión.		

localidades indicaron que el efecto del fraccionamiento de N en el rendimiento fue estadísticamente significativo en todos los sitios, demostrando que los fraccionamientos triples superaron los fraccionamientos dobles. El análisis combinado del fraccionamiento de N, a través de sitios, se presenta en la **Figura 4**. La respuesta al fraccionamiento triple se explica porque las aplicaciones de N coinciden con las etapas fisiológicas de máxima demanda de nutrientes en el maíz. En la etapa fisiológica V6 (planta de maíz con seis hojas con lígula visible) el punto de crecimiento emerge de la superficie del suelo, se inicia la

diferenciación del primordio de la espiga y el tallo comienza su mayor elongación. En la etapa fisiológica V10 (planta de maíz con diez hojas con lígula visible) el primordio de la mazorca define el número de hileras por mazorca y el número de granos por hilera y la planta comienza un rápido y sostenido incremento en el consumo de nutrientes y en acumulación de materia seca (Ritchie, et al., 2002).

La dinámica del N en el suelo no permite que aplicaciones tempranas de fertilizantes nitrogenados garanticen la

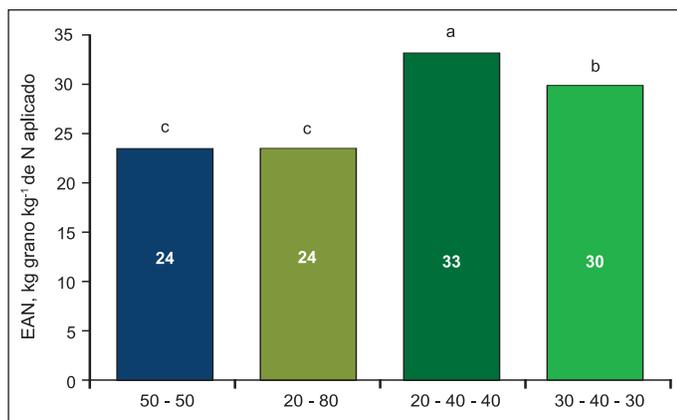


Figura 5. Análisis combinado entre localidades del efecto de cuatro diferentes fraccionamientos de la dosis total de N en la eficiencia agronómica de nitrógeno.

disponibilidad de este nutriente durante el periodo cuando se necesita mayor absorción, principalmente en las etapas vegetativas antes y después de V10. Este potencial déficit de N puede reducir significativamente la producción. Sin embargo, la aplicación de fertilizantes nitrogenados en la etapa V10 es una práctica que difícilmente se puede mecanizar y para su adopción se debe considerar el costo extra de la aplicación manual de N. Una tercera aplicación de N a V8-V9 por razones de mecanización podría todavía presentar ventajas en rendimiento.

El fraccionamiento triple del N no solamente beneficia la producción, sino que aumenta la eficiencia agronómica de los nutrientes (EA). La EA se define como la cantidad de grano producido por cada kg de nutriente aplicado y se calcula de la diferencia entre el rendimiento de la parcela con fertilización completa y el rendimiento de la parcela de omisión, todo dividido para la dosis del nutriente utilizado $[(R_{\text{completo}} - R_{\text{omitido}})/\text{dosis del nutriente}]$. En la **Figura 5** se comparan la EA del N de los sitios estudiados. Cuando se realiza el análisis estadístico combinado, a través de los sitios, es evidente el efecto del fraccionamiento triple 20-40-40 en la EA_N , alcanzando valores de 33 kg de grano kg^{-1} de N aplicado, que es un nivel aceptable de recuperación de N.

La eficiencia agronómica del P (EA_P) y la del K (EA_K) fueron también afectadas significativamente por el fraccionamiento de N. Los mayores valores se obtuvieron con el fraccionamiento 20-40-40 y los menores con los fraccionamientos dobles (**Figura 6**). Un paso fundamental de un programa de manejo eficiente de N es el reconocer, durante el ciclo de crecimiento, si el cultivo presenta exceso o déficit de este nutriente. El número de hileras por mazorca y el número de granos por hilera (que determinan la formación del número total de granos por mazorca) se definen durante las etapas vegetativas

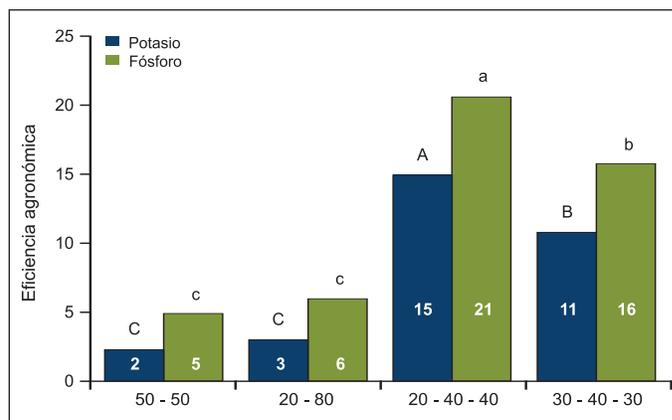


Figura 6. Efecto de cuatro diferentes fraccionamientos de la dosis total de N en la eficiencia agronómica de potasio y fósforo.

comprendidas entre V6 y V12 (Ritchie et al., 2002). El nivel nutricional, particularmente de N, que se presente durante este periodo es un importante regulador del número total de granos. El índice de verdor de las plantas depende en alta medida de la combinación entre el componente genético y el nivel de N absorbido. Se puede medir el índice de verdor en los estados fisiológicos del maíz comprendidos entre V6 y V12 usando el medidor de clorofila SPAD-502 (MCF) y la tabla de comparación de colores desarrollada por el IRRI (TCC) (Witt et al., 2005) para utilizarlas como herramientas de apoyo que permitan mejorar la eficiencia de N.

Los datos de un estudio conducido en Colombia con varios híbridos de maíz en 11 sitios con diferente potencial de rendimiento demostraron que existe buena correlación entre el índice de verdor determinado con medidor de clorofila SPAD-502 (MCF) y la tabla de comparación de colores desarrollada por el IRRI (TCC) (Witt et al., 2005), indicando que la calibración del índice de verdor de los diferentes híbridos utilizando la TCC es viable.

El índice de verdor fue afectado significativamente por el estado fisiológico, la dosis de N y el híbrido utilizado. En general, los mayores índices de verdor se presentaron entre los estados fisiológicos comprendidos entre V12 y V16. Los menores índices de verdor se registraron en V6 y R2. Los índices de verdor se incrementaron significativamente con el incremento de la dosis de N y la magnitud del incremento fue mayor cuando se pasa de 75 a 150 kg N ha^{-1} que cuando se pasa de 150 a 200. Los niveles de índice de verdor medidos con la TCC para los tratamientos sin aplicación de N estuvieron comprendidos entre 2.25 y 3.25, para los tratamientos con 75 kg N ha^{-1} entre 3.5 y 4.25, para 150 entre 3.75 y 4.25 y para 200 entre 4 y 4.75. De esta manera fue posible determinar los niveles críticos de índice de verdor para la TCC para cada

Tabla 3. Niveles críticos de índice de verdor con la TCC para algunos híbridos tropicales.

Híbrido	Estado fisiológico	Concordia	Sabana Torres	Bolívar	Buga	B/grande	M/negro	Obando	Cereté 1	Cereté 2	C/alegre	Espinal
----- Nivel crítico de unidades TCC -----												
FNC3056	V6	3.25	3.5	3.5	4	4	3.5	-	-	3.75	3.75	4
	V10-V12	4	4.25	4.25	4.25	4.5	4.5	-	-	4.5	4.35	4.5
FNC514	V6	3.25	-	-	4	4	3.75	-	-	-	3.5	3.75
	V10-V12	4.25	-	-	4.5	4.25	4.25	-	-	-	4.5	4.25
FNC114	V6	-	-	-	-	-	-	3.75	3.75	-	-	-
	V10-V12	-	-	-	-	-	-	4.5	4.75	-	-	-
DK777	V6	3.25	4.25	-	4.25	4.25	4	-	-	4	4.25	4
	V10-V12	4.25	4.75	-	4.75	4.5	-	-	-	4.75	4.75	4.5
DK234	V6	3.25	4	-	4.25	4	3.75	-	-	3.5	4	3.75
	V10-V12	4	4.5	-	4.5	4.25	4.25	-	-	4.5	4.5	4.25
DK1040	V6	3	4	3.75	4.25	-	-	3.75	3.75	-	3.75	3.75
	V10-V12	4	4.25	4.25	4.25	-	-	4.25	4.75	-	4.5	4.5
DK003	V6	3.50	4	4	4.25	-	-	3.5	3.75	-	4.25	4
	V10-V12	4.25	4.5	4.5	4.5	-	-	4.5	4.75	-	4.75	4.5
P30F80	V6	-	3.75	4	4.25	-	-	3.75	3.5	-	4	3.75
	V10-V12	-	4.25	4.5	4.5	-	-	4.25	4.5	-	4.5	4.25
P30F83	V6	3	-	-	4.25	4.25	3.75	-	-	3.5	-	3.75
	V10-V12	3.75	-	-	4.5	4.75	4.25	-	-	4.75	-	4.25
SV1127	V6	3.25	4	-	-	4.25	3.5	-	-	-	-	-
	V10-V12	4	4.5	-	-	4.5	4.25	-	-	-	-	-

híbrido estudiado en los estados fisiológicos V6 y V10, reconocidos como etapas fisiológicas de elevada demanda de nutrientes (**Tabla 3**).

Las lecturas del índice de verdor utilizando la TCC en las etapas más susceptibles a estrés por falta de N (V6 a V12) permiten afinar la dosis de N a ser aplicada y consecuentemente incrementa la EA_N . En general, índices de verdor superiores a 4 indican suficiencia de N y valores iguales o superiores a éste en el estado vegetativo V12 garantizan producciones altas si las condiciones climáticas son adecuadas en los estados reproductivos comprendidos entre R1 y R3, etapas donde se determina el peso final del grano.

Referencias

- Espinosa, J., and J.P. García. 2008. High fertilizer prices: what can be done. *Better Crops* 92(3):8-10.
- Evans, L.T. 1993. *Crop evolution, adaptation, and yield*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- García, J.P. 2009. Manejo eficiente de nutrientes en el cultivo de maíz en Colombia. FENALCE, Bogotá.
- Haishun, Y., A. Dobermann, K. Cassman, and D. Walters. 2006. *Hybrid-Maize (ver 2006). A Simulation Model for Corn Growth and Yield*. Nebraska Cooperative Extension CS 9. University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE.
- Ritchie, S., H. John, and B. Garren. 2002. *Como se desarrolla una planta de maíz*. Spanish edition. Iowa State University.
- Witt, C., J.M.C.A. Pasuquin, R. Mutters, and R.J. Buresh. 2005. New leaf color chart for effective nitrogen management in rice. *Better Crops With Plant Food* 89(1):36-39.
- Witt, C., J.M. Pasuquin, and A. Dobermann. 2006. Toward a site specific nutrient management approach for maize in Asia. *Better Crops with Plant Food*. 90 (2):28-31.



Oficina Central

3500 Parkway Lane
Suite 550
Norcross, GA 30092-2806
USA
Telef.: 001-770-825-8080
darmstrong@ipni.net
info@ipni.net

**Oficina para el Norte de América
Latina**

Gaspar de Villarroel E14 - 171 y
Av. Eloy Alfaro
Casilla Postal 17-17-980
Quito - Ecuador
Telef: 593-2-246-3175
jespinosa@ipni.net

Oficina para Brasil

Rua Alfredo Guedes, 1949
Edifício Rácz Center, Sala 701
Caixa Postal 400
13400-970 Piracicaba-SP
Brasil
Telef: 55-19-3433-3254
lprochnow@ipni.net

Oficina para el Cono Sur

Av. Santa Fe 910
B 1641 ABO Acassuso
Argentina
Telef: 54-011-4798-9939
fgarcia@ipni.net