INFORMACIONES AGRONOMICAS

ENERO 2010 • No. 76

CONTENIDO

Pág.

Eficiencia de uso de nutrientes en el contexto de agricultura sostenible 1

Herramientas para mejorar la eficiencia de uso de nutrientes en maíz 10

Una nueva forma de determinar la eficiencia de uso del fósforo en agricultura 17

Reporte de Investigación Reciente 20

Cursos y Simposios 21

Publicaciones Disponibles 22

Editores: Dr. José Espinosa
Dr. Raúl Jaramillo

Se permite copiar, citar o reimprimir los artículos de este boletín siempre y cuando no se altere el contenido y se citen la fuente y el autor

IPNI
INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE

Misión: Desarrollar y promover la información científica sobre el manejo responsable de la nutrición de las plantas para beneficio de la humanidad

EFICIENCIA DE USO DE NUTRIENTES EN EL CONTEXTO DE AGRICULTURA SOSTENIBLE

Paul E. Fixen[1]

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 influencian 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

[1] Vicepresidente del International Plant Nutrition Institute (IPNI). Correo electrónico: pfixen@ipni.net

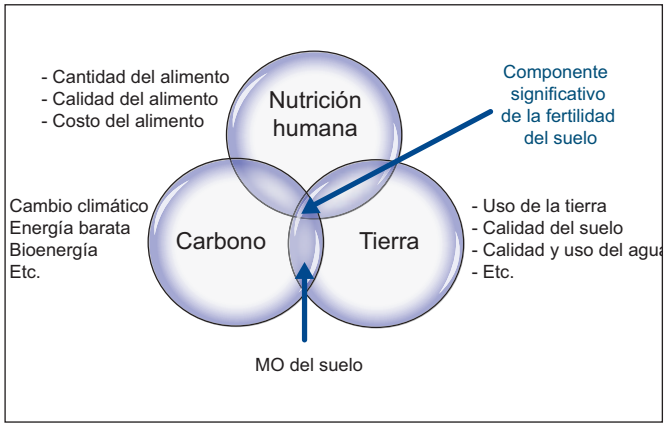


Figura 1. Principales preocupaciones y desafíos de las próximas décadas (Conceptos de carbono y tierra de Janzen, 2009).

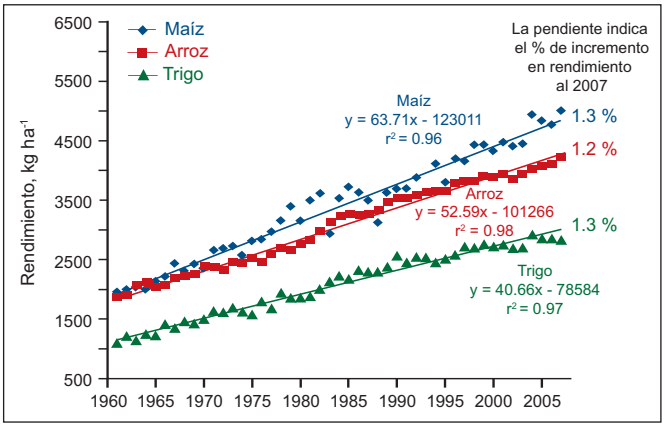


Figura 2. Tendencias globales del rendimiento de cereales, 1961 - 2007 (Datos de la FAO, 2009).

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).

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).

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 Pioner Hi-Bred International 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 remplazar la creciente remoción, existe el riesgo de que más nutrientes se pierdan del sistema. Por

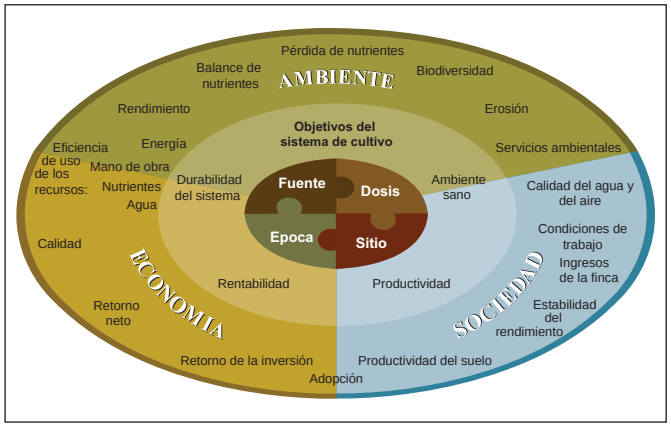


Figura 3. Marco global de los 4Fs e indicadores de sostenibilidad (Adaptado de Bruulsema et al., 2008).

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, 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 agro-ecosistema (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 los 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 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 de la 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 en la tasa de 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

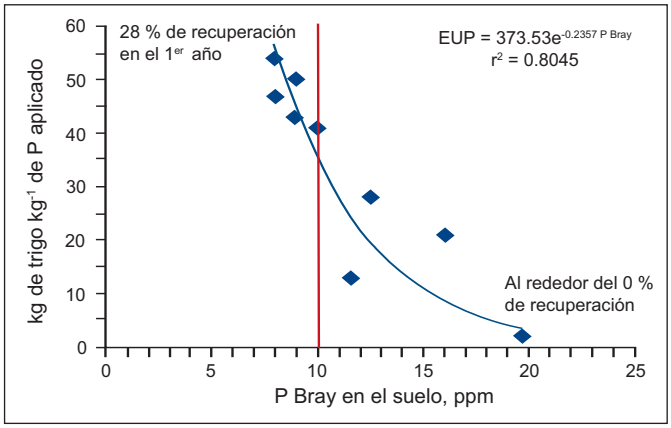


Figura 4. Influencia de la fertilidad del suelo en la eficiencia agronómica del P en experimentos de trigo en Argentina (García, 2004).

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 suelo (donde los rendimientos de los cultivos son máximos) la aplicación de P en dosis similares a aquellas removidas por el cultivo mantienen

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 intensivos 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

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.

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).

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 : uso[1]	***8.4***	***0.88***	***0.61***	***0.42***	***0.94***	***1.64***

[1] Datos calculados por Fixen

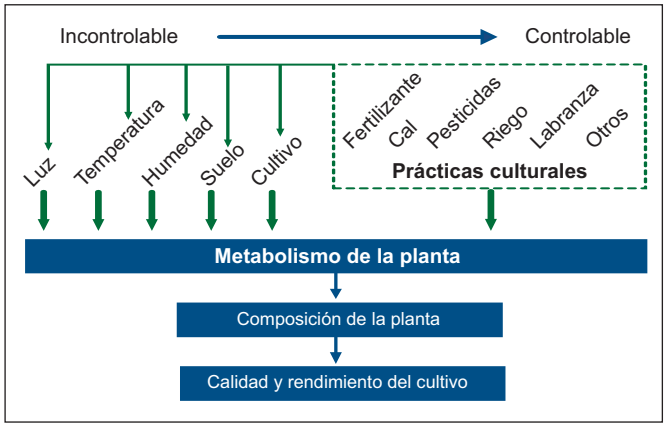


Figura 5. Complejidad de los sistemas de cultivo que implica incertidumbre (adaptado de Beaufils, 1973).

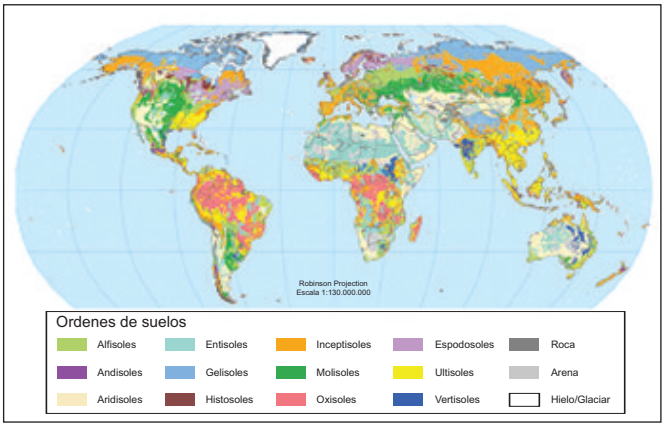


Figura 6. La clasificación de suelos ayuda a definir dominios globales de relevancia para afinar los principios generales (USDA, 2005).

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 influencian 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 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 4Fs 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 especial 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 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

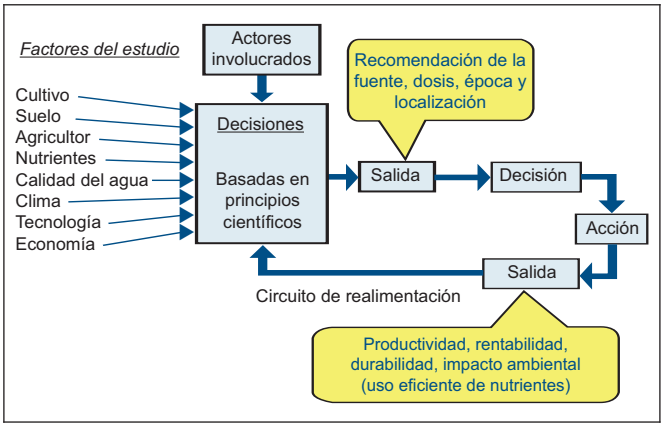


Figura 7. Naturaleza específica del sitio de la MPM hacen que el manejo adaptativo sea importante en su identificación (Fixen, 2005).

de los 4Fs. 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 influencian 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.

Bibliografía

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.★

HERRAMIENTAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE USO DE NUTRIENTES EN MAIZ

José Espinosa[1] y Juan Pablo García[2]

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 incrementando 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 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

[1] Director de la Oficina para el Norte de Latino América del International Plant Nutrition Institute (IPNI). Correo electrónico: jespinosa@ipni.net

[2] Federación Nacional de Cultivadores de Cereales de Colombia (FENALCE). Correo electrónico: juanpagar@yahoo.com

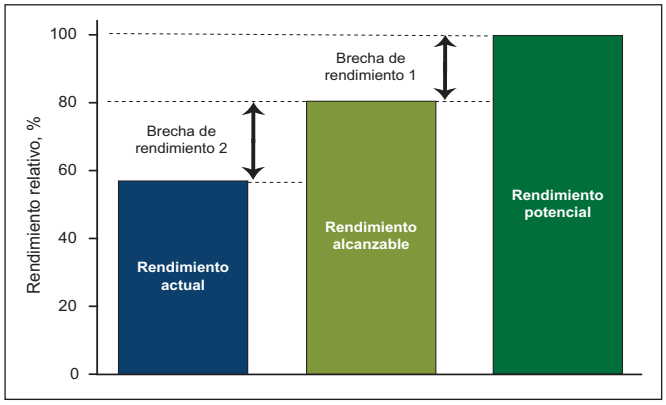


Figura 1. Representación esquemática del rendimiento potencial, rendimiento alcanzable y las brechas de rendimiento (Adaptado de Haishun et al., 2006).

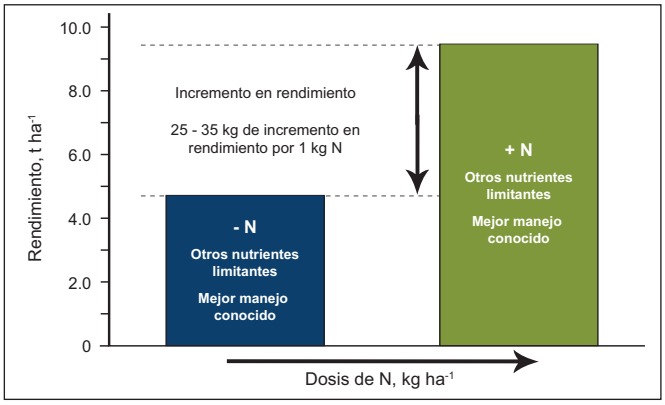


Figura 2. Representación esquemática de la determinación de las dosis de nutrientes utilizando la técnica de las parcelas de omisión (Witt et al., 2006).

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 estás 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 alcanza-

ble 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, 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).

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]	Población simulada[5]	Rend. alcanzable[6]	Población real[7]	Altitud	Tipo de suelo	Textura	Híbrido	Fecha siembra[8]	Madurez fisiológica
	t ha^{-1}	Plantas ha^{-1}	t ha^{-1}	Plantas ha^{-1}	msnm					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] Colombia
[2] Ecuador
[3] México
[4] Rendimiento potencial calculado usando el modelo de simulación Hybrid Maize y los datos climáticos de la NASA, promedio de 10 años
[5] Población utilizada en la simulación
[6] Rendimiento alcanzable en campo con la tecnología disponible
[7] Población en los experimentos de campo
[8] Todos los sitios son cultivo de temporal con excepción de Celaya que es totalmente irrigado

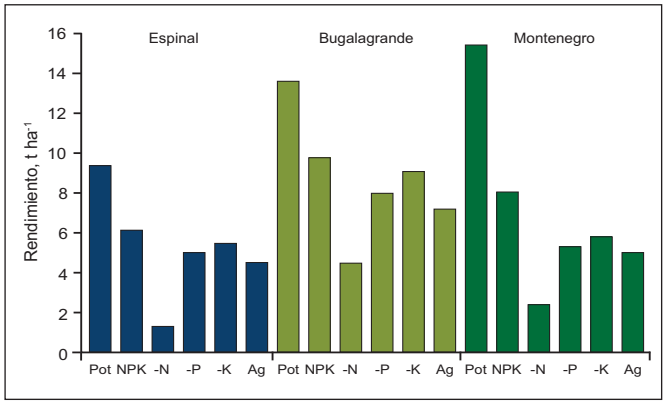


Figura 3. Rendimiento potencial, rendimiento alcanzable, rendimiento de las parcelas de omisión de N, P, K y rendimiento del agricultor en tres sitios con diferente clima en Colombia.

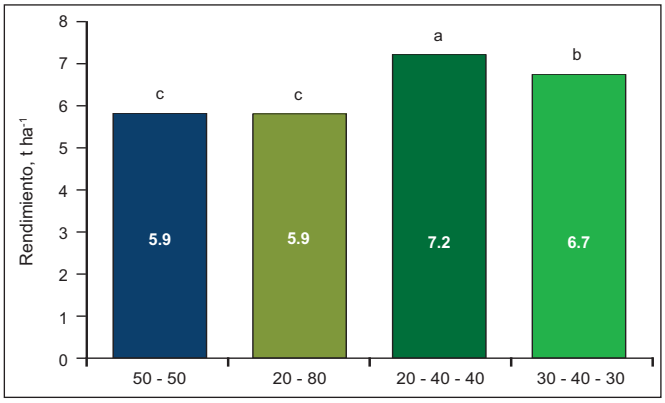


Figura 4. Análisis combinado del efecto de cuatro diferentes fraccionamientos de la dosis total de N, a través de localidades, en el rendimiento del híbrido FNC 3056 en Colombia.

Discusión del concepto de MNSE con ejemplos puntuales

Como se ha mencionado anteriormente, el MNSE es un 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 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 = 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 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 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,

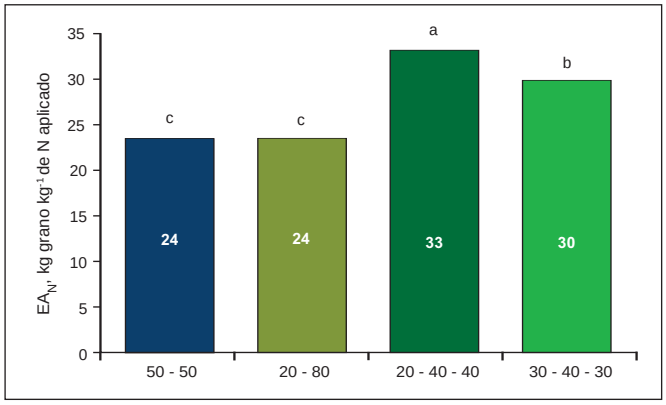


Figura 5. Análisis combinado entre localidades del efecto de cuatro diferentes fraccionamientos de la dosis total de N en la eficiencia agronómica de nitrógeno.

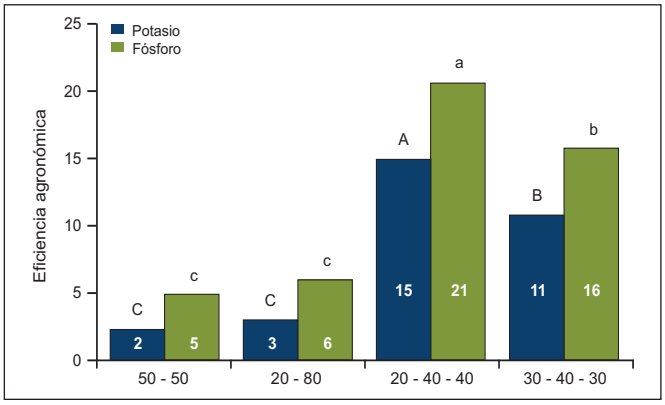


Figura 6. Efecto de cuatro diferentes fraccionamientos de la dosis total de N en la eficiencia agronómica de potasio y fósforo.

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 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 a 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 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 [($R_{completo}$ – $RN_{omitido}$)/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, alcanzado 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**).

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_2O_5 – 56 K_2O		
	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_2O_5 – 48 K_2O		
	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_2O_5 – 217 K_2O		

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.

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 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 TCC desarrollada por el IRRI (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

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	-	-	-	-	-

el estado fisiológico, la dosis de N y el hibrido 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 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.

Bibliografía

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.

UNA NUEVA FORMA DE DETERMINAR LA EFICIENCIA DE USO DEL FOSFORO EN AGRICULTURA

A.E. Johnston[1] y K. Syers[2]

Introducción

En una reciente revisión completa de la literatura hecha por Syers et al. (2008) sobre la eficiencia de uso del fósforo (P) en una amplia variedad de sistemas de cultivo, tipos de suelo y climas, se observó que la recuperación (eficiencia) del P aplicado como fertilizante más el P residual frecuentemente estaba entre 50 y 90 % cuando se mide con un método adecuado y en una apropiada etapa de tiempo. Este artículo discute más profundamente el comportamiento encontrado por esta revisión bibliográfica.

El porcentaje de recuperación de un nutriente, X, frecuentemente se calcula por el método de la diferencia:

$$\text{Recuperación (\%)} = \frac{\text{Absorción del cultivo con X} - \text{absorción del cultivo sin X}}{\text{Cantidad de X aplicada}} \times 100$$

Este método es generalmente apropiado para determinar la recuperación del nitrógeno (N) aplicado con los fertilizantes, pero su uso es más limitado para P y potasio (K). Porque?. El N inorgánico de los fertilizantes que contienen (o se transforman a) amonio o nitrato que no es utilizado por el cultivo rara vez permanece en el suelo como residuo. El nitrato que queda en el suelo luego puede perderse por lixiviación o denitrificación y el amonio por volatilización. Por esta razón, la recuperación del N aplicado se determina mejor por el método de la diferencia. Sin embargo, una muy pequeña o ninguna cantidad de P y K residual se pierden del suelo. En la mayoría de suelos, este remanente se acumula como una reserva de estos dos nutrientes.

Se puede usar el método directo, utilizando el isótopo ^{32}P, para medir el porcentaje de recuperación de P aplicado con los fertilizantes. El porcentaje de recuperación (eficiencia) obtenido por este método rara vez supera el 25 %. Sin embargo, se debe pensar en lo siguiente: si solamente 25 % del P en un cultivo proviene del P aplicado con los fertilizantes, el otro 75 % debe provenir de las reservas del suelo. Si se quiere mantener la fertilidad del suelo, cualquier P utilizado de las reservas debe ser reemplazado. Entonces, es razonable considerar que del total de P absorbido por el cultivo, parte del fertilizante recientemente aplicado y parte de las reservas del suelo (que se mantiene mediante aplicación de P), representa la recuperación del P a largo plazo. Johnston y Poulton (1977) propusieron otro método para medir la eficiencia de uso de P que luego fue ampliado por Syers et al. (2008) y que se denominó el "Método del Balance" en el cual el porcentaje de recuperación del P aplicado se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Recuperación (\%)} = \frac{\text{Remoción de P por el cultivo}}{\text{P aplicado}} \times 100$$

Este método tiene la ventaja de que toma en cuenta la recuperación del P de las reservas del suelo y que no necesita una parcela control sin aplicación de P.

Un segundo aspecto de la eficiencia de uso de P se relaciona con el reciente conocimiento del comportamiento del P en el suelo. En relación a la disponibilidad de P para que sea absorbido por las raíces de las plantas, Jonhston (2001) sugirió que el P presente en el suelo se encuentra en cuatro compartimentos. Además de definir los cuatro compartimentos caracterizados por la disponibilidad de P para absorción por las raíces de las plantas, los autores relacionaron los cuatro compartimentos con la extractabilidad del P por diferentes reactivos químicos. De esta forma, una medida de laboratorio del P disponible se puede relacionar con el P que absorve el cultivo en el campo. En la **Figura 1** se presenta un esquema del concepto.

La cantidad de P en cada uno de estos compartimientos está relacionada con la energía entre los sitios de enlace en la superficie o dentro de los constituyentes del suelo con capacidad de retener P y con la proporción de esos sitios en la matriz total del suelo.

El P es absorbido por las plantas como iones ortofosfato, principalmente $H_2PO_4^-$ y en menor cantidad HPO_4^{2-}. Hace tiempo se consideraba que el P que no fue utilizado por la planta se fijaba en el suelo en formas que ya no podían suplementar estos iones ortofosfato a la solución del suelo y, por lo tanto, este P ya no era disponible para absorción por las raíces de las plantas.

1 Centro de Investigación de Rothamsted, Harpenden, Herts., AL5 2JQ, Reino Unido. Correo electrónico: Johnny.johnston@bbsrc.ac.uk.
2 Universidad de Naresuan, Phitsanulok, Tailandia. Correo electrónico: keiths@nu.ac.th

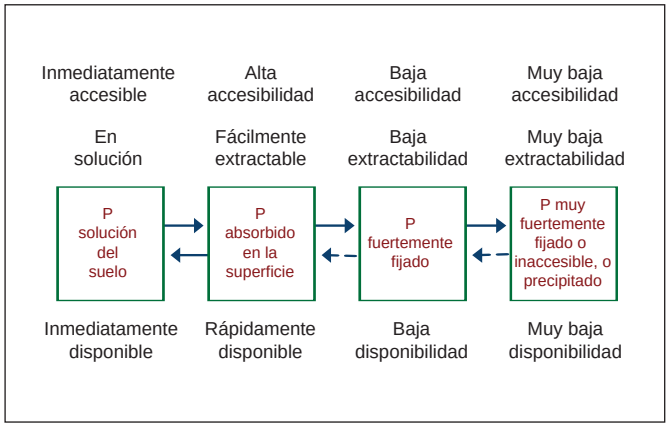


Figura 1. Representación esquemática de los cuatro compartimentos, extractabilidad y disponibilidad del P en el suelo.

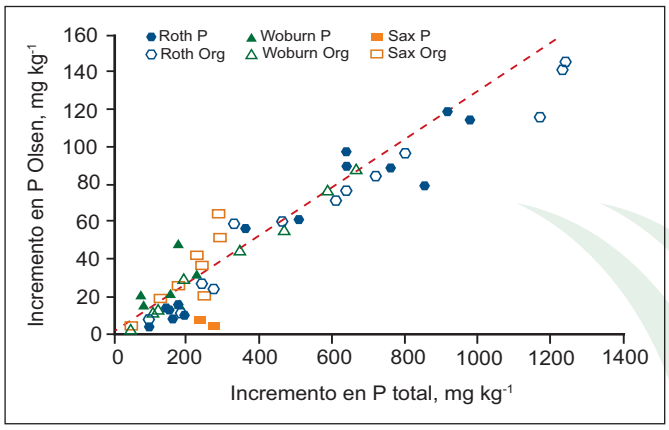


Figura 2. Relación entre el P total y el P extraído con Olsen (la línea punteada representa 13 % del P añadido y que fue extraído con el método Olsen).

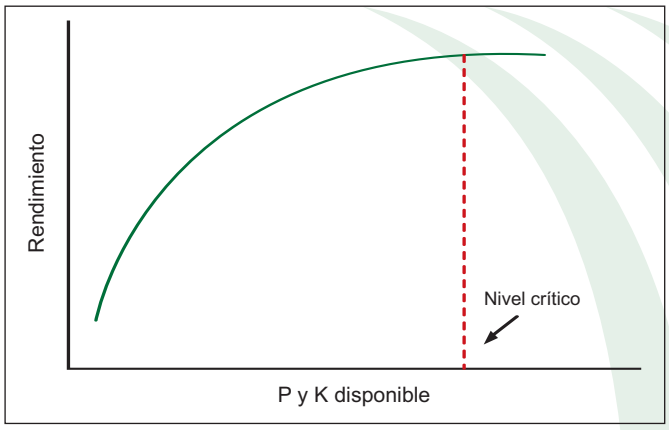


Figura 3. Cuánto P debe estar presente en el compartimento de fácil disponibilidad?

Sin embargo, en la década de 1950 empezaron a aparecer en experimentos de campo indicios que demostraban que cuando se habían acumulado reservas suficientemente altas de P en el suelo provenientes de pasadas aplicaciones de fertilizantes o residuos de corral, estas reservas del suelo pueden proveer de suficiente P para mejorar los rendimientos de los cultivos.

El aspecto más importante de la **Figura 1** es la transferencia reversible del P entre la solución del suelo, el compartimiento de P fácilmente disponible y el compartimiento de P menos disponible. Datos que soportan estas aseveraciones con experimentos de campo fueron publicados por Syers et al. (2008). El análisis de rutina del P disponible mide el P en la solución del suelo y el P que se encuentra en el compartimiento de P fácilmente disponible. El método de análisis de suelo utilizado no es importante. Lo esencial es que los datos obtenidos caractericen en forma precisa el suelo en términos de la respuesta del cultivo ya sea al P proveniente del suelo o al P aplicado como fertilizante.

La transferencia reversible de P entre los tres primeros compartimentos implica un equilibrio entre el P presente en los mismos. Datos que demuestran el incremento de P extraído con Olsen y el P total fueron obtenidos con varios experimentos a largo plazo conducidos en un suelo arcillo limoso en Rothamsted, un suelo franco arenoso en Woburn y un suelo franco arcillo arenoso en Saxmundham. En todos los tipos de suelo existe una relación lineal común entre el incremento en P extraído con Olsen y el incremento del P total (**Figura 2**).

En forma similar, un experimento conducido en Carolina del Norte, Estados Unidos, McCollum (1991) demostró que después de añadir P por 9 años en un total de 1 228 kg P ha^{-1}, solamente alrededor del 20 % fue extraído por el método de Mehlich 1.

Varias importantes preguntas prácticas se presentan al analizar este concepto del comportamiento de P del suelo y del P añadido con el fertilizante.

La primera pregunta es: Cuánto P debe estar presente en el compartimento de P fácilmente disponible para asegurar rendimiento óptimo?

Cuando el rendimiento del cultivo está relacionado con el P fácilmente disponible medido por el análisis de rutina, el rendimiento se incrementa rápidamente al inicio y luego más lentamente hasta que llega a una meseta (curva de respuesta asintótica, **Figura 3**). El nivel de P disponible en el suelo al cual se logra el rendimiento asintótico se puede considerar como el nivel crítico de P para ese cultivo. Por debajo del nivel crítico, la falta de P disponible resulta en pérdida de rendimiento. La aplicación de P para llegar a niveles más altos del nivel crítico se haría solamente para mantener un nivel no limitante de P en el suelo y no se espera una respuesta directa en rendimiento.

Ejemplos de curvas de respuesta de rendimiento con P extraído con Olsen de los experimentos de Rothamsted se presentan en la **Figura 4**. Aún cuando el rendimiento máximo de los tres cultivos [remolacha azucarera

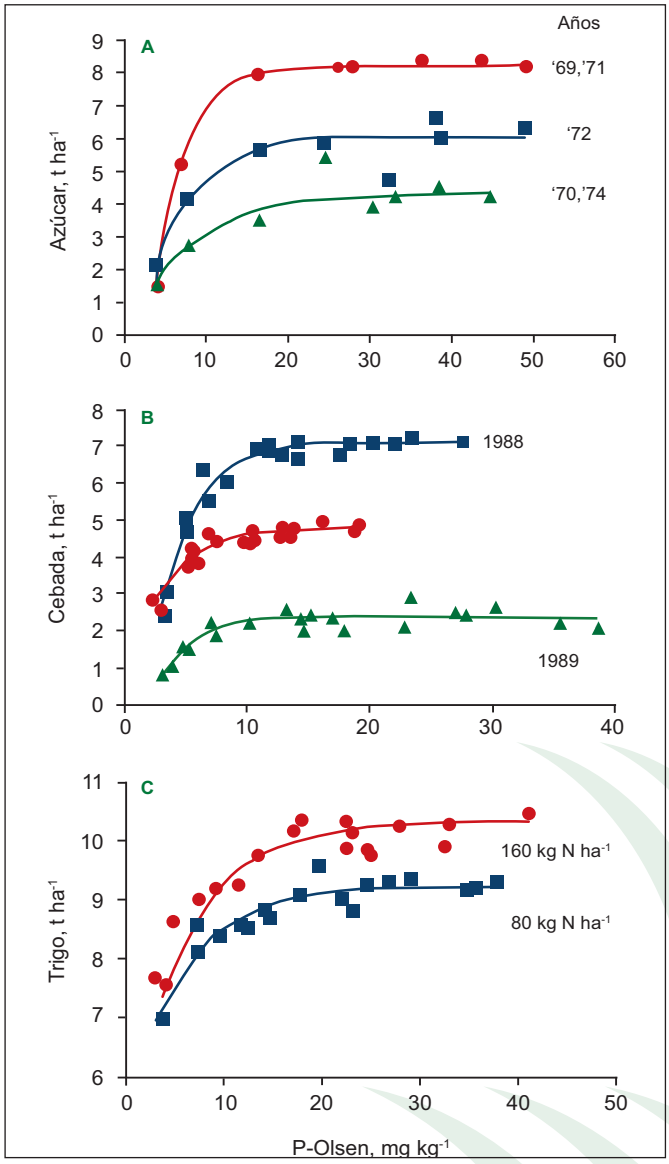


Figura 4. Ejemplo de los niveles críticos para varios cultivos.

(rendimiento de azúcar), cebada de primavera y trigo de invierno] fue diferente entre años debido a factores climáticos o a la cantidad de N aplicado, el nivel crítico varió muy poco. Para lograr el rendimiento asintótico más alto no se requiere una concentración más alta de P extraído con Olsen en los 25 cm superficiales del suelo.

La segunda pregunta es: Cuánto P se debe añadir para incrementar el P disponible al nivel crítico?

La respuesta a esta pregunta es específica para cada sitio. Por esta razón, es necesario trabajar mucho más en el asunto. El tipo y la densidad aparente del suelo, la profundidad de incorporación del P y la forma de muestreo influencian el resultado. Dos ejemplos muestran lo que se puede hacer. Un experimento que se inició en 1856 en un suelo franco arcillo limoso en la estación experimental de Rothamsted fue modificado para medir la cantidad de P requerida para incrementar el contenido de P-Olsen (Poulton and Johnston, comunicación personal). Los cinco tratamientos de P estudiados en el periodo 1856 a 1901 produjeron un rango estrecho de contenidos de P-Olsen en el suelo. El contenido de P en el suelo se incrementó entre 1986 y 1991 aplicando de 264 a 786 kg P ha^{-1}. El total de P aplicado y los promedios del balance de P y el contenido inicial y final de P-Olsen de los tratamientos evaluados se presenta en la **Tabla 1**. En los tratamientos en los cuales el contenido de P-Olsen inicial fue de 7 mg kg^{-1}, un balance positivo de 182 kg de P ha^{-1} incrementó el contenido de P en el suelo a 18 mg kg^{-1}. Se sembró cebada de primavera cada año (1986 a 1991).

De la curva de respuesta al P, la media del 95 % del rendimiento asintótico de grano fue 52.1 t ha^{-1} y el contenido de P-Olsen asociado con este punto fue 14

Tabla 1. Total de P añadido, balance de P 1986-1991 y P-Olsen en 1986 y 1991.

P añadido kg ha^{-1}	Balance de P[1] kg ha^{-1}	P-Olsen, mg kg^{-1} 1986	P-Olsen, mg kg^{-1} 1991
786	700	7	48
522	437	8	38
264	182	7	18

[1] **Cantidad de P aplicada sobre la remoción del cultivo.**

Tabla 2. Relación entre el P-Olsen, rendimiento máximo de trigo de invierno, P total removido en el grano más paja, P aplicado anualmente y porcentaje de recuperación del P aplicado estimado por el método del balance.

P-Olsen, mg kg^{-1}, en el 2004	9	14	23	31
Rendimiento de trigo, t ha^{-1}	7.1	7.8	7.9	7.9
P removido en el grano más paja, kg ha^{-1}	14	17	19	19
P aplicado anualmente, kg ha^{-1}	20	20	20	20
Porcentaje de recuperación del P aplicado*	70	85	95	95

* **Estimado por el método del balance.**

mg kg^{-1}. Es decir que, 182 kg de P ha^{-1} incorporados en los 25 cm superficiales del suelo en 6 años fueron suficientes para incrementar el contenido de P-Olsen sobre el nivel crítico. En el experimento conducido por McCollum (1991), se determinó el contenido de P-Melhich 1 en los 15 cm superficiales de un suelo franco arenoso al inicio del periodo de 9 años en los cuales se aplicó P. Al inicio del experimento el suelo estaba alrededor del nivel crítico para maíz (18 a 22 g $(m^3)^{-1}$ y mayor que el nivel crítico para soya. Se aplicó dosis de 0 a 1 120 kg P ha^{-1}. El incremento en P-Melhich 1 fue lineal y 10 kg P ha^{-1} incrementaron el contenido de P-Mehlich 1 en 1 g $(m^3)^{-1}$.

La tercera pregunta es: Cuánto P es necesario para mantener el nivel crítico?

Se continuó con el experimento en Rothamsted, pero no se aplicó P entre 1993 y 1999. En 1999 el contenido de P-Olsen estaba en un rango de 2 a 31 mg kg^{-1} de modo de que se podrían obtener respuestas en rendimiento al P. Desde el año 2002 al 2006 se cultivó trigo de invierno y se aplicaron 20 kg P ha^{-1} cada año para reemplazar el P con el grano y la paja en las parcelas que recibieron P de 1986 a 1991. Estas adiciones mantuvieron los niveles P-Olsen en el suelo.

Los datos de este experimento que el máximo rendimiento de grano se obtuvo cuando el contenido de P en el suelo estaba al nivel crítico y cuando este nivel se mantuvo reemplazado el P removido en la cosecha, de esta forma, la eficiencia de uso de las aplicaciones anuales de P era mayor al 90 % (**Tabla 2**).

La **Tabla 2** demuestra que el rendimiento máximo fue de 7.9 t ha^{-1} con un contenido de 31 mg de P-Olsen kg^{-1}. El

rendimiento se redujo en suelos con menos de 14 mg P kg^{-1}, lo que representa pérdida para el agricultor. El mantener el P-Olsen al nivel crítico reemplazando el P removido en la cosecha resulta en una eficiencia de uso de P de alrededor de 95 % de P aplicado anualmente. En forma similar, en el experimento descrito por McCollum (1991), el reemplazo de P removido en la cosecha mantuvo el nivel crítico de P-Mehlich 1 en el suelo.

Bibliografía

Johnston, A.E. and P.R. Poulton. 1977. Rothamsted Experimental Station Report for 1976, Part 2:53-85.

Johnston, A.E. 2001. Principles of crop nutrition for sustainable food production. Proceeding 459. York, UK, International Fertilizer Society. 39 pp.

McCollum, R.E. 1991. Agron. J. 83:77-85.

Syers, J.K., A.E. Jonhston, and D. Curtin. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. FAO, Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 18. Rome, Italy.

REPORTE DE INVESTIGACION RECIENTE

FRACCIONES DE FOSFORO EN EL SUELO Y SU RELACION CON LA ABSORCION POR ARROZ DE INUNDACION

Goncalves, G.K. and E.J. Meurer. 2009. Phosphorus fractions and their relationship with phosphorus uptake by flooded rice in Rio Grande do Sul. Rev. Bras. Ciênc. Solo 33(2):357-362.

Los suelos empleados en el cultivo de arroz por inundación en el estado de Rio Grande do Sul, Brasil, evolucionaron de diferentes materiales, lo que ha llevado a variaciones en la distribución de las fracciones de fósforo (P). Para poder cuantificar las fracciones de P y relacionarlas con la absorción de este nutriente por la planta se diseñó un experimento de invernadero con cuatro muestras de suelos en las que se cultivó arroz por 35 días, con y sin la adición de P (39.30 mg P kg^{-1} de suelo). En las muestras de suelo se determinó el P disponible antes de la siembra (Mehlich 1) y se determinaron las diferentes fracciones de P utilizando el método de Hedley. La absorción de P por las plantas de arroz se correlacionó con las fracciones lábiles (Pi RTA y Pi $NaHCO_3$) y con la fracción moderadamente lábil (NaOH 0.1 mol L^{-1} y 0.5 NaOH mol L^{-1}). El P extraído por el método de la resina y el método de Mehlich 1 correlacionaron con las fracciones lábiles y moderadamente lábiles. Esta asociación fue más fuerte para la resina (Pi RTA). El P adicionado recientemente como superfosfato triple incrementó especialmente la fracción moderadamente lábil (Pi NaOH 0.1 mol L^{-1}) y, en menor medida, la fracción lábil (Pi $NaHCO_3$ y Pi RTA).

CURSOS Y SIMPOSIOS

1. Simposio Internacional: Importancia del Manejo del Suelo y el Potasio para el Desarrollo Agrícola Sustentable de Centroamerica y el Caribe

Organiza : ASCS
Lugar y Fecha : San Salvador - El Salvador
Marzo 10-13, 2010
Información : ASCS
: Tel.: 503 2224 5526
: sdvirnvisdurlo@yahoo.com
: www.ascienciasuelo.org

2. Conferencia Internacional sobre Fertilizantes de Eficiencia Mejorada

Organiza : IFA
Lugar y Fecha : Miami, Floriada, USA
Marzo 23, 2010
Información : IFA
: pheffer@fertilizer.org
: www.newaginternational.com

3. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo

Organiza : AACS
Lugar y Fecha : Rosario, Santa Fe, Argentina
Mayo 31-4 Junio, 2010
Información : AACS
: Tel.: 54 11 4783 3021
: Fax.: 54 11 4783 3024
: www.suelos.org.ar

4. X Conferencia Internacional en Agricultura de Precisión

Organiza : Colorado State University, IPNI y FAR
Lugar y Fecha : Denver, Colorado, EE.UU.
Julio 18-21, 2010
Información : Colorado State University
: CPA@colostate.edu
: www.icpaonline.org

5. XIX Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo

Organiza : ASSSI - IUSS
Lugar y Fecha : Brisbane, Australia
Agosto 1-6, 2010
Información : ASSSI - IUSS
: Tel.: 617 3368 2644
: soil@ccm.com.au
: www.19wcss.org.au

6. XII Congreso Nacional y V Internacional de la Ciencia del Suelo

Organiza : UNSA y SPCS
Lugar y Fecha : Arequipa – Perú
Octubre 11-15, 2010
Información : SPCS
: Fax: 51 54 281 299
: suelosarequipa@unsa.edu.pe
: www.unsa.edu.pe/suelos

7. XXXV Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo

Organiza : SMCS
Lugar y Fecha : Mexicali - Baja California Norte
Octubre 25-29, 2010
Información : SMCS
: Lic. Jairo Ramirez Rodriguez
: webmaster@smcs.org.mx
: www.smcs.org.mx

8. XIX Reunión Internacional ACORBAT - 2010

Organiza : ACORBAT
Lugar y Fecha : Medellin - Colombia
Noviembre 8-12, 2010
Información : ACORBAT
: Tel.: 574 448 2910
: Fax.: 574 331 0494
www.comunicacionesefectivas.com

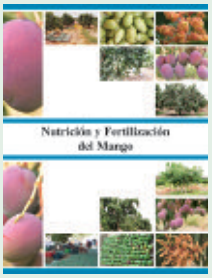
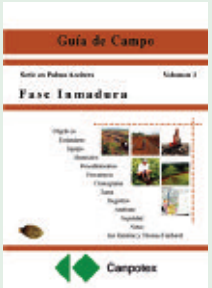
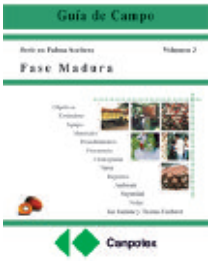
9. XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo

Organiza : SECS
Lugar y Fecha : Sto. Dgo. de los Tsáchilas - Ecuador
Noviembre 17-19, 2010
Información : SECS
: lmartinez@ute.ed.ec
: calvache@uio.satnet.net
: jespinosa@ipni.net
: www.secsuelo.org

10. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo

Organiza : SLCS
Lugar y Fecha : Mar del Plata, Argentina
Abril, 2012
Información : SLCS
: Fax: 52 55 1113 2614
: slcsorg@slcs.org.mx
: www.slcs.org.mx/congresos.htm

PUBLICACIONES DISPONIBLES

	✳ **Uso Eficiente de los Nutrientes.** Esta publicación 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.	$ 15.00
	✳ **Síntomas de Deficiencias de Nutrientes y Desórdenes en Palma Aceitera.** Guía de Bolsillo para técnicos a cargo del manejo de plantaciones que deseen identificar los síntomas de deficiencia en el campo, conocer algo de sus causas y como éstas podrían prevenirse o remediarse. Está nueva edición es un versión mejorada del antiguo manual con una nueva estructura y más información sobre manejo de nutrientes en palma.	$ 15.00
	✳ **Nutrición y Fertilización del Mango.** Esta publicación ofrece información básica para el manejo de la nutrición y fertilización del mango tomando en cuenta las particulares características de desarrollo de este cultivo en el trópico.	$ 15.00
	✳ **Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 1: Vivero.** Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 1 cubre el manejo del vivero para producir plántas de calidad que deben estar disponibles para la siembra en el campo en el momento requerido.	$ 15.00
	✳ **Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 2: Fase Inmadura.** Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 2 cubre el manejo de la fase inmadura de la plantación para lograr una población uniforme de palmas productivas en cada bloque del campo.	$ 15.00
	✳ **Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 3: Fase Madura.** Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 3 cubre el manejo de la fase madura de la plantación para lograr rendimientos sostenidos de racimos de fruta fresca a través de toda la etapa productiva del cultivo.	$ 15.00

PUBLICACIONES DISPONIBLES

	✳ **Manual Internacional de Fertilidad de Suelos.** Publicación didáctica sobre uso y manejo de suelos y fertilizantes con datos y ejemplos de diferentes partes del mundo	$ 15.00
	✳ **Manual de Nutrición y Fertilización del Café.** Este manual presenta conceptos modernos del manejo de la nutrición y fertilización del cafeto como herramienta para lograr rendimientos altos sostenidos.	$ 10.00
	✳ **Manual de Nutrición y Fertilización de Pastos.** Esta publicación ofrece a las personas envueltas en la producción ganadera una visión amplia del potencial productivo, de los requerimientos nutricionales y de los factores limitantes impuestos por el ambiente tropical a la producción de forrajes.	$ 10.00
	✳ **Nutrición de la Caña de Azúcar.** Este manual de campo es una guía completa para la identificación y corrección de los desórdenes y desbalances nutricionales de la caña de azúcar. El tratamiento completo de la materia y las excelentes ilustraciones hacen de este manual una importante herramienta de trabajo en la producción de caña.	$ 8.00
	✳ **Estadística en la Investigación del Uso de Fertilizantes.** Publicación que presenta conceptos actuales de diseño experimental e interpretación estadística de los datos de investigación de campo en el uso de fertilizantes.	$ 6.00
	✳ **Fertilización del Algodón para Redimientos Altos.** En esta publicación se discuten una serie de aspectos para ayudar al investigador a tomar la decisión más adecuada en cuanto a fertilización, teniendo en cuenta todos los factores que pueden afectar el cultivo en condiciones locales.	$ 5.00