



## 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



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<sup>1</sup>

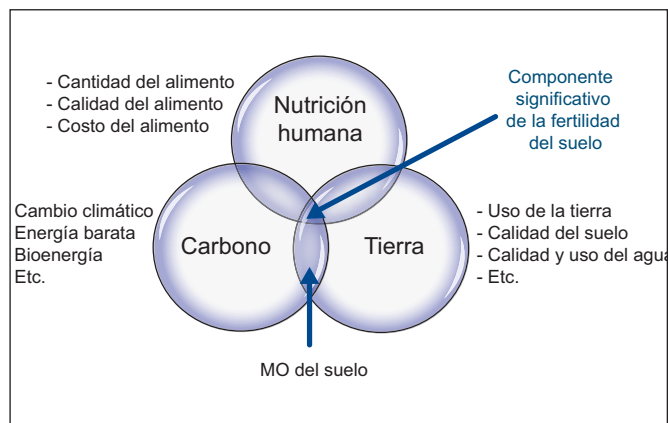
### Contexto global del manejo de nutrientes contemporáneo

Las mejores prácticas de manejo (MPM) se pueden definir como acciones, aplicadas a los recursos, que han sido probadas con investigación y que entregan el mejor desempeño combinado de aspectos económicos, sociales y ambientales (IPNI, 2009). Se han presentado otras definiciones con énfasis en ciertos aspectos de las MPM incluyendo la protección ambiental (Sharpley et al., 2006; Tandon y Roy, 2004), ahorro de recursos (Anónimo, 2006), optimización del crecimiento y minimización de los efectos ambientales adversos (Lilly, 2009) o evaluación a través de la implementación con agricultores (Griffith y Murphy, 1991). Las MPM son la manifestación de campo de los cuatro fundamentos (4Fs) de la nutrición de plantas: aplicación de la fuente correcta, en la dosis, época y localización correctas (Roberts, 2007; Bruulsema et al., 2009).

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

Se ha estimado que la necesidad de alimentos se duplicará en los próximos 30 años (Glenn et al., 2008). Esto equivale a mantener una tasa de incremento

<sup>1</sup> Vicepresidente del International Plant Nutrition Institute (IPNI). Correo electrónico: pfixen@ipni.net

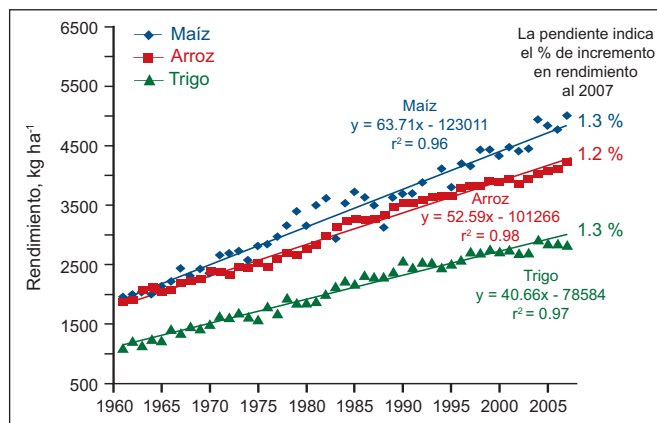


**Figura 1. Principales preocupaciones y desafíos de las próximas décadas (Conceptos de carbono y tierra de Janzen, 2009).**

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).

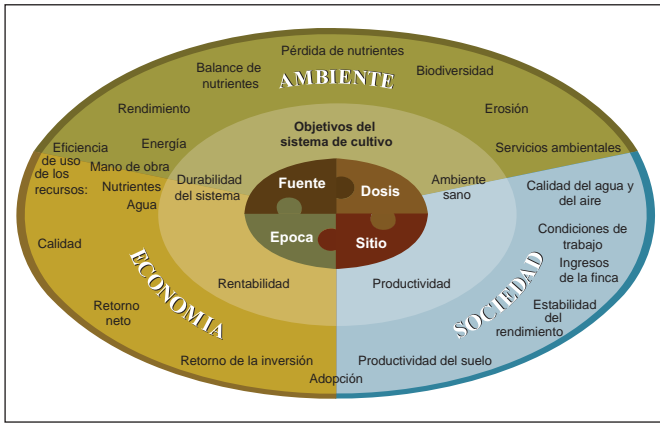


**Figura 2. Tendencias globales del rendimiento de cereales, 1961 - 2007 (Datos de la FAO, 2009).**

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 Pioneer Hi-Bred Internacional de 1930 al 2007 muestra una tasa anual de incremento de solamente 0.014 t ha<sup>-1</sup> a una población de 10 000 plantas ha<sup>-1</sup> y de 0.107 t ha<sup>-1</sup> a 79 000 plantas ha<sup>-1</sup> (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

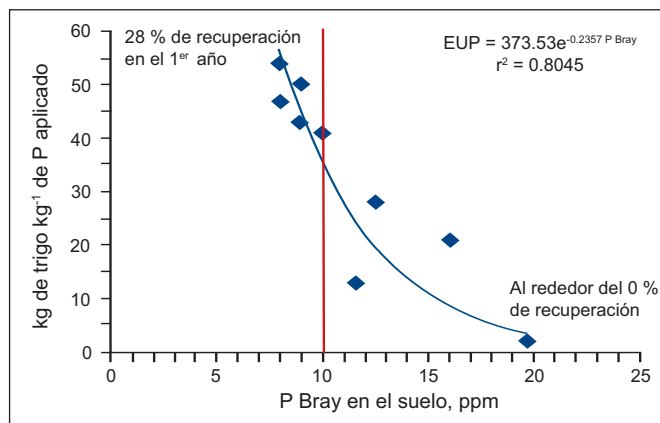


Figura 4. Influencia de la fertilidad del suelo en la eficiencia agronómica del P en experimentos de trigo en Argentina (García, 2004).

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 <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	14.0	15.0
Fertilizante nitrogenado, kg N ha <sup>-1</sup>	1 005	1 495
N removido en el grano, kg N ha <sup>-1</sup>	880	970
Cambio medido del N en el suelo, kg ha <sup>-1</sup>	139	404
N no contabilizado, kg ha <sup>-1</sup>	14	121
EUN 1: Productividad parcial del factor de N, kg de grano kg <sup>-1</sup> de N aplicado	70	50
EUN 2: kg de N en el grano kg <sup>-1</sup> de N aplicado	0.88	0.65
EUN 3: (kg de N en el grano + cambio de N en el suelo) kg <sup>-1</sup> 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.

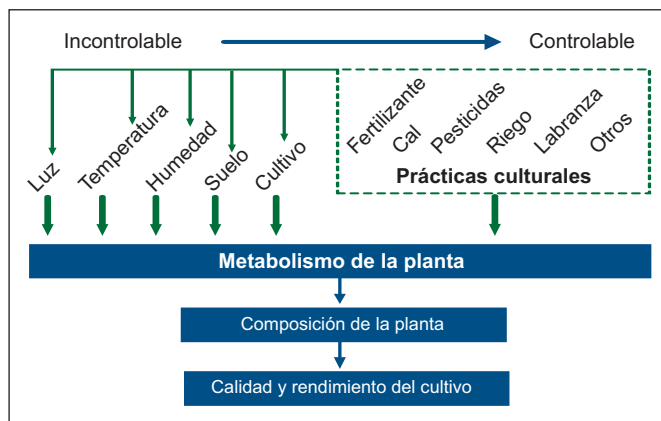
**Universalidad del marco global basado en principios científicos**

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 <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> -----					
	Oeste de Kenia (maíz de bajos insumos)		Norte de China (trigo/maíz en doble cultivo)		Medio oeste Estados Unidos (maíz/soya)	
	N	P	N	P	N	P
Entradas y salidas						
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
<b>Relación remoción : uso<sup>1</sup></b>	<b>8.4</b>	<b>0.88</b>	<b>0.61</b>	<b>0.42</b>	<b>0.94</b>	<b>1.64</b>

<sup>1</sup> Datos calculados por Fixen



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

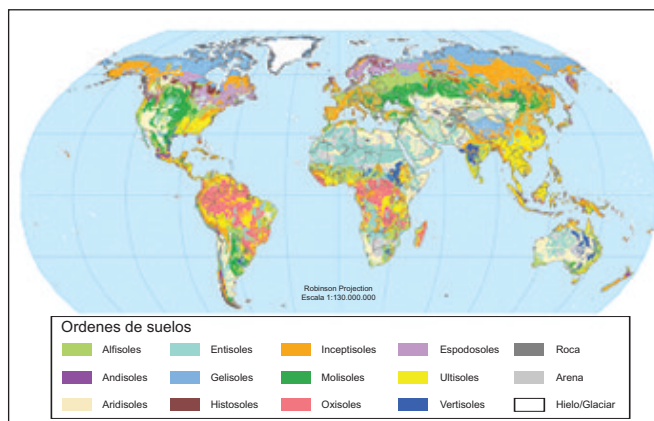
Es importante presentar las MPM de fertilizantes como la posibilidad que ofrece la más alta probabilidad de lograr los objetivos, antes que indicar que éstas garantizan que los objetivos se cumplan. La **Figura 5** ilustra la complejidad de los sistemas de cultivo en los cuales se manejan fertilizantes.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

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



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

sistema de cultivo.

- Reconocer las interacciones entre fuente, dosis, época y localización.
- Evitar efectos nocivos a las raíces, hojas y plántulas.
- Reconocer los efectos en la calidad así como en el rendimiento del cultivo.
- Considerar los aspectos económicos.

**Fuente:**

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

**Dosis:**

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

**Epoca:**

- Determinar la época de absorción del cultivo.
- Determinar la dinámica del suplemento de nutrientes del suelo.
- Reconocer el efecto de los factores climáticos en la

pérdida de nutrientes.

- Evaluar la logística de las operaciones de campo.

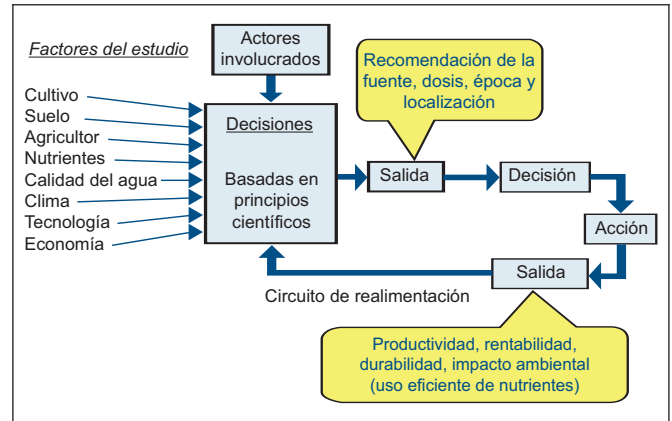
**Localización:**

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

**Manejo adaptativo de nutrientes para mejorar la EUN**

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