



INFORMACIONES AGRONÓMICAS

de Hispanoamérica



Junio 2011 · No. 2

CONTENIDO

Alivio de la pobreza a través de la fertilización balanceada de maíz y el desarrollo integral de la familia.....	1
Niveles de materia orgánica y pH en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana argentina	6
Calibración de análisis de suelos para potasio en café a partir de resultados obtenidos en una localidad	13
Uso de clinoptilolita como vehículo de fertilizantes nitrogenados en un suelo de la región pampeana argentina	16
Calibración de análisis de suelo en cafetales al sol y bajo semisombra	22
Es necesaria una fertilización balanceada para lograr altas producciones de alfalfa ..	35
Evaluación de métodos de diagnóstico de azufre en maíz: Indicadores de suelos e indicadores vegetales. Utilidad del medidor de clorofila	38
Cursos y Simposios	46
Publicaciones Disponibles	48

**Editores: Dr. Fernando O. García
Dr. Raúl Jaramillo**

Propietario: International Plant Nutrition Institute (IPNI)

CUIT: 30-70175611-4

ISSN 2222-0178

No. de Registro de Propiedad Intelectual en trámite

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

www.ipni.net

ALIVIO DE LA POBREZA A TRAVÉS DE LA FERTILIZACIÓN BALANCEADA DE MAÍZ Y EL DESARROLLO INTEGRAL DE LA FAMILIA

José Espinosa¹, Arturo Melville² y Kenneth Hylton³

Introducción

Un alto porcentaje de la población rural de Guatemala vive en la pobreza. Esta pobreza se observa en la mayoría de hogares y cada paso tendiente a librar a las familias rurales de esta carga puede contribuir a alcanzar prosperidad y estabilidad. Con un nivel tan alto de pobreza, el lograr que la gente de campo consiga ingresos económicos es especialmente importante. La producción de maíz es la principal actividad agrícola de las tierras altas de Guatemala, donde este cultivo es parte fundamental de la historia y cultura de la región. Para enfrentar los problemas de hambre y mal nutrición y para promover autonomía económica es necesario desarrollar un programa robusto de agricultura sostenible. La utilización de fertilizantes, de acuerdo con los conceptos de Manejo de Nutrientes por Sitio Específico (MNSE), es parte integral de este programa.

Extensas áreas de las tierras altas de Guatemala se cultivan con variedades de maíz suave de polinización abierta destinadas al consumo humano. Los agricultores son propietarios de fincas pequeñas y enfrentan limitaciones de capital y tecnología, lo que hace que la producción de grano sea generalmente baja. Sin embargo, existe el potencial de obtener rendimientos sostenibles, lo suficientemente altos, para lograr ingresos suficientes para mantener el hogar y crear ahorros que se puedan invertir en el mejoramiento de las fincas.

Según HELPS International, una organización no gubernamental (ONG), una familia de agricultores en las zonas rurales de Guatemala necesita de aproximadamente 1700 kg de maíz año⁻¹, pero con el método tradicional de producción se obtienen solamente alrededor de 700 kg de maíz año⁻¹. El jefe de familia tiene que trabajar fuera de su comunidad para obtener los recursos necesarios para comprar maíz adicional. El aumento de la capacidad de los agricultores para producir mayor cantidad de maíz ayudaría a las familias a lograr una mejor calidad de vida (**Foto 1**).

En el año 2006, HELPS International desarrolló e implementó un Programa de

¹ Ex Director IPNI-NLA. Director de Investigaciones de la Universidad Tecnológica Equinoccial Campus Santo Domingo. Ecuador. Correo electrónico: jespinosa@ute.edu.ec

² HELPS International Guatemala: Correo electrónico: amelville@helpsinternational.com

³ Company Mosaic, USA. Correo electrónico: kenneth.hylton@mosaicco.com



Foto 1. Los productores de maíz en Guatemala tienen mucho interés por aprender una mejor forma de producción de maíz.

Maíz para promover el desarrollo económico y rural en la provincia de Alta Verapaz en Guatemala. Este esfuerzo se inició en coordinación con DISAGRO, un distribuidor local de fertilizantes. A finales del 2008, el Instituto Internacional de Nutrición de Plantas (IPNI) y la compañía MOSAIC se unieron al programa. Desde su incorporación al programa, MOSAIC ha contribuido con experiencia agronómica y con el apoyo financiero para análisis de suelo y foliar y para ampliar considerablemente el programa en la región de Alta Verapaz. En la actualidad, MOSAIC contribuye aproximadamente con US \$ 400 000 anuales para la administración del programa y para ofrecer préstamos sin intereses a los productores. El reembolso de los préstamos es la principal condición para que los productores permanezcan en el programa. Las tasas de recuperación de los préstamos son superiores al 90%.

Las actividades del Programa de Maíz se iniciaron con la organización comunitaria. Se identificaron las comunidades rurales que deseaban participar en el programa y se contactó a sus líderes. Se estableció una asociación de productores en cada una de las comunidades, con sus respectivos consejos de administración, para manejar específicamente el Programa de Maíz. El objetivo general del programa era aumentar el rendimiento del maíz a través de asistencia técnica y crédito para fertilizantes y otros insumos agrícolas. El objetivo específico del Programa de Maíz fue el desarrollar las habilidades en los agricultores para producir suficiente maíz para cubrir las necesidades anuales de grano de la familia y que permita además tener un superávit para pagar el crédito y generar ahorros. Los ingresos adicionales pueden cubrir otras necesidades básicas de la familia, especialmente salud y educación.

La primera región donde se implementó el programa fue Cotzal, en Quiché, donde se empezó con 24 familias y 3.24 ha de tierra. HELPS ha trabajado en las comunidades de esta región por muchos años con otros programas de alivio de la pobreza. Los agricultores participantes poseen o alquilan pequeñas parcelas de tierra con un

tamaño promedio de 0.5 ha. Los principales factores que limitan la producción de maíz de los pequeños productores en las tierras altas de Guatemala son la erosión, la disminución de la fertilidad del suelo y el manejo inadecuado del cultivo. Investigación realizada con pequeños agricultores en las tierras altas de América del Sur ha demostrado que el manejo de la densidad de siembra y de los nutrientes puede sostener rendimientos suficientemente altos como para satisfacer las necesidades de alimentos de la familia, aumentando simultáneamente sus ingresos.

El uso prolongado de la tierra con el continuo cultivo de maíz, sin devolver los nutrientes removidos, degrada la fertilidad del suelo y reduce los rendimientos. La falta de ingresos de los agricultores impide el uso de fertilizantes y el ciclo de degradación se agudiza.

Fue obvio para HELPS que el uso de fertilizantes era un componente clave del programa. Sin embargo, el manejo del cultivo por los agricultores tampoco era conducente hacia altos rendimientos. Tradicionalmente, los pequeños agricultores mantienen una población de plantas muy baja de irregular distribución en el campo. Se colocan de cuatro a cinco semillas de las variedades locales de maíz por sitio de siembra. Estos sitios están ubicados a aproximadamente un metro de distancia entre sí (**Foto 2**). Las plantas que germinan en el sitio crecen de manera desigual debido a la competencia. Los agricultores suelen sembrar de esta manera para asegurar la supervivencia de una o dos plantas por sitio, lo que garantiza la cosecha de algo de maíz. Las iniciativas para introducir semilla de maíz híbrido no fueron aceptadas por los agricultores debido a que el grano no es apto para la preparación de tortillas y otros usos culinarios, en comparación con las variedades locales. Dadas estas condiciones, los primeros pasos del programa estuvieron encaminados a ayudar a los agricultores a elegir buena semilla y a desarrollar un buen programa de fertilización basado en la experiencia local. El primer año fue también el momento de la formación práctica de los promotores de HELPS, personal bilingüe, en su mayoría jóvenes de la zona, que tenían educación agrícola de escuelas de formación



Foto 2. La siembra de cuatro o cinco semillas por sitio hace que las plantas de maíz crezcan en forma desigual, factor que contribuye al bajo rendimiento.

profesional. El grupo estaba dirigido por un ingeniero agrónomo de DISAGRO.

El programa estableció un criterio básico de nutrición balanceada para la aplicación de fertilizantes. Las dosis de aplicación se basaron en la experiencia de DISAGRO y del consenso con otros expertos en la región. La dosis total de fertilizantes se fraccionó en dos aplicaciones, una en la siembra y otra 45 días más tarde. La siembra se realizó utilizando el método tradicional de los agricultores. Los resultados de la cosecha del primer año fueron alentadores, produciendo rendimientos de grano que oscilaron entre 3 y 5 toneladas métricas por hectárea ($t\ ha^{-1}$) en los lotes fertilizados. Estos rendimientos son suficientes para satisfacer las necesidades anuales de grano de la familia del agricultor y para generar excedentes que permiten pagar los préstamos (**Foto 3**). El éxito del programa hizo que más agricultores se unan al proyecto en los años siguientes hasta llegar a un total de 54 comunidades, 1169 agricultores y 636 hectáreas en el 2010. El crecimiento del programa se presenta en las **Figuras 1 y 2**.

Basándose en la experiencia acumulada por el programa se implementó un enfoque más sistemático para entender el sistema de cultivo y acumular datos confiables para su manejo. En condiciones tropicales, el potencial de rendimiento y las necesidades de nutrientes varían entre las zonas agro-ecológicas donde se cultiva maíz. La región de Alta Verapaz en Guatemala es en cierta forma diferente de otras zonas del país donde hay más información sobre la producción de maíz. Estas diferentes condiciones sociales y de ambientes agro-ecológicos requieren de diferentes recomendaciones de fertilización y métodos de manejo del cultivo. Considerando que los pequeños agricultores rara vez utilizan el análisis de suelos se introdujo un enfoque basado en el concepto de MNSE. Este concepto se basa en la respuesta observada en la planta cuando se utiliza la técnica de las parcelas de omisión para evaluar la influencia de las condiciones agro-ecológicas en los requerimientos de nutrientes del cultivo y es una herramienta para desarrollar recomendaciones de fertilización que logren rendimientos altos y sostenidos (**Foto 4**).

Para este estudio se diseñó un experimento simple que comparó un tratamiento de fertilización balanceada con parcelas individuales de omisión de N y P. Todas las parcelas experimentales se sembraron con una población de 62 000 plantas ha^{-1} arregladas en hileras a 0.8 m de separación y en sitios de siembra ubicados a 0.4 m dentro de la hilera. En cada sitio se sembraron 2

semillas. Este es un cambio importante en el manejo del cultivo que se introdujo para asegurar una población uniforme. Los agricultores normalmente siembran 40 000 plantas ha^{-1} , ubicando de 4 a 5 semillas por sitio, distribuidas de manera desigual en el campo. La competencia en cada sitio de siembra hace que solo una o dos plantas produzcan bien, lo que reduce el potencial de rendimiento. Se diseñó un tratamiento de fertilización balanceada en base a la experiencia acumulada por el programa en los dos años anteriores. El nuevo tratamiento exploratorio de fertilización balanceada fue el siguiente: 146-90-74 kg de $N-P_2O_5-K_2O\ ha^{-1}$ más 26 kg de MgO , 43



Foto 3. Comercialización de maíz de las áreas rurales de Guatemala.

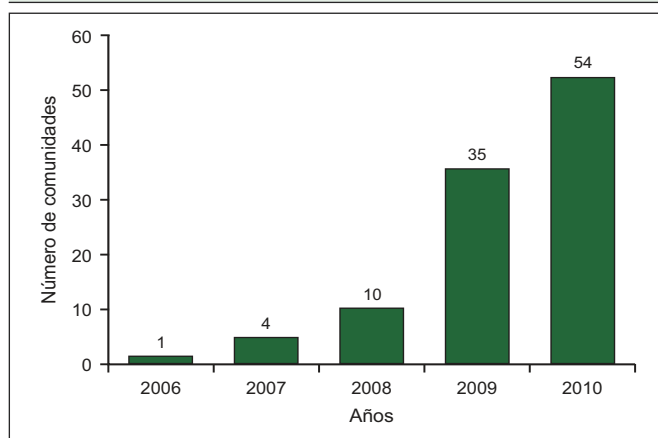


Figura 1. Incremento anual del número de comunidades incluidas en el Programa de Maíz.

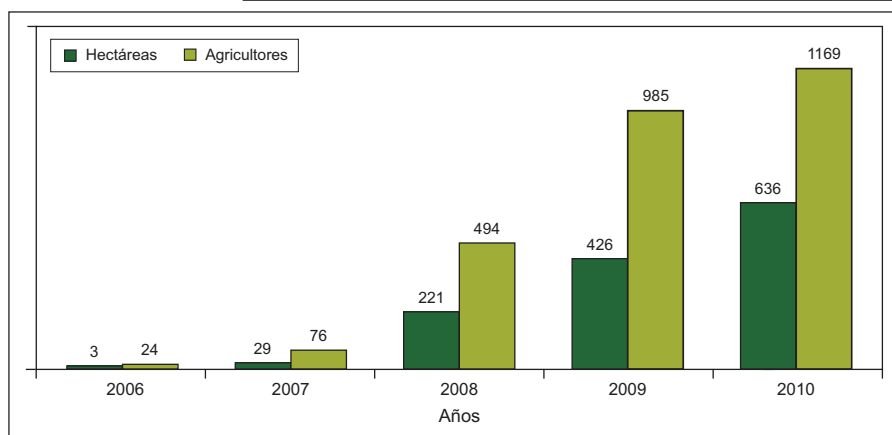


Figura 2. Incremento anual del número de hectáreas incluidas en el Programa de Maíz.



Foto 4. Las parcelas de omisión ayudan a demostrar los efectos en el crecimiento y rendimiento del maíz cuando éste no recibe diferentes nutrientes.

kg de S, 1.1 kg de Zn y 2.4 kg de B ha⁻¹. Se establecieron también tratamientos de omisión de N y P. Estas parcelas se fertilizaron con todos los nutrientes excepto el nutriente omitido y permiten determinar el rendimiento que se puede obtener con la reserva de nutrientes del suelo. La dosis de N en el tratamiento completo y en la parcela de omisión de P se fraccionaron en tres aplicaciones durante el ciclo de crecimiento: 30% a la siembra, 35% en V6 y 35% en V10. Se establecieron 10 sitios experimentales en Alta Verapaz.

Los resultados de estos experimentos de campo determinaron con certeza la magnitud del rendimiento obtenible con el nuevo manejo y nutrición del cultivo, así como los rendimientos posibles cuando se limita el suplemento de N y P. Esto permitió conseguir información suficiente para calcular las dosis de nutrientes necesarias para lograr la meta de rendimiento en los años siguientes. Los resultados de los dos años de experimentación se presentan en la **Figura 3**.

Los rendimientos de grano de los 10 sitios variaron entre 2.7 y 4.6 t ha⁻¹ para el tratamiento completo, con un promedio de 3.7 t ha⁻¹. El rendimiento en las parcelas de omisión de N varió de 2 a 3 t ha⁻¹, con un promedio de 1.6 t ha⁻¹ y en las parcelas de omisión de P de 1.5 a 4.2 t ha⁻¹, con un promedio de 2.7 t ha⁻¹. La alta variabilidad

entre los sitios es comprensible dadas a las condiciones de relieve de los lotes y del natural ajuste de los agricultores al nuevo procedimiento de siembra. Los datos acumulados permiten asumir que un rendimiento de 4.5 t ha⁻¹ es una producción realista, posible de obtener en las condiciones prevalentes en Alta Verapaz. Otros experimentos conducidos en la región para evaluar fuentes de Zn han logrado rendimientos medios superiores a 5.5 t ha⁻¹ (datos no mostrados), rendimientos que pasarían a ser la meta de rendimiento para el futuro inmediato. También se puede suponer que normalmente se pueden obtener rendimientos de alrededor de 1.5 t ha⁻¹ sin la aplicación de N y 2.5 t ha⁻¹ sin P. Por último, también puede asumir una eficiencia agronómica (EA) de 20 kg de grano kg⁻¹ de N aplicado y 40 kg de grano kg⁻¹ de P aplicado. Estos datos se pueden utilizar como referencia para la producción de maíz en la región hasta que se obtengan cifras más precisas mediante investigación.

Un mejor manejo del cultivo y de los nutrientes incrementará los rendimientos y mejorará también la EA de N y P. Las dosis de N y P se calcularon de la siguiente manera:

$$\text{Dosis} = (\text{Rendimiento de la parcela completa} - \text{rendimiento de la parcela de omisión}) / \text{EA}$$

Las dosis de nutrientes calculadas con los supuestos indicados anteriormente son similares a los ya utilizados en el experimento: 150 y 90 kg ha⁻¹ de N y P₂O₅, respectivamente. La diferencia es que ahora existen parámetros concretos que definen el rendimiento obtenible y la EA. Estos parámetros se deben mejorar a través de mejor manejo del cultivo por parte de los agricultores. Este proceso ajustará progresivamente la dosis de nutrientes para el dominio de recomendación en Alta Verapaz. Un mejor manejo del cultivo y de los fertilizantes puede conducir a mayor rendimiento, mayor eficiencia en el uso de nutrientes y mayor rentabilidad para los agricultores locales.

El Programa de Maíz continuó en el campo durante los años 2009 y 2010, utilizando la experiencia adquirida en

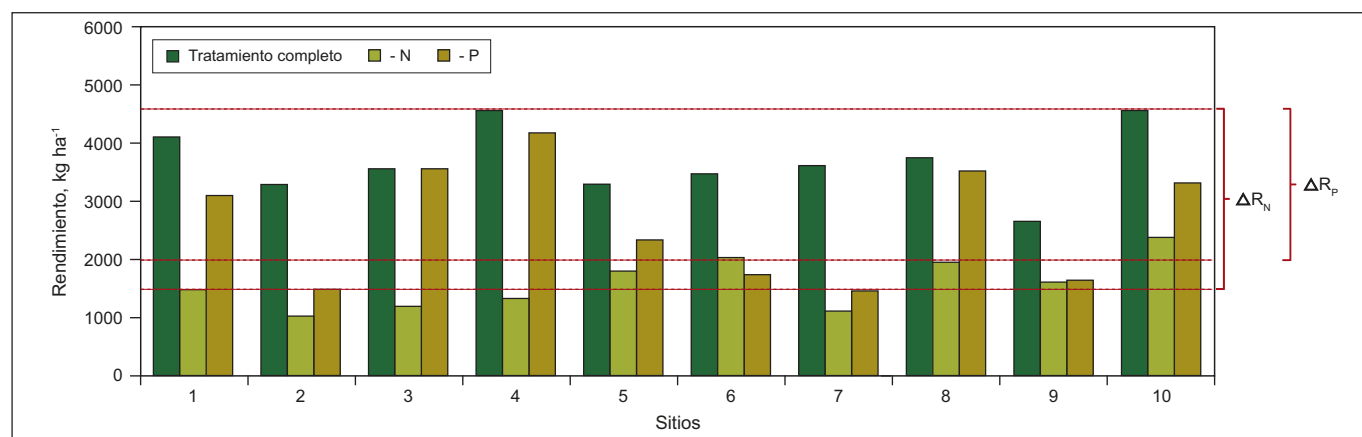


Figura 3. Rendimiento de maíz de 10 experimentos de campo en Alta Verapaz, Guatemala donde se comparó un tratamiento de fertilización balanceada con las parcelas de omisión de N y P (todos los nutrientes excepto el nutriente en cuestión). Se asume un rendimiento obtenible de 4500 kg ha⁻¹.

años anteriores. Una de las principales actividades durante este período fue el entrenamiento. Las sesiones de capacitación se llevaron a cabo para instruir primero a personal técnico del Programa, antiguo y nuevo, en la aplicación de las mejores prácticas de manejo que mostraron ser eficaces en el campo. A continuación el personal entrenado capacitó a los agricultores participantes y trabajó con ellos en el campo durante la siembra. Las diferencias entre los lotes de los agricultores que participaban en el programa y los lotes tradicionales se hicieron evidentes durante el ciclo de cultivo. Inmediatamente antes de la cosecha, el personal técnico brindó asistencia a los agricultores para mejorar la selección de semilla y se reforzó el entrenamiento, particularmente en distancias de siembra, control de plagas y enfermedades y manejo de nutrientes (Foto 5).

Se implementó también un proyecto piloto para desarrollar un Manual de Mejores Prácticas de Manejo del cultivo con el apoyo de la ENCA (Escuela Nacional Central de Agricultura). El manual se distribuyó entre el personal técnico y los agricultores. Después de la cosecha, el programa ayuda a los agricultores a vender su maíz a buen precio, cumpliendo de esta forma con uno de los principales objetivos del programa. El proceso de selección de nuevos participantes para la próxima temporada se inicia con la colaboración conjunta de técnicos y agricultores participantes.

Proceso de mejoras del hogar

HELPS International ha ofrecido un programa de mejoras para el hogar desde hace varios años en muchas áreas rurales. Las inadecuadas condiciones de vida prevalentes en muchos hogares de zonas rurales de América Central profundizan el ciclo de pobreza. Aproximadamente la mitad de los habitantes de zonas rurales de Guatemala aún cocinan con fuego abierto en el interior de sus casas. Como resultado, existe una alta posibilidad de que se acumulen niveles letales de monóxido de carbono dentro de la casa.

La principal causa de muerte de niños menores de 5 años son las enfermedades pulmonares contraídas en hogares con cocinas interiores de fuego abierto. Además, las mujeres deben pasar varias horas al día recogiendo leña, o gastar la mitad de sus ingresos para comprar leña. Además ellas tienen que cuidar la lumbre por 5 a 6 horas al día. Estas condiciones elevan el riesgo de desarrollar problemas en los ojos e incluso la intoxicación mortal con monóxido de carbono. Las mujeres embarazadas pueden tener bebés de bajo peso con potenciales problemas pulmonares.

La solución de HELPS International a este problema fue el desarrollo de la estufa ONIL. Se trata de una cocina de un diseño altamente eficiente que permite preparar los alimentos con una fracción muy pequeña de leña en



Foto 5. El entrenamiento a los agricultores incluye la capacitación en la identificación de síntomas visuales de deficiencias nutricionales.



Foto 6. Los filtros de agua ayudan a mejorar la salud de la familia.

comparación con una cocina a fuego abierto. La salud y los beneficios ambientales derivados del uso de la estufa ONIL son impresionantes. La financiación inicial de la Fundación Shell permitió que se inicie la manufactura de estas estufas en dos fábricas, una en Guatemala y otra en México. En la actualidad se han instalado alrededor de 80 000 estufas en Guatemala y México. Además de la estufa ONIL, otros artículos para mejorar la calidad de vida en el hogar son las estufas al aire libre, filtros de agua (Foto 6) y sistemas de energía solar. Los participantes del Programa de maíz en el 2009 y 2010 también estuvieron involucrados en este programa de mejoras. La instalación de estufas y filtros de agua en los hogares de los agricultores participantes en el Programa de Maíz fueron un reconocimiento por su compromiso.

La experiencia adquirida por HELPS International con el Programa de Maíz y con el de mejoras del hogar en el 2009 y 2010 será útil para desarrollar un enfoque más integrado para mejorar la vida familiar. Siguiendo este enfoque, los pasos a implementarse en el futuro son la mejor distribución del espacio en los hogares para mantener a los adultos y los niños en ambientes diferentes y establecer pequeños huertos para proporcionar una mejor nutrición para la familia y para enseñar prácticas agrícolas básicas. □

NIVELES DE MATERIA ORGÁNICA Y pH EN SUELOS AGRÍCOLAS DE LA REGIÓN PAMPEANA Y EXTRAPAMPEANA ARGENTINA

Hernán Sainz Rozas^{1,2}, Hernán E. Echeverría¹ y Hernán Angelini¹

Introducción

La materia orgánica del suelo (MO) es considerada un indicador de salud del mismo y su efecto positivo sobre la sostenibilidad del sistema productivo ha sido ampliamente documentado. Para un determinado ambiente, los niveles de MO más elevados se encuentran en pastizales naturales, y cuando estos sistemas son cultivados, se produce una rápida caída de la MO seguida por una declinación más lenta hasta un nuevo estado estable. El nivel de MO en dicho estado va a depender del clima, suelo y del manejo del mismo (labranzas, rotaciones, secuencias de cultivos agrícolas, fertilización). La intensificación de la actividad agrícola y la falta de rotaciones con pasturas ha producido un deterioro de los niveles de MO, los que en algunos casos, dependiendo del tipo de suelo y textura, presentan sólo el 50% de su nivel original (Álvarez, 2001; Lavado, 2006), lo que explica la respuesta generalizada al agregado de nitrógeno (N) (Echeverría y Sainz Rozas, 2007), en menor medida a azufre (S) (Reussi Calvo et al., 2008) y el desencadenamiento de problemas ambientales como la erosión de los suelos (Lavado, 2006).

El pH del suelo es una de las propiedades químicas más relevantes ya que controla la movilidad de iones, la

precipitación y disolución de minerales, las reacciones redox, el intercambio iónico, la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes. La remoción de bases (calcio, magnesio, potasio) sin reposición de las mismas, conlleva a una disminución en la saturación del complejo de intercambio y acidificación de suelos (Vázquez, 2005).

Por otra parte, la aplicación frecuente de fertilizantes también contribuye a la disminución del pH del suelo (Liebig et al., 2002), dependiendo dicho efecto de la capacidad tampón del mismo. El uso de fertilizantes fosfatados y nitrogenados se ha incrementado desde mediados de los 90, y en la actualidad, el consumo de fertilizantes (fosfatados mas nitrogenados) se ubica alrededor de 120 kg ha⁻¹ (Melgar, 2006). En suelos de Balcarce se han determinado caídas en los valores de pH en situaciones con aportes de N y fósforo (P) durante siete años (Fabrizzzi et al., 1998).

Si bien la MO y el pH del suelo son indicadores de la capacidad productiva del mismo, no se cuenta con información actualizada del estado de estas propiedades en suelos de la región pampeana y extrapampeana. Esta información es necesaria a los fines de evaluar el estado de deterioro de los mismos, con el objeto de implementar acciones correctivas tendientes a mejorar

Tabla 1. Número de muestras y estadísticos descriptivos del contenido de materia orgánica del horizonte superficial del suelo (0-20 cm) en provincias de la región pampeana y extrapampeana.

Provincia	No. de muestras	Promedio	Desvío estándar	Mínimo	Máximo	----- Percentil -----		
						0.25	0.50	0.75
----- % -----								
Buenos Aires	19 842	2.7	1.2	0.07	8.3	1.9	2.5	3.2
La Pampa	1122	1.6	0.6	0.5	5.2	1.2	1.5	1.9
Santa Fe	4439	2.7	0.6	0.5	6.5	2.3	2.7	3.0
Córdoba	3895	2.0	0.7	0.3	5.5	1.5	2.1	2.5
Santiago del Estero	220	2.5	0.4	1.6	5.0	2.2	2.4	2.6
Entre Ríos	1087	3.4	0.9	1.0	7.7	2.8	3.3	3.9
Salta	373	2.4	0.5	0.9	5.8	2.1	2.3	2.6
Tucumán	641	2.6	0.5	0.4	5.9	2.3	2.6	2.9

Fuente: Laboratorio Tecnoagro, laboratorio Suelofertil de ACA Pergamino, laboratorio ISETA de 9 de Julio, laboratorio Tecnosuelo NOA, laboratorio EEA INTA Oliveros, laboratorio EEA INTA Marcos Juárez, laboratorio EEA INTA Balcarce y laboratorio EEA INTA Anguil.

¹ Unidad Integrada Balcarce: EEA INTA - FCA UNMP

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), C. C. 276, (7620). Balcarce, Argentina. Correo electrónico: fertibalc@balcarce.inta.gov.ar

la capacidad productiva del sistema suelo. Los objetivos del presente trabajo fueron: i) Relevar los contenidos actuales de MO y el pH y mapear dichas variables en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana y extrapampeana; y ii) estimar el cambio en los contenidos de MO causados por la actividad agrícola en algunas áreas de la región pampeana.

Materiales y métodos

Para confeccionar los mapas de MO y pH se recopiló información de los laboratorios que trabajan bajo normas IRAM. El carbono (C) orgánico oxidable se determinó siguiendo la norma IRAM-SAGPyA 29571-2 la que se basa en la metodología propuesta por Walkley y Black (1934). La determinación de pH en todos los laboratorios que contribuyeron con datos se realizó siguiendo el mismo protocolo: se agregó agua a muestras de suelo secas al aire o a 30 °C y tamizadas a 2 mm en una relación suelo:agua de 1:2.5 (v:v), se mezcló y se dejó equilibrar por 1 hora. Transcurrido este tiempo la suspensión se agitó nuevamente y se midió el pH con el electrodo en posición vertical. Las muestras correspondieron al estrato superficial de 0-20 cm y fueron extraídas durante las campañas 2005 y 2006. El mayor número de muestras provino de las provincias de Buenos Aires, Santa Fe y Córdoba (**Tablas 1 y 3**). Las muestras con valores de pH superiores a 7.5 fueron eliminadas dado que estos suelos no fueron considerados apropiados para la mayoría de los cultivos agrícolas realizados en la región.

Los datos se agruparon por provincia y partido o departamento y se determinó el promedio, mediana, desvío estándar, valor mínimo, máximo y los percentiles. La normalidad de la distribución de los datos de MO y pH fue testeada utilizando la rutina Proc Univariate del programa Statistical Analysis System (SAS, 1985). Según el resultado de este análisis se utilizó el valor de la mediana de MO y pH de cada partido o departamento para la realización de los mapas. Para ello los rangos de valores de MO seleccionados fueron de 1.0 a 1.9; 2.0 a 2.9; 3.0 a 3.9; 4.0 a 4.9 y entre 5.0 y 6.5 %. Los rangos de valores de pH utilizados fueron de 5.5 a 5.9; 6 a 6.4 y de 6.5 a 7.5.

Para generar los mapas se utilizó el programa ESRI ArcMap (2009) con cartografía base correspondiente a la división política del país. Se generó un punto, latitud y longitud correspondiente al centro de cada partido o departamento, el cual se relacionó con el valor del estadístico utilizado. El método de interpolación utilizado para realizar los mapas de MO y pH fue el Kriging Ordinario (KO), el cual fue validado mediante el análisis de los valores predichos versus observados,

Tabla 2. Contenidos de materia orgánica en suelos prístinos y en suelos muestreados en 2005-2006 en algunas zonas de la región pampeana.

Provincia	Zona	Prístinos promedio	Actual promedio	Reducción respecto de condición prístina
Buenos Aires	Sudeste*	8.6 (1.8)	5.5 (0.9)	36.6
	Norte	5.0 (1.0)	2.9 (1.2)	42.0
Santa Fe	Sur	4.3 (1.1)	2.6 (0.5)	39.0
Córdoba	Sudeste	3.3 (0.8)	2.0 (0.6)	39.4
La Pampa	Este	3.4 (0.7)	1.6 (0.6)	53.0

* Valores entre paréntesis representan el desvío estándar.

los que se obtuvieron por validación cruzada (Villatoro et al., 2008). También se calculó la eficiencia de predicción (EP), la que estima que tan efectivo es el uso de una variable interpolada respecto del uso del promedio general de la misma (Schloeder et al., 2001). Un valor de 100 indica predicción perfecta y valores bajos o valores negativos indican que la estructura espacial es pobre y que no es viable realizar un muestreo intensivo para realizar un mapa.

Para evaluar los cambios en los contenidos de MO causados por la actividad agrícola en algunas zonas de la región pampeana, se compararon los datos promedios actuales con los promedios de MO de suelos en condición prístina. Las zonas o áreas evaluadas fueron: suroeste y sudeste de Córdoba, datos publicados por Cantú et al. (2007) y Ferreras et al. (2007) de los departamentos de Río Cuarto, Marcos Juárez y Unión, sur de Santa Fe, datos publicados por Ferreras et al. (2007) de los departamentos de Belgrano, Iriondo, San Lorenzo, Constitución, Gral. López y Caseros, norte de Buenos Aires, datos publicados por Vázquez et al. (1990) y Ferreras et al. (2007), de los partidos de Pergamino, Gral. Arenales y Salto, sudeste de Buenos Aires, datos publicados por Urquieta (2008) de los partidos de Azul, Tandil, Benito Juárez, Lobería, Balcarce, Gral. Pueyrredón y Gral. Alvarado, y noreste y centro-este de La Pampa, datos publicados por López et al. (2007) de los departamentos de Conhelo, Quemú Quemú, Toay, Capital, Catrilo y Atrreuco.

Resultados y discusión

Materia orgánica

El análisis de la distribución de los datos (n = 31619) indicó una ligera desviación desde la normalidad (P < 0.07), por lo que los valores promedio fueron ligeramente mayores a la mediana (Tabla 1). Por lo tanto, los mapas resultantes de interpolar con ambos estadísticos fueron similares (datos no mostrados). La relación entre valores predichos por el KO y observados fue significativa (P < 0.05), con ordenada al origen y pendiente no diferentes de 0 y 1, respectivamente ($y = 0.98x$, $r^2 = 0.80$). Los mayores errores de predicción del KO se determinaron en la zona norte de la provincia de Santa Fe, norte de Santiago del Estero y en algunas zonas de Salta (Figura 1), lo que puede ser atribuido a la baja cantidad de departamentos relevados en dichas zonas. No obstante, la EP calculada fue del 80%, valor considerado aceptable para la aplicación de métodos de interpolación (Villatoro et al., 2008).

Los contenidos de MO disminuyeron de este a oeste y de sur a norte del área relevada, con valores de MO que variaron de 1.0 hasta 6.5%, según zonas. Como se mencionó, los valores más bajos se determinaron al oeste de Buenos Aires, este de La Pampa y sur-suroeste de Córdoba, y los más elevados al sudeste de Buenos

Aires (Figura 2), provincia que presentó la mayor variación en los niveles de MO (Tabla 1). A nivel regional, los niveles de MO de suelos prístinos están regulados por el clima, dado que el mismo incide en el balance de C al afectar el ingreso del mismo al suelo y su salida por respiración microbiana (Álvarez y Steinbach, 2006). Por lo tanto, la caída de los niveles de MO hacia el oeste de la región se asocia a la disminución de la precipitación media anual, mientras que la disminución de los niveles de MO hacia el norte de la región se relaciona con el aumento de la temperatura media (Álvarez y Steinbach, 2006). Además, la MO también se incrementa al aumentar la proporción de arcillas por una mayor protección contra el ataque microbiano (Six et al., 2002) y por mayor disponibilidad de agua. Por lo tanto, la variación de textura del horizonte superficial contribuiría también a explicar la disminución de MO este-oeste. Los contenidos de MO de los suelos del este de La Pampa oscilaron de 1.0 a 1.9% (Figura 1) y son similares a los reportados por Romano y Roberto (2007) para dicha área en un relevamiento realizado durante el período 2004-2006.

Los niveles de MO de suelos prístinos tomados de la bibliografía para diferentes zonas de la región pampeana (Tabla 2) fueron similares a los determinados (datos no

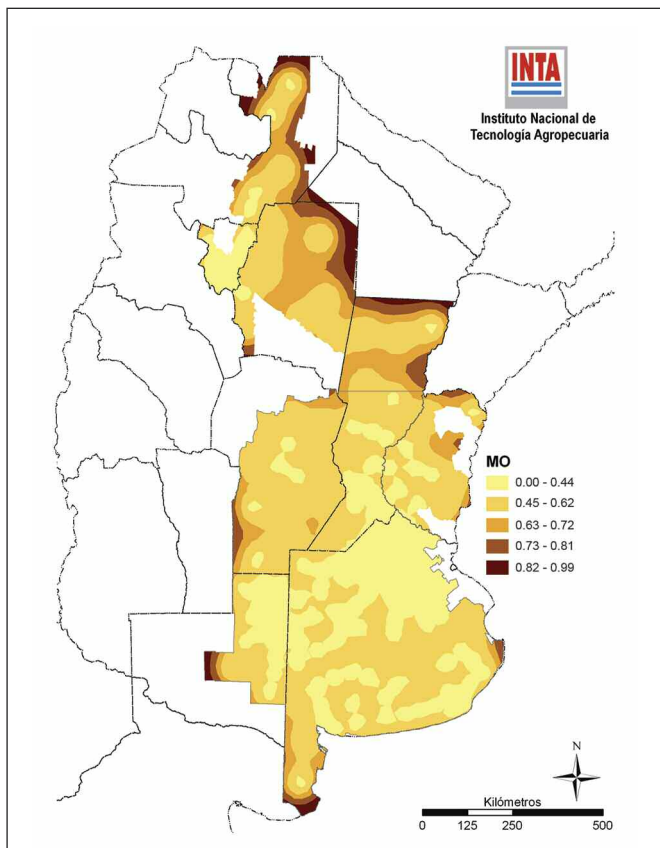


Figura 1. Mapa del error estándar del valor estimado de materia orgánica (MO, %) por el método Kriging para suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana.

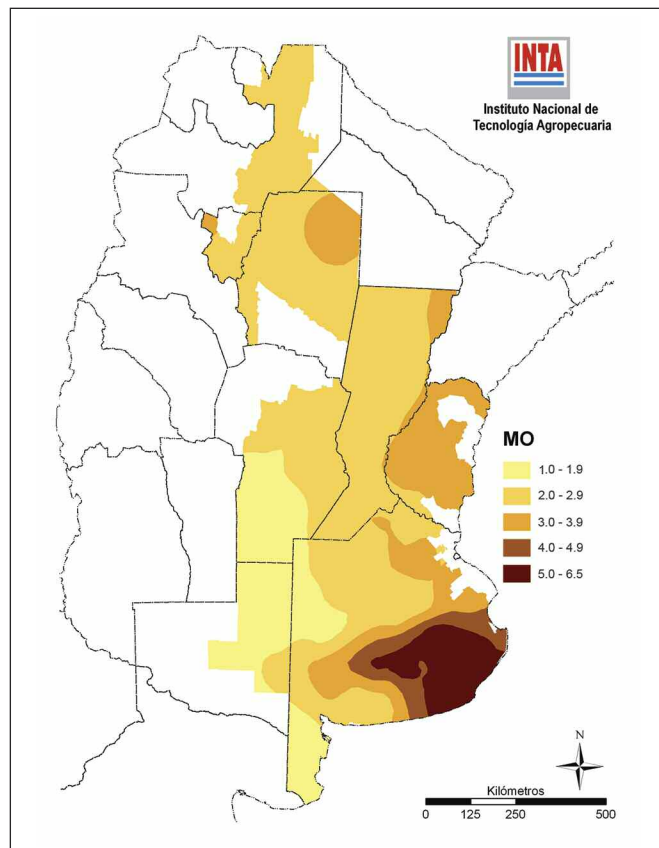


Figura 2. Rangos de valores de mediana del contenido de materia orgánica (MO, %) del horizonte superficial (0-20 cm) de suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana. Interpolación realizada con el método Kriging.

mostrados) utilizando el modelo desarrollado por Álvarez y Steinbach (2006), el cual incluye temperatura media, precipitaciones y textura del horizonte superficial como variables explicativas del nivel de MO en condición prístina. Por lo tanto, es factible que los valores de MO de suelos prístinos tomados de la bibliografía sean representativos de la condición inicial, a pesar de que no se contó con un elevado número de sitios. La reducción de los niveles de MO respecto de la condición prístina osciló del 36 al 53% según zonas

(Tabla 2), valores similares a los reportados por otros autores (Álvarez, 2001; Lavado, 2006). La menor caída se determinó para la región sudeste de Buenos Aires y la mayor para los suelos del este de La Pampa (Tabla 2). La mayor disminución detectada para esta región se explicaría en parte por la textura más gruesa de estos suelos, la que determina una menor protección de la MO (Six et al., 2002). Las elevadas caídas de MO determinadas en el norte de Buenos Aires, Sur de Santa Fe y sudeste de Córdoba se podrían asociar a la

prolongada historia agrícola de los suelos de esta área y a la elevada frecuencia del cultivo de soja en la rotación (Casas, 2003). Es válido destacar que las fracciones de la MO que se reducen en mayor medida son las más lábiles, las que son muy importantes para promover la estabilidad de los agregados y proveer N a través de la mineralización (Studdert et al., 1997; Six et al., 2002). Para el horizonte superficial de un suelo franco la disminución de un 1% de MO implica la pérdida de 1000 a 1400 kg de N ha⁻¹ y de 80 a 120 kg de P y S ha⁻¹ (García et al., 2006; Echeverría, 2007), lo que pone de manifiesto la incidencia de la pérdida de MO sobre las reservas de nutrientes en el suelo.

El contenido de MO de un suelo es definido por el balance entre ingresos (básicamente residuos vegetales) y salidas de C (mineralización). Por lo tanto, todas las acciones que incrementen la entrada de C al suelo (rotación con pasturas, elevada frecuencia de cultivos con altos aportes de C, adecuada fertilización, riego, etc.) asociadas a labranzas que minimicen la salida de C (labranzas conservacionistas) incrementarán el contenido de C del suelo.

En el sudeste de Buenos Aires, Studdert et al. (2010) reportaron que las caídas de C orgánico total (COT) y particulado (COP) en suelo disminuyeron rápidamente desde la salida de la pastura, particularmente bajo labranza convencional, y que ambas fracciones se incrementaron rápidamente (3 años) con la inclusión de una pastura en la rotación (Figura 3). Para la misma

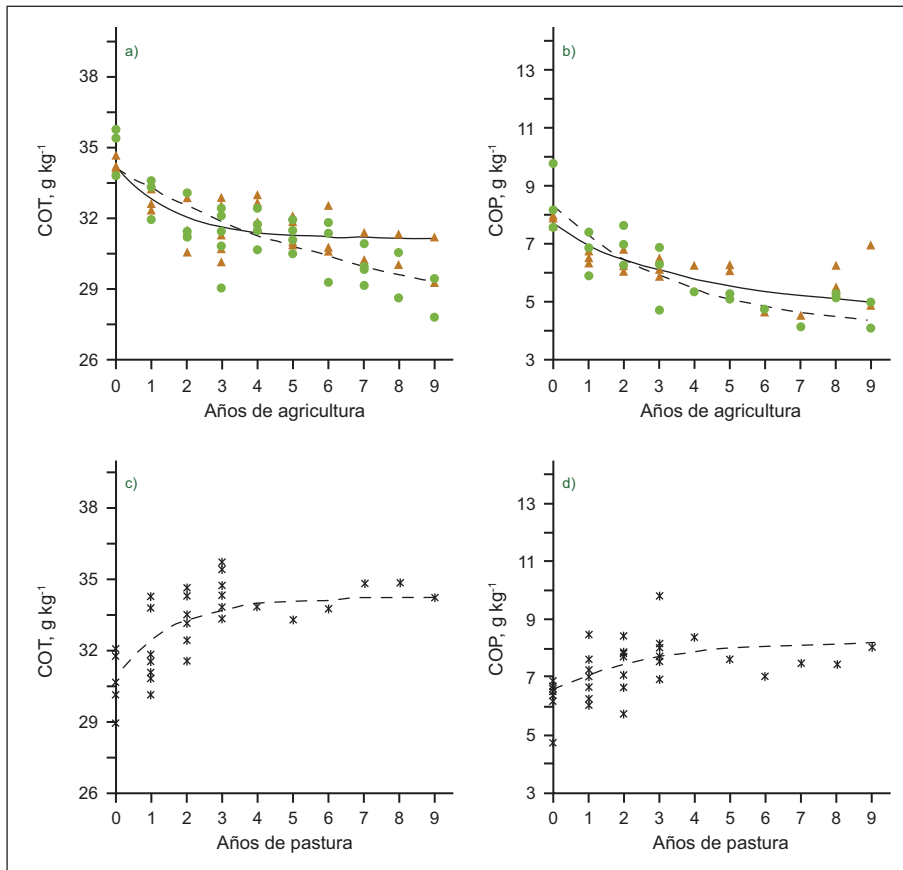


Figura 3. Evolución del contenido de carbono orgánico total (COT) (a) y particulado (COP) (b) en función de los años de agricultura para siembra directa (triángulos) y labranza convencional (círculos), y del COT y COP en función de los años bajo pastura mixta de gramíneas y leguminosas (c y d, respectivamente). Adaptado de Studdert et al. (2010).

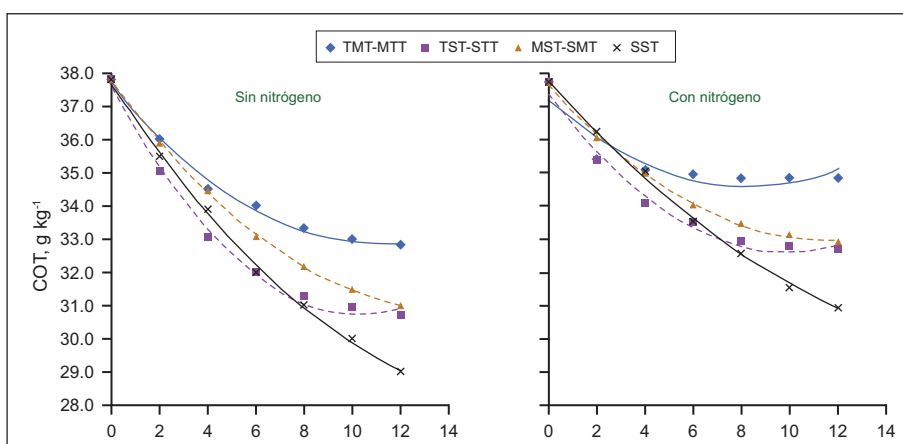


Figura 4. Evolución del contenido de carbono orgánico total (COT) para distintas rotaciones de cultivos sin y con fertilización nitrogenada; T = trigo, S = soja, M = maíz. Adaptado de Domínguez et al. (2007).

Tabla 3. Número de muestras y estadísticos descriptivos del pH del horizonte superficial del suelo (0-20 cm) en provincias de la región pampeana y extrapampeana.

Provincia	No. de muestras	Promedio	Desvío estándar	Mínimo	Máximo	----- Percentil -----		
						0.25	0.50	0.75
Buenos Aires	19 094	6.22	0.44	4.40	7.50	5.90	6.20	6.50
La Pampa	1007	6.52	0.45	5.25	7.50	6.20	6.50	6.80
Santa Fe	4802	6.03	0.36	5.00	7.50	5.80	6.00	6.20
Córdoba	3960	6.20	0.44	5.10	7.50	5.90	6.20	6.40
Santiago del Estero	231	6.80	0.38	5.81	7.50	6.51	6.80	7.10
Entre Ríos	1191	6.34	0.53	4.20	7.50	5.90	6.30	6.70
Salta	439	6.71	0.52	5.03	7.50	6.34	6.78	7.13
Tucumán	674	6.35	0.58	4.97	7.50	5.92	6.35	6.78

Fuente: Laboratorio Tecnoagro, laboratorio Suelofertil de ACA Pergamino, laboratorio ISETA de 9 de Julio, laboratorio Tecnosuelo NOA, laboratorio EEA INTA Oliveros, laboratorio EEA INTA Marcos Juárez, laboratorio EEA INTA Balcarce y laboratorio EEA INTA Anguil.

zona, Domínguez et al. (2007) reportaron menores caídas de COT desde la salida de la pastura en la medida que aumentó la frecuencia de gramíneas y cuando las mismas fueron fertilizadas con N (Figura 4). Estos resultados muestran que la inclusión de pasturas incrementa rápidamente el COT y COP y que la agricultura produce una rápida caída de ambas fracciones del C. No obstante, los ciclos bajo agricultura podrían prolongarse con la adopción de labranzas conservacionistas como la SD y con combinaciones de cultivos de elevada frecuencia de gramíneas adecuadamente fertilizadas.

Reacción del suelo

El análisis de la distribución de los datos (n = 31398) no indicó desviación desde la normalidad (P > 0.10), por lo que los valores promedio fueron iguales a la mediana en la mayoría de las provincias relevadas (Tabla 3) y a nivel de partido (datos no mostrados). Por lo tanto, y de manera análoga a MO, se optó por la mediana para la realización del mapa. La relación entre valores predichos y observados fue significativa (P < 0.05), con ordenada al origen y pendiente diferentes de 0 y 1, respectivamente ($y = 2.19 + 0.65x$, $r^2 = 0.66$). No obstante, la EP fue del 67%, valor considerado aceptable para la aplicación de métodos de interpolación (Villatoro et al., 2008). La pendiente menor a uno indica que el método de interpolación subestimó el pH para valores elevados del mismo. Los mayores errores de predicción del KO se determinaron en zonas como el norte de la provincia de Santa Fe, norte de Santiago del Estero y en algunas zonas de Salta (Figura 5), lo que puede ser atribuido a la baja cantidad de departamentos relevados.

Los suelos de la mayor parte de los partidos o departamentos relevados en las provincias de Buenos

Aires, La Pampa, Santa Fe, Córdoba, Entre Ríos, Santiago del Estero, Salta y Tucumán presentaron valores de pH dentro del rango de 6 a 7.5 (Figura 6), los cuales son considerados óptimos para el crecimiento de los principales cultivos de la región. Sólo algunos partidos del norte de Buenos Aires (Baradero, Ramallo, San Nicolás, Mercedes, Chacabuco, Pergamino, Colón, Junín) y centro, centro-sur de Santa Fe (San Martín, San Jerónimo, Belgrano, Iriondo, San Lorenzo, Caseros, Rosario y Constitución) y este de Córdoba mostraron valores de pH en el rango de 5.5-6 (Figura 6). Estos bajos valores de pH podrían ser explicados por la mayor exportación de bases de esta área respecto de otras regiones agrícolas (Cruzate y Casas, 2003). Es probable también que la mayor acidez de los suelos de esta zona se asocie a una prolongada historia de aplicación de fertilizantes nitrogenados. Para el sudeste de Buenos Aires, Fabrizzi et al. (1998) reportaron descensos de hasta 0.3 unidades de pH para aplicaciones anuales de 120 kg N ha⁻¹. El alto contenido de MO confiere a los suelos del sudeste bonaerense una alta capacidad de resistir procesos de acidificación. Principalmente, este efecto obedece a la presencia de grupos funcionales en la superficie de la MO que permiten el intercambio de H⁺ con la solución del suelo (Wong y Swift, 2003). De este modo, los suelos del sudeste bonaerense presentarían una mayor tolerancia a la acidificación ante similares dosis de fertilización con N respecto de los suelos de la pampa ondulada. El proceso de acidificación sería más intenso en los estratos superficiales del suelo (0-5 cm), zona en la cual se realiza habitualmente la localización de los fertilizantes nitrogenados (Divito et al., 2011).

Los valores de pH determinados en el este de la provincia de La Pampa son similares a aquellos reportados por Romano y Roberto (2007) en un

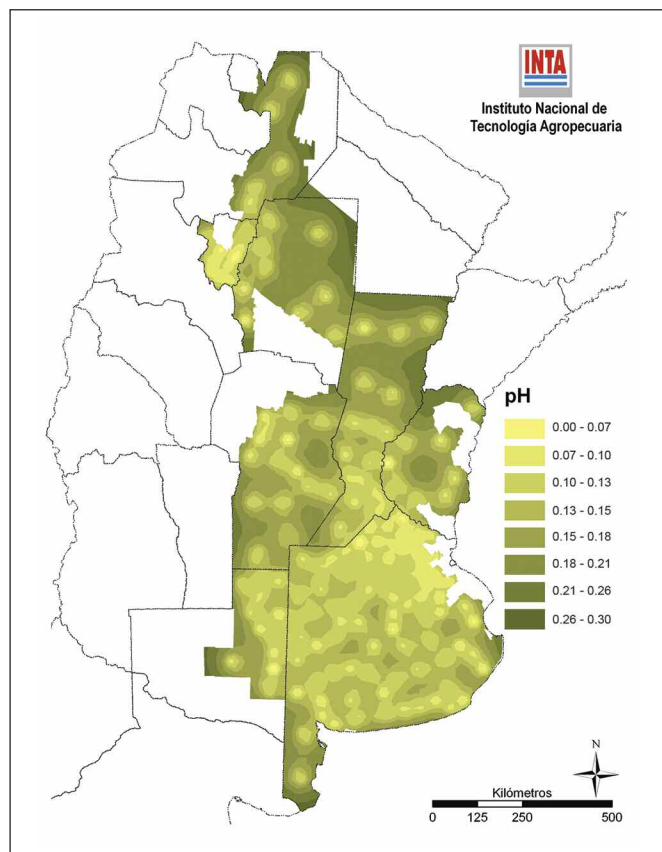


Figura 5. Error estándar del valor estimado de pH por el método Kriging para suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana.

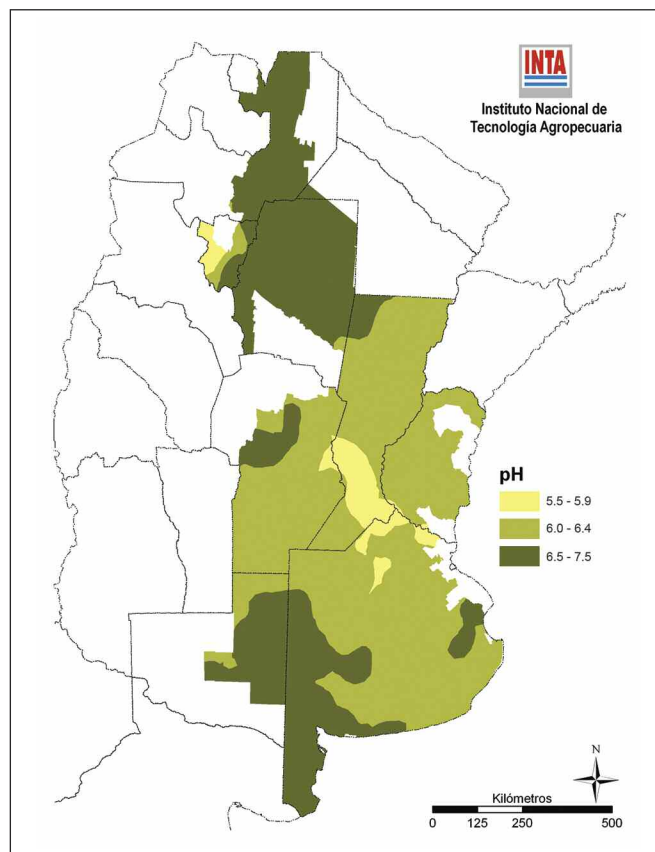


Figura 6. Rango de valores de mediana de pH del horizonte superficial (0-20 cm de profundidad) de suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana. Interpolación realizada con el método Kriging.

relevamiento realizado durante el período 2004-2006.

Conclusiones

Los mayores valores de MO se determinaron en el sudeste de la región pampeana y los valores más bajos hacia el oeste y norte de dicha región. Los contenidos actuales representan entre el 47 al 63% de los originales, lo que marca la necesidad de implementar prácticas de manejo de suelo y cultivo que aumenten el ingreso de C para revertir este proceso de degradación.

En general, el pH de los suelos no sería limitante para la producción de los cultivos extensivos en la mayor parte del área relevada, pero se pueden presentar potenciales problemas de acidez en áreas específicas.

Agradecimientos

A los que aportaron información sobre los análisis de suelos: José Lamelas y Luis Berasategui (Tecnoagro), Roberto Rotondaro (Suelofertil), Graciela Cordone (INTA Casilda), Carlos Galarza (INTA Marcos Juárez), Alfredo Bono (INTA Anguil), Juan Galantini (UNS), Luis Ventimiglia (INTA 9 de Julio), Sebastián Gambaudo (INTA Rafaela) y Laboratorio Tecnosuelo del NOA. Este trabajo fue financiado con fondos del proyecto INTA AERN 295561 y AGR 319/10 de la UNMP.

Bibliografía

- Álvarez, R., y H.S. Steinbach. 2006. Factores climáticos y edáficos reguladores del nivel de materia orgánica. En: *Materia Orgánica "Valor Agronómico y Dinámica en Suelos Pampeanos"* (ed. R Álvarez). Editorial. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. pp. 31-40.
- Álvarez, R. 2001. Estimation of carbon losses by cultivation from soils of the Argentine Pampa using the Century Model. *Soil Use and Management*. 17:62-66.
- Cantú, M.P., A. Becker, J.C. Bedano, y H.F. Schiavo. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo* 25:173-178.
- Casas, R.R. 2003. Sustentabilidad de la agricultura en la región pampeana. <http://www.inta.gov.ar>
- Cruzate, G., y R. Casas. 2003. Balance de nutrientes. *Fertilizar*. Año 8. Número especial "Sostenibilidad" Diciembre 2003. pp. 7-13.
- Divito, G.A., H.R. Sainz Rozas, H.E. Echeverría, y G.A. Studdert. 2011. Long term nitrogen fertilization: soil property changes in an Argentinean papas soil under no tillage. *Soil & Tillage Research* (En prensa).
- Domínguez, G.F., G.A. Studdert, y H.E. Echeverría.

2007. Propiedades del suelo: Efectos de las prácticas de manejo. En: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. H.E. Echeverría y F.O. García (eds.). Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. pp. 207-229.
- Echeverría, H.E., y H. Sainz Rozas. 2007. Nitrógeno. En: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. H.E. Echeverría y F.O. García (eds.). Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. pp. 69-97.
- Echeverría, H.E. 2007. Azufre. En: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. H.E. Echeverría y F.O. García (eds.). Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. pp. 139-160.
- ESRI ArcMap 9.2, 2009. Licencia 37142261_v9 del set ArcGIS Desktop.
- Fabrizzi, K.P., L. Picone, A. Berardo, y F.O. García. 1998. Efecto de la fertilización nitrogenada y fosfatada en las propiedades químicas de un Argiudol Típico. *Ciencia del Suelo*. 16:71-76.
- Ferreras, L., G. Magra, P. Besson, y F.O. García. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la región pampeana norte de argentina bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo*. 25:159-172.
- García, F.O. 2003. Agricultura sustentable y materia orgánica del suelo: siembra directa, rotaciones y fertilidad. III Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. 17-19 Septiembre. Actas en CD.
- García, F.O., L.I. Picone, y A. Berardo. 2006. Fósforo. En: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. H.E. Echeverría y F.O. García (eds.). Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. pp. 99-121.
- Lavado, R. 2006. La región Pampeana: Historia, características y uso de sus suelos. En: *Materia Orgánica "Valor Agronómico y Dinámica en Suelos Pampeanos"* (ed. R. Álvarez). Editorial. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. pp. 1-12.
- Liebig, M.A., G.E. Varvel, J.W. Doran, y B.J. Wienhold. 2002. Crop sequence and nitrogen fertilization effects on soil properties in the western corn belt. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:596-601.
- López, M.V., J.M. de Dios Herrero, G.G. Hevia, R. Gracia, y D.E. Buschiazzo. 2007. Determination of the wind-erodible fraction of soils using different methodologies. *Geoderma*. 139:407-411.
- Melgar, R. 2006. El mercado de fertilizantes en la Argentina y su relación con el sector agropecuario. En: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. H.E. Echeverría y F.O. García (eds.). Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. pp. 489-502.
- Reussi, Calvo N.I., H.E. Echeverría, y H.R. Sainz Rozas. 2008. Usefulness of foliar nitrogen-sulfur ratio in spring red wheat. *Journal of Plant Nutrition*. 31:1612-1623.
- Romano, N., y M. Roberto. 2007. Contenido de fósforo extractable, pH y materia orgánica en los suelos del este de la provincia de La Pampa. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 33:1-6.
- SAS Institute, Inc. 1985. User's guide. Statistics. Version 5. SAS Institute, Inc., Cary, NC.
- Schloeder, CA; NE Zimmerman y MJ Jacobs. 2001. Comparison of methods for interpolating soils properties using limited data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:470-479.
- Six, J., R.T. Conant, E.A. Paul, y K. Paustian. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*. 241:155-176.
- Studdert, G.A., H.E. Echeverría, y E.M. Casanovas. 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic Argiudoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1466-1472.
- Studdert, G.A., G.F. Domínguez, M. Agostini, y G. Monterubbianesi. 2010. Cropping systems to manage southeastern pampas' Mollisols health. I. Organic C and mineralizable N. *New Advances in Research and Management of World Mollisols Proceedings of International Symposium on Soil Quality and Management of World Mollisols*. July 13-16, 2010, Harbin, China.
- Urquieta, J.F. 2008. Nitrógeno potencialmente mineralizable anaeróbico en suelos del sudeste bonaerense y su relación con la respuesta a nitrógeno en trigo. Tesis ingeniero agrónomo, Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, Argentina.
- Vázquez, M.E. 2005. Calcio y Magnesio, acidez y alcalinidad del suelo. En: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos (ed HE Echeverría y FO García). Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. pp. 161-188.
- Vázquez, M.E., L.A. Berasategui, E.R. Chamorro, L.A. Tanquini, y L.A. Barberis. 1990. Evolución de la estabilidad estructural y diferentes propiedades químicas según el uso de los suelos en tres áreas de la pradera pampeana. *Ciencia del Suelo*. 8:203-210.
- Villatoro, M., C. Enríquez, y F. Sancho. 2008. Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, CA, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*. 32:95-105.
- Walkley, A., y Y. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37:29-37.
- Wong, M.T.F., y R.S. Swift. 2003. Role of Organic Matter in Alleviating Soil Acidity. In: Rengel, Z. (Ed.). *Handbook of Soil Acidity*. Marcel Dekker. New York. USA. pp. 337-358. □

CALIBRACIÓN DE ANÁLISIS DE SUELOS PARA POTASIO EN CAFÉ A PARTIR DE RESULTADOS OBTENIDOS EN UNA LOCALIDAD

Siavosh Sadeghian Khalajabadi¹ y Víctor Hugo Álvarez Venegas²

Introducción

El potasio (K), junto con el nitrógeno (N), constituyen los dos nutrientes de mayor demanda por el cultivo de café. Bajo condiciones de la zona cafetera central de Colombia, una planta extrae cerca de 130 g de K durante 5.5 años después de la siembra; cantidad que equivale a 508 kg ha⁻¹ de este elemento (Riaño et al., 2003). Parte de esta cantidad retorna al suelo en forma de hojas, raíces y tallos, pero otra parte se exporta a través de la cosecha. De acuerdo a Sadeghian et al. (2006), por cada 1000 kg de café almendra, equivalentes a 5625 kg de café cereza, se extraen 37 kg de K; por lo tanto, en las plantaciones adensadas y a plena exposición solar, donde la producción es alta (5000 kg de café pergamino seco), se exportan anualmente 180 kg de K₂O por ha. Para suplir las anteriores exigencias, muchos caficultores aplican más de 300 kg de K₂O ha⁻¹ año⁻¹, cantidad que puede resultar elevada cuando el suelo cuenta con suficientes reservas; de allí que se sugiere ajustar los planes de fertilización con base en los resultados de los análisis de suelos. Para generar las anteriores recomendaciones, se desarrollan investigaciones específicas en varias localidades de una región o país (se recomienda más de 20 sitios), contrastantes en su fertilidad, con el fin de calibrar la respuesta del cultivo con respecto al contenido del elemento en el suelo (Nelson, 1999). Dichos estudios son costosos y tienden a ser generales, razón por la cual Álvarez (1996) propone una nueva metodología para calibrar los análisis de suelos, partiendo de los resultados obtenidos en un solo sitio. Este procedimiento, desarrollado en la Universidad Federal de Viçosa (Minas Gerais, Brasil), permite definir los rangos de fertilidad y generar las respectivas recomendaciones de fertilizantes.

El propósito de este trabajo consistió en calibrar el análisis de suelos para K en café a partir de resultados obtenidos en una localidad.

Materiales y métodos

Para cumplir con el objetivo propuesto, se utilizaron parte de los resultados de una investigación en la que se determinó la respuesta de café a la fertilización con K. Este experimento se llevó a cabo durante los años 2000 y 2004 en la finca La Siria, ubicada en el municipio de Quimbaya (departamento de Quindío), a 1400 m.s.n.m. y 2400 mm de lluvia por año. Los tratamientos consistieron en cuatro dosis de K (0, 100, 200 y 400 kg de K₂O ha⁻¹ año⁻¹), suministradas como KCl (60% de K₂O) en los meses de febrero y agosto, junto con el N (240 kg ha⁻¹ año⁻¹) y el P (80 kg de P₂O₅ ha⁻¹ año⁻¹). Se utilizó el diseño de bloques completos al azar con cinco repeticiones. Cada parcela experimental estaba conformada por 60 plantas de café Variedad Colombia (32 efectivas y 28 bordes), las cuales habían sido sembradas a 1 m x 1 m en el año 1998. El suelo de la finca correspondió a la unidad cartográfica Montenegro,

clasificado como un Fulvudand con los siguientes atributos en los primeros 20 cm de profundidad al iniciar el experimento: pH 4.63, C orgánico 70 g kg⁻¹, K 0.51 cmol_c kg⁻¹, Ca 2.1 cmol_c kg⁻¹, Mg 0.9 cmol_c kg⁻¹, Al 0.9 cmol_c kg⁻¹, S 28.3 mg kg⁻¹, P 17.9 mg kg⁻¹ y textura FA. Se recolectó el café cereza en cada uno de los pases a través de tiempo y se totalizó la producción por año. Para valorar el efecto de los tratamientos sobre el contenido de K en el suelo, se tomaron muestras por parcela experimental seis meses después de haber realizado por última vez la aplicación de los tratamientos (febrero de 2004); asimismo, durante el año 2003 se analizó la concentración foliar de K durante la cosecha.

Para la calibración se utilizó la metodología propuesta por Álvarez (1996). Inicialmente se corroboró, mediante el análisis de varianza, el efecto de los tratamientos sobre las variables de respuesta (producción de café, contenido de K en el suelo – extraído con acetato de amonio 1 N pH 7.0 – y concentración de K en hojas); posteriormente, se generaron las ecuaciones de regresión para dichas variables en función de las dosis aplicadas, corroborando la significancia de los parámetros de cada modelo. Se calculó la dosis de K para la máxima producción (óptimo biológico) y el óptimo económico, y se determinó el nivel crítico de K a partir de cada uno de estos valores.

Se calculó el rendimiento relativo (RR) para cada dosis de K, a partir de la ecuación de producción en función de la cantidad aplicada, mediante la siguiente fórmula:

$$RR (\%) = \frac{\text{Producción con dosis } X_i}{\text{Producción máxima}} \times 100$$

Se expresó el RR de cada dosis en función del respectivo contenido de K en el suelo (datos obtenidos a partir de la ecuación de regresión), con el fin de generar un modelo, a partir del cual se establecieron las clases de fertilidad y los

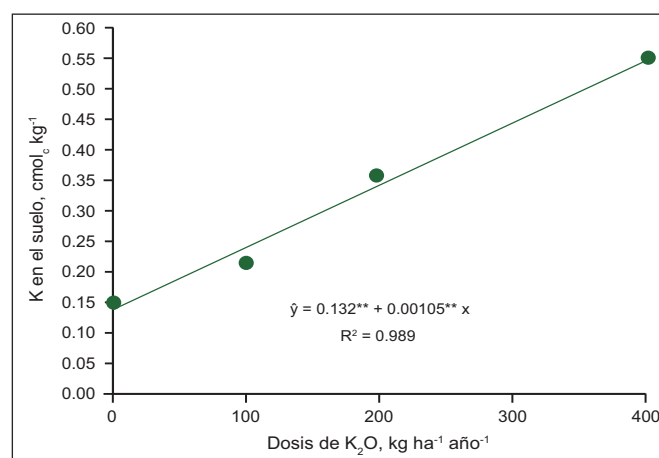


Figura 1. Contenido de K en el suelo, en respuesta a las dosis de K.

¹ Investigador. Disciplina de Suelos, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Colombia. Correo electrónico: siavosh.sadeghian@cafedecolombia.com

² Investigador. Departamento de Suelos, Universidad Federal de Viçosa, MG, Brasil. Correo electrónico: vhav@ufv.br

respectivos rangos, de acuerdo a lo sugerido por Havlin et al. (1999). Por último, se calcularon las dosis recomendadas a partir del tenor de K disponible en el suelo y la pendiente de la recta de recuperación del K por el método de análisis (K recuperado/K₂O adicionado), así:

$$\text{Dosis recomendada} = \frac{\text{Nivel crítico de K} - \text{K disponible}}{\text{Tasa de recuperación de K}}$$

Adicionalmente, se generó una ecuación para expresar de forma continua la dosis de K en función de su contenido en el suelo.

Resultados y discusión

En el tratamiento testigo, el contenido de K en el suelo se redujo en 0.36 cmol_c kg⁻¹ luego de cuatro años, pues pasó de 0.51 cmol_c kg⁻¹ a 0.15 cmol_c kg⁻¹. A partir de este punto, y con la aplicación de los tratamientos, los contenidos de K se incrementaron de manera lineal conforme a las dosis suministradas (Figura 1), hasta alcanzar niveles superiores a los detectados al iniciar el estudio (0.55 cmol_c kg⁻¹); en este sentido, por cada 100 kg de K₂O ha⁻¹ año⁻¹, el tenor de K se incrementó en 0.105 cmol_c kg⁻¹.

Durante los dos primeros años no se registró efecto significativo de la aplicación de K en la producción de café, tendencia que se modificó para los dos periodos siguientes y el acumulado de los cuatro ciclos productivos (Tabla 1). La falta de respuesta inicial a los tratamientos se relacionó con los altos contenidos de K en el suelo al comenzar el estudio (0.51 cmol_c kg⁻¹).

Para el promedio de la producción de café pergamino seco (c.p.s.), el comportamiento de la respuesta a la fertilización potásica, se ajustó a un modelo cuadrático (Figura 2). De acuerdo a la ecuación de regresión, el punto de máxima producción (5949.5 c.p.s.) se logró con la aplicación de 272.7 kg de K₂O ha⁻¹ año⁻¹, y el óptimo económico (5946.6 kg de c.p.s.) con 259.3 kg de K₂O ha⁻¹ año⁻¹†. Duque y Mestre (1999) justifican la poca diferencia entre los óptimos físicos y económicos en café con el hecho que la relación entre el precio del fertilizante y el del café es muy pequeña (0.226 con precios de 1999); aclarando que esta situación normalmente no se observa en la agricultura.

Al sustituir la dosis óptima para alcanzar la máxima producción (272.7) en la ecuación del tenor de K en función

de las dosis adicionadas ($\hat{y} = 0.132 + 0.00105 \times 272.7$), se encontró un nivel crítico para K de 0.42 cmol_c kg⁻¹. Cuando se realizó el mismo procedimiento con la dosis óptima económica (259.3), el nivel crítico fue 0.40 cmol_c kg⁻¹. En este caso los valores obtenidos son similares, lo cual se debe a la poca diferencia entre las anteriores dosis óptimas: sin

niveles críticos. Por lo anterior, surge la duda si se debería modificar el nivel crítico a través del tiempo por las variaciones en los precios de los productos, o si más bien

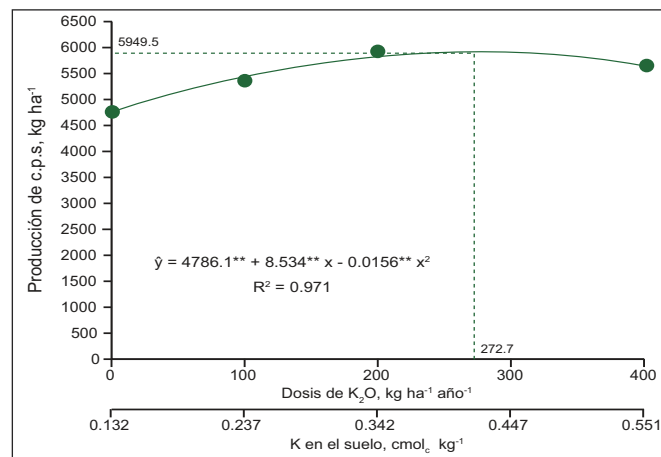


Figura 2. Producción de (c.p.s.), en respuesta a la fertilización con K.

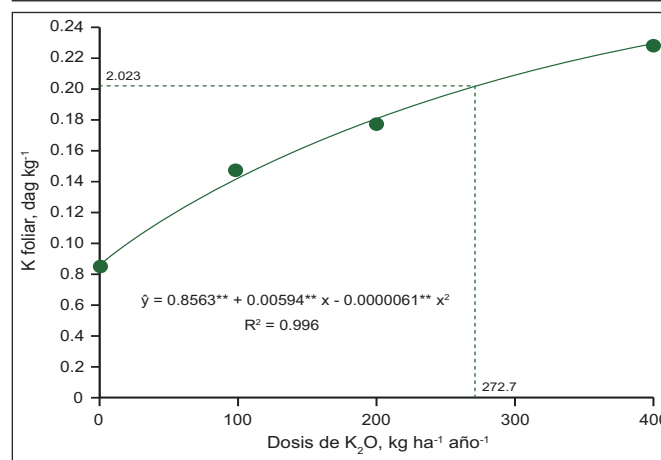


Figura 3. Concentración foliar de K en función del suministro de K.

Tabla 1. Producción de café pergamino seco*, en respuesta a la fertilización con dosis crecientes de K.

Dosis de K ₂ O kg ha ⁻¹ año ⁻¹	---- Año 2001 ----		---- Año 2002 ----		---- Año 2003 ----		---- Año 2004 ----		--- Acumulado ---	
	Promedio	CV	Promedio	CV	Promedio	CV	Promedio	CV	Promedio	CV
0	209	28	7937	11	7496	16	3666	40	19 308	16
100	263	30	8268	7	8532	5	4432	11	21 496	4
200	242	29	8734	4	9894	5	4924	8	23 794	4
400	291	41	8578	12	9170	12	4690	9	22 728	9

* Se calculó con base en el promedio del factor de conversión 1:4.5 de café cereza: c.p.s., obtenido en el estudio.
CV: coeficiente de variación.

† Cálculo obtenido para los siguientes precios: kg de K₂O = \$ 2333 (1.2 dólares) y kg de c.p.s. = \$ 5600 (2.8 dólares).

Tabla 2. Dosis recomendadas de K, según valores promedios de K en el suelo para cada clase de fertilidad.

RR	Clase	Límite de clase	Valor promedio	Dosis recomendada
%		----- cmol _c kg ⁻¹ -----		kg de K ₂ O ha ⁻¹ año ⁻¹
< 70	Baja	< 0.10	0.05	351
70 - 90	Media	0.10 - 0.20	0.15	256
90 - 100	Alta	0.21 - 0.40	0.30	113
> 100	Muy alta	> 0.40	> 0.40	< 17

cafeteros de Colombia, en donde se ha evaluado el efecto de K en la producción. En general, los rangos encontrados en este trabajo coinciden con los obtenidos en un estudio reciente de calibración, desarrollado por Sadeghian (2009) en 32 localidades de la zona cafetera de Colombia, en el cual se encontró un nivel crítico para K de 0.20 cmol_c kg⁻¹ (RR = 90%), y un nivel de suficiencia de 0.48 cmol_c kg⁻¹ (RR = 100%).

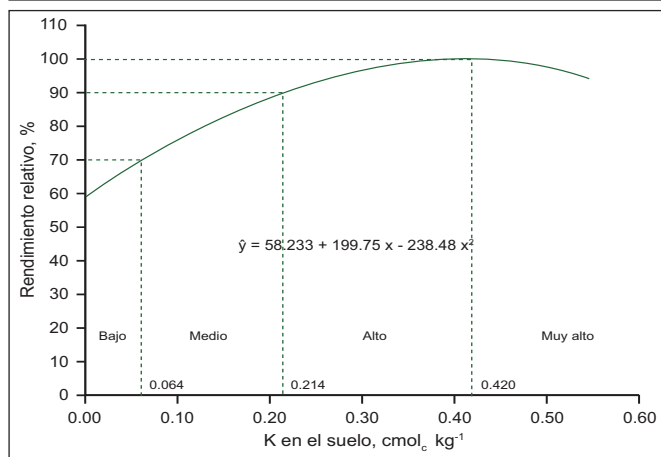


Figura 4. Rendimiento relativo en función del contenido de K en el suelo.

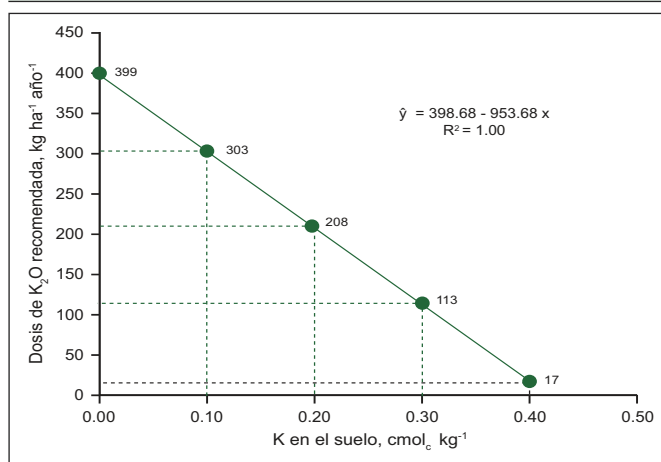


Figura 5. Dosis recomendadas de K (K₂O) en función del contenido de K en el suelo.

considerar este parámetro fijo, como lo fue concebido inicialmente.

La concentración foliar de K se incrementó significativamente en respuesta a las dosis aplicadas, comportamiento que se ajustó a una tendencia cuadrática (Figura 3). El nivel crítico de K en las hojas fue de 2.023 dag kg⁻¹, valor que se obtuvo al sustituir 272.7 en la ecuación correspondiente ($\hat{y} = 0.8563 + 0.00594 x - 0.0000061 x^2$).

En la Figura 4 se presenta el rendimiento relativo (RR) en función del contenido de K en el suelo. Como se puede observar, no fue posible delimitar la clase “muy baja”, pues no se obtuvieron valores de RR inferiores a 50%; comportamiento que es muy frecuente en la mayoría de los suelos

Por último, se generó la ecuación que expresa las dosis recomendadas de K en función de su contenido en el suelo (Figura 5), de acuerdo al cual se puede definir las cantidades a aplicar de manera continua. La información anterior se puede presentar de forma aproximada; procedimiento que tiene su justificación en los intervalos de confianza que acompañan todos los valores estimados (Álvarez, 1994); por lo tanto, se calcularon las dosis K, según sus valores promedios en el suelo para cada clase de fertilidad (Tabla 2).

Conclusiones y recomendaciones

La metodología empleada resulta útil para generar información sobre la fertilidad del suelo en sitios específicos y permite estimar, de una manera relativamente sencilla, las recomendaciones concernientes a las dosis de fertilizantes.

La respuesta del café al suministro de K guarda una relación estrecha con sus contenidos en el suelo; en este sentido, es posible que la producción no se afecte después de uno o dos años de haber suspendido la fertilización, siempre y cuando sus contenidos en el suelo sean altos.

Bibliografía

Álvarez, V.H. 1996. Correlação e Calibração de métodos de análise de solos. In: Álvarez, V.H., L.E.F. Fontes, & M.P.F. Fontes, eds. O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa, MG: SBCS. pp. 615- 646.

Duque, H., y A. Mestre. 1999. Óptimos económicos en la respuesta del café a la fertilización. Avances Técnicos Cenicafé. No. 270:1-4.

Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, y W.L. Nelson. 1999. Soil fertility and fertilizers; an introduction to nutrient management. 6. ed. Upper Saddle River (Estados Unidos), Prentice Hall. 499 p.

Nelson, L. 1999. Estadística en la investigación del uso de fertilizantes. Ottawa, INPOFOS, 66 p.

Riaño, N.M., J. Arcila, A. Jaramillo, y B. Chaves. 2004. Acumulación de materia seca y extracción de nutrientes por *Coffea arabica* L. cv. Colombia en tres localidades de la zona cafetera central. Cenicafé, 55(4):265-276.

Sadeghian, S., B. Mejía, y J.Arcila. 2006. Composición elemental de frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha en la zona cafetera de Colombia. Cenicafé, 57(4):251-261.

Sadeghian, S. 2009. Calibración de análisis de suelo para N P K y Mg en cafetales al sol y bajo semisombra. Cenicafé 60(1):7-24. □

USO DE CLINOPTILOLITA COMO VEHÍCULO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS EN UN SUELO DE LA REGIÓN PAMPEANA ARGENTINA

G. Millán¹, F. Agosto², M. Vázquez¹, L. Botto², L. Lombardi¹ y L. Juan¹

Introducción

La dinámica del nitrógeno (N) en sistemas suelo-aire-agua ha sido objeto de gran interés en la literatura científica, debido al relevante papel que desempeña en la producción agrícola y por la importancia de un uso racional del nutriente. El aumento de la eficiencia de uso del N (EUN), debido al uso de tecnologías de suministro gradual, tiene repercusión sobre la producción vegetal y es un factor fundamental para reducir la contaminación del ambiente (Bolado Rodríguez et al., 2003). En Argentina se ha demostrado la contaminación de aguas subterráneas y superficiales como consecuencia de la fertilización nitrogenada (Costa, 1997; Andriulo et al., 2000). Por lo tanto, el desarrollo de tecnologías de fertilización de liberación lenta de N podría disminuir la contaminación y mejorar los rendimientos de los cultivos.

Las zeolitas son una familia de minerales aluminosilicatos hidratados altamente cristalinos. Su estructura forma cavidades ocupadas por iones grandes y moléculas de agua con gran libertad de movimiento, lo que permite que los iones adsorbidos en los canales internos de la misma, puedan ser intercambiados (Breck, 1974). La ingeniería de zeolitas permite que sean aplicadas como vehículo de principios activos (microbicidas, antiácidos, antiglicemiantes, antibióticos, etc.) tanto a especies sintéticas como naturales en la industria farmacéutica. En este aspecto las zeolitas naturales pueden y deben ser consideradas como materiales con propiedades físicas y químicas susceptibles de modificación, favoreciendo el diseño y desarrollo de nuevos materiales y tecnologías. Los reportes de uso de las rocas zeolíticas en la cultura de los suelos se remontan al Japón de los inicios del siglo pasado (Giannetto et al., 2000) y su aplicación se encuentra referida a tres propiedades: i) capacidad y selectividad al intercambio catiónico, ii) modificación de la granulometría del suelo, y iii) adsorción de agua.

El cultivo de plantas sin suelo mediante el uso de un sustrato zeolítico se basa en las propiedades que facilitan el almacenaje de macro y micronutrientes (K, NH_4^+ , Ca, Fe, Mg) necesarios para el crecimiento vegetativo de la planta, el almacenaje de agua, la posibilidad de soporte mecánico de raíces y la oxigenación de las mismas durante el proceso de desorción de agua y llenado de cavidades por moléculas de O_2 y N_2 del aire (Ming et al., 1995). En general, la variabilidad estructural, térmica y

composicional de las zeolitas naturales hacen que continúen vislumbrándose múltiples aplicaciones en el ámbito agropecuario para estos materiales.

La clinoptilolita es la zeolita natural más abundante en la naturaleza. Existen importantes yacimientos de estos materiales en Latinoamérica entre ellos Chile (Maurelia et al., 2000), México (Olguín Gutiérrez, 2009), Ecuador (Morante Carballo, 2004), y Cuba (Márquez Canosa et al., 2007). En Argentina existen yacimientos de importancia que podrían asociarse a importantes beneficios socioeconómicos. Por ende, y debido a la variabilidad que presentan los materiales naturales, es mucho lo que puede hacerse en el campo de las zeolitas argentinas, tanto en lo referente a la potencialidad de los depósitos como en la determinación de las propiedades fisicoquímicas, pilares sobre los que se sustenta el desarrollo de tecnologías propias. Estudios geológicos realizados en la zona de Cuenca de Pagancillo, departamento de Independencia, centro oeste de la provincia de La Rioja determinaron la presencia de un material zeolítico de elevado potencial de interés económico (Agosto et al., 2005).

La clinoptilolita posee una alta capacidad de intercambio catiónico y una gran afinidad por los iones NH_4^+ (Inglesakis, 2004). Aunque existe cierta controversia, se atribuye a las clinoptilolitas, la capacidad de retener y liberar lentamente los iones NH_4^+ que se incorporan en la red de canales que forman su estructura cristalina (Lewis et al., 1984; Ferguson y Pepper, 1987; MacKown y Tucker., 1985; Allen et al., 1996; Kithome et al., 1998). La dinámica de liberación de moléculas nitrogenadas ocluidas en la clinoptilolita difiere de la de iones. Las moléculas nitrogenadas quedan retenidas por atracción electroestática y se producen en ellas modificaciones en sus ángulos moleculares y en los enlaces simples y dobles (Park y Komarneni, 1998).

La dinámica suelo-clinoptilolita-N es variable, dependiendo de las características fisicoquímicas de los suelos, de la dosis de clinoptilolita y N aplicada, del manejo del cultivo y de la época del año en la cual se realizan los ensayos (Kolyagin y Karasev, 1999; Postnikov et al., 1996; Ando et al., 1996; Babaririck y Pirela, 1984; Lewis et al., 1984). Esto sugiere la necesidad de evaluar los suelos donde se emplearán. En trabajos previos, la utilización de clinoptilolita ha permitido aumentar la eficiencia de utilización de

¹ Cátedra de Edafología, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. Calle 60 y 119 (1900). La Plata, Argentina.

² Cátedra de Química Inorgánica, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP. Calle 47 y 115 (1900). La Plata, Argentina.

fertilizantes nitrogenados y obtener altos rendimientos con menores dosis de N (Loboda, 1999; Soca et al., 2004). Por lo tanto, es posible que el aporte de N con soporte de clinoptilolita, permita aumentar la eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado en comparación con una fertilización solo a base de urea.

El objetivo de este trabajo es evaluar la producción de materia seca y la recuperación de N del fertilizante en raigrás anual (*Lolium multiflorum*), cultivado bajo cubierta en un suelo franco arenoso, fertilizado con clinoptilolita-NH₄ y clinoptilolita-urea, en comparación con una fertilización nitrogenada tradicional con urea granulada.

Materiales y métodos

Obtención y características de la clinoptilolitas

Las clinoptilolitas utilizadas se obtuvieron en un yacimiento de zeolita de La Rioja, Argentina. Correspondieron a clinoptilolitas sódicas, de origen vulcanoclástico, con alta capacidad de intercambio catiónico (Chelischehev et al., 1988) (Tabla 1). Se molieron y tamizaron a un diámetro de partículas entre 1 y 2 mm. Para obtener la forma mono-iónica amónica, se utilizó un matraz de 500 ml donde se trató 50 g de clinoptilolita con 500 mL de NH₄Cl 0.5 N en relación 1:10 (clinoptilolita:solución nitrogenada de intercambio). Este proceso se prolongó por 96 h a 20 °C (± 2 °C). Se evaluó el NH₄⁺ retenido por destilación Kjeldhal. El NH₄⁺ que ocupó los sitios de intercambio de la clinoptilolita se calculó por la diferencia entre la concentración inicial y final de NH₄⁺ en el sobrenadante (Inglezakis et al., 2004). Las clinoptilolitas combinadas con urea se obtuvieron tratando primero 50 g de clinoptilolita con 500 mL de HCl 0.5 N en un matraz de 500 mL durante 96 h a 20 °C (± 2 °C), renovando la solución de intercambio cada 48 horas (Inglezakis et al., 2004), de modo de obtener una clinoptilolita ácida (clinoptilolita-H) libre de cationes. Finalmente se obtuvo la clinoptilolita-urea por intercambio en lechos

de contacto de urea fundida a 200 °C con clinoptilolita-H. Se calculó la urea incorporada en la clinoptilolita por diferencia de peso.

El suelo utilizado se obtuvo de los primeros 20 cm del horizonte superficial de un Hapludol Típico (Lincoln, Buenos Aires, Argentina), perteneciente a la subregión Pampa Arenosa de la Pradera Pampeana. El suelo se secó al aire, se desagregó, se tamizó (malla de 2 mm) y se caracterizó física y químicamente según SAGPyA (Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación y la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo) (Tabla 1).

Ensayo de invernáculo

Se realizó un ensayo en invernáculo donde los factores fueron el tipo de fertilizante (clinoptilolita-NH₄, clinoptilolita-urea y urea) y las dosis de N (0, 60, 120 y 180 kg ha⁻¹ de N). Las unidades experimentales fueron macetas de 0.4 L con 300 g de suelo. En función de la concentración de N de la clinoptilolita modificada, las dosis de N empleadas derivaron en relaciones (p/p) suelo:clinoptilolita de 1:0; 1:0.0003; 1:0.0006 y 1:0.0012 para las dosis de 0, 60, 120 y 180 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. Se fertilizó y se regó de modo de mantener el suelo a 90% de capacidad de campo (3 MPa), mediante riegos realizados con agua destilada cada 48 h. Se sembraron 130 semillas por maceta de *Lolium multiflorum* cv. Grandesa tetraploide. Pos-emergencia, se ralearon para dejar 100 planta maceta⁻¹. A partir de la emergencia, se realizaron cuatro cortes, al ras de la maceta, cada 28 d. En cada ocasión se determinó la materia seca (MS) (peso constante a 60 °C) y N (digestión húmeda en medio sulfúrico con H₂O₂ y valoración Kjeldahl) (Malavolta et al., 1989). Por otro lado, se calculó la eficiencia de recuperación del N del fertilizante (ERNF), utilizando la siguiente fórmula:

$$ERNF = [(N \text{ absorbido tratamiento} - N \text{ absorbido testigo}) / (\text{dosis de N aplicado})^{-1}] \times 100.$$

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica del suelo y la clinoptilolita.

Suelo															
pH ^a	CE	CIC ^b	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	MO ^c	N	C:N	P ^d	Arena	Limo	Arcilla	3 Mpa	147 Mpa
	dS m ⁻¹		cmol _c kg ⁻¹					%			ppm	Franco arenoso (%)			RH (%)
5.6	0.8	15.2	10.2	1.5	0.5	1.8	3.4	0.19	10.5	19	53	31	16	25	9
Clinoptilolita															
CIC ¹	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	MnO	K ₂ O	P ₂ O ₅						
cmol _c kg ⁻¹				%											
175	62.7	12.5	0.6	0.4	0.6	6.4	0.01	1.2	0.03						

^a pH determinado en extracto de suelo en relación 1:2.5, suelo:agua.

^b Capacidad de intercambio catiónico (CIC) evaluada a pH 6.

^c MO Walkey Black.

^d P Bray y Kurtz¹.

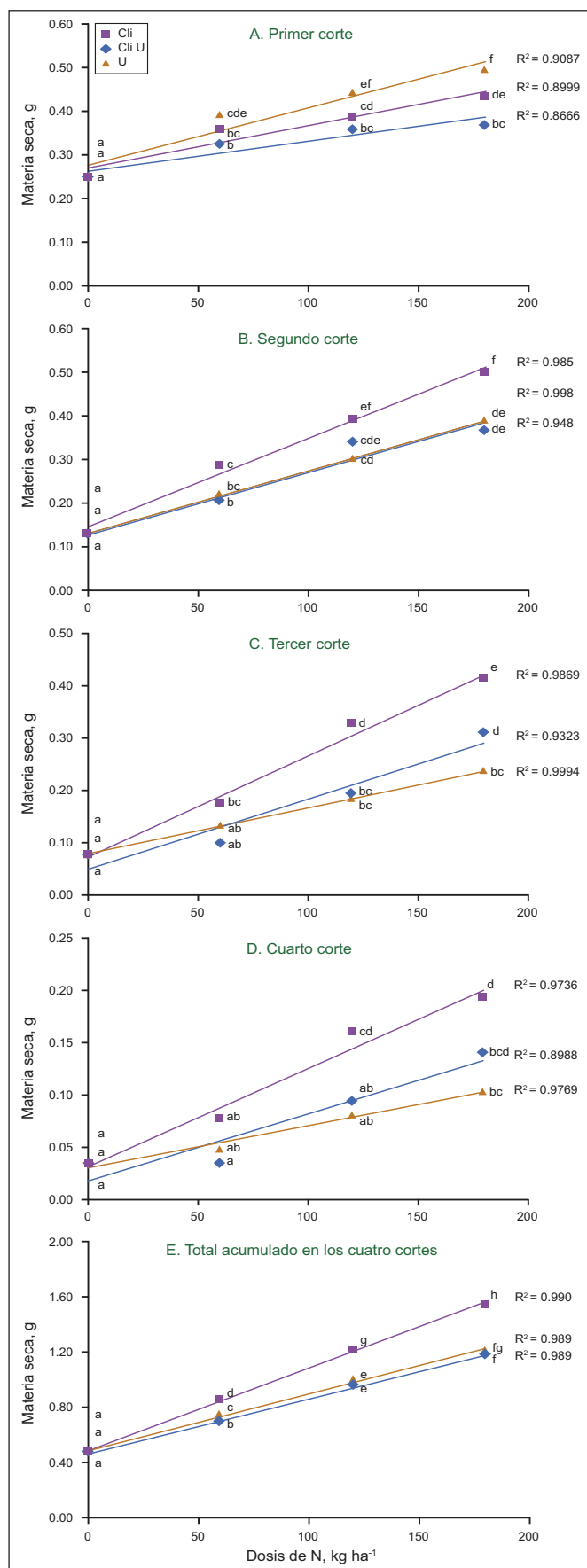


Figura 1. Efecto de tres tipos de fertilizantes nitrogenados sobre los rendimientos de MS de *Lolium multiflorum* cv. grandeza. Promedios en cada dosis de N seguidos por iguales letras no son estadísticamente diferentes entre sí según la prueba de comparación múltiple de medias LSD ($p < 0.05$). Cli = clinoptilolita-NH₄ y Cli U = clinoptilolita-Urea. U = urea.

Diseño y análisis estadísticos

El diseño estadístico fue en bloques completos al azar con arreglo factorial 3 x 4, con tres repeticiones de cada tratamiento. Los factores fueron tres tipos de fertilizante (clinoptilolita-NH₄, clinoptilolita-urea y urea) y los niveles cuatro dosis de N equivalentes a 0, 60, 120 y 180 kg ha⁻¹. Se realizó un análisis de varianza y los promedios se separaron de acuerdo con la prueba de las diferencias mínimas significativas (LSD) (Mendenhall et al., 1986).

Resultados

Producción de materia seca

En cuatro cortes realizados, la producción de MS total aumentó significativamente para todas las dosis de N empleadas cuando se utilizó clinoptilolita-NH₄, en comparación con la utilización de urea granulada (Figura 1E). Independientemente de la forma de utilización de la clinoptilolita, este aumento de rendimiento coincidió con lo expuesto en trabajos previos (Pirela et al., 1984; Kolyagin y Karasev, 1999; Soca et al., 2004). En relación al rendimiento obtenido con el uso de urea, con clinoptilolita-NH se obtuvo incrementos de rendimiento del 13, 25 y 26 % respectivamente en la medida que aumentó la dosis de N, (Figura 1E). Se observó que la utilización de este tipo de fertilizante permitió obtener rendimientos estadísticamente similares a urea aplicada en dosis mayores. Por ejemplo, cuando se aplicaron 120 kg ha⁻¹ utilizando clinoptilolita-NH₄ se obtuvieron rendimientos equivalentes a los obtenidos con la utilización de urea en la dosis de 180 kg ha⁻¹.

Al analizar la producción total de MS de *Lolium multiflorum*, la interacción entre tipo de fertilizante nitrogenado y la dosis fue significativa ($p < 0.001$). En la producción por cada corte, se observó que para la dosis de 60 kg ha⁻¹, los tratamientos fertilizados con clinoptilolita-NH₄ y urea no registraron diferencias significativas. Sin embargo, a dosis mayores existió un comportamiento diferencial según el tipo de fertilizante utilizado y el corte analizado.

Para el primer corte, los tratamientos fertilizados con urea exhibieron una mayor producción de materia seca para las dosis de 120 y 180 kg ha⁻¹ (Figura 1A). En el segundo corte se determinó una mayor producción de los tratamientos fertilizados con clinoptilolita-NH₄ sólo en la dosis de 180 kg ha⁻¹ (Figura 1B). En el tercer y cuarto corte, el aumento de la producción de MS se registró para las dosis de 120 y 180 kg ha⁻¹ cuando se utilizó clinoptilolita-NH₄ (Figura 1C, D). En las condiciones en que se realizó el ensayo, con un suelo mantenido a 90% de capacidad de campo y sin percolación, las pérdidas por volatilización de NH₃ serían bajas y el riesgo de pérdidas por lixiviación de NO₃ reducido. Por lo cual, se atribuye el aumento de

rendimiento de MS a la capacidad de retención de iones NH_4^+ que poseen las clinoptilolitas y a su lenta liberación, permitiendo la existencia de iones NH_4^+ en la solución del suelo por un periodo mayor de tiempo. En este sentido, Watson (1986) demostró que las plantas de raigrás anual pueden absorber preferencialmente NH_4^+ y que su crecimiento vegetativo se ve favorecido en un medio con una baja relación $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ (Griffith y Streeter, 1994). Así, el NH_4^+ que ocupa los canales internos de la clinoptilolita, sería liberado lentamente permitiendo una absorción progresiva por el cultivo favoreciendo una mayor producción de MS a lo largo del cultivo. Este efecto sobre los rendimientos se observa con mayor magnitud en suelos con baja capacidad de intercambio catiónico (CIC) y textura gruesa (Ferguson y Pepper, 1987), como ocurrió en el suelo utilizado en este ensayo.

En los tratamientos fertilizados con clinoptilolita-urea, la producción de MS total de *Lolium multiflorum* obtenida registró valores similares para las dosis de 120 y 180 kg ha^{-1} de N. Sin embargo, con 60 kg ha^{-1} de N, la producción de MS fue menor a la del tratamiento fertilizado con urea (Figura 1E). Al analizar la producción por cortes de *Lolium multiflorum*, la producción de MS fue inferior para todas las dosis de N en el primer corte, en relación a la urea (Figura 1A). En el segundo corte no se observaron diferencias estadísticamente significativas para las distintas dosis analizadas (Figura 1B). En el tercer corte sólo se observó diferencia para la dosis de 180 kg ha^{-1} , a favor de la utilización de clinoptilolita-urea (Figura 1C). Ya en el cuarto corte no se registraron diferencias entre los distintos tratamientos (Figura 1D). Esto indicaría que la urea ocluida en la clinoptilolita, estaría fuertemente retenida, presentando una dinámica de liberación más lenta, si se la compara con la retención de iones (Park y Komarnemi, 1998).

Contenido de N en materia seca

El contenido de N total (NT) en la parte aérea de *Lolium multiflorum* presentó una marcada diferencia en relación a las dos formas de utilización de la clinoptilolita (Tabla 2). Independientemente de la fecha de corte de *Lolium multiflorum*, la interacción entre el efecto del tipo de fertilizante nitrogenado y la dosis aplicada fue significativa ($p < 0.001$). Cuando se utilizó clinoptilolita- NH_4 el contenido de NT en la parte aérea se

Tabla 2. N total en la parte aérea de *Lolium multiflorum*. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos.

Tipo de fertilizante	Dosis de N kg ha^{-1}	N Total parte aérea, mg			
		Corte 1	Corte 2	Corte 3	Total
Clinoptilolita- NH_4	0	5.0 a	2.2 a	1.0 a	8.1 a
Clinoptilolita- NH_4	60	11.9 c	5.5 c	1.8 c	20.2 c
Clinoptilolita- NH_4	120	16.5 ef	12.0 ef	3.5 ef	31.9 ef
Clinoptilolita- NH_4	180	18.3 f	17.1 f	5.1 f	40.5 f
Clinoptilolita-Urea	0	5.0 a	2.2 a	1.0 a	8.1 a
Clinoptilolita-Urea	60	9.3 b	4.4 b	1.2 b	14.9 b
Clinoptilolita-Urea	120	12.9 c	9.0 c	2.1 c	24.0 c
Clinoptilolita-Urea	180	13.4 cd	10.6 cd	3.5 cd	27.5 cd
Urea	0	5.0 a	2.2 a	1.0 a	8.1 a
Urea	60	15.0 de	4.1 de	1.4 de	20.5 de
Urea	120	18.5 f	7.6 f	1.9 f	28.0 f
Urea	180	22.7 g	10.0 g	2.5 g	35.3 g

correlacionó con la producción de MS, analizada en el punto anterior. Para la dosis más baja (60 kg ha^{-1} de N) no se observaron diferencias en los contenidos de NT. Sin embargo, para las dosis de 120 y 180 kg ha^{-1} de N se observó que la utilización de clinoptilolita- NH_4 permitió incrementar el NT en relación a la urea. Por el contrario, el contenido de NT de los tratamientos fertilizados con clinoptilolita-urea fue inferior a la de los tratamientos fertilizados directamente con urea.

Al analizar NT por cortes de *Lolium multiflorum* se observó que en el primer corte, fue la urea el tipo de fertilizante que permitió obtener una mayor disponibilidad de N. Esta diferencia se observó para todas las dosis analizadas en relación a la clinoptilolita-urea, y para las dosis de 60 y 180 kg ha^{-1} si la comparación la realizamos con la clinoptilolita- NH_4 . En el segundo corte, los tratamientos fertilizados con clinoptilolita- NH_4 registraron el mayor contenido de NT, en relación a los restantes tipos de fertilizantes usados. En este corte, la urea sólo presentó diferencias significativas con la clinoptilolita-urea para la dosis de 120 kg ha^{-1} . En el tercer corte de *Lolium multiflorum*, la clinoptilolita- NH_4 fue el tipo de fertilizante que permitió aumentar el NT para todas las dosis empleadas. En el mismo corte, se observó que la utilización de clinoptilolita-urea permitió aumentar el NT en relación a la urea para la dosis de 180 kg ha^{-1} (Tabla 2). Esto indicaría que la dinámica de desorción de las clinoptilolitas intercambiadas (clinoptilolitas- NH_4) fue más rápida a la de las formas ocluidas (clinoptilolita-urea). El proceso de liberación de los iones NH_4^+ adsorbidos internamente en la clinoptilolita es un proceso de difusión controlada, que responde al modelo de Freundlich modificado (Kithome et al., 1998).

En el presente estudio, la fracción retenida en las formas ocluidas fue mayor a la de las formas intercambiadas, en concordancia con la investigación previa (Park y Komarneni, 1998). En el proceso de preparación de la clinoptilolita-urea, el ingreso de una molécula en los canales de la clinoptilolita produce la modificación de los ángulos de la misma, pudiendo inclusive cambiar los tipos de enlace (simples y dobles) y generándose varios sitios de atracción entre la molécula de urea y la clinoptilolita. Dicho proceso explicaría la disminución de la velocidad de desorción de la urea en relación al NH_4^+ (Park y Komarneni, 1998). Asimismo, no toda la urea ocupa los canales de la clinoptilolita, sino que existe la posibilidad de que una fracción de la urea quede adherida en la superficie externa de dicho mineral, existiendo por tanto, una fracción fácilmente disponible similar a la urea granulada.

Eficiencia de recuperación del N

Según los resultados obtenidos, existió una marcada diferencia en la eficiencia de recuperación entre urea y las clinoptilolitas. Se registró una interacción significativa ($p < 0.013$) entre el tipo de fertilizante y la dosis de N aplicada en el primer y tercer corte para ERNF. La clinoptilolita- NH_4 aumentó la ERNF en dosis de 120 y 180 kg ha^{-1} de N, en relación con la fertilización con urea. Con 60 kg ha^{-1} de N, la ERNF fue similar (Figura 2). Esto indicaría que el aumento de la eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado al utilizar clinoptilolita intercambiada con NH_4^+ se podría atribuir a la relación suelo:clinoptilolita.

En el presente ensayo se trabajó con una sola clinoptilolita intercambiada; por lo tanto, el aumento de la dosis de N implica un aumento de la cantidad de clinoptilolita por maceta. Para las dosis de 60, 120 y 180 kg ha^{-1} de N, las relaciones (p/p) suelo:clinoptilolita fueron de 1:0.0003; 1:0.0006 y 1:0.0012. Al analizar trabajos previos, se observó que las relaciones utilizadas en suelos de textura y CIC similar, si bien son muy diversas, todas ellas son mayores a las del presente trabajo. Weber et al (1983) utilizaron una relación de 1:0.056; MacKown y Tucker (1985) trabajaron con relaciones de 1:0.0125 y Pirela et al (1984) lo hicieron con relaciones de 1:0.0033, encontrando todos ellos mejor resultado con clinoptilolita- NH_4 que con urea. La eficiencia de recuperación de N de los tratamientos fertilizados con clinoptilolita-urea fue muy baja en relación a los otros tratamientos. Dado que en el ensayo se mantuvo la humedad del suelo a 90% de la capacidad de campo y, por lo tanto, no hubo lixiviación ni probabilidades de volatilización cuantitativamente importantes, se entiende que esta baja recuperación no responde a un aumento de las pérdidas de N, sino que estaría dada por la capacidad de retención de las moléculas de urea en los canales de la clinoptilolita.

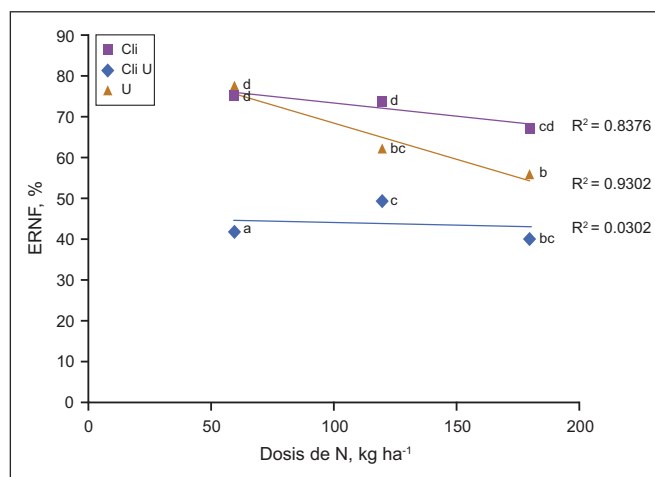


Figura 2. Eficiencia de recuperación del fertilizante (ERNF) aplicado a *Lolium multiflorum* en todos los tratamientos. Promedios en cada tratamiento seguidos por iguales letras no son estadísticamente diferentes entre sí según la prueba de comparación múltiple de medias LSD ($p < 0.05$). Cli = clinoptilolita- NH_4 , Cli U = clinoptilolita-urea y U = urea.

Como se explicó anteriormente, el proceso de fusión de la urea para la preparación de clinoptilolita-urea posibilita la ubicación de dicho compuesto en sitios internos de los canales, donde queda retenida por atracción electrostática, y en sitios externos donde queda adherida a la superficie del mineral. El N disponible proviene fundamentalmente de la urea adherida en la superficie externa y en los bordes de dicho material. La urea que ingresó en los canales de la clinoptilolita no estaría disponible en el ciclo del cultivo, quedando ocluida en dichos canales (Park y Komarneni, 1998).

Conclusiones

El complejo clinoptilolita-urea produjo rendimientos de MS inferiores o similares a la utilización de urea a una misma dosis de N aplicada. Además, originó una disminución significativa de la eficiencia de recuperación del N del fertilizante en las condiciones del ensayo.

Por otra parte, el uso de clinoptilolita- NH_4 permitió incrementar la producción de MS de *Lolium multiflorum* respecto de igual dosis aplicada de N en forma de urea. Asimismo, el uso de este tipo de fertilizante permitió, utilizando menores dosis de N, alcanzar producciones de MS similares a las obtenidas con urea. Además, la utilización de clinoptilolita- NH_4 permitió aumentar la eficiencia de recuperación del fertilizante cuando se utilizaron dosis mayores a 120 kg ha^{-1} de N. En consecuencia, existiría una fracción remanente menor de N en el suelo, susceptible a ser lixiviada o volatilizada, lo cual implicaría menor impacto ambiental de la práctica de la fertilización nitrogenada.

Bibliografía

- Agosto, M., M. Canafoglia, R. De Barrio, C. Cabello, I. Schalamuk, G. Minelli, y L. Botto. 2005. Depósitos tobáceos terciarios del Área de Paganzo (Pcia. de La Rioja) su potencialidad tecnológica. Actas del XVI Congreso Geológico Argentino. Buenos Aires, Argentina, 20 al 23 de septiembre. Versión electrónica.
- Allen, E.R., L. Hossner, D. Ming, y D. Henninger. 1996. Release rates of phosphorus, ammonium, and potassium in clinoptilolite-phosphate rock systems. *Soil Science Society of America Journal* 60:1467-1472.
- Ando, H., C. Mihara, K. Kakuda, y G. Wada. 1996. The fate of ammonium nitrogen applied to flooded rice as affected by zeolite addition. *Soil Science and Plant Nutrition* 42:531-538.
- Andriulo, A., C. Ferreira, C. Nasal, M. Rivero, F. Abrego, M. Bueno, F. Rimatori, M. De la Cruz, M. Venancio, y R. Giacosa. 2000. Nitratos en el agua subterránea del partido de Pergamino. Efecto a largo plazo de la agricultura continua y a corto plazo de la producción intensiva de granos. Actas del XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina, 11 al 14 de abril.
- Babarick, K.A., y H. Pirela. 1984. Agronomic and horticultural uses of Zeolites: review. Pages 93-103. In: W.G. Pond y F.A. Mumptom (eds.). *Zeo-agriculture. Use of Natural Zeolites in Agriculture and Aquiculture*. Westview Press, Boulder, CO, USA. 264 p.
- Bolado-Rodríguez, S.A., y J. Alvarez-Benedí. 2003. Caracterización de procesos acoplados de adsorción, transformación y volatilización de N en suelos fertilizados con urea. pp. 185-192. En: J. Alvarez-Benedí y P. Marinero (eds.). *Estudios de la Zona no Saturada del Suelo*, v. VI. Valladolid, España.
- Breck, D. 1974. *Zeolite Molecular Sieves*, Wiley Ed. New York, EE UU. 180 p.
- Chelischev, N., N. Volodin, y V. Kryukov. 1988. Ion Exchange Properties of Natural high Silica Zeolites. *Nauka* (ed.), Moscu. 174 p.
- Costa, J. L. 1997. Riego y Medio Ambiente. Calidad de aguas para riego. pp. 7-14. En: *Seminario de Riego. Regional Buenos Aires Sur* (ed.), Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, INTA. Mar del Plata, Argentina.
- Ferguson, G., y I. Pepper. 1987. Ammonium retention in sand amended with clinoptilolite. *Soil Sciences Society of American Journal* 51:231-234.
- Giannetto, G., A. Montes, y G. Rodríguez. 2000. *Zeolitas Características, Propiedades y Aplicaciones Industriales*. Ed. Innovación Tecnológica, Facultad de Ingeniería – UCV. Caracas, Venezuela. 351 p.
- Griffith, S.M., y D.J. Streeter. 1994. Nitrate and ammonium nutrition in ryegrass: changes in growth and chemical composition under hydroponic conditions. *Journal of Plant Nutrition* 17:71-81.
- Inglezakis, V., M. Loizidou, y H. Grigoropoulou. 2004. Ion exchange studies on natural and modified zeolites and the concept of exchange site accessibility. *Journal of Colloid and Interface Science*. 275:570-576.
- Kithome, M., J.W. Paul, L.M. Lavkulich, y A.A. Bomke. 1998. Kinetics of Ammonium Adsorption and Desorption by the Natural Zeolite Clinoptilolite. *Soil Sciences Society of American Journal* 62:622-629.
- Kolyagin Yu, S., y O. A. Karasev. 1999. Root nutrition and the quality of sugarbeet. *Sakharnaya Svekla (Bulgaria)* 6:11-12.
- Lewis, M.D., F.D. Moore, y K.L. Goldberry. 1984. Ammonium-exchanged clinoptilolite and granulated clinoptilolite with urea as nitrogen fertilizers. Pages 123-137. In: W.G. Pond and F.A. Mumptom (eds.). *Zeo Agriculture: Use of Natural Zeolites in Agriculture and Aquaculture*. Westview Press, Boulder, CO, USA. 264 p.
- Loboda, B. 1999. Agroecological assessment of using substrates from zeolite-containing rocks in greenhouse grown sweet pepper. *Agrokhimiya (Russia)* 2:67-72.
- MacKown, C., y T. Tucker. 1985. Ammonium nitrogen movement in a coarse-textured soil amended with zeolite. *Soil Science Society of America Journal* 49:235-238.
- Malavolta, E., G. Vitti, y S. de Oliveira. 1989. Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Piracicaba, SP, Brasil. 325 p.
- Marquez, E., T.N. Herrera Vasconcelos, y N.M. Gutierrez Duque. 2007. Características físico-químicas de las zeolitas naturales como material filtrante. XXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. 10 p. En <http://www.cepis.org.pe/>
- Maurelia, R., R. Zamora, M. Guevara, M. Rojas, y L. Rojas. 2000. Caracterización y separación de una estilbita originaria de la región de Atacama, Chile. *Bol. Soc. Chil. Quím.* v.45 n.4 Versión impresa ISSN0366-1644. En: <http://www.scielo.cl>
- Mendenhall, W., R. Scheaffer, y D. Wackerly. 1986. *Estadística Matemática Con Aplicaciones*. Grupo Editorial Iberoamericana. California, EUA. 251 p.
- Ming, D., E. Gruener, K. Henderson, S. Steinberg, D. Barta, C. Jr., Galindo, y D. Henninger. 1995. Plant growth experiments in zeoponic substrates : applications for advanced life support systems. NASA Johnson Space Center, Houston, Texas. En <http://www.dsls.usra.edu>
- Morante, F.E. 2004. Las zeolitas de la costa de Ecuador (Guayaquil): Geología, caracterización y aplicaciones. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. 400 p. En <http://oa.upm.es/>
- Park, M., y S. Komarneni. 1998. Ammonium nitrate occlusion vs. nitrate ion exchange in natural zeolites. *Soil Science Society of America Journal* 62:1455-1459.
- Olguin, M.T. 2009. Zeolitas. Características y propiedades. En: <http://www.ua.es>
- Pirela, H.G., D.G. Westfall, y K.A. Babarick. 1984. Use of clinoptilolite in combination with nitrogen fertilization to increase plant growth. Pages 65-76. In: W.G. Pond and F.A. Mumptom (eds.). *Zeo Agriculture: Use of Natural Zeolites in Agriculture and Aquaculture*. Westview Press, Boulder, CO, USA. 264 p.
- Postnikov, A.V., G. A. Romanov, B. Loboda, y A.V. Zekunov. 1996. A good substrate for green crops. *Kartofel' i Ovoshchi* 5:21-22.
- Soca, M., J. Castellanos, y J. Febles. 2004. Efecto de la zeolita en la eficiencia de los fertilizantes químicos, fertilizantes y enmiendas de origen mineral. *Panorama Minero (Buenos Aires, Argentina)* 14:261-268.
- Watson, C. J. 1986. Preferential uptake of ammonium nitrogen from soil by ryegrass under simulated spring conditions. *Journal of Agricultural Science* 107:171-177. □

CALIBRACIÓN DE ANÁLISIS DE SUELO EN CAFETALES AL SOL Y BAJO SEMISOMBRA

Siavosh Sadeghian Khalajabadi¹

En Colombia, el café se cultiva bajo diferentes sistemas de manejo; en el extremo más tradicional se encuentran plantaciones de variedad Típica con bajas densidades de siembra y sombrío denso, y en el más tecnificado, aquellas que se establecen con variedades Colombia, Caturra y Variedad Castillo®, en altas densidades y a plena exposición solar. Entre éstos se halla una considerable gama de sistemas intermedios con rendimientos contrastantes.

Actualmente, el 15.7% del área cafetera en el país (137 454 ha) está dedicada al sistema tradicional, y el restante 84.3% (740 259 ha) corresponde a plantaciones tecnificadas; de las cuales el 46.7% se cultiva a plena exposición solar, el 21.6% bajo semisombra, y solo el 16% con sombrío denso (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2007).

Se define como lote cafetero a plena exposición solar “aquel en el cual el efecto de regulación de la luz incidente proviene de cualquier especie arbórea permanente, inferior a 20 árboles por hectárea y/o inferior de 300 especies arbustivas semipermanentes”, y lote cafetero con semisombra como “aquel en el cual el efecto de regulación de la luz incidente proviene de cualquier especie arbórea superior a 20 e inferior a 50 árboles por hectárea, y/o cualquier especie arbustiva semipermanente con más de 300 y menos de 750 plantas por hectárea (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 1993).

El uso de sombrío, el cual fue común en Colombia hasta finales de la década de los 70 del siglo pasado, puede traer como ventajas la regulación de las temperaturas extremas durante el día, la disminución de la evapotranspiración, la conservación de los suelos, un menor efecto de los vientos fuertes, del granizo y de la sequía, así como la regulación del ciclaje de nutrientes (Beer et al., 1998; Jaramillo, 2005).

Gómez et al. (2000), con base en el origen de los suelos de la región cafetera, sugieren el uso de sombra en algunos suelos derivados de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, que presentan limitaciones físicas; mientras que en suelos originados a partir de cenizas volcánicas, consideran que se pueden establecer plantaciones con altas densidades de siembra y a libre exposición solar.

En lo referente a la fertilización, se ha demostrado que

resulta antieconómico realizar esta práctica en cafetales viejos y bajo sombra (Valdes y Herrón, 1966). Mestre (1996) recomienda no emplear más de 500 kg ha⁻¹ del fertilizante 17-6-18-2 en cafetales no envejecidos y con sombrío, aclarando que para aumentar la producción se debe incrementar el ingreso de la luz a la plantación. A su vez, Farfán y Mestre (2004) demostraron que el grado de la respuesta a la fertilización se reduce conforme aumenta el sombrío.

Para cafetales a plena exposición solar, el efecto del nitrógeno (N) ha sido positivo en casi todas las localidades en donde se ha evaluado su respuesta, independiente de los contenidos de materia orgánica del suelo (MO) (Uribe y Mestre, 1976). Sadeghian y Duque (2003) recomiendan tener en cuenta la MO para la recomendación de N, dada su alta correlación (Sadeghian, 2003; Valencia, 1999).

Uribe y Mestre (1976) registraron respuesta al suministro de potasio (K), cuando sus niveles en el suelo eran bajos. El efecto del fósforo (P), solo o en combinación con abonos orgánicos, no ha sido contundente, pues su aplicación en pocos casos ha servido para aumentar el rendimiento de manera sostenida (Uribe, 1983; Uribe y Mestre, 1976). Incluso, se reportan efectos contraproducentes en algunas ocasiones (Uribe, 1983).

En una investigación desarrollada por Uribe y Salazar (1981), se determinó el efecto de magnesio (Mg), sin obtener respuesta a su aplicación y, en un estudio reciente, Sadeghian (2006) reporta incrementos cercanos al 10% sobre la producción al suministrar 30 kg ha⁻¹ año⁻¹ de MgO.

Referente a la densidad de siembra, tanto en Colombia (Uribe y Mestre, 1988) como en otros países productores, como Brasil (Pavan et al., 1994), se ha demostrado que el aumento en el número de plantas por unidad de área conlleva al incremento de la producción. Para densidades menores a 4400 plantas ha⁻¹, se sugiere reducir en 20% la cantidad del fertilizante con respecto a la dosis recomendada para densidades más altas (Uribe y Salazar, 1981).

En cuanto a la fertilidad del suelo se refiere, uno de los pasos más importantes de los estudios de la nutrición mineral es calibrar los resultados de los análisis de suelos frente a la respuesta de los cultivos en el campo,

¹ Investigador. Disciplina de Suelos, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Colombia. Correo electrónico: siavosh.sadeghian@cafedecolombia.com

de lo contrario, los valores obtenidos mediante cualquier método de laboratorio tendrán poco significado. Un análisis de suelo apropiadamente calibrado identifica de manera correcta el grado de deficiencia o suficiencia de un elemento y provee una estimación de la cantidad de nutriente para eliminar la deficiencia (Evans, 1987). Mediante la calibración se busca determinar los niveles crítico y de suficiencia, para un nutriente en particular. El primer término se refiere al contenido del elemento en el suelo, por debajo del cual existe una alta probabilidad de respuesta a la fertilización; mientras que el segundo sugiere un nivel por encima del cual deja de haber respuesta al suministro del elemento. Al respecto, Nelson (1999) asegura que el eslabón más débil en la cadena que determina la utilidad de los análisis de suelos es el trabajo de campo y no el de laboratorio, para lo cual se recomiendan estudios específicos en 20 sitios o más. Zapata (1997) hace hincapié en que la calibración debe ser una práctica continua, pues es posible que un método químico pierda su capacidad de diagnóstico y prognosis, debido a que la calidad de los suelos y las tecnologías de producción cambian con el paso de tiempo. Pese a la necesidad obligatoria de la calibración, en Colombia esta labor se quedó casi inactiva después de que el ICA publicara en los años 80 la “Guía para la Fertilización en Diversos Cultivos. Quinta Aproximación” (Guerrero, 2004).

La mayor parte de los resultados en torno a la nutrición de los cafetales en Colombia ha sido obtenida en las Subestaciones Experimentales de Cenicafé, ubicadas en las diferentes regiones del país y con características agroclimáticas contrastantes; a pesar de ello, el número de estas localidades puede ser considerado reducido para estudios como los de calibración de los análisis de suelos. Con respecto a la fertilización de los cultivos con semisombra, los estudios realizados hasta ahora no han tenido en cuenta los diferentes elementos de manera individual.

Mediante la realización de este trabajo se buscó i) determinar para cafetales al sol y con semisombra, el efecto de la fertilización con N, P, K y Mg, en diferentes regiones de la zona cafetera de Colombia contrastantes en su fertilidad, y ii) calibrar la respuesta obtenida en producción frente a los análisis de suelo.

Materiales y métodos

La investigación se llevó a cabo entre los años 2000 y 2004, en 32 localidades de la zona cafetera colombiana (26 fincas cafeteras y 6 Subestaciones Experimentales de Cenicafé), ubicadas en 32 veredas, pertenecientes a 25 municipios y 10 departamentos. Se seleccionaron 20 plantaciones tecnificadas de café variedad Colombia o Caturra, a libre exposición solar, y 12 bajo sombrero parcial de guamo (*Inga* spp.) o de plátano (*Musa* sp.), con densidades de café entre 4000 y 10 000 árboles ha⁻¹,

y edades entre 2 y 3 años, es decir, iniciando el ciclo productivo. Éstas habían recibido un adecuado manejo cultural (control de plagas y enfermedades, manejo de arvenses, etc.) y antes de iniciar el experimento no presentaban síntomas visibles de deficiencias nutricionales. En cuanto a la fertilización, los planes habían incluido básicamente N y P, y en algunos casos K y cales.

En la **Tabla 1** se presenta la información acerca de la ubicación geográfica de los sitios, las características generales de las plantaciones y las propiedades químicas del suelo.

Se evaluaron cinco tratamientos, por medio de los cuales se buscó determinar la respuesta al suministro de N, P, K y Mg, y calibrar los resultados de los análisis de suelos. Éstos consistieron en un testigo en el que fueron suministrados los cuatro nutrientes objeto de estudio (N, P, K, Mg), en cantidades que, de acuerdo con lo establecido por Sadeghian y Duque (2003), se consideran adecuadas para obtener producciones relativamente altas y sin causar toxicidad a las plantas, y otros cuatro tratamientos definidos con base en el criterio del elemento faltante (**Tabla 2**).

Como fuentes se emplearon urea (46% de N), superfosfato triple-SFT (46% de P₂O₅), cloruro de potasio-KCl (60% de K₂O) y óxido de magnesio (88% de MgO); las cuales son de uso común en la región cafetera del país, a excepción de SFT, cuya elección apuntó al empleo de un fertilizante fosfatado que no contuviera N, como es el fosfato diamónico-DAP.

Los fertilizantes se fraccionaron en dos aplicaciones anuales, la primera entre los meses de marzo y abril, y la segunda entre agosto y septiembre; períodos en los cuales inician las lluvias en las diferentes regiones.

En todos los sitios, a excepción de cuatro, se estableció una sola repetición de cada tratamiento; lo anterior conscientes de la variabilidad espacial que existe en la fertilidad del suelo aun a cortas distancias, factor que se trató de minimizar mediante la selección de un área homogénea en lo relacionado con la pendiente, el relieve del lote, el número de árboles y el nivel de sombra. En la Subestación El Rosario (Antioquia) y en la finca La Arcadia (Tolima) se instalaron dos repeticiones, y en las dos fincas localizadas en el departamento de Quindío (Mónaco y San Alberto) se ubicaron tres repeticiones, establecidas bajo diseño de bloques completos al azar. Para el caso de este trabajo, los resultados de los anteriores sitios se presentan como promedio de las dos o tres repeticiones.

Las dimensiones de las parcelas experimentales y su arreglo espacial fueron diferentes en cada sitio, como consecuencia de las variaciones en las densidades de siembras de las plantaciones y la forma de los lotes.

Tabla 1. Información sobre la ubicación de los sitios, las características de las plantaciones y las propiedades químicas del suelo.

Departamento	Municipio	Vereda	Finca	Altura msnm	Variiedad	Densidad planta ha ⁻¹	Sistema	pH	MO %	P mg kg ⁻¹	Ca	Mg cmol _c kg ⁻¹	K	AI
Antioquia	Veneza	El Cerro	El Rosario*	1630	Colombia	10 000	AS	4.5	12.8	3	1.3	0.3	0.43	5.4
Caldas	Manzanares	Cantadelicia	Cantadelicia	1500	Caturra	4800	AS	6.2	9.4	26	9.1	1.6	0.64	0.0
Caldas	Palestina	Los Lobos	Chaparral	1265	Colombia	10 000	AS	6.0	8.9	6	7.5	1.5	0.99	0.0
Caldas	Anserma	Cauya	Cuba	1650	Colombia	10 000	AS	5.1	18.9	63	1.6	0.5	0.20	2.0
Caldas	Salamina	Colorados	El Edén	1846	Caturra	6000	SS	5.3	8.3	53	4.8	1.4	0.22	0.3
Caldas	Chinchiná	Guacamayo	La María	1400	Colombia	6944	SS	5.1	12.7	26	2.0	0.8	0.23	1.0
Caldas	Pensilvania	San Miguel	La Palma	1450	Caturra	4000	AS	5.8	18.6	4	5.3	1.3	0.39	0.1
Caldas	Manizales	El Rosario	La Pradera	1430	Colombia	10 000	AS	5.3	6.3	6	1.5	0.3	0.42	0.8
Caldas	Chinchiná	La Floresta	San José	1300	Colombia	10 000	AS	5.0	12.1	12	1.3	0.6	0.27	1.3
Caldas	Salamina	El Tigre	Santa Rosa	1750	Colombia	6400	AS	5.3	7.8	7	3.5	0.8	0.22	0.5
Caldas	Pácora	El Topacio	Toledo	1840	Caturra	5500	SS	5.4	16.9	2	0.6	0.3	0.23	0.5
Cauca	Timbó	Urubamba	Atlanta	1700	Caturra	5550	SS	5.1	29.0	5	1.4	0.5	0.23	3.0
Cauca	Timbó	Guacas	El Rastrojo	1760	Colombia	6666	AS	5.2	9.5	4	3.3	1.1	0.68	0.7
Cauca	Popayan	Figueroa	La Esperanza	1760	Colombia	5555	SS	5.3	24.2	7	3.7	1.0	0.63	1.4
Cauca	Piendamó	Cañadulce	La Trinidad	1650	Caturra	9050	AS	5.1	28.9	9	1.7	0.5	0.34	1.2
Cesar	Pueblo Bello	Cuestaplata	Bella Vista	1640	Colombia	5128	SS	4.7	8.0	1	2.4	0.8	0.29	2.5
Cesar	La Paz	La Laguna	La Norteña	1400	Caturra	9800	SS	4.6	8.4	4	4.5	0.6	0.30	1.2
Cesar	Fonseca	Las Colinas	Las Aguas	1320	Colombia	8300	SS	5.4	11.6	37	11.2	1.1	0.46	0.2
Cesar	Codazzi	San Jacinto	Los Andes	1490	Caturra	7400	SS	4.1	7.3	4	1.1	0.7	0.22	7.9
Cesar	Pueblo Bello	Pueblo Bello	Pueblo Bello*	1380	Caturra	6200	SS	4.8	10.3	60	4.6	0.9	0.48	0.5
Cundinamarca	Sasaima	Santa Teresa	El Paraíso	1650	Caturra	5900	SS	5.1	21.2	2	1.6	0.6	0.21	1.8
Cundinamarca	Sasaima	S. Bernardo	Sta. Bárbara*	1450	Colombia	5000	AS	5.3	22.6	46	0.8	0.4	0.20	0.8
Cundinamarca	Sasaima	S. Bernardo	Villa Gilma	1450	Caturra	4500	SS	5.0	17.4	4	2.0	0.2	0.21	1.4
Quindío	Córdoba	Río Verde	Mónaco	1350	Caturra	10 000	AS	5.4	4.9	30	4.2	1.2	0.69	0.2
Quindío	Bellavista	Los Balsos	San Alberto	1520	Caturra	7700	AS	5.3	8.0	6	0.9	0.2	0.18	0.9
Risaralda	Pereira	El Retiro	La Catalina*	1350	Colombia	10 000	AS	5.0	10.2	5	4.6	0.8	0.59	1.1
Santander	Bucaramanga	El Gualilo	El Gualilo	1380	Colombia	7690	AS	4.9	10.5	56	10.1	2.4	0.85	1.1
Santander	Bucaramanga	La Capilla	Sabaneta	1570	Colombia	5555	AS	4.7	4.9	21	0.2	0.1	0.23	1.9
Santander	Floridablanca	Vericute	Santander*	1495	Colombia	10 000	AS	4.8	7.8	18	2.8	0.5	0.30	0.8
Tolima	Líbano	Paraíso	La Arcadia	1450	Colombia	10 000	AS	5.1	18.2	3	2.5	0.5	0.26	1.1
Tolima	Líbano	La Marcada	La Marcada	1400	Caturra	10 000	AS	6.2	12.9	5	5.0	0.7	0.29	0.1
Tolima	Líbano	La Unión	S.E. Líbano	1500	Colombia	10 000	AS	5.2	18.7	1	4.7	1.0	0.19	0.9

* Subestación, AS: Al sol, SS: Semisombra

Tabla 2. Tratamientos evaluados y las respectivas cantidades de nutrientes suministradas.

Tratamiento	Elemento faltante	Cantidad suministrada, kg ha ⁻¹ año ⁻¹			
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
Testigo (NPKMg)	-	240	80	240	60
Sin N (PKMg)	N	0	80	240	60
Sin P (NKMg)	P	240	0	240	60
Sin K (NPMg)	K	240	80	0	60
Sin Mg (NPK)	Mg	240	80	240	0

El área ocupada por cada tratamiento, incluyendo su borde, fluctuó entre 100 y 120 m², para un total de 500 a 600 m², correspondientes a los cinco tratamientos, los cuales se asignaron de manera aleatoria.

Se recolectó el café cereza en cada uno de los pases y se totalizó por año. En la mayoría de las localidades, el experimento se inició en el año 2000 y tuvo una duración de tres años; en 11 de ellas se evaluó el efecto de los tratamientos durante cuatro años (las Subestaciones Pueblo Bello, Santander y Líbano, y las fincas La Norteña, Los Andes, Mónaco, San Alberto, Sabaneta, La Arcadia y La Marcada).

Antes de aplicar por primera vez los tratamientos y dos años después, se tomaron muestras de suelo por parcela, a 20 cm de profundidad, en la zona del “plato” del árbol, es decir, donde se aplican los fertilizantes. Se analizaron las siguientes propiedades: pH (método potenciométrico relación suelo:agua desionizada 1:1 p/p), materia orgánica (método Walkley-Black y valoración por colorimetría a 585 nm), P (extracción con Bray II, coloración Bray-Kurtz y lectura por colorimetría a 660 nm), K, Ca y Mg (extracción con acetato de amonio 1 N a pH 7.0 y lectura por espectrofotometría de absorción atómica) y Al (extracción con KCl 1 N y valoración por espectrofotometría de absorción atómica).

Se tomó el contenido de MO como indicador de la disponibilidad de N, dada la alta correlación entre estas dos propiedades en la zona cafetera de Colombia (Sadeghian, 2003), y por ser la MO un buen indicador de la disponibilidad de N para las plantas (Agboola y Ayodele, 1987).

Para el análisis de varianza se consideró a cada localidad como un bloque. Se empleó la prueba Duncan al 5% para comparar los tratamientos, para cada una de las variables de respuesta (producción y propiedades químicas del suelo), en cada uno de los dos sistemas (al sol y semisombra). Asimismo, se aplicó la prueba t al 5% para comparar los promedios de los sistemas.

Con el fin de calibrar el análisis de suelo, se correlacionó el rendimiento relativo (RR) con respecto al nivel del nutriente en el suelo, para cada sistema y

año. El RR se calculó al dividir la producción obtenida sin la aplicación del elemento (rendimiento con el nutriente al mínimo) por la producción más alta registrada (rendimiento máximo estable), expresada en términos de porcentaje. Dado que el número de sitios para el cuarto año se redujo a 11, la calibración sólo se llevó a cabo para los primeros tres años.

Para determinar el nivel crítico se empleó el modelo rectilíneo-discontinuo (Cate y Nelson, 1971), y para el nivel de suficiencia, el modelo lineal-plateau (Nelson y Anderson, 1977). Adicionalmente, se seleccionó el modelo cuadrático para la MO, dado el comportamiento de la respuesta.

Resultados y discusión

Cambios en la fertilidad del suelo

En general, se presentó una amplia variación en los registros obtenidos, en especial para los contenidos de P, Mg y K (**Figura 1**). Cuando se excluyó el N de los planes de fertilización, se incrementó el pH en los dos sistemas, resultado que se puede asociar a la acidez generada por la nitrificación del amonio proveniente de la urea (Zapata, 2004). Un comportamiento similar ha sido registrado por Sadeghian et al. (2006), en el departamento del Quindío. Pavan et al. (1999) justifican el descenso del pH en suelos cultivados con café, como resultado de un excedente de iones H⁺ que se genera en la nitrificación de amonio, provenientes de la fertilización nitrogenada y que no es neutralizado por la liberación de iones OH⁻ en el proceso de absorción de NO₃⁻ por las raíces de las plantas.

En los dos sistemas, los niveles de P, K y Mg aumentaron con su aplicación; mientras tanto, el suministro de N vía urea contribuyó a la pérdida de K, resultado que puede asociarse con factores como la acidez generada en la nitrificación del amonio-NH₄⁺ (Zapata, 2004), la competencia del NH₄⁺ en el complejo de cambio (Bohn et al., 1993), la menor selectividad por el K frente a otros cationes intercambiables de mayor valencia (Sparks, 1995) y la alta solubilidad de la fuente empleada (KCl) (Guerrero, 2004).

Efecto en la producción

En los cafetales a plena exposición solar, el promedio de la producción de café cereza fue mayor que bajo semisombra, durante los cuatro años de evaluación (**Figura 2**). Lo anterior puede relacionarse con aspectos como la densidad de siembra, el nivel de sombra y los factores ambientales. En este estudio, el promedio de la densidad en los cafetales al sol fue de 8340 plantas ha⁻¹, frente a 6400 plantas ha⁻¹ en las plantaciones con semisombra. De acuerdo con Duque (2004), en variedades de

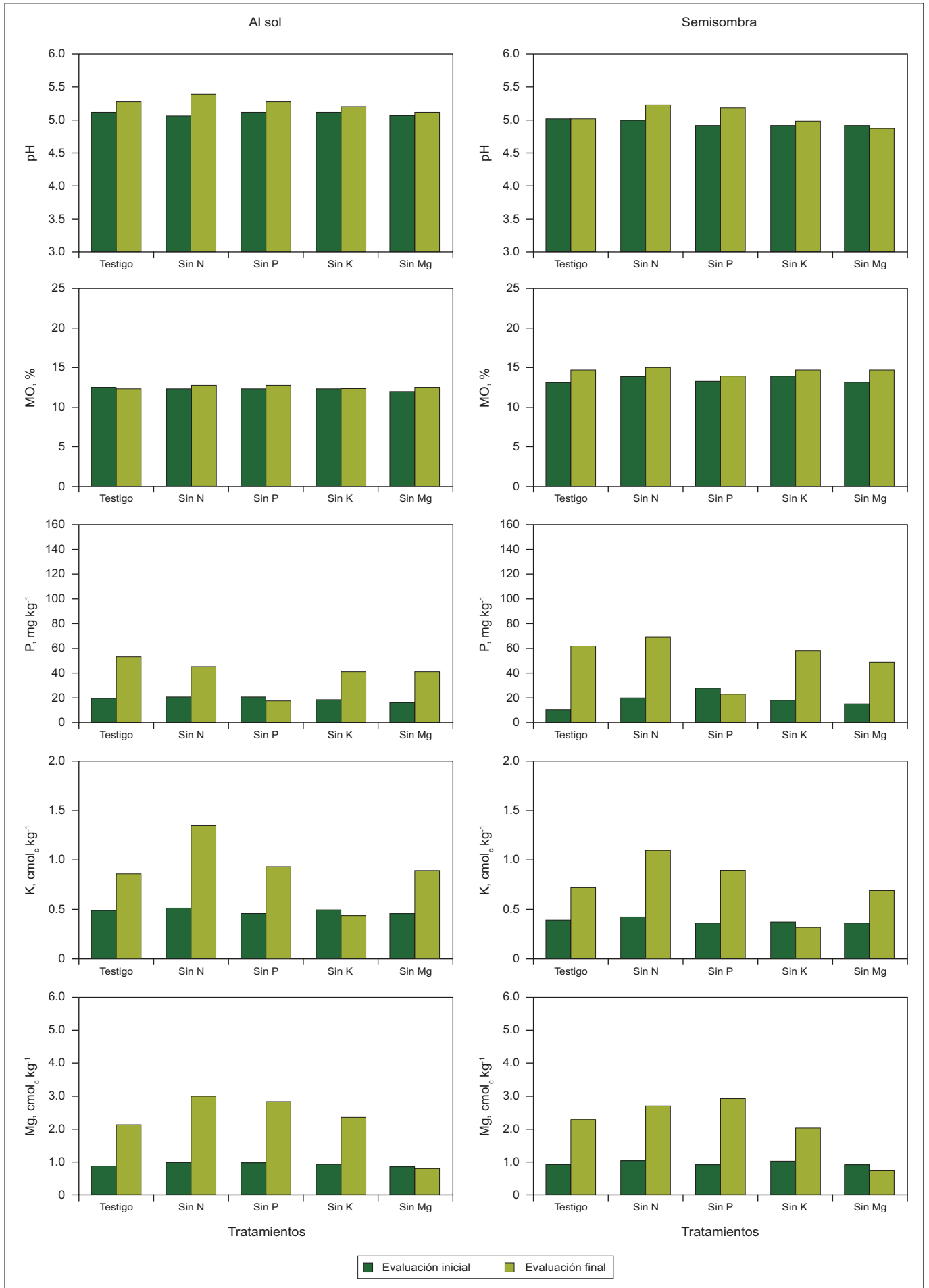


Figura 1. Cambios en el pH y en los contenidos de MO, P, K y Mg por el efecto de los tratamientos.

porte bajo, el efecto de la densidad sobre la producción sigue una función cuadrática, con un máximo biológico cercano a 11 000 plantas ha⁻¹. Con respecto a la radiación solar, se ha demostrado una relación inversa entre el nivel de la sombra y la producción de café (Farfán y Mestre, 2004). En cuanto a los factores ambientales, la mayoría de las plantaciones bajo semisombra estaban ubicadas en los departamentos de Cesar y La Guajira (**Tabla 2**), los cuales presentan un déficit hídrico marcado en algunos meses del año (Jaramillo y Arcila, 1996), que afecta negativamente la producción, adicional a las limitaciones de índole físico que exhiben los suelos de esta región, que en su mayoría son de origen ígneo y en menor grado metamórfico y sedimentario (Gómez et al., 2000).

En el primer año no se registraron diferencias significativas entre los tratamientos en los dos sistemas; resultado que estaría relacionado con una baja demanda de nutrientes por la menor cosecha en este ciclo productivo y la disponibilidad de reserva de los elementos requeridos en el suelo y en la planta al iniciar el experimento. Sobre el tema, Mestre (1977) sostiene que el efecto de la fertilización en la producción de café puede que no se manifieste en el primer año en el que se inicia el trabajo de investigación sino al siguiente, debido a que el fertilizante suministrado influye

principalmente sobre el crecimiento de ese año y la producción del grano tiene lugar en las ramas formadas el año anterior. Uribe y Mestre (1976) al evaluar la respuesta al N, P y K, en ocho localidades de la zona cafetera, sólo registraron efecto de P y K para la primera cosecha en una localidad, y para el N en cinco. Un comportamiento similar se reporta para el Mg (Uribe y Salazar, 1981) y para el P (Uribe, 1983).

En el segundo y el tercer año se encontró respuesta a la aplicación de N, tanto en los cafetales a plena exposición solar como bajo semisombra. En el cuarto año, la tendencia registrada fue similar a los últimos dos ciclos, pues el rendimiento más bajo correspondió al tratamiento sin N; pese a ello, solamente se detectaron diferencias en las plantaciones a plena exposición solar. El hecho de que no se haya presentado efecto de los tratamientos en los cafetales bajo semisombra estaría relacionado con el efecto conjugado del menor número de sitios (repeticiones) para esta cosecha y la alta variabilidad asociada. Para esta última cosecha, la carencia de los otros nutrientes, especialmente el K, afectó levemente el rendimiento en ambos sistemas, sin que fuera detectado estadísticamente.

Carvajal (1984) sostiene que en ocasiones el efecto de la aplicación de K y P tiene una ocurrencia a largo plazo,

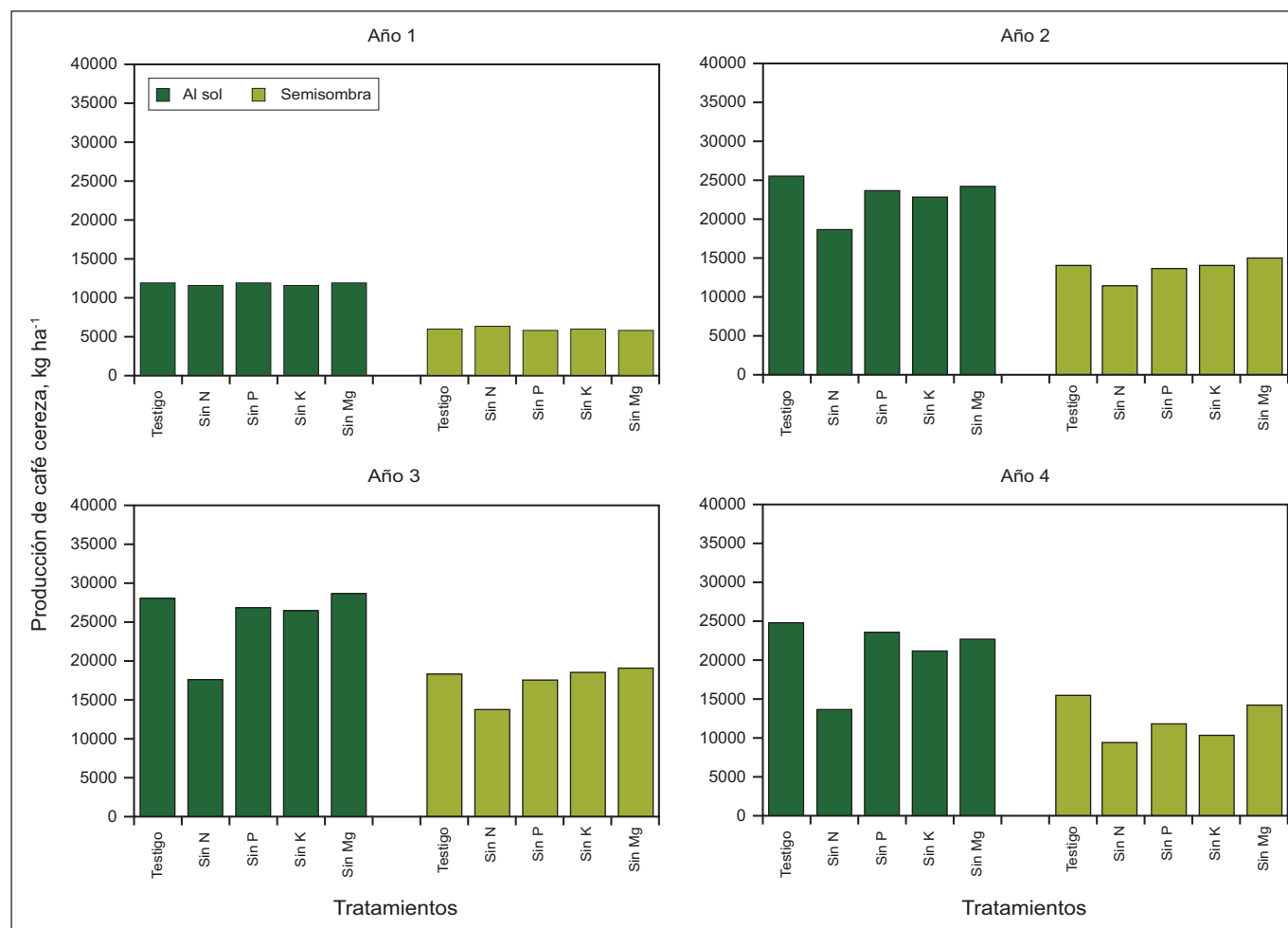


Figura 2. Promedios de la producción de café cereza obtenidos durante cuatro años.

Tabla 3. Promedios de producción de café cereza (kg ha⁻¹) y coeficientes de variación (CV) por tratamientos y sistema, correspondientes a cuatro cosechas.

Tratamiento	Sistema				Promedio	CV, %
	Al sol		Semisombra			
	Promedio	CV, %	Promedio	CV, %		
NPKMg-Testigo	22 172 A	54.00	12 856 A	57.31	18 777 A	60.81
PKMg-Sin N	15 514 B	57.90	10 171 A	63.34	13 567 B	62.79
NKMg-Sin P	21 127 A	51.71	12 102 A	62.49	17 838 A	60.11
NPMg-Sin K	20 412 A	51.60	12 577 A	59.23	17 556 A	58.19
NPK-Sin Mg	21 677 A	51.01	13 177 A	62.25	18 579 A	58.54
Promedio	20 181 a	54.23	12 177 b	60.99	17 263	61.01

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre los sistemas, según prueba t al 5%.

Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos para un mismo sistema, según prueba Duncan al 5%.

pudiéndose observar su respuesta después del segundo o tercer año. Pese a lo anterior, para el caso particular de este estudio, el análisis de los datos de manera global no revela el comportamiento en referencia. Los anteriores resultados coinciden con los obtenidos por Sadeghian et al. (2006), quienes reportan efecto del suministro de N a partir del segundo año de evaluación, y de K solo en el cuarto año, mientras que para el P y Mg no hubo respuesta. Al considerar los promedios obtenidos durante cuatro años, solo se presentó una disminución significativa en el rendimiento por la falta de N en los cafetales al sol (Tabla 3). En el sistema de producción bajo semisombra, la magnitud de la reducción fue menor y no alcanzó a detectarse estadísticamente. Cuando se comparan los promedios de los cinco tratamientos en los dos agroecosistemas, se obtienen los mismos resultados que en el sistema a plena exposición. De acuerdo a lo anterior, se puede señalar al N como el nutriente más crítico en la producción de café bajo las condiciones evaluadas, y particularmente para las plantaciones a libre exposición solar. Se hubiera esperado una respuesta similar para el caso de K, tal como lo reportan Uribe y Mestre (1976) y Hernández et al. (2004).

Calibración del análisis de suelo

Materia orgánica

Para el primer año de evaluación, la MO del suelo como indicador de la disponibilidad de N, no se relaciona con el rendimiento relativo (RR) en los dos sistemas, sea por separado o analizado conjuntamente (Figura 3).

En el segundo año, la tendencia registrada se ajustó a un modelo cuadrático, la cual fue más evidente para el siguiente ciclo, independiente del sistema de manejo. Los puntos de inflexión de las curvas obtenidas estuvieron entre 17 y 20% de MO, con un promedio cercano a 18%. En suelos con niveles de MO menores al 8% o mayores al 30%, el RR se redujo en más del 50% al eliminar el N de los planes de fertilización. Lo anterior pone de

manifiesto que, en el caso de este estudio, el modelo rectilíneo discontinuo no sería un buen estimador estadístico para describir el comportamiento de la producción en función de la MO, pues éste determina un nivel crítico en particular, después del cual la respuesta a la fertilización se hace cada vez menor, lo cual no ocurrió.

En un estudio de calibración para arroz (Agboola y Ayodele, 1987), desarrollado en Nigeria, se encontró una relación lineal entre el rendimiento del cultivo y la MO del suelo; comportamiento que estaría relacionado con los contenidos más bajos de la MO (entre 1.1 y 7.7%). Para Colombia, el ICA (1992) se basa en el piso térmico como indicador de la disponibilidad del N en función de la MO, en este sentido, para regiones de clima medio o templado (como es el caso de café), se cataloga como un nivel alto aquel suelo cuyo contenido sea mayor a 5%, límite que corresponde a los valores más bajos encontrados en este trabajo. Lo anterior se debe al hecho de que la gran mayoría de los suelos en cuestión tienen origen volcánico o influencia de cenizas, resistentes a la mineralización, en respuesta a la presencia de la alofana como mineral predominante (Zech et al., 1997).

Para algunas condiciones de Brasil (Chaves, 2002) o Kenia (CRF, 1991), no se considera el contenido de la MO para ajustar las dosis de N en el cultivo de café. Esta recomendación puede deberse a las pocas variaciones que presentan estos suelos, los cuales son relativamente pobres en esta propiedad. En contraposición, en Colombia sí se tiene en cuenta la MO para ajustar la fertilización nitrogenada (Sadeghian y Duque, 2003), pues en la zona cafetera del país existe una amplitud considerable entre los niveles.

Fósforo

El nivel crítico para el P, determinado por el modelo lineal-discontinuo, presentó ciertas variaciones a través de tiempo, pero el rango en el que fluctuó fue relativamente reducido (Figura 4).

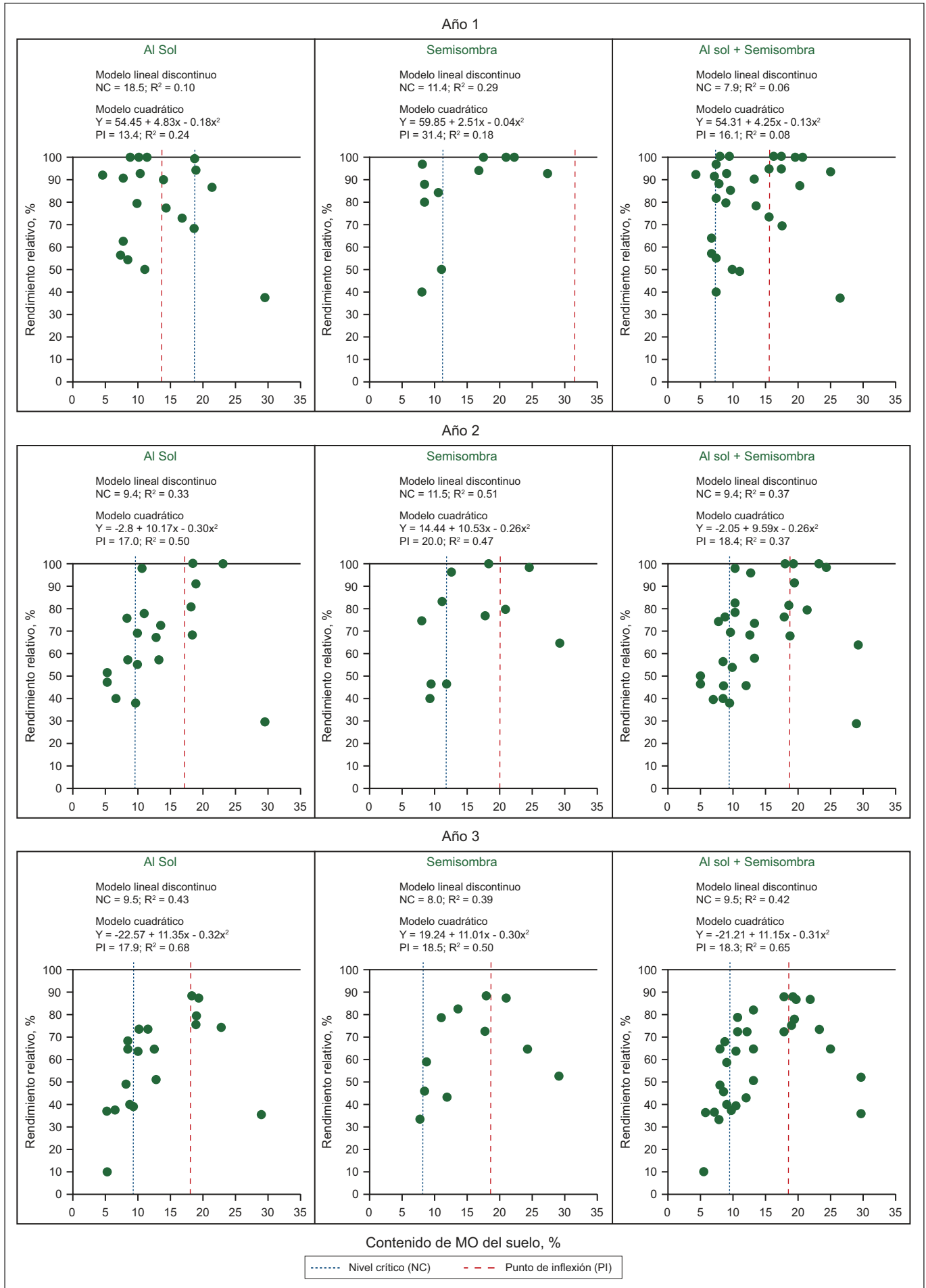


Figura 3. Relación entre el contenido de MO del suelo y el rendimiento relativo de café al sol y bajo semisombra para un periodo de tres años.

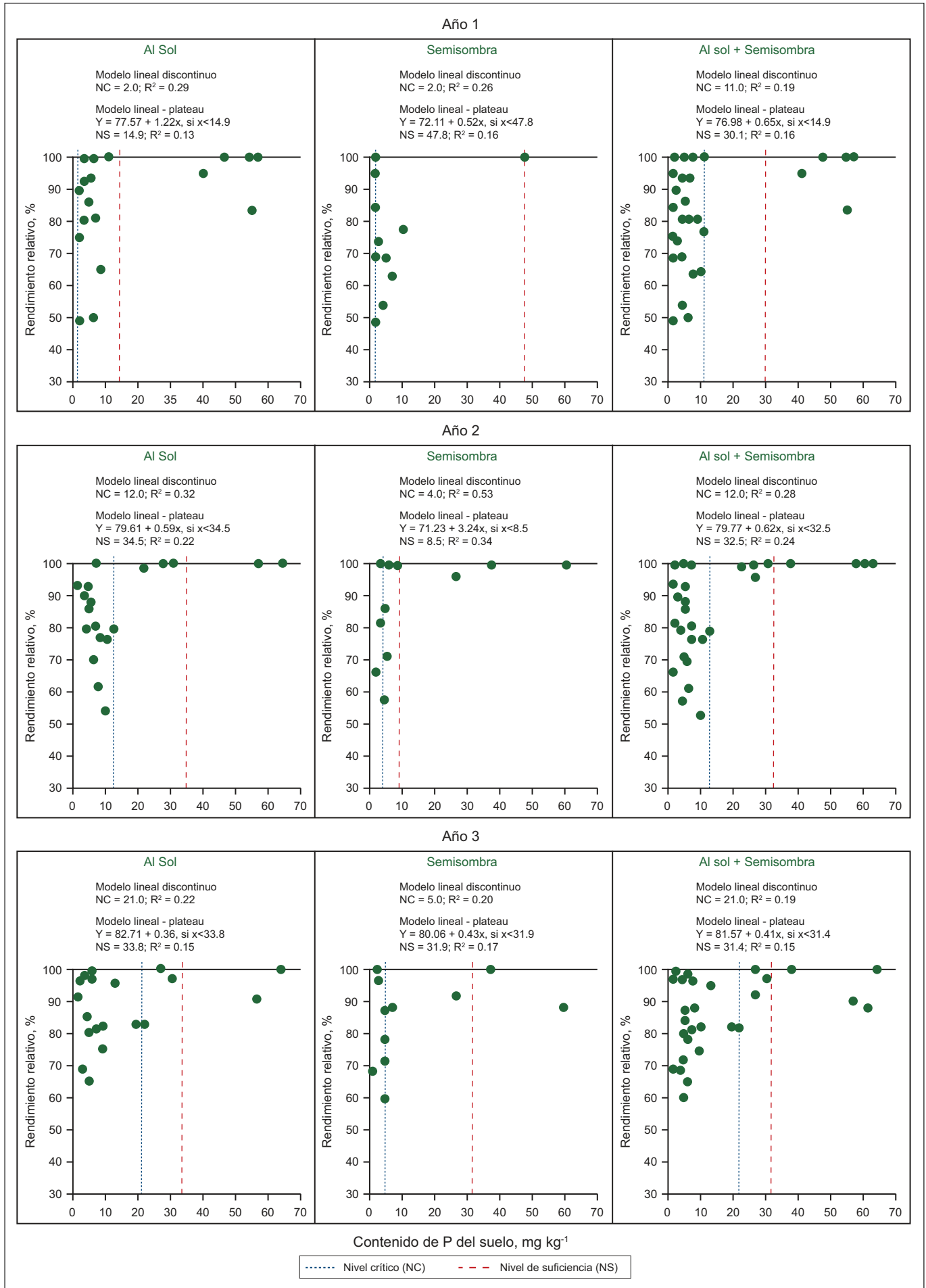


Figura 4. Relación entre el contenido de P del suelo y el rendimiento relativo de café al sol y bajo semisombra para un periodo de tres años.

En el primer año se encontró un valor muy bajo del nivel crítico para los dos sistemas (2 mg kg^{-1}), pese a ello, el análisis conjunto de los resultados (sol + semisombra) sugiere un nivel de 11 mg kg^{-1} , el cual se aproxima a lo establecido actualmente para la etapa de producción (10 mg kg^{-1}), según lo reportado por Sadeghian y Duque (2003), quienes resumen los criterios establecidos en el programa “Reporte e Interpretación del Análisis de Fertilidad de Suelos”. En los siguientes dos años, el nivel crítico para los cafetales al sol se incrementó consecutivamente hasta 21 mg kg^{-1} , mientras que para el sistema bajo semisombra permaneció por debajo de 5 mg kg^{-1} , comportamiento que podría estar asociado con una mayor extracción en el sistema a plena exposición solar. Con base en los registros de producción obtenidos y la extracción de elementos por los frutos de café (Sadeghian et al., 2006), la remoción de P por la cosecha en cafetales al sol se estima en $17 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, frente a $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ bajo semisombra. Al considerar los dos sistemas, los valores hallados para los últimos dos años estuvieron entre 11 y 21 mg kg^{-1} .

En general, se obtuvieron valores cercanos a 30 mg kg^{-1} para el nivel de suficiencia, mediante el empleo del modelo lineal-plateau; solo en dos oportunidades (sistema al sol en el primer año y semisombra en el segundo año), los niveles encontrados fueron menores al nivel en referencia.

Los resultados mencionados presentan algunas variaciones frente a los reportados por países productores de café, posiblemente en respuesta a factores como el método de laboratorio empleado, origen de los suelos y manejo, entre otros. CRF (1991) considera para Kenia como bajo $P < 15 \text{ mg kg}^{-1}$ y alto $P > 30 \text{ mg kg}^{-1}$; Chaves (2002) establece los siguientes rangos de fertilidad para Brasil: menor de 15 mg kg^{-1} , entre 15 y 22 mg kg^{-1} y mayor de 22 mg kg^{-1} ; a su vez, Raju (1988) define como nivel crítico 7 mg kg^{-1} para condiciones de India.

Potasio

Los valores del nivel crítico de K, determinados por medio del modelo rectilíneo-discontinuo, presentaron algunas variaciones a través de tiempo, sin que hubiera una tendencia que indicara un efecto del sistema de manejo (Figura 5). En general, el ajuste del modelo fue mejor (mayor R^2) para cafetales al sol, lo cual estaría relacionado con un mayor número de registros para este sistema; por ello, el análisis conjunto de los datos (al sol + semisombra) fue más concluyente y con un rango de valores más estrechos, los cuales estuvieron comprendidos entre 0.20 y $0.30 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

Los niveles de suficiencia, evaluados mediante el modelo lineal-plateau, estuvieron entre 0.36 y $0.80 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$; en este caso tampoco se evidenció una tendencia clara que indicara influencia del sistema. Al

analizar de manera conjunta los resultados, las variaciones fueron bajas, pues el rango de los valores encontrado sólo fue de $0.05 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (entre 0.43 y $0.48 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Con base en lo anterior se puede concluir que para valores inferiores al nivel crítico (0.20 ó $0.30 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), existe una alta probabilidad de respuesta al suministro de K, y, por lo tanto, se deben aplicar las máximas dosis con el fin de incrementar su nivel en el suelo para obtener altas producciones, de acuerdo a la oferta ambiental. En este mismo sentido, cuando el contenido de K sea mayor al nivel de suficiencia (0.43 ó $0.48 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), no se espera un efecto considerable de la fertilización potásica; sin embargo, se podrá suministrar cierta cantidad del elemento para mantener la fertilidad en niveles superiores y evitar así su agotamiento en el suelo.

Para Colombia sólo existe un reporte de calibración para K en café, el cual corresponde a lo determinado por Bravo (Bravo, 1978); éste indica que para contenidos mayores a $0.35 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ la probabilidad de encontrar respuesta a la fertilización es menor al 5%. Valencia (1999), en base en el valor en referencia y el nivel de confianza para las determinaciones de K en el laboratorio ($\pm 0.06 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), establece como rango óptimo el intervalo entre 0.29 y $0.41 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, el cual se aproxima a 0.30 y $0.40 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Para otros países productores de café como Brasil, Kenia e India, en general, los niveles señalados varían entre 0.20 y $0.45 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Chaves, 2002; CRF, 1991; Raju, 1988), rango que se asemeja a lo encontrado en este trabajo.

Magnesio

Para el primer año se presentó una alta dispersión de los datos (Figura 6), posiblemente como consecuencia del efecto de labores que pueden afectar la disponibilidad de Mg en el suelo, tales como el encalamiento, práctica que incrementa el pH y los niveles de Ca.

Los niveles críticos obtenidos mediante el modelo lineal-discontinuo para este primer ciclo fueron altos frente a los siguientes dos años ($\geq 1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ y $\leq 0.5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente). Como se mencionó anteriormente, la respuesta al Mg en producción fue baja, resultado que se ve reflejado en los altos valores del RR para la mayoría de los datos, especialmente en los últimos dos años de evaluación. Para Colombia se han propuesto como nivel bajo de Mg, contenidos menores a $0.4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Sadeghian y Duque, 2003), valor diferente al registrado en este estudio para el primer año, pero cercano a los encontrados en los años siguientes.

En contraposición al P y K, no fue posible determinar un nivel de suficiencia para Mg, resultado que se relaciona con la falta de correlación entre los niveles del elemento en el suelo y la respuesta en producción a la fertilización.

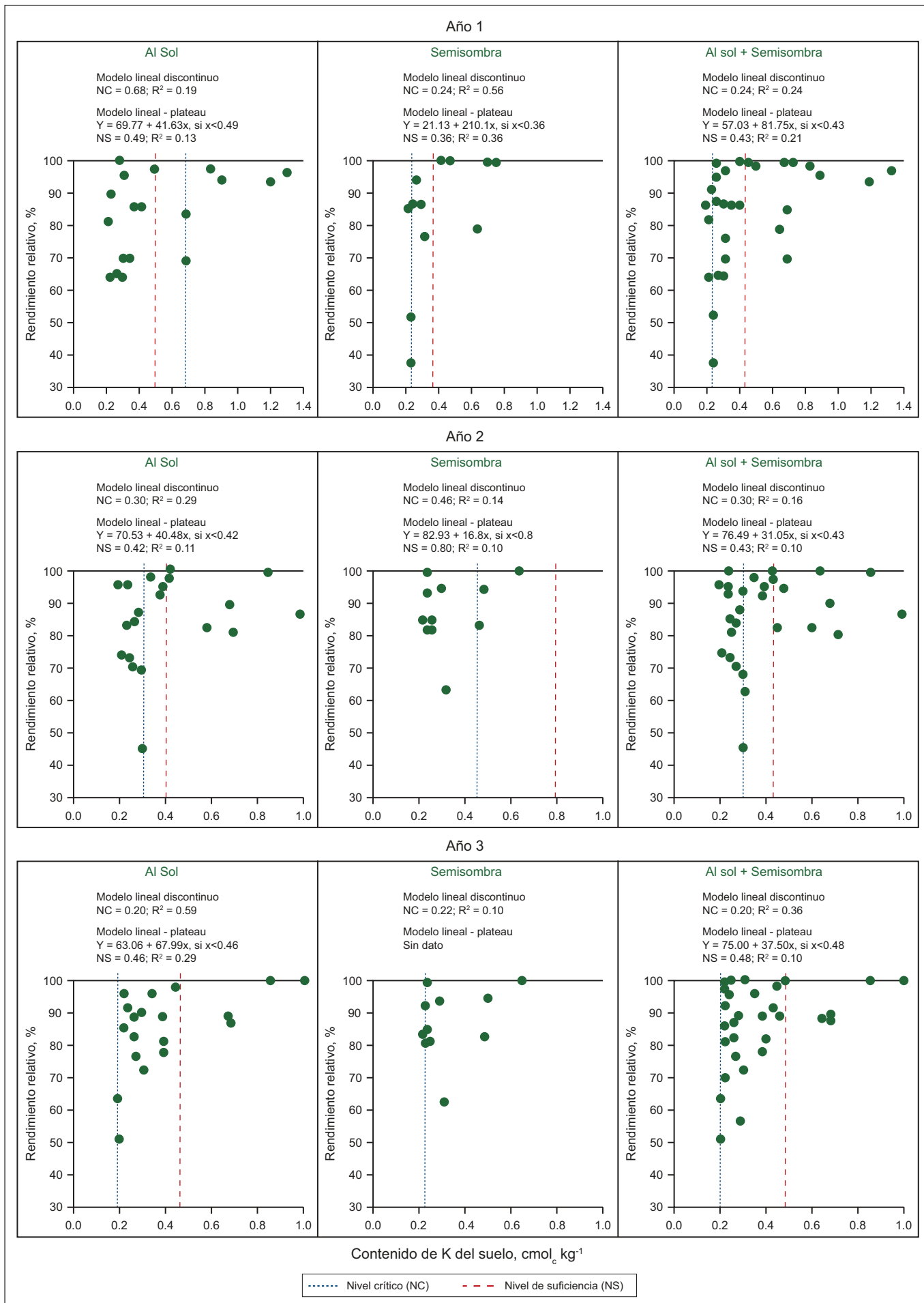


Figura 5. Relación entre el contenido de K del suelo y el rendimiento relativo de café al sol y bajo semisombra para un periodo de tres años.

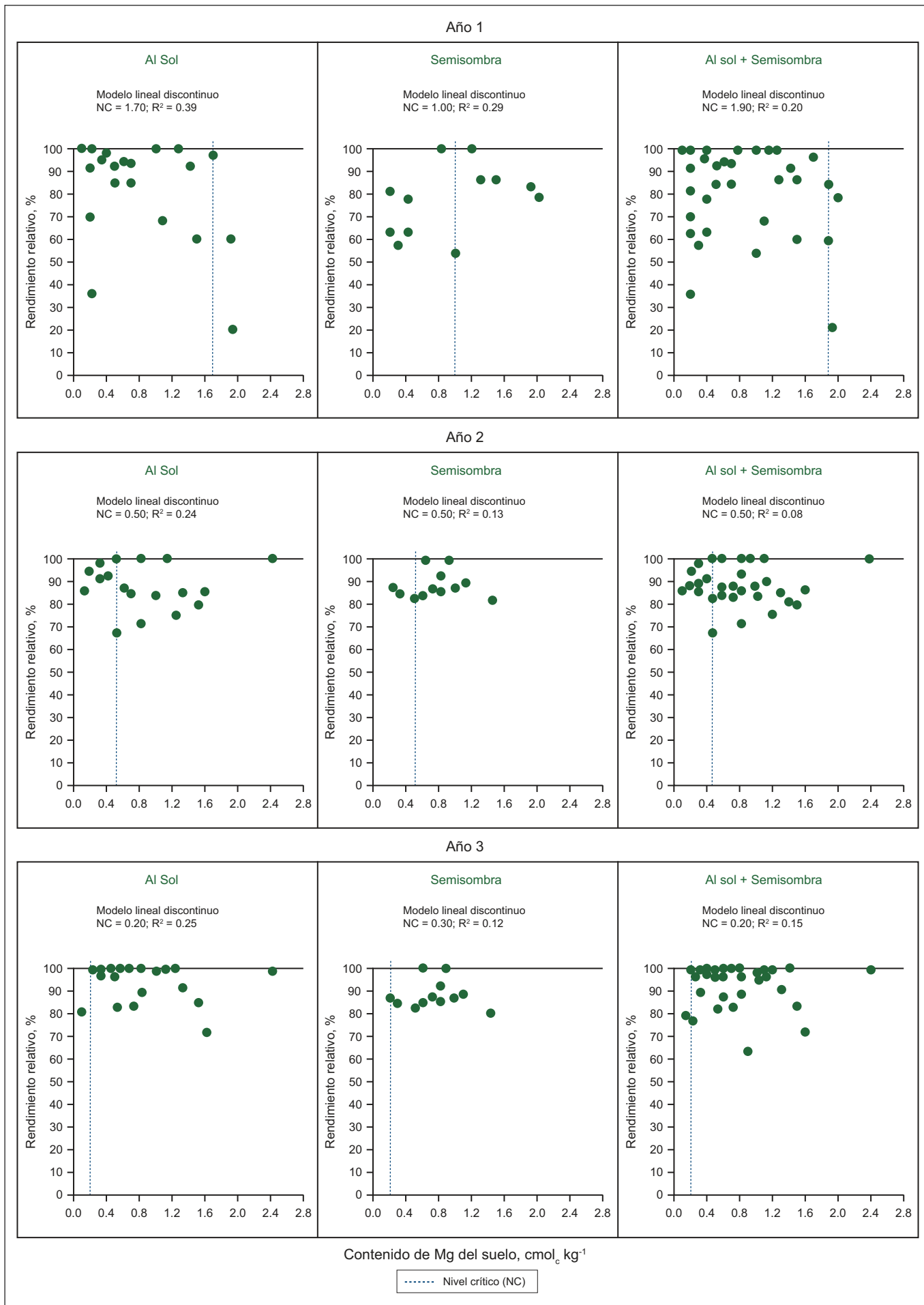


Figura 6. Relación entre el contenido de Mg del suelo y el rendimiento relativo de café al sol y bajo semisombra para un periodo de tres años.

Agradecimientos

El autor expresa sus más sinceros agradecimientos a los propietarios de las fincas en donde se llevó a cabo el experimento, a los Extensionistas y los Líderes de Extensión de los Comités Departamentales de Caldas y Cesar-Guajira: Sergio Granada, Luis G. Cortés, Francisco Bustamente, Arturo Valencia, Carlos A. León, Roberto Mejía, Edgar de los Ríos, Jorge H. Paez, Flor A. Zuluaga, Fredy M. Aguirre, Felipe E. Toro, Milton M. Herrera, Gabriel García, Arturo Valencia, Armando Pavón, Víctor Pacheco, José Molina y Euder Maestre. A los jefes de las Subestaciones Experimentales de Cenicafé: Juan C. García, John W. Mejía, Jorge C. Torres, Celso Arboleda (q.e.p.d.), José D. Arias, José E. Baute, Piedad D. Henao, Carlos R. Solarte y Pedro M. Sánchez. A Eduardo Hernández G., Esther C. Montoya R. y Rubén D. Medina.

Bibliografía

- Agboola, A., y O. Ayodele. 1987. Soil test calibration for upland rice in south western Nigeria. *Fertilizer Research*. 14:235-244.
- Beer, J.W., R.G. Muschler, D. Kass, y E. Somarriba. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems* 38:139-164.
- Bohn, H.L., B.L. Mcneal, y G.A. O'connor. 1993. Química del suelo. Mexico, Editorial Limusa. S.A., 370 p.
- Bravo, G. 1978. Fertilización potásica en café. *Suelos Ecuatoriales* 9(2):68-75.
- Carvajal, J.F. 1984. Cafeto: Cultivo y fertilización. 2ed. Berna, International Potash Institute, 1984. 254 p.
- Cate, R.B., y L.A. Nelson. 1971. Simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into tow classes. *Soil Science Society of American*, 35:658-660.
- Chaves, J.C.D. 2002. Manejo do solo. Adubação e calagem, antes e após a implantação da lavoura cafeeira. Londrina, Instituto Agrônomo do Paraná, Circular No. 120. 36 p.
- Coffee Research Foundation (CRF), 1991. Standard recommendations for fertilizer, Kenya Coffee 56:1153-1160.
- Duque, H. 2004. Cómo reducir los costos de producción en la finca cafetera. 2ed. Chinchiná, Cenicafé. 101 p.
- Evans, C.E. 1987. Soil test calibration. In: BROWN, J.R. Soil testing: sampling, correlation, calibration, and interpretation. Madison, Soil Science Society of America., pp. 23-30.
- Farfán, F., y A. Mestre. 2004. Respuesta del café cultivado en un sistema agroforestal a la aplicación de fertilizantes. *Cenicafé* 55(2):161-174.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 1993. Manual de uso de fotografías aéreas. Aplicación al Sistema de Información Cafetera. Bogotá, FNC.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 2007. Sistema de Información Cafetera: Encuesta nacional cafetera SICA. Estadísticas Cafeteras. Bogotá, FNC.
- Gómez, L., A. Caballero, y J.V. Baldión. 2000. Ecotopos cafeteros de Colombia: Zonificación Agroecológica. In: SIMPOSIO sobre Suelos de la Zona Cafetera Colombiana. Julio 24-28. Chinchiná, Cenicafé. 24 p.
- Guerrero, R. 2004. El diagnóstico cuantitativo de la fertilidad del suelo. In: BOLETÍN de Suelos. No. 42. Bogotá, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, pp. 12-17.
- Guerrero, R. 2004. Propiedades generales de los fertilizantes sólidos. 4ed. Bogotá, Monómeros Colombo Venezolanos, 46 p.
- Hernández, E., S. Sadeghian, y M. Ross. 2004. Avances sobre el efecto de fuentes y dosis de potasio en la producción y calidad del café. In: CONGRESO Latinoamericano, 16; Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, 12. Cartagena (Colombia), Septiembre 26-Octubre 1, 2004. Bogotá, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. 10 p.
- Instituto Colombiano Agropecuario. 1992. Fertilización en diversos cultivos. 5ed. Tibaitatá, ICA. 64 p.
- Jaramillo, A. 2005. Clima andino y café en Colombia. Chinchiná, Cenicafé. 196 p.
- Jaramillo, A., y J. Arcila. 1996. Épocas recomendables para la siembra de los cafetos. Chinchiná, Cenicafé. 8 p. (Avances Técnicos No. 229).
- Mestre, A. 1977. Determinación de la rata óptima de fertilización en plantaciones de café sin sombrío. *Cenicafé* 28(2):51-60.
- Mestre, A. 1996. Respuesta del café bajo sombra a la fertilización. Chinchiná, Cenicafé, 1996. 4 p. (Avances Técnicos. No. 231).
- Nelson, L. 1999. Estadística en la investigación del uso de fertilizantes. Ottawa, INPOFOS, 66 p.
- Nelson, L., y R. Anderson. 1977. Partitioning of soil test-crop response probability. In: Peck et al. Soil testing: Correlation and interpreting the analytical results. Madison, ASA Special Publication. 29. ASA, CSSA, and SSSA. pp. 19-38.
- Pavan, M.A., J.C.D. Chaves, y A. Androcioli. 1994. Produção de café em função da densidade de plantio, adubação e tratamento fitossanitário. *Turrialba* 44(4):227-231.
- Pavan, M.A., J.C. Dias, R. Siqueira, A. Androcioli, A. Colozzi, y E. Libro. 1999. High coffee population density to improve fertility of an Oxisol. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 34(3):459-465.
- Raju, T. 1988. Calibration of soil test values for coffee. *Journal of Coffee Research* 18(1):28-35.
- Sadeghian, S. 2003. Efecto de la fertilización con nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio sobre las propiedades químicas de suelos cultivados en café. *Cenicafé* 54(3):242-257.
- Sadeghian, S. 2006. Efecto de fuentes solubles de magnesio y azufre en la producción y calidad del café. In *Cenicafé. INFORME Anual de Actividades de Investigación 2005-2006*. Chinchiná, Cenicafé. 13 p.
- Sadeghian, S., y H. Duque. 2003. Análisis de suelos: importancia e implicaciones económicas en el cultivo del café. Chinchiná, Cenicafé. 8 p. (Avances Técnicos No. 308).
- Sadeghian, S., J.C. García, y E.C. Montoya. 2006. Respuesta del café a la fertilización con N, P, K y Mg en dos fincas del departamento del Quindío. *Cenicafé* 57(1):58-69.
- Sadeghian, S., B. Mejía, y J. Arcila. 2006. Composición elemental de frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha en la zona cafetera de Colombia. *Cenicafé* 57(4):251-261.
- Sparks, D.L. 1995. Environmental soil chemistry. San Diego (California), Academic Press. 267 p.
- Uribe, A. 1983. Efecto del fósforo en la producción de café. *Cenicafé* 34(1):3-15.
- Uribe, A., y A. Mestre. 1976. Efecto del nitrógeno, el fósforo y el potasio sobre la producción de café. *Cenicafé* 27(4):158-173.
- Uribe, A., y A. Mestre. 1988. Efecto de la densidad de población y de la disposición de los árboles en la producción de café. *Cenicafé* 39(2):31-42.
- Uribe, A., y N. Salazar. 1981. Distancias de siembra y dosis de fertilizante en la producción de café. *Cenicafé* 32(3):88-105.
- Uribe, A., y J.N. Salazar. 1981. Efecto de los elementos menores en la producción de café. *Cenicafé* 32(4):122-142.
- Valdes, H., y A. Herrón. 1966. Respuesta a la aplicación de fertilizantes en dos proyectos de cafetos bajo sombra. *Cenicafé* 17(4):142-146.
- Valencia, G. 1999. Fisiología, nutrición y fertilización del cafeto. Chinchiná, Cenicafé-Agroinsumos del Café. 94 p.
- Zapata, R.D. 1997. Fundamentos químicos para evaluar la fertilidad del suelo. In: Diagnóstico químico de la fertilidad del suelo. Comité Regional de Antioquia. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Medellín, Ecográficas Ltda., pp. 1-11.
- Zapata, H.R. 2004. Química de la acidez del suelo. Cali, Cargraphics. 208 p.
- Zech, W., N. Senesi, G. Guggenberger, K. Kaiser, J. Lehman, T. Miano, A. Miltner, y G. Schorff. 1997. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma* 79(1197):117-161. □

ES NECESARIA UNA FERTILIZACIÓN BALANCEADA PARA LOGRAR ALTAS PRODUCCIONES DE ALFALFA

H. Fontanetto¹, S. Gambaudo¹, O. Keller¹, M. Sillón², E. Weder³, G. Gianinetto³, G. Berrone³, M. Meyer³ y C. Cánepa³

Introducción

Los nutrientes limitantes para la producción de la alfalfa en los suelos de la zona centro-este de Santa Fe, son en orden de importancia: el fósforo (P), el calcio (Ca) y el azufre (S) (Fontanetto et al., 2004; 2006; 2008; 2009; Gambaudo et al., 1998, 2001; 2007a; 2007b; Vivas y Quaino, 2000).

Cuando no se realiza una fertilización de “arranque” o al momento de la siembra, un recurso disponible para la reposición de los mencionados nutrientes en el suelo es la refertilización luego de que la pastura está implantada. Esta práctica se realiza con el fin de “corregir sobre la marcha”, las deficiencias nutricionales presentes en el suelo y que el cultivo de alfalfa alcance el óptimo de producción. Esta última alternativa es muy poco utilizada por la ausencia de información regional que demuestre sus beneficios. En este sentido, los resultados informados por Fontanetto y Bianchini (2007) en la zona central de Santa Fe aplicando fertilizaciones anuales en pasturas instaladas, fueron muy alentadores.

La corrección de una condición nutricional deficitaria de P, S, Ca y magnesio (Mg) en el suelo es un factor determinante en una estrategia de alta producción de materia seca (MS) de alfalfa. Por ello, el objetivo de la presente experiencia fue evaluar el efecto de la refertilización con P, S, Ca y Mg sobre la producción de materia seca de una pastura de alfalfa pura de 1 año en un suelo de baja fertilidad.

Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en la zona rural de Esperanza (Santa Fe), departamento Las Colonias, sobre un suelo Argiudol típico de la serie Esperanza. El análisis químico de la capa superficial (0-20 cm) arrojó un valor de P extractable de 18 ppm; 2.68% de materia orgánica (MO) y pH 5.9. Asimismo, fue baja la capacidad de intercambio catiónico (CIC, de 15.1 meq 100 g⁻¹ suelo), y también los valores de Ca y Mg intercambiables (7.3 y 0.7 meq 100 g⁻¹ suelo, respectivamente). Una fertilidad química adecuada para estos dos últimos nutrientes se pueden aún encontrar en suelos de la zona rural de Rafaela, con valores promedios de CIC de 17 a 19 meq 100 g⁻¹ suelo y niveles de Ca y Mg de 9.5 a 11 y 1.3 a 1.7 meq 100 g⁻¹ suelo, respectivamente. Asimismo, los valores de pH ideal deberían ser de 6.1 (INTA, 1991).

En la experiencia, se aplicó una sola dosis de Ca (1000 kg ha⁻¹ de una calcita con 34% de CaO) y también una sola dosis de Ca y Mg (1000 kg ha⁻¹ de una dolomita con 32% de CaO y 14% de MgO) a fines de julio de 2008. Las aplicaciones de los nutrimentos se realizó el 11/09/2008, de la siguiente manera: aplicando 300 kg ha⁻¹ de superfosfato triple de calcio (SFT con 20% de P: P30) y 200 kg ha⁻¹ de yeso agrícola (YS con 18% de S: S36), respectivamente. La variedad de alfalfa utilizada en la experiencia fue Hf 600 sembrada el 13/04/2007, utilizándose 15 kg ha⁻¹ de semilla. Los tratamientos ensayados se detallan en la **Tabla 1**.

Los tratamientos de fertilización se dispusieron en un diseño de bloques completos al azar con 4 repeticiones y el tamaño de la unidad experimental fue de 2 m de ancho por 8 m de largo. Los cortes de forraje se efectuaron en el estado de 10% de floración del cultivo o cuando los rebrotes basales tenían 5 cm de longitud, sobre una superficie de 7 m² por unidad experimental. La producción de MS fue analizada mediante el análisis de la variancia y las diferencias entre medias de cada factor mediante prueba de Duncan (P < 0.05) (SAS Institute, 1989). En este artículo se presentan los resultados que corresponden a 11 cortes desde la aplicación de los fertilizantes y hasta agosto de 2009.

Resultados y discusión

La producción de MS de cada corte de la alfalfa con los diferentes tratamientos de fertilización se detalla en la **Figura 1**. Para todos los cortes la alfalfa fertilizada tuvo diferencias altamente significativas respecto al Testigo (P < 0.0001). Las diferencias entre los tratamientos se comenzaron a hacer notorias a partir del 3^{er} corte y la significancia al agregado de las diferentes variantes de fertilización fue disminuyendo a partir del 9^{no} corte. En

Tabla 1. Tratamientos de fertilización ensayados en alfalfa.

Tratamiento	Nutrientes	Producto y dosis, kg ha ⁻¹
1	Testigo	Sin fertilizante
2	P60-S0	300 kg ha ⁻¹ de SFT
3	P0-S36	200 kg ha ⁻¹ de yeso agrícola
4	P60-S36	Idem 2 + 3
5	P60-S36-Ca	Idem 4 + 1000 kg ha ⁻¹ de Calcita
6	P60-S36-Ca-Mg	Idem 5 + 1000 kg ha ⁻¹ de Dolomita

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. INTA-EEA Rafaela. Argentina.

² Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral. FCA-UNL. Argentina.

³ Agricultores Federados Argentinos, Centro Primario Humboldt. AFA-Centro Primario Humboldt. Argentina.

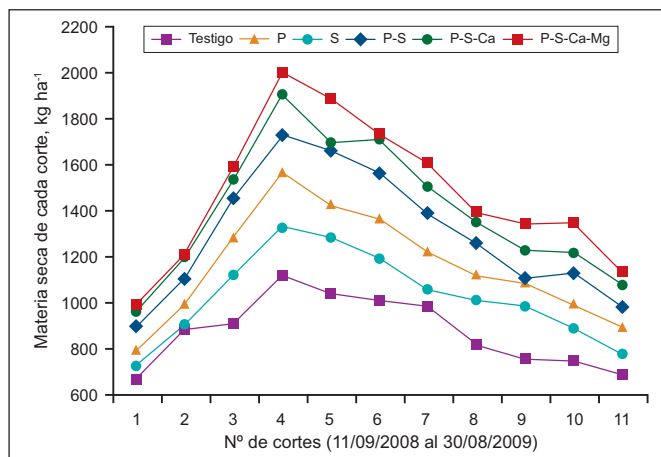


Figura 1. Producción de MS de cada uno de los 11 cortes de alfalfa fertilizada al voleo. Zona rural de Esperanza (Santa Fe).

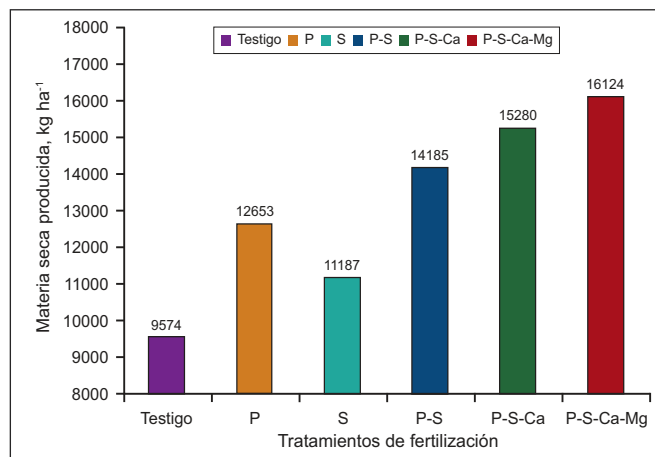


Figura 4. Producción total de MS de 11 cortes de una pastura de alfalfa de 1 año fertilizada al voleo. Zona rural de Esperanza (Santa Fe).

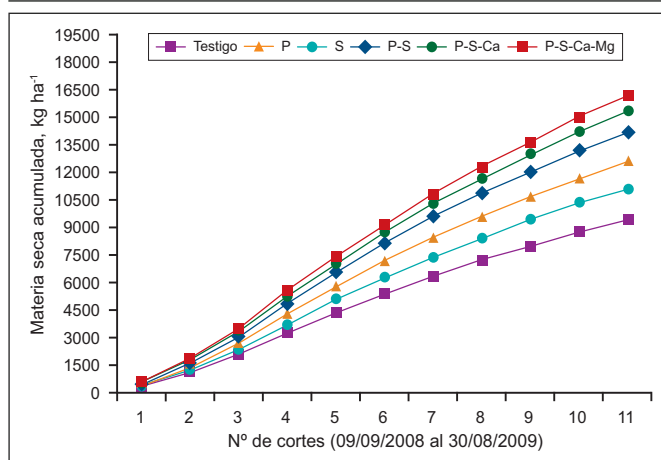


Figura 2. Producción acumulada de MS de 11 cortes de alfalfa fertilizada al voleo. Zona rural de Esperanza (Santa Fe).

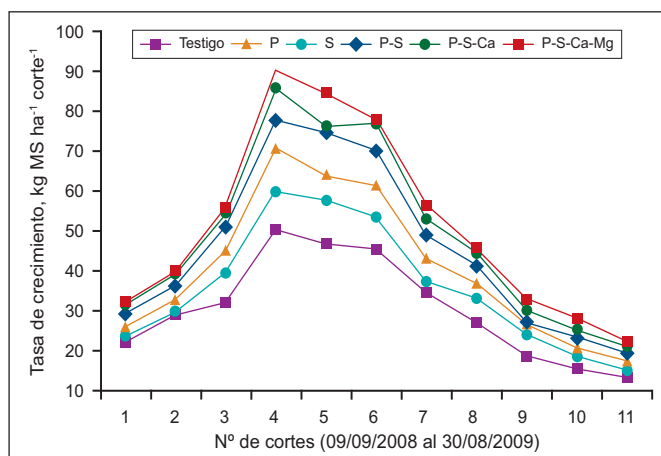


Figura 3. Tasa de crecimiento de la alfalfa de 11 cortes con los tratamientos ensayados de fertilización al voleo. Zona rural de Esperanza (Santa Fe).

el 11^{vo} corte, los tratamientos fertilizados siguieron mostrando diferencias respecto al testigo, pero entre éstos se mantuvo solamente para el caso de los tratamientos 4, 5 y 6. El tratamiento 2 (P60S0) en el último corte presentó un valor de producción de MS similar al testigo, lo que demostraría que luego del mismo sería necesario efectuar nuevamente una

aplicación de S. Para el resto de los nutrientes, la nueva aplicación sería necesaria luego de 2 cortes más, de acuerdo a las tendencias registradas en esta experiencia (Figura 1).

La producción de MS acumulada de la alfalfa con los diferentes tratamientos de fertilización se detalla en la Figura 1. Las diferencias debidas a los tratamientos sobre producción acumulada de MS comienza a hacerse significativa a partir del 3^{er} corte (Figura 2). Las tasas de crecimiento de la alfalfa por los tratamientos de fertilización se detallan en la Figura 3. Todos los tratamientos de fertilización afectaron positivamente la tasa de crecimiento del cultivo, con los valores mayores para los tratamientos con todos los nutrientes combinados. La producción total de los 11 cortes realizados se detalla en la Figura 4.

La producción total de MS arrojó incrementos muy significativos por efecto de la fertilización, con valores de 1613 a 6550 kg ha⁻¹ (aumentos del 16.8% al 68.4% en relación al testigo). Si esos incrementos se transforman en litros de leche extras producidos por vacas lecheras, teniendo en cuenta que para producir 1 litro de leche se necesita 1 kg de MS de alfalfa y asignándole un precio de \$ 1.40 por litro de leche, se pueden estimar los beneficios obtenidos con los diferentes tratamientos de fertilización (Tabla 2).

Los márgenes brutos (MB) logrados con los diferentes tratamientos de fertilización fueron muy significativos y variaron de 2128 a 7910 \$ ha⁻¹, demostrando la altísima rentabilidad de la fertilización de la alfalfa y además, que las fertilizaciones más completas serían también las más sustentables para el suelo. Desde un análisis estrictamente económico, los tratamientos de mayor MB fueron el 6 y el 5, luego el 4, el 2 y el 3. Los tratamientos completos (5 y 6) produjeron altos MB y serían los más recomendados desde lo productivo y lo sustentable.

Tabla 2. Producción de MS de alfalfa, costo de los fertilizantes, litros de leche adicionales producidos respecto al testigo y margen bruto, para los diferentes tratamientos de fertilización.

Tratamientos	Nutrientes	MS	Costo del	Litros de	Ingreso	Margen Bruto
		producida	tratamiento	leche	adicional	adicional
		kg ha ⁻¹	+ aplicación	excedentes	\$ ha ⁻¹	(MB)
			\$ ha ⁻¹	s/testigo		\$ ha ⁻¹
1	Testigo	9574	0	0	0	0
2	P	12 653	830	3079	4311	3481
3	S	11 187	130	1613	2258	2128
4	P-S	14 185	910	4611	6455	5545
5	P-S-Ca	15 280	1260	5706	7988	6728
6	P-S-Ca-Mg	16 124	1210	6550	9170	7910

SFT: \$ 2600 t⁻¹; Yeso agrícola: \$ 400 t⁻¹; Calcita: \$ 350 t⁻¹; Dolomita: \$ 350 t⁻¹; 1 litro de leche: \$ 1.40.

Conclusiones

- La refertilización de la alfalfa a 1 año de implantada produjo incrementos muy altos en la producción de MS.
- La refertilización manifestó ser una práctica que permite recuperar deficiencias nutricionales en alfalfares en producción y que son sub-fertilizados (bajas dosis) a la siembra.
- La fertilización balanceada con P, S, Ca y Mg es necesaria para lograr altas producciones de MS y con los mejores beneficios económicos.
- Si bien el Mg apareció como limitante de la producción en esta experiencia, es necesario seguir investigando el área que abarca su deficiencia en el suelo.

Bibliografía

Diaz Zorita, M., y S. Gambaudo. 2007. Fertilización y Encalado en Alfalfa. Capítulo 11. En El cultivo de la alfalfa en la Argentina. Editor: Basigalup, D. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. pp. 229-246.

Fontanetto, H., O. Keller, y H. Vivas. 2004. Buscando la fertilización balanceada de pasturas en el área central de Santa Fe. Sistemas Ganaderos en Siembra Directa. AAPRESID. 1^{er} Simposio Nacional "Hacia una Ganadería Competitiva". pp. 48-59.

Fontanetto, H., O. Keller, y H. Vivas. 2006. La fertilización de alfalfa en el área central de Santa Fe. A.A.P.R.E.S.I.D. Planteos Ganaderos en Siembra Directa: pp. 96-101. Marzo 2006.

Fontanetto, H., S. Gambaudo, O. Keller, M. Correnti, J. Ramuno, F. Díaz, M. Trucco, y L. Stangaferro. 2007. La fertilización de alfalfa en el área de Pilar (Santa Fe). A.A.P.R.E.S.I.D. Planteos Ganaderos en Siembra Directa: pp. 53-55. Abril de 2007.

Fontanetto, H., y A. Bianchini. 2007. Fertilización fosfatada y azufrada de alfalfa a la siembra y al año de implantación en el centro-este de Santa Fe.

Informaciones Agronómicas del Cono Sur 36:22-25. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.

Fontanetto, H., O. Keller, C. Negro, L. Beloti, y D. Giailevra. 2008. Fertilización de alfalfa en la región central de Santa Fe con fósforo, azufre, calcio y micronutrientes. A.A.P.R.E.S.I.D. Planteos Ganaderos en Siembra Directa: pp. 77-81. Marzo 2008.

Fontanetto, H., y O. Keller. 2009. Aspectos del manejo de la Fertilización de la Alfalfa en el área central de Santa Fe. Todo Agro Eventos. Jornadas de Alfalfa, Agosto de 2009. Cuadernos de la Alfalfa II: pp. 24-27.

Gambaudo, S. 1998. Fertilización: acidificación de los suelos y su corrección. 5^{to} Seminario de Actualización Técnica: Invernada, planteos de alta producción. CPIA, CADIA y SRA: pp. 163-169.

Gambaudo, S., A. Zampar, L. Tomatis, y O. Quaino. 2001. Respuesta de la alfalfa a la aplicación de dos enmiendas calcáreas. INPOFOS, Informaciones Agronómicas del Cono Sur, número 12:4-6.

Gambaudo, S. 2007a. Minerales para la Sustentabilidad de los Sistemas Agropecuarios. En Simposio Fertilidad 2007: Bases para el manejo de la nutrición de los cultivos y los suelos. International Plant Nutrition Institute - Fertilizar Asociación Civil. Ed. García, F y Ciampitti. I. pp.13-18. ISBN 978-987-23542-0-6.

Gambaudo, S. 2007b. Identificación de zonas para encalado y criterios a tener en cuenta para el cálculo de la dosis variable. 7^{mo} Curso Internacional de Agricultura de Precisión y 2^{da} Exposición de Máquinas Precisas. Ediciones INTA. EEA Manfredi, 17, 18 y 19 de julio. pp. 82-87.

INTA. 1991. Carta de Suelos de la República Argentina. Hojas 3160-26 y 25. Esperanza-Pilar. INTA EEA Rafaela. 135 p.

SAS Institute Inc. 1989. SAS/STAT 'Users Guide, Version 6, 4th Edition, Volume 1, Cary, NC: SAS Institute Inc. 943 p.

Vivas, H.S., y O. Quaino. 2000. Fósforo y enmienda calcárea para la producción de alfalfa en dos suelos del centro este de Santa Fe. 1998/99. Actas del XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. Abril del 2000. □

EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DE AZUFRE EN MAÍZ: INDICADORES DE SUELO E INDICADORES VEGETALES. UTILIDAD DEL MEDIDOR DE CLOROFILA

Agustín Pagani y Hernán Echeverría*

Introducción

El azufre (S) es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas y su deficiencia ha sido reportada en numerosos cultivos (Havlin et al., 2005), incluyendo el maíz. Generalmente, suelos arenosos con bajo contenido de materia orgánica han sido identificados como escenarios frecuentes de respuesta al agregado de S. Además, la siembra directa, el empleo de fertilizantes y pesticidas libres de impurezas azufradas, la intensificación de la agricultura y la reducción de las emisiones atmosféricas de gases que contienen S han contribuido a la aparición cada vez más frecuente de sitios con respuesta a la aplicación de este nutriente. Respuestas a S por parte del cultivo de maíz han sido documentadas en numerosas regiones del mundo (Mallarino et al., 2000; Weil y Mughogho, 2000) así como también en la Argentina (Fontanetto et al., 2000; Prystupa et al., 2006; Pagani et al., 2009a).

El desarrollo de indicadores de disponibilidad de S para los cultivos es fundamental para el uso racional de fertilizantes. Si bien se ha trabajado mucho para determinar un método confiable para determinar deficiencias de S en el cultivo de maíz, aun no hay consenso entre los investigadores acerca de que metodología arroja los mejores resultados (Scherer, 2001). En general, los análisis de suelos no han resultado de utilidad para diagnosticar deficiencias de S en maíz (Scherer, 2009) por lo que los análisis de material vegetal son normalmente preferidos. En este sentido, la concentración de S total en planta y la relación nitrógeno (N):S han sido propuestas como herramientas para caracterizar el estatus azufrado del cultivo de maíz. Así, Tandon (1984) sugirió que el umbral crítico de S en hojas de maíz se encuentra entre 0.015 y 0.05 g kg⁻¹, aunque este valor varía en función del estadio de desarrollo. Por otro lado Terman et al. (1973) reportaron la utilidad de la relación N:S en planta como indicador del estatus azufrado del maíz. Estos investigadores propusieron una relación N:S aceptable de 16:1 o menor. Sin embargo, Kang y Osiname (1976) concluyeron que la relación N:S no es un buen indicador del estatus azufrado del cultivo.

La deficiencia de S en el cultivo de maíz, al igual que la de N, se caracteriza por un amarillamiento (clorosis) del follaje (Hitsuda et al., 2005). Sin embargo, debido a la

escasa movilidad del S dentro de la planta (a diferencia del N), los síntomas de su deficiencia se manifiestan generalmente en los estratos superiores del cultivo. Para N se han desarrollado métodos de diagnóstico basados en la cuantificación de la intensidad de color verde de las hojas (Blackmer y Schepers, 1995), pero no existe evidencia en la bibliografía acerca de la utilidad de la cuantificación del verdor foliar como herramienta para caracterizar el estatus azufrado del maíz.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la utilidad de diferentes métodos de diagnóstico de S para el cultivo de maíz.

Materiales y métodos

Se realizaron cinco experimentos en dos localidades de la región pampeana durante los años 2005 a 2009 con diferentes dosis de S. En la campaña 2005-2006 se empleó un experimento de larga duración en la Estación Experimental INTA de Balcarce en adelante denominado Balcarce I (Bce I), mientras que en la campaña 2006-2007 se realizaron dos experimentos, uno en el mismo sitio, denominado Balcarce II (Bce II) y otro en la localidad de 9 de Julio, denominado 9 de Julio I (9dJ I). Durante la campaña 2007-2008 se condujo un cuarto experimento en 9 de Julio, en adelante denominado 9 de Julio II (9dJ II). Finalmente, en la campaña 2008-2009 se utilizó nuevamente el ensayo de larga duración de Balcarce (Bce III). Algunas características de los suelos y prácticas de manejo de los cinco experimentos son presentadas en la **Tabla 1**. Todos los ensayos fueron fertilizados con 20-30 kg ha⁻¹ de fósforo (P) y 120-150 kg ha⁻¹ de N, asegurando una elevada disponibilidad. Las fuentes de N, P y S fueron urea granulada (46-0-0), superfosfato triple de calcio (0-20-0) y sulfato de calcio (20% S, 16% Ca), respectivamente.

En Bce I y Bce III se empleó diseño en bloques completos aleatorizados (DBCA) con tres repeticiones. En ambos experimentos se emplearon dos sistemas de labranza, convencional (LC) y directa (SD), y dos niveles de S (0 y 15 kg ha⁻¹). En Bce II, 9dJ I y 9dJ II, el sistema de labranza utilizado fue SD y el diseño DBCA (con tres repeticiones) con niveles de S de 0, 8 y 16 kg ha⁻¹ para Bce I y 9dJ I, y 0, 5, 10 y 20 kg ha⁻¹ para 9dJ II.

* Unidad Integrada INTA-FCA Balcarce, CC 276, (7620) Balcarce, Argentina. Correo electrónico: paganiagustin@hotmail.com

Tabla 1. Algunas características de los suelos, y prácticas de manejo y determinación de índice de verdor con el medidor de clorofila Minolta SPAD 502 en los cinco experimentos.

	Bce I	Bce II	Bce III	9dJ I	9dJ II
Localidad	Balcarce	Balcarce	Balcarce	9 de Julio	9 de Julio
Año	2005-2006	2006-2007	2008-2009	2006-2007	2007-2008
Tipo de Suelo	Argiudol Típico	Argiudol Típico	Argiudol Típico	Hapludol Típico	Hapludol Entico
Materia orgánica (g kg ⁻¹)	53 (6.4)	53 (1.4)	49 (3.7)	28 (4.8)	23 (1.2)
pH (1:2.5)	5.9 (0.3)	5.3 (0.12)	5.9 (0.2)	6.3 (0.1)	6.4 (0.6)
P (mg kg ⁻¹)	19.8 (5.9)	8.0 (2.81)	20.1 (4.7)	9.0 (3.5)	18.1 (1.5)
NO ₃ ⁻ -N (mg kg ⁻¹) 0-20 cm	13.3 (2.2)	14.8 (1.6)	17.6 (0.9)	9.0 (1.6)	10.5 (1.1)
20-40 cm	7.7 (1.5)	11.9 (2.1)	8.9 (0.6)	7.2 (1.4)	8.1 (0.7)
40-60 cm	5.7 (0.5)	9.0 (1.0)	6.5 (0.7)	4.6 (1.8)	6.1 (0.3)
SO ₄ ²⁻ -S (mg kg ⁻¹) 0-20 cm	5.4 (0.4)	5.9 (1.1)	4.6 (0.3)	5.3 (1.0)	6.0 (1.7)
20-40 cm	4.5 (1.1)	4.4 (0.6)	4.0 (0.8)	5.0 (1.6)	2.7 (0.4)
40-60 cm	4.5 (0.8)	3.7 (0.6)	4.0 (0.8)	5.0 (0.3)	3.4 (1.3)
Híbrido	Dekalb 682RR	Dekalb 682RR	Dekalb 682RR	Nidera 882 CL	Nidera 882 CL
Densidad (pl. ha ⁻¹)	75 000	76 200	75 700	84 000	90 000
Espaciamiento/hileras (cm)	70	52	52	70	70
Fecha de siembra	14 Oct.	13 Oct.	15 Oct.	11 Oct.	24 Sept.
Sistema de labranza	LC y SD	LC	LC y SD	SD	SD
Dosis de S (kg ha ⁻¹)	0 y 15	0, 8 y 16	0 y 15	0, 8 y 16	0, 5, 10 y 20

SD: Siembra directa
LC: Labranza convencional

En el estadio de 6 hojas expandidas (V6), pre-floración, post-floración y madurez fisiológica se realizaron muestreos de planta entera con el fin de determinar la concentración de N y S total en planta. Para ello, se cortaron 10 plantas al azar por parcela al nivel del suelo, el material se pesó, se tomó una alícuota y ésta se secó en estufa a 60 °C hasta peso constante para determinar materia seca. Una fracción de dicha alícuota fue molida (0.84 mm de malla) a fin de realizar las determinaciones de la concentración de N y S. Las mismas fueron realizadas a través de combustión seca a 950 °C y 1350 °C, respectivamente, con un equipo LECO TruSpec CNS (LECO, 2008). Al momento de la cosecha, se determinó el stand de plantas por parcela, se tomaron los tres surcos centrales y se recolectaron manualmente las espigas correspondientes a las plantas de los cinco metros centrales. La trilla se efectuó mediante trilladora estacionaria y se expresó el rendimiento en kg ha⁻¹ a 14% de humedad. De los granos cosechados, se tomó una alícuota y se realizaron determinaciones de la concentración de N y S en grano.

Se realizaron determinaciones de índice de verdor (IV) con el medidor de clorofila Minolta SPAD 502 ® (30 lecturas por parcela) en diferentes estadios y días después de la emergencia (DDE), en los momentos de: 51, 55, 62, 71 y 76 días DDE en Bce I (V7, V8, V11, V13 y V15, respectivamente); 40, 56, 65, 70, 79 y 91 DDE en Bce II (V5, V8, V12, V13, V16 y R2, respectivamente); 39, 48, 54, 58, 68, y 75 DDE at Bce III (V6, V8, V10, V11, VT, y R1); 26, 33, 50, 55, 66 y 76 DDE en 9dJ I (V5, V6, V11, V13, V18 y R2, respectivamente); y 37, 43, 56, 63, 73 y 80 DDE en 9dJ II (V6, V7, V11, V14, V18 y R2, respectivamente). Dichas determinaciones se realizaron: i) en el estrato medio del canopeo (última hoja expandida, aproximadamente a la mitad de la distancia entre el tallo y el ápice y a la mitad de la distancia entre el borde de la hoja y la nervadura central (Blackmer y Schepers, 1995) y ii) en el estrato superior del mismo (última hoja no enrollada). Con los valores de IV se determinó un nuevo Índice de Suficiencia de S (ISS), análogo al índice de suficiencia de N (Blackmer y Schepers, 1995), de la siguiente manera:

$$ISS = IV_{S_0} / IV_{S_{max}}$$

donde:

IV_{S_0} : índice de verdor de los tratamientos con S eventualmente limitante.

$IV_{S_{max}}$: índice de verdor de los tratamientos con S no limitante.

Se determinó rendimiento en grano expresado a 14% de humedad. Se calculó el rendimiento relativo (RR) de la siguiente manera:

$$RR = Rto_{S_0} / Rto_{S_{max}}$$

donde:

Rto_{S_0} : rendimiento de los tratamientos con S eventualmente limitante.

$Rto_{S_{max}}$: rendimiento de los tratamientos con S no limitante.

Se realizaron análisis de varianza y de regresión lineal simple utilizando los procedimientos GLM y REG, respectivamente, incluidos en las rutinas del programa Statistical Analysis System. Cuando las diferencias entre tratamientos fueron significativas, se empleó el test de la diferencia mínima significativa (LSD). Se utilizó el procedimiento de Cate y Nelson (1965) para establecer umbrales críticos que separen valores mayores y menores al 95% del RR. En todos los análisis el nivel de significancia fue del 10%.

En Bce I y 9dJ I, las precipitaciones registradas durante el ciclo del maíz tuvieron adecuada distribución, totalizando 490 y 594 mm, respectivamente, por lo que la disponibilidad de agua no habría limitado en forma significativa el crecimiento del cultivo. Por su parte, en Bce II y 9dJ II, las precipitaciones totales alcanzaron 522 y 453 mm pero con una inadecuada distribución, ya que estas no fueron abundantes alrededor de la floración del cultivo, situación que condicionó el rendimiento en ambos experimentos. En Bce III, las precipitaciones durante el ciclo alcanzaron los 308 mm y se adicionaron 290 mm de riego, sin embargo el cultivo sufrió deficiencia hídrica debido a la alta tasa evapotranspirativa que tuvo lugar durante la campaña.

Resultados y discusión

Rendimiento

El rendimiento promedio de los ensayos fue 11 120 kg ha⁻¹ en Bce I, 9850 kg ha⁻¹ en Bce II, 9080 kg ha⁻¹ en Bce III, 14 690 kg ha⁻¹ en 9dJ I y 9870 kg ha⁻¹ en 9dJ II. No se registró efecto significativo de la aplicación de S sobre el rendimiento en Bce I pero si en Bce II (11% de incremento de rendimiento), Bce III bajo LC (11%), 9dJ I (6 y 11% para 8 y 16 kg S ha⁻¹, respectivamente) y 9dJ II (1, 4 y 12% para 5, 10 y 20 kg S ha⁻¹,

respectivamente) (Tabla 2). Estas respuestas a la fertilización azufrada coinciden con las reportadas por otros investigadores en la Región Pampeana (Fontanetto et al., 2000; Ventimiglia, 2005; Ferraris y Couretot, 2006) así como en otras partes del mundo (Weil y Mughogho, 2000; Mallarino et al., 2000).

Concentración de N y S en planta

La aplicación de S, en general, no incrementó significativamente la concentración de N en planta (Tabla 2), tal cual lo reportado por Khan et al. (2006). El agregado de S tendió a incrementar la concentración de este nutriente en planta, aunque estos incrementos no siempre fueron significativos (Tabla 2). Hitsuda et al. (2005) reportaron incrementos en la concentración de S total en planta debido a la fertilización azufrada.

Índice de verdor (IV)

La aplicación de S tendió a aumentar la intensidad de color verde del cultivo, determinada a través del IV, aunque no siempre de manera significativa. Las variaciones en el IV a través de experimentos y momentos de determinación pueden explicarse por diferencias en las condiciones ambientales (principalmente temperatura y agua) y en los materiales genéticos utilizados. Estas variaciones pueden reducirse marcadamente al relativizar los valores de IV empleando el ISS de manera análoga a la propuesta originalmente para N por Blackmer y Schepers (1995). Además interacciones entre N y S pueden interferir con la respuesta en IV a la aplicación de S, sin embargo, Pagani et al. (2009b), trabajando en la misma región, no encontraron interacción N x S significativa en el cultivo de maíz.

Las mayores diferencias en IV entre tratamientos fueron encontradas cuando las determinaciones se realizaron en el estrato superior del canopeo, lo que coincide con la manifestación general de la deficiencia azufrada en el cultivo (Hitsuda et al., 2005), debido a la relativamente baja movilidad del S dentro de la planta. Estos resultados sugerirían que el IV determinado en el estrato superior del canopeo podría ser empleado como una herramienta de mayor sensibilidad para determinar el estatus azufrado del cultivo que la clásica metodología (estrato medio) propuesta para N por Blackmer y Schepers (1995).

Métodos de diagnóstico de S

a) Contenido de S como sulfato y materia orgánica en el suelo

La disponibilidad de S como sulfato a la siembra no fue un buen indicador de la respuesta a S (Figura 1), debido fundamentalmente a su reducida variabilidad (McLaren y Cameron, 2004) cuando se combinaron los datos de los cinco experimentos (de 30 a 40 kg S ha⁻¹). En algunos estudios se ha reportado la utilidad de la disponibilidad de

Tabla 2. Rendimiento en grano y concentración de N y S en planta entera en los momentos de V6, pre-floración, post-floración y madurez fisiológica para los cinco experimentos. Letras distintas representan diferencias significativas.

Experimento	Tratamiento	Rendimiento kg ha ⁻¹	Momento de muestreo									
			V6		Pre-floración		Post-floración		Madurez fisiológica			
			N, g kg ⁻¹	S, g kg ⁻¹	N, g kg ⁻¹	S, g kg ⁻¹	N, g kg ⁻¹	S, g kg ⁻¹	N, g kg ⁻¹	S, g kg ⁻¹	N, g kg ⁻¹	S, g kg ⁻¹
<Bcc I	SD 0 S	10 050	nd	nd	0.315	0.020	0.180	0.008	0.116	0.009	b	
	SD 15 S	10 670	nd	nd	0.326	0.020	0.169	0.010	0.110	0.010	a	
	LC 0 S	11 550	nd	nd	0.329	0.021	0.175	0.008	0.120	0.009	b	
	LC 15 S	12 210	nd	nd	0.325	0.022	0.180	0.009	0.126	0.012	a	
Bcc II	0 S	8480	b	0.232	0.015	b	0.205	0.016	0.109	b	0.114	0.009
	8 S	9380	a	0.242	0.016	ab	0.225	0.018	0.125	a	0.109	0.010
	16 S	9380	a	0.242	0.018	a	0.202	0.016	0.125	a	0.107	0.010
Bcc III	SD 0 S	10 170		0.356	0.021	b	0.353	0.024	0.142		0.135	0.010
	SD 15 S	10 190		0.364	0.025	a	0.332	0.020	0.198		0.138	0.011
	LC 0 S	8970	b	0.377	0.024		0.318	0.021	0.163		0.140	0.010
	LC 15 S	10 060	a	0.376	0.025		0.307	0.021	0.159		0.138	0.011
9dJ I	0 S	13 930	b	0.380	0.022		0.340	0.026	0.150		0.102	0.009
	8 S	14 730	ab	0.347	0.022		0.347	0.029	0.153		0.107	0.010
	16 S	15 400	a	0.342	0.022		0.358	0.032	0.137		0.104	0.010
9dJ II	0 S	9470	b	0.432	a	0.025	0.193	b	0.134	0.010	0.089	0.008
	5 S	9540	b	0.425	a	0.026	0.202	b	0.134	0.012	0.092	0.009
	10 S	9850	b	0.398	b	0.029	0.199	b	0.146	0.011	0.097	0.009
	20 S	10 610	a	0.397	b	0.028	0.216	a	0.143	0.011	0.091	0.010

En cada columna y dentro de cada experimento/sistema de labranza, letras diferentes indican diferencias significativas entre las medias de los tratamientos (P < 0.1). SD: Siembra directa; LC: Labranza convencional. Nd: No determinado.

S-SO₄⁻² como predictor de la respuesta a S (Bullock y Goodroad, 1989; Stecker et al., 1995), sin embargo en numerosos otros trabajos se ha concluido que esta variable no arroja buenos resultados al respecto (Scherer, 2009). La robustez de este método ha sido cuestionada debido a la gran magnitud de otras fuentes de S para el cultivo que no son cuantificadas (Hoeft et al., 1985).

El contenido de materia orgánica del suelo se desempeñó mejor como predictor de la respuesta a S (Figura 1). Si bien no se encontró una relación estadísticamente significativa entre ambas variables, los valores de alta respuesta a la fertilización azufrada correspondieron a bajos valores de MO y viceversa. Este resultado es esperado ya que la MO es la principal fuente de S para los cultivos en la mayoría de los suelos de la región pampeana (Echeverría, 2005). En línea con

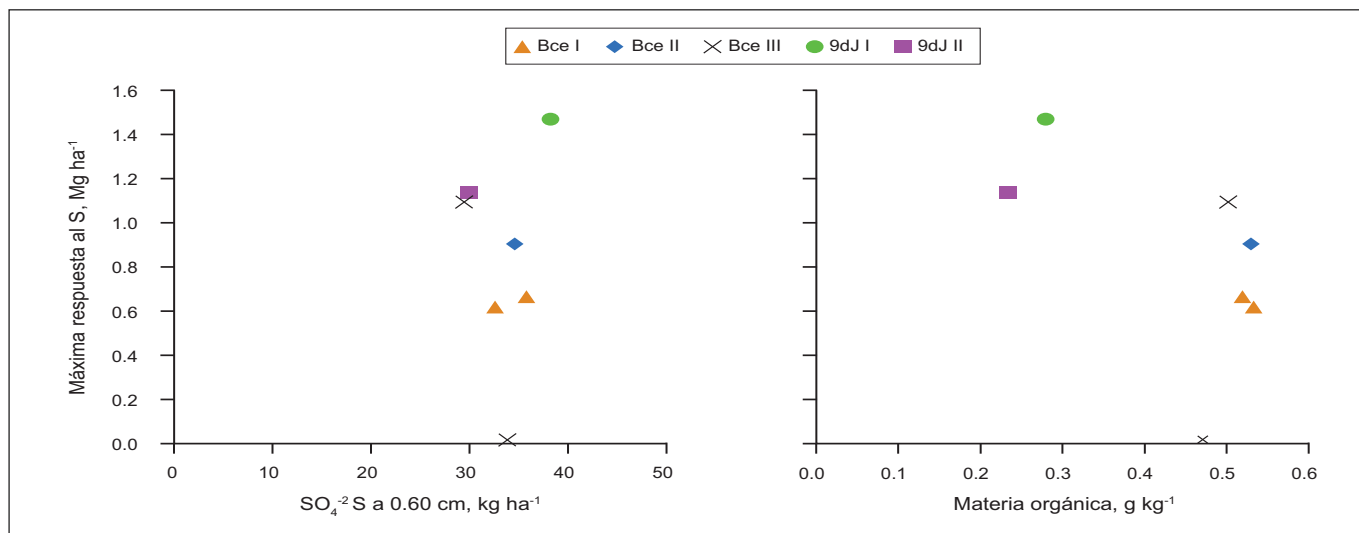


Figura 1. Máxima respuesta al agregado de azufre (S) en función del contenido de sulfatos y materia orgánica para los cinco experimentos conducidos en Balcarce y 9 de Julio.

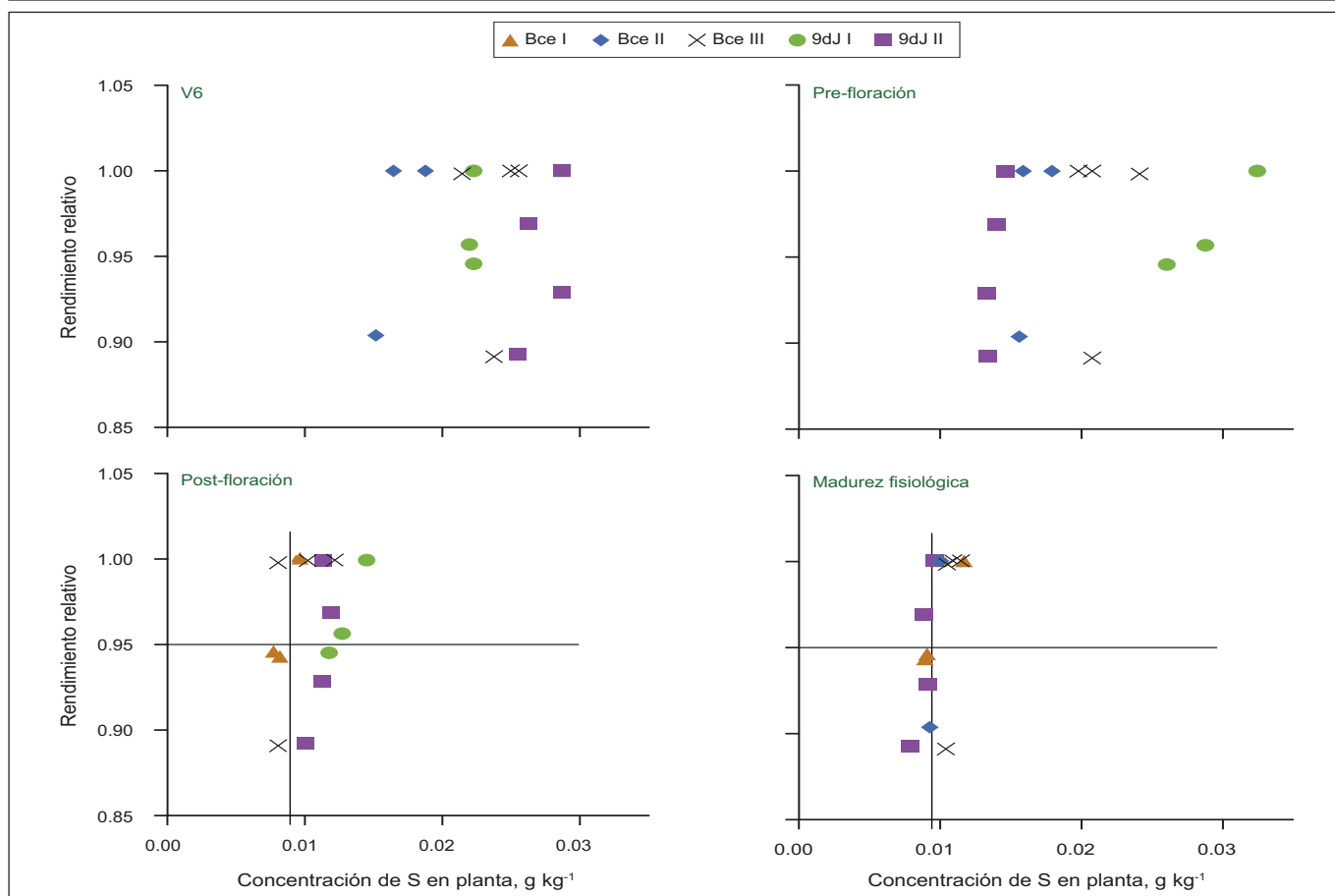


Figura 2. Rendimiento relativo (RR) en función de la concentración de azufre (S) en planta entera para diferentes momentos del ciclo del cultivo. Análisis combinando información de los cinco experimentos conducidos en Balcarce y 9 de Julio. (1 g kg⁻¹ = 1000 mg kg⁻¹ ó ppm).

lo anterior, Tabatabai y Bremner (1972) determinaron altas correlaciones entre disponibilidad de S para los cultivos y contenido de MO.

b) Concentración de S total en planta

La concentración de S en planta no se mostró como un buen indicador del estatus azufrado del cultivo en estadios tempranos de desarrollo (Figura 2). Rehm y Capp (2008) reportaron que debido a la variabilidad del contenido y formas de S en los tejidos de plantas jóvenes, la definición

de umbrales críticos es muy dificultosa. Sin embargo, en el estadio de post-floración, una menor dispersión de los valores fue encontrada y 78% de las muestras fueron correctamente caracterizadas considerando un rendimiento umbral de 95% y una concentración de S crítica 0.009 g kg^{-1} (0.09%) (Figura 2). En madurez fisiológica, una aún menor dispersión de los datos fue encontrada y 89% de las muestras fueron correctamente caracterizadas considerando un rendimiento umbral de 95% y una concentración de S crítica 0.0095 g kg^{-1} (0.095%) (Figura 2).

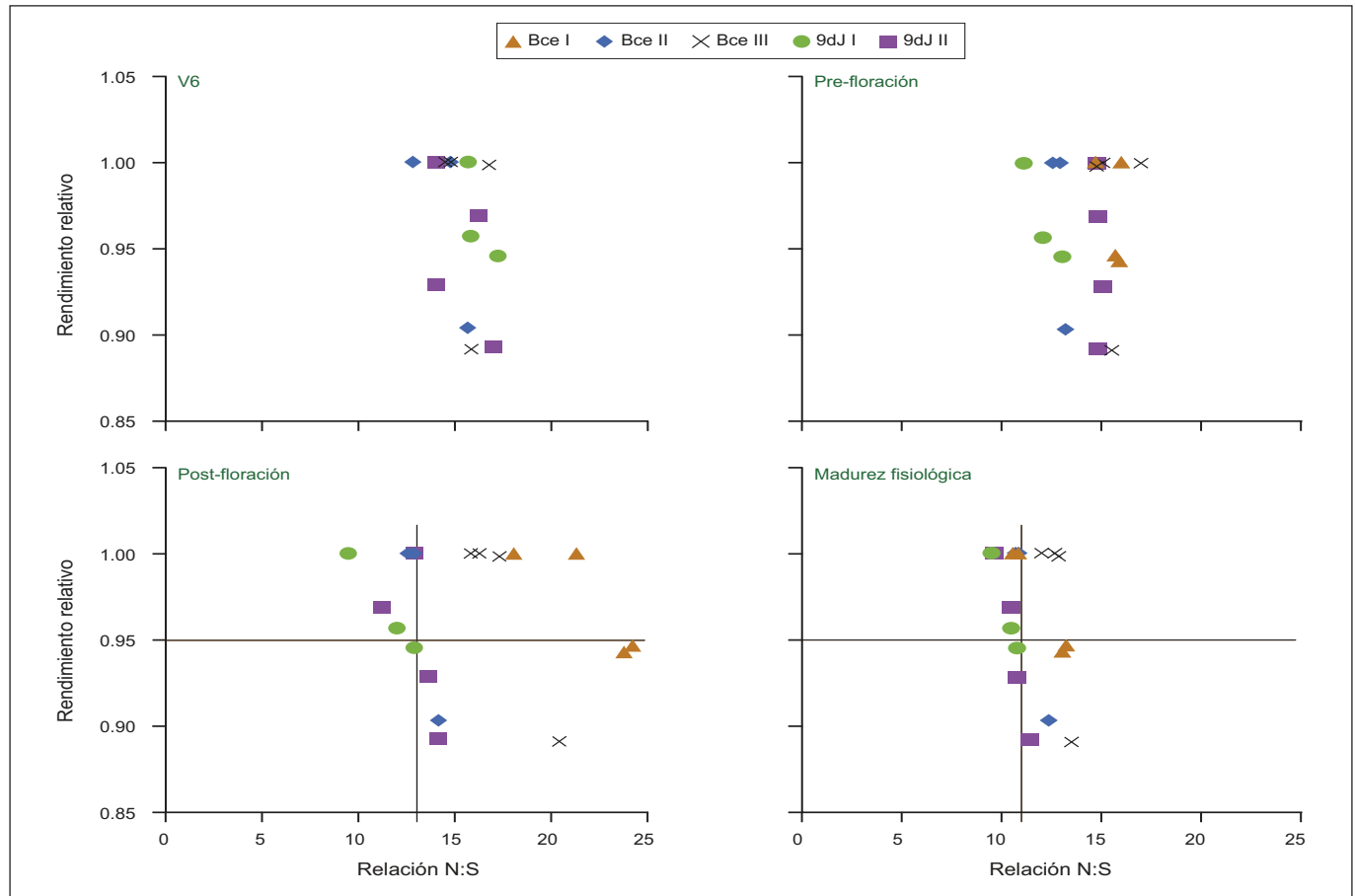


Figura 3. Rendimiento relativo (RR) en función de la relación nitrógeno:azufre (N:S) en planta entera para diferentes momentos del ciclo del cultivo. Análisis combinando información de los cinco experimentos conducidos en Balcarce y 9 de Julio.

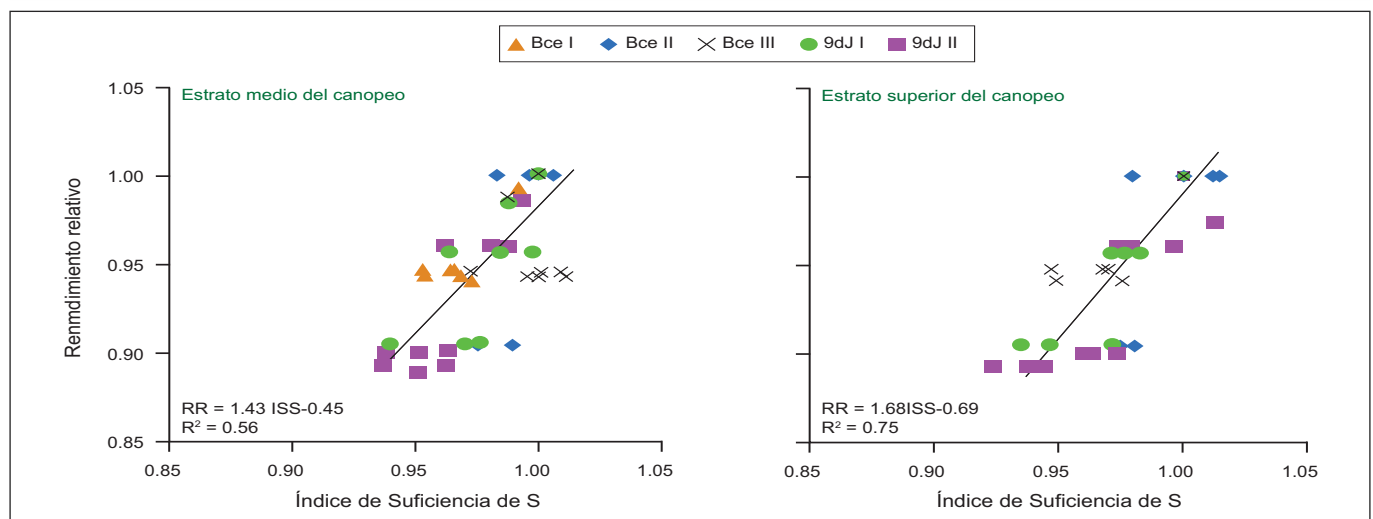


Figura 4. Rendimiento relativo (RR) en función del ISS determinado en dos estratos del canopeo durante el período V6-V14. Análisis combinando información de los cinco experimentos conducidos en Balcarce y 9 de Julio.

Jones y Eck (1973) sugirieron que el rango de concentración óptima de S para maíz es amplio (0.01-0.03 g kg⁻¹), pudiendo estar influenciado por varios factores como el material genético y las condiciones de crecimiento. Por su parte, Tandon (1984) propuso valores de suficiencia de concentración de S en hojas de 0.015 a 0.050 g kg⁻¹ en el momento de anthesis.

c) Relación N:S en planta

Cuando todos los factores de crecimiento excepto S se encuentran en óptimos niveles, la relación N:S crítica en planta ha sido propuesta como más estable entre órganos de la planta y estadíos fenológicos que la concentración de S (Jones et al., 1980). Por esta razón, Rasmussen et al. (1975) sugirieron que la relación N:S es mejor indicador del estatus azufrado del tejido vegetal que la concentración de S.

Como se observó con la concentración de S, la relación N:S en planta no contribuyó a caracterizar el estatus azufrado del cultivo en estadíos tempranos de desarrollo (**Figura 3**). En el estadio de post-floración, aun cuando la dispersión de los valores fue considerable, 67% de las muestras fueron correctamente caracterizadas considerando un rendimiento umbral de 95% y una relación N:S crítica de 13:1 (**Figura 3**). En madurez fisiológica, la relación N:S resultó un aceptable indicador del estatus azufrado del cultivo ya que 72% de las muestras fueron correctamente caracterizadas considerando un rendimiento umbral de 95% y una relación N:S crítica de 11:1 (**Figura 3**).

Algunos estudios en maíz y otros cultivos han reportado que valores de relación N:S > 16:1 indican insuficiente S para la formación de proteínas y la probable presencia de NO₃⁻, amidas o amino ácidos (Terman et al., 1973). Por su parte, Weil y Mughogho (2000) sugirieron que la relación N:S en la hoja de la espiga al estadio de panojamiento estuvo significativamente relacionada con la respuesta a S y determinaron un valor crítico de 10:1.

d) Índice de suficiencia de azufre (ISS) en ambos estratos del canopeo

Combinando datos de los cinco experimentos, se determinaron relaciones significativas ($P < 0.05$) entre el RR y el ISS en los estadíos de V6-V8, V9-V12, y V13-V14 ($R^2 = 0.62, 0.56, \text{ y } 0.43$, respectivamente, para el estrato medio y $R^2 = 0.56, 0.71, \text{ y } 0.81$, respectivamente, para el estrato superior) (datos no mostrados). Los resultados del test de coincidencia y paralelismo indicaron que las pendientes y ordenadas al origen de las relaciones entre RR e ISS no difirieron significativamente ($P > 0.1$) a través de los momentos de determinación (V6-V8, V9-V12 y V13-V14) para ambos estratos del canopeo. Por lo tanto, fue posible agrupar los valores para cada estrato durante el periodo

V6-V14, integrando la información de los cinco experimentos. De esta manera se obtuvieron relaciones significativas ($P > 0.01$) para ambos estratos del canopeo aunque con mejores ajustes para el estrato superior (**Figura 4**). Para ambos estratos, valores superiores a 0.98 de ISS permitirían lograr RR superiores a 0.95. Estos resultados sugieren que la determinación de la intensidad de color verde del cultivo (a través del ISS) en los estratos superiores del canopeo es una metodología promisoría para caracterizar el estatus azufrado del cultivo, tarea que hasta el momento ha sido de gran dificultad para investigadores y agrónomos. Esta nueva tecnología presenta las ventajas de ser rápida, no destructiva y relativamente sencilla, ya que solo requiere de la presencia de una franja dentro del lote con S no limitante para el cálculo del ISS.

Conclusiones

- Los indicadores de suelo (especialmente la disponibilidad de S-SO₄⁻²) no fueron adecuados predictores de la respuesta a S.
- Los indicadores de planta, como la concentración de S y la relación N:S, no deberían emplearse para determinar el estatus azufrado del cultivo en estadíos tempranos de desarrollo, pero pueden ser de utilidad en estadíos avanzados (especialmente en madurez fisiológica) lo que permitiría planear futuras fertilizaciones.
- Por su parte, la intensidad del color verde del cultivo podría tener un alto potencial (a través del ISS) como metodología de diagnóstico/caracterización del estatus azufrado del maíz, particularmente si las lecturas de IV se realizan en el estrato superior del canopeo. Futuras investigaciones serán necesarias para validar esta nueva metodología.

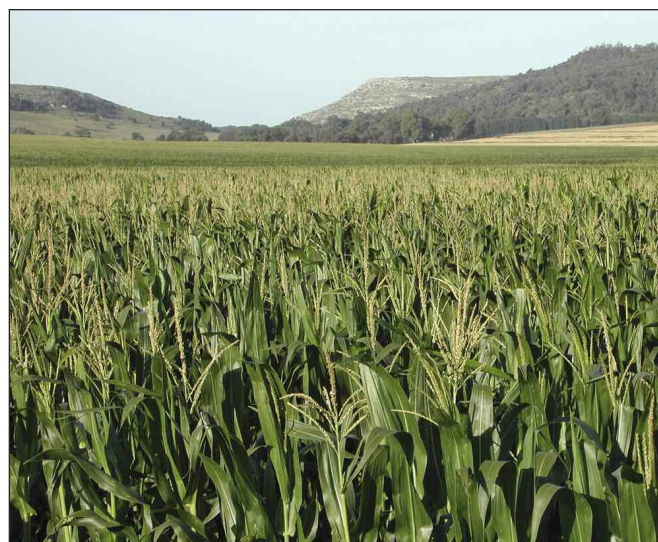
Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con fondos de los proyectos: Pict 2007-446, INTA PNCER 22421 y de la FCA-UNMP AGR319/10.

Bibliografía

- Blackmer, T.M., y J.S. Schepers. 1995. Use of chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn. *J. Prod. Agric.* 8:56-60.
- Bullock, D.G., y L.L. Goodroad. 1989. The effect of sulfur rate, application method, and source on corn yield and mineral content. *Comm. Soil. Sci. Plant Anal.* 20:1209-1217.
- Cate, R.B. Jr., y L.A. Nelson. 1965. A rapid method for correlation of soil test analysis with plant response data. *North Carolina Agric. Exp. Stn., International soil Testing Series Bull.* No. 1.

- Echeverría, H.E. 2005. Azufre. pp. 139-160. En H.E. Echeverría and F.O. García (ed.) Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Ferraris, G.N., y L.A. Couretot. 2006. Evaluación de diferentes dosis y momentos de aplicación de nitrógeno y su interacción con el azufre utilizando fuentes líquidas en el Norte de la Provincia de Buenos Aires. pp. 70-73. En Maíz en siembra directa. Revista técnica de la Asociación de productores en siembra directa. Aug. 2006.
- Fontanetto, H., O. Keller, R. Inwinkelried, N. Citroni, y F.O. García. 2000. Phosphorus and sulfur fertilization of corn in the northern Pampas. Better Crops Plant Food. 14:1-5.
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, y W.L. Nelson. 2005. Sulfur, calcium, and magnesium. pp. 219-243. En Havlin et al. (ed.) Soil fertility and fertilizers. Pearson Prentice Hall. New Jersey. 7th ed.
- Hitsuda, K., M. Yamada, y D. Klepker. 2005. Sulfur requirement of eight crops at early stages of growth. Agron. J. 97:155-159.
- Hoef, R.G., J.E. Sawyer, R.M. Vanden Heuvel, M.A. Schmitt, y G.S. Brinkman. 1985. Corn response to sulfur on Illinois soils. J. Fert. Issues. 2:95-104.
- Jones, J.B. Jr., y H. v. Eck. 1973. Plant analysis as an aid in fertilizing corn and grain sorghum. pp. 349-364. En Soil Testing and Plant Analysis. L. M. Walsh and J. D. Beaton (eds.) Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI.
- Jones, M.B., W.A. Ruckman, W.A. Williams, y R.L. Koenigs. 1980. Sulfur diagnostic criteria as affected by age and defoliation of subclover. Agron. J. 72:1043-1046.
- Kang, B.T., y O.A. Osiname. 1976. Sulfur response of maize in Western Nigeria. Agron J. 68:333-336.
- Khan, M.J., M.H. Khan, R.A. Khatkhat, y M.T. Jan. 2006. Response of maize to different levels of sulfur. Commun. Soil. Sci. Plant Anal. 37:41-51.
- LECO. 2008. Organic application notes. Available at <http://www.leco.com> [accessed 18 Feb. 2008; verified 3 Feb. 2009]. LECO, St. Joseph, MI.
- Mallarino, A.P., D. Haden, y A. Christensen. 2000. Sulfur fertilization for corn. p. 19-21. En Northwest Res. Farm Annu. Prog. Rep. 1999, ISRF99-29, 31. Iowa State Univ., Ames, IA.
- McLaren, R.G., y K.C. Cameron. 2004. Soil Science. 2nd ed., Oxford University Press, Victoria, Australia.
- Pagani, A., H.E. Echeverría, y H.R. Sainz Rozas. 2009a. Nitrogen and sulfur response in corn at different environments of Buenos Aires Province. (In Spanish, with English abstract) Ci. Suelo (Argentina). 27(1):21-29.
- Pagani, A., H.E. Echeverría, F.H. Andrade, y H.R. Sainz Rozas. 2009b. Characterization of corn nitrogen status with a greenness index under different availability of sulfur. Agron. J. 101:315-322.
- Prystupa, P., F.H. Gutiérrez Boem, F. Salvagiotti, G. Ferraris, y L.A. Couretot. 2006. Measuring corn response to fertilization in the northern Pampas. Better Crops Plant Food. 90:25-27.
- Rasmussen, P.E., R.E. Ramig, R.R. Allmaras, y C.M. Smith. 1975. Nitrogen-sulfur relations in soft white winter wheat. II. Initial and residual effects of sulfur application on nutrient concentration, uptake, and N/S ratio. Agron. J. 67:224-228.
- Rehm, G.W., y J.G. Clapp. 2008. Sulfur in a fertilizer program for corn. pp. 143-152. En J. Jez (ed.) Sulfur, a missing link between soils, crops, and nutrition. Agronomy Monograph 50. ASA, CSSA, SSSA Madison, WI.
- Scherer, H.W. 2001. Sulphur in crop production. Eur. J. Agron. 14:81-111.
- Scherer, H.W. 2009. Sulfur in soils. J. Plant Nutr. Soil Sci. 172:326-335.
- Stecker, J.A., D.D. Buchholz, y P.W. Tracy. 1995. Fertilizer sulfur effects on corn yield and plant sulfur concentration. J. Prod. Agric. 8:61-65.
- Tabatabai, M. A., y J. M. Bremner. 1972. Forms of sulfur and carbon, nitrogen and sulfur relationships in Iowa soils. Soil Sci. 114:380-386.
- Tandon, H.L.S. 1984. Sulfur Research and Agriculture Production in India; Fertilizer Development and Consultation Organization: New Delhi, India, pp. 13-23.
- Terman, G.L., S.E. Allen, y P.M. Giordano. 1973. Dry matter yield-N and S concentration relationships and ratios in young corn plants. Agron. J. 65:633-641.
- Ventimiglia, L.A. 2005. Nutrición de cultivos en el centro de Buenos Aires. Nutrición, producción y ambiente. En Simposio Fertilidad 2005, Rosario (Santa Fe), Argentina. 27-28 Apr. 2005. INPOFOS y Fertilizar Asociación Civil Publ., Rosario (Santa Fe), Argentina.
- Weil, R.R., y S.K. Mughogho. 2000. Sulfur nutrition of maize in four regions of Malawi. Agron. J. 92:649-656. □



CURSOS Y SIMPOSIOS

1. Congreso Tecnológico CREA 2011

Organiza : CREA
 Lugar : Estadio Orfeo, Córdoba, Argentina
 Fecha : Junio 22-24, 2011
 Información : CREA
 Tel.: +54(11)4382-2076
 tecnologico crea@crea.org.ar
 www.tecnologico crea.com

2. V Simposio Tecnología de Producción de Caña de Azúcar

Organiza : GAPE – FEALQ - ESALQ
 Lugar : Piracicaba, SP, Brasil
 Fecha : Julio 6-8, 2011
 Información : GAPE – FEALQ – ESALQ
 Tel.: +55(19)3417-2138
 Simposiocana2011@yahoo.com.br
 www.gape-esalq.com.br

3. Conferencia InfoAg 2011

Organiza : CropLife, IPNI, PAQ
 Lugar : Springfield, Illinois
 Fecha : Julio 12-14, 2011
 Información : CropLife, IPNI, PAQ
 Tel.: 001(217)762-7955
 registration@infoag.org
 exhibits@infoag.org
 www.infoag.org

4. II Simposio Internacional Manejo de Materia Orgánica y Biofertilizantes en Agricultura: Impacto sobre la Huella de Carbono y de Agua

Organiza : CATA
 Lugar : Santiago, Chile
 Fecha : Agosto, 17-18, 2011
 Información : CATA
 Tel.: 56(2)353-1327
 cata@usm.cl
 www.cata.usm.cl

5. II Simposio Paraguayo de Manejo y Conservación de Suelos

Organiza : Sociedad Paraguaya de la Ciencia del Suelo
 Universidad Nacional de Asunción
 Lugar : Asunción, Paraguay
 Fecha : Agosto 25-26, 2011
 Información : SOPACIS
 sopacis@gmail.com
 www.agr.una.py/IISIMPOSIO_SUELOS1

6. V Congreso de la Soja del Mercosur - Mercosur 2011

Organiza : Mercosoja 2011
 Lugar : Rosario, Argentina
 Fecha : Septiembre 14-16, 2011
 Información : Mercosoja 2011
 Tel: +54(341)421-3471
 infomercosoja2011@acsoja.org.ar
 www.mercosoja2011.com.ar/site/

7. Primer Seminario-Taller de Cartografía Digital "Dando los primeros pasos"

Organiza : Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS)
 Lugar : Villa de Merlo, San Luis, Argentina
 Fecha : Noviembre 9-11, 2011
 Información : AACS
 seminariotaller@fices.edu.ar
 www.suelos.org.ar

8. XIX Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo

Organiza : SVCS-INIA
 Lugar : Calabozo, Venezuela
 Fecha : Noviembre 21-25, 2011
 Información : SVCS-INIA
 Tel.: 58(246)808-3446
 nalfonzo@inia.gob.ve
 www.xix-cvcs-inia.gob.ve

9. XIX Congreso Latinoamericano – XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo

Organiza : SLCS - AACS
 Lugar : Mar del Plata, Argentina
 Fecha : Abril 16-20, 2012
 Información : AACS-SLCS
 Tel.: +54(0)2266-439100
 slcs2012@congresodesuelos.org.ar
 www.congresodesuelos.org.ar

10. XIX Conferencia ISTRO y IV Reunión de la Sociedad Uruguaya de la Ciencia del Suelo

Organiza : ISTRO - SUCS
 Lugar : Montevideo, Uruguay
 Fecha : Septiembre 24-28, 2012
 Información : ISTRO – SUCS
 Istro2012@congresos-rohr.com
 www.congresos-rohr.com



Latinoamérica unida protegiendo sus suelos



AACCS
ASOCIACION ARGENTINA
CIENCIA DEL SUELO

XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo



Mar del Plata,
Argentina,
16 al 20 de abril de 2012
Gran Hotel Provincial

www.congresodesuelos.org.ar
www.slcs.mx www.suelos.org.ar



19th ISTRO CONFERENCE

IV REUNIÓN DE SUCS

24 - 28 SEPTIEMBRE 2012

RADISSON HOTEL, MONTEVIDEO, URUGUAY

<http://www.congresos-rohr.com/istro2012>



ISTRO
International Soil Tillage
Research Organization



ORGANIZAN

ISTRO - International Soil Tillage Research Organization

SUCS-Sociedad Uruguaya de Ciencia del Suelo

Facultad de Agronomía

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria

PUBLICACIONES DISPONIBLES

Título de la Publicación	Costo (U\$S)	Costo (Pesos argentinos)
NUEVO. Simposio Fertilidad 2011. La Nutrición de Cultivos Integrada al Sistema de Producción. Actas del Simposio organizado por IPNI y Fertilizar en Rosario en Mayo de 2011.	20.00	80.00
NUEVO. La Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. Resultados y conclusiones de los primeros diez años 2000-2009. Resumen y discusión de los principales resultados obtenidos en la Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe (Argentina).	8.00	30.00
Manual de Manejo del Cultivo de Soja. Aborda temáticas de fenología, manejo, nutrición y fertilidad, malezas, enfermedades y plagas del cultivo.	16.00	60.00
Simposio Fertilidad 2009. Actas del Simposio organizado por IPNI y Fertilizar en Rosario en Mayo de 2009.	16.00	60.00
Simposio Fertilidad 2007. Actas del Simposio organizado por IPNI y Fertilizar en Rosario en Mayo de 2007.	8.00	30.00
Como se Desarrolla una Planta de Soja. Edición en español de la guía fenológica y de manejo publicada por Iowa State University. Como se desarrolla una planta de maíz. Edición en español de la guía fenológica y de manejo publicada por Iowa State University.	4.00	15.00
Como se Desarrolla una Planta de Maíz. Edición en español de la guía fenológica y de manejo publicada por Iowa State University.	4.00	15.00
Síntomas de Deficiencias Nutricionales de Trigo, Maíz y Soja. Set de tres posters que muestran y describen los síntomas de deficiencia de nutrientes en los tres cultivos.	4.00	15.00
Simposio Fertilidad 2005. Nutrición, Producción y Ambiente. Actas del Simposio organizado por IPNI y Fertilizar en Rosario en Abril de 2005.	4.00	15.00
Simposio Fertilidad 2004. Fertilidad de Suelos para una Agricultura Sustentable. Actas del Simposio organizado por IPNI y Fertilizar en Rosario en Abril de 2004.	4.00	15.00
Simposio El Fósforo en la Agricultura Argentina. Actas del Simposio efectuado en Rosario en Mayo de 2003 (98 pág.)	4.00	15.00
Fertilidad 2002. Trabajos presentados en la Cuarta Jornada de Actualización Técnica para Profesionales realizada en Rosario (Argentina) en Mayo de 2002.	2.00	7.50
Fertilidad 2001. Trabajos presentados en la Tercera Jornada de Actualización Técnica para Profesionales realizada en Julio de 2001.	2.00	7.50
Fertilidad 2000. Trabajos presentados en la Jornada de Actualización Técnica para Profesionales realizada en Abril de 2000.	2.00	7.50
Fertilización del Algodón para Rendimientos Altos. Cubre en forma detallada los requerimientos nutricionales, análisis foliar y de suelos y fertilización del cultivo.	5.00	18.00
Balance para el Éxito. Trifolios con información de manejo nutricional de cultivos. Disponibles: Alfalfa, Trigo, Maíz, Soja, Sorgo granífero, Algodón. El precio es por cada uno.	0.50	2.00
Vea el catálogo completo de publicaciones del IPNI en www.ipni.net/lasc		

Consulte la versión completa de Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica en su versión digital en: www.ipni.net/lasc

Héctor Baigorri, el amigo de todos

El pasado 19 de Abril falleció el Ing. Agr. M. Sc. Héctor Baigorri, referente nacional y regional en el cultivo de soja, incansable caminador de cada rincón de Argentina y países del Cono Sur. Sus innumerables trabajos y enseñanzas desde INTA y desde su actividad profesional como asesor y líder de Planeta Soja (www.Planetasoja.com) constituyen un legado invaluable. Nuestro recuerdo, compartido con el Dr. Fernando Andrade (UIB INTA-FCA Balcarce), desde IPNI Cono Sur.

Héctor, siempre estarás presente en nuestras vidas, tu don de buena gente, tu humildad, tu generosidad, tu entusiasmo y tus pasiones, tu sonrisa y tus silencios; todos tus gestos nos acompañarán en cada paso. Supiste formar, junto con Liliana, una familia, y no se necesita agregar adjetivos. Supiste también disfrutar de tus muchas pasiones, Liliana, tus hijos y nietos, así como tu trabajo, la gente, el campo y la soja.



Van con estas breves palabras todo nuestro agradecimiento a la vida por haber podido conocerte, por disfrutar de tu amistad, por compartir pasiones y desazones. El orgullo de haber sido tus amigos se fusiona con la tristeza y nostalgia que nos envuelve en tu partida.

Fernando O. García y Fernando H. Andrade

Forma de pago de las publicaciones

Argentina

- Giro postal o telegráfico a través de Correo Argentino - Los datos para realizar su envío son los siguientes:
Sra. Laura Nélide Pisauri - DNI: 17.278.707 • Av. Santa Fe 910 (B1641ABO) Acassuso, Buenos Aires, Argentina
Agencia de correos de destino: Sucursal Acassuso, Buenos Aires, Argentina
- Depósito bancario a INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE, Banco Galicia, Sucursal Olivos, Cta. Cte. N° 3856/4 053/5
- Transferencia bancaria a INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE, Banco Galicia, Sucursal Olivos, Cta. Cte. N° 3856/4 053/5, CBU 0070053520000003856451 CUIT 30-70175611-4

Otros países

- Envío de dinero a través de Western Union - Los datos para realizar su envío son los siguientes:
Sra. Laura Nélide Pisauri - DNI: 17.278.707 • Av. Santa Fe 910 (B1641ABO) Acassuso, Buenos Aires, Argentina
Agencia de correos de destino: Sucursal Acassuso, Buenos Aires, Argentina

Solicitamos nos haga saber por teléfono, fax o correo electrónico, la opción elegida y nos envíe los datos para acreditar su pago (N° de giro y fecha, datos de depósito o transferencia bancaria).

*Para conocer los gastos de envío y cualquier otra consulta de publicaciones
por favor enviar un correo electrónico a Lpisauri@ipni.net*