IPNI
INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE

INFORMACIONES AGRONÓMICAS
de Hispanoamérica

Marzo 2011 · No. 1

CONTENIDO

Entrenamiento y crédito como generadores de cambios sociales y ambientales en el cultivo de café - cuatro años después 1

Del diagnóstico a la aplicación: Conceptos básicos y prácticos para la nutrición de cultivos 8

Uso agronómico de la roca fosfórica para aplicación directa 13

Fertilización con fósforo y azufre en rotación de cultivos del Centro de Santa Fe, Argentina: Beneficios productivos y económicos y evolución del P extractable. 17

Siembra directa, rotaciones y fertilidad para una agricultura sostenible con énfasis en las condiciones de Santa Cruz de la Sierra, Bolivia 22

Reducción de la emisión de gases de efecto invernadero por medio de la intensificación agrícola 30

Reporte de Investigación Reciente 32

Retiro del Dr. José Espinosa 33

Cursos y Simposios 34

Publicaciones Disponibles 35

Editores: Dr. José Espinosa
Dr. Fernando García
Dr. Raúl Jaramillo

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

www.ipni.net

ENTRENAMIENTO Y CRÉDITO COMO GENERADORES DE CAMBIOS SOCIALES Y AMBIENTALES EN EL CULTIVO DE CAFÉ – CUATRO AÑOS DESPUÉS

Reiles Zapata[1] y José Espinosa[2]

En enero del año 2007 se publicó en esta revista los resultados de un exitoso programa de iniciativa privada en Perú, que facilitó el mejoramiento del estándar de vida de familias rurales a través del manejo de la producción de café. A continuación se presenta una actualización del progreso del "Programa Familia" en Perú.

Introducción

Muchos campesinos migraron, durante las décadas de 1940 y 1950, de la sierra alta a la ceja de selva ubicada entre las cordilleras Occidental y Oriental de los Andes en el Nororiente Peruano, para cultivar café como medio para mejorar sus condiciones de vida. Esta actividad se desarrolló en fincas pequeñas localizadas en suelos moderadamente fértiles ubicados en pendientes pronunciadas. Estas familias campesinas han vivido del cultivo de café por muchos años. Segundas y terceras generaciones de estas familias pioneras encontraron la forma de exportar el café producido localmente por medio de pequeñas compañías de exportación. Comercio & Cia., un ejemplo de estas compañías, ha sido muy exitosa en el mercadeo de café Peruano en los Estados Unidos y Europa. La compañía tuvo un importante crecimiento desde sus inicios en 1994 y al momento tiene una significativa participación en el mercado de café exportado por Perú.

Siendo parte del sistema de producción en su zona de influencia, Comercio & Cia., constató el descenso de los rendimientos de café en sus propias parcelas y en las parcelas de los productores locales. El efecto de esta situación en la comunidad se hizo visible a tal punto que se lo consideró como una seria amenaza para la supervivencia de todos aquellos involucrados en la producción de café en la zona.

Efectos sociales y ambientales de la declinación del rendimiento

Los bajos rendimientos se volvieron el denominador común en la producción de café en esta zona de Perú. Se constató que el principal factor limitante era el agotamiento de los nutrientes del suelo en los campos de producción que, en su

[1] Coordinador del Programa Familia, Jaén, Perú. Correo electrónico: reileszr@molicom.com.pe
[2] Director del International Plant Nutrition Institute (IPNI). Oficina para el Norte de Latinoamérica. Quito, Ecuador. Correo electrónico: jespinosa@ipni.net

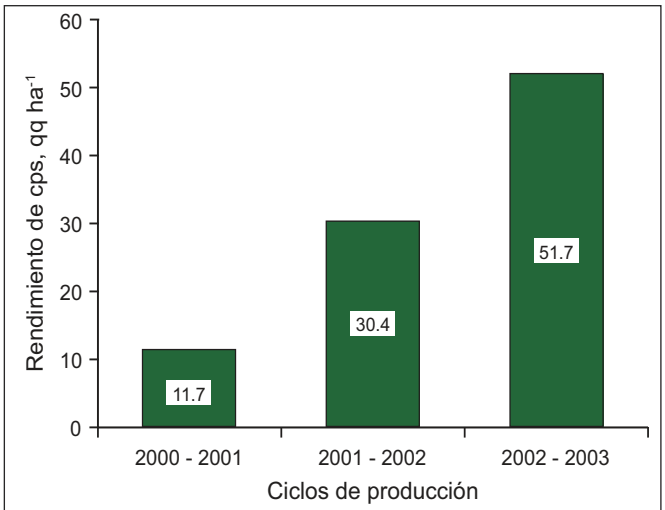
Foto 1. Efecto del desgaste del suelo en el crecimiento y rendimiento del cultivo de café.

mayoría, eran fertilizados con residuos de plantas y desechos de corral, casi no se utilizaban fertilizantes minerales en la producción de café en la zona. En estas condiciones, los rendimientos bajaron a menos de 10 quintales de café pergamino seco por hectárea. El agotamiento de los suelos produjo, además de los bajos rendimientos y baja rentabilidad, notables efectos secundarios. Desde el punto de vista económico, la baja rentabilidad no permitía ahorro y en consecuencia los productores no podían pensar en ninguna inversión para mejorar las parcelas. Esta condición incrementaba el malestar familiar y los problemas sociales asociados con la pobreza. Este círculo vicioso se estrechaba hasta obligar a los campesinos a abandonar sus parcelas y emigrar hacia la selva para deforestar nuevas tierras e iniciar nuevamente el ciclo. Desde el punto de vista ambiental, era claro el deterioro de los suelos debido al balance negativo de nutrientes. La producción de biomasa era baja y la cobertura pobre, lo que expone al suelo a problemas graves de erosión (**Foto 1**). La condición social de los campesinos se deterioraba junto con la degradación del ambiente. El sistema no era sostenible y un cambio radical era necesario.

Evaluación agronómica y social de la recuperación de la producción

En 1997, Comercio & Cia. empezó a evaluar las posibilidades de mejorar el rendimiento de café a través del manejo agronómico del cultivo. Se organizó un grupo de técnicos conocedores de las condiciones agronómicas, económicas y sociales de los productores de las zonas de influencia de la compañía para iniciar un proyecto agronómico de mejoramiento del cultivo. Era evidente que el problema agronómico básico era el desgaste progresivo del suelo por la continua producción de café sin reponer los nutrientes exportados en la cosecha. Los insumos producidos en las fincas (material vegetal de las podas, residuos del beneficio de café y residuos de corral) no eran suficientes para mantener rendimientos altos y rentables. Era indispensable reponer los nutrientes al suelo con el uso de fertilizantes y mantener el cultivo mediante prácticas adecuadas de manejo como poda y manejo eficiente de la sombra.

Estudios de campo, como el presentado en la **Figura 1**, demostraron el efecto significativo de la aplicación de fertilizantes en el rendimiento de café. Las dosis de



Mezcla física aplicada = 20 - 7 - 20 + 3MgO + 4S + Zn + B

Cantidad aplicada = 100 g planta^{-1} aplicación^{-1}, densidad promedio 3000 plantas ha^{-1}

Época de aplicación = Primera aplicación a inicio de la época de lluvia
Segunda aplicación en la mitad de la época de lluvia

cps = Café pergamino seco; 1 quintal (qq) = 100 libras = 45 kilogramos

Figura 1. Efecto de la aplicación de fertilizantes en el rendimiento de café pergamino seco (cps) en Loma Santa, Jaén, Perú.

Foto 2. Baja producción de café sin manejo agronómico y sin aplicación de fertilizantes (izquierda), en contraste con la producción abundante de lotes con buen manejo agronómico y fertilización (derecha).

fertilizante utilizadas en este estudio provienen de la combinación de datos de extracción de nutrientes publicados en la literatura y de estudios de absorción de nutrientes conducidos por el proyecto. Basándose en esta información, el proyecto se fijó una meta de rendimiento de 40 - 60 quintales de café pergamino seco por hectárea. Esta es una meta de rendimiento realista para café creciendo con 30 - 50 % de sombra, condición dominante en el área. El experimento presentado en la **Figura 1** se diseño para probar el efecto de la aplicación de una dosis definida de nutrientes en un periodo de tres años. Conociendo que los suelos estaban desgastados se esperaba respuesta efectiva en rendimiento en el segundo y tercer ciclo de producción. Era importante demostrar la respuesta del cultivo a la aplicación de fertilizantes, sin embargo, era más importante aún demostrar que, debido al deterioro de las plantas, se observan respuestas en rendimiento luego que las plantas han logrado reponer la biomasa perdida por el agotamiento constante de los nutrientes del suelo, esta biomasa es la que soporta el rendimiento posterior de la planta. Se determinó también la forma y época adecuada de aplicación de los fertilizantes. El Instituto Internacional de Nutrición de Plantas (IPNI por sus siglas en inglés) estuvo envuelto en el entrenamiento básico en nutrición de cultivos de los técnicos del proyecto, colaboró como consultor en los experimentos de campo y suministró de información técnica.

Se había logrado demostrar que la cantidad y calidad de café dependía del manejo de nutrientes y de las prácticas adecuadas de manejo agronómico del cultivo para la zona. Sin embargo, factores externos hicieron más dramática la situación. Los precios internacionales de café cayeron en 1999 y los productores en todo el mundo enfrentaron la peor crisis de los últimos 100 años. El pronunciado descenso del precio internacional derivó en la consecuente reducción de los precios locales y los productores Peruanos vieron como su situación era aún más crítica. En estas condiciones, el incremento de los rendimientos era más importante que nunca. Los productores habían visto los efectos del manejo agronómico en la producción de café y existía interés por mejorar los cultivos (**Foto 2**). Muchos agricultores optaron por declarar sus fincas orgánicas y las certificaron con la esperanza de obtener algún incremento en rentabilidad con la diferencia de precio de café orgánico frente al café convencional. Sin embargo, los bajos rendimientos no hacían rentable el cultivo aún con este incentivo.

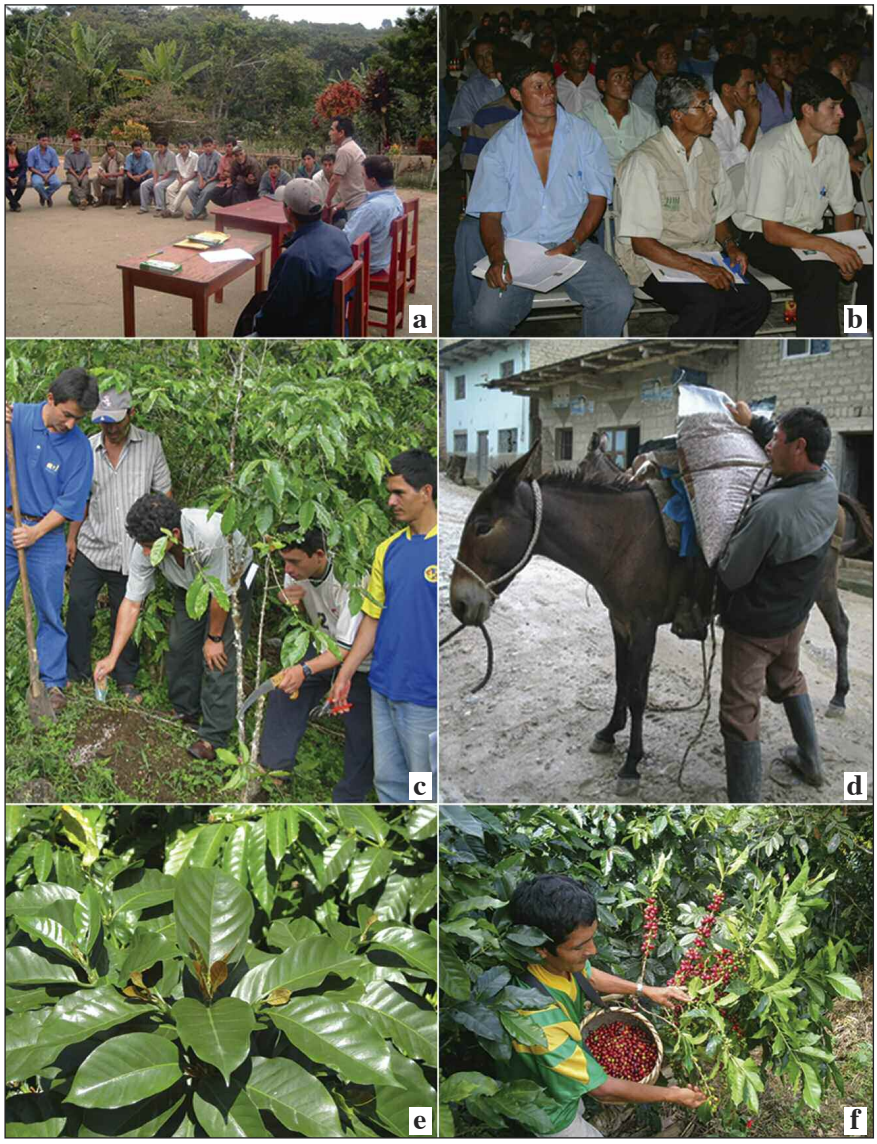


Foto 3. Desarrollo del Programa Familia: a) Organización comunal, b) Entrenamiento, c) Fertilización de café, d) Fertilizante disponible, e) Efecto en el crecimiento de la planta, f) Cosecha abundante.

La investigación conducida en la zona por el proyecto había demostrado que la solución del problema de producción de café era relativamente simple desde el punto de vista agronómico. Solamente había que poner a disponibilidad de los productores los insumos necesarios, particularmente fertilizantes, para incrementar y hacer rentable la producción de café en esta zona de Perú. Sin embargo, el proyecto determinó también que las condiciones sociales imperantes en la zona era quizá el mayor limitante para la producción. La pobreza derivada de la baja producción y el descenso del precio, no permitía que los agricultores puedan invertir en fertilizantes. La intervención del estado en la zona es mínima y las agencias gubernamentales y privadas de crédito no entregan préstamos a este sector de la producción por el alto riesgo y por la falta de documentación legal de las fincas que servirían de garantía. Se hizo evidente entonces que mejorar la producción de café en la zona era más complejo que solamente fertilizar.

El Programa Familia

Se decidió entonces iniciar un proyecto ambicioso de organización campesina para lograr el incremento demostrado de

Tabla 1. Evolución del promedio de rendimientos y precios pagados a los agricultores envueltos en el Programa Familia.

Tipo de producción	Promedio de rendimiento, qq ha^{-1}		Promedio de precios, US$ qq^{-1}		Promedio del ingreso, US$ ha^{-1}	
	2006	2010	2006	2010	2006	2010
Programa Familia	30	40	80	120	2 400	4 800
Orgánico	10	12	87	128	870	1 536

qq = quintal = 100 libras = 45 kilogramos

la producción. Era evidente la necesidad de diseñar un proyecto que permitiera ayudar a los campesinos a organizarse y legalizar la propiedad, hacer disponible el crédito, entrenar a los productores en el manejo agronómico de las fincas y organizar la cadena productiva de modo que la cosecha se pueda vender a precio justo y en forma segura. La experiencia de los miembros de la Junta Directiva de Comercio & Cia. con la comunidad y la evaluación del grupo técnico determinó que la mejor forma de afianzar un programa de desarrollo agrícola de esta naturaleza era basándose en el núcleo familiar. Nació entonces el Programa Familia con el lema "Más y mejor café para fortalecer la familia en armonía con el ambiente".

El Programa Familia diseñó una estrategia basada en acciones que permitan legalizar la tierra, organizar la comunidad y la cadena productiva, tener acceso a créditos para la compra de fertilizantes y entrenamiento en el manejo del cultivo (**Foto 3**). Uno de los factores más importantes del programa fue el poner a disposición de los agricultores crédito sin intereses por tres años que se pagaría con la cosecha. Se estableció este periodo de tiempo teniendo en cuenta el periodo requerido para obtener rendimientos rentables de café, en suelos donde los nutrientes habían sido paulatinamente agotados.

La propuesta tecnológica del Proyecto Familia busca recuperar la fertilidad del suelo para incrementar la producción de café de la finca y mejorar los ingresos familiares a través de fertilización balanceada, prácticas adecuadas de manejo del cultivo, generación y uso eficiente de los subproductos de la finca para reciclamiento (pulpa, desechos y estiércoles), uso racional de los recursos naturales (agua, suelo y bosque) y reforestación.

El Programa Familia arrancó oficialmente en el periodo 2003-2004 con productores cuyas fincas cubrían una superficie total de 950 hectáreas con café. Los agricultores no comprometieron todas sus áreas de cultivo de café y solicitaron crédito para fertilizar solamente parte de sus lotes, lográndose comprometer 450 hectáreas de la superficie total. Después de todo, este era un programa nuevo y mucho habían escuchado sobre los supuestos efectos negativos del uso de fertilizantes por parte de varias organizaciones de la región. Por esta razón, el uso de fertilizantes por parte de pocos productores de café generó mucha discusión y controversia.

Los oponentes indicaban, entre otras cosas, que el uso de fertilizantes solo degradaría más el suelo. Obviamente, esto no sucedió y los productores disfrutaron de buenos rendimientos. Observando los beneficios del manejo adecuado del cultivo y la fertilización, los agricultores comprometieron toda el área de sus fincas para el proyecto y se recibieron nuevas solicitudes para ingresar al programa.

El proyecto creció rápidamente y en el ciclo 2005-2006 estaban comprometidos con el programa 7 500 hectáreas pertenecientes a 2 500 familias. En el ciclo de producción 2009-2010 el número de familias asociadas con el programa creció a 15 000 cubriendo un área aproximada de 12 500 hectáreas. En solo 7 años el área del proyecto había crecido de manera sorprendente 28 veces.

Beneficios del Programa Familia

Este esfuerzo totalmente privado, generado para cumplir con la responsabilidad social con la comunidad que vio nacer y crecer a Comercio & Cia., ha logrado sobrepasar las expectativas iniciales. El precio internacional de café ha alcanzado niveles aceptables y esto ha hecho más valioso el programa. Los agricultores obtienen rendimientos altos que se pagan a buen precio.

Foto 4. Rendimientos altos y estables protegen a los agricultores de las fluctuaciones de los precios internacionales de café.

El resultado positivo ha permitido expandir el programa a comunidades enteras de productores de café en el noreste de Perú. Las familias han incrementado la producción de café, lo cual tiene importantes repercusiones en las inversiones productivas y sociales. Los efectos tangibles del programa son los siguientes:

Beneficios económicos

La mejor producción de café con mejor calidad de grano y de tasa ha resultado en mayores ingresos, condición que mejora la economía de las familias y promueve el ahorro y la inversión. La evolución de los rendimientos de café y de los precios alcanzados por los agricultores se presenta en la **Tabla 1**.

Los agricultores participantes en el programa han reconocido que es poco lo que pueden hacer para controlar los precios internacionales del café. Ellos también se han dado cuenta que la mejor forma de sobrellevar las fluctuaciones de los precios internacionales del café es a través de la producción de altos rendimientos por unidad de área, haciendo más eficiente el uso de los insumos externos.

Los agricultores están convencidos que una finca bien manejada ayuda a estabilizar los rendimientos y de esta forma ellos pueden disfrutar de los periodos con altos precios de café y proteger su inversión durante las épocas de bajo precio. Los rendimientos altos y estables han generado ahorros que hacen que los agricultores sean menos dependientes del crédito y menos vulnerables a la fluctuación de los precios y a los cambios adversos de clima que pueden afectar el cultivo (**Foto 4**).

Al momento, muchos agricultores han cambiado la distribución de los lotes de café para usar de mejor forma la tierra disponible y existe incentivo para renovar las plantaciones viejas con plántulas obtenidas de semilla seleccionada (**Foto 5**). El uso de estas y otras mejores prácticas de manejo (MPM) han mejorado los rendimientos que al momento están en un rango de 40 a 50 qq de café pergamino por hectárea por ciclo.

Los buenos resultados del mejor manejo del cultivo y los fertilizantes han incentivado a los agricultores a invertir en mejor infraestructura para procesar la fruta cosechada. Los agricultores han construido mejores y más grandes piscinas para lavar las cerezas de café y han comprado equipo para remover la piel y la pulpa del fruto (**Foto 6**). También se ha invertido en cobertores solares para secar el café pergamino y asegurar la calidad del producto final (**Foto 7**).

Muchos agricultores han diversificado la producción de la finca en los espacios liberados por la mejor distribución de la tierra dedicada al cultivo del café. Cultivos como maíz, yuca, maracuyá, caña de azúcar así como la producción ganadera y la piscicultura han sido incluidos en la operación normal de la finca (**Foto 8**). Esto genera alimentos e ingresos extras para la familia, particularmente en las épocas cuando no hay cosecha de café.

Las comunidades en los distritos de Coipa y Chirinos de la provincia de San Ignacio y las del distrito de San José del Alto en la provincia de Jaén son regiones que han cambiado marcadamente luego de 7 años de participación en el Programa Familia. Al momento, el paisaje en estas comunidades es más verde con más cobertura vegetal y las plantaciones de café son limpias, ordenadas y muestran el efecto de la adopción de la tecnología básica (**Foto 9**). Los asentamientos y pueblos de la zona son más dinámicos con los nuevos y diversos negocios impulsados por los mayores ingresos de los dueños de las fincas y de la mano de obra.

Beneficios sociales

Como su nombre sugiere, el principal beneficio social del

Foto 5. La producción de plántulas en un vivero bien manejado provee de material homogéneo que asegura altos rendimientos.

Foto 6. Nuevo complejo para el beneficio de la fruta de café que utiliza menos agua y recoge los residuos para tratarlos adecuadamente.

Foto 7. Cobertores solares para secar el café y preservar la calidad.

Programa Familia es el fortalecimiento de la economía y la unidad de la familia. Esta situación sirve como fundamento para otros beneficios sociales que se derivan directamente de hogares estables y solventes. Ejemplos notables son la implementación de sistemas básicos de sanidad por los agricultores participantes en el programa, como la construcción de letrinas funcionales, el mejoramiento de la infraestructura local y la instalación de electricidad en las fincas (**Foto 10**).

Foto 8. Diversificación de las actividades de la finca que asegura alimentos e ingresos.

Foto 9. Paisaje más verde y ordenado como producto de la adopción de las prácticas promovidas por el Programa Familia.

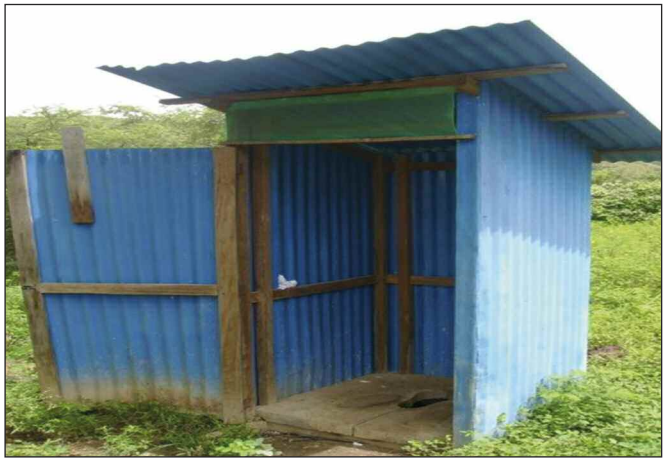


Foto 10. Construcción de letrinas funcionales en las fincas de los agricultores que permite una adecuada sanidad.

Uno de los signos más penosos de los bajos rendimientos y precios inestables era la falta de empleo en las comunidades de la región. Generalmente, la mayor fuente de empleo en esta zona se terminaba una vez que finalizaba la época de cosecha. Tanto los campesinos sin tierra como los propietarios se veían forzados a buscar trabajo fuera de sus comunidades, generalmente en la construcción o servicios, en ciudades distantes. Alternativamente, algunos agricultores se veían forzados a trasladarse a sitios en el interior del bosque para despejar nueva tierra y empezar nuevamente.

Los rendimientos más altos requieren de más mano de obra, no solamente en la época de cosecha, sino también durante todo el ciclo del cultivo. Las actividades relacionadas con las MPM, como la poda, manejo de la sombra, renovación de la plantación, aplicación de fertilizantes, entre otras, necesitan constante atención. Los agricultores también usan su tiempo en los otros cultivos o en el cuidado de los animales. Todas estas actividades rentables generan empleo constante para los agricultores y abren oportunidades de trabajo para los campesinos sin tierra.

La educación es un importante beneficio social consecuencia del mejor ingreso económico de los hogares. Los agricultores de las comunidades envueltas en el programa han podido mantener a sus hijos en la escuela para terminar la educación primaria y secundaria. Los niveles culturales de las familias en el programa siguen mejorando, lo que tiene un decisivo efecto en el desarrollo de la comunidad. Algunos agricultores pueden enviar a sus hijos a las universidades en las ciudades para que continúen con su educación. Sin embargo, la mayoría de los jóvenes se une a la fuerza laboral después de finalizar la educación secundaria y aprovechan de las oportunidades de trabajo que han resultado de la implementación del programa. Más aún, ellos tienen la motivación de cultivar café por su cuenta usando el crédito disponible en el programa. Es satisfactorio ver la actitud de esta nueva generación de productores, quienes con gusto hacen uso de las nuevas tecnologías para cultivar café. Los jóvenes están liderando el cambio y juegan un papel importante en la organización de la comunidad, coordinando el entrenamiento agronómico y el del crédito, así como otras actividades.

Beneficios ambientales

El efecto del Programa Familia sobre el ambiente es indiscutible. El vigoroso crecimiento de las plantas de café no solamente produce más rendimiento de fruta, sino que también produce abundante biomasa que permanece en el campo después de la poda. Los rendimientos más altos también producen mayor cantidad de pulpa en el beneficio de la fruta, este material también regresa al campo luego de pasar por el proceso de compostaje (**Foto 11**). Todo este reciclamiento incrementa el contenido de materia orgánica y promueve la recuperación de la fertilidad del suelo (**Foto 12**).

Foto 11. Proceso de compostaje para optimizar los residuos del cultivo de café.

Foto 13. Reforestación de perímetro de la finca como una inversión económica y ambiental.

La abundante cobertura generada por la caída de las hojas y por la poda protege el suelo de la erosión. Los nutrientes aplicados al suelo con los fertilizantes también alimentan los árboles de sombra sembrados entre los cafetales. La sombra crece vigorosamente, creando un hábitat que a su vez promueve la biodiversidad.

Un importante efecto del programa es que los agricultores pueden mantener un buen nivel de vida utilizando el área agrícola existente, lo que reduce el potencial de deforestación de nuevos sitios para producir café. Al momento, los agricultores satisfechos con los buenos resultados de la producción de café han empezado a ver la reforestación como otra inversión económica y ambiental a largo plazo. Por esta razón, los agricultores han empezado a reforestar las áreas de finca que no son adecuadas para café (perímetro de las fincas, bordes de caminos y arroyos, etc.). A medida que progresa el programa, los agricultores dedican más tiempo a actividades de reforestación y progresivamente aumentan su inversión en el ambiente (**Foto 13**).

La mayoría de las fincas participantes están localizadas en la parte superior de las cuencas hidrográficas y la reforestación de esto sitios en particular beneficia el ambiente de la región y contribuye a la conservación de la principales fuentes de agua de la región.

Los agricultores también se han dado cuenta de la necesidad de tratar las aguas residuales provenientes del proceso de beneficio del café. Se ha iniciado trabajos para encontrar formas de usar menos agua en el proceso y para tratar los líquidos residuales antes que lleguen a los cuerpos de aguas. Las nuevas piscinas de lavado también contribuyen a reducir el uso de agua en el proceso de beneficio de la fruta.

Conclusión

Después de 7 años de implementación, el Programa Familia ha demostrado que un esfuerzo completo de desarrollo rural puede promover el efectivo manejo del cultivo que incremente los rendimientos de café en áreas socialmente marginadas que no han recibido atención gubernamental o privada. Los actuales precios internacionales del café permiten que la producción sea muy rentable. Sin embargo, si los precios cayeran nuevamente debido a cambios en los mercados internacionales, la única forma de atenuar la situación sería a través de un eficiente manejo del cultivo que mantenga altos rendimientos. ❖

Foto 12. Efecto del Programa Familia en el ambiente. El agotamiento del suelo elimina paulatinamente la cobertura y degrada el ambiente (izquierda). El manejo del cultivo y la sombra promueve el crecimiento, acumula residuos y mejora la fertilidad y la biodiversidad (derecha).

DEL DIAGNÓSTICO A LA APLICACIÓN: CONCEPTOS BÁSICOS Y PRÁCTICOS PARA LA NUTRICIÓN DE CULTIVOS

Antonio P. Mallarino*

Introducción

La cuidadosa planificación del manejo de nutrientes siempre es importante para los productores, pero lo es especialmente en estos tiempos de cambios bruscos e imprevistos en los precios de los fertilizantes y los productos agrícolas, así como por la mayor preocupación de la sociedad con respecto a la calidad de las aguas. Los altos precios de los fertilizantes no serían un problema si existiese un correspondiente aumento de los precios de los productos agrícolas que mantengan o mejoren la relación precios - insumo/producto. Las fluctuaciones imprevistas en las relaciones de precios complican las decisiones respecto a la fertilización y estimulan a los productores a reducir las dosis de aplicación. En los países desarrollados, una reducción en las dosis de aplicación de nitrógeno (N) y fósforo (P) es vista con buenos ojos por el público y las agencias estatales a cargo del control de la calidad del ambiente. Sin embargo, una reducción de las dosis de N y P en todos los campos o condiciones de producción no es una buena decisión, porque no necesariamente va a aumentar la rentabilidad de la producción. Por esta razón, productores y agrónomos consultores deben tener presentes algunos principios básicos de manejo de nutrientes y posibles alternativas prácticas para este manejo, especialmente si consideramos que pocas veces existe una única manera de interpretar los análisis de suelos y decidir las dosis de fertilización para todas las condiciones de producción. La forma de encarar las alternativas posibles son muy diferentes para el caso de nutrientes móviles en el suelo, como el N, que para nutrientes relativamente inmóviles como P y potasio (K). En este artículo se discuten los conceptos básicos y las alternativas prácticas para el manejo de P que van desde las bases del diagnóstico hasta interpretaciones para el manejo de la fertilización.

El análisis de suelo y las calibraciones

El uso del análisis de suelo nunca está libre de error, pero es una herramienta de diagnóstico muy útil para decidir las dosis de fertilización. Si bien el muestreo del suelo y el análisis de laboratorio tienen un costo, el valor real se ha reducido significativamente en los últimos años si se compara con los precios de los fertilizantes y los precios de los productos agrícolas. En el mundo existen varios métodos de análisis para P que a menudo dan resultados diferentes. Aun el mismo método de análisis puede dar resultados que no son directamente comparables en suelos de propiedades químicas y mineralógicas muy contrastantes. Esto se debe a que el análisis de P del suelo (así como el de otros nutrientes), no mide la cantidad de P disponible en el suelo para los cultivos, sino solamente cierta cantidad que es proporcional a la cantidad disponible. Por lo tanto, los métodos de análisis de suelo deben calibrarse para diferentes suelos de una región o país. El proceso de calibración incluye la determinación del valor crítico del análisis o el rango de valores que separan suelos donde hay respuesta probable a la fertilización de los suelos donde la respuesta es poco probable (Dahnke y Olson, 1990). En la mayoría de las regiones o países donde se han calibrado los análisis de suelo, se establecen categorías de interpretación que generalmente son muy baja, baja, media, alta y muy alta, en relación a la suficiencia del nutriente en cuestión. Estas categorías a menudo difieren entre cultivos porque las necesidades pueden ser diferentes y a veces también entre suelos con propiedades contrastantes.

Una vez que se dispone de los datos de los experimentos de calibración conducidos en el campo, no existe un método único, que sea siempre el mejor, para determinar el nivel o rango crítico ni las clases interpretativas. Se puede usar una variedad de modelos matemáticos para estimar el nivel o rango crítico, pero todos imparten un cierto grado de sesgo y con todos hay un cierto grado de incertidumbre. Además, los cálculos del nivel crítico pueden apuntar a relaciones agronómicas fijas, como por ejemplo máximo rendimiento, o relaciones económicas tales como el óptimo económico basado en las relaciones de precios que son de naturaleza cambiante. La investigación ha demostrado que se pueden determinar varios niveles críticos, para un mismo método, suelo, o cultivo, todos con cierta validez dependiendo de los modelos usados y de las condiciones asumidas por los investigadores (Mallarino y Blackmer, 1992). Es importante entender que las interpretaciones del análisis de suelo y las recomendaciones de fertilización siempre reflejan la opinión de los investigadores en cuanto a la filosofía de manejo de la nutrición y de la producción.

Interpretación del análisis de suelo y recomendaciones de fertilización

La filosofía fundamental para interpretar el análisis de suelo y desarrollar recomendaciones de fertilización varía mucho a través de las regiones o países dependiendo de la forma de pensar de los investigadores y/o extensionistas envueltos en el proceso. Tradicionalmente estas filosofías se agrupan en dos claros conceptos: 1) el concepto de "nivel de suficiencia" y 2) el concepto de "subir y mantener". En su forma estricta, el nivel de suficiencia establece que hay un nivel de nutriente por debajo del cual hay respuesta a la fertilización. Cada nutriente tiene su

* **Departamento de Agronomía - Iowa State University, Ames, Iowa, Estados Unidos. Correo electrónico: apmallar@iastate.edu**

nivel de suficiencia y deficiencia, se fertiliza cada cultivo con la dosis óptima de acuerdo al nivel de cada nutriente y se reconoce que la dosis óptima de un nutriente puede ser afectada por el contenido de otros nutrientes en el suelo. El concepto de subir y luego mantener se basa en el poder residual de los fertilizantes fosfatados y potásicos y establece que si el contenido del nutriente determinado por el análisis está por debajo del nivel óptimo se debe fertilizar no solo para alcanzar el máximo rendimiento sino para subir el nivel del nutriente hasta el nivel óptimo en un plazo determinado. En algunos casos se interpreta mal este concepto y se recomienda fertilizar con lo que el cultivo va a remover en el grano cosechado aún cuando los niveles de nutriente en el suelo sean altos y la probabilidad de respuesta sea casi nula.

Las metodologías usadas en los diferentes estados de los Estados Unidos son bastante similares y representan posiciones intermedias entre los conceptos del nivel de suficiencia y subir y mantener. Las recomendaciones para las categorías bajas a veces incluyen sólo la dosis que daría el máximo rendimiento económico en la mayoría de las condiciones, pero a veces incluyen las dosis para maximizar el rendimiento y pueden incluir un componente para subir el nivel del nutriente en el suelo paulatinamente. Sin embargo, ningún estado recomienda una única aplicación para tratar de llegar inmediatamente al nivel de nutriente que determina el máximo. En algunos estados se especifica la proporción de la dosis que mantendría el nivel inicial de nutriente y la proporción para lograr la máxima respuesta y subir el nivel. En el estado de Iowa, en el cinturón maicero norteamericano, las dosis recomendadas para suelos deficientes son las estimadas para alcanzar el máximo rendimiento con una alta probabilidad. Las dosis recomendadas para las categorías muy baja y baja suben el nivel de nutriente hasta el óptimo en un período de cuatro a seis años, dependiendo especialmente de los niveles de rendimiento. El tipo de suelo no es muy importante en Iowa para desarrollar la recomendación, porque si bien hay suelos diferentes, las características que determinan la eficiencia de la aplicación de P y el uso de P por los cultivos no son muy diferentes para los suelos predominantes.

Es importante considerar que en la mayoría de los suelos del cinturón maicero y de muchas zonas templadas aún las dosis óptimas económicas de fertilización resultan en un incremento paulatino de los niveles de P en el suelo. Esto se explica por las propiedades químicas y mineralógicas de los suelos (fijan poco P), la absorción y remoción parcial del P aplicado durante el primer cultivo, el reciclaje de P en los residuos, y la transferencia de P de horizontes profundos a los superficiales (Dodd y Mallarino, 2005). Estas condiciones y procesos permiten que se pueda manejar el nivel de P en el suelo a corto o mediano plazo.

En Iowa no se considera la meta de rendimiento para las recomendaciones correspondientes a las categorías bajas. Sin embargo, la dosis de mantenimiento para la categoría denominada óptima está basada exclusivamente en la remoción promedio de P en el grano, ensilaje o heno. Este es un aspecto importante de la filosofía de fertilización utilizada en la mayor parte de los Estados Unidos y daría para mucha discusión que no es posible en este artículo. En gran parte del cinturón maicero, la dosis de aplicación y la remoción de P con la cosecha son los dos factores más importantes que determinan la evolución de los niveles de P y K en los suelos. En esta región, la variación del tipo de suelo a menudo no es importante y cuando hay un efecto del tipo de suelo, éste es en gran parte debido a las diferencias en el nivel de rendimiento. Resultados de ensayos de larga duración en suelos y zonas climáticas diferentes son la base de esta recomendación. Este tipo de información es útil porque permite estimar la cantidad de fertilizante a agregar para llegar a un nivel deseado del nutriente en el suelo, pero también sirve para determinar la cantidad a agregar periódicamente para mantener el nivel deseado.

Esta filosofía parea el uso del análisis de suelo y el manejo de la fertilización tiene varias ventajas. Es muy sencilla de implementar, implica poco riesgo de perder posible respuesta, implica bajos costos de aplicación, es una buena opción para suelos con poca o moderada capacidad de retención de P y K y no requiere de muestreos de suelo anuales. Con esta metodología, los costos de aplicación y el tiempo dedicado al manejo son significativamente menores. Esto se debe a que la aplicación de dosis de mantenimiento o aquellas que con seguridad producen el máximo rendimiento permiten el uso de métodos de aplicación sencillos, baratos y que requieren poca atención. Esto incluye la fertilización al voleo y la aplicación de las necesidades de dos cultivos en una sola vez, normalmente antes del cultivo más exigente. Sin embargo, esta filosofía puede disminuir el retorno neto por kg de fertilizante agregado y puede que no sea una práctica recomendable en suelos con muy alta capacidad de retención de P o K o cuando la tenencia de la tierra es precaria, por ejemplo arrendamientos anuales. Con la filosofía estricta del nivel de suficiencia se trata de aplicar la dosis óptima que da el máximo rendimiento económico para un cultivo, por esta razón, es necesaria una mayor precisión del análisis de suelo, las interpretaciones y las recomendaciones. Además, puede requerir muestreos de suelos anuales o bianuales, aumenta el riesgo de perder respuesta si se aplica menos fertilizante del que se debe y requiere más atención. Probablemente sea una buena práctica en suelos muy fijadores de P o K o cuando el productor tiene una limitante grave de dinero disponible o tenencia de la tierra precaria, como en el caso de pequeños productores.

Consideración de incertidumbre y relaciones de precios

Aunque las calibraciones de los métodos de análisis de suelo fueran perfectas, siempre hay cierto grado de incertidumbre respecto a la relación entre el resultado del análisis de suelo y la suficiencia del nutriente para los cultivos. La incertidumbre resulta de errores de muestreo

Tabla 1. Interpretaciones del análisis de suelo para P y ejemplos de recomendaciones de fertilización en Iowa, Estados Unidos, para dos niveles de rendimiento de maíz y soya. †

Nivel de P Bray-1		Categoría	Rendimiento de Maíz		Rendimiento de Soya	
Subsuelo	0-15 cm		8 000 kg	12 000 kg	3 000 kg	4 000 kg
	ppm		kg P_2O_5 ha^{-1}			
Baja	0-8	Muy baja	112	112	90	90
(< 8 ppm)	9-15	Baja	84	84	67	67
	16-20	Óptima	54	80	40	67
	21-30	Alta	‡	‡	0	0
	> 31	Muy alta	0	0	0	0
Alta	0-5	Muy baja	112	112	90	90
(> 9 ppm)	6-10	Baja	84	84	67	67
	11-15	Óptima	54	80	40	67
	16-20	Alta	‡	‡	0	0
	> 21	Muy alta	0	0	0	0

† **Adaptado de Sawyer et al. (2002). El nivel de rendimiento se utiliza sólo para determinar la fertilización para la categoría Óptima, para la cual se recomienda mantenimiento basado en remoción.**

‡ **Se recomienda aplicar una dosis baja de fertilizante a la siembra con suelo muy húmedo y frío ó con gruesa cubierta de residuos.**

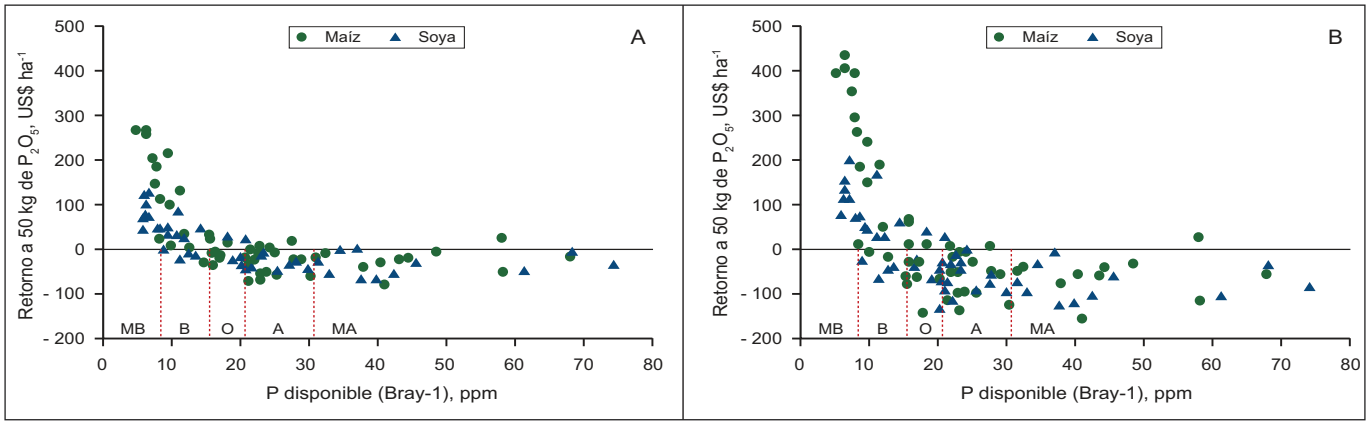


Figura. 1. Retornos netos a la fertilización fosfatada para diferentes niveles de P disponible y de precios. A: Grano de maíz y soya a US$ 80 y US$ 200 t^{-1}, respectivamente y P a US$ 0.70 kg^{-1} de P_2O_5. B: Grano de maíz y soya a US$ 167 y US$ 367 t^{-1}, respectivamente y P a US$ 0.88 kg^{-1}. Categorías interpretativas: muy baja (MB), baja (B), óptima (O), alta (A), muy alta (MA). Adaptado de Mallarino (2009). Precios expresados en dólares americanos (US$).

(representatividad del área muestreada), errores de análisis, dificultad de predecir con un análisis puntual en el tiempo la cantidad de nutriente disponible durante los períodos más críticos del cultivo y dificultad para predecir la eficiencia de la fertilización para cada condición particular. Por lo tanto, es importante que las investigaciones de calibración de métodos de análisis determinen la probabilidad de respuesta del cultivo para distintos resultados del análisis. También es importante que las publicaciones con interpretaciones y recomendaciones indiquen estas probabilidades. En Iowa, por ejemplo, la probabilidad de respuesta para las categorías usadas en el estado es de aproximadamente 80, 65, 25, 5, y 1 % para las categorías muy baja, baja, óptima, alta y muy alta (Sawyer et al., 2002). Es importante notar que la clase óptima no indica cero probabilidad de respuesta sino 25 % de una respuesta pequeña a moderada (**Tabla 1**).

La relación de precios afecta a la dosis de fertilización que se debe aplicar para lograr el máximo retorno económico neto al uso de fertilizante. Independientemente de la filosofía para el manejo, los retornos netos a la fertilización son mayores a niveles bajos de análisis de suelo donde hay una alta probabilidad de una respuesta grande, los retornos disminuyen a medida que los niveles suben y pueden hacerse negativos si se fertiliza con valores altos donde no hay respuesta (**Figura 1**).

El retorno neto por kg de fertilizante aplicado es máximo a niveles de análisis bajos y con dosis bajas y disminuye a medida que los niveles de análisis o las dosis aumentan. Esto se debe a la característica forma curvilínea con incrementos decrecientes de la respuesta al aumento de fertilidad del suelo o al aumento de las dosis de fertilizantes (**Figura 2**). El máximo retorno económico se

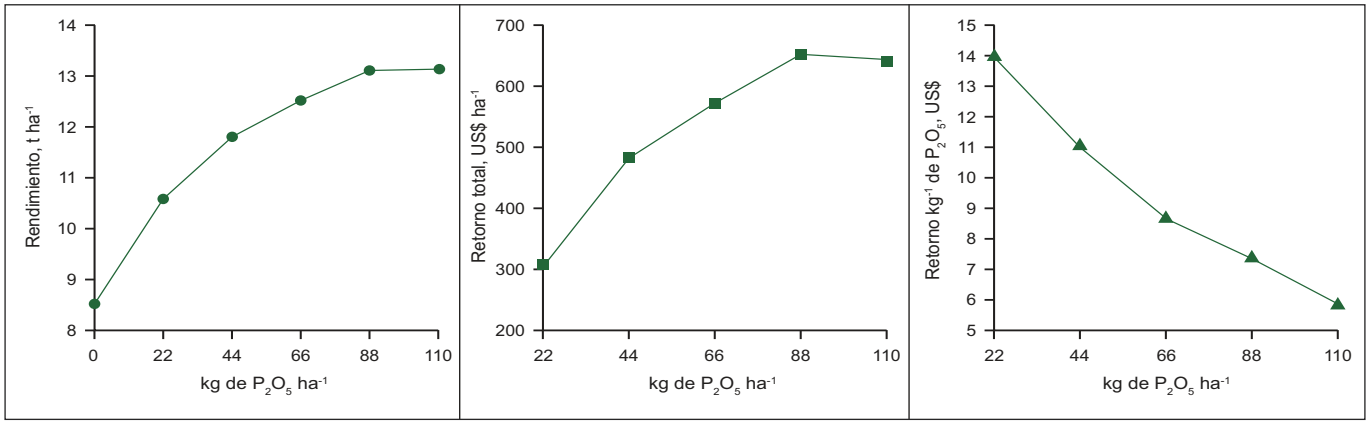


Figura 2. Respuesta de maíz a la fertilización fosfatada en un suelo de Iowa, Estados Unidos, con P disponible muy bajo en rendimiento, retorno neto total, y retorno por kg de P_2O_5 aplicado. Se asumieron precios de US$ 167 t^{-1} de maíz y US$ 0.88 kg^{-1} de P_2O_5. Adaptado de Mallarino (2009).

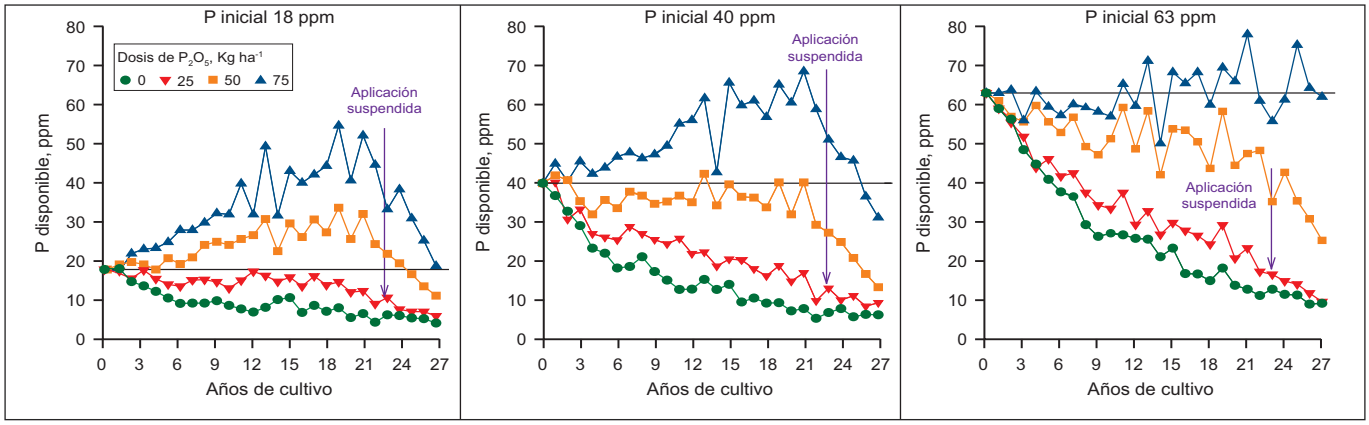


Figura 3. Cambios en P disponible (Bray-1) a través del tiempo para diferentes niveles iniciales y dosis anuales de fertilización fosfatada para la rotación maíz-soya. Adaptado de Mallarino (2009).

obtiene con una dosis de fertilizante algo menor a la necesaria para el máximo rendimiento. Una dosis de fertilización baja en suelos con niveles de P bajos resulta en altos retornos por kg de fertilizante aplicado, pero no logra el máximo retorno. En suelos con niveles de P cercanos al óptimo o mayores, la fertilización puede mantener o aumentar los niveles de P pero puede que no resulte en un beneficio económico a corto plazo (para una cosecha o ciclo).

Qué nivel de análisis de suelo debe mantenerse?

La remoción de P con la cosecha de granos o forraje, junto con la aplicación de P con fertilizantes o estiércol es el factor más importante que determina los cambios de niveles de P del suelo en el cinturón maicero y muchas zonas templadas del mundo. Los niveles de rendimiento, y, por lo tanto, de remoción de P y otros nutrientes, varían mucho entre campos, pero también pueden variar significativamente dentro de un campo.

La **Figura 3** muestra como ejemplo la evolución del nivel de P en un suelo de Iowa con los años como consecuencia de la fertilización y la producción de maíz y soya. Esta figura también muestra que la dosis necesaria para mantener cierto nivel inicial de P en el suelo es mayor a medida que el nivel inicial aumenta y que la tasa de declinación es mayor a niveles de P altos y durante los primeros años cuando la fertilización se suspende. Este resultado también se ha observado en otras zonas del mundo, incluida Argentina. Aun cuando todavía no se entiende bien la razón para estas tendencias, se piensa que se debe a una mayor absorción y concentración de P con niveles altos y también mayores pérdidas de P con escurrimiento superficial o a través del perfil del suelo.

En el cinturón maicero, la investigación ha demostrado que un nivel óptimo de P (Bray-1, 16-20 ppm a 15 cm de profundidad) se mantiene o aumenta un poco al reponer el P extraído con las cosechas siempre y cuando los rendimientos y concentración de P de la porción cosechada se estime correctamente. Sin embargo, otras investigaciones han mostrado que la relación entre balance neto de P (aportes y remoción) y el análisis de suelo es buena a través de varios años, pero puede ser pobre en el corto plazo (**Figura 4**).

El concepto de mantener un deseado nivel de P o K disponible se usa en la mayoría de los estados de los Estados Unidos y en otras regiones templadas y claramente refleja uno de los aspectos más importantes de la filosofía predominante. Este concepto no se aplica cuando se sigue una filosofía estricta de nivel de suficiencia. Sin embargo, en muchas partes no se define bien cuál es el criterio seguido para elegir el nivel o rango de valores de análisis de suelo a mantener. Las

recomendaciones de Iowa claramente indican que el nivel de P disponible que se recomienda mantener (la clase óptima) es aquel nivel que resulta en un 25 % de respuesta pequeña a moderada. Una dosis de P basada en remoción sin duda aplica suficiente P para producir el máximo rendimiento de un cultivo o rotación (cuando se aplica al maíz la cantidad para la rotación maíz-soya). Sin embargo, esto no quiere decir que la dosis de fertilización basada en reposición sea la dosis óptima económica para un cultivo. En muchos casos, una dosis menor sería suficiente, pero predecir con precisión cuál sería esa dosis para cada campo o año en particular es difícil y la aplicación de una dosis muy baja reduce el retorno económico total y aumenta el riesgo de deficiencias futuras. Por lo tanto, el uso del concepto de mantenimiento refleja una filosofía de manejo de nutrientes a largo plazo y reduce el riesgo de perder rendimiento.

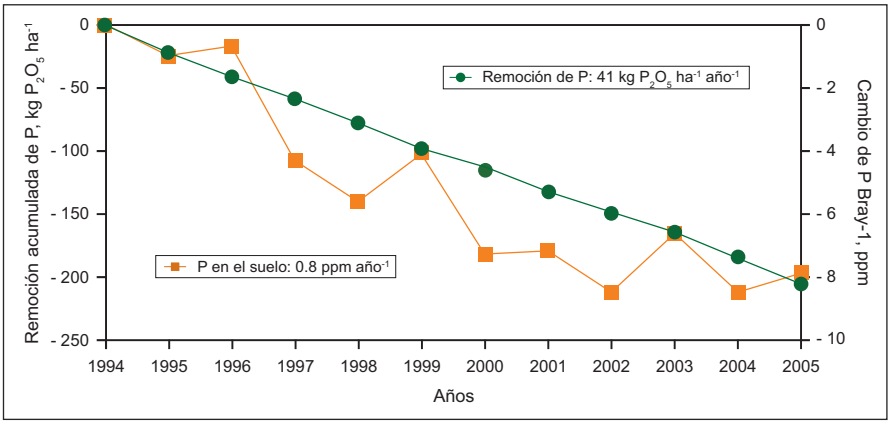


Figura 4. Cambios en P disponible (Bray-1) y remoción de P a través del tiempo para suelos sin fertilización fosfatada manejados con maíz y soya (promedios de cinco sitios). Adaptado de Mallarino y Prater (2007).

Otros factores afectan en forma significativa el manejo de la fertilización en general y el nivel de nutriente disponible que se quiere o puede mantener. Dos aspectos importantes son la filosofía del productor o consultor respecto la administración de la empresa agrícola y la actitud respecto al riesgo de perder retornos económicos debido a deficiencias o excesos de fertilización. La mayoría de los productores de Iowa y del cinturón maicero piensan que la fertilidad es la base del sistema productivo y que aún pequeñas deficiencias de nutrientes que limitan el rendimiento reducen la productividad y rentabilidad del sistema de producción. Muchos piensan que mantener un nivel de análisis que determina un 25 % probabilidad de respuesta es muy conservador y prefieren mantener niveles con una probabilidad de respuestas de aproximadamente el 5 % (la clase alta). Este es especialmente el caso cuando los precios de los fertilizantes son bajos y se sospecha que van a subir en el futuro. Debido al mismo razonamiento, los productores que empiezan a trabajar en suelos con niveles de P mayores al óptimo, ya sea naturalmente o porque anteriormente se habían subido los niveles, son reacios a esperar para fertilizar hasta que los niveles bajen del nivel óptimo.

Otro factor importante es la tenencia de la tierra. Fixen (1992) demostró que los intereses bancarios y tenencia de la tierra tienen un gran impacto en el nivel de P o K disponible que se considera óptimo y que se debe mantener. Hay muchas formas de tenencia de tierra y contratos de producción que no se pueden discutir en detalle en este artículo. Es claro que bajas dosis de fertilización aplicadas a suelos con niveles bajos no es una buena decisión económica aún con tenencia incierta en el futuro porque la probabilidad de reducir el beneficio económico a la fertilización es grande y se puede limitar el beneficio económico al sistema de producción en general. Por otro lado, mantener un nivel de P disponible donde la probabilidad de respuesta es baja pensando en la productividad futura puede no ser una buena decisión cuando la tenencia de tierra no es segura por lo menos por dos o tres años.

Bibliografía

Dahnke, W.C., y R.A. Olson. 1990. Soil test correlation, calibration, and recommendation. p. 45-71. In R.L. Westerman (ed.). Soil testing and plant analysis, 3rd ed. SSSA, Madison, WI.

Dodd, J.R., y A.P. Mallarino. 2005. Soil-test phosphorus and crop grain yield responses to long-term phosphorus fertilization for corn-soybean rotations. Soil Sci. Soc. Am. J. 69:1118-1128.

Fixen, P. 1992. Role of land tenure and other factors in soil P interpretations. p. 125-133. In North-Central Extension-Industry Soil Fertility Conf. Proceedings. Nov. 18-19. Vol. 8. Bridgeton, MO.

Mallarino, A.P., y A.M. Blackmer. 1992. Comparison of methods for determining critical concentrations of soil test phosphorus for corn. Agron. J. 84:850-856.

Mallarino, A.P., y J. Prater. 2007. Corn and soybean grain yield, phosphorus removal, and soil-test responses to long-term phosphorus fertilization strategies. p.241-253. In The Integrated Crop Management Conf. Proceedings. Nov. 29-30, 2007. Ames, IA. Iowa State Univ. Extension.

Mallarino, A.P. 2009. Long term phosphorus studies and how they affect recommendation philosophies. p. 6-12. In North-Central Extension-Industry Soil Fertility Conf. Proceedings. Nov. 14-15. Vol. 25. Des Moines, IA.

Sawyer, J.E., A.P. Mallarino, R. Killorn, y S.K. Barnhart. 2002. General guide for crop nutrient recommendations in Iowa. Publ. Pm-1688 (Rev.). Iowa State Univ. Extension. Ames, IA.❖

USO AGRONÓMICO DE LA ROCA FOSFÓRICA PARA APLICACIÓN DIRECTA

S.H. (Norman) Chien[1], Luis Prochnow[2] y Robert Mikkelsen[3]

Introducción

En muchos suelos ácidos del mundo, especialmente en los trópicos, los problemas de fertilidad limitan la producción de cultivos. Estos suelos tienen generalmente bajo contenido de fósforo (P) disponible para las plantas y a menudo tienen una alta capacidad de fijación de P, lo que resulta en una baja eficiencia de uso de los fertilizantes fosfóricos solubles en agua como el superfosfato triple (SFT) y el fosfato diamónico (DAP). En estos casos, la aplicación al suelo de roca fosfórica (RF) sin procesar puede ser una alternativa atractiva.

Propiedades de la roca fosfórica

El mejor indicador del desempeño agronómico de la RF es la solubilidad, característica que normalmente se mide en el laboratorio usando citrato de amonio neutro, ácido cítrico al 2 % o ácido fórmico al 2 %. La solubilidad de la RF refleja las características químicas y mineralógicas de minerales específicos. El principal mineral en la mayoría de las RF es la apatita, pero ésta varía ampliamente en sus propiedades físicas, químicas y cristalográficas.

La fórmula química de la apatita de algunas RFs representativas se presenta en la **Tabla 1**. En general, la solubilidad en citrato de amonio se incrementa a medida que aumenta la substitución de CO_3^{2-} por PO_4^{3-} en la estructura de la apatita. Se conoce que la solubilidad de la RF correlaciona bien con la respuesta del cultivo (**Figura 1**).

Generalmente, la solubilidad de la RF se incrementa a medida que se reduce el tamaño de las partículas. Sin embargo, la efectividad agronómica de las RFs altamente reactivas molidas y sin moler no sigue estrictamente este patrón de comportamiento. Por ejemplo, la solubilidad de una RF reactiva sin moler (-35 mesh; 0.15 mm) es menor que la misma RF molida (-100 mesh; 0.15 mm), pero su efectividad agronómica es similar en condiciones de campo (Chien y Friese, 1992) e invernadero (**Fotos 1 y 2**). No es suficiente comparar la solubilidad y la efectividad agronómica de varias RFs basándose solamente en la distribución del tamaño de las partículas. Una base de datos sobre la solubilidad de muchas RFs de diversos sitios en el mundo fue compilada por Smalgerger et al. (2006).

Propiedades del suelo

pH: Entre las propiedades del suelo, el pH es el que tiene la mayor influencia en la efectividad agronómica de la RF. Chien (2003) encontró, en un estudio conducido en 15 suelos de características diferentes, que la efectividad agronómica relativa (EAR) de la RF Gasa (Túnez), comparada con el SFT (EAR = 100 %) se incrementa a medida que el pH del suelo se reduce. Sin embargo, el pH por si solo explica solamente el 56 % de la variabilidad de la EAR en este estudio (ecuación 1). Al considerar también el contenido de arcilla (factor relacionado con la capacidad amortiguadora del pH y la capacidad de intercambio catiónico del suelo) fue posible explicar el 74 % de la variabilidad de EAR (ecuación 2). Debido a que el pH se expresa en una escala logarítmica, la eficiencia agronómica de la RF se reduce apreciablemente a pHs superiores a 5.5. Por esta razón, el valor agronómico de la RF se reduce cuando el pH del suelo está por encima de este valor.

Ecuación 1:

$$EAR, \% = 181.4 - 21.1\ pH \qquad (R^2 = 0.56)$$

Ecuación 2:

$$EAR, \% = 163.4 - 20.6\ pH + 0.78\ arcilla \qquad (R^2 = 0.74)$$

Capacidad de fijación de P en el suelo: La liberación de P de la RF generalmente se incrementa con un mayor poder de fijación de P del suelo. La adsorción y la precipitación del P soluble crean un sumidero que reduce la

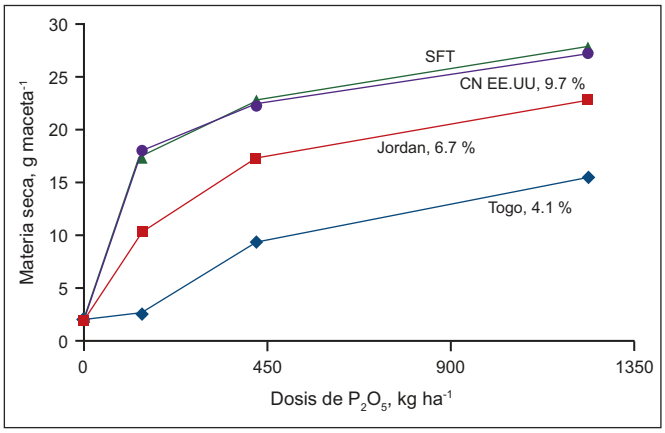


Figura 1. Materia seca de maíz fertilizado con RF molida de diferente solubilidad en citrato de amonio, comparada con una fuente de P soluble (SFT) en un suelo ácido (pH 4.8) (Chien y Friesen, 1992). La solubilidad en citrato de cada RF se muestra como porcentaje de P_2O_5.

[1] **Consultor privado, anteriormente científico principal del IFDC, Muscle Shoals, Alabama, Estados Unidos. Correo electrónico: nchien@comcast.net.**

[2] **Director del Internacional Plant Nutrition Institute (IPNI), Oficina para Brasil. Piracicaba, SP, Brasil. Correo electrónico: lprochnow@ipni.net.**

[3] **Director del Internacional Plant Nutrition Institute (IPNI), Oficina para el Oeste de los Estados Unidos. La Merced, California, Estados Unidos. Correo electrónico: rmikkelsen@ipni.net.**

Foto 1. Respuesta de la soya a la aplicación de diferentes fuentes de P en Brasil.

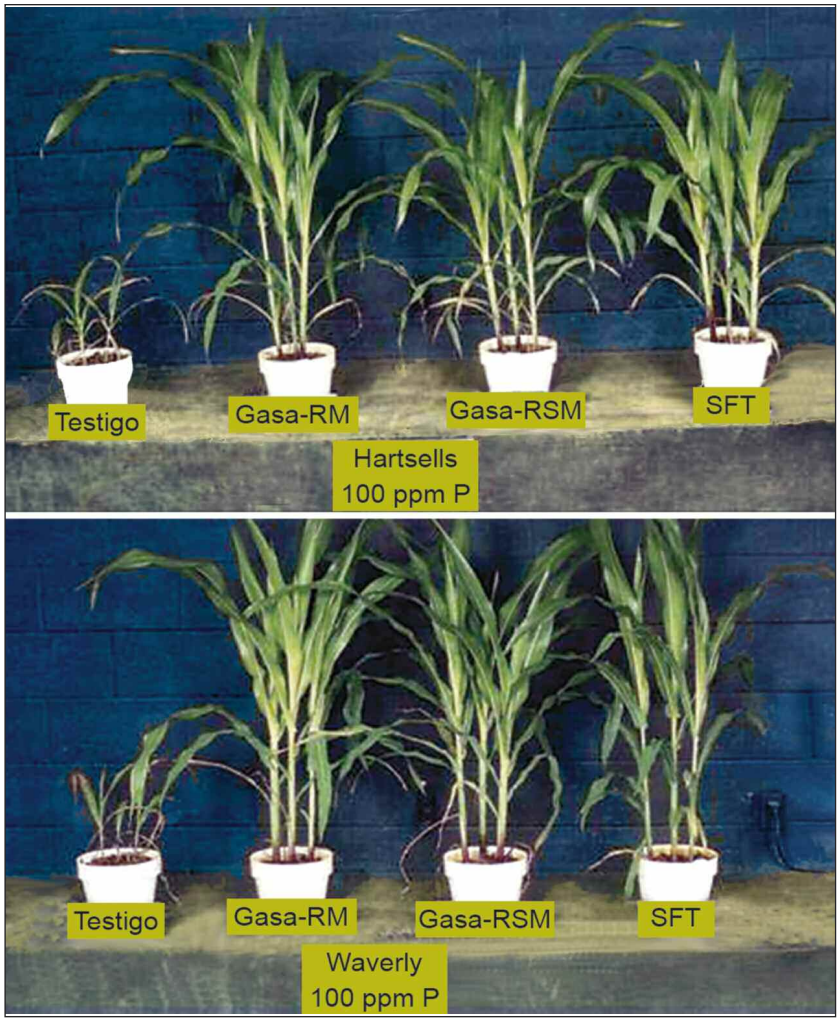


Foto 2. Comparación del efecto de la aplicación de RF molida (RM) y sin moler (RSM) en el crecimiento de maíz en dos suelos diferentes (Hartsells, pH 4.8 y Waverly, pH 5.3). Se compara en invernadero la RF de Gasa (Túnez) con SFT y un testigo sin fertilizar.

concentración del P en la solución del suelo y favorece la disolución de la RF. Sin embargo, a medida que se incrementa la capacidad de fijación, la concentración del P liberado al inicio del proceso de solubilización de la roca puede reducirse más rapidamente que en el caso de fuentes de P solubles. Por tanto, el efecto negativo de la capacidad de fijación en la EAR de la RF puede ser más significativo en los cultivos de corto plazo como las hortalizas. Para los cultivos a largo plazo o cultivos a corto plazo usando P residual, la EAR de la RF tiende a incrementarse, en comparación con las fuentes solubles con el incremento de la capacidad de fijación de P.

La **Figura 2** muestra que la EAR de varias RFs de diferente reactividad se incrementa desde el primer al tercer cultivo de frijol cultivado en un suelo de alta capacidad de fijación de P (Chien, 2003). Este comportamiento se debe a que el efecto residual del SFT se reduce rápidamente en suelos con alta capacidad de fijación y a la lenta disolución de la RF en el suelo.

Presencia de materia orgánica: Debido a que la disolución de la RF también libera calcio (Ca), en los suelos que inicialmente tienen un contenido alto de Ca la disolución de la RF es normalmente más lenta, como consecuencia de la ley de acción de masas. En muchos suelos tropicales el contenido de Ca es bajo y, por esta razón, presentan condiciones más favorables para la disolución de la RF. Por otro lado, se ha reportado el efecto positivo de la materia orgánica en el incremento de la efectividad de la RF (Chien, 2003). Se considera que el mecanismo para que la RF se disuelva mejor es la formación de complejos químicos entre la materia orgánica y el Ca.

Prácticas de manejo

La aplicación al voleo seguida de una incorporación con labranza es la forma más efectiva de agregar RF al suelo. Esta técnica maximiza la reacción de la RF con el suelo y minimiza la interacción entre las partículas de la roca. No se recomienda la aplicación en banda de RF porque esto limita el contacto de las partículas con el suelo y reduce la disolución. La efectividad de la RF también se reduce con la granulación de las partículas finas (Chien, 2003).

El manejo de la aplicación de RF para arroz de riego requiere de atención especial debido a que el pH se incrementa con la inundación. La efectividad agronómica de RFs reactivas puede reducirse drásticamente cuando se aplican al momento o después de la inundación, sin embargo, la RF puede trabajar bien si se aplica al suelo por lo menos dos semanas antes de la inundación (Chien, 2003). El añadir

cal a los suelos ácidos es una práctica común para elevar el pH y reducir la toxicidad del aluminio (Al). Sin embargo, el incremento de pH y el Ca adicionado con la cal afectan la disolución de la RF. Por esta razón, las prácticas de encalado deben balancear la necesidad de controlar la toxicidad de Al con la reducción de la disolución de la RF (Chien y Friesen, 1992). Se recomienda encalar para incrementar el pH del suelo hasta llegar a un rango entre 5.2 y 5.5 para de esta forma optimizar la efectividad agronómica de la RF.

Cultivos

La utilidad de la RF como fuente de P varía con el cultivo. En general, la efectividad de la RF es mayor en cultivos de largo plazo o perennes que en cultivos de corto plazo o anuales. La RF se ha usado extensivamente en muchos cultivos perennes como caucho, palma aceitera y té en Asia. La RF se ha usado también con éxito en pastos perennes.

La acidificación de la rizósfera es responsable de algunas de las diferencias entre cultivos con respecto a la utilización de la RF. En un estudio que utilizó seis especies, Van Ray y Van Diest (1979) encontraron que la roca de Gasa (Túnez) era equivalente al SFT en trigo, cultivo que tuvo el pH más bajo en la rizósfera en comparación con las otras especies.

Se conoce que la canola es eficiente para utilizar la RF. Se considera que la exudación de ácidos orgánicos por la raíz contribuye a la disolución de la RF. Habib et al. (1999) reportaron que la canola era capaz de utilizar la roca de Ain Layloun (Syria), una roca de mediana reactividad, aun en suelos calcáreos. Subsecuentemente, Chien et al. (2003) encontraron que la EAR de nueve RFs utilizadas en canola sembrada en un suelo alcalino (pH 7.8) se incrementó de 0 a 88 % a medida que la solubilidad de la RF en ácido cítrico al 2 % se incrementaba de 2.1 a 13.1 % de P_2O_5 **(Tabla 2)**.

Uso de la roca fosfórica en agricultura orgánica

La RF se utiliza en ocasiones en aplicación directa en

Tabla 1. Solubilidad y fórmula empírica de apatitas en algunas rocas fosfóricas sedimentarias.

Procedencia	P_2O_5, % (extraído con CAN*)	Fórmula empírica
Carolina del Norte, Estados Unidos	9.7	$Ca_{9.53}Na_{0.34}Mg_{0.13}(PO_4)_{4.77}(CO_3)_{1.23}F_{2.49}$
Gasa, Túnez	8.7	$Ca_{9.54}Na_{0.32}Mg_{0.12}(PO_4)_{4.84}(CO_3)_{1.16}F_{2.46}$
Bahía Inglesa, Chile	6.9	$Ca_{9.59}Na_{0.30}Mg_{0.12}(PO_4)_{4.90}(CO_3)_{1.10}F_{2.44}$
Florida Central, USA	5.3	$Ca_{9.74}Na_{0.19}Mg_{0.07}(PO_4)_{5.26}(CO_3)_{0.74}F_{2.30}$
Tennessee, USA	3.7	$Ca_{9.85}Na_{0.11}Mg_{0.04}(PO_4)_{5.54}(CO_3)_{0.46}F_{2.18}$
Patos de Minas, Brasil	2.5	$Ca_{9.96}Na_{0.03}Mg_{0.01}(PO_4)_{5.88}(CO_3)_{0.12}F_{2.05}$

* **Citrato de amonio neutro (CAN)**

Tabla 2. Características de las diferentes fuentes de P y su efectividad agronómica relativa (EAR) para canola cultivada en un suelo alcalino (pH 7.8) hasta la madurez (Chien et al., 2003).

Procedencia	Total P_2O_5[1]	Soluble en 2 %	Clases de reactividad[2]	EAR, %
SFT	46.2	100	-	100
Gasa (Túnez)	30.1	13.1	Alta	88
Ain Laylou (Syria)	28.1	12.2	Media alta	82
Chelesai (Kazakhastan)	17.0	10.0	Media	74
Tilemsi (Mali)	26.2	10.3	Media	72
El-Hassa (Jordan)	31.3	9.0	Media	64
Kenegesepp (Russia)	29.9	7.8	Media baja	64
Kadjari (Burkina Faso)	25.3	6.0	Baja	60
Kaiyang (China)	32.4	5.1	Baja	42
Panda Hills (Tanzania)	24.8	2.1	Muy baja	0
Testigo	-	-	-	0

[1] **Como porcentaje de P_2O_5 de la roca.**
[2] **Basado en la substitución CO_3/PO_4 en la estructura de apatita.**

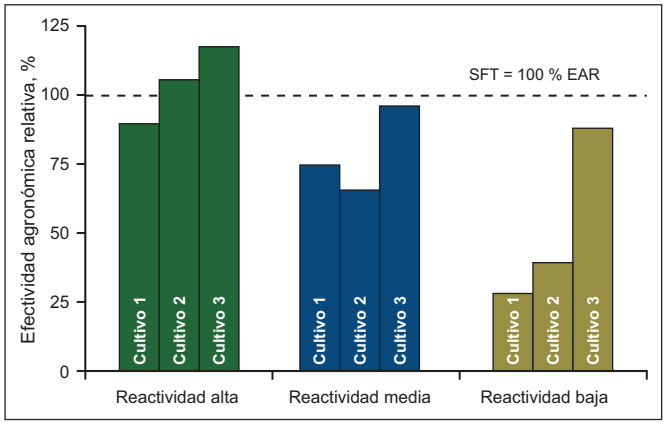


Figura 2. Efectividad agronómica relativa (EAR) de varias RFs (diferente solubilidad) en el rendimiento de tres cultivos sucesivos de frijol cultivados en un Andisol de Colombia (Chien, 2003). La EAR se calcula por comparación con el SFT. Todas las rocas se aplicaron una sola vez, en una dosis de 460 kg de P_2O_5 ha^{-1}.

agricultura orgánica. El éxito de la RF para la nutrición de los cultivos orgánicos depende en mucho de su reactividad en el suelo. El contenido total de P_2O_5 que aparece en el saco es irrelevante con respecto a la reactividad de la RF en el suelo. De hecho, la mayoría de las RFs de origen ígneo tienen un alto contenido de P_2O_5 (> 34 %), pero baja reactividad debido a la poca substitución de CO_3 por PO_4 en la estructura de la apatita y, por esta razón, no son recomendadas para aplicación directa en agricultura orgánica (Chien et al, 2009). Sin embargo, los detalles de la reactividad de la roca rara vez se explican a los productores orgánicos. Los factores que afectan la efectividad de la RF en agricultura orgánica son más o menos los mismos que afectan el uso de RF en agricultura convencional. Una excepción ocurre cuando se añade RF en el proceso de compostaje, donde pueden presentarse condiciones alcalinas antes que condiciones ácidas (Chien et al., 2009), sin embargo, la quelatación del Ca derivado de la apatita por la materia orgánica puede ayudar a disolver la RF.

Sistemas de decisión y soporte para uso de roca fosfórica

Los resultados de muchos experimentos con RF se han integrado en una sola herramienta que permite predecir la efectividad agronómica de la roca en situaciones específicas. El Centro Internacional de Desarrollo de los Fertilizantes (IFDC, por sus siglas en inglés) desarrolló y publicó un modelo de sistemas de soporte y decisión para RF (Smalberger et al., 2006; (http://www-iswam.iaea.org). Este sistema puede usarse para tomar decisiones entre el uso de fertilizantes solubles o RF para satisfacer las necesidades de nutrientes. El sistema también provee asistencia para determinar las condiciones donde el uso de RF es más económico que los fosfatos solubles como fuente de nutrientes.

Conclusiones

En ciertas circunstancias, la efectividad agronómica y económica de la RF puede ser igual o mejor que la de los fertilizantes fosforados solubles en agua. A diferencia de los fertilizantes fosfatados solubles en agua, que pueden ser usados ampliamente, existen factores específicos, incluyendo la reactividad de la RF, las propiedades del suelo, las prácticas de manejo y el tipo de cultivo, que deben tomarse en cuenta para maximizar la utilización de la RF. El uso de los sistemas de decisión y soporte es un medio efectivo de predecir el mejor uso de la RF.

Bibliografía

Chien, S.H. 2003. Factors Affecting the Agronomic Effectiveness of Phosphate Rock for Direct Application. *In* Direct Application of Phosphate Rock and Related Technology: Latest. Development and Practical Experiences, pp. 50-62, (S.S.S. Rajan and S.H. Chien, ed.). Special Publications IFDC-SP-37, IFDC, Muscle Shoals, Alabama.

Chien, S.H., and D.K. Friesen. 1992. Phosphate Rock for Direct Application. *In* Workshop on Future Directions for Agricultural Phosphorus Research, pp. 47-52, TVA Bull. Y-224. Tennessee Valley Authority, Muscle Shoals, Alabama, U.S.A.

Chien, S.H., G. Carmona, J. Henao, and L.I. Prochnow. 2003. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 34:1825-1835.

Chien, S.H., L.I. Prochnow, and H. Cantarella. 2009. Adv. Agron. 102:261-316.

Habib, L., S.H. Chien, G. Carmona, and J. Henao. 1999. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 30:449-456.

Smalberger, S.A., U. Singh, S.H. Chien, J. Henao, and P.W. Wilkens. 2006. Agron. J. 98:471-483.

Van Ray, B. and A. Van Diest. 1979. Plant Soil 51:577-589.❖

FERTILIZACIÓN CON FÓSFORO Y AZUFRE EN ROTACIÓN DE CULTIVOS DEL CENTRO DE SANTA FE, ARGENTINA: BENEFICIOS PRODUCTIVOS Y ECONÓMICOS Y EVOLUCIÓN DEL P EXTRACTABLE

H.S. Vivas[1], N. Vera Candioti[1], R. Albrecht[1], L. Martins[1] y J.L. Hotián[2]

Introducción

En el centro de la provincia de Santa Fe, Argentina, el doble cultivo trigo/soya es parte relevante de las rotaciones y por si mismo constituye un sistema muy intensivo tanto en producción, como en extracción de nutrientes y es, a su vez, uno de los más dependientes de la disponibilidad hídrica. De allí la importancia de generar información involucrando varias campañas para caracterizar este sistema de producción. Por cuestiones técnicas y de riesgo, el sistema productivo deseable no es la simple secuencia trigo/soya, sino que más bien ésta debería formar parte de una secuencia de cultivos como trigo/soya-maíz-soya, para anexar los beneficios de la acumulación de agua y la fertilidad generada mediante una rotación.

Dada la amplia demanda de nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) del trigo y la soya, podría aplicarse al trigo todos los requerimientos de ambos cultivos (García et al., 2001). El N, es fundamental para la gramínea, siguiéndole en importancia el P y el S (Vivas et al., 2010a), éstos últimos aportando efectos residuales y aditivos en la producción de granos (Vivas et al., 2006; Vivas et al., 2010b).

El P constituye un nutriente esencial y las condiciones de deficiencia en el suelo solo pueden remediarse mediante la aplicación de fertilizantes (Ozanne, 1962). Por su baja movilidad y con aplicaciones sucesivas, este elemento tiende a concentrarse en la superficie (Olsen et al., 1962). Esta estratificación favorece el desarrollo radicular en la superficie, pero ante un estrés temporal o prolongado de agua, su escasa movilidad le impide ser absorbido por la planta (Vivas et al., 2005; Vivas et al., 2009). Se considera que el nivel de P extractable (método Bray-Kurtz 1) en el suelo (0-20 cm), adecuado para la rotación trigo/soya, debe ubicarse por arriba de 15 ppm.

Albrecht et al. (2000), demostraron que el S es un nutriente relevante para los cultivos en el centro de Santa Fe. En suelos de la región pampeana se ha encontrado que más del 95 % del S total pertenece a formas orgánicas (Mizuno et al., 1990), el resto corresponde a compuestos inorgánicos como el S-SO_4^{2-} en solución y el S-SO_4^{2-} adsorbido, que constituyen las formas rápidamente tomadas por los cultivos (Havlin et al., 1999). Según Spencer y McLachlan (1975), citados por Havlin et al. (1999), las gramíneas requieren menos S que las leguminosas y crucíferas, diferencia que se refleja en las concentraciones de S en el grano (Havlin et al., 1999). A diferencia del P, el S-SO_4^{2-} tiene mayor movilidad en el suelo y puede ser absorbido por flujo masal y por difusión. Esta característica es importante para interpretar la respuesta de los cultivos a la fertilización con P y S en relación a las condiciones ambientales (disponibilidad hídrica). Las necesidades de fertilización con S en los sistemas de cultivos del centro de Santa Fe son muy recientes y se comparan con las demandas de P observadas en la zona hace alrededor de 30 años. La agricultura continua, sin aplicación de fertilizantes, produce una disminución del contenido de materia orgánica en el suelo y en consecuencia deprime el aporte de S-SO_4^{2-} proveniente de la mineralización de la misma (Stevenson, 1986). Se considera que niveles superiores a 10 ppm de S-SO_4^{2-} en el suelo (0-20 cm de profundidad) son adecuados para la rotación trigo/soya, aunque el diagnóstico de las deficiencias considerando este como el único parámetro no fue preciso en varios casos (Geniletti y Gutiérrez Boem, 2004; Reussi Calvo et al., 2006).

La fertilización del doble cultivo trigo/soya en una sola ocasión tiene importantes ventajas operativas al reducirse el número de aplicaciones y llegar al cultivo de soya de segunda sin otro compromiso que el de la siembra.

Los objetivos del presente estudio, conducido en el periodo 2000-2010, fueron evaluar los beneficios productivos y económicos de la fertilización con P y S sobre el doble cultivo trigo/soya como componente de una rotación trigo/soya-maíz-soya y determinar los efectos de esta fertilización en la evolución del P extractable del suelo como índice de fertilidad.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en la localidad de Bernardo de Irigoyen, departamento San Jerónimo, provincia de Santa Fe, Argentina, sobre un suelo serie Clason (Argiudol típico, arcilloso fino, illítico, térmico). Se aplicó una dosis uniforme de N al trigo (60 kg de N ha^{-1}), mientras que las dosis de P y S fueron variables y se aplicaron al cultivo de trigo con el propósito de fertilizar el doble cultivo por una sola vez. Se utilizó un diseño experimental de parcelas divididas en bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Los tratamientos fueron una combinación de P en la macroparcela (0, 20 y 40 kg ha^{-1}) y de S en la subparcela (0, 12, 24 y 36 kg ha^{-1}). La

[1] **INTA EEA Rafaela, Ruta 34 Km 227 - CC 22 – (2300) Rafaela, Santa Fe, Argentina. Correo electrónico: hvivas@rafaela.inta.gov.ar**

[2] **Cooperativa Bernardo de Irigoyen, Juan XXIII No. 128, (2248) Bernardo de Irigoyen, Santa Fe, Argentina.**

fertilización de N-P-S se realizó siempre al momento de la siembra del trigo (2000-2003-2006 y 2009). El P se incorporó con la sembradora, pero el N y el S se distribuyeron al voleo. La unidad experimental fue de 4.2 x 12 m. El P se aplicó en forma de superfosfato triple (P = 20 %), el S como yeso (S = 18 %) y el N como urea (N = 46 %). Como se indicó, la soya de segunda no tuvo fertilización alguna.

Al inicio del experimento (2000), el contenido de materia orgánica del suelo (0-20 cm) fue de 2.9 %, el P extractable (Pe) de 11 ppm, el S-SO_4^2 de 9.5 ppm y el pH de 6.2. Luego de cada doble cultivo se tomaron muestras de suelo (0-20 cm) para analizar el Pe con el propósito de evaluar el efecto residual como índice de fertilidad. El rendimiento y los datos de contenido de Pe se analizaron estadísticamente utilizando SAS (SAS Institute Inc, Cary NC) y se utilizó la prueba de LSD para la comparación de medias. Se realizó un análisis económico mediante el cálculo del margen bruto para el rendimiento promedio de las cuatro cosechas de trigo y las de soya de segunda, con precios de insumos y productos correspondientes al mes de agosto de 2010. La distribución de lluvias para todas las campañas se puede observar en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Distribución de lluvias en Bernardo de Irigoyen, departamento San Jerónimo, provincia de Santa Fe, Argentina.

	Trigo			
Meses	2000-01	2003-04	2006-07	2009-10
	mm			
Marzo	75	102	87	200
Abril	153	243	70	45
Mayo	215	83	1	12
Junio	32	0	64	7
Julio	29	35	5	63
Agosto	36	67	2	1
Septiembre	76	35	9	123
Octubre	195	55	68	93
Total	811	620	306	544
	Soya de segunda			
Noviembre	197	38	120	150
Diciembre	97	85	330	209
Enero	234	85	95	77
Febrero	96	30	86	268
Marzo	139	82	483	71
Abril	89	165	67	105
Total	852	485	1 181	880

Resultados

Respuesta productiva

En todos los cultivos de trigo y soya de segunda hubo diferencias significativas en la respuesta a la fertilización con S ($p < 0.05$), mientras que el cultivo de soya no respondió significativamente a la aplicación de P en las cosechas del 2004 y 2010 (**Tabla 2**).

La falta de respuesta a la aplicación de P en la soya puede explicarse por las condiciones de estrés hídrico prevalentes durante enero, febrero y marzo del 2004 y durante enero y marzo del 2010. En estas condiciones, el P que tiene poca movilidad y está localizado mayormente en la superficie, está fuera del alcance del sistema radicular y no puede ser absorbido por la planta. En cambio, la respuesta positiva al S de todas las cosechas se explicaría por la mayor movilidad de este nutriente hacia capas profundas que lo expondría menos a las variantes hídricas que ocurren en superficie.

Un estudio realizado por Chao et al. (1962) en columnas de suelo, utilizando ^{35}S un marcador, demostró claramente la migración del S-SO_4^{2-} en profundidad de acuerdo a los volúmenes de riego y las dosis de fertilización. Los patrones de distribución estuvieron determinados por las características edáficas.

Con excepción del trigo 2000, las interacciones PxS no fueron significativas ($p > 0.05$), lo cual indicaría que existe un efecto independiente y aditivo de los dos nutrientes.

Las variaciones de los efectos P y S en los cuatro doble cultivos se pueden apreciar en la **Figura 1**.

No se hizo comparación de medias con los datos de trigo 2000 debido a que se presentó una interacción PxS positiva ($P > 0.05$) entre los factores en estudio (**Figura 1a**). Por su lado, la soya 2001 tuvo respuesta creciente a los niveles de P hasta P40 y hasta S24 con las dosis de S, luego se estabilizó. En el 2003 (**Figura 1b**), el trigo

Tabla 2. Significancia de los factores P y S y su interacción en la producción de trigo y soya.

Factores	Tr00	Sy01	Tr03	Sy04	Tr06	Sy07	Tr09	Sy10
P	*	*	*	ns	*	*	*	ns
S	*	*	*	*	*	*	*	*
PxS	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

*** = significativo al 5 %; ns = no significativo; Tr = Trigo; Sy = Soya.**

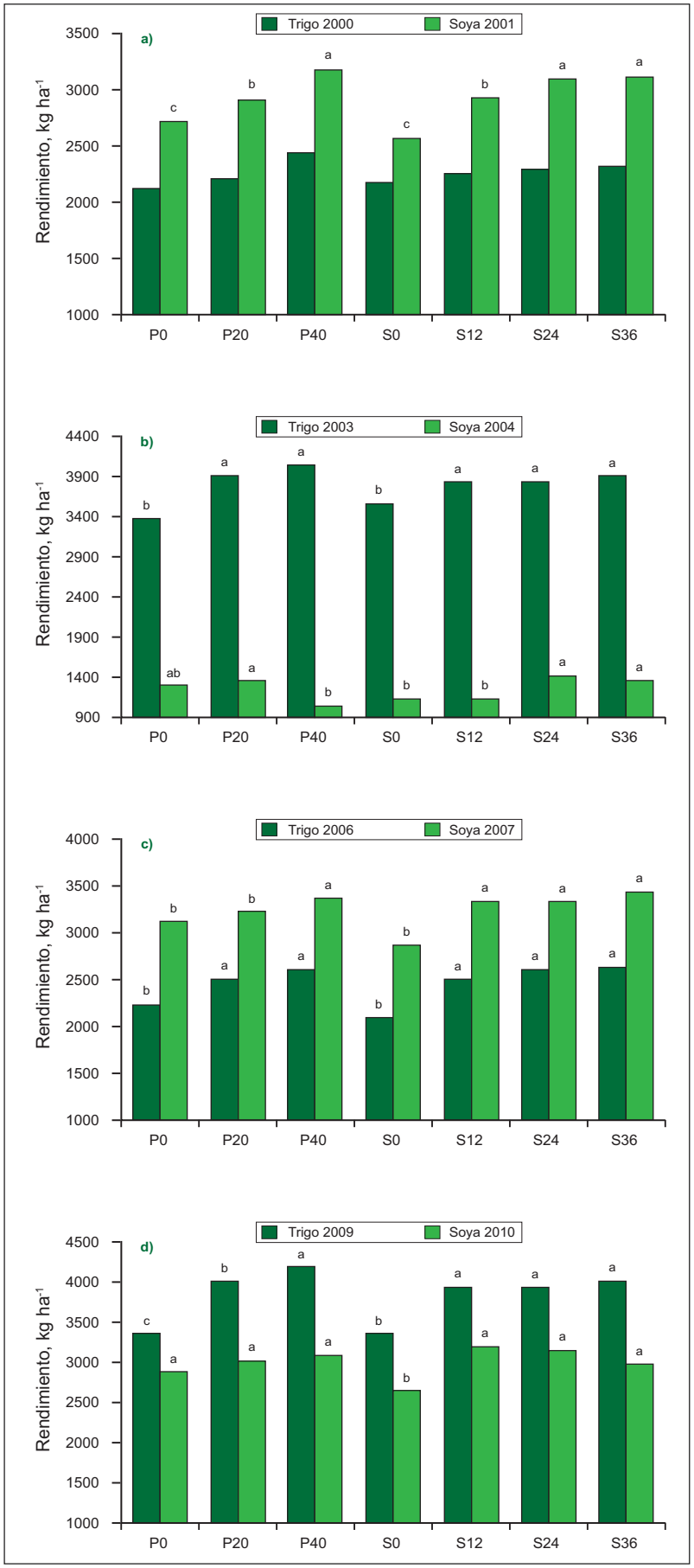


Figura 1. Variación de los rendimientos en relación con la fertilización con P y S en cuatro campañas de doble cultivo: a) Trigo-Soya 2000/01; b) Trigo-Soya 2003/04; c) Trigo-Soya 2006/07; d) Trigo-Soya 2009/10. Medias de tratamientos en cada cultivo y factor seguidas de la misma letra no difieren entre sí (LSD al 5 %).

respondió a P20 y P40, en cambio con S solo hubo respuesta hasta S12 y luego se estabilizó. El rendimiento de la soya 2004 tuvo un comportamiento inverso, siendo menor con las mayores dosis de P, debido al déficit hídrico y a la alta demanda de nutrientes del trigo. A pesar del estrés hídrico, las altas dosis de S lograron incrementar los rendimientos.

En el 2006 (**Figura 1c**), el trigo respondió a las dosis de P20 y P40 y solamente a S12. La soya respondió solamente al nivel P40 y al nivel S12. En el 2009 (**Figura 1d**), el trigo respondió a todos los niveles de P y solamente a la dosis S12. Con la soya no hubo respuesta a las dosis de P y para el S fueron suficientes niveles de S12.

Los incrementos porcentuales de cada dosis de P o S respecto de su correspondiente testigo P0 o S0, se pueden ver en el **Tabla 3**. Dada la interacción PxS significativa en el trigo 2000, no se especificaron sus respectivos incrementos porcentuales.

En la **Tabla 3** se observa cómo se destacan los incrementos de rendimiento del trigo en respuesta a la fertilización fosfatada. De igual modo, fue notable la respuesta de la soya de segunda a la fertilización con S. Las últimas dos campañas de trigo se caracterizaron por alta respuesta a la fertilización, tanto con P como con S. Los promedios de las cuatro campañas para trigo y soya en cada una de las doce combinaciones P-S se presentan en la **Figura 2**.

La producción de trigo expresó de mejor forma la respuesta a la fertilización creciente y combinada de P y S. La soya de segunda, por su parte, se destacó por la respuesta al S, pero no respondió a la fertilización fosforada.

Dada la importancia de evaluar la condición de fertilidad residual del suelo posterior a cada doble cosecha, se utilizaron los niveles de Pe como indicador de la disponibilidad de P. En la **Figura 3** puede verse la evolución de este parámetro a través del tiempo. El análisis de la variancia para los datos de Pe detectó diferencias significativas según las dosis de fertilización fosfatada.

Cuando el doble cultivo se condujo sin aplicación de P se produjeron aumentos de producción debido a la fertilización con S (**Figura 2**), pero a través de las campañas el contenido de Pe en el suelo se redujo cada vez más llegando a 5.7 ppm en la campaña 2009/10 (**Figura 3**). En el caso de P20 se observó un pequeño ascenso en el contenido del Pe,

Tabla 3. Incrementos porcentuales de la fertilización con P y S respecto de sus testigos, P0 y S0, para cada una de las cosechas. Bernardo de Irigoyen, Santa Fe.

	Tr00*	Sy01	Tr03	Sy04	Tr06	Sy07	Tr09	Sy10
	(%)							
P20	-	7.1	14.8	4.6	12.8	1.5	19.9	4.5
P40	-	17	20.1	-19	17.2	7.6	25.3	7.6
S12	-	14.7	6.7	1.9	20.3	13.6	16.8	19.8
S24	-	20.7	7	24	25.1	16.2	16.7	19.4
S36	-	21.9	9.1	21.1	26	19.6	18.5	12.2

*** No se presenta información debido a la existencia de interacción significativa PxS.**

respecto a la concentración inicial, alcanzando un valor de 13.1 ppm en 2010, que fue significativamente diferente del P0, pero no llegó a valores de 15 ppm deseables para la rotación. Con la dosis P40, el contenido de Pe fue superior a los 15 ppm en el 2004, 2007 y 2010, con diferencias significativas respecto a P0 y a P20 (**Figura 3**).

Respuesta económica

La fertilización con P y S no solo produjo aumentos significativos en los rendimientos, sino también beneficios económicos (**Figura 4**). Los márgenes de ingreso bruto fueron mayores siempre que se fertilizó con S (solo o en combinación con P). El P tuvo efecto positivo, pero la respuesta se potenció cuando la aplicación de P se combinó con la aplicación de S, alcanzando beneficios de 2 378, 2 498 y 2 417 US$ ha^{-1} para los tratamientos P20-S12, P20-S24 y P20-S36, respectivamente. Las combinaciones de S con P40 tuvieron mayor producción de grano, pero los márgenes fueron menores debido al mayor costo del fertilizante fosfatado. Los beneficios fueron de 2 295, 2 334 y 2 364 US$ ha^{-1} para los tratamientos P40-S12, P40-S24 y P40-S36, respectivamente.

Cuando no se aplicó P, los márgenes fueron también importantes: 2 366, 2 387 y 2 328 US$ ha^{-1} para los tratamientos P0-S12, P0-S24 y P0-S36, respectivamente. Sin embargo, es preciso indicar que esta situación no es aconsejable en suelos deficientes en P y debido a que la mayor producción acentúa la deficiencia y degrada el suelo aun cuando se observen resultados económicamente positivos durante los primeros años.

La dosis P40 no solo incrementó el contenido de Pe a niveles deseables, sino que también provocó incrementos apreciables de rendimiento (**Figura 3**). La combinación de P con las dosis de S también aumentó la producción, pero los márgenes decayeron por el mayor costo del fertilizante, (**Figura 4**). La combinación de P20 con las dosis crecientes de S produjo los mayores márgenes de ingreso bruto y el Pe residual, si bien es inferior al contenido deseable, es cercano a este valor (**Figuras 3 y 4**).

Conclusiones

- En las cuatro campañas de doble cultivo siempre se presentaron beneficios productivos y económicos, tanto en trigo como en soya, promovidos por la fertilización con P y S.

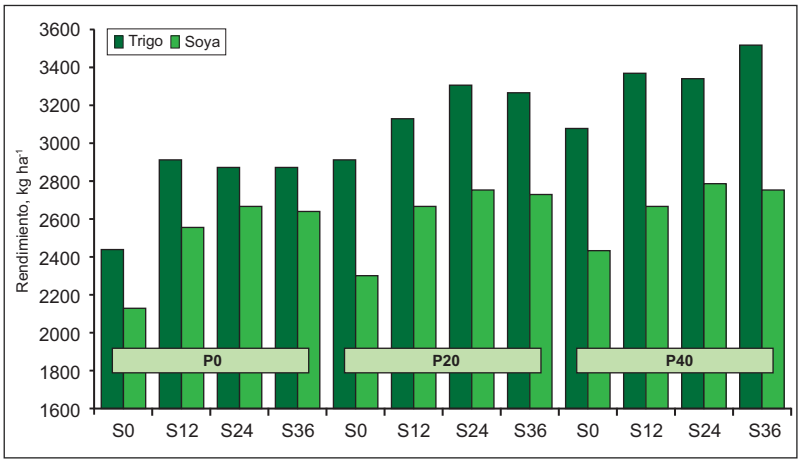


Figura 2. Producción de trigo y soya de segunda para las diferentes combinaciones de P y S. Promedio de las cuatro campañas conducidas en Bernardo de Irigoyen, Santa Fe.

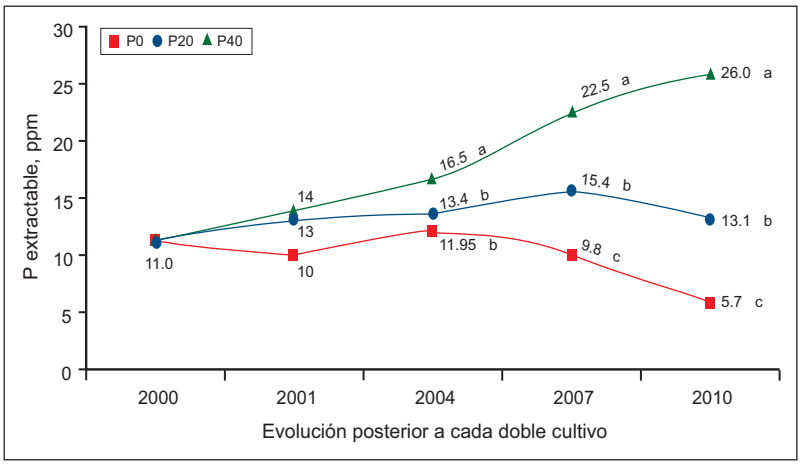


Figura 3. Evolución del contenido de Pe del suelo (0-20 cm) luego de cada doble cultivo trigo/soya en Bernardo Irigoyen, Santa Fe. Medias con igual letra en cada año no difieren entre sí (LSD al 5 %).

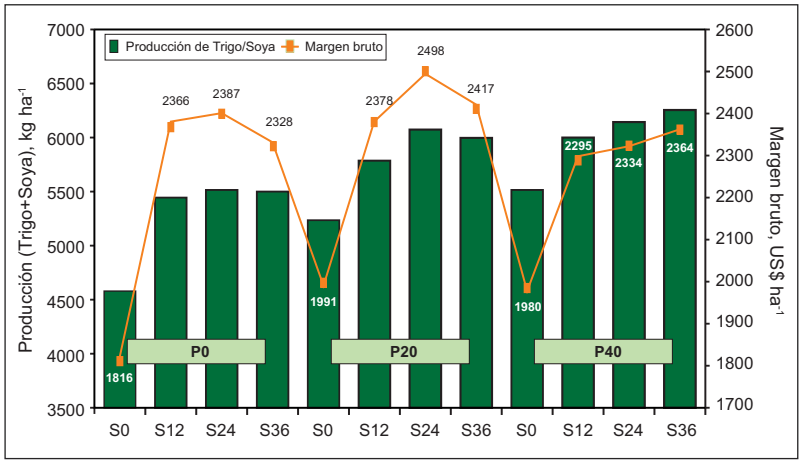


Figura 4. Producción promedio de cuatro campañas de trigo y soya de segunda y margen bruto correspondiente a cada combinación de fertilización con P y S en Bernardo de Irigoyen, Santa Fe. Precios de insumos y productos en base al mes de agosto de 2010.

- Aunque ambos cultivos respondieron a las combinaciones de P y S, el trigo se destacó por su respuesta a la fertilización con ambos nutrientes, mientras que la soya mostró respuestas principalmente al S.
- Los mayores rendimientos no siempre produjeron los mayores márgenes de ingreso bruto.
- La combinación P20 y S24 permitió obtener el mayor margen bruto sin reducir los valores iniciales de Pe.
- La provisión de 40 unidades de P para el doble cultivo, en combinación con S, permitió una adecuada provisión de nutrientes y una evolución favorable de los niveles de Pe.

Agradecimiento

Los autores agradecen a los Estadísticos Oscar Quaino y Alejandra Cuatrín (INTA EEA Rafaela) y Belén Conde (INTA EEA Marcos Juárez) por su contribución para este artículo.

Bibliografía

Albrecht. R., H.S. Vivas, H. Fontanetto, y J.L. Hotian. 2000. Residualidad del P y del S en soya sobre dos secuencias de cultivos. Campaña 1999-2000. En. Información Técnica de Soya y Maíz de Segunda. Campaña 2000. INTA EEA Rafaela. Publicación Miscelánea No. 93.

Chao, T.T., M.E. Harward, and S.C. Fang. 1962. Movement of S35 Tagged Sulfate Through Soil Columns. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 26:27-32.

García, F.O., H. Fontanetto, y H.S. Vivas. 2001. La Fertilización del doble cultivo trigo-soya. INTA EEA Rafaela. Información Técnica de Trigo. Publicación Miscelánea No. 94.

Geniletti, A., y F.H. Gutiérrez Boem. 2004. Fertilización azufrada del cultivo de soya en el centro-sur de Santa Fe. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. 24, 12-14. Acassuso, Bs As, Argentina.

Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, and W. L. Nelson. 1999. Soil Fertility and Fertilizers. An introduction to Nutrient Management. Sixth Edition. Prentice-Hall, Inc.

Mizuno, J., B. de Lafaille, y L.G. de López Camelo. 1990. Caracterización del azufre en algunos molisoles de la provincia de Buenos Aires. Ciencia del Suelo 8:111-117.

Olsen, S.R., W.D. Kemper, and J.D. Jackson. 1962. Phosphate diffusion to plant roots. Soil Sci. Soc. Am Proc. 26:222-227.

Ozanne, P.G. 1962. Phosphate Nutrition of Plants. A General Treatise. *In*. The Role of Phosphorus in Agriculture (ed.) F.E. Khasawneh, E.C. Sample, E.J. Kamprath. ASA-CSSA-SSSA.

Reussi Calvo, N.I., E.H. Echeverría, y H. Sainz Rosas. 2006. Respuesta del cultivo de trigo al agregado de azufre en el sudeste bonaerense. Ciencia del Suelo 24:77-87.

Stevenson, F.J. 1986. The Sulfur Cycle. In. Cycles of Soil. Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients. A Wiley-Interscience Publication. John Wiley and Sons.

Vivas, H.S., R. Albrecht, y J.L. Hotian. 2005. Manejo del fósforo y el azufre en una secuencia de cultivos del centro de Santa Fe. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. No. 28. p 16-18.

Vivas, H.S., R. Albrecht, J.L. Hotian, y L. Gastaldi. 2006. Residualidad del fósforo y del azufre. Estrategia de fertilización en una secuencia de cultivos. 2003-2006. INTA EEA Rafaela. Publicación Miscelánea No. 106.

Vivas, H.S., R. Albrecht, J.L. Hotián, y O. Quaino. 2007. Relación del fósforo y del azufre asociada a la respuesta del doble cultivo trigo/soya en un suelo del centro de Santa Fe. INTA EEA Rafaela. Información Técnica de Cultivos de Verano. Publicación Miscelánea No. 108.

Vivas, H.S., N. Vera Candioti, R. Albrecht, y J.L. Hotián. 2009. Fósforo y Azufre sobre soya de 1º en rotación con gramíneas. Región central de Santa Fe. INTA EEA Rafaela. Información Técnica de Cultivos de Verano. Publicación Miscelánea No. 115. p. 57-65.

Vivas, H.S., N. Vera Candioti, R. Albrecht, L. Martins, O. Quaino, y J.L. Hotian. 2010a. Efecto aditivo de la fertilización con fósforo y azufre sobre trigo en una rotación. INTA EEA Rafaela. Información Técnica de Trigo y otros cultivos de invierno. Publicación Miscelánea No. 116. p. 61-67.

Vivas, H.S., N. Vera Candioti, R. Albrecht, L. Martins, O. Quaino, y J. L. Hotian. 2010b. Fósforo y Azufre en una Secuencia de Cultivos para una Fertilización cada dos cosechas. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bolsa de Comercio de Rosario. p. 138.❖

SIEMBRA DIRECTA, ROTACIONES Y FERTILIDAD PARA UNA AGRICULTURA SOSTENIBLE CON ÉNFASIS EN LAS CONDICIONES DE SANTA CRUZ DE LA SIERRA, BOLIVIA

Fernando O. García*

Introducción

La demanda global de alimentos, forrajes, fibras y biocombustibles en los últimos años ha impulsado un fuerte aumento en la producción de granos en los países de América del Sur. Los costos crecientes de la tierra y de otros recursos e insumos, en muchos casos no son compensados por los precios de los granos, condición a la que se le suma la incertidumbre de las condiciones económicas y climáticas para el futuro cercano. En este marco, la intensificación productiva sostenible, definida como la mayor y más eficiente producción por unidad de recurso y/o insumo utilizado, se presenta como una alternativa válida. Esta intensificación busca mejorar la eficiencia en términos agronómicos, económicos y ambientales e involucra sistemas de producción y no solamente cultivos.

Los principales aspectos que deben considerarse en la implementación de sistemas intensificados sostenibles son:

- Rotaciones
- Siembra directa
- Balance de nutrientes y nutrición adecuada de cultivos y suelos
- Genética
- Manejo integrado de plagas, enfermedades y malezas.

La sostenibilidad en el contexto de la producción agrícola, implica preservar y/o mejorar la capacidad productiva del sistema desde el punto de vista agronómico, económico y ambiental, así como preservar la calidad de los recursos renovables y no renovables incluidos en el sistema productivo (suelo, agua, aire, biodiversidad). Entre estos recursos, se destaca el suelo como recurso finito no renovable. El suelo debe proveer un medio para el crecimiento de las plantas, regular y direccionar el flujo del agua y servir como un amortiguador ambiental que atenúe el efecto o degrade los compuestos ambientalmente peligrosos.

La calidad del suelo se define en términos de sus propiedades químicas, físicas y biológicas. Entre estas propiedades, la materia orgánica (MO) es considerada como uno de los más importantes indicadores de la calidad de suelo y de la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Robinson et al., 1994). La MO es la fracción orgánica del suelo en la cual se incluyen los residuos vegetales y animales en descomposición (10-20 %), la biomasa microbiana (1-5 %) y el humus (50-85 %). Se excluyen los residuos vegetales y animales sin descomponer. La determinación analítica de la MO involucra la determinación del carbono (C) orgánico del suelo que constituye aproximadamente el 58 % de la MO, por lo que suelen usarse indistintamente los términos MO ó C orgánico (MO = C orgánico * 1.72). La importancia de la MO radica en su relación con numerosas propiedades del suelo como se describe a continuación:

- Propiedades físicas: Densidad, capacidad de retención de agua, agregación y estabilidad de agregados (**Figura 1**), color y temperatura.
- Propiedades químicas: Reserva de nutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S) y otros, pH, capacidad de intercambio catiónico, capacidad tampón, formación de quelatos.
- Propiedades biológicas: Biomasa microbiana, actividad microbiana (respiración), fracciones lábiles de nutrientes.

El contenido de MO está determinado por los factores de formación del suelo (tiempo, clima, vegetación,

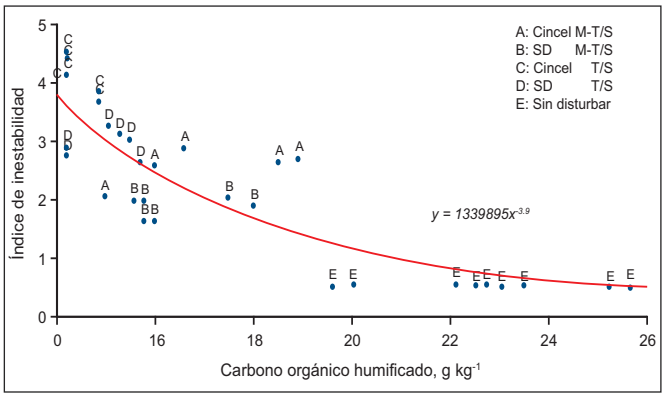


Figura 1. Relación entre el C orgánico humificado y el índice de inestabilidad de los agregados del suelo para distintas rotaciones con doble cultivo trigo/soya (T/S) y maíz (M), sistemas de labranza (Cincel y Siembra directa, SD) y una situación prístina (sin disturbar) en el sur de Santa Fe (Argentina). Fuente: Gómez et al. (2001).

* **Director del International Plant Nutritión Institute (IPNI). Oficina para el Cono Sur de Latinoamérica. Correo electrónico: fgarcia@ipni.net**

material parental, topografía, manejo). El manejo del suelo afecta el contenido de MO y los principales factores de cambio son el número de años de agricultura, cultivos, labranza, rotaciones, manejo del cultivo, fertilización y períodos de barbecho.

La siembra directa (SD), la rotación de cultivos y el mantener o elevar los niveles de fertilidad contribuyen a estabilizar los contenidos de MO del suelo a través de la incorporación de una alta cantidad de residuos de buena calidad (Walters et al., 2007; Galantini et al., 2008; Ferrari et al., 2010; Prior et al., 2010; Quincke et al., 2010) (**Figura 2**). Estas tres prácticas de manejo interactúan entre sí para promover la acumulación de MO, condición que mejora las propiedades químicas, físicas y biológicas que definen la calidad del suelo y la sostenibilidad de los sistemas de producción.

Este artículo discute los efectos de la SD, las rotaciones y la fertilidad sobre acumulación de MO, como indicador de la calidad del suelo y de la sostenibilidad de los sistemas de producción de granos. Asimismo, se presentan algunas alternativas para el manejo de estas prácticas en sistemas de producción de granos en la región este de Bolivia. Como se mencionó anteriormente, existe una marcada interacción entre los efectos de estas tres prácticas, que a su vez interactúan con otras prácticas de manejo de suelos y cultivos. La variabilidad de los resultados obtenidos con el manejo de las prácticas mencionadas, generada por las condiciones ambientales locales (suelo, clima, tecnología, condiciones económicas), amerita un análisis específico para el sitio de cada situación.

Siembra directa y materia orgánica del suelo

El hecho de no remover el suelo y mantener los residuos de cosecha en la superficie en los sistemas bajo SD promueve la acumulación de MO en las capas superficiales del suelo, en comparación con los sistemas de labranza convencional (LC) que remueven el suelo (Díaz Zorita et al., 2002; Studdert y Echeverria, 2002a; Alvarez, 2005; Amado et al., 2006; Andriulo et al., 2008; Galantini et al., 2008) (**Figura 3**). Este efecto se explica por la menor oxidación de los residuos orgánicos, la menor erosión y, eventualmente, la mayor producción de residuos promovida por el mejoramiento de la fertilidad y otras características del suelo bajo SD.

Estudios conducidos por Sá et al. (2001), en oxisoles del sur de Brasil, reportaron incrementos importantes en el contenido de C orgánico del suelo (806 kg ha^{-1} año^{-1}) en la capa de 0-20 cm en sistemas de producción bajo SD. Los aumentos de C orgánico del suelo estuvieron estrechamente relacionados con la cantidad de residuos aportados (R^2 = 0.74). Los autores atribuyen el incremento a la mayor protección del C orgánico en el suelo a través de la formación de agregados estables del tamaño de arenas y limos, especialmente en la capa de 0-10 cm de profundidad. Los datos de Bayer et al.

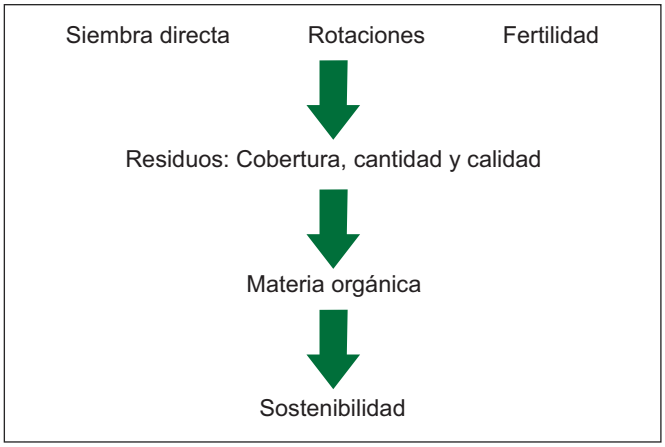


Figura 2. Relación de la siembra directa, rotaciones y fertilidad con la materia orgánica y la sostenibilidad de los sistemas agrícola-ganaderos.

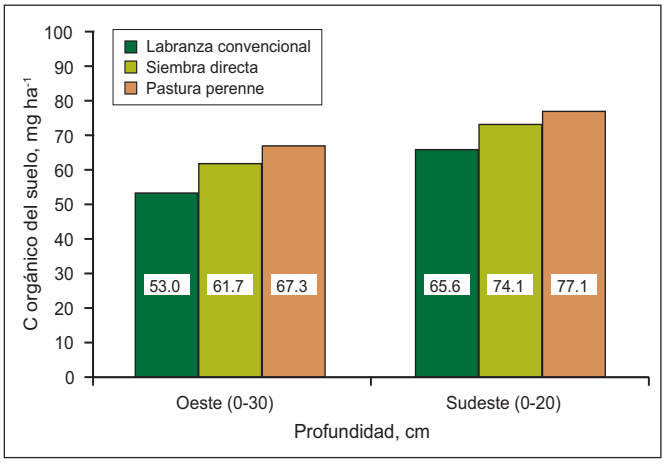


Figura 3. Carbono (C) orgánico del suelo bajo labranza convencional, siembra directa y pastura perenne en el oeste (0-30 cm de profundidad) y el sudeste (0-20 cm de profundidad) de la región pampeana argentina. Fuente: Díaz Zorita et al. (2002) y Studdert y Echeverría (2002b).

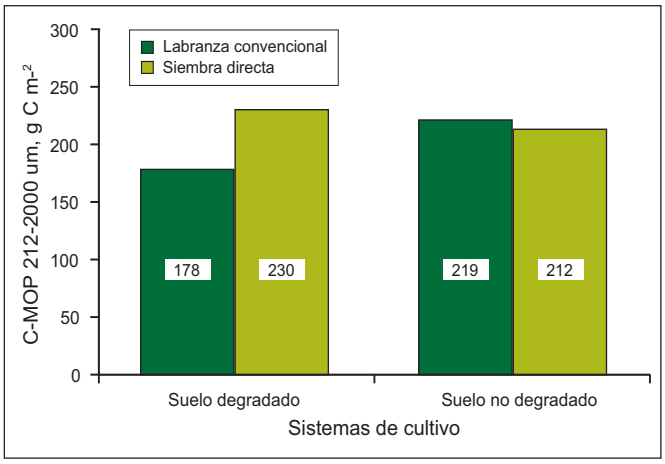


Figura 4. Carbono (C) orgánico del suelo en la fracción particulada de 212-2000 μm bajo labranza convencional y siembra directa en un suelo de prolongada historia agrícola (degradado) (izquierda) y un suelo con historia de pasturas (no degradado) (derecha) en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Fuente: Fabrizzi et al. (2003).

Tabla 1. Rendimiento en grano, C humificado, pérdida de C y balance de C para dos rotaciones agrícolas en el sudeste de Córdoba, Argentina. Fuente: Alejandro Thomas (com. personal).

A. Trigo/Soya - Maíz, tres cultivos en dos años			
Cultivos	Trigo/Soya	Maíz	Promedio
Rendimiento, kg ha^{-1}	3 529 / 2 771	11 000	
C humificado, kg ha^{-1}	2 993	3 359	3 176
Pérdida de C, kg ha^{-1}	3 505	2 713	3 109
Balance de C, kg ha^{-1}	-512	646	67

B. Trigo/Soya - Maíz-Soya, cuatro cultivos en tres años				
Cultivos	Soya	Trigo/Soya	Maíz	Promedio
Rendimiento, kg ha^{-1}	3 500	3 529 / 2 771	11 000	
C humificado, kg ha^{-1}	1 763	2 993	3 359	2 705
Pérdida de C, kg ha^{-1}	2 713	3 505	2 713	2 977
Balance de C, kg ha^{-1}	-950	-512	646	-273

Tabla 2. Tasa de secuestro de C en suelos tropicales y subtropicales de Brasil. Fuente: T. Amado y C. Bayer (datos no publicados), citado por Bayer et al. (2010).

Región	Manejo	Tasa estimada de secuestro de C mg C ha^{-1} año^{-1}
Subtropical (Sur)	Monocultura/Rotación de cultivos tradicional	0.12 ± 0.06
	Rotación de cultivos intensiva	0.36 ± 0.09
Tropical (Cerrados)	Monocultura/Rotación de cultivos tradicional	0.03 ± 0.07
	Rotación de cultivos intensiva	0.42 ± 0.06

(2001) obtenidos en ultisoles de Rio Grande do Sul, Brasil, sugieren que la estabilización del C orgánico se debe a la interacción de los compuestos orgánicos con minerales de carga variable (caolinitas y óxidos de hierro). Los efectos positivos de la SD sobre la fracción orgánica del suelo se observan también cuando se evalúan los contenidos de N orgánico (Moraes Sá, 1996) y las fracciones lábiles de C orgánico del suelo (Fabrizzi et al., 2003; Amado et al., 2006) (**Figura 4**).

Estudios realizados en los últimos años para evaluar la acumulación de C orgánico a mayores profundidades en sistemas de producción bajo SD han reportado resultados contradictorios. Baker et al. (2006) y Blanco-Caqui y Lal (2008) no encontraron diferencias de acumulación de C entre sistemas de LC y SD al evaluar la masa de C incluyendo horizontes subsuperficiales. Los efectos de la SD en la acumulación de C orgánico dependen de las condiciones iniciales del sitio, del tipo de suelo y del clima (Alvarez, 2005; Bayer et al., 2010).

Rotaciones y materia orgánica del suelo

La rotación de cultivos tiene varias ventajas si se compara con los sistemas de monocultivo. Las principales ventajas son:

- Posibilidad de acumular mayor cantidad de residuos de diferentes características lo que produce significativos aportes de C para el suelo.
- Mayor intensidad de uso del suelo.
- Mayor eficiencia de uso del agua.

Existen numerosos ejemplos a nivel mundial de las ventajas de la intensificación del manejo de las rotaciones en el incremento de los niveles de MO y en el mejoramiento de otros índices de calidad del suelo y/o en la eficiencia de uso de los recursos (Gregory y Drury, 1996; Peterson et al., 1998; Amado et al., 2006; Andriulo et al., 2008; Galantini et al., 2008). La mayor acumulación de MO se produce, entre otras razones, por la mayor producción de residuos provenientes de rendimientos más altos, por la reducción de los períodos bajo barbecho y por el uso más eficiente del agua.

En general, la inclusión de gramíneas en la rotación mejora el balance de C del suelo, tanto por la cantidad como por la calidad de los residuos y porque se logra una mayor cobertura del suelo. La **Tabla 1** muestra el balance de C del suelo de dos rotaciones en el sudeste de Córdoba, Argentina. En la rotación que tiene una mayor frecuencia de gramíneas (trigo y maíz), el balance de C es positivo, pero el balance es negativo en la rotación con mayor frecuencia de soya. El impacto negativo en el contenido de MO que se presenta cuando existe una mayor frecuencia de soya en las rotaciones, con respecto a cultivos como maíz o sorgo, ha sido descrito por varios autores en diversas regiones del mundo (Havlin et al., 1990; Studdert y Echeverria, 2000).

Una alternativa para mejorar el balance de C en el suelo es la utilización de cultivos de cobertura. Esta práctica

Tabla 3. Aporte de C de residuos y C humificado en un ciclo de la rotación maíz-trigo/soya de cuatro tratamientos de fertilización en dos sitios del sudeste de Córdoba, Argentina. Los tratamientos NP y NPS incluyeron dosis de nutrientes según diagnóstico y el tratamiento NPS-Rep dosis de nutrientes según reposición de los nutrientes extraídos en grano. Elaborado a partir de información de Vicente Gudelj y col. (com. personal).

Tratamiento	Aporte C residuos *	C humificado **
	---------- (kg C ha^{-1}) ----------	
	Don Osvaldo	
Testigo	6 144	-815
NP	8 061	31
NPS	10 353	1 082
NPS-Rep	11 381	1 532
	Los Chañaritos	
Testigo	8 358	173
NP	10 377	1 071
NPS	11 019	1 359
NPS-Rep	11 747	1 677

* Estimado a partir del índice de cosecha y la concentración de C en residuos.
** Según modelo AMG (Andriulo et al., 1999).

está muy difundida en numerosas zonas de Brasil, donde se utiliza avena negra entre la rotación entre dos cultivos de grano en verano (por ejemplo soya y maíz) (Fiorin, 1999). En estos sistemas, la inclusión de leguminosas como cobertura (lablab, mucuna, caupi, vicia o guandú) mejora la acumulación de MO (**Figura 5**) (Amado et al., 2006; Vieira et al., 2009). En climas templados, la inclusión como cultivos de cobertura de gramíneas como centeno o avena, o de leguminosas como vicia o trébol encarnado, es también una buena alternativa para fijar una mayor cantidad de C atmosférico en el suelo (Ruffo, 2003).

Un reciente resumen presentado por Bayer et al. (2010) muestra que las tasas de secuestro de C en sistemas bajo SD en Brasil están directamente relacionadas con el aporte anual de C de los cultivos. Las estimaciones regionales de T. Amado y C. Bayer (datos no publicados) indican que los sistemas de rotaciones intensivas de cultivos permiten alcanzar retenciones de C significativas, comparadas con secuencias de baja intensidad de cultivos (**Tabla 2**).

Fertilidad y materia orgánica del suelo

La MO es reserva de nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. Si se considera que la MO contiene aproximadamente un 58 % de C y se estima que la relación C/N/P/S es de 140:10:1.3:1.3, cada 1 % de MO en la capa superficial de 0 a 20 cm de suelo, con una densidad de 1.1 t m^{-3}, representa 22 000 kg ha^{-1} de

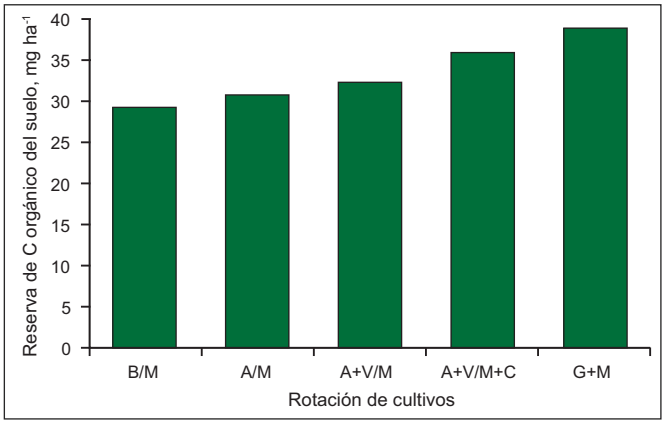


Figura 5. Reservas de C orgánico del suelo (0-17.5 cm) medidas a los 19 años del establecimiento de cinco rotaciones en la Estación Experimental Agronómica de la Universidad Federal de Rio Grande do Sul, RS, Brasil. B/M = Barbecho/Maíz; A/M = Avena/Maíz; A+V/M = Avena+Vicia/Maíz; A+V/M+C = Avena+ Vicia/Maíz+Caupí; M+G = Maíz+Guandú. Fuente: Vieira et al. (2009).

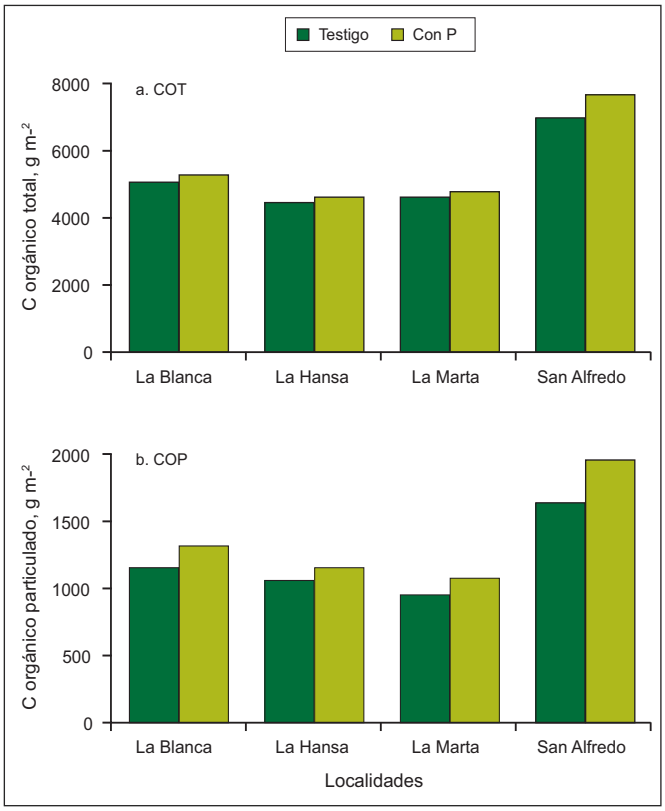


Figura 6. Reservas de C orgánico total (a) y particulado (b) en la capa de 0-20 cm superficiales de suelo sin (testigo) o con aplicación de P anual. Ensayos establecidos en el año 2000 y determinación realizada en agosto 2006. Fuente: Ciampitti et al. (2010).

MO, 12 000 - 13 000 kg ha^{-1} de C, 1 000 - 1 200 kg ha^{-1} de N, 90 - 120 kg ha^{-1} de P y 90 - 120 kg ha^{-1} de S. Estos contenidos indican que la MO actúa como sumidero y fuente de estos nutrientes en el sistema. En situaciones de balance negativo, cuando la exportación de nutrientes en los productos cosechados (granos y forrajes) es

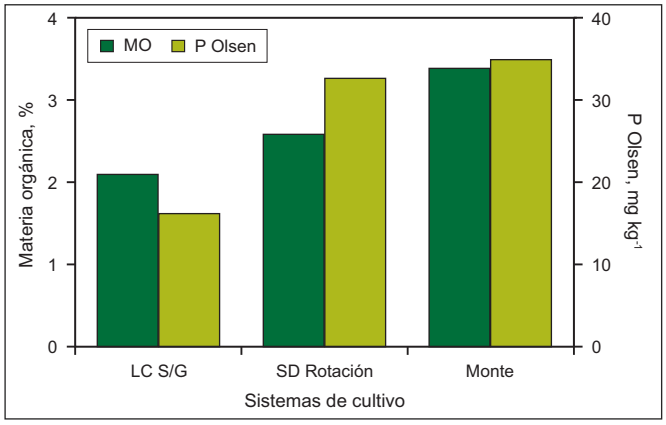


Figura 7. Materia orgánica (MO) y P Olsen en sucesión soya/girasol, rotación de cultivos anuales y situación prístina (Monte) en el ensayo del CEA-2 de ANAPO en la zona Este de Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. Fuente: Presentación del Ing. Agr. Edward Peña en el evento Vidas 2007 de Fundacruz.

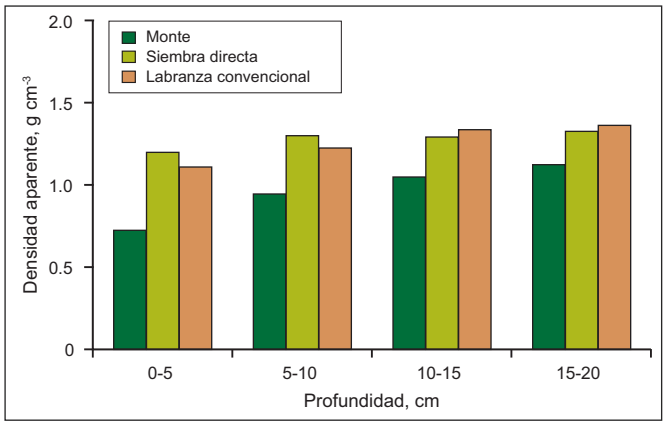


Figura 8. Densidad aparente bajo SD, LC y situación prístina (Monte) en el ensayo del CEA-2 de ANAPO en la zona Este de Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. Fuente: Presentación del Ing. Agr. Edward Peña en el evento Vidas 2007 de Fundacruz.

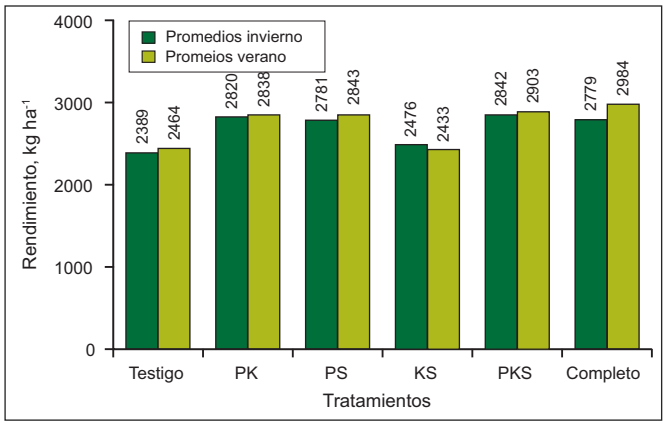


Figura 9. Rendimientos de soya de invierno y de verano, promedios de tres campañas, en los ensayos del Proyecto de Fertilizacion de Suelos y Cultivos de Fundacruz-IPNI. Zona Norte, 8 ensayos en invierno y 11 en verano, 2005/06 a 2007/08.

superior al aporte de nutrientes vía abonos orgánicos y fertilizantes, la MO constituye una fuente importante de los nutrientes necesarios para los cultivos, pero al mismo tiempo este proceso reduce los niveles de MO en el suelo. Esta situación se observa frecuentemente cuando se incorporan áreas nuevas a la agricultura. En estas situaciones se ven disminuciones importantes de MO en los primeros años de cultivo que liberan cantidades importantes de nutrientes.

La aplicación de nutrientes vía fertilizantes minerales y/o abonos orgánicos permite mantener y/o mejorar los niveles de MO en el suelo (**Tabla 3**). La adecuada nutrición de los cultivos permite incrementar los rendimientos y acumular una mayor cantidad de residuos, logrando un mayor aporte de C para el suelo (Ciampitti et al., 2010) (**Figura 6**). Los efectos de la fertilización nitrogenada en la acumulación de MO han sido discutidos por varios autores. Se han observado resultados positivos en algunos sitios, mientras que en otros no se observó efecto, esta variabilidad se atribuye a diferencias en las condiciones climáticas, edáficas y de manejo (cultivos, eficiencia de la fertilización nitrogenada, etc.) (Alvarez, 2005; Andriulo et al., 2008; Galantini et al., 2008; Vieira et al., 2009).

Algunas consideraciones sobre el manejo de suelos y cultivos para una agricultura sustentable en la región de Santa Cruz de la Sierra, Bolivia

La producción de granos en la región de Santa Cruz de la Sierra se ubica en dos áreas contrastantes que son la zona Norte o Integrada y la zona Este o de Expansión. Estas dos zonas tienen características edáficas y climáticas diferentes que han sido evaluadas detalladamente en relevamientos recientes en el marco del Proyecto de Agricultura Sustentable (PAS) liderado por ANAPO y CIAT a través de estudios de caso. Algunas de las características relevantes se discuten a continuación (**Tabla 4**):

- La elevada proporción de limo en ambas zonas impone una limitación física característica de los suelos de la región. El 54 y 77 % de los suelos en la zona Norte y la zona Este, respectivamente, presentan contenidos de limo superiores al 60 %.
- Los niveles de pH se ubican en general en rangos de levemente ácidos a levemente alcalinos (6.0-7.5), aunque en la zona Norte se presentan suelos con niveles de pH medianamente ácido (pH 5.3-5.9) y medianamente alcalino (7.6-8.0).
- La conductividad eléctrica superior a 4 mmhos cm^{-1} indica la presencia de suelos salinos, los cuales son más frecuentes en la zona Norte.
- Los niveles de MO son en general bajos en el Norte (< 2 %) y medios en el Este (< 4 %), aunque tienden a disminuir a medida que se intensifica el manejo, en tiempo y espacio en las situaciones donde se siembran dos cultivos de soya por año.
- Los niveles de P Olsen (indicador de disponibilidad de P) son bajos en el Norte (34 % de los suelos

tienen contenidos menores de 6 ppm) y altos en el Este.

- Los niveles de K intercambiable (indicador de disponibilidad de K) son medios a bajos en el Norte y altos en el Este.
- Los niveles de Ca y Mg intercambiable son adecuados en ambas zonas, pero las relaciones entre ambos cationes, y de éstos con el K, indican que podrían presentarse problemas de equilibrio entre bases en ambas zonas.
- Los niveles de Na intercambiable indicaran que también se podrían presentar problemas de sodicidad en un 19-20 % de los suelos de ambas zonas.

A partir de esta información y la relevada en numerosos ensayos, experimentos y evaluaciones conducidas por distintos institutos de investigación y organizaciones científicas y de productores, la implementación de prácticas de manejo como las discutidas en las secciones precedentes, contribuirá a una agricultura sostenible en términos ambientales, sociales y económicos.

Tabla 4. Distribución de frecuencia de algunos parámetros de suelo evaluados en los estudios de caso del relevamiento del PAS (ANAPO-CIAT) para las zonas Norte y Este de Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. Fuente: Presentación de la Ing. Agr. Mary Selva Viera en el evento Vidas 2007 de Fundacruz.

Parámetro	Zona Norte	Zona Este
Textura	43 % Franco-limoso 17 % Franco-arenoso	44 % Franco-limoso 33 % Franco-arcillo-limoso
pH	19 % 7.6-8.0	
	18 % 6.6-7.0	30 % 6.6-7.0
	18 % 6.0-6.5	29 % 7.1-7.5
	14 % 5.3-5.9	24 % 6.0-6.5
	13 % 7.1-7.5	
Conductividad eléctrica (mmho cm^{-1})	20 % > 4	8 % > 4
Materia orgánica (%)	51 % < 2.0	86 % 2.0-4.0
	46 % 2.0-4.0	8 % < 2.0
P Olsen (ppm)	40 % 6-15	95 % > 15
	34 % < 6	4 % 6-15
K intercambiable (cmol kg^{-1})	60 % 0.21-0.65	79 % > 0.65
	27 % > 0.65	13 % 0.21-0.65
Ca intercambiable (cmol kg^{-1})	83 % > 2.5	97 % > 2.5
Mg intercambiable (cmol kg^{-1})	86 % > 1.0	100 % > 1.0
Na intercambiable (cmol kg^{-1})	59 % 0.1-0.7	80 % 0.1-0.7
	19 % > 0.7	20 % > 0.7

Tabla 5. Rendimientos de soya, trigo, girasol, y sorgo bajo LC y SD en distintos sistemas de rotación en el ensayo del CEA-2 de ANAPO en la zona Este de Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. Ensayo iniciado en el verano 2000/01. Fuente: Presentación del Ing. Agr. Edward Peña en el evento Vidas 2007 de Fundacruz.

Cultivo	Sistema de rotación*	LC	SD
		---------- t ha^{-1}	----------
Soya (Verano 2006/07)	S/G	3.2	3.8
	S/T	3.4	3.7
	Rotación	2.9	3.8
Trigo (Invierno 2006)	S/T	1.02	1.62
	Rotación	1.09	1.85
Girasol (Invierno 2006)	S/T	1.05	1.21
	Rotación	1.19	1.51
Sorgo (Invierno 2006)	Rotación	5.2	6.5

* **S/G = sucesión Soya (Verano)/Girasol (Invierno); S/T = Soya (Verano)/Trigo (Invierno); Rotación = Soya (V)/Sorgo (I)-Soya (V)/Trigo (I)-Maiz (V)/Girasol (I).**

a. Siembra directa y rotaciones

La implementación de rotaciones en sistemas de SD permite mejorar los rendimientos de los cultivos y las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo. La **Tabla 5** muestra los rendimientos de cultivos de soya, trigo, girasol y sorgo, en rotación o sucesión, bajo sistemas de LC y SD en la zona Este de Santa Cruz, Bolivia. La **Figura 7** muestra los efectos de la SD y de las rotaciones sobre el contenido de MO y el P extractable, comparados con la situación prístina (cobertura de Monte) y la **Figura 8** presenta la densidad aparente bajo los sistemas de LC, SD y la condición prístina.

Estos resultados demuestran claramente las ventajas de manejar rotaciones de cultivos bajo sistemas de SD. La inclusión de leguminosas y gramíneas de cobertura como crotolaria, lablab, brachiaria, mileto u otros, sin duda es una opción prometedora que debe seguirse evaluando. Este sería un aporte significativo a la sostenibilidad del sistema como se ha demostrado en otros países y se ha observado en evaluaciones preliminares en Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.

b. Fertilidad

El mantenimiento y/o la generación de adecuados niveles de fertilidad del suelo a través de la rotación de cultivos, la inclusión de leguminosas que aportan N vía fijación simbiótica y la fertilización, contribuyen a la sostenibilidad de los sistemas de cultivo de Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.

En el Proyecto de Fertilización de Suelos y Cultivos llevado a cabo por Fundacruz, en colaboración con IPNI entre los periodos del 2005/06 y 2007/08, se evaluaron tratamientos de fertilización incluyendo N, P, potasio (K), azufre (S) y micronutrientes en cuatro sitios de la zona Norte y uno en Paraíso, CAICO y en la zona Este. En un total de 19 ensayos/año en soya en zona Norte (8 en invierno y 11 en verano), se observó respuesta significativa a P en 17 sitios, a la interacción PxS en 2 sitios y a micronutrientes en 1 sitio (**Figura 9**). Asimismo, se observaron tendencias de respuesta, no significativas, a S y K en dos sitios. Las respuestas promedio a P fueron de 418 kg ha^{-1} con dosis de P de 20 kg ha^{-1}, resultando en una eficiencia de 21 kg de soya por kg de P. La respuesta a P se asoció con los bajos niveles de P en el suelo. El 80 % de los sitios con menos de 10 ppm de P Olsen presentó respuestas agronómicas y económicas significativas a la fertilización fosfatada.

En los 4 ensayos de maíz del invierno del 2006 en la zona Norte se observó respuesta significativa al N en 3 sitios y al P en los 4 sitios. En el Paraíso y CAICO se observaron respuestas significativas a N, P y S en sorgo y maíz y a P en soya. En el sitio de la zona Este, no se observaron respuestas a la fertilización. Finalmente, ensayos paralelos realizados con soya en el invierno del 2007 en 2 sitios de la zona Norte mostraron respuestas a la aplicación de zinc (Zn).

c. Otros aspectos de manejo de suelos

Dos problemas frecuentes en el manejo de suelos de la región son la presencia de capas compactadas y de manchones de salinidad y/o sodicidad. En ambos casos, el mantener puentes verdes, con la inclusión de cultivos de alta producción de residuos y de cultivos de cobertura siempre será una práctica positiva que disminuye los impactos negativos de ambos problemas.

En los suelos con capas compactadas es recomendable el uso de cultivos descompactadores. Entre los cultivos de cobertura, los más adecuados son aquellos que desarrollen mayor cantidad de raíces.

En suelos salinos y/o sódicos, el análisis de suelos permite identificar el principal problema (**Tabla 6**). Se recomienda drenar para eliminar las sales en los suelos salinos, mientras que en los suelos sódicos se recomienda la aplicación de sulfato de calcio (yeso) para reemplazar el exceso de Na con Ca y luego drenar el suelo para eliminar las sales junto con el Na. En estos casos, los puentes verdes con presencia permanente de cultivos o coberturas permiten mantener bajas las napas evitando el afloramiento de sales y Na.

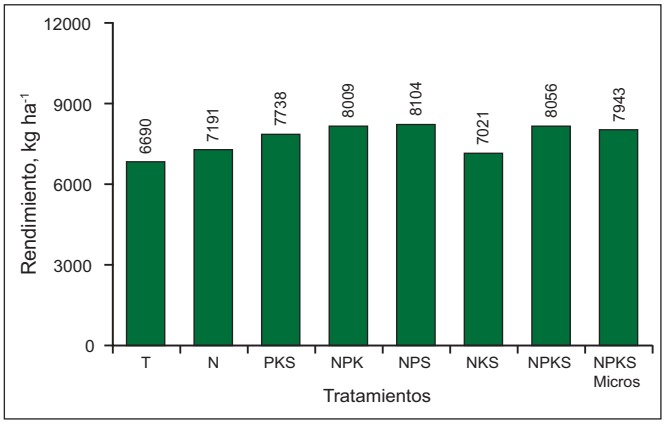


Figura 10. Rendimientos de maiz de invierno 2006, promedios de cuatro sitios, en los ensayos del Proyecto de Fertilización de Suelos y Cultivos de Fundacruz-IPNI, zona Norte.

Consideraciones finales

La producción de alimentos, biocombustibles, forrajes y fibras afecta la sostenibilidad ambiental, social y económica de los ecosistemas. Uno de los principales objetivos del manejo adecuado del suelo es limitar los procesos de degradación y balancearlos con los procesos de producción. La agricultura sostenible preserva la calidad de los recursos naturales como agua, aire, biodiversidad, suelo, etc. La MO es el indicador más importante de la calidad del suelo. El manejo adecuado, específico para cada sitio, de rotaciones, siembra directa y fertilidad, permite alcanzar y/o mantener contenidos adecuados de MO en el suelo.

Bibliografía

Alvarez, R. 2005. A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon storage. Soil Use & Management 21:38-52.

Amado, T.J.C., C. Bayer, P.C. Conceicao, E. Spagnollo, B.C. Campos, and M. Veiga. 2006. Potential of carbon

Tabla 6. Caracterización analítica, condición física y necesidades de enmiendas de suelos salinos, alcalinos, alcalino/salinos y calcáreos.

	---------- Análisis de suelo ----------			Condición física	Necesidad de enmienda
	CE*	PSI, %	pH		
Salino	>4.0	<15	<8.4	Buena	No
Alcalino	<4.0	>15	<8.4	Pobre	Si
Salino/alcalino	>4.0	>15	<8.4	Buena-Pobre	Si
Calcario	<4.0	<15	7.3 - 8.4	Buena	No

*** CE = Conductividad eléctrica (mmho cm^{-1}); PSI = Porcentaje de Na intercambiable**

accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in Southern Brazil. J. Environ. Qual. 35:1599–1607.

Andriulo, A., B. Mary, and J. Guérif. 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. Agronomie 19:365-377.

Andriulo, A., M.C. Sasal, A. Irizar, S. restovich y F. Rimatori. 2008. Efecto de diferentes sistemas de labranza, secuencias de cultivo y de la fertilización nitrogenada sobre los stocks de C y N edáficos. En J. Galantini (ed.). Estudios de las fracciones organicas en suelos de la Argentina. pp. 117-129. EdiUNS. Bahia Blanca, Argentina.

Baker, J.M., T. E. Ochsner, R. T. Venterea, and T. J. Griffis. 2006. Tillage and soil carbon sequestration—What do we really know? Agriculture, Ecosystems and Environment 118:1-5.

Bayer, C., L. Martin-Neto, J. Mielniczuk, C. Pillon, and L. Sangoi. 2001. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. Soil Sci. Soc. Am. J. 65:1473-1478.

Bayer, C., J. Dieckow, e P.C. F. Carvalho. 2010. Uma síntese da pesquisa em sequestro de carbono e mitigação de Gases de efeito estufa em sistemas de produção agropecuária no sul do Brasil. Actas CD Taller SUCS-ISTRO. Colonia (Uruguay). 12-14 de Julio de 2010.

Blanco-Canqui, H., and R. Lal. 2008. No-Tillage and Soil-Profile Carbon Sequestration: An On-Farm Assessment. Soil Sci. Soc. Am. J. 72:693-701.

Ciampitti, I., G. Rubio, L. Picone, and F. García. 2010. Soil carbon and phosphorus pools in field crops rotations in Pampean soils of Argentina. Enviado a SSSAJ.

Díaz Zorita, M., G. Duarte, and J. Grove. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. Soil Till. Res. 65:1-18.

Fabrizzi, K. P., A. Morón, and F. O. García. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. non-degraded mollisols in Argentina. Soil Sci. Soc. Am. J. 67: 1831-1841.

Ferrari, A. E., L. A. Gabbarini, D. L. Reyna, M. González Baro, and L. G. Wall. 2010. Indicadores de calidad de suelos agricolas con distintos manejos. Actas CD Taller SUCS-ISTRO. Colonia (Uruguay).

Fiorin, J.E. 1999. Plantas recuperadoras da fertilidade do solo. En III Curso sobre Aspectos Básicos de Fertilidade e Microbiologia do Solo sob Plantio Direto. Aldeia Norte Editora. Passo Fundo, RS, Brasil.

Galantini, J., J. Iglesias, M.R. Landriscini, L. Suñer, y G. Minoldo. 2008. Calidad y dinamica de las fracciones organicas en sistemas naturales y cultivados. En J. Galantini (ed.). Estudios de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina. pp. 71-95. EdiUNS. Bahia Blanca, Argentina.

García, F.O. 2003. Agricultura Sustentable y Materia Orgánica del Suelo: Siembra Directa, Rotaciones y Fertilidad. III Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Sociedad Boliviana de la Ciencia del Suelo. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.

Gómez, E., L. Ferreras, S. Toresani, A. Ausilio, and V. Bisaro. 2001. Changes in some soil properties in a Vertic Argiudoll under short-term conservation tillage. Soil Till. Res. 61:179-186.

Gregory, E. and C. Drury. 1996. Fertilizer increases corn yield and soil organic matter. Better Crops 80(4): 3-5. Potash and Phosphate Institute. Norcross, Georgia, EE.UU.

Havlin, J.L., D. Kissel, L. Maddux, M. Claassen, y J. Long. 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. Soil Sci. Soc. Am. J., 54:448-452.

Moraes, Sá J. C. 1996. Manejo de nitrogenio na cultura do milho no sistema plantio direto. Aldeia Norte Editora. Passo Fundo, RS, Brasil.

Peterson, G., D. Westfall, L. Sherrod, D. Poss, K. Larson, D. Thompson, and L. Ahuja. 1998. Sustainable dryland agroecosystem management. Technical Bulletin 98-1. Colorado Agricultural Experimental Station. Fort Collins, CO, EE.UU.

Prior, S.A., G.B. Runion, H.A. Torbert, and H.H. Rogers. 2010. Effects of atmospheric CO2 and tillage practice on carbon dynamics. Actas CD Taller SUCS-ISTRO. Colonia (Uruguay). 12-14 de Julio de 2010.

Quincke, A., J. Sawchik, and A. Morón. 2010. Siembra directa y rotación con pasturas: Efectos sobre carbono orgánico, nitrógeno total y potencial de mineralización de nitrógeno en un suelo agrícola del sudoeste de Uruguay. Actas CD Taller SUCS-ISTRO. Colonia (Uruguay). 12-14 de Julio de 2010.

Robinson, C., R. Cruse, and R. Kohler. 1994, Soil management pp. 109-134. En J. Hatfield y D. Karlen (ed.). Sustainable agricultura systems. Lewis Pub.. Boca Raton, Florida, EE.UU.

Ruffo, M. 2003. Factibilidad de inclusión de cultivos de cobertura en Argentina. Actas XI Congreso Nacional de AAPRESID. Tomo 1: 171-176. Rosario, Argentina.

Sá, J.C.M., C. Cerri, W. Dick, R. Lal, S. Venske Filho, M. Piccolo y B. Feigl. 2001. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a brazilian oxisol. Soil Sci. Soc. Am. J. 65:1486-1499.

Studdert, G., and H. Echeverría. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. Soil Sci. Soc. Am. J. 64:1496-1503.

Studdert, G. and H. Echeverría. 2002a. Rotaciones mixtas, labranzas y carbono orgánico en la capa arable en el sudeste bonaerense. En Jornada de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilidad 2002". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires. 52 pág.

Studdert, G. and H. Echeverría. 2002b. Agricultura continua, labranzas y carbono orgánico en la capa arable en el sudeste bonaerense. En Jornada de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilidad 2002". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires. 52 pág.

Studdert, G. and H. Echeverría. 2002c. Rotaciones agrícolas y dinámica del carbono orgánico del suelo en Balcarce. En Jornada de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilidad 2002". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires. 52 pág.

Vieira, F. C. B., C. Bayer, J. A. Zanatta, J. Mielniczuk, and J. Six. 2009. Building Up Organic Matter in a Subtropical Paleudult under Legume Cover-Crop-Based Rotations. Soil Sci Soc Am J. 73: 1699-1706.

Walters, D.T., S. Verma, A. Dobermann, K. G. Cassman, D. Ginting, A.E. Suyker, H. Yang, and M.A.A. Adviento-Borbe. 2007. Carbon Sequestration and Global Warming Potential of Continuous Corn and Corn/soybean Rotations Reconsidered. 2007 ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings. Madison, Wisconsin, EE.UU.❖

REDUCCIÓN DE LA EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR MEDIO DE LA INTENSIFICACIÓN AGRÍCOLA

Cliff Snyder[1], Tom Bruulsema, Valter Casarin, Fang Chen, Raúl Jaramillo, Tom Jensen, Robert Mikkelsen, Rob Norton, T. Satyanarayana y Shihua Tu

Introducción

La población mundial pasó de 3 080 millones en 1961 a más de 6 510 millones en el 2005 (111 % de incremento) y se espera que llegue a más de 9 000 millones en el 2050. Este crecimiento poblacional incrementará la demanda de alimentos en un 70 %. ¿Se podrá lograr este incremento en producción? y, si es así, ¿cuál sería el impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y en el cambio climático? Un artículo escrito por Burney et al. (2010) recientemente publicado en la literatura científica, entrega algunas respuestas a estas inquietudes. El presente artículo discute brevemente estas respuestas y sus implicaciones en un contexto práctico.

Escenario agrícola mundial

Desde 1961 hasta el 2005, la producción global de alimentos se aumentó a través del incremento en el área sembrada (extensificación) y mediante el incremento del rendimiento en areas que ya se encontraba cultivada (intensificación). El área de tierra en producción agrícola creció de 960 a 1 208 millones de hectáreas (Mha), un incremento del 27 %. Mientras tanto, los rendimientos de los cultivos, promediados a través de los diferentes grupos de cultivos, se incrementaron de 1.8 a 3.96 t ha^{-1} (135 % de incremento). Estas mejoras en rendimiento fueron posibles gracias a la adopción de variedades mejoradas e híbridos, al incremento en el uso de fertilizantes, al mejor manejo de plagas, al mayor acceso a la irrigación, al incremento del uso de prácticas de conservación de suelo y a la mayor mecanización agrícola.

Gases de efecto invernadero

Se estima que la producción agrícola fue responsable del 10 al 12 % de las emisiones globales totales de GEI en el 2005. Esas emisiones comprenden fundamentalmente el óxido nitroso (N_2O) y el metano (CH_4), cuya suma representa de 5 a 6 giga-toneladas (Gt) de dióxido de carbono equivalente (CO_2e).

Aproximadamente 60 % del total global de emisiones de N_2O y el 50 % de emisiones globales de CH_4 se atribuyen a la agricultura (Flynn y Smith, 2010). El cambio en el uso de la tierra, resultante de la eliminación de los bosques y de la conversión de tierras nativas a producción agrícola, es responsable del 6 al 17 % de las emisiones totales de GEI.

La atmósfera ha experimentado incrementos en la concentración de N_2O que han pasado de 270 partes por billón (ppb) en la era pre-industrial a 319 ppb en el 2005, (ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends), aproximadamente un incremento anual del 0.26 % (Davidson, 2009). Los incrementos en la concentración de dioxido de carbónico (CO_2) han pasado de 318 partes por millón (ppm) en 1961 a 380 ppm en el 2005 o aproximadamente 0.44 % de incremento anual. Se considera cada vez más que este incremento en la concentración de GEI agrava el proceso de calentamiento global lo que resulta en cambios climáticos substanciales.

El uso global de fertilizantes nitrogenados fue de aproximadamente 93 millones de toneladas métricas (Mt) en el 2005. Utilizando el factor "Tier 1" del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, 2006) para emisiones de N_2O de 1 % (1 kg de N_2O-N emitido por 100 kg de N aplicado), se estima que el uso de

Foto1. La inversión en investigación agronómica evita las emisiones de GEI.

Foto 2. El incremento en la eficiencia de uso de los insumos es una estrategia viable para disminuir las emisiones de GEI.

[1] **El Dr. Snyder es el Director del grupo de trabajo. Correo electrónico: csnyder@ipni.net. Los autores son científicos del International Plant Nutrition Institute (IPNI) que forman parte del grupo de trabajo de Nutrientes y el Ambiente (WG02).**

Tabla 1. Comparación del mundo real con escenarios alternativos en la producción mundial de alimentos para satisfacer la demanda desde 1961 hasta el 2005 y las emisiones de GEI correspondientes (preparada utilizando los datos de Burney et al., 2010).

	Mundo real (MR)		Mundo alternativo (MA1)	Mundo alternativo (MA2)
	Intensificación de la producción agrícola		Extensificación de la producción agrícola	
	1961	2005		
Nivel de vida		Mejorado	Igual que MR	Igual que en 1961
Rendimiento, t ha^{-1}	1.84	3.96	1.84	1.84
Producción, Mt	1 776	4 784	4 784	3 811
Tractores agrícolas, Millones	11.3	28.5	28.5[1]	23.7
Superficie bajo riego, Mha	139	284	284[1]	298
Dosis de fertilizantes (N-P_2O_5-K_2O), kg ha^{-1}	32	136	32	32
Consumo mundial de fertilizante, Mt	31	165	88	67
Expansión global de la superficie de cultivo desde 1961, Mha	-	248	1 761	1 111
Aumento neto en las emisiones de GEI en comparación con MR, Gt CO_2e	-	-	590	317

[1] **El MA1 asume de manera conservadora que el uso de maquinaria y el área bajo riego son los mismos que en el MR.**

fertilizantes nitrogenados es responsable de la emisión de 1.46 Mt de N_2O o aproximadamente de 433 Mt de CO_2e. En perspectiva, el uso global de fertilizantes nitrogenados podría haber sido responsable de entre el 7 al 8.6 % de la emisión global de GEI (Flynn y Smith, 2010).

La producción agrícola moderna depende mucho del uso de fertilizantes. Para contestar la pregunta sobre cuál sería el impacto neto en los GEI, científicos de la Universidad de Stanford en los Estados Unidos (Burney et al., 2010) compararon dos escenarios mundiales alternativos (MA1 y MA2) contra el mundo real (situación actual; MR) en la emisión global de GEI desde 1965 hasta el 2005. En el escenario MA1, la superficie agrícola se expande, los rendimientos se mantienen constantes de acuerdo a los niveles de 1961, pero el estándar de vida mejora hasta llegar a las condiciones del MR. En el escenario MA2 también se tiene expansión en el área agrícola, pero el estándar de vida se mantiene en los niveles de 1961. Algunos de los supuestos utilizados y los resultados en términos de emisiones globales de GEI se muestran en la **Tabla 1**.

En el escenario MA1, en el que se asume que las dosis de fertilizantes y los rendimientos permanecen constantes en los niveles de 1961, se requiere expandir mucho más el área agrícola (> 7 veces) y además invadir áreas naturales para alcanzar las metas en la producción global de alimentos alcanzada en el MR. El escenario MA2 asume condiciones similares, pero además mantiene constante la producción per cápita de granos (estándar de vida). Aun así, el escenario MA2 todavía requiere de una gran expansión del área agrícola (4.5 veces más) para satisfacer las demandas globales de alimentos. En ambos escenarios, el MA1 y MA2, las emisiones globales del CO_2e se incrementan marcadamente en comparación con las emisiones en el MR.

A pesar de que la producción agrícola ha incrementado las emisiones de GEI por hectárea, el efecto neto de la intensificación ha sido evitar una gran cantidad de emisiones (**Tabla 1**). Al mismo tiempo, el incremento en la producción y consumo de fertilizantes es responsable de entre el 40 y 60 % de la producción global actual de cultivos y alimentos (Stewart et al., 2005; Erisman et al, 2008). Expresado de otra manera, podemos decir que gracias a la producción intensiva de cultivos se han evitado 13.1 Gt de emisiones de CO_2e por año y que cada dólar invertido en la producción agrícola ha resultado en la reducción de 249 kg de emisiones de CO_2e, en relación a las tecnologías empleadas en 1961.

Implicaciones importantes

Dos importantes conclusiones se pueden obtener de este estudio. Primero, la inversión en el mejoramiento de la producción agrícola es una manera efectiva de prevenir el incremento en las emisiones de GEI (**Foto 1**). Segundo, debe asegurarse que los esfuerzos de mitigación tomen en cuenta todos los impactos del sistema completo de estrategias utilizadas para reducir las emisiones de GEI. El aumentar la eficiencia de los insumos en la producción agrícola es una estrategia válida para disminuir las emisiones de GEI (**Foto 2**), pero reducir la utilización de insumos y finalmente limitar los rendimientos no lo es.

El satisfacer las necesidades de 9 000 millones de personas y al mismo tiempo proteger el planeta y mantener la capacidad de recuperación de la naturaleza puede ser el mayor reto que jamás ha enfrentado la humanidad (Foley et al., 2005).

Los principios promovidos por la industria de fertilizantes y por la comunidad agrícola para satisfacer la demanda de alimentos, mantener el planeta y preservar partes significativas de los ecosistemas naturales, incluyen la

intensificación ecológica de los sistemas de producción (Cassman, 1999), el uso eficiente de nutrientes (Dobermann, 2007) a través de mejores prácticas de manejo (MPM) y la mejor administración del manejo de nutrientes para lograr las metas económicas, ambientales y sociales propuestas (Bruulsema et al., 2008; IFA, 2009; Snyder et al., 2009).

La pregunta al momento sería entonces: ¿Estamos listos como sociedad global para enfrentar este desafío?

Bibliografía

Bruulsema, T.W., C. Witt, F. García, S. Li, T.N. Rao, F. Chen, and S. Ivanova. 2008. Better Crops 92(2):13-15.

Burney, J.A., S.J. Davis, and D.B. Lobell. 2010. Proc. Natl. Acad. Sci. 107(26):12052-12057.

Cassman, K.G. 1999. Proc. Natl. Acad. Sci. 96:5952-5959.

Davidson, E.A. 2009. Nature Geoscience 2:659-662.

Dobermann, A. 2007. Nutrient use efficiency - measurement and management. pp. 1-28. *In* Fertilizer Best Management Practices: General Principles, Strategy for their Adoption and Voluntary Initiatives vs Regulations. 259 pp. Proc. IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices. 7-9 March 2007, Brussels, Belgium. International Fertilizer Industry Association, Paris, France.

Erisman, J.W., M.A. Sutton, J. Galloway, Z. Klimont, and W. Winiwarter. 2008. Nature Geoscience 1:636-639.

Flynn, H.C. and P. Smith. 2010. Greenhouse gas budgets of crop production - current and likely future trends. 67 pp. International Fertilizer Industry Association. Paris, France.

Foley, J.A., R. DeFries, G.P. Asner, C. Barford, G. Bonan, S.R. Carpenter, F. S. Chapin, M.T. Coe, G.C. Daily, H.K. Gibbs, J.H. Helkowski, T. Holloway, E.A. Howard, C.J. Kucharik, C. Monfreda, J.A. Patz, I. C. Prentice, N. Ramankutty, and P.K. Snyder. 2005. Science 309: 570-574.

IFA. 2009. The Global "4R" Nutrient Stewardship Framework. Developing Fertilizer Best Management Practices for Delivering Economic, Social and Environmental Benefits. 10 pp. International Fertilizer Industry Association. Paris, France.

IPCC. 2006. Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 11: N_2O Emissions from Managed Soils, and CO_2 Emissions from Lime and Urea Application. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl (verified 30 July 2010).

Snyder, C.S., T.W. Bruulsema, T.L. Jensen, and P.E. Fixen. 2009. Agric. Ecosyst. Environ. 133:247-266.

Stewart, W.M., D.W. Dibb, A.E. Johnston, and T.J. Smyth. 2005. Agron. J. 97:1-6.❖

REPORTE DE INVESTIGACION RECIENTE

EVALUACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA APLICACIÓN DE DOSIS VARIABLES DE FERTILIZANTE EN CAFÉ

Molin, J.P., A. Viegas, F.R. Frasson, G. Di Chiacchio, y W. Tosta. 2010. Test procedure for variable rate fertilizer on coffee. Acta Scientiarum. Agronomy Maringá, 32(4):569-575.

Se tuvo como objetivo desarrollar un procedimiento para la aplicación variable de dosis de fertilizante y evaluar las respuestas del rendimiento de café (*Coffea arabica* L.), en cuanto a la aplicación de fósforo y potasio. El trabajo se condujo durante la temporada del 2004 en un campo de 6.4 ha ubicado en la parte central del estado de São Paulo. Se aplicaron dos tratamientos con dosis fijas o variables en líneas alternas durante toda la temporada: un tratamiento con la fertilización recomendada localmente y el otro basado en un muestreo del suelo en cuadrícula. Se utilizó un aplicador de fertilizante neumático prototipo con dos cintas de distribución, una para cada línea. La cosecha se realizó con una cosechadora comercial equipada con un sensor volumétrico de rendimiento adaptado. Los datos fueron analizados en base a geoestadística, correlaciones y regresiones. El procedimiento mostró ser factible y efectivo. El área que recibió fertilización en una dosis variable mostró un 34 % de incremento del rendimiento en comparación con el área que recibió una dosis fija. La dosis variable de fertilizante resultó en ahorros de 23 % en la cantidad de fertilizante fosfatado y en un incremento de 13 % en el fertilizante potásico, en comparación con el fertilizante en tasa fija. El rendimiento en el 2005, un año después de la aplicación de los tratamientos, todavía presentaba efectos residuales de los tratamientos conducidos durante el ciclo anterior. ❖

COLONIZACIÓN MICORRITICA Y FERTILIDAD DEL SUELO CON DIFERENTES FUENTES Y NIVELES DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN BRACHIARIA BRIZANTHA

Delbem, F.C., M.H. Scabora, C.V. Soares, R. Heinrichs, T.A. Ferrari, y A.M. Rodrigues. 2010. Mycorrhizal colonization and soil fertility under different sources and levels of nitrogen fertilization on Brachiaria brizantha. Acta Scientiarum. Agronomy Maringá, 32(3):455-461.

Es factible conseguir incremento en la producción de nuevos cultivares con la fertilización nitrogenada. El objetivo de este estudio fue verificar el efecto de fuentes y niveles de fertilización nitrogenada, a distintas profundidades, en la colonización micorritica y la fertilidad del suelo cubierto con *Brachiaria brizantha* cv. Xaraés. El diseño experimental fue en bloques completamente al azar y los tratamientos se arreglaron en un factorial 3 × 4, utilizando tres fuentes de nitrógeno (urea, sulfato de amonio y ajifer-L40) en cuatro dosis de N (0, 100, 200, y 400 kg ha^{-1}), evaluadas a dos profundidades (0-10 y 10-20 cm) en tres repeticiones. Se tomaron muestras de suelo compuestas de cinco submuestras por parcela, que se mezclaron y homogenizaron antes del análisis. El uso de ajifer y de urea proporcionaron una mayor productividad de biomasa aérea de *Brachiaria brizantha* cv. Xaraés, pero esta tendió a reducir al aumentar la cantidad de nitrógeno. La mejor dosis fue la aplicación de 100 kg ha^{-1} de N. En dosis más elevadas, el horizonte de 0-10 cm de profundidad se tornó ácido y se redujo la cantidad de materia orgánica, K, Ca, Mg, SB y V %. La esporulación, más no la colonización micorritica, es notablemente estimulada en dosis elevadas. ❖

UNA DESPEDIDA PARA UN GRAN AMIGO DE LA AGRICULTURA EN LATINOAMÉRICA: EL DR. JOSÉ ESPINOSA SE RETIRA LUEGO DE MÁS DE 21 AÑOS DE FECUNDA LABOR EN EL IPNI

El Dr. José Espinosa, nuestro amigo, Director y guía por los últimos 21 años se retira del IPNI para dedicar su talento y experiencia en nuevos proyectos. José o Pepe, como lo conocemos más cercanamente, supo construir la oficina del IPNI para el Norte de Latinoamérica desde cero y más allá de la valiosa enseñanza que ha dejado en todos los países en donde ha trabajado, se le reconoce la calidad humana y su capacidad para ir generando actividades y redes de colaboradores y amigos. Además del IPNI, su esfuerzo ha sido especialmente visible en la Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo, en la que contribuye activamente por más de 15 años y en las Sociedades de Ciencia del Suelo del resto de la región. Sus nuevos retos lo llevan más cerca del aula, apoyando a las nuevas generaciones que se beneficiarán inmensamente de su talento y experiencia.

Nuestra eterna gratitud, admiración y más sincero apoyo para Ud. José. !!

Estimados amigos en América Latina, después de 21 años de labores ha llegado la hora de jubilarme y terminar mi vinculación con el IPNI. Durante este tiempo he ejercido las funciones de Director de la oficina para el Norte de Latinoamérica del Instituto Internacional de Nutrición de Plantas (IPNI, por sus siglas en inglés) y de editor de la revista Informaciones Agronómicas para el Norte de Latinoamérica. El tiempo ha pasado rápidamente, pero esta experiencia ha sido extraordinaria. El año 1989 empecé mis labores en la nueva oficina para el Norte de Latinoamérica que el entonces Instituto de la Potasa y el Fósforo (PPI, por sus siglas en inglés) decidió abrir en su proyecto de expansión. El área abarcaba la región comprendida entre Perú y Costa Rica incluyendo Cuba, República Dominicana, Puerto Rico y Jamaica en el Caribe. Al mismo tiempo se abrieron las oficinas de India y del Sureste Asiático. En 1997, por razones institucionales, se incluyó México y América Central en el territorio bajo mi responsabilidad. El Instituto siguió ampliando su área de acción y en el año 2007 cambió su nombre de PPI a IPNI. Todos estos cambios fueron importantes en la vida del Instituto y marcaron mi actividad profesional de manera definitiva. En 1989, el Dr. David Dibb, en ese tiempo Presidente del PPI, me explicó la naturaleza del trabajo y me indicó que la misión del Instituto era la de desarrollar información científica acerca del uso adecuado de nutrientes en agricultura. Esto se lograría a través de investigación y educación. Acepté el reto y este ha sido mi trabajo a través de todo ese tiempo. Esto me ha dado la incomparable y fascinante oportunidad de conocer casi todos los sistemas agrícolas de la región y de otras regiones en el mundo. Pero más importante aún, me ha dado la oportunidad de conocer una enorme cantidad de personas con quienes he interactuado en investigación y educación a través de los años. Por supuesto, esto también me ha dado la inmensa satisfacción de tener amigos en muchos países, la oportunidad de conocer pensamientos diversos y finalmente, la humildad de reconocer lo poco que conozco y cuanto puedo aprender de agricultores, colegas profesionales, estudiantes y amigos. Una de las actividades que más he disfrutado a través de los años ha sido la edición de la revista Informaciones Agronómicas. Iniciamos con un modesto primer número en marzo de 1990 y terminamos editando el número 79 en diciembre del 2010. Tengo el honor de ser también uno de los editores del primer número de la revista Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica, con el cual me despido de todos los lectores de nuestra revista. Finalmente quiero reconocer y agradecer el trabajo de los profesionales que colaboraron conmigo en la oficina de IPNI en Quito durante muchos años, en particular a la Licenciada Amparo Ormaza, al Ing. Mario Ramos y al Licenciado Paúl Gualoto. Su eficiente apoyo fue fundamental para lograr los objetivos propuestos en nuestra oficina. Al llegar a este punto crucial en mi vida me he dado cuenta que todavía tengo suficiente fuerza y entusiasmo para dedicarle a la ciencia. Por esa razón, he decidido aceptar la propuesta de una pequeña universidad en Ecuador para trabajar como Director de Investigación y Transferencia de Tecnología. Allí tienen un amigo dispuesto a ayudar en lo que esté a su alcance. Mi nueva dirección de correo electrónico es jespinosa@ute.edu.ec. Nuevamente, gracias a todos mis amigos por el privilegio de su amistad, los llevo en mi corazón.

José Antonio Espinosa Marroquín

CURSOS Y SIMPOSIOS

1. IX Congreso Internacional de Pastizales - IRC-2011

Organiza : IRC-2011
Lugar : Rosario, Argentina
Fecha : Abril 2-8, 2011
Información : IRC-2011
irc2011@yahoo.com
www.irc2011.com.ar

2. I Simposio Regional IPNI-Brasil Sobre Buenas Prácticas para Uso Eficiente de Fertilizantes

Organiza : IPNI-BRASIL
Lugar : Sorriso, Mt, Brasil
Fecha : Abril 19-20, 2011
Información : IPNI-BRASIL
Tel.: 19 3433-3254/3422-9812
elavorenti@ipni.net
www.19wcss.org.au
www.ipni.net/brazil

3. Simposio "Fertilidad 2011". La Nutrición de Cultivos Integrada al Sistema de Producción

Organiza : IPNI Cono Sur - FERTILIZAR
Lugar : Centro de Convenciones Metropolitano-Rosario, Argentina
Fecha : Mayo 18-19, 2011
Información : IPNI - FERTILIZAR
Tel.: (54) 011 4798-9939/9988
fgarcia@ipni.net
www.ipni.net/lasc
www.fertilizar.org.ar/simposio

4. Mundo Soja Maíz 2011

Organiza : Mundo Soja Maíz 2011
Lugar : Buenos Aires, Argentina
Fecha : Junio 7-8, 2011
Información : Mundo Soja Maíz 2011
www.mundosojamaiz.com.ar

5. Conferencia InfoAg 2011

Organiza : CropLife, IPNI, PAQ
Lugar : Springfield, Illinois
Fecha : Julio 12-14, 2011
Información : CropLife, IPNI, PAQ
Tel.: 217 762-7955
440 602-9178
registration@infoag.org
exhibits@infoag.org
www.infoag.org

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

Organiza : Mercosoja 2011
Lugar : Rosario, Argentina
Fecha : Septiembre 14-16, 2011
Información : Mercosoja 2011
mercosoja2011@acsoja.org.ar
www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf

7. 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

8. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo

Organiza : AACS
Lugar : Mar del Plata, Argentina
Fecha : Abril 16-20, 2012
Información : AACS-SLCS
www.suelos.org.ar
www.slcs.org.mx

PUBLICACIONES DISPONIBLES

Las siguientes publicaciones se encuentran disponibles con un costo nominal	
Titulo de la Publicación	**Costo (U$S)**
Uso Eficiente de Nutrientes. Esta publicación resume el estado del conocimiento con respecto a la eficiencia de uso de nutrientes en las Américas y discute el contexto contemporáneo dentro del cual se deben manejar los nutrientes.	15.00
Nutrición y Fertilización del Mango. Esta publicación ofrece información básica para el manejo de la nutrición y fertilización del mango tomando en cuenta las particulares características de desarrollo de este cultivo en el trópico.	15.00
Manual Internacional de Fertilidad de Suelos. Publicación didáctica sobre uso y manejo de suelos y fertilizantes con datos y ejemplos de diferentes partes del mundo	15.00
Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 1: Vivero. Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 1 cubre el manejo del vivero para producir plántas de calidad que deben estar disponibles para la siembra en el campo en el momento requerido.	15.00
Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 2: Fase Inmadura. Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 2 cubre el manejo de la fase inmadura de la plantación para lograr una población uniforme de palmas productivas en cada bloque del campo.	15.00
Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 3: Fase Madura. Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 3 cubre el manejo de la fase madura de la plantación para lograr rendimientos sostenidos de racimos de fruta fresca a través de toda la etapa productiva del cultivo.	15.00
Manual de Nutrición y Fertilización del Café. Este manual presenta conceptos modernos del manejo de la nutrición y fertilización del cafeto como herramienta para lograr rendimientos altos sostenidos.	10.00
Manual de Nutrición y Fertilización de Pastos. Esta publicación ofrece a las personas envueltas en la producción ganadera una visión amplia del potencial productivo, de los requerimientos nutricionales y de los factores limitantes impuestos por el ambiente tropical a la producción de forrajes.	10.00
Nutrición de la Caña de Azúcar. Este manual de campo es una guía completa para la identificación y corrección de los desórdenes y desbalances nutricionales de la caña de azúcar. El tratamiento completo de la materia y las excelentes ilustraciones hacen de este manual una importante herramienta de trabajo en la producción de caña.	8.00
Estadística en la Investigación del Uso de Fertilizantes. Publicación que presenta conceptos actuales de diseño experimental e interpretación estadística de los datos de investigación de campo en el uso de fertilizantes.	6.00
Fertilización del Algodón para Rendimientos Altos. En esta publicación se discuten una serie de aspectos para ayudar al investigador a tomar la decisión más adecuada en cuanto a fertilización, teniendo en cuenta todos los factores que pueden afectar el cultivo en condiciones locales.	5.00
Vea el catalogo completo de publicaciones de IPNI en http://nla.ipni.net	