Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica

En este número

- Propiedades químicas de suelos agrícolas en diferentes zonas de Chile
- ¿Fertilización fosfatada por suficiencia o restitución?
- Efecto del manejo de la fertilización sobre la productividad de los suelos
- Fertilización con P, S y Zn en el cultivo de soja
- Dinámica del K foliar en olivo
- Productividad y consumo de agua de maíz

IAH 16 - Diciembre 2014

Estudio prospectivo de las principales propiedades químicas de suelos agrícolas cultivados con trigo candeal y maíz en diferentes zonas de Chile 2

¿Fertilización fosfatada por suficiencia o restitución en secuencias agrícolas de la pampa arenosa? 8

Efecto del manejo de la fertilización sobre la productividad de los suelos en una rotación en la Región CREA Santa Fe Centro 13

Efecto de la fertilización con fósforo, azufre y zinc en el cultivo de soja en la región pampeana norte de Argentina 17

Dinámica del potasio foliar en un ensayo de fertilización potásica en olivo 21

Productividad y consumo de agua de maíz tardío en el centro de San Luis (Argentina): Cambios provocados por la fertilización nitrogenada 24

Cursos y Simposios 27

Publicaciones Disponibles 28

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

International Plant Nutrition Institute (IPNI)

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.

http://www.ipni.net

Oficina para el Cono Sur de Latinoamérica • Av. Santa Fe 910 (B1641ABO) Acassuso • Buenos Aires - Argentina
Telf/Fax.: 54 11 4798 9939 • Correo electrónico: Lpisauri@ipni.net • http://Lacs.ipni.net

Oficina para el Norte de Latinoamérica • Casilla Postal 17 17 980 • Quito - Ecuador
Telf.: 593 2 2463 175 • Fax: 593 2 2464 104 • Correo electrónico: aormaza@ipni.net • http://nla.ipni.net

Oficina para México y Centroamérica • 3500 Parkway Lane, Suite 550 • Norcross, GA 30092 - EE.UU
Telf.: 1 770 825 8079 • Fax: 1 770 448 0439 • Correo electrónico: atasistro@ipni.net • http://mca.ipni.net

Estudio prospectivo de las principales propiedades químicas de suelos agrícolas cultivados con trigo candeal y maíz en diferentes zonas de Chile

J. Hirzel[1,*], I. Walter[2] e I. Matus[1]

Introducción

Los estudios de las propiedades químicas de suelos agrícolas que representen zonas de gran amplitud se pueden realizar con diferentes fines, como por ejemplo: determinar zonas contaminadas con metales pesados (Buccolieri et al., 2010; Sierra et al., 2007; Qiao et al., 2011); estudios de niveles críticos de nutrientes esenciales para cultivos y praderas (Chen et al., 2003); caracterización de suelos agrícolas o con potencial de uso agrícola (Bourennane et al., 2004; Young et al., 2010); análisis de factores limitantes a la productividad o causantes de problemas en las plantas (Fidanza, 2007); y caracterización química de suelos usados en sistemas pastoriles frente a diferentes tipos de uso de la tierra (Parvage et al., 2013).

Al respecto, para los suelos chilenos no existen estudios agronómicos de amplitud geográfica que caractericen la variabilidad de propiedades químicas asociadas al cultivo de alguna especie en particular, o a la amplitud de posibilidades de cultivos agrícolas, sino más bien estudios de caracterización general de pedones realizados en diferentes áreas del país (CIREN 1996, 1997 y 1999; Luzio, 2010) independientes de las especies agrícolas cultivadas. Por otra parte, estos estudios agronómicos permiten caracterizar condiciones productivas en función de las propiedades químicas del suelo, y asociar dichas propiedades con la respuesta productiva de una especie a la aplicación de nutrientes. Como ejemplo se puede señalar el estudio realizado por Bourennane et al. (2004), en el cual se determinó la relación existente entre el rendimiento del cultivo de trigo y algunas propiedades químicas de diferentes áreas productivas de Francia durante dos temporadas.

Para el caso de Chile se han propuesto algunos sistemas de fertilización que vinculan las propiedades químicas del suelo a la necesidad de fertilización de diferentes cultivos en función de su capacidad productiva, utilizando un modelo de respuesta lineal (Rodríguez, 1993). Sin embargo, algunos estudios han demostrado que si bien las propiedades químicas son importantes para la capacidad productiva (Fernández, 1995; Fernández, 1996), una parte importante de la respuesta o variabilidad del rendimiento está condicionada a las propiedades físicas del suelo (Hirzel y Matus, 2013) y a la variabilidad climática (Cherkasov et al., 2010).

Por su parte, el desarrollo de los cultivos de trigo candeal (*Triticum durum* L.) y maíz en Chile, de alta importancia en la dieta humana y animal de este país, ocupa una extensa área de cultivo que en conjunto comprende un orden de 1400 km de longitud entre los paralelos 28°5' y 41°2' latitud sur. Esta extensa área geográfica presenta mucha variabilidad de tipos de suelo y propiedades químicas (CIREN 1996, 1997 y 1999; Luzio, 2010), dentro de las cuales se pueden destacar algunas que se traducen en factores limitantes para el cultivo, como la salinidad en la zona centro-norte (Khitrov et al., 2009; Havlin et al., 1999), y bajas concentraciones de P y altas concentraciones de aluminio (Al) en la zona centro-sur y sur (Benton, 1998; Havlin et al., 1999; Mellado, 2007). Por consiguiente, para contribuir al conocimiento de la fertilidad del suelo y de su variabilidad a lo largo de la zona productora de trigo candeal y maíz en Chile, el objetivo del presente estudio fue caracterizar las principales propiedades químicas en cuatro grandes áreas geográficas, evaluando su variabilidad entre las diferentes áreas y dentro del perfil arable del suelo.

Materiales y métodos

El estudio contempló un muestreo al azar de suelos cultivados de forma intensiva con trigo candeal y/o maíz, de rotación corta con cereales o monocultivo para el maíz, en un transecto de 1400 km a lo largo del valle central de riego de Chile. La extensión territorial monitoreada se dividió en 4 zonas de acuerdo a su posición geográfica desde norte a sur, separadas en: zona centro-norte, zona central, zona centro-sur y zona sur **(Figura 1)**, utilizando parte de la metodología señalada por Qiao et al. (2011), que permite agrupar las zonas seleccionadas de acuerdo a sus características climáticas y de génesis de suelo. En el periodo libre de cultivo del año 2012 se monitorearon 10 unidades productivas o sitios de cada zona geográfica, colectando muestras compuestas por 30 sub-muestras desde cada sitio, con lo cual se constituyeron 40 muestras compuestas a lo largo del transecto de suelos estudiado. En cada sitio las muestras de suelo se colectaron a 2 profundidades: 0-20 y 20-40 cm usando barreno de 3 cm de diámetro. Las 4 zonas monitoreadas presentaron las siguientes características principales:

i. Zona centro-norte, con régimen arídico y formación sedimentaria con origen aluvial. Los órdenes de suelo correspondieron a Entisol, Inceptisol y Alfisol.
ii. Zona central, con régimen semi-arídico y formación sedimentaria con origen aluvial o lacustre. Los órdenes de suelo correspondieron a Inceptisol, Mollisol, Alfisol y Vertisol.
iii. Zona centro-sur, régimen templado y formación sedimentaria con origen aluvial, volcánico y de transición. Los órdenes de suelo correspondieron a Inceptisol, Alfisol y Andisol.

[1] Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile. Avenida Vicente Méndez 515, Chillán, Chile. [*]Correo electrónico: jhirzel@inia.cl
[2] Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), Apdo. Correos 8111, 28080 Madrid, España.

iv. Zona sur, régimen templado lluvioso y formación sedimentaria con origen volcánico. Los órdenes de suelo correspondieron a Andisol y Ultisol.

Las rotaciones de cultivos en cada localidad muestreada fueron las siguientes: i) Zona centro-norte; trigo candeal-maíz ó monocultivo de maíz, ii) Zona central; trigo candeal-maíz ó monocultivo de maíz, iii) Zona centro-sur; trigo candeal-maíz, trigo candeal-avena (*Avena sativa* L.), monocultivo de maíz, iv) Zona sur; trigo candeal-maíz, trigo candeal-avena, monocultivo de maíz. Antecedentes adicionales de manejo como encalado u otras prácticas de acondicionamiento de suelos no fueron considerados como parámetro de selección de sitios a muestrear. Todos los suelos de las zonas centro sur y sur reciben encalado cada 2 a 4 años para corregir limitaciones de Al. A su vez, en todos los suelos de las zonas estudiadas no se incorporan residuos de cosecha.

Las muestras de suelo fueron secadas al aire, tamizadas por 2 mm y analizadas para pH, materia orgánica (MO), nitrógeno (N) disponible y fósforo (P) extractable, calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na) y aluminio (Al) de intercambio de acuerdo a la metodología señalada por Sadzawka et al. (2006), en el laboratorio de análisis de suelo del Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Chile, ciudad de Chillán. El pH del suelo fue determinado en relación suelo:agua 1:2.5 usando pH-metro. La MO del suelo fue medida usando el método de digestión húmeda de Walkley-Black. El N disponible (NH_4^+ + NO_3^-) fue extraído con KCl 2M y determinado por colorimetría en un auto-analizador Skalar (espectrofotómetro de flujo segmentado). El P extractable (Olsen) fue determinado con $NaHCO_3$ 0.5M y ácido molibdato ascórbico. Los cationes de intercambio fueron determinados con extracción por Acetato de Amonio 1M a través de espectroscopía de llama con absorción atómica para Ca y Mg, y emisión atómica para K y Na. El Al intercambiable fue determinado por extracción con KCl 1M usando espectroscopía de absorción atómica. Los resultados analíticos fueron evaluados estadísticamente a través de un diseño de bloques al azar con arreglo en parcelas divididas, donde la parcela principal correspondió a la zona geográfica y la subparcela a la profundidad de muestreo. Se realizó análisis de varianza y test de medias Tukey (p=0.05) usando el procedimiento estadístico GLM de SAS (SAS, 1989).

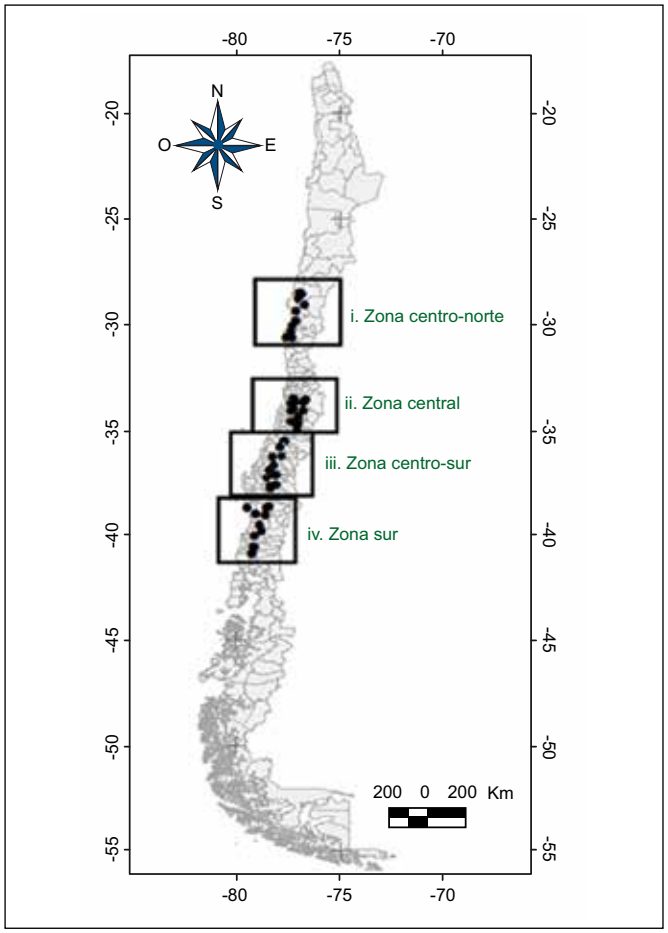

Figura 1. Zonas de muestreo a lo largo del valle central de riego de Chile.

Resultados y discusión

Todos los parámetros evaluados en el suelo fueron significativamente diferentes entre áreas geográficas, en tanto que, independientemente del sitio, la profundidad del suelo tuvo efecto significativo para el contenido de MO, y las concentraciones de N disponible y P extractable, y K intercambiable ($p<0.01$) **(Tabla 1)**. Por su parte, la interacción entre el área geográfica y la profundidad del suelo no presentó efectos significativos en ninguno de los parámetros evaluados ($p>0.05$) **(Tabla 1)**. El análisis de los resultados por profundidad de suelo se presenta a continuación.

Primer estrato del suelo (0-20 cm)

Para la primera profundidad del suelo, el pH presentó una disminución desde norte a sur dentro de la zona de estudio **(Figura 2a)** fluctuando entre 7.9 y 5.7, siendo el mayor valor el de la zona centro-norte y el menor valor el obtenido en la zona sur ($p<0.05$). La zona centro-norte muestra diferencias significativas con el resto de las zonas estudiadas, mientras que las zonas centro-sur y sur no presentaron diferencias significativas entre ellas ($p>0.05$). Estos valores de pH se encuentran dentro del rango levemente ácido a básico, con limitaciones en dos de las zonas geográficas estudiadas según los rangos considerados como adecuados para plantas cultivadas (Etchevers y Padilla, 2007). Una situación similar ha sido indicada por estudios previos de caracterización parcial dentro de estas zonas geográficas (CIREN 1996, 1997 y 1999; Luzio, 2010; Stolpe, 2006), con la diferencia que el pH en la zona sur es menor en estos estudios previos, lo cual se explica porque las siembras de trigo y maíz en la zona sur están acompañadas de la práctica de encalado frecuente para corregir limitaciones de acidez y Al con el objeto de potenciar el rendimiento de los cultivos.

El contenido de MO, presentó un comportamiento opuesto al observado para el pH **(Figura 2b)**, aumentando de valor desde norte a sur, asociado a las diferencias de pluviometría y temperaturas ambientales de cada zona geográfica, dado que la mineralización de la MO es acelerada por el aumento de temperatura del suelo,

Tabla 1. Análisis de significancia de los parámetros químicos evaluados en el suelo.

Fuente de variación	Área geográfica (A)	Profundidad del suelo (P)	Interacción (A*P)
pH	*†	NS	NS
Materia orgánica	**	**	NS
Nitrógeno disponible	*	**	NS
Fósforo extractable	**	**	NS
Calcio intercambiable	**	NS	NS
Magnesio intercambiable	**	NS	NS
Potasio intercambiable	**	**	NS
Sodio intercambiable	**	NS	NS
Aluminio intercambiable	**	NS	NS

*† Donde *, ** y NS indican diferencias significativas a un nivel de probabilidad de 0.05, de 0.01, y no significativo, respectivamente.*

situación que acelera la reducción de MO en las zonas centro-norte y centro, y en condiciones de mayor pluviometría se genera una considerable producción de masa vegetal, que sumada a una menor temperatura de suelo contribuye al aumento de MO en el suelo (Havlin et al., 1999; Jenkinson y Rayner, 1977). El mayor contenido de MO se presentó en la zona sur ($p<0.05$), seguido de la zona centro-sur ($p<0.05$), y luego por las zonas centro y centro-norte, sin diferencia significativas entre éstas dos últimas zonas geográficas ($p>0.05$). Los valores obtenidos son similares a los hallados por CIREN (1996, 1997 y 1999), Luzio (2010) y Stolpe (2006) en estudios parciales realizados previamente. Los contenidos de MO en el presente estudio fluctuaron entre 25.1 y 142.5 g kg^{-1}, mientras que los valores de MO en los suelos volcánicos (zonas centro-sur y sur) oscilaron entre 70.3 y 142.5 g kg^{-1}. Estos valores relativamente altos (Etchevers y Padilla, 2007) son considerados valores normales para suelos de origen volcánico (Neall, 2006).

El contenido de N disponible sólo presentó diferencias significativas entre la zona centro sur y centro ($p<0.05$). El mayor valor se obtuvo en la zona centro-sur **(Figura 2c)**, asociado al mayor contenido de MO y a su mineralización (Havlin et al., 1999). La concentración de N disponible fluctuó entre 25 y 45 mg kg^{-1} dentro de las cuatro zonas geográficas evaluadas, cuyos valores en general se consideran adecuados para la mayoría de los cultivos agrícolas (Etchevers y Padilla, 2007).

La concentración de P extractable dentro de la 4 zonas geográficas fluctuó entre 19.8 y 40.9 mg kg^{-1}, siendo la zona centro-norte la que presentó el mayor valor, diferenciándose de forma significativa del resto de las zonas estudiadas ($p<0.05$), las cuales no presentaron diferencias significativas entre ellas ($p>0.05$) **(Figure 2d)**. Estas concentraciones se encontraron dentro del rango adecuado (zonas centro, centro-sur y sur) a alto (zona centro-norte) para suelos agrícolas (Etchevers y Padilla, 2007), y fueron inferiores a la media y al rango de concentraciónde P Olsen registradas por Chen et al. (2003) para suelos cultivados con praderas en Nueva Zelanda. En general, las diferencias entre las concentraciones de P extractable obedecen a los procesos de fijación de este elemento en el suelo, con diferencias de magnitud asociados a las propiedades de cada suelo; como el pH, concentración de bases, Al y contenido de MO (Barreal et al., 2001; Chen et al., 2003; Havlin et al., 1999; Haynes and Mokolobate, 2001). De esta forma, los suelos volcánicos presentan mayor fijación de P y por tanto menores concentraciones de P extractable, a diferencia de los suelos de la zona centro norte y central (origen aluvial, lacustre y transición). No obstante, se esperaba encontrar todavía una menor concentración de P extractable en los suelos de la zona centro sur y sur, asociado a sus propiedades específicas (suelos volcánicos). Este hecho puede explicarse por los sistemas utilizados para calcular la dosis de P necesarias para los cultivos de maíz y trigo en esas zonas del país durante los últimos 20 años (Rodríguez, 1993), las cuales podrían haber sobre estimado las necesidades de P del cultivo, y generado una acumulación de este nutriente en el suelo.

Las concentraciones de Ca, Mg y Na en el suelo se encontraron dentro del rango descrito por los estudios parciales previos (CIREN 1996, 1997 y 1999; Luzio, 2010), y presentaron una disminución paulatina desde norte a sur dentro de la zona de estudio (**Figuras 2e, f y g**), los datos obtenidos están asociados al aumento de pluviometría en el mismo orden (Havlin et al., 1999). Un comportamiento similar se presentó en el pH del suelo **(Figura 2a)**, dada la estrecha relación entre este parámetro y la concentración de bases en el suelo (Havlin et al., 1999).

La concentración de Ca intercambiable desde norte a sur fluctuó entre 22.9 y 5.2 $cmol_+ kg^{-1}$, y los mayores valores se presentaron en la zona centro-norte y centro, los cuales fueron diferentes significativamente a las otras dos zonas estudiadas ($p<0.05$). Mientras que los valores obtenidos en las zonas centro-sur y sur no presentaron diferencias significativas entre ellas **(Figura 2e)**. Las concentraciones de Ca en el suelo obtenidas en este estudio se pueden considerar dentro del rango adecuado (zonas centro-sur y sur) a muy alto (zonas centro y centro-norte) para suelos agrícolas (Etchevers y Padilla, 2007). Un rango similar de concentración de Ca para las zonas centro-sur y sur fue señalado por Officer et al. (2004) para suelos agrícolas de Illinois y Missouri en EE.UU.

Respecto al Mg intercambiable **(Figura 2f)**, las concentraciones fluctuaron entre 3.3 y 0.8 $cmol_+ kg^{-1}$, consideradas dentro del rango adecuado a alto para suelos agrícolas (Etchevers y Padilla, 2007). La mayor concentración obtenida se presentó en la zona centro-norte, que se diferencia significativamente del resto de las zonas ($p<0.05$), en tanto que las concentraciones de estas últimas zonas no presentaron diferencias significativas

(p>0.05) entre ellas. Esta ausencia de diferencias entre zonas que presentan cuantitativamente una gran diferencia de concentración (zona centro y sur) **(Figura 2f)** obedece al alto coeficiente de variación obtenido para este elemento (64.4%), debido principalmente a las diferencias en la génesis de los suelos presentes en una misma zona geográfica (Luzio, 2010). El rango de concentración de Mg encontrado en toda la zona de estudio fue similar al señalado por Officer et al. (2004).

La concentración de Na intercambiable fluctuó entre 1.29 y 0.10 $cmol_+ kg^{-1}$ desde la zona centro-norte hacia el sur **(Figura 2g)**, y la mayor concentración se obtuvo en la zona centro norte, la cual se diferencia de forma significativa de las otras tres zonas (p<0.05), no obteniéndose diferencias significativas (p>0.05) entre ellas. La concentración de Na encontrada en la zona centro-norte se encuentra dentro del rango alto señalado para suelos agrícolas (Etchevers y Padilla, 2007), e incluso se traduce en riesgo de sodicidad que puede afectar negativamente la productividad de las plantas (Benton, 1998; Havlin et al., 1999).

Los valores de la concentración de K intercambiable, fluctuaron entre 0.49 y 0.76 $cmol_+ kg^{-1}$ y se encuentran dentro del rango adecuado a alto señalado para suelos agrícolas (Etchevers y Padilla, 2007). Con respecto a las zonas geográficas se observa que las zonas centro-norte y centro-sur presentan los mayores contenidos de K intercambiable, los cuales se diferencian de forma significativa solo con la zona centro (p<0.05) **(Figura 2h)**. Valores similares son señalados por estudios parciales previos (CIREN 1996, 1997 y 1999; Luzio, 2010), y obedecen a la génesis de suelo, mayor potencial de rendimiento y extracción de K en el cultivo de maíz de la zona central, y al K aplicado como fertilizante en estos suelos (Havlin et al., 1999). A su vez, este rango de concentración de K es mayor al señalado por Officer et al. (2004) para suelos agrícolas de Illinois y Missouri.

Los contenidos de Al intercambiable fluctuaron entre 0.02 y 0.51 $cmol_+ kg^{-1}$ **(Figura 2i)** y se encuentran dentro de los limites considerados como adecuado a alto para suelos agrícolas (Etchevers y Padilla, 2007). Los valores obtenidos coinciden con los descritos en los estudios parciales previos (CIREN 1996, 1997 y 1999; Luzio, 2010). Como era de esperar, la mayor concentración de Al se obtuvo en la zona sur cuyos valores fueron significativamente diferentes (p<0.05) a los obtenidos en el resto de las zonas estudiadas. Estas zonas, a pesar de tener valores de Al intercambiable muy diferentes entre ellas, no presentaron diferencias significativas entre sí (p>0.05). La mayor concentración de Al en la zona sur obedece a la mayor pluviometría de esta zona (lixiviación de cationes de reacción básica) y a las propiedades ándicas del suelo, donde destaca la mayor presencia de Al asociado a la MO y las arcillas amorfas (Alofanos e Imogolita) (Havlin et al., 1999; Neall, 2006).

Segundo estrato del suelo (20-40 cm)

Para la segunda capa de suelo, los valores de pH obtenidos **(Figura 2a)** presentaron el mismo comportamiento descrito para los primeros 20 cm dentro de las zonas geográficas de estudio **(Figura 2a)**. Los valores de pH en la segunda profundidad fluctuaron entre 5.7 y 8.1. Tampoco se obtuvieron diferencias significativas en los pH entre ambas profundidades **(Tabla 1)**. La explicación de las diferencias en el pH obtenidas entre zonas geográficas para esta segunda capa sería la misma que se ha mencionado anteriormente al analizar de los valores de la primera capa.

El contenido de MO en la segunda profundidad del suelo **(Figura 2b)** también presentó el mismo comportamiento que se obtuvo en la primera profundidad y puede aplicarse la misma discusión que se dio para la **Figura 2b**. Los contenidos obtenidos, para esta segunda capa, fluctuaron entre 22.0 y 114.6 g kg^{-1} para la zona centro-norte y la zona sur respectivamente. Para los suelos volcánicos, los contenidos de MO fluctuaron entre 54.7 y 114.6 g kg^{-1} (zona centro-sur y sur, respectivamente). Para toda las zonas de estudio se obtuvo un significativo y menor contenido de MO en la segunda capa de suelo respecto de la primera (p<0.01) **(Tabla 1)**, lo cual responde a la continua generación y aportes de carbono orgánico en superficie (Havlin et al., 1999). El contenido de N disponible en la segunda capa del suelo presentó un comportamiento parecido al obtenido y descrito para la primera capa **(Figura 2c)**, sin embargo en la segunda profundidad no se obtuvieron diferencias significativas entre zonas geográficas (p>0.05). Los valores de N disponible fluctuaron entre 20 y 26 mg kg^{-1} dentro de las cuatro zonas geográficas evaluadas, y fueron significativamente inferiores a los valores obtenidos para la primera capa del suelo (p<0.01) **(Tabla 1)**. Esta menor concentración de N en la segunda capa analizada está asociada al menor contenido de MO, dado que la principal fuente de aporte de N disponible en el suelo proviene de la mineralización de la MO del suelo (Havlin et al., 1999).

Los niveles de P extractable fluctuaron entre 9.2 y 23.0 mg kg^{-1} **(Figura 2d)**, observándose un efecto similar al obtenido y descrito en la primera capa del suelo **(Figura 2d)**, pero en este caso (20-40 cm) sólo se obtuvo diferencia significativa entre la zona centro norte y centro sur (p<0.05), con mayor valor en la zona centro norte. Al igual que lo que se observó para el N, en esta profundidad, el contenido de P extractable dentro de las zonas de estudio fue significativamente inferior al obtenido para la primera capa del suelo (p<0.01) **(Tabla 1)**, lo cual se asocia al menor contenido de MO en profundidad, dado que gran parte del P que se hace disponible en el suelo está presente en forma orgánica (Chen et al., 2003; Havlin et al., 1999), y al hecho de que cuando se fertiliza con P, este se mantiene en los primeros 20 cm, dado el poco movimiento de este nutriente en el suelo (Havlin et al., 1999).

Los contenidos de los elementos Ca, Mg, Na, K y Al intercambiable presentaron el mismo comportamiento observado y discutido para la capa superior del suelo (**Figuras 2e, 2f, 2g, 2h, 2i**, respectivamente). Los valores de Ca, Mg, Na, K y Al intercambiable fluctuaron entre 4.8-22.0, 0.6-3.3, 0.08-1.30, 0.36-0.70, y 0.02-0.62 $cmol_+$

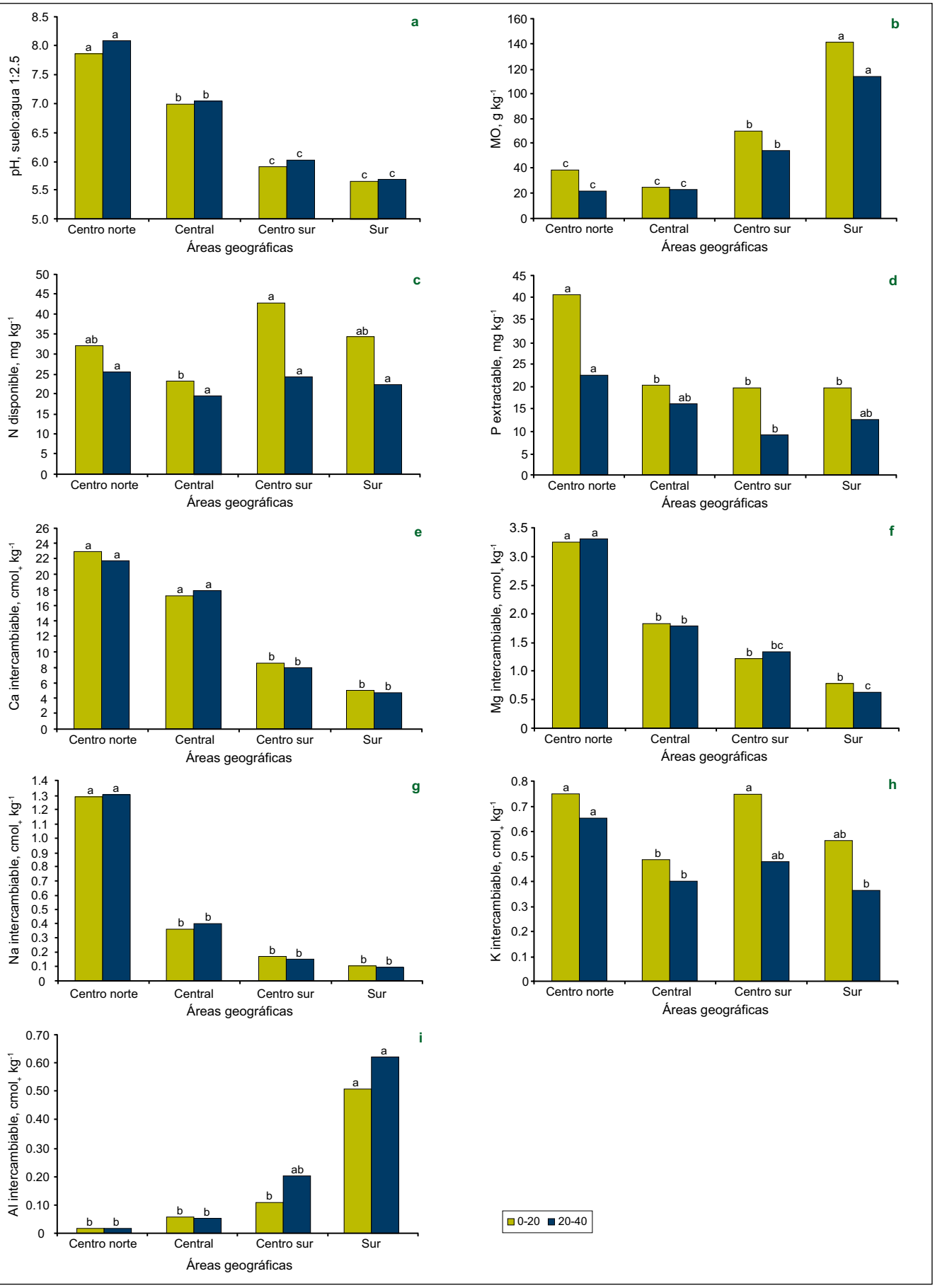

Figura 2. Propiedades químicas de suelo (0-20 y 20-40 cm) de cuatro áreas geográficas de Chile cultivadas con trigo candeal y maíz; a) pH, b) materia orgánica, c) nitrógeno disponible, d) fósforo extractable, e) calcio intercambiable, f) magnesio intercambiable, g) sodio intercambiable, h) potasio intercambiable, e i) aluminio intercambiable. Letras distintas sobre las barras de un mismo estrato de suelo para cada propiedad química analizada indican diferencia estadística entre áreas geográficas según Test de Tukey ($p<0.05$).

kg^{-1}, respectivamente. Las concentraciones de Ca, Mg, Na y Al en la segunda profundidad dentro de las zonas estudio fueron similares a lo obtenido en los primeros 20 cm, no obteniéndose diferencias significativas entre ambas capas del suelo ($p>0.05$) **(Tabla 1)**. Este hecho está asociado a la génesis de suelos; con alta concentración de bases en todo el perfil en zonas de menor pluviometría; y al movimiento de cationes en las zonas con mayor pluviometría donde se realiza su aplicación a través de fertilización o de enmiendas para corregir acidez (Havlin et al., 1999). Concentraciones similares de Ca, Mg y Na en diferentes capas de suelo han sido reportadas también por Zaidel'man et al. (2007) para suelos de Rusia. La concentración de K fue inferior en la segunda profundidad de suelo respecto a la primera ($p<0.01$), asociado a las prácticas de fertilización con este elemento, la cual tiende a generar estratificación del nutriente en la parte superior del suelo (Havlin et al., 1999).

Conclusión

Los suelos chilenos cultivados con trigo y maíz desde la zona centro norte hasta el sur mostraron diferencias significativas entre las propiedades químicas evaluadas (pH, MO, N disponible y P extractable, Ca, Mg, K, Na y Al intercambiable). La mayoría de estas propiedades se encuentran dentro del rango adecuado a alto para los principales cultivos agrícolas, y sólo el pH y las concentraciones de Na y Al intercambiable podrían ser limitantes en algunas de las zonas geográficas estudiadas. Por su parte, la profundidad del suelo en la cual cada propiedad química fue analizada, generó diferencias en los contenidos de los siguientes parámetros: MO, N disponible, P extractable y K intercambiable, cuyos mayores valores fueron encontrados en la primera capa del suelo (0-20cm).

Agradecimientos

Este estudio ha sido realizado con financiamiento del proyecto FONDECYT 1120992 de Chile.

Bibliografía

Barreal, M.E., M. Camps Arbestain, F. Macías, y A.E. Fertita. 2001. Phosphate and sulfate retention by nonvolcanic soils with andic properties. Soil Science, 166(10):691-707.

Benton, J. 1998. Plant nutrition manual. CRC Press LLC, Washington, USA. 149 p.

Bourennane, H., B. Nicoullaud, A. Couturier, y D. King. 2004. Exploring the spatial relationships between some soil properties and wheat yields in two soil types. Precision Agriculture 5:521-536.

Buccolieri, A., G. Buccolieri, A. Dell'Atti, G. Strisciullo, y R. Gagliano-Candela.2010. Monitoring of total and bioavailable heavy metals concentration in agricultural soils. Environ Monit Asses 168:547-560.

Chen, C., S. Sinaj, L. Condron, E. Frossard, R. Sherlock, y M. Davis. 2003. Characterization of phosphorus availability in selected New Zealand grassland soils. Nutrient Cycling in Agroecosystems 65:89-100.

Cherkasov, G.N., N.S. Sokoroev, A.N. Voronin, y S.V. Trapeznikov. 2010. Effect of weather conditions on soil fertility, crop yield, and fertilizer efficiency in the Central Chernozem Zone. Russian Agricultural Sciences, 36(5):353-355.

CIREN. 1996. Estudio Agrológico de la VI Región. Imprenta CIREN CORFO. Santiago, Chile. Tomos I y II. 476 p.

CIREN. 1997. Estudio Agrológico, VII Región. Descripciones de Suelos. Materiales y Símbolos. Centro de Información de Recursos Naturales. Santiago, Chile. Publicación N° 117. 660 p.

CIREN. 1999. Descripciones de suelos materiales y símbolos: Estudio Agrológico VIII Reg. Publicación Ciren Nº121. 583 p. Santiago, Chile.

Etchevers, J., y J. Padilla. 2007. Diagnóstico de la fertilidad del suelo. *En* Alcantar, G., y L. Trejo-Téllez (Eds.). Nutrición de cultivos. Ediciones Mundi-Prensa, México. 454 p.

Fernández, M. 1995. Fertilización nitrogenada y su eficiencia en maíz de grano. Simiente 65:122-132.

Fernández, M. 1996. Influencia de la fertilización de largo plazo en el cultivo de maíz y en la residualidad de P y K en un Mollisol calcáreo. Agricultura Técnica, Chile. 56:107-115.

Fidanza, M. 2007. Characterization of soil properties associated with type-I fairy ring symptoms in turfgrass. Biologia, Bratislava 62:533-536.

Havlin, J.L., J.D. Beaton, S. Tisdale, y W.L. Nelson. 1999. Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management.6ª Ed. Prentice-Hall, New Jersey, North Carolina, USA. 499 p.

Haynes, R.J. and M.S. Mokolobate. 2001. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenom and the mechanisms involved. Nutrient Cycling in Agroecosystems 59:47-63.

Hirzel, J., y I. Matus.2013. Effect of soil depth and increasing fertilization rate on yield and its components of two durum wheat varieties. Chilean J. Agric. Res 73:55-59.

Jenkinson, D. S., y J. H. Rayner.1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. Soil Science 123:298-305.

Khitrov, N., D. Rukhovivh, N. Kalinina, A. Novikova, E. Pankova, y G. Chernousenko. 2009. Estimation of the areas of salt-affected soils in European part of Russia on he basis of a digital map of soil salinization on scale of 1:2.5 M. Eurasian Soil Science 42:581-590.

Luzio, W. 2010. Suelos de Chile. Departamento de Ingeniería y Suelos. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. 364 p.

Mellado, M. 2007. El trigo en Chile Cultura, Ciencia y Tecnología. Colección Libros INIA 21. 684 p.

Neall, V.E. 2006. Volcanic Soils. Encyclopedia of life supporting systems, EOLSS. Land use and land cover VII:1-24. On-line www.eolss.net/ebooks/Sample%20Chapters/C19/E1-05-07-13.pdf

Officer, S., A. Kravchenko, G. Bollero, K. Sudduth, N. Kitchen, W. Wiebold, H. Palm, y D. Bullok. 2004. Relationships between soil bulk electrical conductivity and the principal component analysis of topography and soil fertility values. Plant and Soil 258:269-280.

Parvage, M., B. Ulén, y H. Kirchmann. 2013. A survey of soil phosphorus and nitrogen in Swedish horse paddocks. Agriculture, Ecosystems and Environment 178:1-9.

Qiao, M., C. Cai, Y. Huang, Y. Liu., A. Lin, e Y. Zheng. 2011. Characterization of soil heavy metal contamination and potential health risk in metropolitan region of northern China. EnvironMonitAsses 172:353-365.

Rodríguez, J. 1993. La fertilización de los cultivos. Pontificia Universidad Católica de Chile. Facultad de Agronomía. Santiago. Colección en Agricultura. 291 p.

Sadzawka, A., R. Grez, M.L. Mora, N.R. Saavedra, M.A. Carrasco, y C.W. Rojas. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie Actas INIA N°34, Santiago, Chile.

Sierra, M., F.J. Martínez, y J. Aguilar. 2007. Baselines for trace elements and evaluation of environmental risk in soils of Almería (SE Spain). Geoderma 139:209-219.

Stolpe, N. 2006. Descripciones de los Principales Suelos de la VIII Región de Chile. Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Universidad de Concepción, Chile. 84 p.

Young, S., M. Wilson, S. Hillier, E. Delbos, S. Ali, y R. Stoltzfus. 2010. Differences and commonalities in physical, chemical and mineralogical properties of Zanzibari geophagic soil. J. Chem Ecol 36:129-140.

Zaidel'man, F.R., A.S. Nikiforova, L.V. Stepantsova, S.B. Safronov, y V.N. Krasin. 2007. Chemical properties of soils in closed depressions of the northern Tambov plain. Moscow University Soil Science Bulletin 62:200-207.

¿Fertilización fosfatada por suficiencia o restitución en secuencias agrícolas de la pampa arenosa?

M. Barraco[1,*], M. Díaz-Zorita[2], C. Justo[3] y A. Lardone[1]

Introducción

La disponibilidad de estrategias de diagnóstico y recomendación de la fertilización con fósforo (P) en sistemas agrícolas responden a distintos criterios de manejo de la práctica, basados entre otros conceptos en los de suficiencia o de restitución por balance del nutriente. Los planteos según criterios de suficiencia procuran corregir necesidades anuales de P ("fertilizando el cultivo") y conducen en el largo plazo al establecimiento de rendimientos de entre el 5% y el 10% inferiores al máximo alcanzable, al reducir potenciales riesgos de no lograr respuestas rentables en el año de aplicación de la corrección (Leikam et al., 2010). Ésta es una estrategia frecuente en condiciones de limitados recursos para inversiones, tenencias de la tierra de corto plazo y requiere del frecuente y preciso muestreo y análisis de suelos, conduciendo a la generalización de limitaciones en los nutrientes en el largo plazo. En contraposición, los planteos de fertilización por restitución se independizan en parte de los cultivos, buscando correcciones que compensen la extracción de nutrientes y el mantenimiento de niveles nutricionales que no limiten la productividad, maximizando los rendimientos (Leikam et al., 2010).

La información disponible comparando los efectos de largo plazo de estas estrategias de fertilización bajo condiciones extensivas de producción es limitada. Se supone que al aplicarse modelos de fertilización por suficiencia se tenderá a la disminución en los niveles extractables de fósforo. En cambio, al aplicarse modelos de restitución por balance, la oferta de P tenderá a estabilizarse y se reducirá la variabilidad en la productividad de los cultivos, al disminuir la frecuencia de sectores con niveles de P potencialmente limitantes.

Los objetivos de este estudio fueron: i) evaluar el efecto de dos estrategias de fertilización fosfatada en el largo plazo sobre la productividad de cultivos de maíz (*Zea mays*), trigo (*Triticum aestivum*), soja (*Glycine max*) y girasol (*Helianthus annus*) en rotación; y ii) estimar los efectos sobre los contenidos de P de los granos y P extractable de los suelos (Pe), después de 12 años de estudio en un sitio representativo de la región de la pampa arenosa argentina.

Materiales y métodos

El ensayo se estableció en un módulo de producción agrícola de 72 ha ubicado en el Campo Experimental de la EEA de INTA en General Villegas (34° 54´S, 63° 44´W) en Drabble (Buenos Aires), sobre un suelo con predominio de Hapludoles típicos, franco arenosos en consociación con Hapludoles thapto argicos (Alfieri et al., 1991) (Materia orgánica = 27.1 g kg^{-1}, P Bray 1 (Pe) = 22 mg kg^{-1}, pH = 6.2).

El módulo se instaló en el año 1996 con una secuencia agrícola de 6 años de duración (maíz-soja de primera-girasol-trigo/soja de segunda-maíz-girasol) bajo prácticas de labranza cero, en franjas de 12 ha para cada cultivo, de manera de instalar todas las fases de la secuencia todos los años. Durante el periodo 1996 a 2001, los cultivos no recibieron fertilización con P.

En el otoño de 2001, en cada franja, se establecieron dos estrategias de fertilización fosfatada: i) de suficiencia y ii) de restitución por balance del P aparentemente extraído por los cultivos. Para el criterio de suficiencia se consideraron umbrales de P del suelo (capa de 0 a 20 cm) de 18 mg kg^{-1} para maíz y trigo (Hanway y Olson, 1980) y de 12 mg kg^{-1} para soja y girasol (Ferraris y Couretot, 2004; Díaz-Zorita, 2005). Para la estrategia de restitución se estimó el P extraído para una producción promedio de 9000 kg ha^{-1} de maíz , 4000 kg ha^{-1} de trigo, 4000 kg ha^{-1} de girasol, 3500 kg ha^{-1} de soja de primera y 2000 kg ha^{-1} de soja de segunda según la concentración de P media de los granos propuestas por Andrade et al. (1996). En la **Tabla 1** se presentan las dosis medias de P agregadas en cada cultivo según las estrategias de fertilización aplicadas.

En todos los tratamientos, las aplicaciones de P se realizaron en el momento de la siembra en forma de fosfato monoamónico (11-23-0). En girasol y soja, en aquellos casos en que las dosis de fertilizante resultaron superiores a 45 kg ha^{-1} de fertilizante comercial se aplicaron fraccionadas en partes equivalentes en el surco y en el entresurco para reducir riesgos de fitotoxicidad

Tabla 1. Dosis de P agregado según el cultivo y estrategia de fertilización. Promedio de 12 campañas.

Cultivo	Estrategia de fertilización	
	Suficiencia	Restitución
	---------- Dosis de P, kg ha^{-1} ----------	
Maíz	14	27
Trigo	15	30
Soja de segunda	0	11
Girasol	0	13
Soja de primera	0	15

[1] EEA INTA General Villegas. *Correo electrónico: barraco.miriam@inta.gob.ar
[2] CONICET y Novozymes Bioag S.A.
[3] Consultora Privada.

en las semillas. El manejo de los cultivos se realizó bajo condiciones de alta producción representativas de la región de la pampa arenosa, con fechas de siembra de inicio de junio en trigo, inicios de octubre en maíz, mediados de octubre en girasol, inicios de noviembre para soja de primera y mediados a fin de diciembre en soja de segunda. Se realizaron controles químicos de malezas en el barbecho y en el ciclo de los cultivos, fertilización nitrogenada con aportes equivalentes a 140 kg ha^{-1} de N en maíz y en trigo (N_{suelo}+$N_{fertilizante}$), inoculación de semillas de soja con *Bradyrhizobium japonicum*, control de plagas y enfermedades según monitoreo.

En los otoños del 2001 (año 1) y del 2013 (año 12) se tomaron muestras compuestas de los suelos geo-referenciadas (capa de 0 a 20 cm), siguiendo un muestreo en grilla con 6 estaciones de muestreo por franja de cultivo y modelo de fertilización, para la determinación de los contenidos de P extractable (Pe, Bray y Kurtz, 1945). Anualmente se determinó la producción de grano de los cultivos, por cosecha y trilla manual de muestras de 3 m^2 de cada cultivo, coincidentes con las posiciones geo-referenciadas en donde se realizaron las determinaciones de Pe (6 muestras por criterio de fertilización). Los resultados de producción se expresaron corregidos a contenidos de humedad de 14%. Además, en el año 12 del estudio (2013) se determinó la concentración de P en los granos (6 muestras/criterio de fertilización) para la estimación del balance de P (BP) según la diferencia entre el P extraído en los granos (Pgr) y el P aplicado al fertilizar (Pfert): BP (kg ha^{-1}) = Rendimiento (kg ha^{-1}) x Pgr (kg kg^{-1}) – Pfert (kg ha^{-1}). Los cálculos se expresaron en base seca (0% de humedad).

Se desarrollaron análisis descriptivos de los rendimientos y de los contenidos de Pe de los suelos. Además los rendimientos se evaluaron en forma individual para cada campaña y en un análisis combinado, considerando a los criterios de fertilización como tratamientos y a las campañas como bloques (con las 6 muestras anidadas). La comparación múltiple de medias se realizó mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 10%. Los contenidos de P de los granos de la campaña 2012 se analizaron mediante el test t. Para todos los análisis se empleó el programa estadístico InfoStat versión 2014 (Di Rienzo et al., 2014).

En la **Tabla 2** se presentan las precipitaciones mensuales del periodo en estudio, mostrando una gran variabilidad entre campañas, (característica de la pampa arenosa) sobre todo en el periodo primavero-estival.

Resultados y discusión

Rendimiento de los cultivos

Los rendimientos de maíz variaron entre 300 y 12 735 kg ha^{-1}, con rendimientos medios de 8580 kg ha^{-1}. En las campañas 2001, 2003, 2005 y 2008, los rendimientos de los cultivos bajo prácticas continuas de fertilización según un modelo de restitución fueron significativamente mayores que los observados según el modelo de suficiencia, mientras que para el resto de las campañas los rendimientos medios fueron similares entre estrategias de fertilización, **(Figura 1)**. En promedio, las diferencias de rendimiento entre las dos estrategias de fertilización fueron significativas (p=0.07) y los cultivos fertilizados según el criterio de restitución rindieron en promedio 526 kg ha^{-1} más que los cultivos manejados con suficiencia de P.

Tabla 2. Precipitaciones mensuales en mm durante el periodo de estudio. Fuente: Estación Meteorológica de la EEA INTA General Villegas.

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
2001	131	22	259	157	34	10	3	51	129	139	120	65	1118
2002	218	21	122	50	56	3	12	58	28	198	114	92	972
2003	41	129	91	8	0	4	5	0	11	36	90	41	454
2004	278	28	36	105	86	0	48	22	0	133	112	17	865
2005	199	55	254	19	3	12	51	25	38	38	165	38	894
2006	210	66	148	92	11	9	11	1	10	189	88	156	990
2007	113	151	228	32	14	17	2	2	86	49	29	99	823
2008	93	68	54	9	2	16	30	0	30	96	131	41	570
2009	25	111	42	55	20	0	29	1	80	10	121	311	804
2010	217	147	27	38	23	14	4	2	107	64	19	26	687
2011	128	83	50	100	10	7	11	1	8	78	62	3	540
2012	80	283	127	71	79	6	0	69	60	271	170	60	1275
2013	8	20	104	35	48	4	18	0	39	71	104	78	529

En los cultivos de trigo, la producción de grano varió entre 500 y 4864 kg ha^{-1}, con rendimientos medios de 3328 kg ha^{-1} **(Figura 2a)**. En el 50% de las campañas evaluadas (2003, 2005, 2006, 2008, 2010 y 2011), los rendimientos de los cultivos según un modelo de restitución fueron mayores que los observados según el modelo de suficiencia (p<0.10), mientras que en las campañas restantes fueron similares entre ellos. En promedio, las diferencias de rendimiento entre las dos estrategias de fertilización fueron altamente significativas (p<0.01) y los cultivos fertilizados según el criterio de restitución rindieron en promedio 472 kg ha^{-1} más que los cultivos manejados con suficiencia de P.

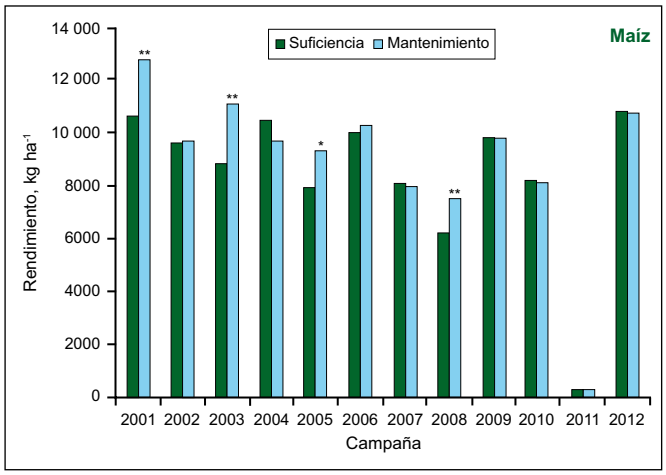

Figura 1. Rendimientos de maíz según dos criterios de fertilización con fósforo. Dentro de cada campaña, * y ** indican diferencias significativas según Tukey al 10% y al 1%, respectivamente, entre criterios de fertilización.

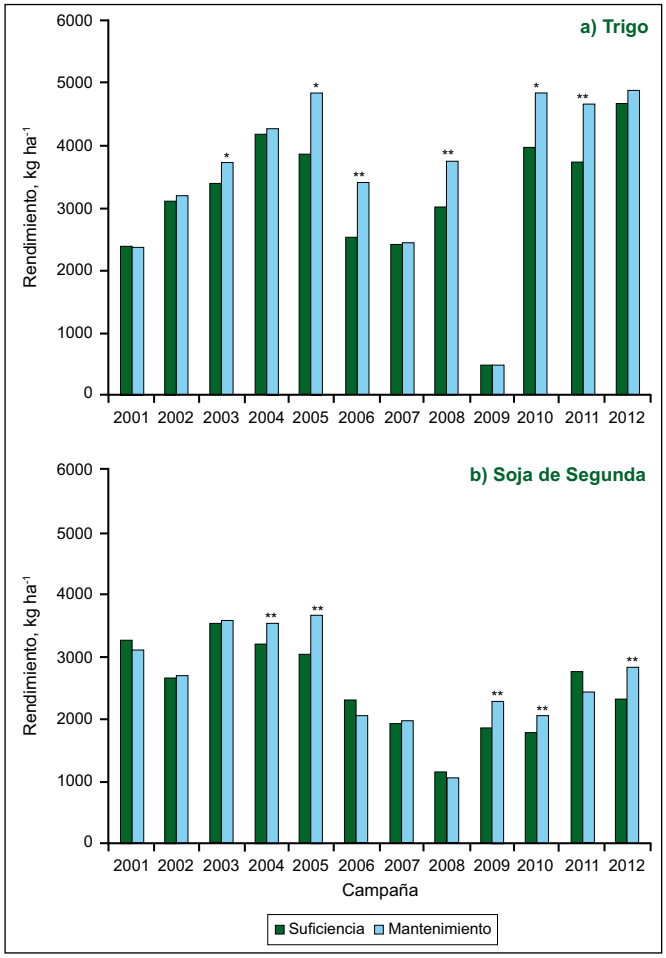

Figura 2. Rendimientos de trigo (a) y de soja de segunda (b) según dos criterios de fertilización con fósforo. Dentro de cada campaña, * y ** indican diferencias significativas según Tukey al 10% y al 1%, respectivamente, entre criterios de fertilización.

Los rendimientos de soja de segunda variaron entre 1057 y 3368 kg ha^{-1}, con rendimientos medios de 2556 kg ha^{-1} y con diferencias significativas entre criterios de fertilización (p=0.07) **(Figura 2b)**. En las campañas 2005, 2006, 2009, 2010 y 2012, los rendimientos de los cultivos bajo prácticas continuas de fertilización según un modelo de restitución fueron significativamente mayores que los observados según el modelo de suficiencia (p<0.10), mientras que la diferencia de rendimiento entre las dos estrategias de fertilización fue de 111 kg ha^{-1} cuando se promediaron los 12 años evaluados. Considerando la secuencia trigo/soja de segunda, los rendimientos según el modelo de restitución fueron un 11% superiores que sobre un modelo de suficiencia (6200 versus 5588 kg ha^{-1}, respectivamente).

En soja de primera, los rendimientos variaron entre 1366 y 4856 kg ha^{-1}, con rendimientos medios de 3868 kg ha^{-1}. Si bien en las campañas 2005, 2008, 2009 y 2012, los rendimientos de los cultivos bajo prácticas continuas de fertilización según un modelo de restitución fueron significativamente mayores que los observados según el modelo de suficiencia (p<0.10), en el análisis en conjunto de todas las campañas éstas diferencias no resultaron significativas (p=0.28), **(Figura 3a)**. La diferencia de rendimientos entre las dos estrategias de fertilización fue de 141 kg ha^{-1} cuando se promediaron los 12 años evaluados.

La producción de girasol varió entre 350 y 4589 kg ha^{-1}, con rendimientos medios de 3015 kg ha^{-1}. En el análisis en conjunto no se observaron diferencias significativas entre criterios de fertilización (p=0.48) y solo en dos campañas los rendimientos resultaron superiores con el criterio de restitución de P **(Figura 3b)**. La diferencia de rendimientos, promedio de los 12 años de evaluación, fue de 124 kg ha^{-1} mayor con planteos de fertilización por restitución.

La producción acumulada de la secuencia agrícola (7 cultivos en 6 campañas) mostró una producción promedio de 32 170 kg grano ha^{-1} para el criterio de suficiencia y de 33 999 kg grano ha^{-1} para el criterio de restitución **(Figura 4)**.

Contenidos de P en granos y balance de P al año 12

Luego de 12 años de aplicación de modelos contrastantes de manejo de la fertilización con P, la concentración de P en los granos fue similar bajo prácticas de restitución que al fertilizar por suficiencia en cultivos de maíz y trigo **(Tabla 3)**. En soja de primera y soja de segunda fue un 6.2% y 6.6% superior, respectivamente en la estrategia de fertilización por restitución, mientras que en girasol

se observó menores contenidos de P con dicha estrategia **(Tabla 3)**. Resultados similares en cultivos de soja fueron reportados por Ventimiglia et al. (2012). El balance de P resultó negativo en la mayoría de los cultivos bajo la estrategia de suficiencia, a excepción de trigo donde resultó levemente positivo **(Tabla 3)**. Al aplicarse la estrategia de restitución, el balance fue positivo para maíz y trigo debido a que los rendimientos obtenidos resultaron inferiores a los estimados al calcular la dosis de restitución. En cambio, en soja y girasol el balance de P fue negativo como consecuencia de mayores rendimientos con respecto a los previstos en el planteo original **(Tabla 3)**. En soja de segunda, el balance resultó neutro, pero si se adiciona lo aportado en el trigo se supera lo extraído por los dos cultivos. Considerando a la rotación en estudio, el balance global del sistema hasta la campaña 2012 fue de -43.8 kg de P para el criterio de suficiencia y de +22.6 kg P para el criterio de restitución.

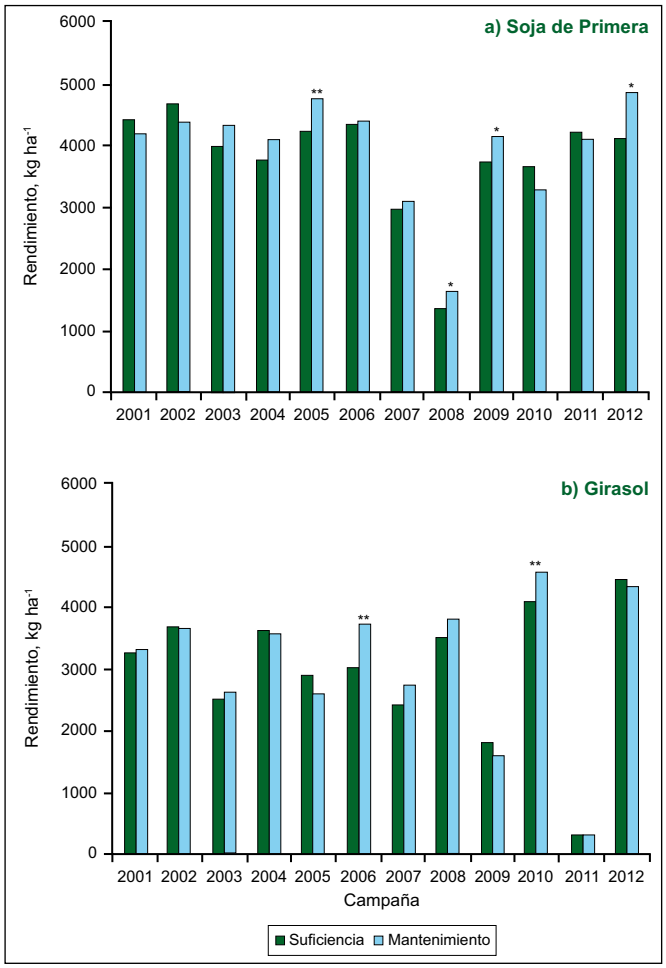

Figura 3. Rendimientos de soja de primera (a) y de girasol (b) según dos criterios de fertilización con fósforo. Dentro de cada campaña, * y ** indican diferencias significativas según Tukey al 10% y al 1%, respectivamente, entre criterios de fertilización.

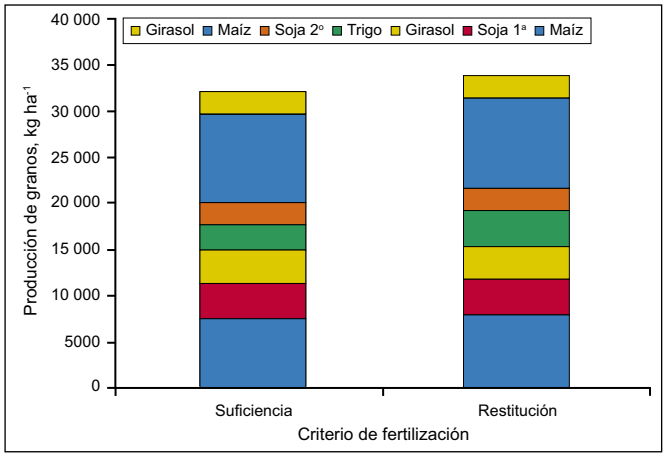

Figura 4. Producción acumulada en una secuencia maíz-soja de primera-girasol-trigo/soja de segunda-maíz-girasol según dos criterios de fertilización con P. Promedio de 12 campañas de estudio.

Evolución de P en los suelos

Al inicio del estudio los niveles de Pe de los suelos variaron entre 12.1 y 60.7 mg kg^{-1}, mientras que en el año 2013 variaron entre 6.9 y 56.9 mg kg^{-1} para la estrategia de suficiencia y entre 17.5 y 54.0 mg kg^{-1} para la estrategia de restitución. En promedio, luego de 12 años en los planteos por suficiencia éstos se redujeron a razón de 0.7 mg kg^{-1} $año^{-1}$ mientras que al considerarse una estrategia de restitución se incrementaron en 0.5 mg kg^{-1} $año^{-1}$ **(Tabla 4)**. Además, con la estrategia de suficiencia se observó un incremento en la variabilidad de Pe entre los puntos geo-referenciados, en tanto que la variabilidad en los contenidos de Pe entre puntos disminuyó con la estrategia de restitución **(Tabla 4)**.

Finalmente, con la estrategia de suficiencia de P se observó en el año 12 un 50% de los puntos geo-referenciados con niveles sub-óptimos para la producción de soja y girasol (Pe<11 mg kg^{-1}) y 75% de los puntos con niveles sub-óptimos para maíz y trigo (Pe<18 mg kg^{-1}). En contraposición, con la estrategia de restitución de P ningún punto mostró valores sub-óptimos para soja y girasol y sólo un 1% para maíz y trigo **(Tabla 4)**.

Conclusiones

La aplicación de estrategias de fertilización de restitución de P durante 12 años consecutivos en un suelo representativo de la región de la pampa arenosa con niveles medios a altos de Pe permitió alcanzar mayores rendimientos que bajo planteos de fertilización de suficiencia. Estas mejoras fueron del 6.3% en maíz y del 15.2% en trigo mientras que en cultivos oleaginosos las diferencias fueron menores (3.7% en soja de primera, 4.4% en soja de segunda y 3.4% en girasol).

Al fertilizar anualmente con criterios de suficiencia se redujeron los niveles de Pe a razón de aproximadamente 0.7 mg kg^{-1} $año^{-1}$ mientras que las correcciones de reposición los incrementaron a razón de 0.5 mg kg^{-1} $año^{-1}$.

Si bien ambas estrategias se diferencian en las dosis anuales de fertilización con P, este estudio contribuye al análisis de los efectos de largo plazo de la aplicación continua de decisiones de manejo del nutriente, aplicable a una amplia área agrícola de la región pampeana. Las mayores respuestas sobre los cultivos de cereales sugieren la posibilidad de establecer planteos combinados de fertilización, con aplicación de reposición

Tabla 3. Contenido de P de los granos, P extraído por los cultivos, P aportado por la fertilización (P aplicado) y balance de P según dos criterios de fertilización con P en Hapludoles de la región de la pampa arenosa. Campaña 2012/13. Datos expresados en base seca (0% de humedad).

Cultivos	Criterio de fertilización con P							
	Suficiencia				Restitución			
	P en grano	P extraído	P aplicado	Balance	P en grano	P extraído	P aplicado	Balance
	%	kg P ha^{-1}			%	kg P ha^{-1}		
Maíz	0.19	18.4	13.0	-5.4	0.20	18.8	27.0	+8.2
Trigo	0.35	13.6	17.0	+3.4	0.35	14.6	34.0	+19.4
Soja 1ª	0.36	12.8	0.0	-12.8	0.38	16.0	12.0	-4.0
Soja 2º	0.41	8.2	0.0	-8.2	0.43	10.6	10.0	-0.6
Girasol	0.48	18.5	0.0	-18.5	0.42	16.3	12.0	-4.3

Tabla 4. Concentración de P extractable de los suelos (Pe, Bray y Kurtz 1) al inicio (Año 1) y final del estudio (Año 12) según criterios de fertilización con P en Hapludoles de la región de la pampa arenosa: DS (Desvío estándar), CV (Coeficiente de variación en %), P25, P50, P75 (Percentil 25, 50 y 75, respectivamente).

Criterio de fertilización con P	Muestreo	Pe					
		Media	DS	CV	P25	P50	P75
		mg kg^{-1}		%	mg kg^{-1}		
Suficiencia	Año 1	23.3	7.9	33.7	19.10	21.6	25.4
	Año 12	15.0	10.3	68.6	9.6	11.7	15.3
Restitución	Año 1	22.5	8.8	39.5	17.3	20.1	22.6
	Año 12	28.9	7.9	27.4	23.2	27.7	33.2

antes de la siembra de cereales y planteos de suficiencia al sembrar oleaginosas.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por los proyectos de INTA: BANOR 710011 “Desarrollo y transferencia de tecnología para la producción sustentable de los sistemas agrícolas en el norte de la provincia de Buenos Aires” y BANOR 1271305 “Contribución del INTA al desarrollo sustentable del territorio del noroeste bonaerense”. Los autores agradecen al International Plant Nutrition Institute (IPNI) por la financiación para los análisis de P de los granos.

Bibliografía

Alfieri, A.E., J.C. Viale, R.E. Sobral. 1991. Carta de suelos del campo experimental de la EEA General Villegas. INTA CIRN, 90 p.

Andrade, F., H. Echeverría, N. Gonzalez, S. Uhart, y N. Darwich. 1996. Requerimientos de nitrógeno y fósforo de los cultivos de maíz, girasol y soja. Boletín Técnico N° 134. EEA INTA Balcarce. Argentina.

Bray, R.H, y L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. Soil Sci. 59:39-45.

Díaz-Zorita, M. 2005. Capítulo 14: Girasol. *En*: Echeverría, H.E.; García, F.O. (Eds.). Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Balcarce: Ediciones INTA. 307 p.

Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, y C.W. Robledo. 2014. InfoStat versión 2014. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Disponible en http://www.infostat.com.ar. [Fecha de acceso 12/8/2014].

Ferraris , G. y L. Couretot. 2004. Fertilización fosforada en soja. Diagnóstico y tecnología de aplicación. Revista de Tecnología Agropecuaria, EEA INTA Pergamino, IX(26):46-49.

Hanway, J. y R. Olson. 1980. Phosphate nutrition of corn, sorghum, soybeans and small grains. In: Khasawneh, F.,E. Sample y E. Kamprath (Eds.). The role of Phosphorus in Agriculture. ASA-CSSA-SSSA. Madison, WI.

Leikam, D., G. Randall, y A. Mallarino. 2010. Are current soil test–based phosphorus and potassium fertilizer recommendations adequate?. Crops and Soils 43:27-32.

Ventimiglia, L., L. Torrens Baudrix, y M. Saks. 2012. Fósforo en la monocultura sojera: Efecto de la dosis, forma y momento de aplicación sobre el balance nutricional. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica. 6:23-26.

Efecto del manejo de la fertilización sobre la productividad de los suelos en una rotación en la Región CREA Santa Fe Centro

Diego H. Pérez[1,2,*] y Brenda L. Gambín[3,4]

Introducción

Las rotaciones (secuencias de cultivos) utilizadas en la producción agropecuaria en la región pampeana argentina muestran generalmente elevada participación de soja de primera siembra ("de primera"). Esto produce severos efectos negativos en los ambientes explorados, entre los que se pueden mencionar la pérdida de materia orgánica de los suelos y la baja eficiencia del uso del agua (Martínez et al., 2011). La inclusión de gramíneas como trigo y maíz son de suma importancia desde el punto de vista de aportes de carbono, mejorando en el largo plazo la condición física-química del suelo y el uso eficiente de los recursos (Gerster et al., 2002). Los balances de nutrientes de la mayor parte de la producción agrícola en Argentina son deficitarios. Esto implica que los consumos por parte de los cultivos integrantes de la rotación son mayores a los aportes realizados por fertilizantes (García y González Sanjuan, 2013). En este contexto, no es claro si un esquema de rotación con alta participación de gramíneas y con niveles de fertilización superiores a los generalmente utilizados a nivel de productor puede impactar positivamente sobre la fertilidad química y física de los suelos y, en el largo plazo, sobre el rendimiento de los cultivos involucrados.

El presente trabajo pretende evaluar el efecto del manejo de la fertilización: i) aquel normalmente utilizado por el productor en la zona, y ii) un esquema de alta fertilización; sobre el suelo y los rendimientos bajo una rotación con inclusión de gramíneas.

Materiales y métodos

Los ensayos se realizaron en 3 localidades de la zona Santa Fe Centro de AACREA **(Tabla 1**), seleccionadas por ser agroecológicamente representativas de la zona. En cada localidad se realizaron dos franjas con diferente aporte de nutrientes: i) una correspondiente a la estrategia usual de fertilización del productor (FP), y ii) otra con estrategia de alta fertilización (AF). Cada franja tuvo un tamaño de 450-600 m de largo por 450-500 m de ancho. La rotación utilizada en todos los sitios fue Trigo/Soja-Maíz. Los experimentos comenzaron en la campaña 2006/07 y se cuenta con información de 7 años consecutivos (hasta la campaña 2013/14).

La fertilización se efectúo en los cultivos de trigo y de maíz, mientras que no se fertilizó la soja "de segunda" (sembrada inmediatamente después del trigo). La misma sólo recibió aportes residuales de la fertilización realizada en el cultivo de trigo. Las cantidades aportadas de fertilizantes se muestran en la **Tabla 2**.

El manejo agronómico de cada cultivo fue de acuerdo a las prácticas habituales de cada localidad. En todos los casos el control de plagas, malezas y enfermedades se controlaron según monitoreos semanales y recomendaciones según umbrales de daños económicos.

Determinaciones

En cada sitio se obtuvo el dato de rendimiento (kg ha^{-1}) a través de monitores de rendimiento ubicados en las cosechadoras. El rendimiento de cada cultivo fue corregido por humedad (14% para trigo, 13.5% para soja y 14.5% para maíz). Asimismo, se calculó un rendimiento global de la rotación en kg de glucosa ha^{-1}, teniendo en cuenta el rendimiento de cada cultivo y la calidad del grano (Sinclair y de Wit, 1975).

Las determinaciones químicas del suelo se realizaron a partir de muestreos de suelo previos a la siembra del cultivo de trigo y maíz. Se realizaron análisis completos de suelo de los siguientes parámetros: nitrógeno de nitrato ($N\text{-}NO_3^-$, 0-60 cm), fósforo extractable Bray 1 (Pe, 0-20 cm), azufre de sulfato ($S\text{-}SO_4^{-2}$, 0-20 cm), N total (Nt, 0-20 cm) y materia orgánica (MO, 0-20 cm).

En cada sitio se registraron los datos de precipitaciones mensuales mediante pluviómetros ubicados en cada sitio experimental.

Tabla 1. Descripción de localidades.

Localidad	Latitud	Longitud	Clase de suelo	Serie de suelo	Índice de productividad
Elisa	30° 40´26´´	61° 02´26´´	Argiudol típico, Clase I	Jacinto Arauz	82%
Angélica	31° 33´19´´	61° 32´41´´	Argiudol típico, Clase I	Rafaela	78%
Gálvez	32° 04´20´´	61° 12´19´´	Argiudol típico, Clase I	Clason	90%

[1] **CREA Gálvez, Región Santa Fe Centro, Argentina. *Correo electrónico: diegohugoperez@gmail.com**
[2] **Consultor Privado.**
[3] **CONICET**
[4] **Universidad Nacional de Rosario.**

Adicionalmente, se realizó un análisis económico para cada tratamiento teniendo en cuenta los gastos directos de realización de cada cultivo de la rotación. Dentro de los gastos directos se consideraron los costos de labores (siembra, pulverización y cosecha) a valor de gestión CREA de cada empresa (valores determinados con coeficientes UTA a valor de mercado de ejecución de la labor correspondiente). También se consideraron los gastos en agroquímicos (insecticidas, funguicidas, herbicidas) según las dosis usadas a valor de compra de cada insumo. De la misma manera se determinaron los costos de los diferentes tratamientos de fertilización, este último gasto es el de mayor importancia en la composición de costos totales de los cultivos.

Tabla 2. Aporte de nutrientes por cultivo según esquema de fertilización: FP (Fertilización del productor) y AF (Alta fertilización).

Nutriente	Trigo		Soja 2º		Maíz	
	FP	AF	FP	AF	FP	AF
	kg ha^{-1} aplicados					
N	35-70	150	0	0	60-90	150
P	15-20	100	0	0	15-30	50
S	15-16	24	0	0	13-18	12
Ca	5	13	0	0	5	13

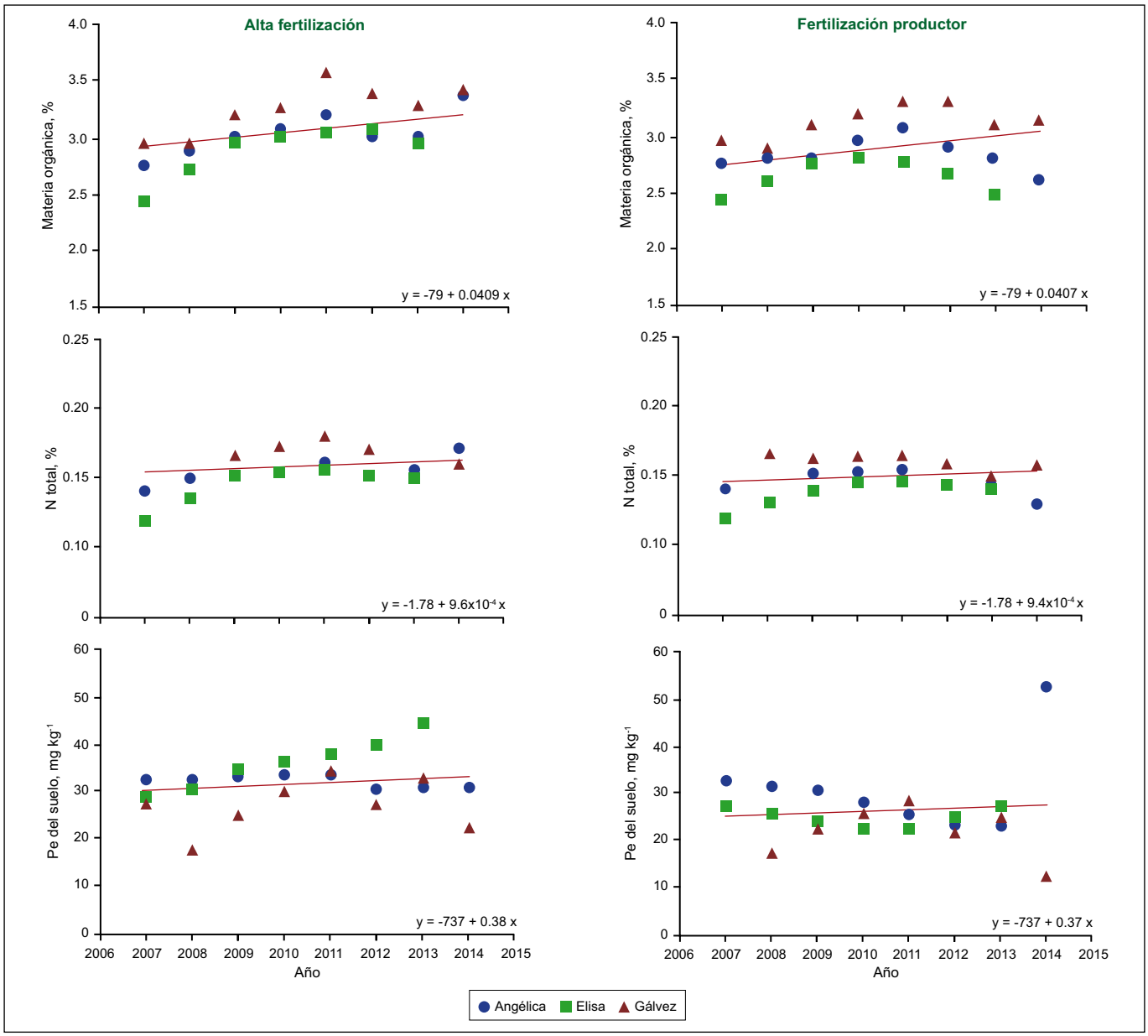

Figura 1. Evolución de MO, Nt y Pe del suelo para ambos esquemas de fertilización. La línea roja indica el ajuste del modelo.

Análisis estadístico

Se analizó el efecto año y la interacción año x tipo de fertilización (AF, FP) sobre cada una de las variables de interés (suelo y rendimiento) usando un modelo lineal mixto con el programa estadístico R (versión 3.0.2, paquete nlme, función lme) (Pinheiro et al., 2014). El sitio fue incluido como efecto aleatorio para estimar diferentes interceptos y tener en cuenta la jerarquía de los datos.

Se usó el criterio AIC para seleccionar los mejores modelos. Los modelos originales sin estructura de correlación (independencia de las observaciones) fueron comparados con modelos con estructura de auto-correlación a fin de tener en cuenta la correlación temporal de los datos. Se testearon estructuras de simetría compuesta y autorregresivas de orden 1. Ninguno de estos modelos fue mejor que el modelo original sin estructura de correlación, por lo que se muestran los efectos de los modelos originales usando el método de máxima verosimilitud restringida (REML). Se testearon los supuestos de normalidad de los datos y homogeneidad de varianza en base a los residuales estandarizados mediante análisis gráficos (Zuur et al., 2009).

En la etapa de exploración de datos se pudo observar que la relación para MO y Nt mostraban tendencias no lineales, probablemente debidas a variaciones en el protocolo de aplicación en algunos sitios/años. Teniendo en cuenta esto, y debido a que el interés era ver una tendencia al largo plazo, se prefirió ajustar modelos lineales a complejizar el modelo con modelos no-lineales y parámetros sin sentido biológico y predictivo.

Resultados

Parámetros de suelo

La variación entre sitios en los parámetros de suelo fue de 0.21%, 0.011% y 3.35 mg kg^{-1} para MO, Nt y Pe, respectivamente. Los parámetros evolucionaron positivamente a lo largo de los años **(Figura 1)**. El efecto fue significativamente ($p<0.01$) superior para el tratamiento AF comparado con la fertilización comúnmente usada por el productor. Los modelos explicaron de manera adecuado los datos observados (r^2 de 0.69, 0.62 y 0.35 para MO, Nt y Pe, respectivamente).

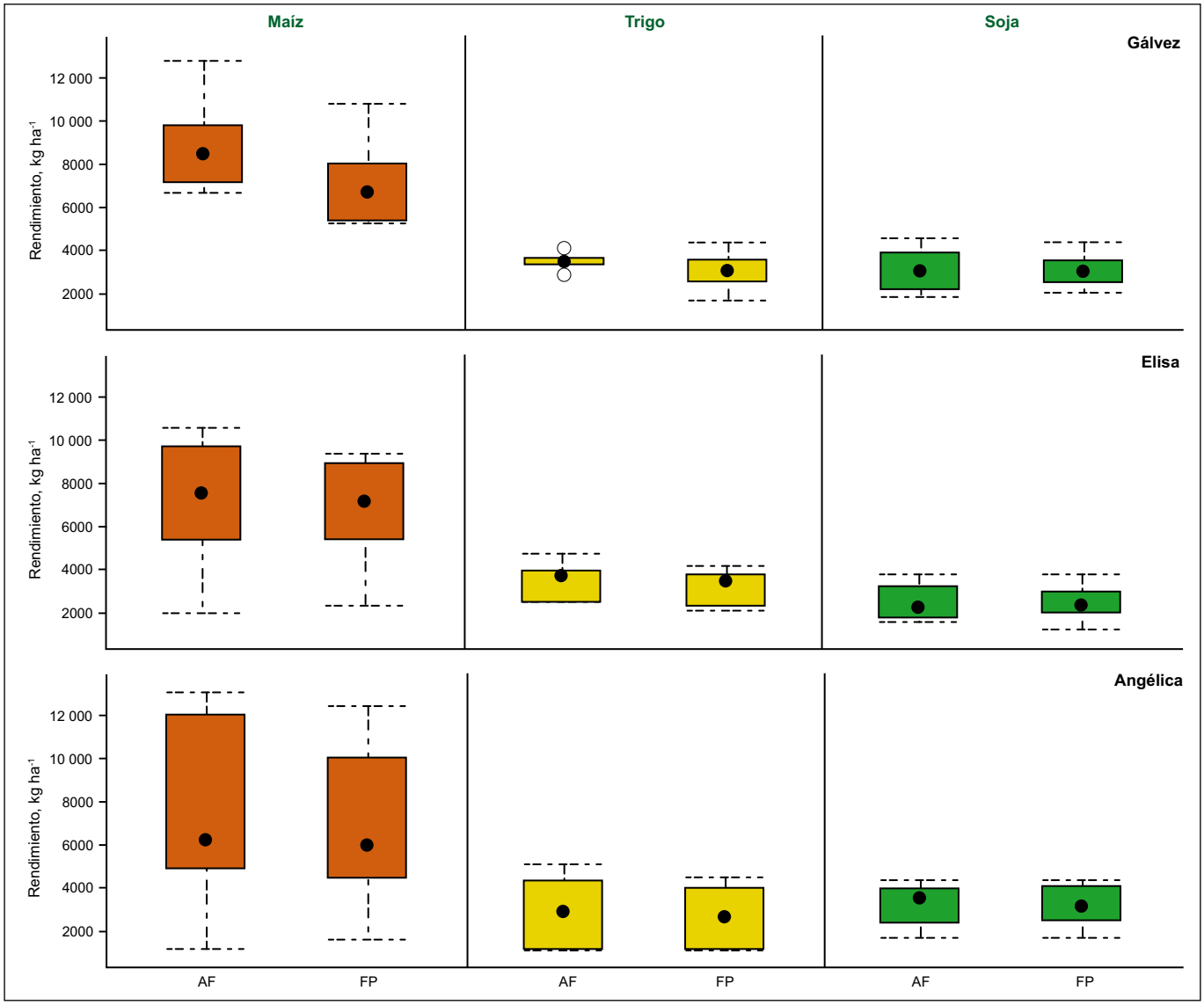

Figura 2. Boxplot de rendimiento por cultivo para ambos esquemas de fertilización: AF (Alta fertilización) y FP (Fertilización del productor).

Bajo el planteo de AF, la MO aumentó 0.0409% por año, mientras que este incremento fue significativamente menor (0.0407% por año) con la fertilización del productor **(Figura 1)**. El Nt aumentó 9.6 x 10^{-4} por año con AF, mientras que este aumento fue de 9.4 x 10^{-4} por año con FP. Finalmente, el Pe del suelo se incrementó a una tasa de 0.38 mg kg^{-1} por año con AF, mientras que este aumento fue de 0.37 mg kg^{-1} por año con la fertilización del productor. A pesar de la baja magnitud de los efectos, todos fueron significativos ($p<0.01$).

Rendimientos de los cultivos

No se observó ganancia significativa en los rendimientos por el manejo de la fertilización cuando los cultivos fueron analizados por separado, debido a la variación anual en los rendimientos **(Figura 2)** y lo acotado de la serie temporal de datos (7 años). Particularmente puede observarse un efecto positivo sobre los rendimientos de maíz con AF en el sitio Gálvez y un aumento en los rendimientos máximos en Elisa y Angélica, pero el efecto no fue significativo en el análisis conjunto.

Cuando se analizó el rendimiento global, se observó una tendencia similar a los parámetros de suelo, aunque los efectos de fertilización no fueron significativos. El manejo AF mostró un efecto positivo de 361±466 kg glucosa ha^{-1} por año de rotación, siendo similar a la ganancia con BF (359 kg glucosa ha^{-1} $año^{-1}$). Las variaciones en los rendimientos estuvieron más explicadas por variaciones en las precipitaciones anuales.

Resultados económicos

El resultado económico fue positivo, en mayor medida, en el esquema de AF. La mayor diferencia se observó en el sitio Gálvez, de mayor rendimiento por unidad de superficie **(Tabla 3**). En este sitio, los efectos de la rotación con AF produjeron una mejora económica del orden de los 131 US$ ha^{-1}.

Tabla 3. Resultado económico en el sitio Gálvez según esquema de fertilización: FP (Fertilización del productor) y AF (Alta fertilización).

Rotación	FP	AF
	------- US$ ha^{-1} $año^{-1}$ -------	
Promedio 7 años M-T/S	742	873
Promedio 7 años Trigo/Soja 2°	979	1090
Promedio 7 años Maíz	504	655

Conclusiones

- El manejo de la fertilización tuvo un efecto positivo sobre las propiedades químicas del suelo, con un impacto significativo principalmente sobre la MO y el Pe.
- El manejo de la fertilización tendió a aumentar el rendimiento global de la rotación.
- Si bien con mayores niveles de inversión (costo del fertilizante) por unidad de superficie trabajada, los efectos de la AF mejoraron los resultados económicos respecto del manejo convencional de la fertilización en la zona (FP).
- El esquema de rotación con gramíneas y bajo AF permitiría recomponer ambientes desde el punto de vista químico de una manera económicamente viable.

Agradecimientos

A la Comisión de Agricultura de la zona CREA Santa Fe Centro y a los responsables de cada sitio: Sr. Martin Sartori – Sartori Hnos. (CREA Elisa-H1°), Sr. Daniel Burini (CREA Gálvez) y Sr. Angel Boschetto (CREA Rafaela).

Bibliografía

García F., y M.F. González Sanjuan. 2013. La nutrición de suelos y cultivos y el balance de nutrientes: ¿Cómo estamos? Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica. 9:2-7.

Gerster, G., A. Gargicevich, G. Cordone, y C. González. 2002. Factores edáficos y prácticas culturales asociadas al rendimiento de soja. XVIII Congreso Argentino de las Ciencias del Suelo: 297 p.

Martínez, F. 2011. El suelo y los modelos productivos: Una aproximación a la problemática agrícola de la Región Pampeana Norte. Actas Simposio Fertilidad 2011. IPNI Cono Sur-Fertilizar AC. Rosario, Santa Fe.

Pinheiro, J., D. Bates, S. DebRoy, y D. Sarkar. 2014. R Core Team (2013) nlme: Linear and nonlinear mixed effects models R package version 3.1-117. URL: http://cran. r-project. org/web/packages/nlme/index. html.

Sinclair T.R., y C.T. de Wit. 1975. Photosynthate and nitrogen requirements for seed production by various crops. Science 189:565-567.

Zuur A.F., E.N. Leno, N.J. Walker, A.A. Saveliev, y G.M. Smith. 2009. Mixed effects models and extensions in ecology with R. Springer, New York.

Efecto de la fertilización con fósforo, azufre y zinc en el cultivo de soja en la región pampeana norte de Argentina

Laureano Boga[1,*] y Hugo Ramirez[1]

Introducción

En Argentina se cultivan más de 20 millones de hectáreas de soja (SIIA, 2014). Tomando en cuenta la superficie cosechada en la campaña 2012/13 de los cultivos de trigo, cebada, maíz, sorgo granífero, girasol y soja, esta última representó en términos relativos el 62% del área total de estos cultivos (SIIA, 2013), resaltando la importancia relativa de la oleaginosa en la producción de granos del país. El consumo de fertilizantes en el cultivo de soja para la campaña 2012/13 fue estimado en 890 000 toneladas constituido básicamente por productos fosforados y azufrados siendo la dosis promedio de uso de 76 kg ha^{-1} (Fertilizar, 2013). Considerando los requerimientos de nutrientes determinados para el cultivo por Ciampitti y García (2007) el nivel de fertilización actual estaría muy lejos de cubrir dichos requerimientos.

Respecto al impacto de la nutrición en la producción, nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) son los nutrientes que en mayor medida limitan el rendimiento, mientras que los cationes como potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) lo hacen solo en situaciones particulares y los micronutrientes pueden hacerlo en ambientes de alta producción (Salvagiotti, 2013).

La fertilización nitrogenada es poco frecuente debido a que el proceso de fijación biológica de N (FBN) puede cubrir alrededor del 50% del N acumulado en las condiciones de producción de la Región Centro Norte Argentina. Las fertilizaciones con N a la siembra no muestran respuestas en rendimiento y las aplicaciones en estados reproductivos (R1-R3) han mostrado resultados variables (García et al., 2009).

La fertilización fosforada es una práctica en adopción creciente debido a la posibilidad de predecir la magnitud de respuesta en función de la disponibilidad de P del suelo. Para la región pampeana argentina es posible obtener respuestas a aplicaciones de 20 kg de P de 300 y 200 kg ha^{-1} para disponibilidades de 10 y 12 mg. kg^{-1} de P, respectivamente (Gutiérrez Boem et al., 2005). Sin embargo, investigaciones recientes sugieren que dichos umbrales de disponibilidad de P que determinan la respuesta, pueden variar bajo secuencias de monocultivo de soja (Bermúdez et al., 2014).

La fertilización azufrada es una práctica también habitual en la Región Centro Norte Pampeana basada en la respuesta encontrada ya en la década pasada, a pesar de que aun no se han desarrollado métodos de diagnóstico confiables basados en los análisis de suelo (Gutiérrez Boem et al., 2005).

Respecto a los micronutrientes, los más estudiados en la región pampeana son molibdeno (Mo), boro (Bo), zinc (Zn) y manganeso (Mn), presentando la respuesta a éstos, resultados contrastantes debido a que las deficiencias no son generalizadas o están asociadas a cultivos de alto rendimiento (Salvagiotti, 2013). Ferraris (2013) determinó que la deficiencia de cationes como el Zn, de baja movilidad en el suelo, puede ser diagnosticada y asociada con el nivel de respuesta del cultivo más fácilmente; tal como lo determinó este autor para maíz, no existiendo dicha información para el cultivo de soja. Sin embargo, Shittu et al. (2013) hallaron respuestas en soja e interacción positiva al agregado de P y Zn en suelos con 0.5 mg kg^{-1} de Zn (DTPA) para 30 y 2 kg ha^{-1}, respectivamente; cuando fueron aplicados a la siembra. Rose et al. (1981), determinaron respuestas en distintas variedades de soja a la aplicación foliar de 4 kg ha^{-1} de Zn como sulfato siendo dichas respuestas diferentes entre variedades y entre sitios experimentales.

Considerando que la disponibilidad de Zn en la Región Pampeana podría estar limitando el rendimiento de los cultivos (Sainz Rozas et. al., 2013), que soja representa más del 60% del área de cultivos extensivos en Argentina y que existen evidencias de respuesta a Zn en soja en otras geografías, el objetivo de este estudio fue: i) evaluar la eficiencia de uso del P (EUP) aplicado en fertilizaciones

Tabla 1. Análisis de suelos de los sitios experimentales (0-20 cm). Campañas 2012-13 y 2013-14.

Sitio y año	Perg	Frr	Cf	Chj	DA	Perg	Co	Cf	Oli	Inrv	9J	Am
	2012				2013							
MO (%)	2.64	2.77	2.51	1.45	3.37	3.16	2.8	2.87	2.3	2.9	4.4	1.5
pH	5.7	6	6.1	6.2	5.4	5.4	6.1	6.1	5.8	6.1	5.8	6.1
P Bray (mg kg^{-1})	8.1	7.7	5.2	22.9	48.0	29.7	11.4	17.9	15.0	13.0	12.4	7.6
S-SO_4 (mg kg^{-1})	5.7	6.1	8.2	5.9	10	11	10	6.5	11	9.0	7.2	2.0
Zn (mg kg^{-1}) DTPA	0.5	0.5	0.5	0.4	1.3	0.9	0.8	0.8	1.0	0.7	0.5	0.4

[1] **Mosaic de Argentina.** [*]**Correo electrónico: laureano.boga@mosaicco.com**

Tabla 2. Estrategias de fertilización evaluadas en soja de primera. Protocolo común a todos los sitios. Los fertilizantes fueron aplicados al costado y por debajo de la línea al momento de la siembra.

Tratamiento	P	S	Zn	Fuente
	--------Nutrientes, kg ha^{-1} --------			
T1	0	0	0	-
T2	20	0	0	Fosfato monoamónico (FMA, 11-23-0)
T3	20	10	0	Mezcla física 40% de superfosfato simple (SFS, 9% P y 12% S) + 60% de FMA
T4	20	10	1	Mezcla química, MicroEssentials™ (12-17.4-0-10S-1Zn)

a la siembra con fertilizantes fosforados simples (P), combinados con S (PS) y Zn (PSZn); y ii) determinar la respuesta a Zn en el cultivo de soja de primera sobre una nutrición de base de 20P+10S.

Materiales y métodos

Durante las campañas 2012/13 y 2013/14 se instalaron doce ensayos a lo largo de la Región Centro Norte Pampeana. En la campaña 2012, las localidades fueron: Pergamino (Perg_2012), Ferre (Frr_2012), Cafferatta (Cf_2012) y Chaján (Chj_2012); mientras que durante el ciclo 2013 las localidades fueron Diego de Alvear (DA_2013), Pergamino (Perg_2013), Colón (Co_2013), Cafferatta (Cf_2013), 9 de Julio (9J_2013), Oliveros (Oli_2013), Inriville (Inrv_2013) y América (Am_2013). El diseño para todos los ensayos fue en bloques aleatorizados con 3 ó 4 repeticiones por tratamiento. Los ensayos fueron sembrados y cosechados mecánicamente.

La conducción de los ensayos fue realizada por los siguientes investigadores o empresas de investigación y desarrollo: Oliveros (Dr. Fernando Salvagiotti, INTA Oliveros), Colón, Pergamino y Ferré (Ing. Agr. MSc. Gustavo Ferraris, INTA Pergamino), América (DZD Agro), Chaján (Dr. Gabriel Espósito, Universidad Nacional Río IV), Diego de Alvear-Cafferatta (Agroconsultor), 9 de Julio (Clarion), e Inriville (Okandú). En la **Tabla 1** se presentan los análisis de suelo de los sitios experimentales y en la **Tabla 2** se describen los tratamientos evaluados.

Se estimaron la eficiencia de uso de fósforo (EUP), definida como kg soja obtenido por kg de P aplicado, para niveles de P Bray de hasta 10 mg kg^{-1} y de 11 a 15 mg kg^{-1} para los tres tratamientos de fertilización (20P, 20P+10S, 20P+10S+1Zn) y la relación insumo:producto (I/P); definida como kg de soja necesarios para pagar un kg de P de las distintas fuentes utilizadas.

Resultados y discusión

Esta red de ensayos abarcó una amplia variedad de suelos, desde Haplustoles del sur de Córdoba, Argiudoles del norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe, Hapludoles del centro de Buenos Aires y Hapludoles énticos con más de 50% de arena en el oeste de Buenos Aires, generando un amplio espectro de disponibilidades de fósforo (P); materia orgánica (% MO), pH y Zinc (Zn) **(Tabla 2)**.

Los sitios de (Chj_2012); (DA_2013); (Perg_2013) y (Cf_2013) presentaron niveles de P muy por encima de 11-13 mg kg^{-1}, rango considerado como suficiente para alcanzar el 90% del rendimiento máximo del cultivo de soja (García et al., 2005). Los sitios de (Co_2013); (Oli_2013) y (Inrv_2013) estuvieron cercanos o dentro del rango crítico, mientras que en (Perg_2012); (Frr_2012); (Cf_2012); (9J_2013) y (Am_2013) los valores fueron inferiores al nivel crítico. De este modo el 38%, 23% y 39% de los sitios evaluados estuvieron por encima, cercanos y por debajo, respectivamente, del nivel de suficiencia citado anteriormente.

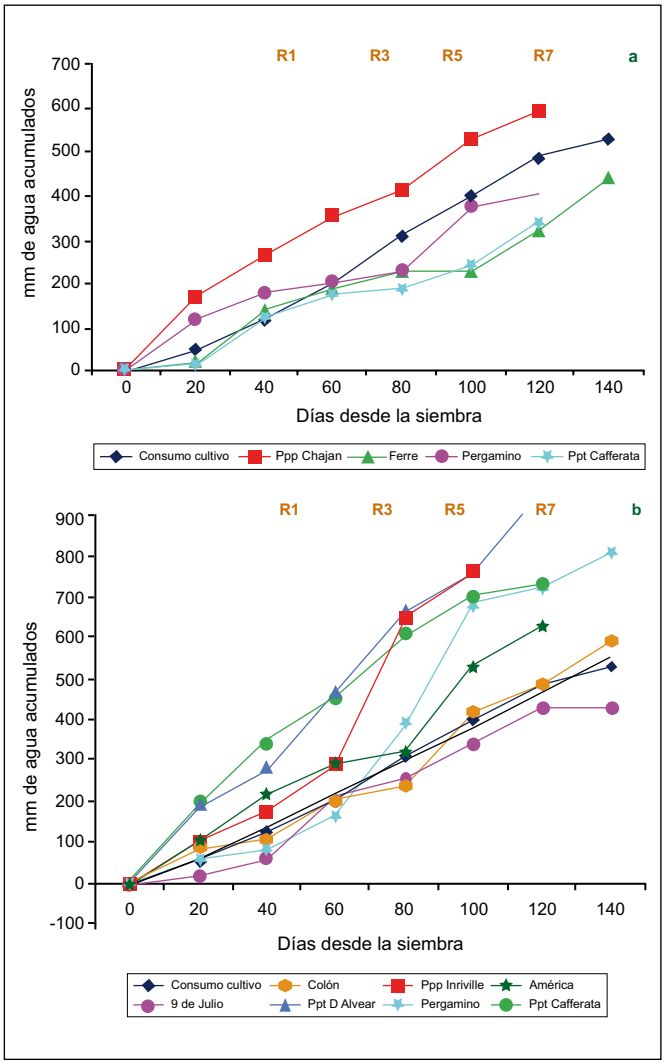

Figura 1. Consumo estimado de agua (Andriani, 1997) y precipitaciones acumuladas durante el ciclo de cultivo para campaña 2012-13 (a) y 2013-14 (b).

Tabla 3. Rendimiento en grano de soja para los tratamientos evaluados en los 12 sitios de ensayo. Campañas 2012-13 y 2013-14.

Sitio		Testigo	20P	20+10S	20P+10S+1Zn	CV %	Valor -p
		Rendimiento, kg ha^{-1}					
Perg	2012	3199 C	3986 AB	3751 B	4187 A	7.5	0.006
Frr	2012	4623 B	4717 B	4895 B	5644 A	4.5	0.003
Cf	2012	4351	4577	4642	4593	3.9	0.16
Chj	2012	3289 C	3551 B	3726 AB	3858 A	4.9	0.008
DA	2013	4499	4694	4517	4657	2.7	0.13
Perg	2013	3588	3641	3698	3983	6.8	0.19
Co	2013	4143 B	4169 B	3803 C	5088 A	5.9	0.01
Cf	2013	3796 C	4207 B	4410 A	4469 A	2.3	0.0001
Oli	2013	3383 B	3571 A	3563 A	3441 AB	3.1	0.09
Inrv	2013	3186	3288	3197	3117	3.9	0.34
9J	2013	6776 C	7349 B	6731 C	8177 A	4.1	0.0004
Am	2013	4121	4316	4335	4307	5.1	0.47

** Rendimientos con letras distintas, para un mismo sitio, difieren significativamente entre sí.*

Los niveles de S-Sulfato hallados superficialmente (0-20 cm) estuvieron muy cercanos o por debajo de 10 mg kg^{-1}, valor este considerado como umbral de respuesta en algunas referencias internacionales (García et al., 2009).

Respecto a Zn en el 90% de los sitios la disponibilidad fue inferior a 0.9 mg kg^{-1}, valor considerado como umbral para extracciones con DTPA por Sims y Johnson (1991).

La relación entre las precipitaciones acumuladas (Pp) en ciclo de cultivo para cada sitio y el consumo de agua (C) (Andriani, 1997), se presenta en la **Figura 1 a y b**. En la campaña 2012, las Pp durante los estadios reproductivos del cultivo (R1-R5) estuvieron cercanas o por debajo de C en tres de los cuatro sitios evaluados **(Figura 1a)**, mientras que para 2013 las Pp superaron ampliamente el C en seis de los ocho sitios **(Figura 1b)**.

El rendimiento promedio de las localidades ensayadas durante los dos años fue de 4329 kg ha^{-1}, siendo el sitio (9J_2013) el de mayor rendimiento superando los 7000 kg ha^{-1}, y el sitio de (Inrv_2013) el de menor rendimiento con 3100 kg ha^{-1}.

Se observaron respuestas significativas a alguno de los tratamientos de fertilización sobre el testigo en 7 de los 12 sitios ensayados (Perg_2012, Frr_2012, Chj_2012, Co_2013, Cf_2013, 9J_2013 y Oli_2013), los cuales presentaron niveles de P Bray cercanos o por debajo del umbral de respuesta citado anteriormente.

Considerando los 7 sitios con respuesta estadísticamente significativa a la fertilización **(Tabla 4)**, la respuesta a la aplicación única de P (Testigo vs 20 P), fue de 260 kg ha^{-1}; la respuesta a la aplicación combinada de P+S (Testigo vs 20P+10S), fue de 193 kg ha^{-1}; mientras que la respuesta a P+S+Zn (Testigo vs 20P+10S+1Zn), fue 548 kg ha^{-1}. La diferencia promedio de respuesta debida al Zn fue de 355 kg ha^{-1} (20P+10S vs 20P+10S+1Zn).

En los sitios con nivel de P Bray inferior a 10 mg kg^{-1}, la EUP fue de 20.5, 13.0 y 56.8 kg soja por kg de P, mientras que en los sitios con nivel de P de entre 11 y 15 mg kg^{-1} la EUP fue de 10.44, 7.60 y 27.95 kg soja por kg de P para P, PS y PSZn, respectivamente.

La relación de precios (kg soja para comprar 1 kg de P) calculada en base a valores de julio 2014 fue de 8.91, 9.30 y 13.54 kg de soja por kg de P como FMA, mezcla física con P y S y mezcla química con P, S y Zn, respectivamente. La EUP superó la relación de precios en todos los tratamientos cuando la disponibilidad de P fue menor a 10 mg kg^{-1} y solamente lo hizo en el tratamiento PSZn cuando la disponibilidad de P se situó entre 11 y 15 mg kg^{-1} **(Figura 2)**.

El patrón de respuesta a Zn se analizó en relación al nivel de Zn en suelo **(Figura 3)** y al rendimiento promedio del sitio **(Figura 4)**. En el primer caso, empleando el método gráfico de Cate y Nelson (1965) y considerando una respuesta positiva y un umbral de respuesta de 0.9 mg kg^{-1} (Rose et al., 1981), se determinó un 58.3% de casos diagnosticados correctamente. Respecto a rendimiento se observa una tendencia a aumento de respuesta a medida que aumenta el potencial de rendimiento del sitio.

Tabla 4. Análisis combinado de los 7 sitios con respuesta a la fertilización.

Tratamiento	Rendimiento, kg ha^{-1}
Testigo	4079 C
20P	4339 B
20+10S	4272 B
20P+10S+1Zn	4627 A
	p>F
Sitio	<0.0001
Tratamiento	<0.0001
Sitio*Tratamiento	<0.0001

Conclusiones

- Los tratamientos de fertilización generaron respuestas significativas en rendimiento en el 58% de los casos evaluados.

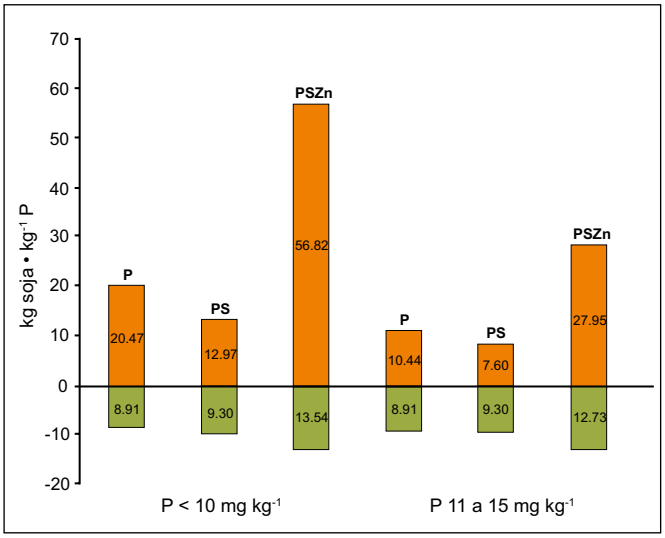

Figura 2. Eficiencia de uso del P aplicado en soja en cada estrategia de fertilización (barras verdes) y sus respectivas relaciones de precios según las fuentes de fertilizantes (barras anaranjadas) en dos rangos de niveles de P Bray-1 a 0-20 cm.

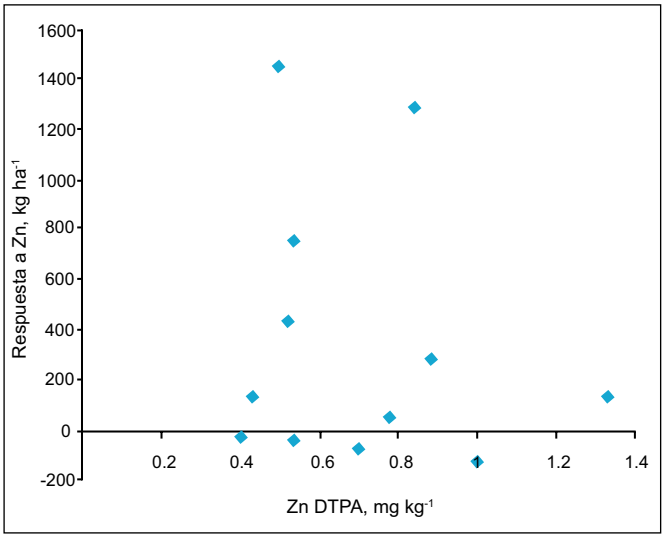

Figura 3. Respuesta a Zn en soja en función de la disponibilidad de Zn en suelo.

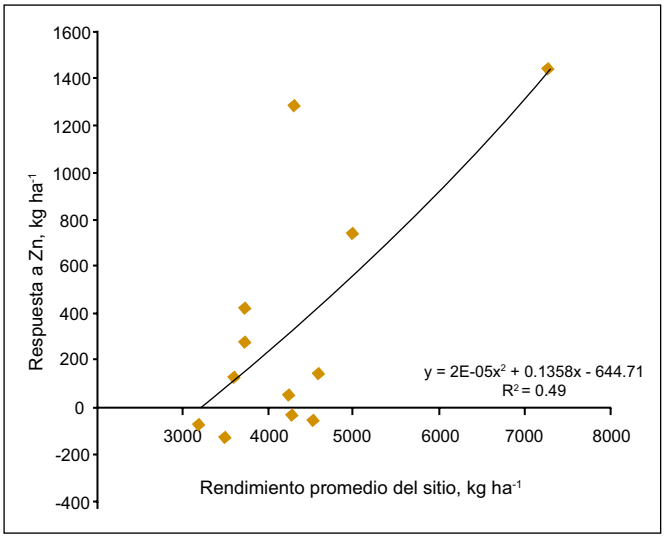

Figura 4. Respuesta a Zn en soja en función del rendimiento promedio del sitio.

- La EUP fue consistentemente mayor a la relación de precios cuando el nivel de P Bray fue menor a 10 mg kg^{-1}.
- La mayor diferencia entre EUP y relación de precios (mayor beneficio económico) se dio cuando el P fue aplicado junto con S y Zn.
- Los dos factores que mostraron una cierta asociación con la respuesta a Zn observada fueron el nivel de este nutriente en suelo y el potencial de rendimiento del sitio.
- Las fertilizaciones con 20P+10S+1Zn mostraron los mayores retornos económicos a la inversión sobre los tratamientos con 20P o 20P+S en suelos con menos de 10 mg kg^{-1} de P Bray, y niveles de Zn menores a 1 mg kg^{-1} en ambientes de producción superiores a 3000 kg ha^{-1}.

Bibliografía

Andriani, J.M. 1997. Uso del agua y riego. *En* El cultivo de la soja en la Argentina. INTA, Centro Regional Córdoba. EEA Marcos Juárez–EEA Manfredi. Coordinación Subprograma Soja. pp. 142-150.

Ciampitti, I.A., y F.O. García. 2007. Requerimientos nutricionales, absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. IPNI. Archivo Agronómico. 11:13-16.

Bermúdez, M., M. Díaz-Zorita, G. Espósito, G. Ferraris, G. Gerster, M. Saks, F. Salvagiotti, y L. Ventimiglia (ex-aequo). 2014. Fertilización con fósforo en secuencias continúas de soja. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica. 14:2-5.

Fertilizar. 2013. Consumo de Fertilizantes campaña 2012-13. www.fertilizar.org.ar [consulta: 06 febrero 2014].

Ferraris, G.N. 2013. Micronutrientes en Región Pampeana Argentina. Posicionamiento y tecnología de Aplicación. Actas Simposio de Fertilidad 2013.; Rosario, pp 124-134.

García, F.O., e I.A. Ciampitti. 2009. La Nutrición del cultivo de Soja. *En*: García, F.O., I.A. Ciampitti, y H. Baigorri (Eds). Manual de Manejo del Cultivo de Soja. Agroeditorial Alejandro Matthies. Buenos Aires, Argentina pp. 33-73.

García, F.O., L. Picone, y A. Berardo. 2005. Fósforo. *En*: Echeverría, H.E., y F.O. García (Eds.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA. Buenos Aires, Argentina. pp. 99-121.

Gutierrez Boem, F.H., y J.D. Sheiner. 2005. Soja. *En*: Echeverría, H.E., y García, F.O. (Eds.) Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Ediciones INTA.Buenos Aires, Argentina. pp. 283-297.

Rose, I.A., W.L. Felton, y L.W. Banks. 1981. Responses of four soybeans varieties to foliar zinc fertilizer. Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry. 21:236-240.

Sainz Rozas, H. R., M. Eyherabide, H.E. Echeverría, P.A. Barbieri, H.P. Angelini, G.E. Larrea, G.N. Ferraris, y M.R. Barraco. 2013. Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos?. *En* Simposio Fertilidad 2013. Mayo de 2013. Rosario, Santa Fé. Argentina.

Salvagiotti, F. 2013. Cómo podemos aumentar los rendimientos de soja?. La visión desde la nutrición. Proc Simposio de Fertilidad 2013. Rosario, pp. 45-50.

SIIA. 2014. Sistema integrado de información Agropecuaria. Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca de la Nación. www.siia.gov.ar [consulta: 05 febrero 2014].

Shittuo, S., y J.A. Ogunwale. 2013. Phosphorous-Zinc interaction for soybean production in soil developed on charnoclite in Ekite State. Agriculture Journal. 8:78-82.

Sims, J.T., y G.V. Johnson. 1991. Micronutrient soil tests. In micronutrients in agriculture (Book series 4): Mortvedt, J., F.R. Cox, L.M. Shuman, y M.R. Welch (Eds.). Ediciones SSSA. Madison, Wisconsin, USA. pp. 427-476.

Dinámica del potasio foliar en un ensayo de fertilización potásica en olivo

M. Salas[2,*], O. Pernasetti[1], P. Watkins[1], A.L. Alurralde[1]

Introducción

El potasio (K) es un macronutriente esencial requerido en grandes cantidades para el normal crecimiento y desarrollo de los cultivos. Cumple un rol importante en la activación de gran número de enzimas (conociéndose más de 60 activadas por este catión), que actúan en diversos procesos metabólicos tales como fotosíntesis, síntesis de proteínas y carbohidratos; mantenimiento del balance hídrico interno, ya que está relacionado con la apertura y cierre estomático, y crecimiento meristemático (Mengel y Kirkby, 1987). Al participar de estos procesos metabólicos, el K actúa favoreciendo el crecimiento vegetativo, la fructificación, la maduración y calidad de los frutos (Conti, 2000). Cantidades adecuadas de K son importantes contribuyentes en la adaptación de los cultivos al stress causado por factores bióticos y abióticos, tales como sequías, salinidad, heladas y ataques de insectos o enfermedades (Kafkafi, 1990, 1997). El K se encuentra normalmente en un rango entre 1% a 4% de la materia seca (MS), pudiendo alcanzar más del 8% en algunos casos (Raven et al., 1976; Leigh, 1989). El K es muy móvil dentro de las plantas; moviéndose por el xilema y el floema en dirección hacia tejidos meristemáticos.

La concentración de K en la hoja de las plantas varía a lo largo de la estación de crecimiento. El contenido de K en los tejidos de la planta se define generalmente como bajo (deficiente), adecuado (suficiente), o alto (excesivo) para un determinado órgano de la planta. Para conocer el estado nutricional de la planta se recurre con frecuencia al análisis de la lámina foliar. Este análisis permite detectar desequilibrios nutritivos con anterioridad a que aparezcan los síntomas de deficiencia en las plantas y debe complementarse con los análisis de suelo (Sierra Bernal et al., 2000). La definición de un nivel de concentración de K como "bajo" o ''alto'', varía entre cultivos y entre órganos vegetales, tales como hojas, tallos y frutos. La concentración de K varía significativamente entre los distintos órganos de la planta. Los tejidos carnosos como frutos y hojas en sus etapas tempranas de desarrollo, contienen altos niveles de K.

Los requerimientos de K en el olivo no solo son elevados, sino que por su esencial participación en importantes procesos metabólicos, lo hacen el macronutriente con mayor influencia directa en la calidad del fruto y del aceite. Se observó en análisis de orujo de la aceituna, que el mayor nivel encontrado de los tres macronutrientes es el de K (Pernasetti et al., 2010).

Numerosas tablas de niveles de K en hoja de olivo (*Olea europea* L.) indican un nivel de 0.8% como crítico, debajo de este valor el K ya es considerado deficiente. El aporte de K cuando la concentración en hoja es menor al valor adecuado (0.8%) mejora el nivel nutritivo en este elemento y disminuye el riesgo de llegar a situaciones de deficiencia de las que es difícil salir (Navarro García y Arquero Quilez, 2000).

El objetivo de este trabajo fue registrar la dinámica del K foliar en plantas de olivo a lo largo del ciclo vegetativo y con ello poder determinar la o las épocas de mayor requerimiento de este elemento por el olivo.

Materiales y métodos

El ensayo fue realizado en una finca olivícola ubicada en la Ruta Nacional 38, a 50 km de la ciudad capital de Catamarca, Dpto. Capayán, provincia de Catamarca, Argentina. Los suelos en que se encuentra la plantación de olivos se clasificaron como Torriortents típicos. Los niveles de K intercambiable en el suelo fueron moderados a buenos (0.8 a 1.5 $cmolc_+ kg^{-1}$).

En la finca se seleccionaron cuatro lotes de 4.5 ha cada uno, con plantas de la variedad Arbequina en plena producción, plantación 1999, en un marco de 7 x 4 m (357 pl ha^{-1}). En cada lote se definieron al azar 4 Unidades Experimentales (UE) conformadas por 9 plantas cada una de las cuales se tomaron muestras foliares mensualmente para su análisis.

La fertilización potásica se llevó a cabo mediante el riego por goteo, desde principios de septiembre hasta la primera quincena de abril. Se utilizó tiosulfato de K (25% K_2O, 17% S) en cuatro dosis: T0:0 g K pl^{-1}; T1:75 g K pl^{-1}; T2:150 g K pl^{-1}; T3:300 g K pl^{-1}.

Las muestras foliares se tomaron de la parte media de las brindillas del año, debajo del brote apical **(Foto 1)**, en muestras compuestas de las 9 plantas que integran cada UE y de diferentes puntos cardinales de las plantas. En laboratorio se procesaron las muestras mediante lavado, secado, molienda y la metodología química de digestión húmeda perclórica y lectura en el fotómetro de llama para la determinación de K.

Resultados y discusión

Los niveles foliares de K no registraron diferencias significativas entre tratamientos ($p>0.10$). Sin embargo, se pueden observar distintas situaciones que consideramos

[1] Cátedra de Edafología. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Catamarca. Argentina.
[2] Cátedra de Química General e Inorgánica. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Catamarca. Argentina. *Correo electrónico: monidelis@yahoo.com.ar

Foto 1. Vista de la plantación evaluada (grande), y detalle de la sección muestreada para el análisis foliar (pequeña).

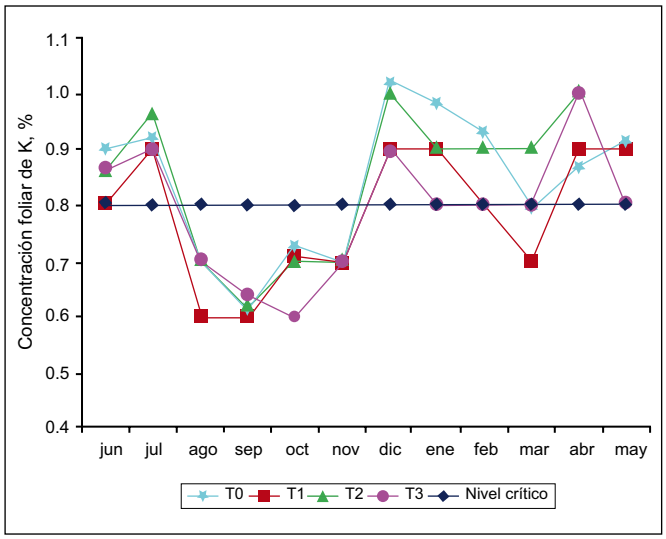

Figura 1. Comportamiento del K foliar en plantas de olivo (*var*. Arbequina) para diferentes tratamientos de fertilización potásica. Promedios de tres años. Catamarca, Argentina.

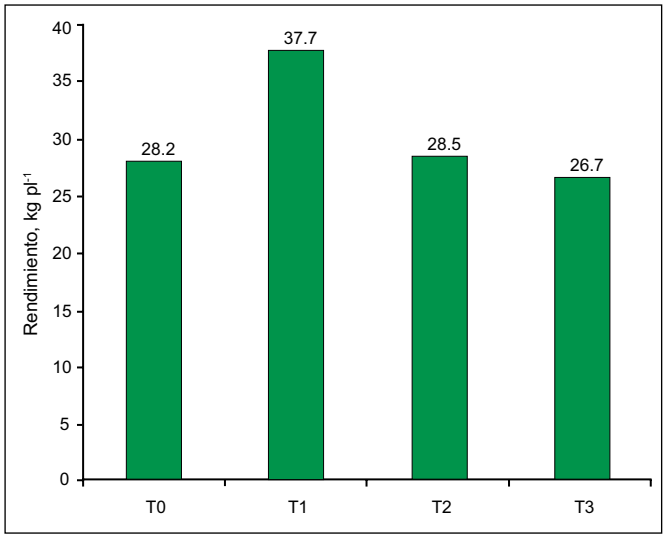

Figura 2. Rendimiento de olivo (*var*. Arbequina) para diferentes niveles de fertilización potásica. Promedio de tres años. Catamarca, Argentina.

de mucha utilidad **(Figura 1).** Los niveles desde junio a diciembre tienen un comportamiento similar en cuanto a los niveles que se obtienen. A partir de esa fecha hasta al final de la campaña cuando todavía la fruta se encuentra en planta (marzo-abril), las curvas comienzan a separarse, con niveles menores a 0.8% en el T1, tratamiento que logró el mayor rendimiento a lo largo del ensayo **(Figura 2)**. Los T2 y T3 registraron rendimientos menores pero mayores niveles de K en hoja. Al final de la campaña (mayo- junio), los niveles de K se mantienen por encima del valor crítico (0.8%) en todos los tratamientos.

Para los 3 años de muestreo, el comportamiento del nivel de K foliar es similar. Si tomamos curvas individuales, por ejemplo el Testigo, vemos que en los meses de la primavera el K es muy requerido por el crecimiento de raíces, brotes, flores y formación de frutos, de manera que la concentración foliar disminuye **(Figura 3)**. Luego en los meses de verano se equilibra y vuelve a bajar en el otoño, cuando la fruta madura y la extracción es mayor, y coincide con otro momento de crecimiento de raíces.

En una experiencia de 10 años en un cultivo de palmas aceiteras se observa que el K foliar se mantiene entre el 0.9 y 1% por la aplicación de K y a partir del 50 año comienza a declinar (Ollagnier y Olivin, 1986). Entre los años 3 y 8 no se observan diferencias significativas en relación al efecto de la aplicación de fertilización potásica en el K foliar, y recién a partir del noveno año comienzan a observarse diferencias. Dichos autores afirman que este ensayo muestra que en cultivos perennes es esencial la combinación de fertilizaciones por largos periodos con análisis foliares correspondientes, para obtener conclusiones razonables y comparables. Nuestros resultados con una plantación mayor a 12 años coinciden con el hecho de observar niveles estables pero siempre cercanos al valor crítico de 0.8%. Estos niveles aún próximos al crítico pueden explicar parcialmente la ausencia de respuesta del porcentaje de K en hoja a la fertilización potásica a pesar de que, por la edad de la plantación, haya expectativa de respuesta.

El flujo de K desde las raíces está determinado en gran parte por la tasa de crecimiento de la planta (Pitman, 1972). Una vez que las hojas más viejas de la planta han alcanzado sus concentraciones específicas de K, el flujo neto de K desde las raíces satisface solo las cantidades necesarias para el desarrollo y crecimiento de nuevas raíces.

Los requerimientos de K necesarios para alcanzar un óptimo crecimiento cambian con las etapas de desarrollo. Los frutos y hojas verdes contienen generalmente niveles más altos de K en sus primeros estadíos (Fageria et al., 1991). Con el aumento de la carga de frutos aumenta la translocación de K desde las hojas y tallos hacia los frutos. Si la tasa de demanda de K en esta etapa es mayor que el K absorbido desde el suelo, el resto de los órganos pueden contribuir a las partes reproductivas con el K acumulado en sus tejidos. Consecuentemente,

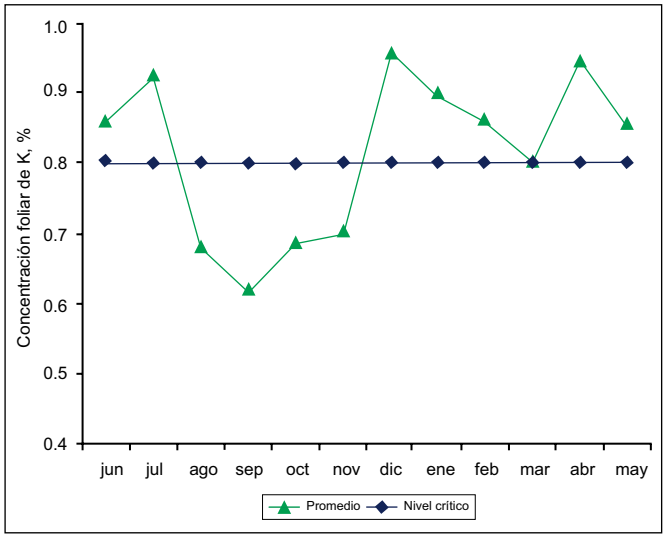

Figura 3. Evolución de la concentración promedio de K en hoja de olivo (*var.* Arbequina). Promedio de tres años. Catamarca, Argentina.

la concentración de K en las hojas declina durante la fructificación. Posteriormente, cuando se cosechan los frutos, aumenta el contenido de K foliar en los árboles frutales (Conradie, 1981). En nuestro ensayo podemos observar este comportamiento si comparamos al tratamientos testigo (T0) que tuvo un comportamiento similar a los tratamientos fertilizados, pero como tuvo poca fruta no presentó la caída que si presentó el tratamientos que tuvo mayor cantidad de fruta (T1).

La translocación del K desde las hojas a los frutos en desarrollo es también notable en los árboles frutales, por ejemplo duraznos donde el K foliar disminuyó constantemente luego de la floración, mientras que los árboles sin frutas mostraron una cantidad constante de K en las hojas durante la etapa de crecimiento (McClung y Lott, 1956).

Conclusiones

- La máxima absorción de K ocurre en un lapso relativamente corto durante el periodo de activo crecimiento (primavera), momento en que disminuye el K en hoja, e indicaría que la fertilización debe comenzarse más temprano.
- Cuando el fruto crece y comienza a madurar, la provisión de K debe estar en el suelo, caso contrario, si hay una producción alta, el K tiende a disminuir por la demanda del fruto.
- Una adecuada cantidad de K debe estar presente en el suelo antes del desarrollo del fruto o debe ser provista durante las etapas más tempranas. Por el contrario, un escaso suministro de K afectará los órganos reproductivos, de tal modo que reducirá la calidad y cantidad de la producción.
- Para lograr una óptima producción se debe conocer la demanda de nutrientes por la planta, por lo tanto, es útil conocer en detalle la absorción, el movimiento, y la distribución del K dentro de la planta durante el ciclo del cultivo.

Bibliografía

Conradie, W.E. 1981. Seasonal uptake of nutrients by Chenin Blank in sand culture: 11. Phosphorus, Potassium, Calcium and Magnesium. S. African J. Enol. Vitic. 2:7-13.

Conti, M. 2000. Dinámica de la Liberación y Fijación de Potasio en el Suelo. Archivo Agronómico Nº4, Informaciones Agronómicas del Cono Sur, Nº 8. INPOFOS. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.

Fageria, N.K., V.C. Baligar, y Charles Allan Jones. 1991. Growth and mineral nutrition of field crops. Marcel Dekker Inc., New York, EE.UU.

Fishet, T. 2009. El fruto del olivo y sus mecanismos para atraer sus nutrientes. Univ de Chile. Dpto. Producción Agrícola. Proyecto LEA Innovo Corfo 05CR11PAD-08.

Kafkafi, U. 1990. The functions of plant K in overcoming environmental stress situations. In: Proc. 22nd colloquium of IPI, pp. 81-93, held in Soligorsk, USSR, IPI, Bern.

Kafkafi, U. 1997. Impact of potassium in relieving plants from climatic and soil-induced stresses. In: Food security in the WANA region, the essential need for balanced fertilization, A.E. Johnston (ed.), pp. 313-327, IPI, Bern.

Leigh, R.A. 1989. Potassium concentrations in whole plants and cells in relation to growth. In: Methods of K-reseárch in plants (21st colloquium of IPI). IPI, Bern, Switzerland.

McClung, A.C., y L.W. Lott. 1956. Mineral nutrient composition of peach leaves as affected by leaf age and position and the presence of a fruit crop. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 67:113-120.

Mengel, K. y E.A. Kirkby. 2001. Principles of plant nutrition. 5th Edition. Kluwer Academic Publisher.

Navarro García, C., y O. Arquero Quílez. 2000. Estrategias de fertilización en el olivar compatibles con el medio ambiente. Proyecto CAO97-014 CIFA. Alameda del Obispo, Córdoba. España.

Ollagnier, M., y J. Olivin. 1986. Efectos sobre la productividad, progresos genéticos y efectos de la nutrición sobre la calidad del aceite de palma. 1986. Palmas 7:2:27-29

Pitman, M.G. 1972. Uptake and transport of ions in barley seedlings 111. Correlation between transport to the shoot and relative growth ratio Aust. J. Biol. Sci. 25:905-919.

Pernasetti, O., M. Salas, P. Watkins, y A.L. Alurralde. 2010. Ensayo de fertilización potásica en olivo, Valle de Catamarca. Jornada de Actualización del Olivo. FCA. UNCA. Argentina.

Raven, P.H., Evert, R.F. y H. Curtis. 1976. Biology of plants. Worth Publishers (New York).

Sierra Bernal, C., A. Ibacache, y F. Tapia. 2000. Fertilización del olivo. Boletín Nº 45. INIA. Vallenar, Chile.

Productividad y consumo de agua de maíz tardío en el centro de San Luis (Argentina): Cambios provocados por la fertilización nitrogenada

J.L. Mercau[1, 2,*] M.A. Ibarra[1, 2] y E.G. Jobbagy[2]

Introducción

El avance y la consolidación de la frontera agrícola en el cordón semiárido central de Argentina son vigorosos en el centro de la provincia de San Luis. La producción de maíz, que ocupa la mitad del área agrícola de la provincia, enfrenta el desafío de obtener buenos rendimientos en secano, con un riesgo tolerable, en un ambiente con lluvias escasas y altamente variables (Magliano et al., en prensa). Al igual que otras regiones (Maddonni, 2012), las siembras tardías en la zona permiten aumentar la oferta hídrica porque: i) favorecen la recarga completa del perfil, y ii) ubican el periodo desde siembra a madurez fisiológica en una época del año con mayor nivel de precipitaciones. Sin embargo, como los suelos predominantes son de texturas arenosas y con bajo contenido de materia orgánica, es posible que la oferta de nitrógeno (N) sea escasa para el crecimiento del cultivo, afectando su capacidad para utilizar el agua y transformarla en rendimiento (Linscott et al., 1962; Singh et al., 1979).

Uno de los riesgos ambientales generados por el avance agrícola en el semiárido central de Argentina es desencadenado por la pérdida de agua en profundidad, y el ascenso freático y salinización/erosión que lo puede acompañar (Santoni et al., 2010; Contreras et al., 2013). La elevada capacidad de transpirar, y sus raíces profundas, permiten a los montes nativos usar toda el agua de lluvia suprimiendo el drenaje profundo y favoreciendo la acumulación de sales por debajo de los primeros metros de suelo. El agua que pierde la agricultura en profundidad arrastra estas sales, eleva la napa freática y puede disparar procesos de salinización en la superficie conocidos, en otros continentes, como "*dryland salinity*" (Scanlon et al., 2007). En el pedemonte serrano, estos aumentos de recarga freática han desencadenado la aparición abrupta de nuevos ríos salobres (Contreras et al., 2013). Al favorecer la recarga del perfil, la siembra tardía aumenta el riesgo de recarga freática. En este trabajo evaluamos el cambio que produce la fertilización nitrogenada del maíz tardío en el consumo de agua y en sus efectos sobre la productividad en grano del agua ofrecida y sobre el drenaje profundo y recarga freática, considerando un amplio gradiente de precipitaciones medias y texturas de suelo en el centro de la provincia de San Luis (Argentina).

Materiales y métodos

Se realizaron cinco ensayos, en disposición de grandes franjas bajo condiciones de secano en campos del centro de San Luis (entre 33.18° y 34.06° S y entre 65.77° a 66.17° W), denominados A, B, C, D y E, por su ubicación a lo largo de un gradiente de precipitación media anual **(Tabla 1)**. En la campaña 2013/14 (base 1 de junio) recibieron 905, 791, 530, 548 y 615 mm, respectivamente, con una distribución irregular en el ciclo del cultivo **(Figura 1)**. Los suelos fueron profundos con 45 a 90% de arena (0-200 cm) y 0.7 a 1.7 % de materia orgánica **(Tabla 1)**. El maíz se sembró entre el 28 de noviembre y el 12 de diciembre, procurando, y logrando, entre 36 000 y 56 000 plantas ha^{-1} con híbridos de madurez relativa 118 a 122. El antecesor fue soja en todos los sitios excepto en el E, donde fue centeno. Se evaluó un testigo sin fertilizar (21- 54 kg N-nitrato ha^{-1} en los primeros 60 cm del perfil, **Tabla 1**) y un tratamiento fertilizado a la siembra con urea incorporada (agregando 56-75 kg N ha^{-1}).

Los tratamientos testigo y fertilizado contaron con dos y tres repeticiones, respectivamente, y cada unidades experimental cubría entre 0.07 a 0.29 ha. La siembra y cosecha fueron mecánicas, y el manejo fue igual al de un lote comercial, sin que los cultivos hayan sufrido daños por adversidades. La disponibilidad de agua útil se midió hasta dos metros de profundidad, cada 20 cm, en tres momentos del ciclo del cultivo de maíz: i) siembra, ii) cuaje de granos, y

Tabla 1. Descripción de los cinco sitios de ensayo: Fr (Textura franca), FrAr (Franco arenosa), ArFr (Areno franca) y Ar (Arenosa). El antecesor centeno es un cultivo cosechado en la misma campaña que tuvo soja como antecesor.

		Sitios Experimentales				
		A	B	C	D	E
Lluvia histórica	mm $año^{-1}$	800	700	600	500	400
Textura superficial		Fr	FrAr	FrAr	ArFr	Ar
Materia Orgánica (0-20 cm)	%	1.7	1.2	1.2	0.7	0.8
$N\text{-}NO_3$ (0-60cm)	kg ha^{-1}	54	28	49	38	21
Antecesor		Soja	Soja	Soja	Soja	Centeno
Fecha de siembra		28-Nov	01-Dic	03-Dic	28-Nov	11-Dic
Densidad	Pl ha^{-1}	56 000	54 000	54 000	40 000	36 000

[1] Chacra San Luis, AAPRESID.
[2] Grupo de Estudios Ambientales. Universidad Nacional de San Luis y CONICET. San Luis, Argentina. *Correo electrónico: jorgemercau@gmail.com

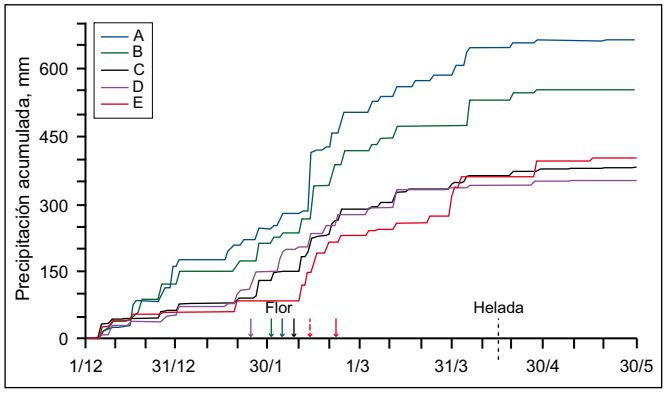

Figura 1. Distribución comparativa de las precipitaciones durante el ciclo del cultivo de maíz para los diferentes sitios bajo estudio (A, B, C, D, E).

iii) madurez fisiológica **(Figura 2)**. A partir de la textura y las mediciones en todo el ciclo se estimaron los límites hídricos en cada ensayo **(Figura 2)**. En base a un balance hídrico diario, calculando lluvias efectivas con la aproximación de curva número y la demanda mediante la aproximación FAO-56 con un coeficiente de cultivo único y evapotranspiración (ETP) de Penman-Monteith (Allen et al., 1998), se estimó el drenaje profundo (pérdida de agua debajo de los 2 m). El consumo aparente se estimó como la suma de las lluvias en el ciclo **(Figura 1)**, y la diferencia de contenido de agua entre siembra y madurez **(Figura 2)**, menos el drenaje. La evapotranspiración real del cultivo (ETc) se obtuvo del mismo modo pero utilizando las lluvias efectivas.

Resultados y discusión

La fertilización con N aumentó el rendimiento en cuatro de los cinco ensayos **(Figura 3)**. Al igual que en zonas húmedas (Otegui et al., 2002), el manejo adecuado de este nutriente modifica el resultado del cultivo en siembras tardías. Los rendimientos fluctuaron entre 1098 y 10 255 kg ha^{-1}. Los valores más bajos fueron en el sitio E, que se sembró con 29 mm de agua útil en todo el perfil **(Figura 2)**, y que sufrió el más largo periodo sin lluvias en enero y principio de febrero, retrasando la floración alrededor de 10 días (datos no mostrados). Los otros cuatro ensayos partieron con el perfil casi lleno al momento de la siembra (89-96% del agua útil, **(Figura 2)**. Los cultivos atravesaron un periodo con pocas lluvias hasta unos 10 días antes del segundo muestreo (12-28 de febrero), generando un consumo importante del agua del suelo en el segundo metro (**Figura 2**, muestreo de cuaje).

La fertilización con N redujo la cantidad de agua en el suelo al momento del cuaje **(Figura 2)**, evitando las pérdidas por drenaje profundo que se produjeron en el llenado de granos cuando no se fertilizó **(Tabla 2, Figura 2)**. En los ensayos A, B y C, las parcelas fertilizadas tuvieron, respectivamente, 53, 59 y 94 mm menos de agua en el perfil alrededor del cuaje de granos. En los otros sitios, la diferencia fue inferior a 10 mm. En madurez, en general los perfiles estaban más húmedos, consecuencia de las elevadas lluvias hacia fin del ciclo **(Figura 1)**, y no hubo diferencias importantes entre los tratamientos **(Figura 2)**. Entre ambos muestreos, en los testigos se estimó una pérdida debajo de los dos metros de 53 y 18 mm, en los sitios A y C. En cambio, en las parcelas fertilizadas, el perfil previamente más vacío impidió que ocurra drenaje **(Tabla 2)**. Los eventos de pérdida en profundidad fueron, según sugiere el balance diario, hacia fin de febrero, en los dos ensayos, y también a principios de abril en el ensayo A.

La productividad en grano del agua ofrecida en el ciclo para el cultivo de maíz tardío aumentó con la fertilización, por una combinación de mayor evapotranspiración con reducción del drenaje, y de mayor eficiencia de uso del agua evapotranspirada **(Tabla 2)**. La evapotranspiración aumentó 50 y 22 mm en los sitios A y B, reduciendo la pérdida de agua en el primero y dejando el perfil un poco más seco en el segundo **(Figura 2)**. En C, aunque el mayor consumo hasta el cuaje evitó el drenaje, las menores lluvias hacia el fin del llenado hicieron que el testigo pueda consumir más porque tenía más agua disponible en el perfil **(Figura 2)**. La eficiencia en el uso del agua evapotranspirada aumentó 13-22% en B, C y D, y cayó un 5% en A. En el sitio E, el crecimiento de los cultivos fue muy pobre, generando valores muy distintos de los otros sitios y sin diferencias importantes entre tratamientos.

Conclusiones

El uso de siembras tardías en el cultivo de maíz contribuye a la consolidación de los planteos agrícolas del cordón semiárido del centro de Argentina. La fertilización nitrogenada permite aumentar la productividad de las escasas y variables lluvias en la región, mejorando el promedio y reduciendo el riesgo económico. Además, el mayor uso del agua en profundidad, reduce el drenaje profundo y la recarga de las napas, uno de los riesgos ambientales generados por la agricultura en estos ambientes.

Tabla 2. Flujos de agua en el ciclo del cultivo (mm), magnitud de la ETc respecto de lluvia anual (PPAnual) y la oferta en el ciclo; y productividad en grano de la oferta de agua consumida y evapotranspirada (ETc) para los tratamientos testigo y Fertilizado de la media y desvío de los tratamiento A, B, C y D. Por separado se muestran los resultados del ensayo E, para ambos tratamientos juntos.

	Flujo de Agua en el ciclo				ETc relativa		Productividad		
	Consumo	ETc	Drenaje	Escorrentía	PP Anual	Of. Ciclo	Of. Ciclo	Consumo	ETc
	mm				%		kg grano mm^{-1}		
Testigo	504±136	389±82	18±25	115±65	57±12	60±11	12±3	16±6	20±6
Fertilizado	521±158	406±100	0	115±65	59±10	62±9	14±4	18±7	22±7
Sitio E	255±12	196±12	0	59	32±2	56±4	4±0.1	5±0.3	7±0.4

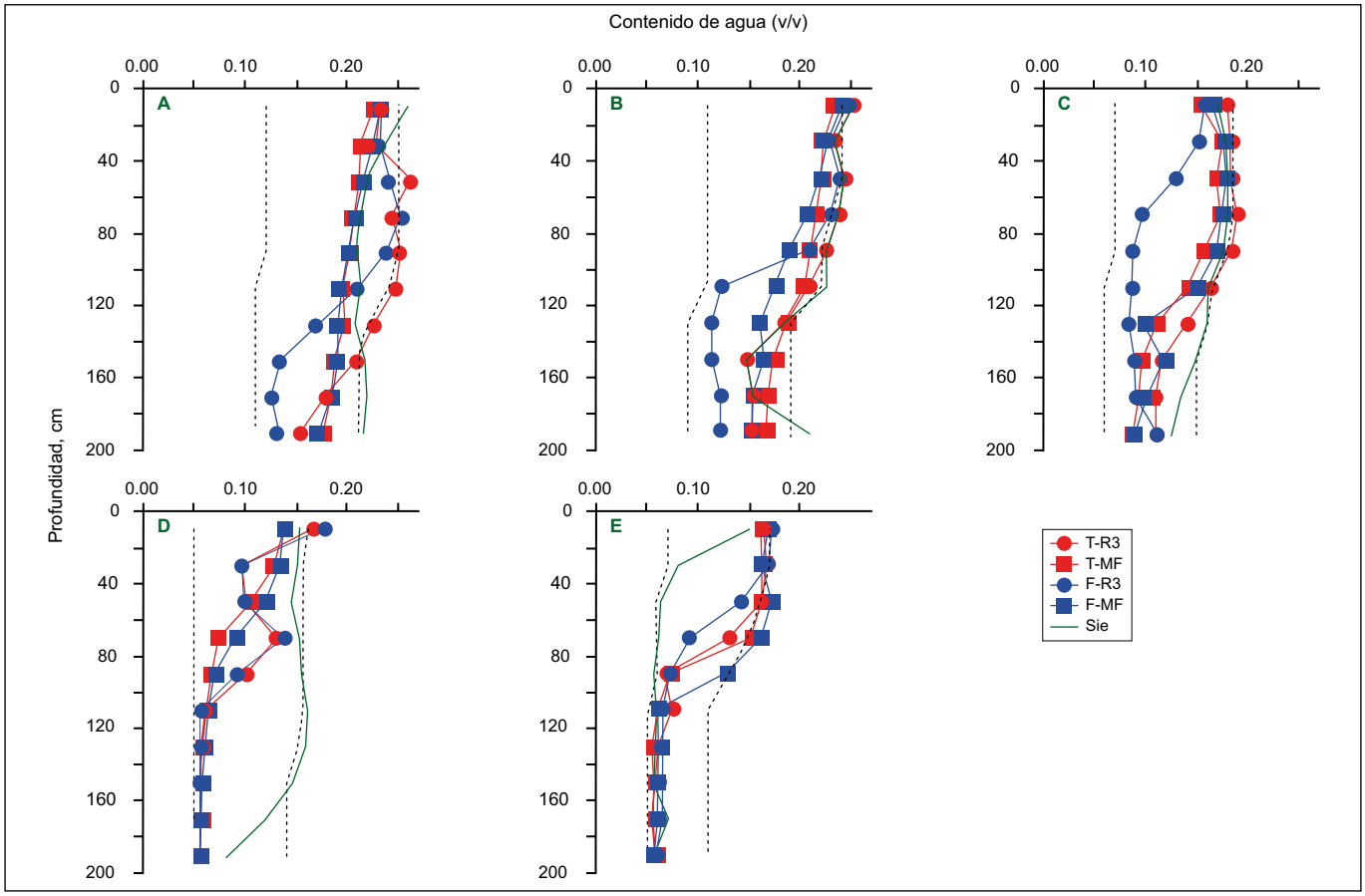

Figura 2. Contenido volumétrico de agua en el perfil de suelo para los tratamientos testigo (T) y fertilizado (F) en diferentes momentos del ciclo [Sie: siembra; R3: estadío de grano lechoso (12 al 28 de febrero); y MF: madurez fisiológica (14-16 de abril)] en los cinco sitios experimentales. Las líneas punteadas grises indican, para cada sitio, los límites hídricos de marchitez permanente (izquierda) y capacidad de campo (derecha).

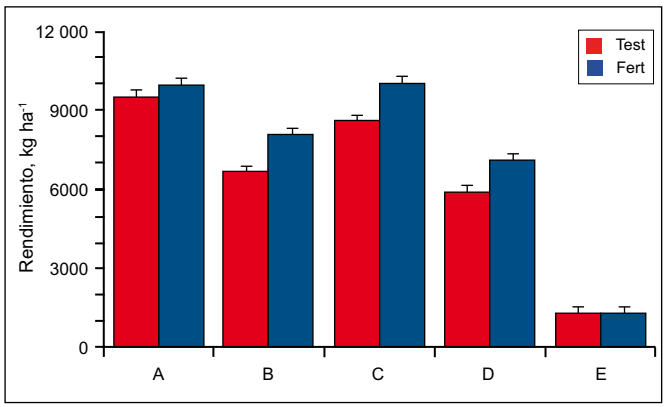

Figura 3. Rendimiento (kg ha^{-1}) de maíz en los cinco ensayos (A-E) en las parcelas testigo (columnas rojas) y fertilizadas (columnas azules). La barra indica el error estándar en cada ensayo.

Agradecimientos

Los productores del proyecto Chacra San Luis (AAPRESID) financiaron el trabajo de Martín Ibarra y la ejecución de los ensayos. El trabajo de Jorge Mercau fue parcialmente financiado por el International Development Research Center (IDRC, Canadá) y el Inter-American Institute for Global Change Research (IAI, SGP-CRA 2031 and CRN 3095), que también financiaron los análisis de agua en el laboratorio del GEA.

Bibliografía

Allen, R., L.S. Pereira, D. Raes, y M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome.

Contreras, S., C.S. Santoni, y E.G. Jobbágy. 2012. Abrupt watercourse formation in a semiarid sedimentary landscape of central Argentina: the roles of forest clearing, rainfall variability and seismic activity. Ecohydrology, 6:794-805.

Linscott, D.L., R.L. Fox, y R.C. Lipps. 1962. Corn root distribution and moisture extraction in relation to nitrogen fertilization and soil properties. Agron. J. 54: 185– 189.

Magliano, P.N., R.J. Fernández, J.L. Mercau, y E.G. Jobbágy. En prensa. Precipitation event distribution in central Argentina: Spatial and temporal patterns. Ecohydrology.

Maddonni, G.A. 2012. Analysis of climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina – a probabilistic approach. Theor. Appl. Climatol. 107:325-345.

Otegui, M.E., J.L. Mercau, y F.J. Menéndez. 2002. Estrategias de manejo para la producción de maíz tardío y de segunda. En: E.H. Satorre (Ed.), Guía Dekalb del cultivo de Maíz. ISBN 987-20358-0-6. pp 171-184. Disponible en https://sites.google.com/a/agro.uba.ar/granero/

Santoni, C.S., E.G. Jobbágy, y S. Contreras. 2010. Vadose zone transport in dry forests of central Argentina: role of land use. Water Resources Research 46: W10541. DOI: 10.1029/2009WR008784.

Scanlon, B.R., I. Jolly, M. Sophocleus, y L. Zhang. 2007. Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. Water Resources Research. Vol. 43 (3) March 2007. doi:10.1029/2006WR005486: 1-18.

Singh, R., B. Dass, N. Singh, e Y. Singh. 1979. Effect of n fertilization on yield and moisture extraction by rainfed maize as affected by soil type and rainfall in Punjab, India. Field Crop Research, 2:109-115.

Cursos y Simposios

1. **VII Congreso Boliviano de la Ciencia del Suelo. Manejo Sostenible del Recurso Suelo para la Seguridad Alimentaria**

Organiza : Sociedad Boliviana de la Ciencia del Suelo
Lugar : Potosí, Bolivia
Fecha : Abril, 15-17, 2015
Información : septimocongresosuelos@gmail.com
http://www.paschaco.com/noticias_detalle.php?id=9

2. **Simposio Fertilidad 2015**

Organiza : IPNI Cono Sur y Fertilizar Asociación Civil
Lugar : Rosario, Argentina
Fecha : Mayo, 19-20, 2015
Información : http://www.fertilizar.org.ar/?page_id=1039

3. **VIII Simposio Regional IPNI Brasil Sobre Buenas Prácticas para Uso Eficiente de Fertilizantes**

Organiza : International Plant Nutrition Institute
Lugar : Vilhena, Brasil
Fecha : Mayo, 26-27, 2015
Información : kfurlan@ipni.net
http://brasil.ipni.net/article/BRS-3323

4. **Congreso Suelos 2015**

Organiza : Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo
Lugar : La Habana, Cuba
Fecha : Junio, 2-5, 2015
Información : http://www.sueloscuba.com

5. **VII Congreso Brasileiro de Soja**

Organiza : International Plant Nutrition Institute
Lugar : Florianópolis, Brasil
Fecha : Junio, 22-25, 2015
Información : cbsoja2015@fbeventos.com
http://www.cbsoja.com.br

6. **VII Simposio Nacional Sobre el Control de la Degradación y Restauración de Suelos**

Organiza : Sociedad Española de la Ciencia del Suelo
Lugar : Bilbao, España
Fecha : Junio, 23-26, 2015
Información : http://www.condegres2015.com/

7. **Expocafé 2015**

Organiza : Expocafé
Lugar : Minas Gerais, Brasil
Fecha : Julio, 1-3, 2015
Información : expocafe@cafeeditora.com.br
http://expocafe.com.br

8. **VI Congreso Ecuatoriano de la Papa**

Organiza : Universidad Técnica del Norte
Lugar : Ibarra, Ecuador
Fecha : Julio, 8-9, 2015
Información : http://congresodelapapa.com

9. **VII Simposio de Tecnología de Producción de la Caña de Azúcar**

Organiza : International Plant Nutrition Institute
Lugar : Piracicaba, Brasil
Fecha : Julio, 15-17, 2015
Información : gape@usp.br
http://www.simposiodecana.com

10. **InfoAg 2015**

Organiza : International Plant Nutrition Institute
Lugar : Louis, MO, USA
Fecha : Julio, 28-30, 2015
Información : http://www.infoag.org

11. **XL Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo**

Organiza : Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo
Lugar : San Luis Potosí, México
Fecha : Agosto 30 - Septiembre 4, 2015
Información : congreso.suelos@agr.uaslp.mx
http://www.smcsmx.org

12. **X Congreso de la Caña de Azúcar**

Organiza : Tecnicaña
Lugar : Cali, Colombia
Fecha : Septiembre, 14-18, 2015
Información : http://www.tecnicana.org

Publicaciones Disponibles IPNI-Norte de Latinoamérica

Titulo de la Publicación	Costo (U$S)
Manual de Arroz. Desórdenes Nutricionales y Manejo de Nutrientes: Esta publicación contiene información que permite desarrollar estrategias de manejo nutricional y recomendaciones de fertilización del arroz cultivado en regiones tropicales y subtropicales. **Guía Practica para el Manejo de Nutrientes en Arroz:** Contiene una discusión concisa y muy práctica de las estrategias de manejo nutricional y recomendaciones de fertilización del arroz cultivado en regiones tropicales y subtropicales. Excelente herramienta de apoyo en el contacto diario con los agricultores.	45.00
Palma de Aceite. Manejo para Rendimientos Altos y Sostenidos: La palma de aceite es uno de los cultivos con mayor expectativa de crecimiento a nivel mundial, existe una gran demanda entre los palmicultores y agrónomos por conocimientos y publicaciones sobre su manejo adecuado.	45.00
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. **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. **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.	45.00
4R de la Nutrición de Plantas. El concepto de los 4R, los 4 Requisitos, del **"MANEJO RESPONSABLE DE NUTRIENTES"** es un enfoque nuevo e innovador para las mejores prácticas de manejo de los fertilizantes adoptado por la industria mundial de fertilizantes. Este enfoque considera dimensiones económicas, sociales y ambientales del manejo de nutrientes y es esencial para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. El concepto es simple—aplicar la fuente correcta de nutrientes, en la dosis, el momento y el lugar correctos—pero la implementación usa el conocimiento en forma intensiva y es específica para cada sitio.	40.00
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
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
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

Vea el catálogo completo de publicaciones del IPNI en http://nla.ipni.net