

ENFOQUES ALTERNATIVOS PARA EL DIAGNÓSTICO DE FERTILIDAD DE SUELOS EL ENFOQUE “TRADICIONAL”*

Fernando O. García¹ e Ignacio A. Ciampitt²

¹IPNI Cono Sur – Av. Santa Fe 910, Acassuso, Buenos Aires, Argentina. fgarcia@ipni.net

²Agronomy Department, Purdue University. 915 W State Street, West Lafayette, Indiana, EE.UU. iciampit@purdue.edu

El diagnóstico de fertilidad de suelos con el objetivo de generar recomendaciones de fertilización para los cultivos extensivos ha evolucionado marcadamente en los últimos años. El diagnóstico de fertilidad basado en el análisis de suelos de las formas “disponibles” o “extractables” de los nutrientes, se desarrolló a partir de investigaciones realizadas entre las décadas de 1940 y 1950. El análisis de suelos continúa siendo probablemente el enfoque más utilizado a nivel mundial, pero otras metodologías o enfoques tales como otros indicadores de suelo, muestreos geo-referenciados, análisis de planta, sensores remotos, modelos de simulación y requerimientos de los cultivos aportan alternativas complementarias y/o superadoras para mejorar los diagnósticos de fertilidad (Janssen et al., 1990; Malavolta et al., 1997; Satorre et al., 2005; Melchiori, 2007; Shanahan et al., 2008).

Los análisis de suelos con fines de diagnóstico de fertilidad (“soil testing”), son extracciones químicas y/o bioquímicas rápidas que estiman la disponibilidad de nutrientes (Sims, 2000; Havlin et al., 2005). La cantidad de nutriente que se extrae es solo una proporción de la cantidad total de nutriente en el suelo. La cantidad de nutriente extraída tampoco es igual a la cantidad de nutriente absorbida por el cultivo pero se relaciona estrechamente con esta. Por lo tanto, el análisis de suelo es solo un “índice de disponibilidad” de nutrientes para el cultivo. Frecuentemente se utiliza el término “disponible”, pero se debe entender que la fracción determinada usualmente representa solo una fracción que está en rápido equilibrio con la solución del suelo, y puede ser absorbida por las plantas.

Los objetivos del análisis de suelo con fines de diagnóstico son 1) proveer un índice de disponibilidad de nutriente en el suelo, 2) predecir la probabilidad de respuesta a la fertilización o enclado, y 3) proveer la base para el desarrollo de recomendaciones de fertilización (Gutiérrez Boem et al., 2005; Havlin et al., 2005). Claramente, el análisis de suelo constituye una mejor práctica de manejo (MPM) clave para el uso de fertilizantes y otros abonos, ya sea para los fines de producción como de protección ambiental. En este escrito se presenta i) una breve descripción del desarrollo e implementación de programas de análisis de suelos con fines de diagnóstico de fertilidad, ii) una síntesis del uso de análisis de suelos en cultivos extensivos de Argentina, y iii) una discusión acerca de los desafíos y oportunidades del análisis de suelo para mejorar el diagnóstico de fertilidad para las recomendaciones de fertilización.

Desarrollo e implementación de programas de análisis de suelo

El desarrollo del análisis de suelo con fines de diagnóstico de fertilidad incluye las siguientes etapas:

1. *Muestreo de suelos*: En las etapas de desarrollo se definen momento, frecuencia, profundidad y otras consideraciones que contribuyan a atenuar los efectos de variabilidad espacial y temporal. La representatividad de la muestra es fundamental para que el programa sea exitoso. Existe una alta variabilidad

* Presentado en el XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACs. Rosario, 31 de Mayo al 4 de Junio de 2010.

espacial y temporal en la mayoría de los análisis de suelo cuyo impacto puede disminuirse con adecuada planificación del muestreo.

2. *Selección del extractante y metodología de análisis:* La metodología elegida debe facilitar estimaciones precisas y exactas del nivel de nutriente “disponible”, ser rápida, de bajo costo e impacto ambiental. Debe procurarse la estandarización de los análisis de laboratorio para reducir la variabilidad en los resultados analíticos (Marban y Ratto, 2005).
3. *Correlación:* El análisis de suelo es correlacionado generalmente con la absorción de nutriente de toda o una parte de la planta en condiciones de campo y/o invernáculo. En ocasiones, el análisis se correlaciona con la producción de materia seca y/o rendimiento comercial.
4. *Calibración:* Es la parte central del desarrollo ya que provee información respecto al grado de deficiencia o suficiencia de un elemento para un cultivo, y cuanto del elemento debe ser aplicado si se presenta deficiente. Involucra la definición de agro-ecosistemas de características similares (rotaciones, suelos, manejo, clima, etc.) que pueden responder de manera similar a la fertilización facilitando la formulación de recomendaciones. Una calibración adecuada requiere la evaluación de la mayor diversidad de los agro-ecosistemas de la región en varias campañas para explorar condiciones climáticas contrastantes. Más aun, la calibración debe ser realizada de manera continua incorporando las más recientes prácticas de manejo de suelos y cultivos.
5. *Interpretación:* A partir de la información experimental desarrollada en las etapas de correlación y calibración, se interpreta cuantitativamente el resultado específico del análisis. La interpretación de los resultados puede variar según las relaciones cuantitativas utilizadas, por ej. distintos niveles críticos según el modelo matemático utilizado (Mallarino y Blackmer, 1992). En esta etapa pueden definirse probabilidades de respuesta económica asociadas a distintas categorías de disponibilidad de nutrientes.
6. *Recomendaciones:* Se integra la interpretación cuantitativa del análisis de suelo con la condición de otros factores que afectan la respuesta potencial a la aplicación de nutrientes. Entre estos factores se incluyen el cultivo, el rendimiento esperado, el tipo de suelo, las condiciones climáticas, las condiciones económicas, las regulaciones ambientales y la filosofía del productor. En esta etapa se define la estrategia y filosofía de recomendación, por ejemplo en nutrientes de baja movilidad, los criterios de suficiencia, reposición, construcción y mantenimiento u otras variantes son las posibilidades a utilizar por el asesor o productor.

Mayor información y discusión sobre estas seis etapas se puede encontrar en Walsh y Beaton (1973), Peck et al. (1977), Brown et al. (1987), Sims (2000), Alvarez et al. (2005) y Havlin et al. (2005). El desarrollo del análisis de suelos requiere de una inversión significativa en recursos técnicos, económicos y de tiempo. Se deben establecer redes de ensayos a campo en suelos con niveles contrastantes de disponibilidad del nutriente en estudio, en distintas condiciones edafo-climáticas y de manejo de suelos y cultivos, durante varios años y evaluando dosis de fertilización. Por esta razón, los estudios de correlación y calibración, que fueron numerosos en distintos países entre las décadas de 1950 y 1970, se han reducido notablemente en los últimos 20-30 años tanto a nivel nacional como internacional.

Una vez desarrollados, la implementación de los programas de diagnóstico de fertilidad, basados en análisis de suelo, involucran tres pasos asociados a las seis etapas indicadas para su desarrollo: 1) Muestreo de suelos, 2) Análisis, e 3) Interpretación y recomendación. Estos tres pasos deben seguir estrictamente las indicaciones definidas durante el desarrollo del programa ya que suelen presentarse numerosas fuentes de variabilidad y de errores potenciales en cada uno de ellos.

Análisis de suelos en cultivos extensivos de Argentina

Nitrógeno

Para trigo y maíz se han calibrado umbrales críticos de disponibilidad de N a la siembra (N-nitratos suelo, 0-60 cm, + N fertilizante), constituyendo el método más difundido para determinar las necesidades de N (González Montaner et al., 1991; Ruiz et al., 2001). Estos umbrales varían según la zona y el nivel de rendimiento objetivo. Para los dos cultivos, los análisis de N-nitratos en pre-siembra permiten predecir con buena precisión y exactitud la dosis óptima económica a aplicar (Alvarez et al., 2003; Pagani et al., 2008; Barbieri et al., 2009). En algunas situaciones, las correlaciones entre el nivel de N-nitratos en pre-siembra y el rendimiento del cultivo pueden ser muy pobres principalmente debido a pérdidas de N producidas por lixiviación, volatilización y/o desnitrificación (disminución del N potencialmente disponible para la absorción por las plantas) durante el desarrollo de las etapas tempranas del cultivo,

En trigo, se pueden mencionar umbrales mayores, en el orden de 175 kg/ha, para alcanzar rendimientos de 6000 kg/ha en el sudeste de Buenos Aires (Información CREA Mar y Sierras), y umbrales menores, entre 130-140 kg/ha para rendimientos de 4000 kg/ha en el sur de Santa Fe (García et al., 2006). En ensayos recientes, Barbieri et al. (2008) determinaron umbrales de 152 y 126 kg N/ha al momento de la siembra y al macollaje, respectivamente, para alcanzar el 95% del rendimiento máximo (promedios de 5000-5500 kg/ha) en el sudeste de Buenos Aires. En maíz, evaluaciones de resultados experimentales más recientes indican que disponibilidades de 150-170 kg N ha⁻¹, según el potencial de rendimiento, maximizan el beneficio económico de la fertilización nitrogenada (Alvarez et al., 2003; García et al., 2006).

Fósforo

La evaluación de la fertilidad fosfatada de los suelos en Argentina se basa en el análisis en pre-siembra que determina el nivel de P Bray a 0-20 cm. Esta metodología ha sido probada y recomendada para todos los cultivos. Las calibraciones sugieren niveles críticos por debajo de los cuales la probabilidad de respuesta es alta: rangos de 15-20, 9-14, 10-15 y 13-18 mg/kg P Bray para trigo, soja, girasol y maíz, respectivamente (Tabla 1). Estos umbrales son relativamente constantes para todas las zonas de producción de granos e independientes del rendimiento esperado del cultivo ya que el P es un nutriente inmóvil en el suelo.

Tabla 1. Umbrales críticos de P extractable (Bray I) en el suelo (0-20 cm) para los cultivos de soja, girasol y maíz en la Región Pampeana.

Cultivo	Umbral Crítico (mg/kg)	Referencia
Trigo	15-20	Echeverría y García, 1998; García et al., 2006; García, 2007
Soja	9-14	Echeverría y García, 1998; Melchiori et al., 2002; Gutiérrez Boem et al., 2002; Díaz Zorita et al., 2002; Fontanetto, 2004; García et al., 2006
Girasol	10-15	Díaz Zorita, 2002
Maíz	13-18	García et al., 1997; Ferrari et al., 2000; Mistrorigo et al., 2000; Berardo et al., 2001; García, 2002; García et al., 2006

El nivel de P extractable define la probabilidad de respuesta. La dosis de P a aplicar se ha propuesto a partir de categorías de “disponibilidad” de P, definidas por el nivel de P Bray. Estas categorías han incluido variantes de filosofías de “suficiencia” y “construcción y mantenimiento” (Berardo, 1994; Echeverría y García, 1998). A escala de productor, la fertilización fosfatada de los cultivos de grano en Argentina se ha realizado históricamente siguiendo un criterio de *suficiencia*. Las filosofías de “suficiencia” y de “construcción y mantenimiento” utilizan el nivel crítico como referencia central, y difieren en cuanto a las dosis recomendadas por debajo del nivel crítico e inmediatamente por arriba del mismo. La Tabla 2 compara algunas características de ambos métodos.

El criterio de *suficiencia* resulta en recomendaciones de fertilización solamente por debajo del nivel crítico de P extractable buscando maximizar el retorno de la inversión en fertilizante en el corto plazo. Por otro lado, el criterio de *construcción y mantenimiento* recomienda aplicaciones de fertilizantes fosfatados con el objetivo de subir el nivel de P Bray por arriba del nivel crítico y mantenerlo, de manera de evitar pérdidas de rendimiento por limitaciones de abastecimiento de P, maximizando la efectividad del sistema y la eficiencia de uso del P a mediano y largo plazo. La decisión por uno u otro criterio, a partir del conocimiento agronómico, es empresarial y depende de factores tales como la tenencia de la tierra (propietario, arrendatario), disponibilidad de capital, etc. Probablemente, en muchas situaciones, el criterio más adecuado involucre una situación intermedia entre ambas filosofías. Por último, se debe destacar que la utilización de estos criterios es sitio-específica, debido a que varían con el nivel de P extractable del suelo y la inversión de capital a realizarse.

Una alternativa para el cálculo de la dosis correcta de acuerdo al criterio de *suficiencia* fue propuesta por Rubio et al. (2008). El criterio consiste en llevar al suelo a valores del rango crítico del cultivo a implantar. Se busca incrementar el P extractable (obtenido por medio del análisis de P Bray hecho en pre-siembra) hasta esos umbrales críticos durante el desarrollo del cultivo minimizando el efecto residual para cultivos subsiguientes. La cantidad de P a aplicar para incrementar el nivel de P Bray se estima a partir de un coeficiente b , que depende del índice de retención de P del suelo, el valor de P Bray inicial, el contenido de arcilla, la densidad aparente y la profundidad de muestreo. En la Figura 2 se ejemplifican los cálculos para un lote agrícola de Venado Tuerto con contenido inicial de P Bray de 11 ppm al que se quiere llevar a una disponibilidad de P de 15 ppm.

Si el criterio es de *construcción y mantenimiento* de P, a la cantidad de P extraída en grano se debería sumar la cantidad de P necesaria para aumentar el nivel de P extractable del suelo al valor deseado. En Argentina, se han determinado requerimientos de 4-12 kg P para incrementar el P Bray en 1 mg/kg, según tipo de suelo, textura, nivel original de P Bray y tiempo de evaluación de la estrategia de fertilización (Tabla 3). En forma general, suelos con valores bajos de P Bray ($<15 \text{ mg kg}^{-1}$) presentan una rápida capacidad de respuesta a la fertilización fosfatada, incrementando los niveles de P extractable del suelo; mientras que por otro lado, presentan una baja o nula respuesta en disminución de los valores ante situaciones de ausencia continua de aplicación de P (Ciampitti et al., 2008; Ciampitti, 2009). Esta última situación, lleva a que año tras año en esos lotes los niveles de P extractable en los análisis varíen moderadamente, por lo cual, no se toma conciencia de la pérdida “real” de P del suelo proveniente de otras fracciones consideradas de menor labilidad. En suelos con valores elevados de P Bray ($>45 \text{ mg kg}^{-1}$), la aplicación de P produce respuestas erráticas en los niveles de P extractable, por lo cual, en muchas situaciones no se observan cambios en los niveles del nutriente en suelo; mientras que situaciones con ausencia de aplicación de P llevan a una disminución rápida y continua de los niveles de P en suelo (Ciampitti et al., 2008; Ciampitti, 2009). En esta última situación, la mejor solución es monitorear los niveles cada 2-3 años y utilizar la filosofía de suficiencia o reposición, dependiendo de la tenencia de la tierra y la decisión empresarial de cada productor.

Tabla 2. Características comparadas de las filosofías de *suficiencia* y de *construcción y mantenimiento* para la fertilización fosfatada.

Suficiencia	Construcción y mantenimiento
Basado en “respuesta del cultivo” a P	Basado en “respuesta del suelo” a P
Para cada valor debajo del nivel crítico, distintas dosis determinan el óptimo rendimiento físico o económico	No se debe trabajar en la zona de P Bray de deficiencia grave y probable
No se consideran efectos de la fertilización en los niveles de nutriente en el suelo	Si el nivel de P es bajo, se fertiliza no solo para alcanzar el máximo rendimiento, sino para asegurar que se suba el nivel inicial
Requiere buen conocimiento de las dosis óptimas para cada cultivo, del nivel inicial y precisión en el análisis de suelo	Llegar al óptimo nivel en 4 a 6 años y mantenerlo, generalmente basado en la remoción de nutriente con las cosechas
Aumenta el retorno por kg de nutriente, la *EA, y solo se alcanzarán los rendimientos máximos si es que la dosis aplicada es suficiente para llevar el suelo al nivel del umbral crítico. Si no es así, el rendimiento será limitado por P	Puede reducir el retorno por kg de nutriente, la EA*, pero también reduce el riesgo de disminuir el retorno a la producción
Mayor impacto de errores de calibración de análisis de suelo, recomendaciones y de muestreo	Menor impacto de errores de calibración de análisis de suelo, recomendaciones y de muestreo
Requiere de muestreos frecuentes y aplicaciones localizadas en muchos casos	No requiere muestreos frecuentes, pueden realizarse cada 2 o 3 años, ni métodos de aplicaciones costosas
Buena opción para suelos “fijadores”, y en lotes en arrendamiento anual	Razonable en suelos poco o no “fijadores”, y en lotes de propietarios
Menor disponibilidad de capital	Mayor disponibilidad de capital

*EA= Eficiencia Agronómica.

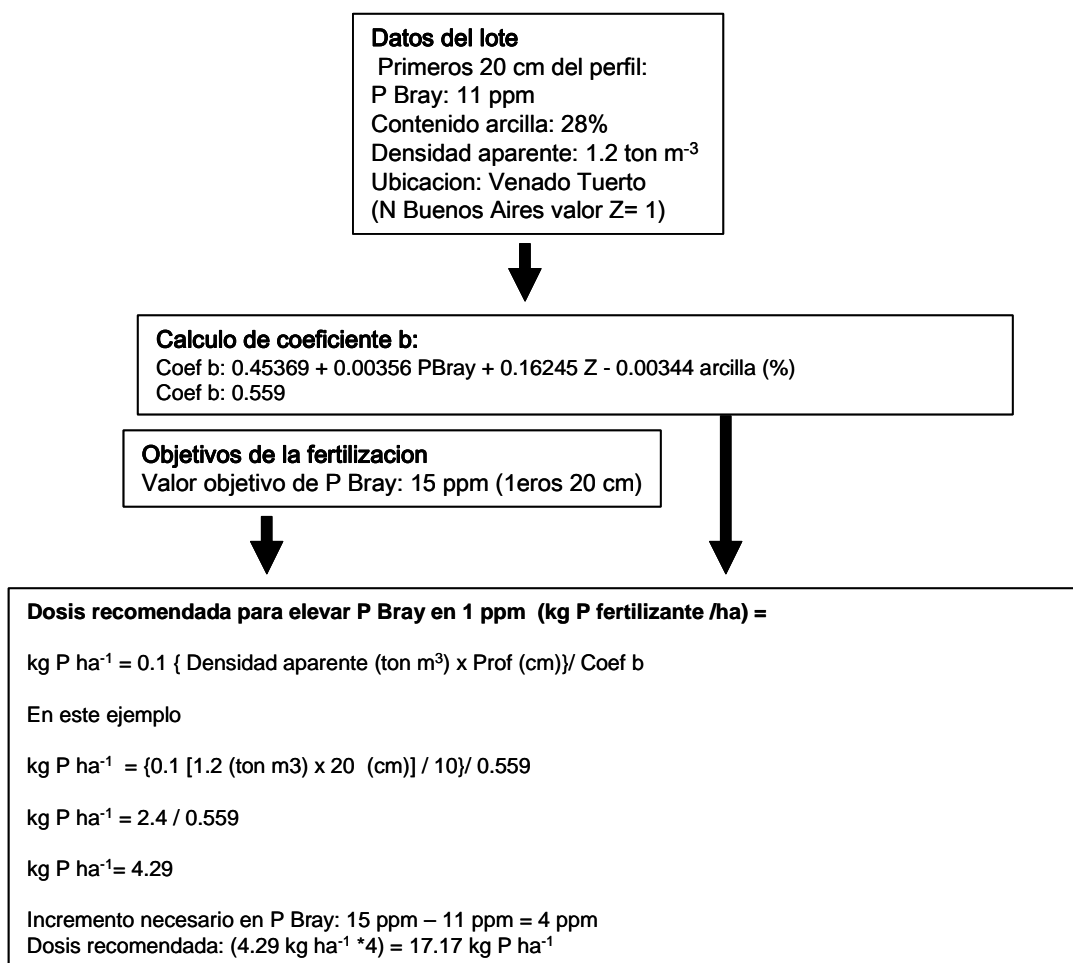


Figura 2. Aplicación práctica de la metodología de estimación de dosis de P de suficiencia propuesta por Rubio et al. (2008). Ejemplo de un lote agrícola de Venado Tuerto en el que se quiere incrementar el P extractable a 15 ppm P Bray.

Tabla 3. Dosis de P necesaria para aumentar en 1 mg P/kg el nivel de P Bray-1 del suelo.

Referencias	Dosis de P (kg P/mg kg ⁻¹ P Bray)	Comentarios
Berardo y Grattone (2000)	6.7	SE Buenos Aires, 1 año, extracción incluida
Berardo et al., com. pers.	9.1	7 años, sin extracción
Ventimiglia et al., com. pers.	10	7 años, sin extracción
Bianchini et al., com. pers.	5.5	1 año, sin extracción, P Bray inicial 22.5 ppm
Rubio et al. (2008)	2.9-6.0	45 días, sin extracción, según P Bray inicial, Arcilla, y Zona
Red CREA Sur de Santa Fe (2006); Ciampitti et al. (2008)	6.4-6.8 10.1-13.3	7 años, sin extracción P Bray inicial > 25 ppm P Bray inicial < 25 ppm

Azufre y otros nutrientes

En el caso de azufre (S), algunas redes de ensayos han permitido determinar umbrales críticos de S-sulfatos a 0-20 cm de profundidad en pre-siembra, con valores generalmente cercanos a 10 mg/kg S-sulfatos, por debajo de los cuales la respuesta es altamente probable (Ferraris et al., 2004; Garcia et al., 2008). Sin embargo, no se han podido generalizar niveles críticos que sirvan de guía para la toma de decisión (Reussi Calvo y Echeverria, 2009). Esta situación no difiere de lo observado en otras regiones del mundo.

En la región pampeana argentina, la intensificación de la agricultura ha resultado en la disminución de los niveles de bases (calcio, magnesio) y pH en algunos suelos, con respuestas significativas a la aplicación de enmiendas calcáreas y/o dolomíticas en alfalfa y soja. Mas aun, también se han determinado deficiencias y respuestas a boro (B) y zinc (Zn) en maíz y soja, a cloro (Cl) en trigo y a molibdeno (Mo) y cobalto (Co) en soja. Sin embargo, aun no se han establecido programas de diagnostico de fertilidad basados en el análisis de suelos para estos nutrientes.

Oportunidades y desafíos del análisis de suelos para mejorar el diagnostico de fertilidad para la recomendación de fertilización

Un mayor uso de análisis de suelos con fines de diagnostico de fertilidad contribuirá significativamente a una agricultura sustentable y, específicamente, a un uso de nutrientes más eficiente. Si bien no se disponen de datos precisos, se puede estimar que anualmente entre el 15% al 25% del área bajo siembra de cultivos de granos es muestreado con fines de diagnostico de fertilidad. Si esta estimación es correcta, indicaría que aun existe un amplio camino para recorrer en la difusión de la práctica, lo cual representa una oportunidad interesante para realizar un manejo más eficiente de los nutrientes, tanto los del suelo como de los fertilizantes. El impacto que podría tener un mayor uso de los análisis de suelo no se debe ver solamente desde el punto de vista productivo, sino también desde la protección ambiental ya que el uso responsable de los nutrientes permitirá reducir los efectos negativos de contaminación de suelos, agua y aire que generan las fertilizaciones excesivas. Por otro lado, una mejor promoción en una correcta interpretación y uso de los análisis de suelos debería ser fomentada, debido a que una variada proporción de los análisis realizados no son utilizados correctamente para solucionar los problemas de fertilidad y de nutrición de los cultivos.

Desde el punto de vista del desarrollo y la implementación del análisis de suelos, existen numerosos desafíos y oportunidades que se discuten a continuación.

Muestreo de suelos

Es importante remarcar el concepto de que no existe análisis y/o recomendación que mejore la representatividad y calidad de la muestra analizada. Los lotes, zonas de manejo o grillas generalmente presentan marcada variabilidad espacial a nivel micro y macro. Es clara pues la insistencia en un cuidadoso y detallado proceso de toma de muestras a campo.

Deben enfatizarse las indicaciones generales del muestreo de suelos: 1) obtener una muestra compuesta de al menos 25-30 submuestras de cada área homogénea, separando zonas con distintas historia de manejo o distinta posición topográfica; 2) respetar la profundidad y época de muestreo indicada por el programa de análisis; 3) mantener limpios y en condiciones los elementos utilizados para el muestreo. Asimismo, es importante conocer la historia de cultivos, manejo del área a muestrear y la topografía. Mas aun, disponer de fotos aéreas y mapas de suelo y/o de rendimiento permitirán diferenciar más fácilmente áreas no homogéneas.

La posibilidad de geo-referenciar la posición de muestreo permite disminuir el efecto de la variación espacial a nivel macro (posición en el paisaje, lote con áreas de diferente historia de cultivos y/o manejo) aunque no disminuye el impacto de la microvariación generada por el posicionamiento de bandas de fertilización de años anteriores. La disponibilidad de muestreadores hidráulicos que facilitan la tarea de muestreo y la constancia de la profundidad, contribuye a la obtención de una muestra representativa.

Análisis de la muestra

Esta etapa es frecuentemente identificada como la principal fuente de variación en los resultados de un análisis de suelos y esto no debiera ser así. Las diferencias que se observan entre resultados de análisis de una misma muestra entre distintos laboratorios se deben a varias causas: 1) representatividad de la muestra (¿fue bien homogenizada antes de dividirse y enviarse a distintos laboratorios?, 2) diferencias de extractantes utilizados, 3) metodologías de análisis diferentes (relación suelo:extractante, tiempo de agitado, tiempo de reposo, instrumental, etc.), y 4) calidad analítica del laboratorio.

Sin lugar a dudas, la estandarización de los ensayos de laboratorio y los programas de interlaboratorio contribuyen de manera decisiva a mejorar la calidad analítica y de los resultados (Marban y Ratto, 2005). En Argentina, diversas instituciones y laboratorios, coordinados por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP), conforman el SAMLA que es una red de adhesión voluntaria que nuclea a laboratorios dedicados al análisis de suelos, aguas, vegetales y enmiendas orgánicas, cuyo objetivo es mejorar la calidad de los análisis con el fin de hacer los resultados más confiables y comparables entre sí, normalizando las distintas técnicas para determinaciones tanto físicas como químicas y unificando criterios en todo lo relativo a la expresión e interpretación de los resultados analíticos (MAGyP, 2010). El MAGyP también coordina el PROINSA que es un programa de interlaboratorios para suelos agropecuarios, que tiene la finalidad de determinar el desempeño de cada laboratorio participante mediante la comparación de sus resultados con los de todos los demás participantes. La continuidad y profundización del trabajo de SAMLA y PROINSA contribuirá a la mejora de la calidad analítica de los laboratorios.

En el caso particular de P, el extractante adaptado por Argentina ha sido el Bray 1 y todas las calibraciones se han realizado con la metodología correspondiente. Frecuentemente se discute la posibilidad de utilizar un extractante universal como es el Mehlich 3, el cual presenta un alto grado de asociación con los valores obtenidos con Bray 1 (Barbagelata y Melchiori, 2004; González et al., 2007). Otra alternativa de extracción es el uso de resinas de intercambio, metodología desarrollada y utilizada en el estado de San Pablo (Brasil), y de características superiores a los extractantes convencionales según Van Raij (1998). En este caso, sería necesario realizar una calibración nueva, lo cual requiere una importante inversión de recursos técnicos, económicos y de tiempo.

Correlación y calibración

El alcance del análisis de suelos con fines de diagnóstico de fertilidad es limitado por la variabilidad observada en las relaciones entre el rendimiento o la respuesta de los cultivos y el nivel de nutriente "disponible" en el suelo. En general, los niveles de un nutriente en suelo explican un 40-60% del rendimiento o respuesta del cultivo., Este escenario ocurre debido a que el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo dependen de numerosos factores más allá de la disponibilidad de un único nutriente (ej.: radiación, temperatura, otros nutrientes, agua, etc).

La Figura 1, que muestra la relación entre el N disponible al momento de siembra, suelo + fertilizante, con la variable rendimiento del cultivo de maíz para diferentes redes de ensayos, es buen ejemplo de la variabilidad que presentan estas relaciones. En este caso, la herramienta del análisis de N en siembra es importante, como predictiva, debido a que

presenta un ajuste de casi el 50% con los rendimientos del cultivo de maíz, para diferentes localidades y en 5 años climáticos diversos. Sin embargo, hay una gran variabilidad en la respuesta de maíz según la disponibilidad de N a la siembra, la cual puede adjudicarse, entre otros factores, a: aporte de N mineralizado durante el ciclo del cultivo, pérdidas del N disponible a la siembra, diferencias en potencial de rendimiento, condiciones climáticas, otros nutrientes o propiedades de suelo limitantes, y otros factores de manejo (plagas, malezas, enfermedades).

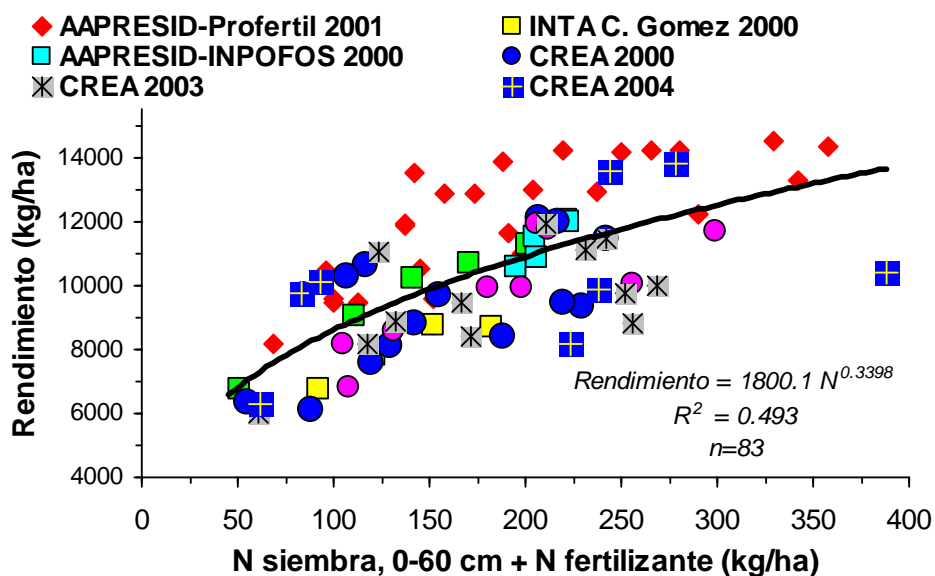


Figura 1. Rendimiento de maíz en función de la disponibilidad de N a la siembra del cultivo (N-nitratos suelo + N-fertilizante).

En el caso particular de P, se ha hipotetizado que, con la expansión de la siembra directa, se podrían lograr mejores ajustes muestreando a profundidades menores de 0-20 cm que es la profundidad a la cual se ha calibrado el análisis de P Bray en el país. Sin embargo, las evaluaciones realizadas no han mostrado mejoras en el ajuste del método muestreando a 0-5 o 0-10 cm de profundidad (Zamuner et al., 2004).

El caso de S debe ser examinado con mayor detalle ya sea en lo que hace a metodología de análisis como a los estudios de correlación y calibración, los cuales son muy escasos en el país hasta la fecha. Asimismo, deberían evaluarse las posibles variables que contribuyan al mejor conocimiento de la dinámica del nutriente en nuestros agroecosistemas y las posibles alternativas para el diagnóstico de fertilidad.

Por otra parte, como se mencionó anteriormente, las experimentaciones de correlación y calibración de análisis de suelos con fines de diagnóstico se redujeron notablemente en los últimos 20-30 años, tanto en el país como a nivel internacional. Estas experimentaciones de correlación y calibración son esenciales para poder generar las interpretaciones y recomendaciones correspondientes. En este aspecto, las investigaciones realizadas en los últimos años en el país han sido escasas y generalmente en trabajos de iso-dosis (dosis única) en los cuales se pueden definir, como en el caso de P, solamente umbrales críticos. En el caso de N, las investigaciones en el uso del contenido de N-nitratos a 0-60 cm permiten generar calibraciones y facilitan la formulación de interpretaciones y recomendaciones.

Si se pretende utilizar el análisis de suelos con fines de diagnóstico, deberían ampliarse las investigaciones de calibración, evaluando los agro-ecosistemas de las principales áreas productoras. Sería de interés aprovechar las tecnologías actuales imágenes satelitales, mapas de rendimiento, mapas de suelos y topográficos, para lograr una mejor definición de ambientes contrastantes en el agrupamiento de sitios con condiciones similares que puedan responder de manera similar a un determinado nivel de nutriente en suelo y/o a la aplicación de fertilizante. Obviamente, los costos y recursos que involucran los estudios de calibración son una limitante. En este aspecto, las alternativas que se han utilizado en los últimos años y que se discuten en el próximo punto pueden ser válidas para simplificar el trabajo experimental de calibración complementándolo con información que contribuye a un diagnóstico de fertilidad adecuado.

Interpretación de resultados y recomendaciones

La interpretación y subsecuente recomendación de fertilización, puede ser mejorada utilizando metodologías y herramientas complementarias al análisis de suelo. Siguiendo con el ejemplo de la relación disponibilidad de N a la siembra – rendimiento de maíz de la Figura 1, evaluaciones de la condición de sitio como tipo de suelo, historia del lote, potencial de rendimiento, genética empleada, condiciones climáticas, profundidad de napa freática, entre otras, pueden contribuir a una mejor interpretación de los resultados. Otras variables de suelo o planta pueden ser determinadas para ajustar la interpretación, en este caso se podrían mencionar la evaluación de N-nitratos en suelo o de nitratos en jugo de base de tallos al estado V5-6, la determinación del índice de verdor a través del clorímetro Minolta SPAD 502, y la evaluación del N mineralizado (Rice y Havlin, 1994; Melchiori, 2007; Sainz Rozas et al., 2000 y 2008).

En el caso de S, los ambientes más frecuentemente deficientes en S incluyen una o varias de las siguientes condiciones: suelos degradados, con muchos años de agricultura continua (especialmente soja), con historia de cultivos de alta producción con fertilización nitrogenada y fosfatada; suelos arenosos de bajo contenido de materia orgánica; y/o suelos sin aporte de sulfatos por presencia de napas freáticas superficiales.

La variación temporal afecta, en particular, a los nutrientes más asociados con la materia orgánica, como es el caso de N y S, y puede ser abordada a través del uso de modelos de simulación del crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo que incluyan simulaciones de la dinámica de los nutrientes (Hoogenboom et al., 2003). Estos modelos permiten incluir características específicas de suelo, fertilización nitrogenada, manejo de cultivo y de riesgo climático. El software *Triguero*, y su contraparte *Maicero*, (Satorre et al., 2005) han sido ampliamente evaluados y pueden ser utilizados como una herramienta adicional para la toma de decisión en distintas regiones trigueras y maiceras. Los sensores remotos monitorean el status nutricional del cultivo y permiten corregir el mismo según las condiciones de la estación de crecimiento y del sitio (Melchiori, 2007; Shanahan et al., 2008).

Para P, la recomendación con criterio de *suficiencia* o de *construcción y mantenimiento* es una alternativa a decidir por el productor y su asesor. La utilización de un criterio u otro, o de situaciones intermedias, depende en gran medida de la situación de cada productor, el sistema de manejo, la disponibilidad de capital, la relación de precios granos/fertilizante y la tenencia de la tierra, entre otros aspectos. En cualquier caso, el conocimiento de las correlaciones, calibraciones y la interpretación del análisis de suelo contribuirá a una toma de decisión más adecuada para optimizar la eficiencia de uso del nutriente y de otros recursos. A modo de ejemplo, el laboratorio de Suelos de la Universidad del Estado de Kansas ofrece en sus recomendaciones las dos alternativas para que productores y asesores tomen la decisión en cada caso en particular (Leikam et al., 2003). Las alternativas intermedias son válidas y probablemente son las más utilizadas en la actualidad.

Para todos los nutrientes, además de las interacciones que se generan con la condición de sitio y otros factores de manejo, debe considerarse que al implementar MPM del uso de fertilizante, existe una interrelación entre la dosis, la fuente, la forma y el momento de aplicación. La dosis recomendada podría variar según la fuente, forma y momento de aplicación. Por otra parte, la interacción entre nutrientes debe ser atendida para lograr la mejor interpretación y recomendación de fertilización específica.

Consideraciones finales

- Los análisis de suelo con fines de diagnóstico contribuyen positivamente a la toma de decisión en el uso eficiente de los fertilizantes pero presentan limitaciones. Vale la pena citar a Fixen y Grove (1990) para resumir las limitaciones del análisis de P extractable: *“...lo mejor para predecir la probabilidad de respuesta a P, es pobre para predecir la magnitud de la respuesta y muy pobre para determinar la dosis óptima económica de P en un lote y año determinado...”*.
- La complementación del análisis de suelo con otros indicadores de suelo, la información inherente al manejo del suelo y del cultivo y la condición del sitio, contribuyen a mejorar la calidad y alcance de la información que nos brinda el análisis.
- La disponibilidad de otras herramientas como análisis de planta, sensores remotos, modelos de simulación y requerimientos de los cultivos surge como una alternativa de complementación entre las metodologías y no deberían ser vistas como alternativas excluyentes o sustitutivas.
- Los equipos y programas relacionados con la agricultura de precisión han abierto la posibilidad de realizar evaluaciones a nivel de lote facilitando su medición e interpretación. Esta es una ventaja a aprovechar decididamente, para mejorar los diagnósticos de fertilidad y recomendaciones de fertilización. La aplicación de dosis variables de un nutriente evaluadas con monitores de rendimiento en distintas zonas de un lote constituye un ejemplo de esta posibilidad.
- Los análisis de suelos con fines de diagnóstico contribuyen no solamente a los aspectos productivos del sistema sino también a la protección ambiental al mejorar la eficiencia de uso de los nutrientes y disminuir la huella (“footprint”) de la agricultura sobre el medio ambiente.

Referencias Bibliográficas

- Alvarez R., F. Gutiérrez Boem, y G. Rubio.** 2005. Recomendación de fertilización. *En R. Alvarez* (Coord.). Fertilización de Cultivos de Granos y Pasturas. Diagnóstico y Recomendación en la Región Pampeana. Ed. Facultad de Agronomía (UBA). Buenos Aires, Argentina. pp. 37-51.
- Alvarez R., H. Steinbach, C. Alvarez y S. Grigera.** 2003. Recomendaciones para la fertilización nitrogenada de trigo y maíz en la pampa ondulada. *Informaciones Agronómicas* 18:14-19. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Barbagelata P. y R. Melchiori.** 2004. Diagnóstico de la fertilización fosfatada para trigo en siembra directa en Entre Ríos. *Actas CD XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. San Luis. AACCS.
- Barbieri P.A., H.E. Echeverría, y H.R. Sainz Rozas.** 2008. Nitratos en el suelo a la siembra o al macollaje como diagnóstico de la nutrición nitrogenada en trigo en el sudeste bonaerense. *Actas CD XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. San Luis. AACCS.
- Barbieri P.A., H.E. Echeverría y H.R. Sainz Rozas.** 2009. Dosis óptima económica de nitrógeno en trigo según momento de fertilización en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 27(1):115-125.

- Berardo, A.** 1994. Aspectos generales de fertilización y manejo del trigo en el área de influencia de la Estación Experimental INTA-Balcarce. Boletín Técnico 128. EEA INTA Balcarce, Buenos Aires, Argentina.
- Berardo A., S. Ehrh, F. Grattone y F. García.** 2001. Corn yield response to phosphorus fertilization in the southern Pampas. *Better Crops International* 15(1): 3-5.
- Berardo A. y F. Grattone.** 2000. Fertilización fosfatada requerida para alcanzar niveles objetivos de P-Bray en un argiudol. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, AACCS. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Brown J.** 1987. Soil Testing: Sampling, correlation, calibration and interpretation. SSSA Spec. Pub. 21. SSSA. Madison, Wisconsin, EE.UU. 144 pag.
- Ciampitti I.A.** 2009. Tesis Magister Scientiae en Ciencias del Suelo. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Capital Federal, Buenos Aires. 196 pp.
- Ciampitti I.A., F.O. García, L.I. Picone y G. Rubio.** 2008. Phosphorus in field crop rotations of the Pampas of Argentina: Dynamics of Bray P, P balance and soil P fractions. *Agronomy Abstracts. ASA-CSSA-SSSA-GSA International Annual Meetings.* October 5-9. Houston, Texas. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, EE.UU.
- Díaz Zorita M.** 2002. Nutrición mineral y fertilización *En* M. Díaz Zorita y G. Duarte (ed.) Manual práctico para el cultivo de girasol. Ed. Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina. pp. 77-96.
- Díaz Zorita M., F. García y R. Melgar.** 2002. Fertilización en soja y trigo-soja: Respuesta de la fertilización en la región pampeana. Boletín Proyecto Fertilizar. EEA INTA Pergamino. 44 pág.
- Echeverría H.E. y F.O. García.** 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. Boletín técnico 149, INTA EEA Balcarce.
- Ferrari M., J. Ostojic, L. Ventimiglia, H. Carta y G. Ferraris.** 2000. Fertilización de maíz: buscando una mayor eficiencia en el manejo del nitrógeno y el fósforo. Actas: "Fertilidad 2000" (IPNI Cono Sur) Rosario, pp. 23-37.
- Ferraris G., F. Salvagiotti, P. Prystupa y F. Gutiérrez Boem.** 2004. Disponibilidad de azufre y respuesta de la soja de primera a la fertilización. Actas CD XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos. AACCS.
- Fixen, P.E., y J. Grove.** 1990. Testing soils for phosphorus. Pp. 141- 180. *In:* R.L. Westerman (ed.) *Soil testing and plant analysis.* 3a. edición. SSSA Book Number 3. Madison, Wisconsin, EE.UU.
- Fontanetto H.** 2004. Nutrición de los cultivos y manejo de la fertilidad del suelo en la región central de Santa Fe. En: Actas Fertilidad de Suelos para una Agricultura Sustentable (IPNI Cono Sur) Pag. 19-25.
- García F.O.** 2002. Manejo de la fertilidad de suelos y fertilización de cultivos para altos rendimientos en la región pampeana argentina. En: www.ipni.net/lasc
- García F.O.** 2007. Requerimientos nutricionales del cultivo: Respuestas a la fertilización. In E. Satorre (ed.). Producción de trigo. 1a. edición. AACREA. Buenos Aires, Argentina. pp. 37-42. ISBN 978-987-22576-8-2.
- García F., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Pozzi, L. Firpo, G. Deza Marin y A. Berardo.** 2006. La Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe: Resultados y conclusiones de los primeros seis años 2000-2005. AACREA. 32 pp. ISBN 987-22576-7-1.
- García F., K. Fabrizzi, M. Ruffo y P. Scarabicchi.** 1997. Fertilización nitrogenada y fosfatada de maíz en el sudeste de Buenos Aires. Actas VI Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.
- García F.O., L.I. Picone y A. Berardo.** 2005. Capítulo 5: Fósforo. En: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Echeverría H.E. y García F.O. (Eds.). 99-121. INTA.
- González M. M. López, G. Moreno, R. Comese y M. Madero.** . 2007. Comparación de los métodos de Bray & Kurtz n° I y Mehlich III en la determinación de la disponibilidad de fósforo en suelos con fertilizaciones continuas. *Ci. Suelo* 25(1) 23-29.
- González Montaner J., G. Maddonni, N. Mailland y M. Porsborg.** 1991. Optimización de la respuesta a la fertilización nitrogenada en el cultivo de trigo a partir de un modelo de

- decisión para la Subregión IV (Sudeste de la Provincia de Buenos Aires). *Ciencia del Suelo* 9 (1-2):41-51.
- Gutiérrez Boem F.H., J.S. Scheiner, J. Moyano y R.S. Lavado.** 2002. Cambio en la disponibilidad de fósforo del suelo por el agregado de fertilizante. Actas XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn. Versión CD.
- Gutiérrez Boem F., G. Rubio y R. Alvarez.** 2005. Diagnostico de la disponibilidad de nutrientes. *En* R. Alvarez (Coord.). Fertilización de Cultivos de Granos y Pasturas. Diagnostico y Recomendación en la Región Pampeana. Ed. Facultad de Agronomía (UBA). Buenos Aires, Argentina. pp. 27-36.
- Havlin J., J. Beaton, S. Tisdale y W. Nelson.** 2005. *Soil Fertility and Fertilizers*. Pearson Education Inc. Upper Saddle River, New Jersey, EE.UU. 7a. edición. 515 pag.
- Hoogenboom G., J.W. Jones, C.H. Porter, P.W. Wilkens, K.J. Boote, W.D. Batchelor, L.A. Hunt y G.Y. Tsuji. (Eds).** 2003. Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, EE.UU.
- Janssen B.H., F.C.T. Guiking, D. van der Eijk, E.M.A. Smaling, J. Wolf, and H. van Reuler.** 1990. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma*, 46: 299-318.
- Leikam D., R. Lamond y D. Mengel.** 2003. Soil Test Interpretations and Fertilizer Recommendations. Department of Agronomy, Kansas State University. MF-2586. Manhattan, Kansas, EE.UU. Disponible en <http://www.agronomy.ksu.edu/SOILTESTING/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1813>.
- MAGyP.** 2010. Disponible en http://www.minagri.gov.ar/SAGPyA/agricultura/agua_y_suelos/01=SAMLA/01-institucional/index.php?PHPSESSID=e154f48eff5ec48f024a537531c6acc5
- Malavolta E., G. Vitti y S. Oliveira.** 1997. Avaliação do estado nutricional das plantas. POTAFOS. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Piracicaba, Sao Paulo, Brasil. 2ª. Edición. 319 pag.
- Mallarino A.P. y A.M. Blackmer** 1992. Comparison of Methods for Determining Critical Concentrations of Soil Test Phosphorus for Corn. *Agron. J.* 84: 850-856.
- Marban L. y S. Ratto (ed.).** 2005. Tecnologías en análisis de suelos. AACs. Buenos Aires. 215 pp.
- Melchiori R.J.** 2007. Estado actual del manejo sitio específico de nitrógeno en Argentina. *In* F. Garcia e I. Ciampitti (ed.). Actas Simposio "Fertilidad 2007". IPNI Cono Sur-Fertilizar AC. Acaassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Melchiori R.J.M., O.P. Papparotti y P.A. Barbagelata.** 2002. Fertilización fosfatada en soja: validación del nivel crítico. INTA EEA Paraná. En: www.parana.inta.gov.ar
- Mistrorigo D., R. De Carli, F. Aranguen, P. Beret y A. Lisasso.** 2000. Fertilización de maíz en siembra directa en Entre Ríos. En Jornadas de Intercambio Técnico de Maíz. AAPRESID. Rosario, Argentina.
- Pagani A, Echeverría HE, Sainz Rozas H, Barbieri PA.** 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 26(2):183-193.
- Peck T. J. Cope y D. Whitney.** 1977. Soil Testing: Correlating and interpreting the analytical results. ASA Spec. Pub. 29. ASA. Madison, Wisconsin, EE.UU. 117 pag.
- Reussi Calvo N. y H. Echeverría.** 2009. Azufre: Marco conceptual para definir las mejores prácticas de manejo en los cultivos. *En* F. Garcia e I. Ciampitti (ed.). Simposio Fertilidad 2009: Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos. IPNI Cono Sur-Fertilizar AC. pp.52-59.
- Rice C. y J. Havlin.** 1994. Integrating mineralizable nitrogen indices into fertilizer nitrogen recommendations. *In* J. Havlin y J. Jacobsen (ed.). Soil tesying: Prospects for improving nutrient recommendations. SSSA Spec. Pub. 40. SSSA. Madison, Wisconsin, EE.UU. pp. 1-13.
- Rubio G., M.J. Cabello, F.H. Gutiérrez Boem y E. Munaro.** 2008. Estimating available soil P increases after P additions in Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:1721-1727.

- Ruiz R., E. Satorre, G. Maddoni, J. Carcova y M. Otegui.** 2001. Umbrales de decisión para la fertilización nitrogenada en maíz. VII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.
- Sainz Rozas H., H. Echeverría, G. Studdert y G. Domínguez.** 2000. Evaluation of the presidedress soil nitrogen test for no-tillage maize fertilized at planting. *Agron. J.* 92:1176-1183.
- Sainz Rozas H., P. Calviño, H. Echeverría, M. Redolatti y P. Barbieri.** 2008. Contribution of anaerobically mineralized nitrogen to reliability of planting or presidedress soil nitrogen test in maize. *Agronomy Journal* 100:1020-1025.
- Satorre E., F. Menéndez y G. Tinghitella.** 2005. El modelo Triguero: Recomendaciones de fertilización nitrogenada en trigo. Simposio "Fertilidad 2005: Nutrición, Producción y Ambiente". Rosario, 27-28 Abril. INPOFOS Cono Sur-Fertilizar A.C. pp. 3-11.
- Shanahan J.F., N.R. Kitchen, W.R. Raun, y J.S. Schepers.** 2008. Responsive in-season nitrogen management for cereals. *computers and electronics in agriculture* 6 1:51-62.
- Sims J.T.** 2000. Soil fertility evaluation. *En* M.E. Sumner (ed.). *Handbook of Soil Science*. CRC Press. Boca Raton, FL. pp. D113-D153.
- Van Raij B.** 1998. Bioavailable tests: alternatives to standard soil extractions. *Commun. Soil Sci. Plant Ana.* 29:1553-1570.
- Walsh L. y J. Beaton.** 1973. *Soil Testing and Plant Analysis*. Revised edition. SSSA. Madison, Wisconsin, EE.UU. 491 pag.
- Zamuner E., L. Picone y H. Echeverría.** 2004. Comparación de métodos de extracción de fósforo disponible Bray I sobre la respuesta de la fertilización fosfatada en trigo. *Ciencia del Suelo* 22 (2):57-63.