

**SOJA: RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN EN EL ÁREA SOJERA ARGENTINA.
Resultados campañas 2000-01 y 2001-02 de la red de ensayos del proyecto Fertilizar-INTA.**

Preparación del informe: Gustavo Ferraris (EEA INTA Pergamino), Flavio Gutierrez Boem (FA-UBA). Hernán Echeverría (EEA INTA Balcarce).

Coordinación: Martín Díaz Zorita (EEA INTA Villegas), Fernando García (INPOFOS), Ricardo Melgar (EEA INTA Pergamino)

Participantes: Norma Arias (EEA INTA Concepción del Uruguay), Mirian Barraco (EEA INTA Villegas), Alfredo Bono (EEA INTA Anguil), Daniel Canova (actividad privada), Héctor Carta (INTA 9 de Julio) , Julio Castellarín (EEA INTA Oliveros), Graciela Cordone (INTA Casilda), Juan De Batista (EEA INTA Concepción del Uruguay), Martín Díaz Zorita (EEA INTA Villegas), Gustavo Duarte (EEA INTA Villegas), Hernán Echeverría (EEA INTA Balcarce), Manuel Ferrari (EEA INTA Pergamino), Gustavo Ferraris (EEA INTA Pergamino), Hugo Fontanetto (EEA INTA Rafaela), Carlos Galarza (EEA INTA Marcos Juárez), Guillermo Gerster (INTA Cañada de Gómez), Néstor González (EEA INTA Pergamino), Vicente Gudelj (EEA INTA Marcos Juárez), Edgardo Guevara (EEA INTA Pergamino), Flavio Gutierrez Boem (FA-UBA), Fernando Martinez (INTA Casilda), Santiago Meira (EEA INTA Pergamino), Ricardo Melchiori (EEA INTA Paraná), Fernando Mousegne (INTA S.A. de Areco), Oscar Novello (GeoLab Cañada de Gómez), Juan Ostojic (EEA INTA Pergamino), Osvaldo Paparotti (EEA INTA Paraná), Hugo Pedrol (EEA INTA Oliveros), Pablo Prystupa (FA-UBA), Alberto Quiroga (EEA INTA Anguil), Nicolás Ridley (actividad privada), Sergio Rillo (INTA 9 de Julio), Hernán Sainz Rozas (FCA Balcarce), Fernando Salvagiotti (EEA INTA Oliveros), Héctor Sánchez (EEA INTA Famaillá), Néstor Trentino (INTA Las Rosas), Pedro Vallone (EEA INTA Marcos Juárez), Luis Ventimiglia (INTA 9 de Julio), Hugo Vivas (EEA INTA Rafaela).

1. INTRODUCCIÓN

La producción de granos se ha duplicado en pocos años en la Argentina, aumentado la superficie sembrada menos de un 20 % (Formento, 2001). Este incremento se produjo a causa de una mejora de la producción por unidad de superficie, basada en la utilización de materiales de mayor potencial genético, mejores prácticas de cultivo (debe mencionarse especialmente la difusión alcanzada por la siembra directa) y el empleo intensivo de insumos para aumentar y proteger la producción. En esta tecnología de insumos los fertilizantes han jugado un rol preponderante.

A pesar de haberse incrementado su utilización, los fertilizantes aportados no han sido suficientes para reponer la extracción de nutrientes ocasionada por un cambio en los sistemas productivos pampeanos, desde explotaciones mixtas con frecuentes rotaciones de praderas hacia una agricultura generalizada con preponderancia del monocultivo de soja. Esto ha ocasionado un marcado

deterioro de la fertilidad de los suelos, disimulada durante mucho tiempo por la gran plasticidad del cultivo de Soja, predominante en la rotación. El mismo es capaz de obtener altos rendimientos con baja disponibilidad de nutrientes en el suelo. Sin embargo, pocos años atrás se comenzaron a observar respuestas al agregado de fósforo (P) y azufre (S) en diversas regiones del país (G de López Camelo et al, 1995; Martínez y Cordone, 1998; Gutiérrez Boem et al., 1999; Melgar y Gearhart, 2000).

Las experiencias previas en fertilización del cultivo de soja, a pesar de haber mostrado lo promisorio de la práctica, constituyen esfuerzos locales insuficientes para desarrollar criterios de recomendación que permitan establecer cuando es conveniente fertilizar el cultivo en toda la región sojera. Respecto del P, aún cuando la precisión alcanzada en otros cultivos con el diagnóstico basado en el análisis de suelo (0-20 cm, método Bray 1) permite suponer que esta metodología también podría ser utilizada en soja, no se han establecido umbrales críticos de respuesta que permitan decidir cuando es conveniente fertilizar. Más aún en S, si bien se han caracterizado ambientes que tendrían una alta probabilidad de respuesta, no se cuenta con una metodología de diagnóstico debidamente ajustada que permita anticipar la respuesta a la fertilización. En relación a la aplicación de otros nutrientes no convencionales, pocos trabajos han evaluado la respuesta a su aplicación en soja. Sin embargo, para estos nutrientes es aún más acentuado el escenario de alta exportación con las cosechas sin reposición por fertilización, por lo que es válido estudiar la posible aparición de áreas deficientes.

En vistas a las dificultades comentadas para elaborar recomendaciones de fertilización en soja de Primera, durante las campañas 2000/01 y 2001/02, en el marco del Proyecto INTA-Fertilizar se realizó una amplia red de ensayos, que abarcó 47 sitios en la zona pampeana y 6 en el NOA. Los resultados del primer año permitieron establecer umbrales preliminares de respuesta a P, e identificar criterios que mostraron resultados alentadores explicando la respuesta al S, algunos de los cuales han sido descriptos por Echeverría et al. (2001). La segunda campaña tuvo como finalidad comprobar la validez de aquellos resultados. Los objetivos generales de la red de ensayos fueron:

- Evaluar la respuesta de la Soja a la fertilización con P, S y otros nutrientes en diferentes zonas de producción de Soja.
- Calibrar el análisis en capa superficial de suelo a la siembra como método de diagnóstico para fertilización fosforada, y establecer umbrales críticos de respuesta para decidir la fertilización.
- Valorar la utilidad de diferentes indicadores de suelo y de cultivo para predecir la respuesta de la Soja a la fertilización con S, y desarrollar a partir de ellos una metodología de diagnóstico.
- Estudiar la disponibilidad de nutrientes no convencionales en suelos de la región Sojera Argentina, y verificar la validez de los umbrales críticos habitualmente propuestos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Durante la campaña 2000/01 se condujeron 29 ensayos en la región pampeana. A estos se le agregaron 18 experimentos en la zona pampeana y 6 en el NOA durante la campaña 2001/02. Las características salientes de los sitios experimentales se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Localización y características destacadas de los sitios experimentales conducidos durante las campañas 2000/01 y 2001/02.

	Partido/ Departamento	Provincia	Unidad Ejecutora	Serie de Suelos	Tipo de Suelos	Sistema de labranza
Ensayos Zona Pampeana Campaña 2000/01						
1.	San Jerónimo	Santa Fe	INTA Rafaela	Clason	Argiudol típico	S. D.
2.	Las Colonias	Santa Fe	INTA Rafaela	Esperanza	Argiudol típico	S. D.
3.	Belgrano	Santa Fe	INTA Oliveros	Los Cardos	Argiudol típico	S. D.
4.	Paraná 1	Entre Ríos	INTA Paraná			

5.	Paraná 2	Entre Ríos	INTA Paraná			
6.	Río Cuarto	Córdoba	INTA M. Juárez	Olaeta	Haplustol údico	L. C.
7.	Marcos Juárez 1	Córdoba	INTA M. Juárez	M. Juárez (Comp. 8)	Argiudol típico	S. D.
8.	Marcos Juárez 2	Córdoba	INTA M. Juárez	Marcos Juárez	Argiudol típico	S. D.
9.	Iriondo	Santa Fe	INTA C. de Gómez	Marcos Juárez	Argiudol típico	S. D.
10.	Caseros	Santa Fe	INTA Casilda	Casilda 4	Argiudol típico	S. D.
11.	General López	Santa Fe	INTA Pergamino	Hughes	Argiudol típico	S. D.
12.	Colón	Bs. As.	INTA Pergamino	Rojas	Argiudol típico	S. D.
13.	Pergamino 1	Bs. As.	INTA Pergamino	Pergamino	Argiudol típico	L. C.
14.	Pergamino	Bs. As.	INTA Pergamino	Pergamino fase 2	Argiudol típico	S. D.
15.	S. A. de Areco	Bs. As.	INTA S.A. de Areco	Cap. Sarmiento	Argiudol típico	L. C.
16.	S. A. de Areco	Bs. As.	INTA S.A. de Areco	Cap. Sarmiento	Argiudol típico	S. D.
17.	Rojas	Bs. As.	INTA Pergamino	Rojas	Argiudol típico	S. D.
18.	Junín 1	Bs. As.	Fac. Agron. UBA	Junín	Hapludol típico	L. C.
19.	Junín 2	Bs. As.	Fac. Agron. UBA	O'Higgins	Argiudol típico	S. D.
20.	9 de Julio 1	Bs. As.	INTA 9 de Julio	Norumbega	Hapludol éntico	S. D.
21.	9 de Julio 2	Bs. As.	INTA 9 de Julio	La Albina	Hapl. Thapto nátrico	S. D.
22.	Tandil 1	Bs. As.	INTA Balcarce	Tandil	Argiudol típico	
23.	Tandil 2	Bs. As.	INTA Balcarce	Tandil	Argiudol típico	
24.	Rivadavia	Bs. As.	INTA Gral. Villegas			
25.	Trenque Lauquen	Bs. As.	INTA Gral. Villegas			
26.	Maracó	La Pampa	INTA Anguil	(no detallado)	Hapludol éntico	S. D.
27.	Catriló 1	La Pampa	INTA Anguil	(no detallado)	Hapludol éntico	L. C.
28.	Catriló 2	La Pampa	INTA Anguil	(no detallado)	Hapludol éntico	L. M.
29.	Capital	La Pampa	INTA Anguil	(no detallado)	Hapludol éntico	S. D.
Ensayos del NOA Campaña 2001/02						
30.	Anta 1	Salta	INTA Famaillá	(no detallado)	(no detallado)	S. D.
31.	Anta 2	Salta	INTA Famaillá	(no detallado)	(no detallado)	S. D.
32.	Burruyacu 1	Tucumán	INTA Famaillá	(no detallado)	(no detallado)	S. D.
33.	Burruyacu 2	Tucumán	INTA Famaillá	(no detallado)	(no detallado)	S. D.
34.	Burruyacu 3	Tucumán	INTA Famaillá	(no detallado)	(no detallado)	S. D.
35.	Cruz Alta	Tucumán	INTA Famaillá	(no detallado)	(no detallado)	S. D.
Ensayos Zona Pampeana Campaña 2001/02						
36.	Río Tercero	Córdoba	INTA Manfredi	(no detallado)	Molisol	
37.	Lozada	Córdoba	INTA Manfredi	(no detallado)	Entisol	
38.	San Jerónimo	Santa Fe	INTA Rafaela	Clason	Argiudol típico	S. D.
39.	Belgrano	Santa Fe	Actividad privada	Armstrong	Argiudol típico	S. D.
40.	Paraná	Santa Fe	INTA Paraná	Los Capones	Peludert árgico	S. D.
41.	Uruguay	Entre Ríos	INTA C. del Uruguay	Don Guillermo	Peludert árgico	L. M.

42.	Uruguay	Entre Ríos	INTA C. del Uruguay	Don Guillermo	Peludert árgico	L. M.
43.	Marcos Juárez	Córdoba	INTA M. Juárez	Marcos Juárez	Argiudol típico	S. D.
44.	Río Cuarto	Córdoba	INTA M. Juárez	(no detallado)	Haplustol údico	S. D.
45.	Constitución	Santa Fe	Actividad privada	Pergamino 27	Argiudol típico	S. D.
46.	Colón	Bs. As.	INTA Pergamino	Rojas	Argiudol típico	S. D.
47.	S. A. de Areco	Bs. As.	INTA S.A. de Areco	Cap. Sarmiento	Argiudol típico	S. D.
48.	Junín 1	Bs. As.	Fac. Agron. UBA	Junín	Hapludol típico	S. D.
49.	Junín 2	Bs. As.	Fac. Agron. UBA	Junín	Hapludol típico	L. C.
50.	9 de Julio	Bs. As.	INTA 9 de Julio	Norumbega	Hapludol éntico	S. D.
51.	General Pinto	Bs. As.	INTA Gral. Villegas	Lincoln	Hapludol típico	S. D.
52.	Tandil	Bs. As.	INTA Balcarce	Tandil	Argiudol típico	S. D.
53.	Capital	La Pampa	INTA Anguil	(no detallado)	Haplustol éntico	S. D.

S.D.: Siembra Directa

L.C.: Labranza Convencional

L.M.: Labranza Mínima

(no detallado): Significa que los suelos no han sido relevados a ese nivel de detalle.

Los ensayos tuvieron un diseño en bloques aleatorizados con cuatro repeticiones. El tamaño de parcela osciló entre 20-50 m de largo, y el ancho de la sembradora utilizada para la siembra. Los fertilizantes se aplicaron a la siembra, separados levemente al costado o por debajo de la semilla para evitar posibles efectos fitotóxicos. La semilla fue inoculada en doble dosis, y se le agregó Cobalto (Co) y Molibdeno (Mo) en todos los casos, para favorecer plenamente la nodulación y evitar así que carencias de Nitrógeno (N) afecten la respuesta a los nutrientes estudiados.

Si bien en algunos experimentos se evaluaron otros tratamientos para atender necesidades de investigación locales, todos los ensayos tuvieron un patrón básico que incluyó los siguientes tratamientos:

T0: Testigo absoluto

T1: P (20 kg/ha de P)

T2: S (15 kg/ha de S)

T3: PS (20 kg/ha de P + 15 kg/ha de S)

T4: PS + Potasio (K) + Magnesio (Mg) + Micronutrientes (20 kg/ha de P + 15 kg/ha de S + 12,8 kg/ha de K + 7,8 kg/ha de Mg + Zinc (Zn) + Cobre (Cu) + Boro (B)).

La calibración y establecimiento de umbrales críticos de respuesta a P se realizó en base al análisis de suelo (0-20 cm), sobre muestras tomadas por bloques al momento de la siembra, y evaluadas mediante el método Bray y Kurtz N°1. No hubo interacción P x S ($P=0,10$) en 49 de 53 sitios. La respuesta a la fertilización con P se calculó por diferencia con el tratamiento testigo:

Respuesta a P = (P-Testigo)

Para predecir la respuesta de la soja a la fertilización con S, en todos los ensayos se evaluaron parámetros de suelo al momento de la siembra. En ambas campañas se realizaron lecturas de clorofila (SPAD 502) en hoja, en 13 sitios (estado V4) y 16 sitios (estado R2) del Norte de Bs As. Las lecturas se efectuaron en todos los casos, en la lámina central de la última hoja expandida. Sobre muestras foliares provenientes de 13 ensayos (campaña 2000/01) que abarcaban diversas zonas geográficas se analizó la concentración de S en la última hoja expandida, también en los estados V4 y R2. En muestras de suelo provenientes de 12 sitios (campaña 2000/01), caracterizados por su bajo error

experimental y diversidad en la respuesta a la fertilización, se cuantificó en forma directa la mineralización de S a través de incubaciones cortas de suelo (15 días) en condiciones controladas de temperatura (30 °C) y humedad (80 % CC). Con los datos del primer año de ensayos, se comparó el ajuste logrado con los indicadores cuando se consideraron los datos de toda la red (29 sitios) y de un grupo seleccionado de ensayos (11 sitios).

Como ya se ha expresado, en 43 de 47 experimentos de la región pampeana, y 5 de los 6 experimentos del NOA la fertilización con P no afectó la respuesta al S (ausencia de interacción P x S, $P < 0,10$), por lo tanto, para la evaluación de variables de suelo, la respuesta se calculó como un promedio:

$$\text{Respuesta a S} = [(PS - P) + (S - \text{Testigo})] / 2$$

En cambio, la valoración de las determinaciones foliares se efectuó en relación a los rendimientos relativos (RR) con o sin P en forma separada, ya que se contaba con datos de análisis químicos y lecturas de clorofila individuales para cada tratamiento:

$$\text{RR sin P} = \text{Rendimiento testigo} / \text{Rendimiento S}$$

$$\text{RR con P} = \text{Rendimiento P} / \text{Rendimiento PS}$$

Por su parte, la respuesta a otros nutrientes se calculó por diferencia con el tratamiento PS:

$$\text{Respuesta a otros nutrientes} = \text{PSKMgCuZnB} - \text{PS}$$

En todos los sitios se midió agua a la siembra (1 m de profundidad). A lo largo de todo el ciclo se siguió la fenología del cultivo, y se evaluó nodulación durante el período reproductivo. Los ensayos fueron analizados estadísticamente a través del análisis de la varianza (diseño básico de 5 tratamientos, $P = 0,10$) y la asociación entre las variables evaluadas y la respuesta a la fertilización se realizó a través de procedimientos de regresión y el método de los cuadrantes de Cate y Nelson (1971).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Respuesta al agregado de fósforo

En la campaña anterior (2000/01) se realizaron 29 ensayos en sitios que tenían un amplio rango de niveles de P en el suelo (entre 2 y 103 ppm). Esto permitió ajustar una función que relacionaba la respuesta a la fertilización fosforada con el nivel de P del suelo. La respuesta a P fue calculada como la diferencia en rendimiento entre el tratamiento fertilizado con P y el testigo. Se preveía que con el agregado de nuevos sitios este modelo podría ser mejorado. Este año (2001/02) se realizaron 18 ensayos en la región pampeana y 6 en el NOA cubriendo también un amplio rango de disponibilidad de P (3-59 ppm). Si se consideran los 53 sitios en forma conjunta no es posible encontrar un modelo que explique la respuesta a la aplicación de P en función del P disponible en el suelo (Figura 1).

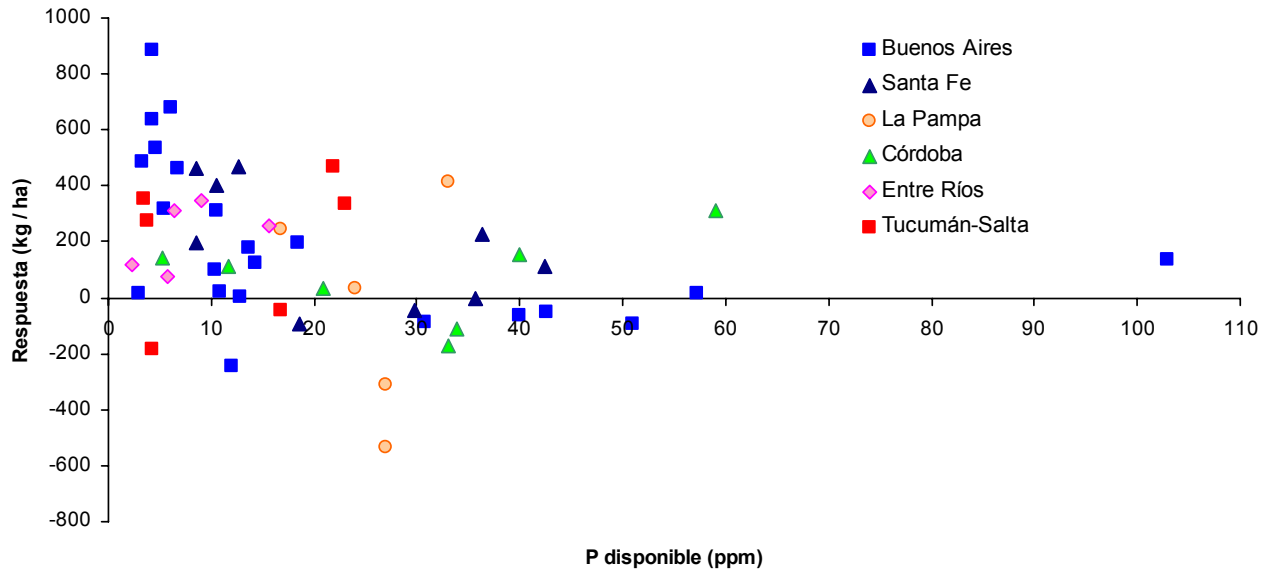


Figura 1: Respuesta del cultivo de soja al agregado de 20 kg/ha de P a la siembra, en función del nivel de P disponible en el suelo (Bray1, 0-20 cm). Cada punto corresponde a uno de los 53 ensayos de las campañas 2000/01 y 2001/02.

Si se consideran sólo los sitios de las provincias de Buenos Aires y Santa Fe (31 sitios) se observa una clara tendencia central en la mayoría de ellos (29) (Figura 2). En estos casos la respuesta a la fertilización fosforada aumenta al disminuir el contenido de P del suelo. De acuerdo a la función ajustada la respuesta aumenta 50 kg/ha por cada ppm de P por debajo de 16 ppm. Por encima de 16 ppm la respuesta esperada es cero. Así es como es esperable obtener una respuesta del orden de los 200 kg/ha en suelos con 12 ppm de P. Esta función permite determinar fácilmente el nivel de P de suelo por debajo del cual la respuesta esperada es superior al costo de la fertilización. Por ejemplo, si se necesitan 150 kg de soja para pagar una fertilización fosforada sería recomendable fertilizar suelos que tengan menos de 13 ppm de P $[(795 - 150) / 49 = 13.1]$.

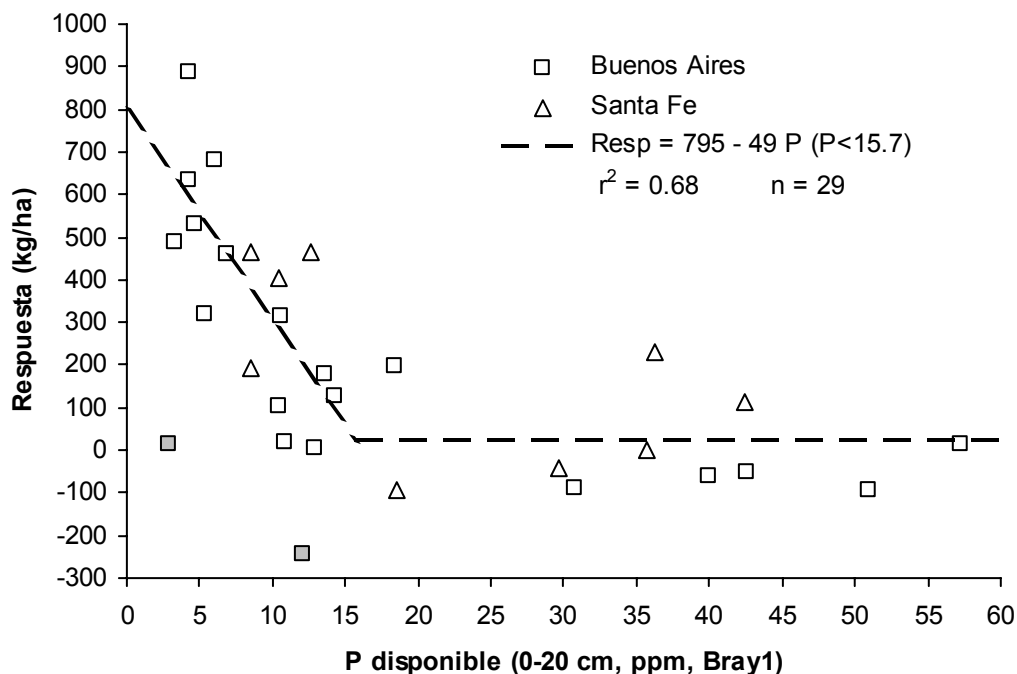


Figura 2: Respuesta del cultivo de soja al agregado de 20 kg/ha de P a la siembra, en función del nivel de P disponible en el suelo (Bray1, 0-20 cm). Cada punto corresponde a uno de los 31 ensayos realizados en las Provincias de Sta. Fe y Bs.As, campañas 2000/01 y 2001/02. Dos sitios con valores extremos fueron excluidos del modelo.

Para el mismo grupo de datos se ajustó una curva relacionando el rendimiento relativo (% del rendimiento máximo) con el contenido de P del suelo (Figura 3). De acuerdo a esta función se logra un rendimiento relativo del 90-95% con niveles de P del suelo de 8-13 ppm. Por encima de este rango de disponibilidad (>13ppm) la probabilidad de respuesta es muy baja y se considera que la disponibilidad del nutriente para el cultivo de soja es alta. Por debajo del rango medio (<8ppm) la probabilidad de respuesta a la fertilización es alta, y se considera que la disponibilidad de P para la soja es baja (Tabla 2). Dentro de este rango medio de disponibilidad se encuentran los valores críticos encontrados en otros trabajos realizados en la región pampeana. Melgar y colaboradores (1995) señalaron que había una alta probabilidad de respuesta cuando los niveles de P eran inferiores a 9 ppm. En ensayos realizados en Vertisoles de Entre Ríos se observó que se alcanza el 95% del rendimiento máximo cuando el suelo tiene 9,5 ppm de P (Barbagelata et al., 2000). Para el sudeste de la provincia de Buenos Aires, se propuso como disponibilidad media de P el rango 8-11 ppm (Echeverría y García, 1998).

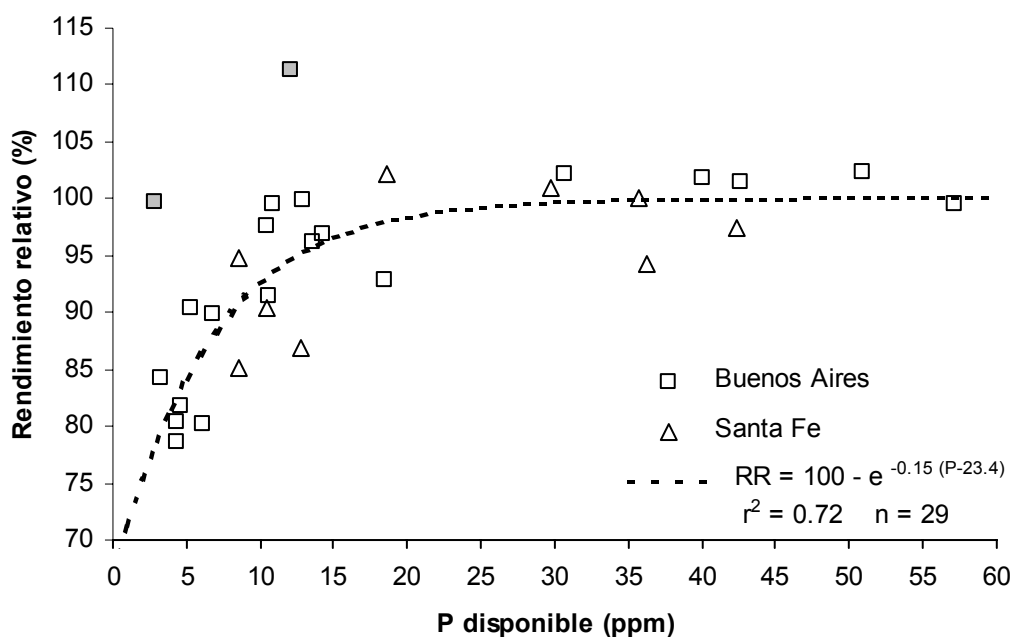


Figura 3: Rendimiento relativo del cultivo de soja en función del nivel de P disponible en el suelo (Bray1, 0-20 cm). Cada punto corresponde a uno de los 31 ensayos realizados en las Provincias de Sta. Fe y Bs.As, campañas 2000/01 y 2001/02. Dos sitios con valores extremos fueron excluidos del modelo.

Tabla 2: Clases de disponibilidad de P de suelo para el cultivo de soja					
Disponibilidad	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
P (ppm, Bray1, 0-20 cm)	-3,5	3,5-8	8-13	13-19	+19
Rendimiento relativo (%)	-80	80-90	90-95	95-98	+98

Si se compara este rango medio de disponibilidad de P con los obtenidos en el medio-oeste norteamericano se observa que es similar o ligeramente inferior (Tabla 3). Dentro del rango medio, en general la recomendación de fertilización tiene por objetivo mantener el nivel de disponibilidad de P del suelo (dosis de mantenimiento). El límite inferior de este rango es el que en general se considera como valor crítico de disponibilidad por debajo del cual la probabilidad de respuesta es alta.

Tabla 3: Rango medio de disponibilidad de P para el cultivo de soja, de acuerdo a los servicios de extensión públicos de varios estados del medio-oeste norteamericano			
Estado	Extractante	Rango medio de disponibilidad (ppm)	Fuente
Iowa	Bray 1	16-20	Voss et al., 1999
Illinois	Bray 1	15-20	Hoelt y Peck, 2001
Missouri	Bray 1	10-20	Minor et al., 1993
Kansas	Bray 1	13-25	Whitney, 1997
Nebraska	Bray 1	6-10	Penas y Wiese, 1996
South Dakota	Bray 1	11-15	Gerwing y Gelderman, 1998
North Dakota	Bray 1	11-15	Franzen, 1999
Minnesota	Bray 1	11-15	Rehm et al., 1994
Wisconsin	Bray 1	8-13	Kelling et al., 1998

3.2. FERTILIZACIÓN CON S EN EL NOA

De los 6 ensayos realizados en las provincias de Salta y Tucumán en la campaña 2001/02, sólo uno manifestó respuesta al agregado de S. El incremento promedio de rendimiento para los sitios evaluados se determinó en 55 kg/ha. Estos resultados podrían explicarse por el elevado nivel de S-sulfatos observado en todos los sitios (12,1; 9,1 y 8,5 ppm promedio para 0-20, 20-40 y 40-60 cm, respectivamente). Tres ensayos mostraron una pequeña diferencia a favor de los tratamientos fertilizados, y se caracterizaron por presentar muy bajo contenido de Materia orgánica (muy cercano o menor al 2 %). En cambio, el único sitio con respuesta negativa tenía una concentración de S-sulfatos en superficie de 20 ppm.

3.3. FERTILIZACIÓN CON S EN LA REGIÓN PAMPEANA

A) Características generales de la respuesta al agregado de S

En la región pampeana se observaron respuestas estadísticamente significativas al agregado de S en 10 ensayos ($P < 0,10$). Asimismo, 11 de los 47 sitios presentaron respuesta $>$ a 200 kg/ha, y 8 de estos $>$ a 300 kg/ha. Este nivel de respuesta permitiría obtener un ingreso adicional que superaría el costo de la fertilización con S, estimado en 1,5 q/ha de Soja (Julio de 2002), incluyendo fertilizante y costo de aplicación. En la Tabla 4 se describen los sitios con respuesta positiva al S.

Tabla 4. Sitios con respuesta positiva ($>$ 200 kg/ha) a la fertilización con S. Red de ensayos de fertilización en Soja de Primera, campañas 2000/01 y 2001/02.

<i>Partido/ Departamento</i>	<i>Provincia</i>	<i>Respuesta al Agregado de S (kg/ha)</i>	<i>Tipo de Suelo</i>
San Jerónimo I-1	Santa Fe	231,0	Argiudol típico
Las Colonias I-1	Santa Fe	276,5	Argiudol típico
Belgrano I-1	Santa Fe	314,0	Argiudol típico
Marcos Juárez I-1	Córdoba	301,5	Argiudol típico
S.A. de Areco I-2	Buenos Aires	300,0	Argiudol típico
Catrilló I-2	La Pampa	394,0	Hapludol éntico
San Jerónimo II-1	Santa Fe	243,7	Argiudol típico
Colón II-1	Buenos Aires	404,3	Argiudol típico
Junín II-1	Buenos Aires	310,1	Hapludol típico
9 de Julio II-1	Buenos Aires	368,7	Hapludol éntico
Tandil II-1	Buenos Aires	359,2	Argiudol típico

El símbolo romano indica el año en que se realizó el ensayo: I=Campaña 2000/01. II=Campaña 2001/02.

El Centro- Sur de Santa Fe es la región donde la respuesta al agregado de S se presenta con mayor frecuencia, alcanzando al 50 % de los ensayos realizados en el área (4 sobre 8). El resto de los sitios con respuesta se ubicaron en diferentes lugares del país, y en varios tipos de suelos. Asimismo, se repartieron en una proporción similar entre ambas campañas. Analizando características del cultivo, solamente se determinó respuesta al S en lotes sembrados con variedades de Grupo IV de maduración, que ocuparon el 75 % de los ensayos. Los cultivos que respondieron a la fertilización estaban sembrados en una amplia variedad de espaciamientos (38 a 70 cm).

B) Predicción de la respuesta al agregado de S en la Región Pampeana

No hubo asociación definida entre los años de agricultura continua y la respuesta en rendimiento debido a la fertilización con S, sin embargo el 70 % de los lotes con más de 20 años de

agricultura respondieron en forma positiva a su agregado. No se observó en cambio ninguna relación con el cultivo antecesor.

B.1) Análisis de suelo a la siembra

Ningún parámetro de suelo por sí solo permitió predecir la respuesta al agregado de S. Considerando los 29 ensayos conducidos en el primer año, se logró explicar un 45 % de la respuesta al S, integrando como variables de un modelo la **relación MO/arcilla y el nivel de Sulfatos (0-60 cm)**: Respuesta a S= 671,7 - 36,2 (S-Sulfatos 0-60 cm) - 1580,2 (MO/arcilla; P= 0,004; $r^2= 0,45$

Considerando los 2 años de experimentación, el análisis de S-Sulfatos 0-60 cm permitió separar tentativamente situaciones de respuesta al agregado de S en el 85 % de los casos (35 sobre 41 ensayos), en un valor umbral de 8,7 ppm (Figura 4).

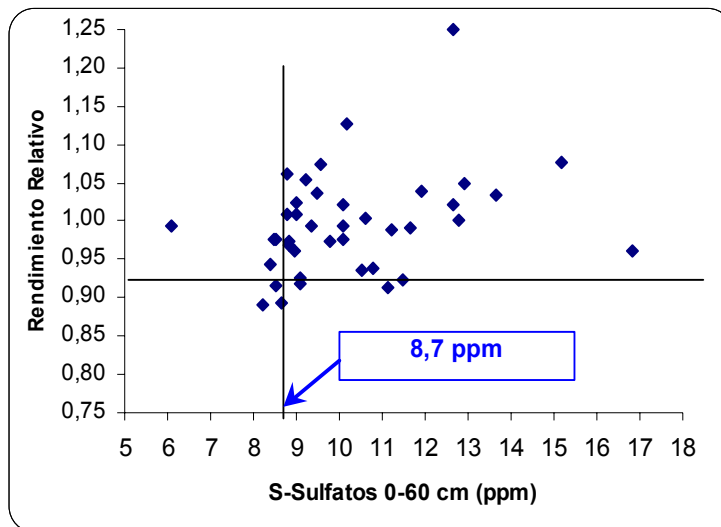


Figura 4. Rendimiento relativo en función del nivel de S-sulfatos (promedio 0-60 cm) disponible en suelos. 41 ensayos de todo el país, campañas 2000/01 y 2001/02.

B.2) Evaluaciones foliares:

El medidor de clorofila fue utilizado en ambas campañas, en ensayos del Norte de la provincia de Bs. As. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($P=0,10$) a favor de los tratamientos fertilizados con S en 8 de 13 sitios en el estado V4, y en 8 de 16 en R2. Los resultados se expresan como Índice de Suficiencia de S (ISS sin $P=$ Lectura Testigo/ Lectura tratamiento S). La diferencia registrada en las mediciones entre los tratamientos fertilizados y no fertilizados fue estadísticamente consistente pero de poca magnitud en valores absolutos, y no permitió una separación entre sitios con o sin respuesta en el estado V4 (Figura 5.a). Igual comportamiento se observó en R2 (Figura 5.b). Las comparaciones entre tratamientos con agregado de P (PS vs P) no permitieron mejorar los resultados.

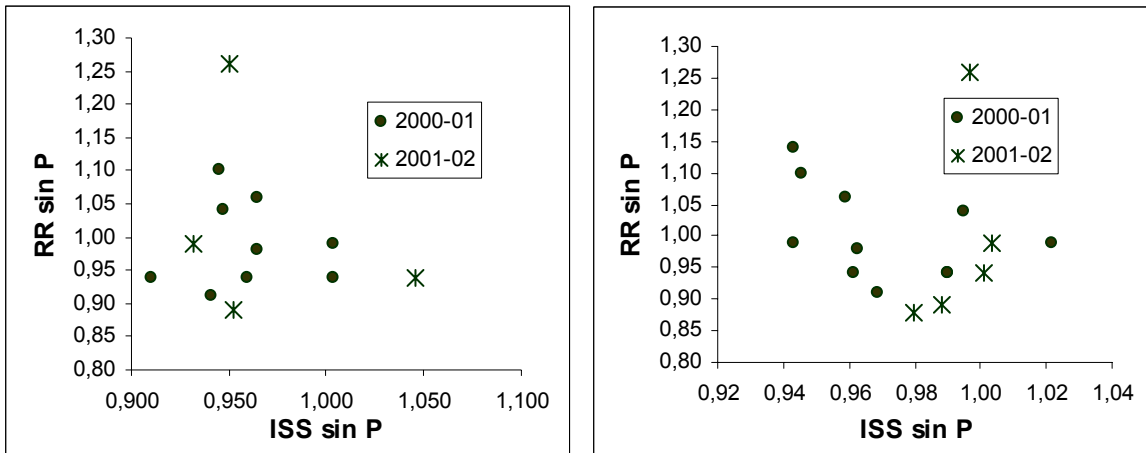


Figura 5. Rendimiento relativo sin P ($RR\ sin\ P = Rendimiento\ testigo / Rendimiento\ S$) en función del Índice de Suficiencia de S sin P ($ISS\ sin\ P = Lectura\ testigo / lectura\ tratamiento\ S$). Observaciones en el estado V4 (Figura 5.a, izquierda) y R2 (Figura 5.b, derecha) utilizando el medidor de clorofila Minolta SPAD 502. Campañas 2000/01 y 2001/02.

Asimismo, se realizaron análisis de la concentración de S total en hoja en 13 ensayos de todo el país. En el estado V4 (Figura 6.a) no se observó una tendencia definida en los rendimientos relativos en relación a la concentración de S. En R2 en cambio (Figura 6.b), la tendencia indicó que cuando el Porcentaje de S en hoja era superior a 0,40 % los rendimientos relativos eran del 94 % o superiores.

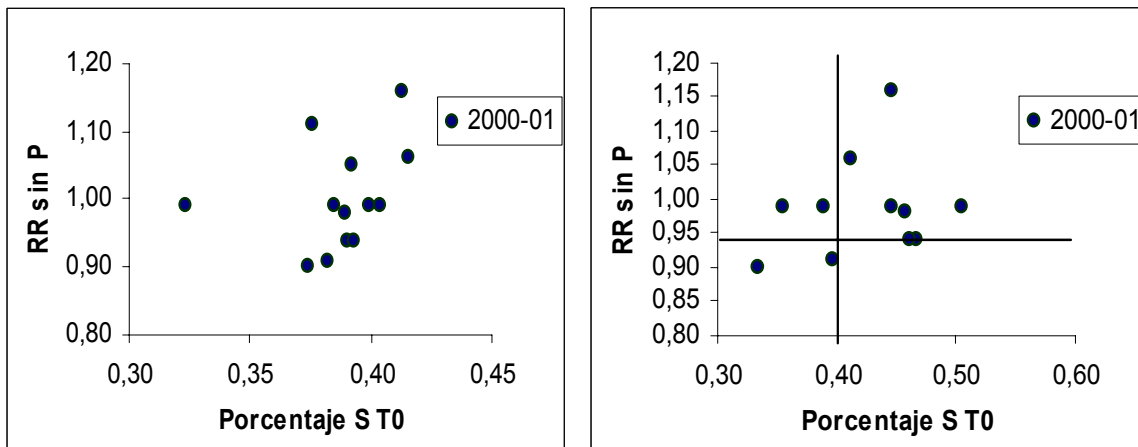


Figura 6. Rendimiento relativo sin P ($RR\ sin\ P = Rendimiento\ testigo / Rendimiento\ S$) en función del Porcentaje de S en tratamiento testigo (T0). Determinaciones en el estado V4 (Figura 6.a, izquierda) y R2 (Figura 6.b, derecha). Campaña 2000/01.

Las evaluaciones foliares traen aparejadas dificultades metodológicas, como la necesidad de precisar el estadio de desarrollo, el sector de la hoja analizado y aún el tamaño final, lo que lo hace poco práctico como único criterio de recomendación. Su utilidad estaría más bien en ser una herramienta de monitoreo, y eventualmente para efectuar correcciones de la estrategia de fertilización implementada a la siembra.

B.3) Estudios de mineralización: Incubaciones de Suelo

La medición directa del proceso de mineralización a través de incubaciones de suelos mostró un aceptable grado de ajuste con la respuesta a la fertilización ($R^2 = 0,56$; $P = 0,01$; Figura 7) Este ajuste

se logra cuando se retira del análisis uno de los sitios, el cual corresponde a un suelo Vertisol con elevado contenido de arcillas. Estos resultados son consistentes con las estimaciones indirectas de mineralización de S (Relación MO/arcilla). Las incubaciones de suelo desde el punto de vista operativo son relativamente poco costosas y fáciles de reproducir en laboratorio, y por lo tanto, potencialmente aptas para ser desarrolladas como metodología de diagnóstico. Adicionalmente, la obtención de la muestra no presenta más exigencias que las de un análisis convencional de suelos.

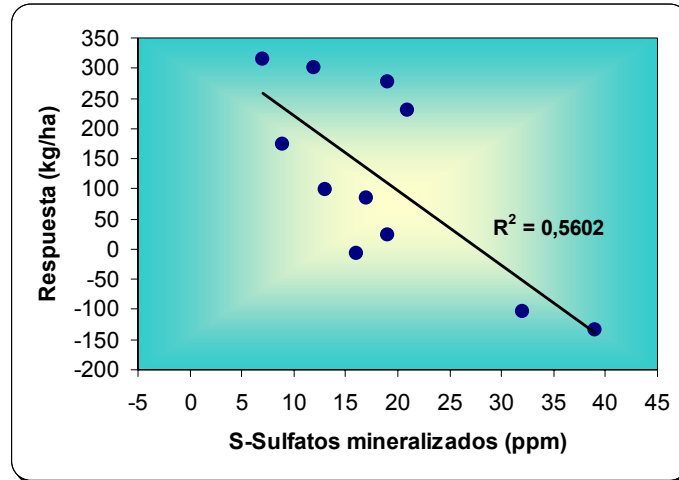


Figura 7. Respuesta al agregado de S en función del S mineralizado en incubaciones controladas de suelo. 11 sitios seleccionados por su baja variabilidad. Campaña 2000/01.

Sin embargo, cabe resaltar que cuando se tienen en cuenta sólo los 11 sitios seleccionados en la incubación, los cuales se caracterizan por su bajo error experimental, otros parámetros de suelo también explican adecuadamente la respuesta a S. La ecuación MO/arcilla + S-Sulfatos (0-60 cm) alcanzó, considerando este grupo de ensayos, un valor de $R^2 = 0,85$. El grado de ajuste de las demás variables puede observarse en la Tabla 5.

Tabla 5: Nivel de ajuste en la estimación de la respuesta a S a partir de diferentes variables de suelo, considerando 11 sitios de baja variabilidad en todo el país

Variabes	R^2 vs Respuesta al S (11 sitios)
S-incubaciones	0,56
Materia Orgánica (MO)	0,57
MO/limo	0,75
MO/arcilla	0,70
S-incubaciones + S-Sulfatos 0-60 cm	0,60
MO + S-Sulfatos 0-60 cm	0,67
MO/limo + S-Sulfatos 0-60 cm	0,80
MO/arcilla + S-Sulfatos 0-60 cm	0,85

A la luz de estos resultados, la escasez de sitios de respuesta y el elevado error experimental de los ensayos a campo parecen ser, más que el valor predictivo de las variables de suelo, las causas del pobre ajuste de las herramientas de diagnóstico evaluadas hasta el momento.

3.4 RESPUESTA AL AGREGADO DE OTROS NUTRIENTES:

En ninguno de los 53 sitios experimentales que comprendió la red durante estas dos campañas el tratamiento Completo (T4) tuvo rendimientos significativamente superiores al tratamiento PS (T3). Esto fue así tanto en los sitios en los que se observó una respuesta significativa al agregado de P o S, como en los sitios donde no hubo diferencias entre el T y los tratamientos fertilizados. Estos resultados sugieren que en los sitios experimentales estos nutrientes adicionales (K, Mg, Zn, Cu y B) no fueron deficientes.

Las concentraciones de K disponible a la siembra en el suelo hasta 20 cm de profundidad, variaron entre 362 y 879 ppm, en los distintos sitios experimentales (incluyendo los sitios del NOA). La literatura internacional indica que los umbrales utilizados para la recomendación de fertilización de cultivos de granos varían entre 40 y 270 ppm, dependiendo de la zona, suelo y cultivo (Haby et al., 1990). Específicamente para el cultivo de soja, los servicios de extensión de varias zonas de los Estados Unidos (Nebraska, Minnesota, Michigan, Ohio, Indiana, Iowa, Kansas, Kentucky) no recomiendan fertilizar cuando el nivel de potasio disponible es mayor que 120-200, dependiendo del Estado y del tipo de suelo (Rehm et al., 1994; Penas y Wiese, 1987; Vitosh et al., 1995; Voss et al., 1999; Whitney, 1997; UK, 1996). La falta de respuesta en nuestros sitios experimentales es consistente con la experiencia internacional ya que están en niveles de disponibilidad considerados “muy altos”.

El rango de valores de disponibilidad de Mg fue de 172-622 ppm (NOA inclusive). El rango de Mg intercambiable por encima del cual la fertilización no es recomendada varía entre 25 y 60 ppm, dependiendo del tipo de suelo. Los umbrales más bajos corresponden a suelos arenosos, mientras que los más altos a suelos arcillosos (Haby et al., 1990). Es raro encontrar umbrales específicos para un cultivo en particular, como soja. En general se dan recomendaciones generales para todos los cultivos de granos, que establecen que no es probable encontrar deficiencia cuando el suelo tiene más de 50 ppm (Knudsen y Frank, 1974; Vitosh et al., 1995). Los niveles de Mg disponible en los sitios de la red de ensayos estaban muy por encima de estos umbrales.

En el caso del Zn, excluyendo dos sitios con valores mayores a 7 ppm, el resto de los sitios de la región pampeana tuvo valores de entre 0.42–3.19. En los 6 sitios del NOA los valores oscilaron entre 2.9 y 5.8 ppm. La experiencia internacional informa de valores umbrales de entre 0.4 y 1 ppm (usando DTPA como extractante, que fue el que se usó en nuestro caso) (Brennan et al., 1993; Pais y Benton Jones, 2000). Estos umbrales son generales, no específicos para el cultivo de soja. De hecho, la mayor parte de los trabajos citados en la bibliografía de los que surgen estos valores críticos se refieren a ensayos realizados con maíz (Martens y Lindsay, 1990). Específicamente para soja, en el Estado de Kansas recomiendan fertilizar con Zn cuando el nivel en el suelo es inferior a 0.5 ppm, con una dosis de entre 2 a 5 kg/ha (Whitney, 1997). Varios sitios de nuestra red de ensayos estuvieron por debajo de 1 ppm, lo que haría presumir una posible deficiencia de este nutriente, pero la falta de respuesta al agregado del mismo es una evidencia en contrario.

El contenido de Cu extractable en los sitios experimentales varió entre 0,45 y 2,12 ppm. Los niveles críticos para cultivos de granos por encima de los cuales no se recomienda fertilizar varían entre 0,2 ppm (Buchholz et al., 1993; Knudsen y Frank, 1974) y 0,5 (Martens y Lindsay, 1990). Unos pocos sitios de la red de ensayos se acercan a estos valores, pero en ellos no se observaron diferencias significativas entre el tratamiento Completo y el que se agregó P y S.

Respecto del B, el rango de valores en los sitios evaluados fue de 0,17-1.73 ppm. En general, se considera que un suelo es deficiente cuando tiene valores inferiores a 0,25-0,5 ppm (usando como extractante agua caliente) (Pais y Benton Jones, 2000; Knudsen y Frank, 1974). La gran mayoría de los sitios se encuentra por debajo de estos valores, lo que haría pensar en una generalizada deficiencia de B. Sin embargo, no hubo respuestas al agregado de este nutriente, lo que revela la necesidad de desarrollar valores críticos basados en información local, para cada cultivo en particular.

4 CONCLUSIONES:

- No fue posible establecer un modelo único que explique la respuesta del cultivo a la fertilización fosforada para todas las zonas que abarcó la red de ensayos.
- Para los sitios de las Pcias. de Sta. Fe y Bs.As., se determinó un rango medio de disponibilidad de fósforo de 8-13 ppm, por debajo del cual la probabilidad de respuesta a la fertilización es alta.
- Para los sitios de las Pcias. de Sta. Fe y Bs.As., la respuesta a la fertilización aumenta 50 kg/ha por cada caída en la disponibilidad de fósforo por debajo de 16 ppm.
- La fertilización con S no incrementó los rendimientos en la región del NOA. En la región pampeana, 11 de 47 sitios presentaron respuestas mayores a 200 kg/ha.
- Se observa una alta frecuencia de respuesta en el Centro-Sur de Santa Fe, y en sitios con larga historia agrícola (> a 20 años).
- La respuesta al agregado de S se asoció a la capacidad del suelo para mineralizar Sulfatos. En este sentido, la relación MO/arcilla y la incubación de suelos se vislumbran como herramientas de diagnóstico promisorias.
- La determinación foliar del contenido de S total en R2 se asoció con la respuesta al agregado de S. Por el contrario, no se logró relacionar dicha respuesta con determinaciones al estadio V4 ni con las lecturas de clorofila en estos estadios.
- No se observaron aumentos en los rendimientos por el agregado de K y Mg, lo que se explica por los elevados contenidos de estos elementos en los suelos estudiados.
- No se observaron aumentos en los rendimientos por el agregado de Zn, Cu y B en forma sólida al suelo a la siembra del cultivo, a pesar de que los contenidos de Zn y de B en algunos sitios se ubicaron por debajo de los umbrales citados en la bibliografía.

5 BIBLIOGRAFÍA:

- ☞ Barbagelata, P.A., R.J.M. Melchiori y O.P. Paparotti. 2000. Fertilización fosfatada del cultivo de soja en suelos vertisoles de la provincia de Entre Ríos. INTA, EEA Paraná.
- ☞ Brennan, R.F., J.D. Armour, D.J. Reuter. 1993. Diagnosis of Zinc deficiency. En: A.D. Robson (ed.) Zinc in soils and plants. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 167-181.
- ☞ Buchholz, D.D., J.R. Brown, R.G. Hanson. 1993. Using your soil test results. University extension, University of Missouri-Columbia, G09111.
- ☞ Cate, R.B. y L.A. Nelson. 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 658:660.
- ☞ 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.
- ☞ Echeverría, H.; G. Ferraris; F. Gutiérrez Boem y F. Salvagiotti (Ex aequo). 2001. Soja: Respuesta a la fertilización en la región pampeana. Resultados campaña 2000-01 de la red de ensayos del proyecto Fertilizar-INTA. EEA INTA Pergamino, 36 p.
- ☞ Formento, N. 2001. Alimentando al mundo. Revista Forrajes y Granos Agrobusiness Journal. Octubre-Noviembre. Año 6, número 69-70, pp 78.
- ☞ Franzen, D.W. 1999. Soybean soil fertility. North Dakota state university extension service.
- ☞ G de López Camelo, L.; S. Ratto; O.S. Heredia y N. Escandón. 1995. Fertilización en Soja: Efectos en la dinámica del Fósforo en Suelo y Planta e influencia sobre componentes del Rendimiento. En: Actas 1er Congreso Nacional de Soja. Cap. II. pp 57-65. AIANBA, Pergamino.

- ☞ Gerwing, J. y R. Gelderman. 1998. Fertilizer recommendation guide. Soil testing laboratory, South Dakota state university.
- ☞ Gutiérrez Boem, F. H.; J. D. Scheiner and R. S. Lavado. 1999. Identifying Fertilization Needs for Soybean in Argentina. *Better Crops International*, 13 (2): 6-7.
- ☞ Haby, V.A., M.P. Ruselle, E.O. Skogley. 1990. Testing soils for potassium, calcium, and magnesium. En: R.L. Westerman (ed.) *Soil testing and plant analysis*. SSSA, Madison, pp. 181-227.
- ☞ Hoelt, R.G. y T.R. Peck. 2001. Soil testing and fertility. En: *Illinois Agronomy Handbook*, University of Illinois, pp.84-124.
- ☞ Knudsen, D., K.D. Frank. 1974. Understand your soil test: Calcium, Magnesium, Boron, Copper, Chlorine, Molybdenum. Cooperative Extension, Institute of Agriculture and Natural resources, University of Nebraska-Lincoln, G74-165-A.
- ☞ Martens, D.C. y W.L. Lindsay. 1990. Testing soils for Copper, Iron, Manganese, and Zinc. En: R.L. Westerman (ed.) *Soil testing and plant analysis*. SSSA, Madison, pp. 229-264.
- ☞ Martínez, F. y G. Cordone. 1998. Resultados de ensayos de fertilización azufrada en Soja. En: *Para mejorar la producción en Soja*, N°8, campaña 1997/98. pp 53-60. EEA Oliveros, INTA.
- ☞ Melgar, R.J., E. Frutos, M.L. Galetto y H. Vivas. 1995. El análisis de suelo como predictor de la respuesta de la Soja a la fertilización fosfatada. En: *Actas I Congreso Nacional de Soja y II Reunión Nacional de Oleaginosas*. Tomo I. pp 167-174 .
- ☞ Melgar, R. y M. Gearhart. 2000. Azufre, la diversidad. *Revista Fertilizar, Especial Siembra Directa*, pp 24-34.
- ☞ Minor, H.C., J. Stecker y J.R. Brown.1993. Phosphorus in Missouri Soils. University extension, University of Missouri-Columbia.
- ☞ Pais, I, J. Benton Jones. 2000. *The handbook of trace elements*. St. Lucie Press, Boca Raton, 223 p.
- ☞ Penas, E.J., R.A. Wiese. 1987. Fertilizer suggestions for soybeans. Cooperative Extension, Institute of Agriculture and Natural resources, University of Nebraska-Lincoln, G87-859-A.
- ☞ Rehm, G, M. Schmitt, R. Munter. 1994. Fertilizing soybeans in Minnesota. University of Minnesota Extension Service, FS-3813-GO.
- ☞ Vitosh, M.L., J.W. Johnson, D.B. Mengel. 1995. Tri-state fertilizer recommendations for corn, soybeans, wheat and alfalfa. Extension Bulletin E-2567, Michigan State University, The Ohio State University, Purdue University.
- ☞ Voss, R.D., J.E. Sawyer, A.P. Mallarino, R. Killorn. 1999. General guide for crop nutrient recommendation in Iowa. University extension, Iowa State University, PM 1688.
- ☞ Whitney, D.A. 1997. Fertilization. En: *Soybean production handbook*. Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service, C-449.