

Soja: Respuesta a la Fertilización en la Región Pampeana

Resultados Campaña 2000-01 de la Red de Ensayos del Proyecto Fertilizar-INTA

Coordinación: Fernando García (INPOFOS) y Ricardo Melgar (EEA INTA Pergamino)

Participantes: Alfredo Bono (EEA INTA Anguil), Héctor Carta (INTA 9 de Julio), Julio Castellarin (EEA INTA Oliveros), Graciela Cordone (INTA Casilda), 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 Gomez), Néstor González (EEA INTA Pergamino), Vicente Gudelj (EEA INTA Marcos Juárez), Pedro Vallone (EEA INTA Marcos Juarez), Edgardo Guevara (EEA INTA Pergamino), Flavio Gutierrez Boem (FA-UBA), Alberto Quiroga (EEA INTA Anguil), Fernando Martinez (INTA Casilda), Santiago Meira (EEA INTA Pergamino), Ricardo Melchiori (EEA INTA Paraná), Fernando Mousegne (INTA S.A. de Areco), Juan Ostojic (EEA INTA Pergamino), Osvaldo Paparotti (EEA INTA Paraná), Hugo Pedrol (EEA INTA Oliveros), Fernando Salvagiotti (EEA INTA Oliveros), Sergio Rillo (INTA 9 de Julio), Hernán Sainz Rozas (FCA Balcarce), Néstor Trentino (INTA Las Rosas), Luis Ventimiglia (INTA 9 de Julio), Hugo Vivas (EEA INTA Rafaela)

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

El incremento de la producción de cereales y oleaginosas en el mediano plazo deberá realizarse en base a una mejora en la eficiencia de utilización de la superficie dedicada a tal fin, en consideración de que es poco probable que se incremente sustancialmente la superficie dedicada a dichos cultivos. No obstante, los suelos de la región pampeana otrora caracterizados por su fertilidad, han sufrido un importante proceso de degradación, lo que hace peligrar su capacidad productiva (Andriulo et al., 1996). Es a través de la conservación del recurso suelo, con la adopción de adecuadas prácticas de manejo y una correcta nutrición de los cultivos, como se podrá superar la actual situación, generando sistemas sustentables.

La soja es uno de los productos agrícolas más valiosos y rentables por poseer buena adaptabilidad sobre un amplio rango de condiciones edáficas y climáticas, pudiendo ser cultivada en la mayoría de las áreas agrícolas del mundo, gracias a su habilidad de fijar nitrógeno (N) atmosférico. Además, el grano de soja tiene aproximadamente 40% de proteína y 20% de aceite, que lo ubica primero en contenido proteico entre los cultivos alimenticios y segunda luego del maní en contenido oleoso (Hartwig y Kilen, 1991).

La Argentina es el principal exportador mundial de aceite de soja y es el segundo de harina de soja, debido a esto el complejo exportador de soja es el más relevante para la economía del país, lo que significa unos 3.500 millones de dólares (Giorda, 1998). La superficie dedicada al cultivo de soja en la Argentina continúa creciendo y con la aparición de los materiales transgénicos, parecería no existir un techo a la producción de la misma. Los 20 millones de toneladas

producidas en 1999/00 y los 21,2 millones de toneladas producidas en 2000/01, serán ampliamente superados por una producción cercana a los 26 millones de toneladas, si se cumplen los pronósticos del informe de abril del Servicio de Agricultura de los EEUU.

Por otra parte, el cultivo de soja es uno de los más extractivos puesto que devuelve muy pocos nutrientes al suelo, exportándose la mayor parte de los mismos en el grano. La exportación de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) para producir cuatro toneladas de grano es de 240, 27, 78, 12, 11 y 19 kg/ha, respectivamente. Además, para dicha producción, se exportan 31, 446, 53, 300, 198, 17 y 168 g/ha de boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo) y zinc (Zn) (García, 2000). No obstante esto, los nutrientes repuestos por fertilización son generalmente una pequeña proporción de lo que exporta el grano, lo que genera balances negativos en la disponibilidad de nutrientes del sistema suelo. Esta situación ha provocado que la deficiencia de N y P se haya generalizado en la región pampeana y que en algunas situaciones se encuentren respuestas al agregado de S (Martínez y Cordone, 2000).

El diagnóstico de los requerimientos de P para el cultivo de soja se efectúa en base al análisis de muestras de suelo por el método de extracción de Bray 1 (1945), el cual fue calibrado satisfactoriamente para cereales (Berardo, 1994; Echeverría y García, 1998). No obstante, ha sido reportado que a igual disponibilidad de P en el suelo, la soja responde en menor magnitud que los cereales al agregado de P (Fixen y Grove, 1990). Esto parecería confirmarse para los suelos de la región pampeana en los que se han determinado respuestas al agregado de P, sólo a muy bajas concentraciones de Bray 1 (Melgar y Lavandera, 1999; Gutierrez Boem et al., 1999). Por lo tanto, parecería conveniente desarrollar acciones tendientes a validar las bondades de dicho método de diagnóstico para el cultivo de soja.

Para los suelos con prolongada historia agrícola del sur de la provincia de Santa Fe, se ha registrado respuesta al agregado de S y se han definido como "ambientes deficientes" y con elevada probabilidad de respuesta a la fertilización a sitios con: bajo contenido de materia orgánica (MO), erosión, monocultivo de soja y trigo-soja, siembra directa y altos rendimientos acumulados con fuerte fertilización con N o N+P (Martínez y Cordone, 1998). No obstante, en algunas situaciones cuando se cumplen estos requisitos, no se han determinado respuestas al agregado de fertilizantes azufrados o no es posible discriminar el efecto de respuesta a S de la de N (Melgar y Lavandera, 1999). Por lo tanto, en la actualidad no se dispone de métodos de diagnóstico de requerimiento de S, rápidos, reproducibles, confiables y de bajo costo (Gutierrez Boem et al., 1999).

Por último, en algunos ensayos se ha determinado cierta tendencia a mayor rendimiento en los tratamientos que incluyen el agregado de mezclas de otros nutrientes además de P y S (Melgar y Lavandera, 1999). No obstante, con un criterio más estricto, es válido reconocer que ninguno de estos ensayos manifestó diferencias estadísticamente significativas. Esta situación constituye un incentivo a continuar las investigaciones en la temática, a fin de determinar si algún otro nutriente de los denominados no convencionales, como potasio (K), magnesio (Mg), zinc (Zn), cobre (Cu) o boro (B), afecta el rendimiento del cultivo de soja en la región pampeana.

Por lo tanto, en el marco del proyecto Fertilizar, se consideró conveniente establecer una red de ensayos de fertilización en la región pampeana con los siguientes objetivos:

- Evaluar el rendimiento del cultivo de soja en distintas áreas agroecológicas.
- Evaluar la respuesta a la fertilización fosfatada y calibración de métodos de diagnóstico.
- Evaluar la respuesta a la fertilización azufrada y desarrollo de métodos de diagnóstico.
- Evaluar la respuesta a la fertilización con otros nutrientes de aplicación no convencional.

Materiales y Métodos

La red estuvo constituida por un total de 28 ensayos, los que se implantaron en sitios con suelos representativos de las distintas áreas de trabajo de la región pampeana y presentaron diferencias marcadas en su clasificación y sistema de labranza (Cuadro 1). En la mayoría de los ensayos se siguió el manejo del cultivo adoptado por el productor. El espaciamiento entre surcos varió entre sitios, no obstante, es factible generalizar que el mayor espaciamiento (70 cm) fue más frecuente en la zona norte y el menor espaciamiento (35 cm) en el sudeste de la región pampeana.

Cuadro 1: Ubicación y características destacadas de los sitios experimentales

Sitio	Partido-Departamento	Provincia	Unidad Ejecutora	Serie de Suelos	Tipo de Suelos	Sistema de labranza
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.	General López	Santa Fe	INTA Pergamino	Hughes	Argiudol típico	S. D.

11.	Colón	Bs. As.	INTA Pergamino	Rojas	Argiudol típico	S. D.
12.	Pergamino 1	Bs. As.	INTA Pergamino	Pergamino	Argiudol típico	L. C.
13.	Pergamino	Bs. As.	INTA Pergamino	Pergamino fase 2	Argiudol típico	S. D.
14.	S. A. de Areco	Bs. As.	INTA S.A. de Areco	Capitán Sarmiento	Argiudol típico	L. C.
15.	S. A. de Areco	Bs. As.	INTA S.A. de Areco	Capitán Sarmiento	Argiudol típico	S. D.
16.	Rojas	Bs. As.	INTA Pergamino	Rojas	Argiudol típico	S. D.
17.	Junín 1	Bs. As.	Fac. Agron. UBA	Junín	Hapludol típico	L. C.
18.	Junín 2	Bs. As.	Fac. Agron. UBA	O'Higgins	Argiudol típico	S. D.
19.	9 de Julio 1	Bs. As.	INTA 9 de Julio	Norumbega	Hapludol éntico	S. D.
20.	9 de Julio 2	Bs. As.	INTA 9 de Julio	La Albina	Hapl. thapto nátrico	S. D.
21.	Tandil 1	Bs. As.	INTA Balcarce	Tandil	Argiudol típico	S.D.
22.	Tandil 2	Bs. As.	INTA Balcarce	Tandil	Argiudol típico	S.D.
23.	Rivadavia	Bs. As.	INTA Gral. Villegas			
24.	Trenque Lauquen	Bs. As.	INTA Gral. Villegas			
25.	Maracó	La Pampa	INTA Anguil		Hapludol éntico	S. D.
26.	Catriló 1	La Pampa	INTA Anguil		Hapludol éntico	L. C.
27.	Catriló 2	La Pampa	INTA Anguil		Hapludol éntico	L. M.
28.	Capital	La Pampa	INTA Anguil		Hapludol éntico	S. D.

S.D.: Siembra Directa
L.C.: Labranza convencional
L.M.: Labranza mínima

Se empleó en cada localidad un diseño en bloques completos aleatorizados con cuatro repeticiones, con un tamaño de parcelas de una maquinada por al menos 20 m de largo. Se definieron cinco tratamientos:

1. Testigo (**T**) sin el agregado de fertilizantes,
2. Fósforo (**P**) a razón de 20 kg P/ha (100 kg/ha de superfosfato triple de calcio),
3. Azufre (**S**) a razón de 15 kg S/ha (62,5 kg/ha de sulfato de amonio),
4. Fósforo más azufre (**PS**) a razón de 20 kg P/ha + 15 kg S/ha (iguales fuentes que los tratamientos P y S) y
5. Completo (**C**) a base de: fósforo (20 kg P/ha), azufre (15 kg S/ha), potasio (14 kg K/ha), magnesio (12 kg Mg/ha), cobre (1 kg Cu/ha), zinc (2 kg Zn/ha) y boro (B). Para ello se realizó una mezcla compuesta por 52,6 % de superfosfato triple de calcio, 37,4% de sulpomag, 3,7% de oxisulfato de Zn, 4,5% de oxisulfato de Cu y 1,8% B. De esta mezcla se aplicaron 190 kg/ha

Los fertilizantes fueron aplicados a la siembra en banda al costado de la semilla y en todos los tratamientos se inoculó la semilla (doble dosis de Nitragin Cell Tech). Además, se agregó 20g de Comosol 2000/100 kg de semilla (10% de molibdeno y 0,5 % de cobalto) o se aplicó en forma foliar al estadio de V4.

Se realizó análisis de suelo a la siembra a distintas profundidades y las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos de ACA en Pergamino. También se determinó la disponibilidad de agua a la siembra hasta el metro de profundidad.

Cuadro 2: Precipitaciones mensuales durante el ciclo del cultivo de soja en algunas de los sitios estudiados

Mes	S.A.Areco	Pergamino	9 de Julio	Oliveros	Rafaela	Paraná	Tandil
Setiembre	98	85	34.2	8	76	96	108
Octubre	94	156	187.2	174	195	142	187
Noviembre	83	229	120.5	149	197	172	32
Diciembre	70	35	72.1	129	97	132	60
Enero	276	156	147.6	148	234	108	150
Febrero	192	160	71.7	64	97	110	44
Marzo	205	353	424.8	239	139	150	244

Se realizó un muestreo de hojas en V4 y en R2 para análisis de nutrientes (ultimo foliolo completamente desarrollado), resultados que se encuentran en etapa de análisis. Durante el desarrollo del cultivo se efectuaron observaciones cualitativas de nodulación, constatando buena presencia de nódulos sin diferencias entre los tratamientos empleados. En madurez del cultivo se procedió a la cosecha para estimar rendimiento a humedad de recibo y calidad de grano

Resultados

Las características meteorológicas del año en estudio fueron muy favorables para el desarrollo del cultivo, en prácticamente toda la región pampeana (Cuadro 2). En la mayoría de los sitios evaluados, las precipitaciones y el agua almacenada en el perfil del suelo a la siembra, permitió una buena implantación y desarrollo del cultivo. De igual manera, las precipitaciones durante el período crítico del cultivo (enero-febrero), fueron muy abundantes, salvo para la localidad de Tandil.

Cuadro 3 a: Análisis químico de suelo: Elementos principales

	Partido/ Departamento	M. O. (%)	N total (%)	pH	N-NO3 (ppm)	P Bray I (ppm)	S-SO4 (ppm) (0-20 cm)	S-SO4 (ppm) (0-60 cm)
1.	San Jerónimo	2.84	0.143	5.6	14.3	12.7	11.25	10.50
2.	Las Colonias	2.26	0.114	5.5	17.8	8.5	14.65	11.13
3.	Belgrano	2.98	0.149	5.7	10.3	36.3	10.20	9.07
4.	Paraná 1	3.20	0.160	7.5	13.0	2.3	14.08	13.63
5.	Paraná 2	2.68	0.134	7.1	11.0	6.4	10.78	15.17
6.	Río Cuarto	2.67	0.134	5.5	19.8	40.0	12.60	11.67
7.	Marcos Juárez 1	2.84	0.142	5.8	15.4	11.7	8.90	8.23
8.	Marcos Juárez 2	2.84	0.142	5.9	11.3	33.8	10.20	9.00
9.	Iriondo	2.66	0.133	6.0	11.5	18.6	10.98	10.07
10.	General López	3.16	0.158	5.5	10.6	8.5	10.03	8.50
11.	Colón	3.32	0.166	5.7	9.1	10.6	10.55	9.77
12.	Pergamino 1	3.14	0.157	5.9	11.3	50.9	11.80	12.67
13.	Pergamino	2.44	0.122	5.8	8.8	57.2	10.13	10.10
14.	S. A. de Areco	3.50	0.175	5.6	7.1	42.6	10.90	
15.	S. A. de Areco	3.95	0.198	5.5	17.9	102.9	7.98	8.50
16.	Rojas	3.14	0.157	5.6	15.5	12.9	12.80	11.20
17.	Junín 1	1.90	0.095	5.9	8.7	4.6	10.35	10.80
18.	Junín 2	2.70	0.135	5.8	7.1	4.3	11.90	12.77
19.	9 de Julio 1	3.35	0.168	5.9	12.5	6.8	9.90	9.33
20.	9 de Julio 2	4.05	0.203	6.0	11.5	18.0	9.78	9.47
21.	Tandil 1	5.84	0.292	5.5	13.1	3.5	13.18	12.93
22.	Tandil 2	6.49	0.325	5.6	10.2	18.2	13.35	11.90
23.	Rivadavia	1.90	0.095	5.8	30.2	14.3	7.80	9.00
24.	Trenque	2.62	0.131	5.8	32.8	40.0	9.10	8.80

	Lauquen							
25.	Maracó	1.10	0.08	6.0	11.2	23.8		
26.	Catrilo 1	1.95	0.12	6.8	16.6	27.1		
27.	Catrilo 2	1.51	0.08	6.1	17.1	26.7		
28.	Capital	2.82	0.16	6.2	18.6	32.9		

M. O. (Materia Orgánica), N total, pH, N-NO₃ y P correspondientes a 0 - 20 cm de profundidad.

N total: Fue calculado como 5 % de Materia Orgánica.

Cuadro 3 b: Análisis químico de suelos: Otros nutrientes

	Partido/ Departamento	K (ppm)	Mg (ppm)	Ca (ppm)	Na (ppm)	Zn (ppm)	Mn (ppm)	Cu (ppm)	Fe (ppm)	B (ppm)
1.	San Jerónimo	414.0	214.8	1302	33.5	7.97	62.6	1.63	68.9	0.20
2.	Las Colonias	361.5	176.5	1019	47.0	2.75	62.7	1.79	71.0	0.28
3.	Belgrano	502.0	244.8	1691	35.0	0.61	44.2	1.36	52.6	0.19
4.	Paraná 1	402.4	302.3	9179	40.3	0.55	6.1	0.88	7.1	0.16
5.	Paraná 2	451.2	622.5	5316	87.9	2.82	37.5	0.97	33.7	0.34
6.	Río Cuarto	787.0	181.0	1262	31.0	1.24	34.6	0.93	69.0	0.36
7.	Marcos Juárez 1	595.0	308.0	1263	48.0	1.44	33.1	1.20	65.6	0.27
8.	Marcos Juárez 2	707.0	380.0	1856	35.0	1.01	55.4	1.77	61.2	0.20
9.	Iriondo	589.9	260.4	1669	33.4	0.51	31.5	1.16	36.4	0.27
10.	General López	580.1	254.9	1403	40.3	0.73	43.9	0.95	79.6	0.18
11.	Colón	586.0	259.8	1751	23.0	1.10	44.6	1.12	68.8	0.24
12.	Pergamino 1	601.6	213.3	1461	75.9	1.47	44.6	1.18	78.8	0.28
13.	Pergamino	605.5	186.6	1365	29.9	0.91	44.2	1.33	80.8	0.20
14.	S. A. de Areco	640.6	214.7	1993	39.1	1.44	70.8	2.10	131.0	0.20
15.	S. A. de Areco	703.2	213.7	2100	28.8	2.24	32.3	1.78	126.7	0.52
16.	Rojas	464.9	226.5	1804	25.9	1.02	44.0	1.18	72.9	0.29
17.	Junín 1	394.5	183.4	1031	31.6	0.86	28.2	0.90	55.4	0.19
18.	Junín 2	513.7	255.0	1200	71.9	0.93	38.8	1.18	83.8	0.29
19.	9 de Julio 1	543.0	221.0	1472	36.8	1.01	14.1	0.55	65.4	0.35

20.	9 de Julio 2	872.8	270.5	1464	31.6	2.38	18.2	0.68	86.7	0.43
21.	Tandil 1	709.0	315.5	1223	80.8	2.62	41.8	1.30	188.3	0.54
22.	Tandil 2	804.5	302.5	2399	47.0	2.12	55.9	1.16	142.4	0.48
23.	Rivadavia	641.0	206.0	733	30.0	0.73	11.4	0.93	58.2	0.20
24.	Trenque Lauquen	688.0	211.0	896	41.0	2.06	17.5	1.00	78.9	0.17
25.	Maracó									
26.	Catriló 1									
27.	Catriló 2									
28.	Capital									

Todas las determinaciones corresponden a 0 - 20 cm de profundidad.

Rendimientos en distintas áreas agro ecológicas de la región pampeana

Para el conjunto de los rendimientos obtenidos en la red, descontando el sitio 6 y 25 por sufrir daño de granizo, se determinó un valor de rendimiento promedio de 3455 kg/ha. El sur de Santa Fe y el norte y oeste de Buenos Aires, presentaron los sitios con rendimientos promedios más elevados (3760 kg/ha), seguidos por la zona centro de Santa Fe y este de La Pampa (3525 kg/ha), centro de Buenos Aires (3391 kg/ha), Córdoba (3142 kg/ha) y por último sudeste de Buenos Aires y Entre Ríos (2753 kg/ha). Problemas de disponibilidad hídrica durante el mes de febrero en el sudeste de Buenos Aires y sanitarios en madurez del cultivo en Entre Ríos (virosis, cercospora, phomosis), explicarían los menores rendimientos obtenidos en estas localidades.

El análisis conjunto de los rendimientos puso de manifiesto interacción entre sitio y tratamiento estadísticamente significativa ($P > 0.027$), es decir que el cultivo se comportó de manera diferente frente a la fertilización según el ambiente en que se desarrolló. Por el contrario, la interacción entre P y S no fue estadísticamente significativa ($P > 0.2$), esto quiere decir que la respuesta por la aplicación de P no difirió entre los niveles de S evaluados..

Respuesta al agregado de fósforo

El contenido de P en el suelo de los ensayos conducidos en la red presentó una amplia variación que permitió que se expresara diferente magnitud de respuesta. El rango del contenido de P en el suelo osciló entre 2 y 103 ppm. Los valores más bajos se registraron en los ensayos conducidos en el área del Centro y Sudeste de Bs. As, Entre Ríos, La Pampa y Centro de la provincia de Santa Fe, oscilando la respuesta en estos sitios entre 86 y 499 kg/ha. Los niveles más altos de P se registraron en los ensayos llevados a cabo en el Norte de Buenos Aires y en la provincia de Córdoba. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas por efecto de la fertilización con P en ocho de los veintiocho sitios evaluados (29 % de los casos).

El aumento en el rendimiento por la aplicación de P (calculada como diferencia entre el tratamiento P y el T, excluyendo a los sitios de La Pampa por la elevada variabilidad) se asoció negativamente con el contenido de este en el suelo (Figura 1). Se efectuó un ajuste de tipo lineal-meseta el que indica que la respuesta del cultivo disminuye en 25 kg/ha por cada incremento de P Bray, partiendo de un valor máximo de respuesta de 522 kg/ha. El ajuste de esta relación explicó el 59 % de la variación de la respuesta en función del contenido de P en el suelo. Se puede notar que a 21 ppm de P en los primeros veinte cm de suelo, la respuesta es igual a cero.

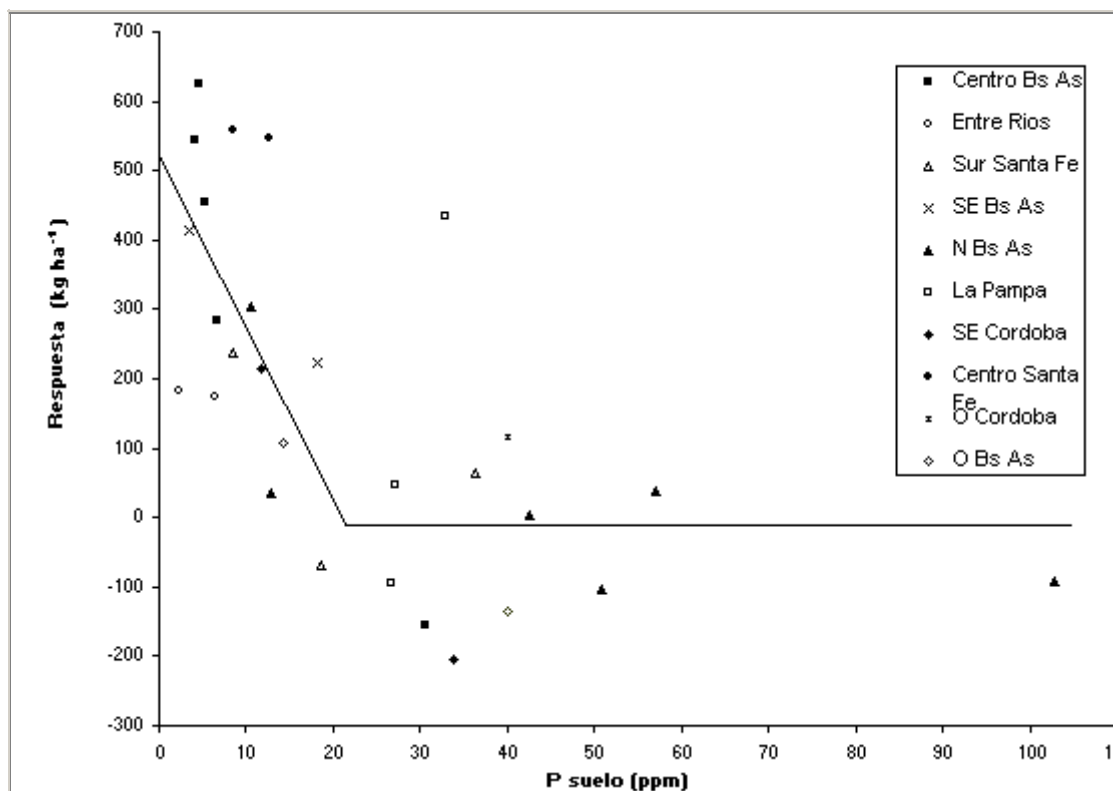


Figura 1 - Respuesta a la fertilización fosfatada de acuerdo al nivel de P en el suelo (20 cm)

Se utilizó el método de Cate y Nelson (1971) para determinar el nivel de P en el suelo a la siembra a partir del cual el incremento en la respuesta por la fertilización fosforada fue menor. En la Figura 2 se representa la relación entre el nivel de P en el suelo y el rendimiento relativo de cada sitio (calculado como la relación entre el rendimiento de la parcela testigo y el promedio de P y PS). Se puede observar que el nivel crítico de P por debajo del cual la respuesta a la fertilización es importante se encuentra en 13 ppm de P.

Para los mismos resultados se ajustó una relación lineal-meseta (Figura 2). En la misma se observa que por encima de 21,4 ppm de P el rendimiento es máximo (100%). También se observa que por cada 10 ppm de aumento en P Bray se logra un aumento en el rendimiento relativo de 6,9%. De acuerdo con estos

resultados, un rendimiento relativo del 90 y 95 % se lograría con valores de 8 y 15 ppm, respectivamente.

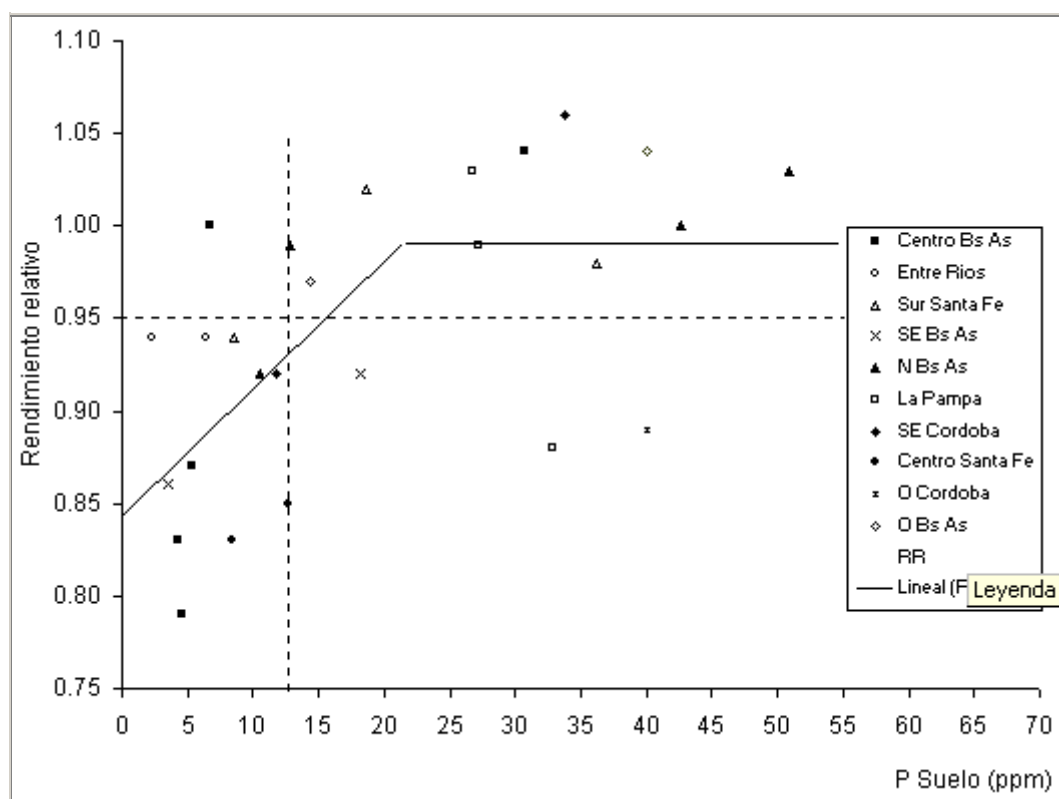


Figura 2: Relación entre el rendimiento relativo y el contenido de P Bray en el suelo. Determinado por el método de Cate y Nelson

Estos umbrales se encuentran cercanos a los valores reportados para soja por Melgar y colaboradores (1995) quienes señalaron alta probabilidad de respuesta cuando los valores de P Bray son inferiores a 9 ppm. El valor crítico determinado en este trabajo se ubicaría dentro del rango de probabilidad media de respuesta a la fertilización reportada por estos autores. Otras experiencias en el norte del país (Mejail et al., 1998) determinaron un valor crítico aun menor de respuesta a la fertilización (7 ppm).

El umbral determinado con esta red de ensayos puede ser considerado relativamente alto, teniendo en cuenta que el cultivo de soja presenta una menor respuesta a la fertilización con P respecto del maíz (Fixen and Grove, 1990). Es de destacar, que los resultados de esta red señalan que la máxima respuesta del cultivo expresada en rendimiento relativo fue de tan solo el 17%.

Teniendo en cuenta las diferencias de umbrales para P determinados en esta red de ensayos y los reportados por otros investigadores, la continuidad de la misma durante la próxima campaña en la región permitirá hacer más robusta la determinación del nivel crítico.

Respuesta al agregado de azufre

Como se mencionó, la respuesta a S se calculó como promedio de las diferencias entre PS-P y S-T, dado que la interacción P x S no fue estadísticamente significativa. La respuesta media a S de toda la red fue escasa (53,5 kg/ha). En dieciséis de los sitios se observaron incrementos en los rendimientos como consecuencia de la aplicación de S, y en seis de ellos esta respuesta superó los 200 kg/ha (21 % de los ensayos). De estos, cinco fueron implantados en siembra directa y uno mediante labranza mínima. Además, cinco de los ensayos presentaron menos de 3 % de MO, y el restante (San Antonio de Areco 2), aunque posee un elevado contenido de MO, también presenta un alto tenor de arcilla, la cual por su efecto protector podría disminuir la capacidad de mineralización de S de ese suelo. En cuanto a la historia agrícola, cinco de los sitios con respuesta superior a 200 kg/ha, tienen una prolongada historia bajo agricultura continua. Respecto a su ubicación geográfica, tres de ellos se encuentran en el centro de la provincia de Santa Fe, uno en Córdoba, uno en La Pampa y solamente uno en el norte de la provincia de Buenos Aires.

Respecto a las variables evaluadas con criterios de diagnóstico, sólo el contenido de S-Sulfatos (ppm, 0-60 cm)(Figura 3), S-Sulfatos (ppm, 20-40 cm), S-Sulfatos (ppm, 40-60 cm) y la relación MO/arcilla (Figura 4) permitieron establecer un modelo de regresión que explique significativamente la respuesta al S ($P < 0.05$). La textura del horizonte superficial, el contenido de MO *per se* (Figura 5), la relación entre MO y limo o limo más arcilla y aún el contenido de S-Sulfatos en superficie (Figura 6), no fueron indicadores apropiados para explicar la respuesta a la fertilización azufrada.

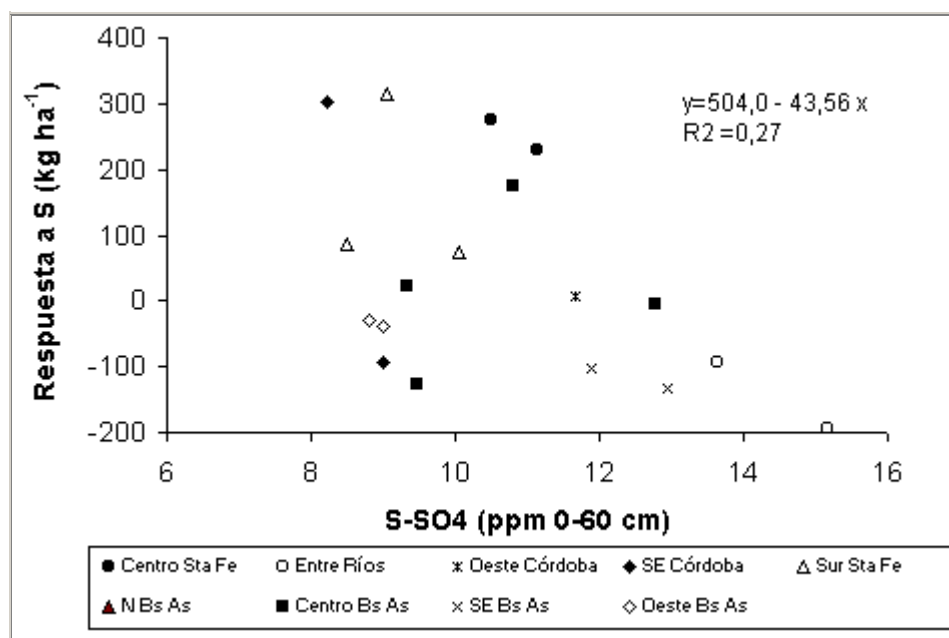


Figura 3: Respuesta al agregado de S en soja en función del contenido de sulfato en los primeros 60 cm del suelo.

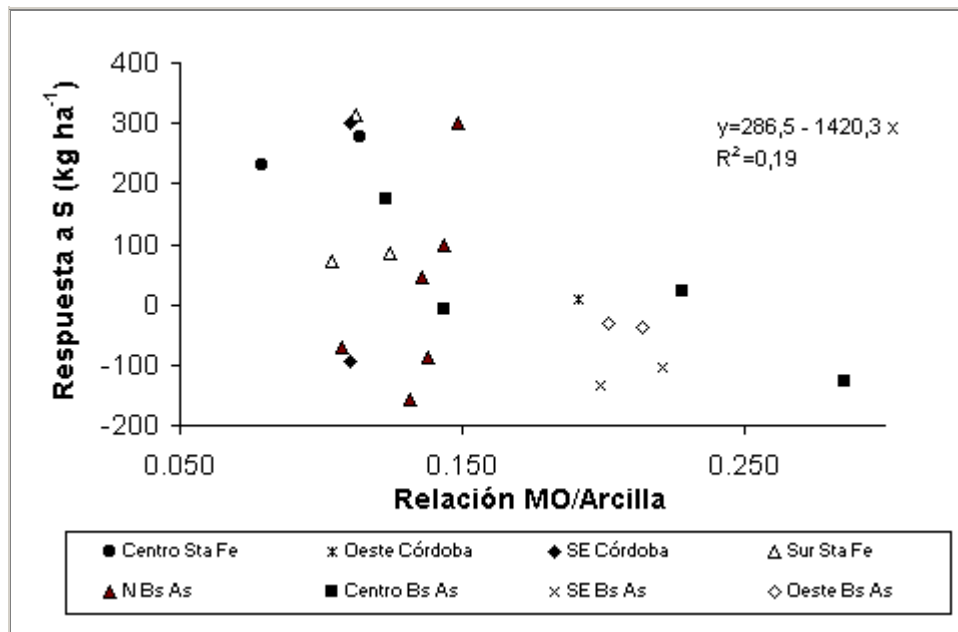


Figura 4: Respuesta al agregado de S en soja en función de la relación MO/arcilla del horizonte superficial.

Una ecuación lineal que integra la relación MO/arcilla y el contenido de S-Sulfatos (ppm, 0-60 cm) logró explicar un 46 % de la respuesta a la aplicación de S. Esta función tiene sentido biológico y estimaría el contenido inicial de S en el perfil (S-Sulfatos 0-60 cm) y la capacidad del suelo para mineralizarlo (relación MO/arcilla). El análisis de regresión para esta ecuación se realizó sobre 21 ensayos, por carecer de los datos necesarios para su cálculo en los restantes.

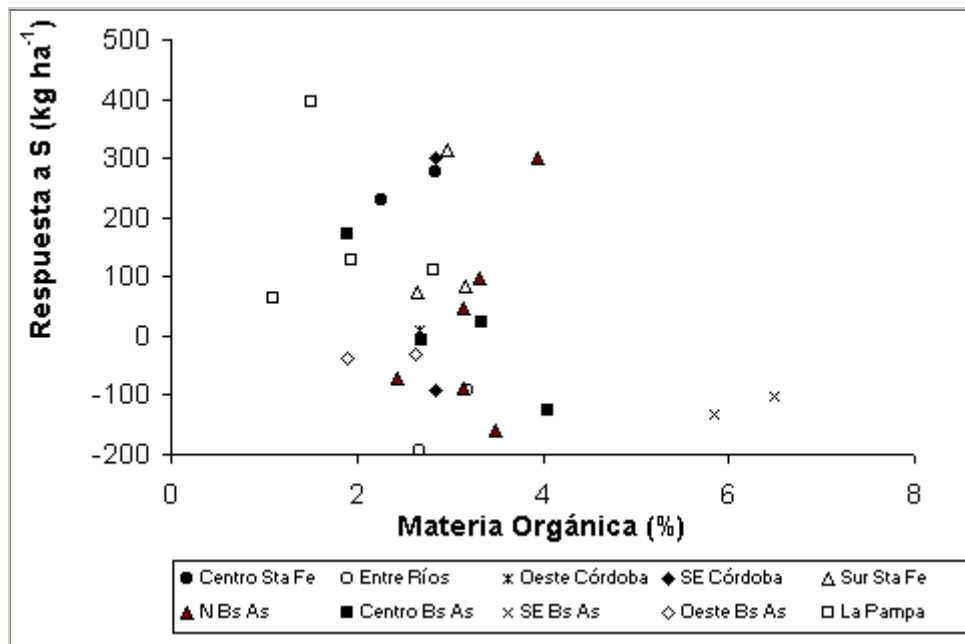


Figura 5: Respuesta al agregado de S en soja en función del contenido de materia orgánica del suelo.

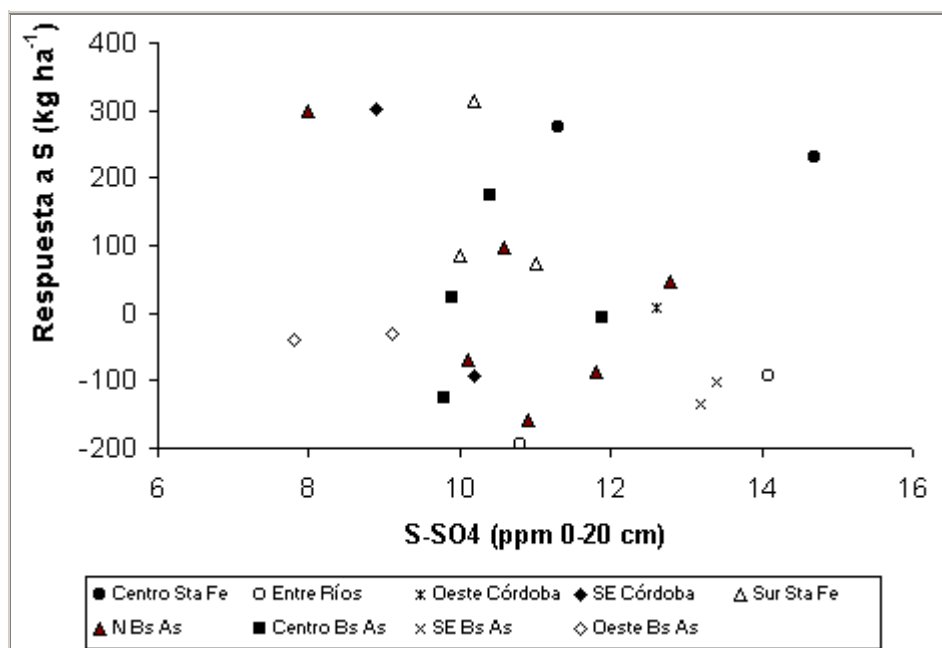


Figura 6: Respuesta al agregado de S en soja en función del contenido de sulfato en los primeros 20 cm del suelo.

Dado que la valoración de la capacidad del suelo para mineralizar S aparece como un indicador promisorio, una cuantificación más precisa de la mineralización

mediante la incubación de muestras de suelo, podría contribuir a explicar la respuesta del cultivo a la fertilización azufrada.

Por último, considerando que las variables evaluadas con criterio de predicción contribuyeron a explicar sólo una parte de la respuesta a la fertilización azufrada, y vista la necesidad de contar con un método de diagnóstico para dicha práctica, se considera de interés evaluar otros extractantes para la determinación de sulfato en suelos, así como también la aptitud de los análisis foliares.

Respuesta al agregado de otros nutrientes

Uno de los objetivos de la red de ensayos de fertilización de soja fue determinar los rendimientos sin limitaciones nutricionales en cada sitio. Para lograr este objetivo se incluyó en el diseño de los experimentos el tratamiento completo (**C**), dónde además de agregarle P y S en las mismas dosis que el tratamiento PS, se le adicionó K, Mg, y tres micronutrientes (Zn, Cu y B).

En ningún sitio el tratamiento **C** fue diferente al tratamiento PS. 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. En el caso de los micronutrientes (Zn, Cu y B) cabe la posibilidad de que la forma de aplicación (agregado al suelo) haya disminuido su aprovechamiento por el cultivo.

La Figura 7 muestra que las concentraciones de K disponible a la siembra en el suelo hasta 20 cm de profundidad, variaron entre 362 y 804 ppm, en los distintos sitios experimentales. 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".

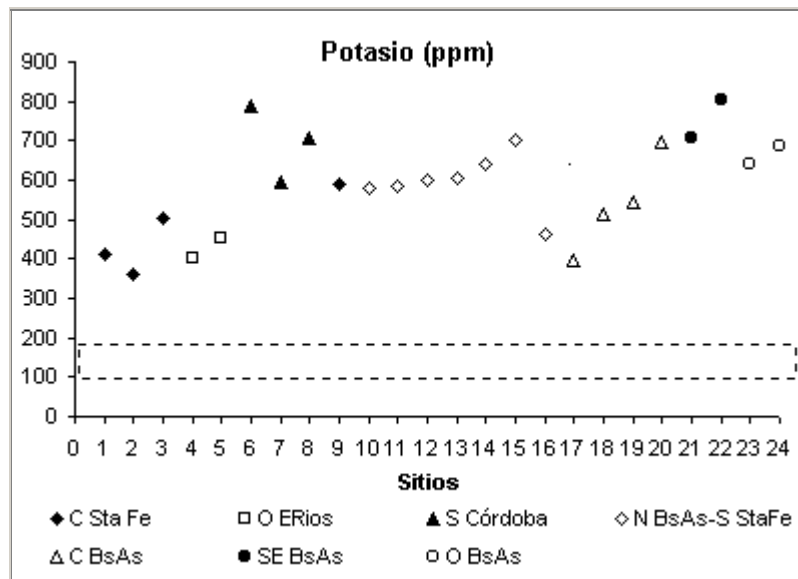


Figura 7: Potasio disponible a la siembra en los sitios experimentales. Las líneas punteadas representan el rango de valores críticos habitualmente usados para este nutriente.

La Figura 8 muestra los niveles de Mg en el suelo en los sitios experimentales de la red. Excluyendo un sitio (Paraná 2) que tiene un valor de Mg disponible de 622 ppm, el rango de valores de disponibilidad para el resto de los sitios fue de 177-380 ppm. 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.

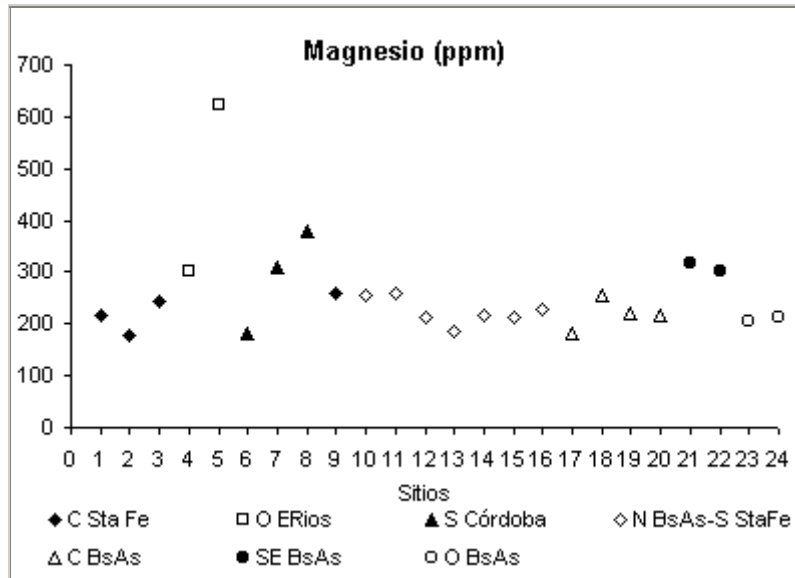


Figura 8: Magnesio disponible a la siembra en los sitios experimentales. Las líneas punteadas representan el rango de valores críticos habitualmente usados para este nutriente.

En el caso del Zn, excluyendo un sitio con un valor de 7,96 ppm (San Jerónimo), el resto de los sitios tuvo valores de entre 0.51–2.8 (Figura 9). 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.

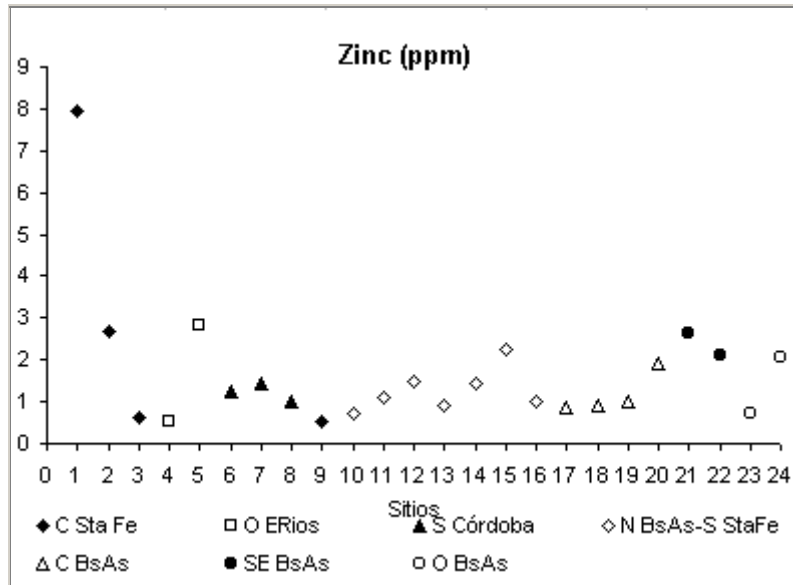


Figura 9: Zinc disponible a la siembra en los sitios experimentales. Las líneas punteadas representan el rango de valores críticos habitualmente usados para este nutriente.

El contenido de Cu extractable en los sitios experimentales varió entre 0,54 y 2,1 ppm (Figura 10). 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). Sólo dos sitios de la red de ensayos se acercan a estos valores (los dos de 9 de Julio, Bs.As.), pero en ellos no se observaron diferencias significativas entre el tratamiento completo y el que se agregó P y S.

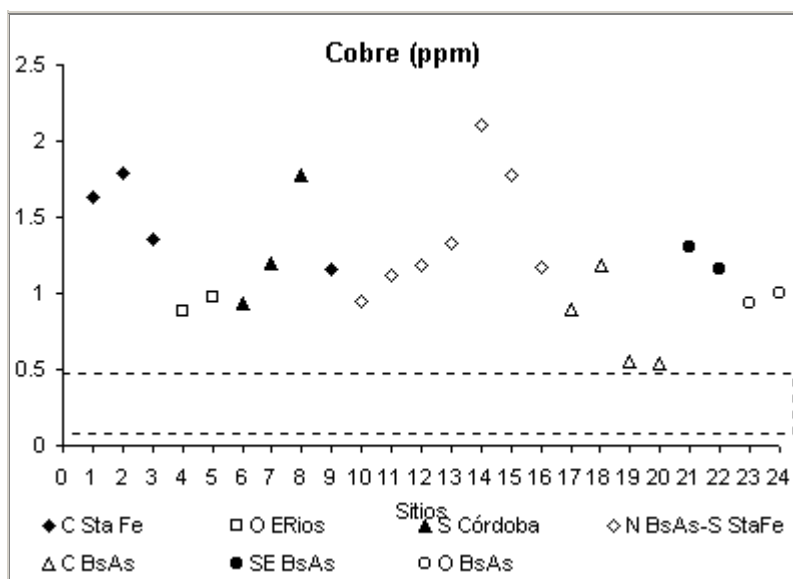


Figura 10: Cobre disponible a la siembra en los sitios experimentales. Las líneas punteadas representan el rango de valores críticos habitualmente usados para este nutriente.

Respecto del B, el rango de valores en los sitios evaluados fue de 0,17-0,54 ppm (Figura 11). 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.

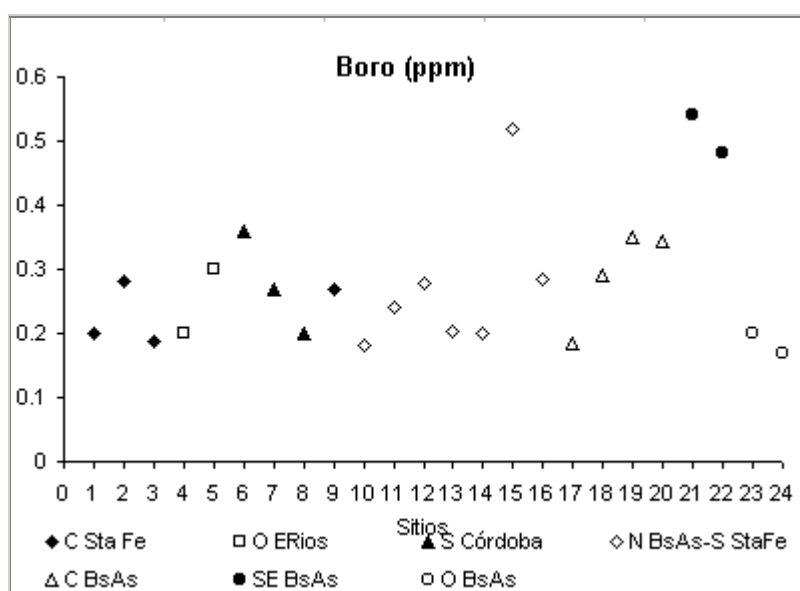


Figura 11: Boro disponible a la siembra en los sitios experimentales. Las líneas punteadas representan el rango de valores críticos habitualmente usados para este nutriente.

Conclusiones

Para un año de muy buenas condiciones meteorológicas para el cultivo de soja en la región pampeana, es factible concluir que:

- Se determinaron respuestas al agregado de P y S en el 29 y 21 % de los sitios evaluados, respectivamente.

- Se determinaron umbrales de respuesta al agregado de P de 8 y 15 ppm de P en el suelo por el método de Bray, para lograr el 90 o 95 % del rendimiento máximo, respectivamente.
- La determinación de S-S04 en superficie no fue buen estimador de la respuesta a S. Dicha estimación mejoró cuando la determinación de S-S04 integró los 60 cm de profundidad y en especial cuando se asoció con la relación MO/arcilla.
- No se determinó respuesta en rendimiento por el agregado de K y Mg, lo que se explica por los elevados contenidos de estos elementos en los suelos estudiados.
- No se determinó respuesta en rendimiento 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.

Agradecimientos

A las empresas participantes del proyecto Fertilizar, a los productores y personal de los establecimientos donde se condujeron los ensayos.

Referencias

Andriulo, A., J. Galantini, F. Abrego y F. Martinez. 1996. Exportación y balance edáfico de nutrientes después de ochenta años de agricultura continua. In: 13º Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Aguas de Lindoia, Sao Paulo, Brasil.

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, 34pp.

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 Nelson, L.A. 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. Est. Exp. Agrop. INTA Balcarce. 18p.

Fixen, P and Grove, J., 1990. Testing soils for phosphorus. In: R.L. Westerman (Ed.) Soil testing and Plant Analysis. SSSA. Madison, Wisconsin, USA.

García, F. O. 2000. Requerimientos nutricionales de los cultivos. En: Jornada de actualización para profesionales. Rosario, Abril de 2000. 40-43p. Giorda L.M. 1998. La soja en la Argentina. En: L.M. Giorda y H.E.J. Baigorri (eds.) El cultivo de la soja en Argentina. Editar, S. Juan. M. Juárez, Argentina. pp 11-28.

Gutierrez Boem, F.H., J.D. Scheiner, and R.S. Lavado. 1999. Identifying fertilization needs for soybean in Argentina. *Better Crops International*. 13: 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.

Hartwig, E.E. y T.C. Kilen. 1991. Yield and composition of soybean seed from parents with different protein, similar yields. *Crop Sci*. 31:290-292.

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 fertilización azufrada en soja. Para mejorar la producción 8. SOJA. Campaña 1997/98. EEA Oliveros INTA.

Martinez, F. y G. Cordone. Avances en el manejo del azufre: novedades en respuesta y diagnóstico en trigo, soja y maíz. En: Jornada de actualización para profesionales. Rosario, Abril de 2000. 28-30p.

Melgar, R. y J. Labandera. 1999. Resultados de los ensayos de fertilización en soja. Campaña 1998-99. En: Jornada de actualización para profesionales: Fertilización en soja. Rosario, Julio de 1999. 30-35 p.

Melgar, R.J., Frutos, E., Galetto, M.L. y Vivas, H. 1995. El análisis de suelo como predictor de la respuesta de la soja a la fertilización fosfatada. Actas I Congreso Nacional de Soja y II Reunión Nacional de Oleaginosas. Tomo I. 167-174 p.

Mejail, J., Marto; J., Sanchez, H., Guevara, D., Hernandez, C., Morandini, M. y Rufino, R. 1998. Red de ensayos de fertilización fosfatada en soja. Convenio I.N.T.A – AGD – EEAOC – Hydro Agri. Avance Agroindustrial, Octubre 1998. 21-23p.

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.