

Soja : Nutrición del Cultivo y Fertilización en la Región Pampeana Argentina

Fernando O. García
INPOFOS/PPI/PPIC Cono Sur
Av. Santa Fe 910 – (B1641ABO) Acassuso – Argentina
e-mail fgarcia@ppi-ppic.org

El cultivo de soja presenta altos requerimientos nutricionales. En la región pampeana argentina, investigaciones de distintos grupos de INTA y la Universidad de Buenos Aires muestran respuestas significativas a la fertilización fosfatada y azufrada. El diagnóstico de la fertilización fosfatada se realiza a través de la evaluación del fósforo (P) disponible en el análisis de suelo en pre-siembra. Para azufre (S), se han caracterizado ambientes de alta probabilidad de respuesta y se están llevando a cabo numerosas investigaciones con el objetivo de calibrar sistemas de diagnóstico más confiables y precisos integrando mediciones de suelo y de planta.

Los cultivos tienen requerimientos específicos y absolutos, los cuales deben ser satisfechos para alcanzar altos rendimientos. Radiación, agua, tiempo de crecimiento y nutrición son los principales requerimientos a ser cubiertos. En el caso de la soja, el objetivo es desarrollar un cultivo con óptimo estado a floración (R1-2 según Fehr y Caviness, 1977) que permita interceptar eficientemente toda la radiación incidente y maximizar la tasa de acumulación de materia seca durante el período de llenado de granos (Vasilas et al., 1995). Para alcanzar este objetivo, entre otros factores, el cultivo debe cubrir sus necesidades nutricionales.

Si bien las técnicas de manejo mejoraron a lo largo de los últimos años (variedades, fechas de siembra, control de malezas, cosecha, etc.), el uso de fertilizantes en este cultivo ha sido muy escaso, limitándose a aplicaciones de fertilizantes de arranque en el mejor de los casos. Resultados de investigaciones realizadas en la región pampeana demuestran la potencialidad de respuesta del cultivo ante situaciones de deficiencia de nutrientes tales como, por ejemplo, fósforo y azufre.

En este trabajo se discuten aspectos relacionados con la nutrición del cultivo y experiencias de fertilización realizadas en años recientes en la región pampeana argentina.

1. Requerimientos nutricionales del cultivo

El diagnóstico de la fertilización del cultivo implica conocer las necesidades nutricionales para alcanzar un rendimiento objetivo y la capacidad del suelo de proveer esos nutrientes en la cantidad y el momento adecuado. En la Tabla 1 se indican los requerimientos nutricionales promedio para producir una tonelada de grano de soja, el índice de cosecha de los distintos nutrientes y, a modo de ejemplo, las necesidades totales y extracción en grano para un rendimiento de 4000 kg/ha. Los valores indicados en esta Tabla son orientativos ya que se observa una marcada variabilidad en la información de las distintas referencias.

En general, el cultivo de soja presenta requerimientos nutricionales por kg de grano producido e índices de cosecha de nutrientes mayores que los cereales. Por ejemplo, la soja exporta 80-85% del fósforo (P) y 55-60% del potasio (K) absorbidos, mientras que trigo y maíz exportan 70-75% y 20-25% del P y K absorbidos, respectivamente.

En cuanto a los nutrientes secundarios, la soja presenta requerimientos de azufre (S) superiores a los de trigo y maíz, y para una eficiente fijación biológica de nitrógeno (FBN) requiere de micronutrientes tales como molibdeno (Mo), cobalto (Co), níquel (Ni), boro (B), hierro (Fe) y manganeso (Mn) (Baigorri, 1999; Yamada, 1999).

Si bien la soja presenta requerimientos muy elevados de N, una gran parte de este requerimiento es cubierto vía FBN a través de la simbiosis soja - *Bradyrhizobium*. La evolución de la FBN está relacionada con la tasa de acumulación de carbono (C) (Purcell, 1999), por lo tanto, las limitaciones nutricionales que afecten el crecimiento del cultivo afectarán la tasa de acumulación de N (Yamada, 1999).

En la región pampeana se han determinado aportes de nitrógeno (N) por FBN del orden del 30-70% de las necesidades totales de N del cultivo dependiendo del nivel de fertilidad nitrogenada del suelo y las características climáticas de la estación de crecimiento (González, 1996). Por lo tanto, la inoculación de la semilla es una práctica indispensable para lograr una adecuada provisión de N para el cultivo. En lotes con cultivos de soja previos se ha observado respuesta a la reinoculación

del orden de 155 a 215 kg/ha (EEA INTA Oliveros, citado por Darwich, 1999). En la región de los Cerrados en Brasil se han reportado respuestas a la reinoculación de 80 a 368 kg/ha (Vargas et al., 1993).

Tabla 1. Requerimientos nutricionales e índice de cosecha de nutrientes en soja¹.

Nutriente	Requerimiento	Índice de cosecha del nutriente	Rendimiento de 4000 kg/ha	
			Necesidad	Extracción
	kg/ton grano		kg/ha	kg/ha
Nitrógeno	80	0.75	320	240
Fósforo	8	0.84	32	27
Potasio	33	0.59	132	78
Calcio	16	0.19	64	12
Magnesio	9	0.30	36	11
Azufre	7	0.67	28	19
	g/ton grano		g/ha	g/ha
Boro	25	0.31	100	31
Cloro	237	0.47	948	446
Cobre	25	0.53	100	053
Hierro	300	0.25	1200	300
Manganeso	150	0.33	600	198
Molibdeno	5	0.85	20	17
Zinc	60	0.70	240	168

¹ Estimaciones promedio a partir de numerosas referencias bibliográficas.

2. Deficiencias nutricionales y experiencias de fertilización en la región pampeana

Fósforo

La respuesta de los cultivos a la fertilización fosfatada depende del nivel de P disponible en el suelo, pero también es afectada por factores del suelo, del cultivo y de manejo del fertilizante. Entre los factores del suelo, se destacan la textura, la temperatura, el contenido de materia orgánica y el pH; mientras que entre los del cultivo deben mencionarse los requerimientos y el nivel de rendimiento. El diagnóstico de la fertilización fosfatada se basa en el análisis de muestras de suelo del horizonte superficial utilizando un extractante adaptado a los suelos del área en evaluación. En la región pampeana, en general, el extractante utilizado es Bray 1.

La soja se caracteriza por presentar niveles críticos de P en suelo, por debajo de los cuales se observan respuestas significativas a la fertilización, menores a los de otros cultivos tales como alfalfa, trigo y maíz. Esta diferencia ha sido atribuida, entre otras causas, a cambios generados en el ambiente rizosférico del cultivo y al alto costo energético de los granos de soja (aceite + proteína). La adecuada nutrición fosfatada del cultivo resulta en mayor crecimiento y desarrollo del cultivo, maduración temprana y mayor desarrollo de nódulos y, por lo tanto, una mayor tasa de fijación de N atmosférico (Díaz Zorita et al., 2000) (Fig.1).

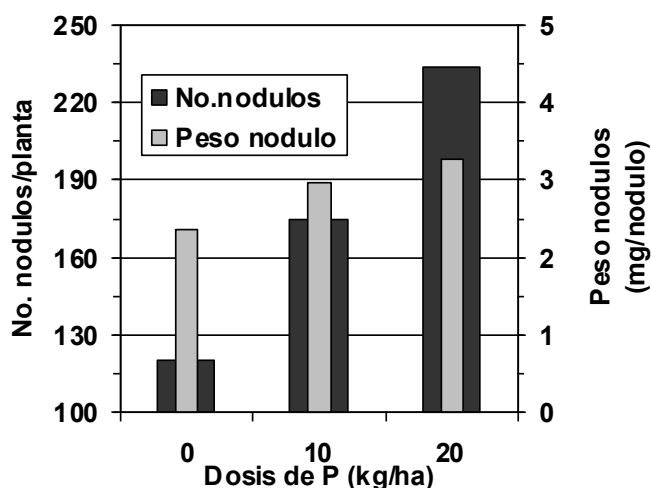


Fig. 1. Efecto de la fertilización fosfatada en la nodulación de soja (Díaz Zorita et al., 2000).

Los suelos de la región pampeana presentan deficiencias de

P como resultado de la baja disponibilidad nativa y/o de la baja reposición vía fertilizantes o abonos orgánicos. Melgar et al. (1995) recopilaron la información de 65 ensayos realizados en el país y encontraron un 70% de probabilidad de obtener respuestas de 300 kg/ha o superiores en suelos con menos de 9 ppm de P Bray y una probabilidad del 40% de obtener respuestas de 200 kg/ha o superiores en suelos con 9 a 14 ppm de P Bray.

Los mayores rendimientos obtenidos en los últimos años han resultado en una mayor demanda de P con respuestas en rendimiento en suelos de mayor nivel de P disponible (Parra, 1997; Avellaneda et al., 1999; Melgar et al., 1999; Sanchez y Lizondo, 1999; Scheiner et al., 1999; Vivas, 1999). La Fig. 2 muestra la respuesta promedio a la fertilización fosfatada observada en 12 ensayos realizados entre 1995 y 1998. Considerando un precio neto de soja de \$140/ton y de fertilizante de \$350/ton, el costo de la aplicación de 60 kg/ha de superfosfato triple o fosfato diamónico sería de 150 kg/ha de soja. Es decir que se obtendrían respuestas económicas a la aplicación con niveles de disponibilidad de P en el suelo menores de 12 ppm.

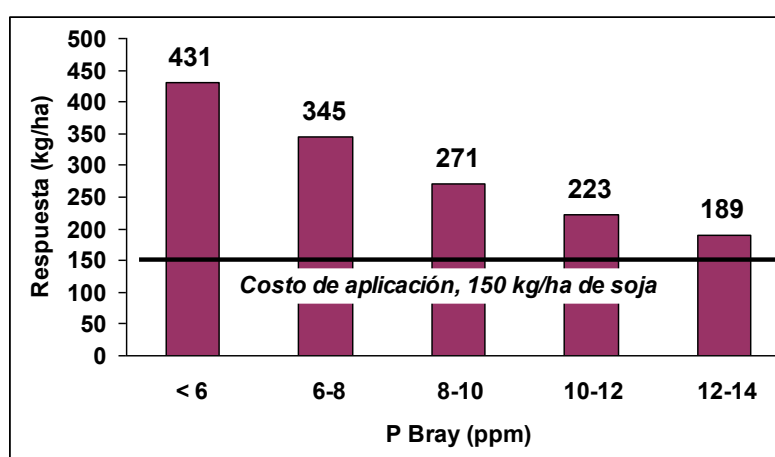


Fig. 2. Respuesta promedio a la fertilización fosfatada con 60 kg/ha de superfosfato triple o fosfato diamónico en 12 ensayos realizados en Buenos Aires y Santa Fe entre 1995 y 1998. La línea horizontal representa el costo del tratamiento expresado en kg/ha de soja, considerando precios de fertilizante de \$350 por ton y neto de soja de \$140 por ton. Fuente: Avellaneda et al. (1999); Hugo Fontanetto (com. personal); Prieto et al. (1999); Lucas Santos (com. personal); Vivas (1999).

En ensayos realizados durante la campaña 1999/00, Berardo y Ehrt (com. personal) encontraron una relación lineal entre los rendimientos de soja sin fertilizar y el nivel de P disponible en el suelo (Ps) en condiciones de secano y bajo riego en suelos del sudeste de Buenos Aires. Las relaciones encontradas en suelos con rangos de P disponible entre 7 y 20 ppm fueron las siguientes:

$$\text{Rendimiento} = 1575 + 90 \text{ Ps} \quad R^2 = 0.64 \quad \text{Secano}$$

$$\text{Rendimiento} = 2469 + 57 \text{ Ps} \quad R^2 = 0.56 \quad \text{Riego}$$

Estos ajustes indican que el rendimiento de soja se incrementa en 57 y 90 kg/ha por cada ppm de incremento en Ps bajo riego y secano, respectivamente.

La Tabla 2 muestra la recomendación de fertilización fosfatada para los suelos del sudeste bonaerense de acuerdo al nivel de P Bray y rendimiento esperado (Echeverría y García, 1998). Estas recomendaciones incluyen, en forma parcial, el criterio de reconstrucción para los niveles muy bajos de P disponible, y de mantenimiento para niveles de P disponible superiores a los 13 mg/kg.

Tabla 2. Recomendaciones de fertilización fosfatada para soja según nivel de P Bray y rendimiento esperado (Echeverría y García, 1998).

Rendimiento Ton/ha	Concentración de P disponible en el suelo (mg/kg)				
	Menos 4	4-6	6-8	8-11	11-16
	kg P ₂ O ₅ /ha				
2	43	33	28	24	
2.5	49	39	34	30	
3	55	45	40	36	25
3.5	61	51	46	42	31
4	67	57	52	48	37
4.5	73	63	58	54	43

Azufre

El ciclo del S en el sistema suelo-planta se asemeja en numerosos aspectos al del N. La mayor reserva de S en los suelos, al igual que para el N, se encuentra en forma orgánica. El S orgánico es mineralizado a formas inorgánicas disponibles para los cultivos (sulfatos, SO₄²⁻), a través de la acción de la biomasa microbiana. Las formas inorgánicas pueden ser perdidas por lavado o en forma gaseosa. Los aportes externos al sistema suelo-planta incluyen los residuos orgánicos, la incorporación por lluvias y deposición atmosférica y los fertilizantes (Tisdale et al., 1993). En general, las situaciones comunes en las que se encuentran deficiencias de S son: 1) suelos arenosos de bajo contenido de materia orgánica; 2) sistemas de cultivo intensivo, suelos degradados; 3) uso de fertilizantes con menor contenido de S, 4) control de contaminación ambiental, menor aporte atmosférico de S y; 5) exceso de precipitaciones y/o riego (Tisdale et al., 1993).

En los últimos años se han observado respuestas a la fertilización azufrada en numerosos cultivos (maíz, soja, trigo, canola, alfalfa, pasturas) en la región pampeana, principalmente en el oeste de Buenos Aires-este de La Pampa y en la zona centro y sur de Santa Fe y norte de Buenos Aires.

En el centro-sur de Santa Fe, las respuestas se observan principalmente en suelos degradados, con muchos años de agricultura continua (especialmente soja), y con historia de cultivos de alta producción con fertilización nitrogenada y fosfatada (Martínez y Cordone, 1998). Estas condiciones definen los ambientes de mayor probabilidad de respuesta a la fertilización azufrada. Las respuestas en soja han sido observadas tanto en cultivos de siembra de primera con aplicaciones directas (Fig. 3), como en cultivos de segunda con aplicaciones de S en el cultivo antecesor, generalmente trigo (Fig. 4).

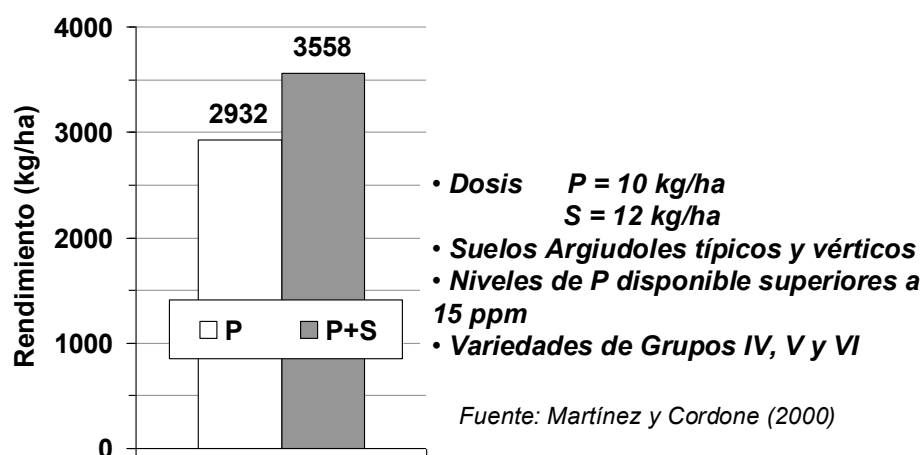


Fig. 3. Rendimientos de soja de primera sin y con aplicación de azufre en la región Centro-Sur de Santa Fe. Promedios de seis sitios, Campaña 1998/99. (Martínez y Cordone, 2000).

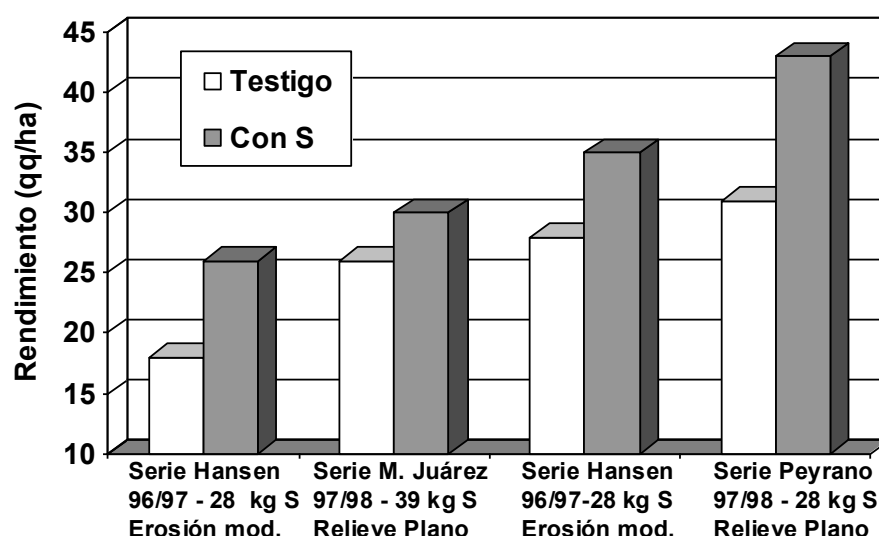


Fig. 4. Rendimientos de soja de segunda sin y con aplicación de azufre en el cultivo de trigo antecesor en cinco ambientes del Sur de Santa Fe y Córdoba. (Martínez y Cordone, 1998).

La Tabla 3 muestra los efectos de fertilización azufrada en aplicaciones directas en soja de primera en el centro-norte de Buenos Aires y sudoeste y centro-este de Santa Fe. Es importante destacar que las repuestas al agregado de S se verifican, en suelos con muchos años de agricultura y cuando el nivel de P disponible es elevado o cuando se aplica P. Esta interacción positiva PS se verifica en los resultados observados en los tres ensayos.

Si bien hay claros indicios de cuales son los ambientes de respuesta a la fertilización azufrada, investigaciones en curso y futuras deberán integrar diferentes mediciones del suelo, de la planta y del ambiente a los fines de contar con sistemas de diagnóstico confiables y precisos y pautas de manejo (dosis, fuentes, momentos y métodos de aplicación) para la fertilización azufrada en todas las situaciones de manejo y cultivo.

Tabla 3. Rendimientos de soja con distintos tratamientos de fertilización fosfatada y azufrada en ensayos realizados en Junín (Buenos Aires) (Scheiner et al., 1999), Teodelina (Santa Fe) (Avellaneda et al., 1999) y La Pelada (Santa Fe) (Hugo Fontanetto, com. personal).

Tratamiento	Rendimiento de Soja		
	Junín (98/99)	Teodelina (98/99)	La Pelada (99/00)
		kg/ha	
Testigo	2604	3913	3511
P	2883	-	3850
S	2596	4252	4162
PS	3272	4535	4506

Otros nutrientes

Los suelos de la Región Pampeana se consideran bien provistos de K. Los lotes con mayor frecuencia de soja en la rotación serán los que muestren mayor disminución de K disponible, por el alto requerimiento e índice de cosecha de K. En la región sojera de EE.UU., se indican niveles críticos de K extractable del suelo de 100 a 150 ppm (0.25-0.4 meq/100 g) según la capacidad de intercambio catiónico (Vitosh et al, 1996); mientras que en el sur de Brasil, los niveles críticos indicados son de 80-120 ppm K (0.2-0.3 meq/100g) (Comissao de Fertilidade do Solo RS/SC, 1994).

La disponibilidad original de calcio (Ca) y magnesio (Mg) de los suelos pampeanos es elevada. La intensificación de la agricultura ha resultado en la disminución de los niveles de bases y pH en algunos suelos, especialmente en el Norte de la región, con respuestas significativas a la aplicación de enmiendas calcáreas y/o dolomíticas en alfalfa y soja. Los altos niveles de K en el complejo de intercambio podrían resultar en deficiencias inducidas de Mg según lo sugiere la bibliografía internacional.

La disponibilidad de micronutrientes en suelos pampeanos ha sido considerada adecuada en general (Sillanpaa, 1982), sin embargo, en los últimos años se han observado respuestas y deficiencias en algunas situaciones. Se han determinado bajos niveles de B, Zn y Cu en suelos y plantas de soja, girasol, maíz y trigo. De estos tres elementos, B y Cu serían los primeros a considerar para el cultivo de soja.

El Mo es un nutriente de gran importancia en la simbiosis soja-*Bradyrhizobium* por formar parte de la enzima nitrogenasa que cataliza la reducción del N₂ atmosférico. Sfredo et al. (1997) reportan respuestas en rendimiento de 540 kg/ha (20% sobre el testigo) a la aplicación de Mo vía semilla en trabajos realizados en Paraná (Brasil). Estos autores recomiendan el uso de 12-25 g/ha de Mo y de 1-5 g/ha de Co, por su importancia en la FBN, en aplicaciones con las semillas, conjuntamente con inoculantes y funguicidas.

El análisis foliar constituye una herramienta de gran utilidad en el diagnóstico de la deficiencia de nutrientes, especialmente los "no convencionales" (otros nutrientes que no sean N y P). La Tabla 4 muestra niveles críticos de nutrientes en hojas de soja en floración reportados por diferentes autores. La información de EMBRAPA (1998) es orientativa para zonas de producción de soja de Brasil. Los datos de Martins (citado por Yamada, 1999) corresponden a la media de lotes de la zona de los Cerrados de Brasil con producción promedio superior a 3600 kg/ha. Los datos de Flannery (1989) corresponden a parcelas de alto rendimiento en EE.UU. Los tenores críticos de nutrientes en hoja varían de acuerdo a la zona de producción y nivel de rendimiento objetivo, por lo tanto, es necesario desarrollar bases de datos que establezcan los tenores críticos para distintas situaciones regionales y condiciones de producción. El análisis foliar debe ser considerado como una herramienta de monitoreo, que permite saber si la nutrición del cultivo fue adecuada y si se deben planificar cambios en el sistema de manejo para próximos cultivos.

Tabla 3. Tenores críticos de nutrientes en hojas de soja según distintos autores. Muestras de hojas del primer trifolio superior maduro al inicio o plena floración (Estado R1-R2).

Nutriente	EMBRAPA (1998)	Martins (1998) 3600 kg/ha	Flannery (1989) 7963 kg/ha
		g/kg	
Nitrógeno	45-55	46.4	53.3
Fósforo	2.6-5.0	2.5	3.6
Potasio	17-25	18.7	21.9
Calcio	3.6-20.0	7.9	10.2
Magnesio	2.6-10.0	3.3	3.3
Azufre	2.1-4.0	2.5	2.4
		mg/kg	
Boro	21-55	51	46
Cobre	10-30	8	12
Hierro	51-350	100	144
Manganeso	21-100	35	30
Molibdeno	1-5	-	-
Zinc	21-50	45	48

Referencias

- Avellaneda J., Agustín Avellaneda, L. Caballero y F. García. 1999 Ensayo de fertilización de soja Establecimiento "San Marcelo", Teodelina (Santa Fe) - Campaña 1998/99. *En* Jornada de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilización de Soja". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires. 39 pág.
- Baigorry H. 1999. Requerimientos nutricionales del cultivo de soja. *En* Jornada de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilización de Soja". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires. 39 pág.
- Comissao de Fertilidade do Solo RS/SC. 1994. Recomendacao de adubacao e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Nucleo Regional Sul, Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo. Santa Maria, RS, Brasil.
- Darwich N. A. 1999. Cómo lograr altos rendimientos en soja. Cyanamid Arg. S.A. Buenos Aires. 54 pág.

- Díaz Zorita M., G. Grosso, M. Fernandez Caniggia y G. Duarte. 2000. Efectos de la ubicación de un fertilizante nitrogeno-fosfatado sobre la nodulación y la producción de soja en siembra directa en la región de la Pampa Arenosa, Argentina. *Ciencia del Suelo* 17(2):62-65.
- Echeverría H. y F. García. 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. Boletín Técnico No. 149. EEA INTA Balcarce.
- EMBRAPA-CNPSoja. 1998. Recomendacoes tecnicas para a cultura da soja na regio central do Brasil 1998/99. EMBRAPA-CNPSoja. 182 pág.
- Fehr W. y C. Caviness. 1977. Stages of soybean development. Spec. Report No. 80. Coop. Ext. Ser., Iowa State University. Ames, Iowa, EE.UU.
- Flannery R. 1989. The use of maximum yield research technology in soybean production. In R. Munson (ed.). The physiology, biochemistry, nutrition and bioengineering of soybeans: Implications for future management. PPI/PPIC. pág. 160-174.
- González N. 1996. Fijación de nitrógeno. En Curso de Actualización "Dinámica de nutrientes en suelos agrícolas". EEA INTA Balcarce.
- Martínez F. y G. Cordone. 1998. Fertilización azufrada en soja. Jornadas de Azufre. UEEA INTA Casilda, Septiembre 1998. Casilda, Santa Fe, Argentina.
- Martínez F. y G. Cordone. 2000. Avances en el manejo de azufre: Novedades en respuesta y diagnóstico en trigo, soja y maíz. In Jornada de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilidad 2000". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Melgar R., E. Frutos, M. Galetto y H. Vivas. 1995. El análisis de suelos como predictor de la respuesta de la soja a la fertilización fosfatada. 1er. Congreso Nacional de Soja y 2da. Reunión Nacional de Oleaginosas. AIANBA. Pergamino. Tomo 1, pág. 167-174.
- Melgar R., y J. Lavandera. 1999. Resultados de los ensayos de fertilización en soja. Campaña 1998/99. En Jornada de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilización de Soja". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires. 39 pág.
- Parra R. 1997. Fertilización fosfatada en el cultivo de soja y residualidad en una secuencia de cultivos en el norte santafesino. Pub. Misc. No. 12. EEA INTA Reconquista. Santa Fe, Argentina.
- Prieto G., M. Bodrero, M. C. Lamsa y L. Macor. 1999. Fertilización fosfatada del cultivo de soja: Experiencias en el sudeste de Santa Fe. Informaciones Agronómicas del Cono Sur No. 3: 4-5. INPOFOS Cono Sur, Acassuso (Buenos Aires, Argentina).
- Purcell L. 1999. Physiology, nutrition and fertilization of soybeans in the United States. Anales Simposio "Monitoreo nutricional para la recomendación de fertilización de cultivos". POTAFOS. Piracicaba, SP, Brasil.
- Sanchez H. y R. M. Lizondo. 1999. Respuesta de la soja a la fertilización fosfatada en el área de granos de la Provincia de Tucumán. Actas Mercosoj 99. CIASF-AIANBA. Rosario, Santa Fe, Argentina.
- Scheiner J., F. Gutiérrez Boem y R. Lavado. 1999. Experiencias de fertilización de soja en el centro-norte de Buenos Aires. En Jornada de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilización de Soja". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires. 39 pág.
- Sfredo G. y colaboradores. 1997. Molibdenio e cobalto na cultura da soja. EMBRAPA-CNPSO. Circular Técnica 16. Londrina, Parana, Brasil.
- Sillanpää M. 1982. Micronutrients and the nutrient status of soils: A global study. FAO Soils Bull. 48. FAO, Organización de Naciones Unidas, Roma, Italia.
- Tisdale S., W. Nelson, J. Beaton y J. Havlin. 1993. Soil fertility and fertilizers. 5ª. Edición. Mac Millan Pub. Co. New York, EEUU.
- Vargas M., C. Mendes, A. Shet y J. Rodrigues Peres. 1993. Fixacao biologica do nitrogenio. In N. Arantes y P. de Souza (ed.). Cultura da soja nos Cerrados. POTAFOS. Piracicaba, SP, Brasil.
- Vasilas B. R. Nelson, J. Fuhrmann y T. Evans. 1995. Relationship of nitrogen utilization patterns with soybean yield and seed-fill period. Crop Sci. 35:809-813.
- Vivas H. 1999. Residualidad de la fertilización fosfatada y su influencia en la producción de soja y en la rotación. En Jornada de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilización de Soja". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires. 39 pág.
- Vitosh M., J. Johnson, y D. Mengel (ed.). 1996. Tri-state fertilizer recommendations for corn, soybeans, wheat and alfalfa. Extension Bulletin E-2567. Michigan State University. EE.UU.
- Yamada T. 1999. Aduacao balanceada da soja. En Jornada de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilización de Soja". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires. 39 pág.