

FERTILIZACIÓN FOSFATADA E INOCULACIÓN DE SOJA EN VERTISOLES

MARTÍN DÍAZ-ZORITA^{1,2,3*}; JOSÉ MD ARANGUREN^{2,4}; RODRIGO AGUILAR² & EMILIO H SATORRE^{1,2,4}

1 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET)

2 Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires

3 Merck Crop Bioscience Argentina S.A., Calle 10 y 11, Parque Industrial Pilar (1629) Pilar, Buenos Aires

4 Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (AACREA)

*Correo electrónico mdzorita@agro.uba.ar

Recibido: 19-02-10

Aceptado: 25-08-10

RESUMEN

La simbiosis entre rizobios y soja [*Glycine max* (L.) Merrill] provee parte de los requerimientos de N del cultivo en un proceso que depende de la disponibilidad de nutrientes tales como el P. El objetivo de este estudio fue determinar los aportes de la fertilización con P (0, 18 y 36 kg ha⁻¹) y de la inoculación con *Bradyrhizobium japonicum* sobre la nodulación y los rendimientos de soja en Vertisoles potencialmente deficientes en P. En sitios sin antecedentes de soja, la inoculación incrementó la nodulación, la biomasa aérea y el rendimiento en grano por sobre los cultivos sin inocular. Al aumentar el P disponible ($P_{\text{suelo}} + P_{\text{fertilización}}$) hasta 12,4 mg kg⁻¹ la nodulación y la biomasa aérea aumentaron. En los sitios con antecedentes de soja en rotación, los rendimientos fueron superiores al inocular y sólo con este tratamiento la biomasa aérea y los rendimientos mejoraron al aumentar la oferta de P. En general, los cultivos inoculados y fertilizados mostraron los mayores rendimientos sugiriendo la conveniencia del manejo combinado de la nutrición del cultivo.

Palabras clave. *Glycine max*, Fijación Biológica de Nitrógeno, Fósforo, Nodulación, *Bradyrhizobium japonicum*.

PHOSPHATE FERTILIZATION AND INOCULATION OF SOYBEAN IN VERTISOLS

ABSTRACT

The symbiosis between rhizobia and soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] provides most of the nitrogen requirements of the crop through a process that also depends on the availability of nutrients, for example phosphorous. The objective of this study was to determine the contribution of P fertilization (0, 18 y 36 kg ha⁻¹) and *Bradyrhizobium japonicum* inoculation on the nodulation and grain yield of soybean crops in Vertisols with low soil P availability. In the sites without previous soybean crops, the inoculation promoted a greater nodulation, and shoot dry matter and grain yields above the non-inoculated crops. Nodulation and shoot growth increased with increasing available P ($P_{\text{soil}} + P_{\text{fertilization}}$) levels up to 12.4 mg kg⁻¹. In the sites rotated with soybean, yields were greater in the inoculated crops. Shoot dry matter and grain yields increased with increasing available P levels only under inoculation. In general, the inoculated and fertilized crops showed greater production suggesting the convenience of the combined nutrition of soybean crops for achieving greater grain yields.

Key words. *Glycine max*, Nitrogen Biological Fixation, Nodulation, *Bradyrhizobium japonicum*.

INTRODUCCIÓN

La soja [*Glycine max* (L.) Merrill] es un cultivo con altos requerimientos de nitrógeno (N) cubiertos tanto desde la solución del suelo como por la fijación biológica del N atmosférico (FBN) en simbiosis con *Bradyrhizobium japonicum*. La funcionalidad y efectividad de la FBN requiere del aporte de recursos energéticos y de nutrientes específicos (Panzieri *et al.*, 2000; Gan *et al.*, 2002). Entre estos, las deficiencias de fósforo (P) reducen la nodulación, la cantidad de N fijado y la producción de granos (Israel, 1987; Tsvetkova & Georgiev, 2003). Además, la oferta de P afecta indirectamente la fotosin-

tesis y así la disponibilidad de fotosintatos para ser trasladados a los nódulos (Yahiya *et al.*, 1995; Christiansen & Graham, 2002).

En los Vertisoles de la provincia de Entre Ríos (Argentina), dados los bajos contenidos de P en sus materiales originarios, se observan deficiencias para la normal nutrición fosfatada de los cultivos (Boschetti *et al.*, 2000). En estos suelos se han descrito mejoras en los rendimientos de soja al fertilizar con P cuando los niveles extractables de P (método de Bray Kurtz 1) son inferiores a 9,5 mg kg⁻¹ (Barbagelata *et al.*, 2002). Sin embargo, es escasa la información en relación a la interacción entre prác-

ticas de fertilización fosfatada e inoculación con *Bradyrhizobium japonicum* en suelos deficientes en P. Se supone que al aumentar la disponibilidad de P al fertilizar se incrementaría la nodulación permitiendo una mejor nutrición nitrogenada y producción de granos. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue determinar los aportes de prácticas de fertilización con P e inoculación con *Bradyrhizobium japonicum* sobre la nodulación y la productividad de soja en Vertisoles deficientes en P.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en 4 sitios experimentales ubicados en el departamento Federal (Entre Ríos, Argentina) sobre Peludertes Argiacuolicos (Hapludertes Acuiicos) serie Caraballo (Tasi *et al.*, 1993). Dos de estos presentaban antecedentes de soja en rotación con otros cultivos anuales de cosecha. En cada sitio, y en el momento la siembra, se tomaron muestras compuestas por cuadruplicado de la capa superficial de los suelos (0 a 20 cm) para la determinación de pH en agua (potenciometría), P extractable (Pe, método de Bray Kurtz 1), S-SO₄ (extracción por el método de Morgan y determinación por turbidimetría) y materia orgánica (método de Walkley y Black). En la Tabla 1 se resumen los resultados de los análisis de suelos.

Los tratamientos evaluados resultaron de la combinación de (i) dosis de fertilización fosfatada [0, 80 y 160 kg ha⁻¹ de fosfato monamónico (11-52-0)] e (ii) inoculación de semillas con *Bradyrhizobium japonicum*. En todos los casos el fertilizante se incorporó en bandas en el suelo separado aproximadamente unos 2,5 cm por debajo de las líneas de siembra. Las semillas en los tratamientos de inoculación recibieron una dosis de 6 ml kg⁻¹ del inoculante líquido Nitragin Cell Tech® (Merck Crop Bioscience Argentina, S.A., Pilar, Buenos Aires, Argentina) conteniendo al menos 1 x 10⁹ unidades formadoras de colonias ml⁻¹. La inoculación se realizó dentro de las 4 horas antes de la siembra utilizando una mezcladora excéntrica. No se aplicaron fungicidas ni otros agroquímicos o fertilizantes sobre las semillas para evitar las interferencias que estos podrían provocar sobre el normal proceso de nodulación.

En todos los casos, los cultivos se manejaron bajo prácticas de siembra directa con control químico de herbicidas en el barbecho y en post-emergencia. El 27 de octubre de 2003 se sembró el cultivar A6445 RG con una sembradora de siembra directa convencional en surcos distanciados a 42 cm y a razón de 40 semillas m⁻². Las parcelas fueron de 4,62 metros de ancho por 25 metros de longitud.

En los estadios fenológicos de v6 y de R3 (Fehr & Caviness, 1977), y sobre muestras de 40 plantas en cada tratamiento, se realizó el recuento de nódulos discriminando entre los ubicados sobre la raíz principal (NRP) en un cilindro aparente de 2,5 cm de diámetro y 5 cm de longitud desde el cuello de las raíces como en el resto de las raíces (laterales o secundarias) hasta 25 cm de profundidad (NRL). Además se determinó la biomasa nodular fresca y seca (72 horas en estufa a 70 °C) discriminando entre los ubicados sobre la raíz principal (BRP) y sobre las raíces laterales (BRL).

En los estadios de R3 y de R5 (Fehr & Caviness, 1977), y sobre muestras de plantas de 1 m lineal de surco en cada tratamiento, se determinó la biomasa aérea seca (72 horas en estufa a 70 °C). También en R5 se evaluó la intensidad de color verde de las hojas superiores de las plantas a través de lecturas con el clorofilómetro Minolta SPAD® sobre 20 hojas en cada parcela en las que también se determinó su concentración de N (método de Kjeldahl). El contenido total de N en las plantas en el estadio de R5 se estimó a partir del producto entre la biomasa aérea total y la concentración de N de las hojas. La tasa diaria de crecimiento entre los estadios de R3 y de R5 fue calculada como el cociente entre la diferencia de biomasa seca aérea en ambos estadios y los días transcurridos entre ambas evaluaciones.

En madurez fisiológica se cosecharon 8 submuestras de 1 m lineal de los 2 surcos centrales de cada parcela sobre las que se determinó el rendimiento en granos, el peso individual de los granos y se estimó el número de granos m⁻² según el cociente entre el rendimiento y el peso individual de los granos. Los resultados de producción de granos se corrigieron a contenidos de humedad de 140 g kg⁻¹.

Como índice adicional para el análisis de los efectos de la fertilización fosfatada sobre las variables evaluadas se estimó el nivel de P disponible (Pd) como la suma entre los niveles de P extraído de los suelos (Pe) y los aportes por fertilización (Pfert). Para convertir los aportes aparentes de Pfert a unidades de mg kg⁻¹, las dosis de fertilización en kg ha⁻¹ se multiplicaron por el peso aparente del suelo en la capa de 0 a 20 cm considerando una densidad aparente de 1,2 t m⁻³ y un factor de recuperación aparente del P de 0,35 (Maddoni *et al.*, 2004).

El análisis estadístico se realizó considerando un diseño en bloques completos aleatorizados con 2 repeticiones (sitios) agrupados según sus antecedentes de soja en rotación. Se emplearon ANVA, prueba de diferencia mínima significativa (LSD), análisis de correlación y de regresión con el programa Statistics 9 (Analytical Software, 2008). Además se realizaron ajustes lineal-meseta entre los valores de Pd y las variables de nodulación y de productividad con el programa TableCurve 2D v5.01 (Systat Software Inc., 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sitios sin antecedentes de soja en rotación

La nodulación, tanto según el número de nódulos como su biomasa individual, no mostró interacciones entre tratamientos de inoculación y de fertilización fosfatada. En el estadio de v6, el número y la biomasa de nódulos en la raíz principal variaron entre 0 y 14 planta⁻¹ y entre 2,4 y 10,7 mg nódulo⁻¹, respectivamente. En las raíces laterales se observaron entre 0 y 16 nódulos planta⁻¹ con una biomasa de entre 5,0 y 8,1 mg nódulo⁻¹. Los NRP y los NRL, tanto en v6 como en R3, fueron mayores en los tratamientos inoculados que en ausencia de esta práctica (Tabla 2). La BRP fue mayor en los tratamientos inocu-

Tabla 1. Promedio de propiedades superficiales (0 a 20 cm) de los Vertisoles estudiados. Desvío estándar entre paréntesis, Pe = fósforo extractable (método de Bray Kurtz 1), M.O. = Materia Orgánica.

Table 1. Soil properties (0 to 20 cm) of the studied Vertisolls. Standard deviation between parenthesis, Pe = soil extractable phosphorus (Bray and Kurtz 1 method), M.O. = organic matter.

Antecedentes de soja	pH	Pe	S-SO ₄	M.O.
		mg kg ⁻¹		g kg ⁻¹
No	6,3 (0,1)	9,1 (1,5)	10,1 (2,2)	48,3 (8,2)
Si	6,2 (0,4)	10,2 (3,7)	18,1 (0,7)	52,5 (0,7)

Propiedades de los vertisoles estudiados en el estrato de 0-20 cm (promedio de dos sitios).

Tabla 2. Nodulación de soja en Vertisoles sin antecedentes del cultivo en rotación según tratamientos de inoculación y de fertilización fosfatada en dos momentos de evaluación.

Table 2. Soybean nodulation in Vertisolls without previous soybean crops depending on inoculation and phosphorus fertilization.

Tratamiento	Estadio v6				Estadio R3			
	NRP	NRL	BRP	BRL	NRP	NRL	BRP	BRL
Sin inoculante	0,1 a	0,3 a	5,2 a	6,6 a	0,1 a	0,6 a	3,2 a	3,7 a
Con inoculante	12,5 b	14,4 b	10,2 b	5,4 a	13,1 b	16,3 b	9,7 b	4,8 a
P0	6,4 a	6,4 a	6,4 a	5,3 a	5,0 a	9,0 a	6,1 a	3,4 a
P1	6,6 a	9,8 a	7,5 a	5,6 a	7,9 a	8,2 a	6,8 a	5,3 a
P2	7,9 a	9,2 a	9,2 a	7,0 a	6,9 a	8,1 a	6,4 a	4,1 a

NRP = nódulos en raíz principal planta⁻¹, NRL = nódulos en raíces laterales planta⁻¹, BRP = biomasa nodular en raíz principal, mg nódulo⁻¹ y BRL = biomasa nodular en raíces laterales, mg nódulo⁻¹. Letras distintas en sentido vertical indican diferencias significativas (p<0,05) entre tratamientos de inoculación (promedio de 3 niveles de fertilización fosfatada: P0 = 0 kg ha⁻¹; P1 = 18,3 kg ha⁻¹; P2 = 36,6 kg ha⁻¹) y de fertilización (promedio de 2 tratamientos de inoculación).

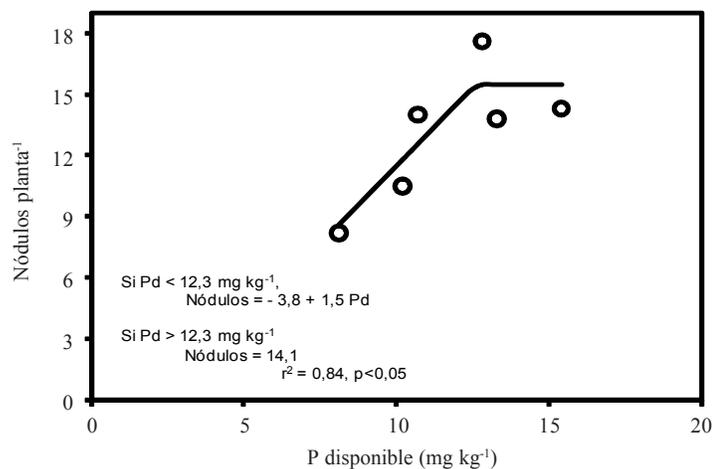
NRP = nodules in the main root plant⁻¹, NRL = nodules in secondary roots plant⁻¹, BRP = mass of nodules from the main root, mg nodule⁻¹ y BRL = mass of nodules from secondary roots, mg nodule⁻¹. In each column, different letters show significant differences (p<0.05) between inoculation treatments (mean o 3 phosphorus fertilization levels: P0 = 0 kg ha⁻¹; P1 = 18.3 kg ha⁻¹; P2 = 36.6 kg ha⁻¹) and between fertilization treatments (mean of 2 inoculation treatments)

lados mientras que la BRL no presentó diferencias entre tratamientos de inoculación. En promedio, la fertilización con P, tanto en v6 como en R3, tendió a incrementar la nodulación y la biomasa de los nódulos (Tabla 2). En particular, en los tratamientos inoculados se encontró una estrecha asociación positiva entre el NRP en R3 y el Pd hasta 12,3 mg kg⁻¹ (Fig. 1). Las diferencias en nodulación

entre tratamientos de inoculación son coincidentes con lo descrito en otros estudios también en sitios sin antecedentes de cultivos de soja y en respuesta a la introducción de cepas infectivas de rizobios al inocular (De Battista *et al.*, 2003; Fontanetto *et al.*, 2004). También concuerdan con los resultados de Fontanetto *et al.* (2004) y de Yahiya *et al.* (1995) quienes describieron aumentos en el

Figura 1. Nódulos en la raíz principal de soja en estadios de R3 en Vertisoles sin antecedentes del cultivo en rotación según niveles de P disponible (P_{suelo} + P_{fertilización}).

Figure 1. Nodules from the main root of soybean plants at the R3 growth stage in Vertisolls without previous soybean crops depending on available P levels (P_{soil} + P_{fertilization}).



número y en la biomasa de nódulos al incrementarse los aportes de P sugiriendo que en las condiciones de este estudio el P sería limitante para la normal formación de nódulos y su crecimiento. Según Miao *et al.*, 2007, al incrementar los aportes de P se incrementa la biomasa de nódulos porque la deficiencia de P inhibe el desarrollo de los mismos.

La biomasa aérea de soja varió entre 1.841 y 5.907 y entre 3.065 y 8.506 kg de materia seca ha⁻¹ en los estadios de R3 y de R5, respectivamente y fue en promedio un 55% mayor en los tratamientos con inoculación que sin esta práctica (Tabla 3). No se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos de fertilización. Se obser-

vó una estrecha relación lineal entre la biomasa aérea y la cantidad de nódulos determinados tanto en estadios de v6 como de R3 sugiriendo la importancia del proceso de nodulación y de FBN sobre la producción y acumulación de biomasa del cultivo (Gan *et al.*, 2003). En los tratamientos inoculados se observó que con niveles mayores a los 11,1 y 10,8 mg kg⁻¹ de Pd no se detectaron aumentos en producción de biomasa aérea (Fig. 2) y en rendimientos en grano (Fig. 3), respectivamente.

La concentración de N en las hojas superiores en el estadio de R5 varió entre 26,8 y 35,2 g kg⁻¹, siendo mayor en los tratamientos inoculados que en los no inoculados (Tabla 3) y mostrando una estrecha relación con las

Tabla 3. Productividad de soja en Vertisoles sin antecedentes del cultivo en rotación según tratamientos de inoculación y de fertilización fosfatada.

Table 3. Soybean productivity in Vertisolls without previous soybean crops depending on inoculation and phosphorus fertilization treatments.

Tratamiento	Biomasa aérea total (kg ha ⁻¹)		Intensidad de color verde (unidades SPAD)	N foliar (g kg ⁻¹)	PG (mg grano ⁻¹)	NG (granos m ⁻²)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
	R3	R5					
Sin inoculante	2.356 a	3.284 a	34,7 a	26,8 a	144 a	1.506 a	2.181 a
Con inoculante	5.362 b	7.296 b	40,2 b	34,1 b	148 a	2.369 b	3.507 b
P0	3.199 a	4.769 a	37,2 a	30,0 a	146 a	1.807 a	2.649 a
P1	4.144 a	5.246 a	37,4 a	30,0 a	149 a	2.095 a	3.116 a
P2	4.235 a	5.854 a	37,8 a	31,0 a	144 a	1.910 a	2.767 a

PG = peso individual de granos y NG = número de granos. Letras distintas en sentido vertical indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos de inoculación (promedio de 3 niveles de fertilización fosfatada: P0 = 0 kg ha⁻¹; P1 = 18,3 kg ha⁻¹; P2 = 36,6 kg ha⁻¹) y de fertilización (promedio de 2 tratamientos de inoculación).

PG = single grain weight and NG = number of grains. In each column, different letters show significant differences ($p < 0,05$) between inoculation treatments (mean of 3 phosphorus fertilization levels: P0 = 0 kg ha⁻¹; P1 = 18.3 kg ha⁻¹; P2 = 36.6 kg ha⁻¹) and between fertilization treatments (mean of 2 inoculation treatments).

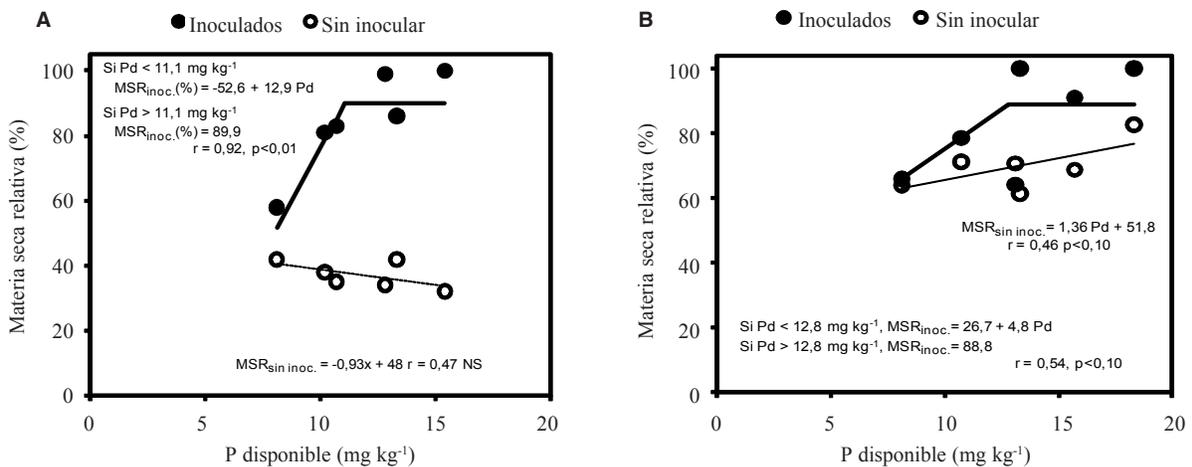


Figura 2. Biomasa aérea de soja en estadios de R5 según el P disponible ($P_{\text{suelo}} + P_{\text{fertilización}}$) y tratamientos de inoculación con *Bradyrhizobium japonicum* en Vertisoles. A = sin antecedentes del cultivo en rotación, B = con antecedentes del cultivo en rotación. NS = modelo no significativo ($P > 0,20$).

Figure 2. Soybean shoot mass at the R5 growth stage depending on available P ($P_{\text{soil}} + P_{\text{fertilization}}$) and inoculation with *Bradyrhizobium japonicum* treatments in Vertisolls. A = without previous soybean crops, B = with previous soybean crops. NS = no significant model ($P > 0,20$).

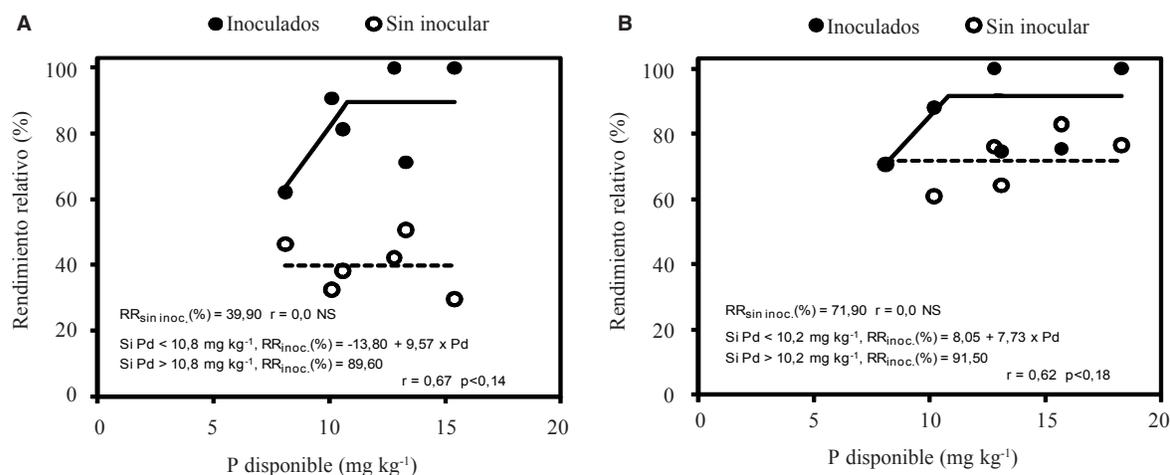


Figura 3. Rendimientos de soja según el P disponible ($P_{\text{suelo}} + P_{\text{fertilización}}$) y tratamientos de inoculación con *Bradyrhizobium japonicum* en Vertisoles. A = sin antecedentes del cultivo en rotación, B = con antecedentes del cultivo en rotación. NS = modelo no significativo ($P > 0,20$).

Figure 3. Soybean grain yields depending on available P ($P_{\text{soil}} + P_{\text{fertilization}}$) and inoculation with *Bradyrhizobium japonicum* treatments in Vertisols. A = without previous soybean crops, B = with previous soybean crops. NS = no significant model ($P > 0.20$).

lecturas de intensidad de color verde [N ($g\ kg^{-1}$) = $1,27 \times \text{Lectura SPAD} - 17,27$, $r^2 = 0,98$, $p < 0,001$]. Además, se observó una estrecha relación entre la concentración foliar de N y la nodulación determinada tanto en estadios de v6 como de R3. Santos y Vicentini (2003), en 2 isólinas de soja cultivadas en sitios similares a los de este estudio, describieron que la intensidad de coloración verde de las hojas superiores en los tratamientos inoculados fue mayor que en los no inoculados en respuesta a un mejor estado de nutrición nitrogenada de las plantas.

La información disponible fue insuficiente para determinar diferencias en el peso individual de los granos (143 y $153\ mg\ grano^{-1}$) según los tratamientos de fertilización e inoculación evaluados (Tabla 3). En cambio, el número de granos varió entre 1.341 y 2.524 granos m^{-2} y fue un 36% mayor en los tratamientos inoculados con respecto a los no inoculados, sin diferencias entre los tratamientos de fertilización (Tabla 3). Los rendimientos en granos fueron un 38% mayores en los tratamientos inoculados que en los no inoculados (Tabla 3) coincidiendo con resultados de otros estudios en Vertisoles sin antecedentes de cultivos soja en rotación y en respuesta a la FBN lograda al inocular con cepas eficientes de rizobios (De Battista *et al.*, 2003; Santos & Vicentini, 2003). El crecimiento entre R3 y R5 fue mayor en los cultivos inoculados que en los sin inocular ($p < 0,05$) a razón de 54 y de $26\ kg$ de materia seca $ha^{-1}\ día^{-1}$, respectivamente. Estas diferencias justifican la mayor cantidad de granos

formados y su contribución a la formación del rendimiento en los cultivos inoculados (Egli, 1998). La ausencia de diferencias en el peso individual de los granos entre tratamientos de inoculación sugiere una menor relevancia relativa de la FBN sobre el llenado de granos tanto modificando su duración como la tasa de acumulación de fotoasimilados (Egli, 1998).

Sítios con antecedentes de soja en rotación

Los efectos de la inoculación y de la fertilización fosfatada sobre la nodulación fueron independientes entre sí. La cantidad de nódulos formados sobre la raíz principal, en v6 y en R3, fueron un 33 y un 25% mayores en los tratamientos inoculados que sin esta práctica, respectivamente (Tabla 4). Sin embargo, el número de nódulos sobre las raíces laterales y en la biomasa de los nódulos no mostraron diferencias significativas entre estos tratamientos. La fertilización fosfatada no indujo a cambios significativos en el número ni en la biomasa de los nódulos con respecto al control sin fertilizar (Tabla 4). Las diferencias en nodulación entre tratamientos inoculados y no inoculados, coinciden con lo descrito en otros estudios, donde se observó mayor número de nódulos en los tratamientos inoculados en ambientes con antecedentes de soja donde es frecuente la presencia de rizobios naturalizados (Peticari *et al.*, 2003).

Tabla 4. Nodulación de soja en Vertisoles con antecedentes del cultivo en rotación según tratamientos de inoculación y de fertilización fosfatada en dos momentos de evaluación.

Table 4. Soybean nodulation in Vertisolls with previous soybean crops depending on inoculation and phosphorus fertilization.

Tratamiento	Estadio v6				Estadio R3				
	NRP	NRL	BRP	BRL	NRP	NRL	BRP	BRL	
Sin inoculante	6 a	7 a	5,4 a	3,6 a	8 a	13 a	4,5 a	3,4 a	
Con inoculante	8 b	8 a	4,6 a	3,7 a	10 b	15 a	4,6 a	3,4 a	
	P0	8 a	7 a	4,5 a	3,8 a	9 a	15 a	4,2 a	3,4 a
	P1	8 a	8 a	4,4 a	3,1 a	9 a	14 a	4,2 a	3,2 a
	P2	7 a	8 a	6,1 a	4,2 a	8 a	14 a	5,2 a	3,7 a

NRP = nódulos en raíz principal planta⁻¹, NRL = nódulos en raíces laterales planta⁻¹, BRP = biomasa nodular en raíz principal, mg nódulo⁻¹ y BRL = biomasa nodular en raíces laterales mg, nódulo⁻¹. Letras distintas en sentido vertical indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos de inoculación (promedio de 3 niveles de fertilización fosfatada: P0 = 0 kg ha⁻¹; P1 = 18,3 kg ha⁻¹; P2 = 36,6 kg ha⁻¹) y de fertilización (promedio de 2 tratamientos de inoculación).

NRP = nodules in the main root plant⁻¹, NRL = nodules in secondary roots plant⁻¹, BRP = mass of nodules from the main root, mg nodule⁻¹ and BRL = mass of nodules from secondary roots, mg nodule⁻¹. In each column, different letters show significant differences ($p < 0,05$) between inoculation treatments (mean of 3 phosphorus fertilization levels: P0 = 0 kg ha⁻¹; P1 = 18.3 kg ha⁻¹; P2 = 36.6 kg ha⁻¹) and between fertilization treatments (mean of 2 inoculation treatments).

La concentración de N en las hojas superiores durante el estadio de R5 varió entre 32,0 y 36,4 g kg⁻¹ (Tabla 5). Si bien las lecturas de intensidad de coloración verde no se correlacionaron con los niveles de concentración de N en las hojas, estas mostraron una mayor intensidad en los tratamientos inoculados que en ausencia de este tratamiento (Tabla 5). Este comportamiento se atribuye en parte al estrecho rango de lecturas de intensidad de color verde y a posibles interferencias de otras deficiencias de nutrientes sobre la normal coloración de las hojas evaluadas. La información disponible fue insuficiente para la detección de diferencias en la concentración foliar de N y en intensidad de coloración verde entre tratamientos de fertilización fosfatada (Tabla 5).

La acumulación de materia seca en R3 no mostró diferencias entre tratamientos de inoculación o de fertilización (Tabla 5). En cambio, independientemente del tratamiento de fertilización fosfatada, en el estadio de R5 la acumulación de materia seca fue un 30% mayor en los tratamientos inoculados que en ausencia de esta práctica. También la biomasa aérea en R5 fue un 15 y un 25% mayor en los tratamientos fertilizados con 18 y con 36 kg ha⁻¹ de P, respectivamente y sólo se asoció positivamente con los niveles de Pd en los cultivos inoculados (Fig. 2).

La información obtenida fue insuficiente para detectar diferencias entre tratamientos de inoculación o de fertilización en el peso individual de los granos (Tabla 5). En cambio, el número de granos fue un 16% mayor al

Tabla 5. Productividad de soja en Vertisoles con antecedentes del cultivo en rotación según tratamientos de inoculación y de fertilización fosfatada.

Table 5. Soybean productivity in Vertisolls with previous soybean crops depending on inoculation and phosphorus fertilization treatments.

Tratamiento	Biomasa aérea total (kg ha ⁻¹)		Intensidad de color verde (unidades SPAD)	N foliar (g kg ⁻¹)	PG (mg grano ⁻¹)	NG (granos m ⁻²)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	
	R3	R5						
Sin inoculante	5.991 a	8.891 a	38,2 a	33,0 a	145 a	2.289 a	3.334 a	
Con inoculante	5.741 a	6.867 b	37,2 b	34,0 a	145 a	2.662 b	3.861 b	
	P0	5.545 a	6.766 a	37,5 a	33,0 a	142 a	2.215 a	3.136 a
	P1	5.819 a	7.829 a	38,0 a	33,0 a	150 a	2.365 b	3.558 b
	P2	6.235 a	9.042 a	37,7 a	34,0 a	144 a	2.846 c	4.098 c

PG: peso individual de granos y NG: número de granos. Letras distintas en sentido vertical indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos de inoculación (promedio de 3 niveles de fertilización fosfatada: P0 = 0 kg ha⁻¹; P1 = 18,3 kg ha⁻¹; P2 = 36,6 kg ha⁻¹) y de fertilización (promedio de 2 tratamientos de inoculación).

PG = single grain weight and NG = number of grains. In each column, different letters show significant differences ($p < 0,05$) between inoculation treatments (mean of 3 phosphorus fertilization levels: P0 = 0 kg ha⁻¹; P1 = 18.3 kg ha⁻¹; P2 = 36.6 kg ha⁻¹) and between fertilization treatments (mean of 2 inoculation treatments).

inocular que en tratamientos sin inoculación y un 30% mayor al fertilizar con 36 kg ha^{-1} de P que sobre el control sin fertilización (Tabla 5). Los rendimientos de soja variaron entre 3.334 y 3.861 kg ha^{-1} con aumentos medios del 15% entre tratamientos de inoculación y de entre el 12 y 30% según la dosis de fertilización aplicada (Tabla 5). En los tratamientos inoculados se observó que con niveles mayores a los $12,8$ y $10,2 \text{ mg kg}^{-1}$ de Pd no se detectarían aumentos en producción de biomasa aérea (Fig. 2) y en rendimientos en grano (Fig. 3), respectivamente.

Las diferencias en rendimientos se asociaron positivamente con la intensidad de color verde de las hojas en R5 [Rendimiento (kg ha^{-1}) = $437,81 \times \text{Unidades SPAD} - 129,43$, $r^2 = 0,22$, $p < 0,10$] y la concentración total de N del cultivo [Rendimiento (kg ha^{-1}) = $10,90 \times \text{N} (\text{kg ha}^{-1}) + 716,96$, $r^2 = 0,93$, $p < 0,001$]. Al aumentar la cantidad de N de las plantas fue mayor la cantidad de granos fijados [Granos $\text{m}^{-2} = 7,05 \times \text{N} (\text{kg ha}^{-1}) + 654,77$, $r^2 = 0,86$, $p < 0,001$]. La mayor producción de granos en tratamientos inoculados coincide con lo descripto por varios autores para suelos Vertisoles en cultivos con antecedentes de soja en rotación y se atribuye a mejoras en la nutrición nitrogenada. Por ejemplo, Arias (2009) sobre 18 sitios experimentales en el este de Entre Ríos determinó aumentos de 426 kg ha^{-1} al aplicar inoculantes en sitios rotados con soja. Estos resultados concuerdan con lo observado en los sitios sin antecedentes de soja en rotación y sugieren que la FBN tendría menor influencia sobre el período de llenado de granos y sobre la tasa de acumulación de materia seca en este período y sí mayores aportes en la definición del número de granos del cultivo (Egli, 1998).

La mayor producción de granos al fertilizar con P, se explica en parte por mejoras sobre el número de granos (18% superior en los tratamientos fertilizados) y en menor medida sobre el peso de los mismos. En los dos sitios estudiados, y sólo en los cultivos inoculados, se describieron relaciones positivas entre los niveles de Pd y los rendimientos (Fig. 3). Estos resultados concuerdan con los descriptos por Fontanetto *et al.* (2004) quienes observaron que la respuesta de soja al agregado de fertilizantes se incrementa en ausencia de limitaciones de N al inocular con *Bradyrhizobium japonicum*. A su vez la respuesta a la inoculación fue creciente en la medida que los cultivos no mostraron limitaciones en P y en ausencia de fertilización no aportó mejoras relevantes en los rendimientos.

CONCLUSIONES

En Vertisoles con niveles de Pe de entre $8,1$ y $13,1 \text{ mg kg}^{-1}$ e independientemente de los antecedentes de producción (duración de las actividades agrícolas, cultivos pre-

vios de soja, etc.) los rendimientos de soja son mayores al inocular las semillas con *Bradyrhizobium japonicum*. Este comportamiento se asocia con mejoras en el estado de nutrición nitrogenada de las plantas logrando una mayor formación de granos y sin efectos significativos sobre su peso individual. Al fertilizar con P la producción de biomasa aérea y los rendimientos se incrementan mayormente en cultivos inoculados con mejoras en la nodulación en sitios de primer año de inoculación.

AGRADECIMIENTOS

Al personal del establecimiento «San Esteban» y en particular a Lorenzo Gancia, José D. y Rodrigo Aranguren, Leonardo Santucho, Fernando Braconi, Pedro, Fermín y Tomás Torroba, Bernardo Llorente, Juan Pina y a las familias Aguilar y Aranguren. A la cátedra de cerealicultura de la Facultad de Agronomía (UBA) y a Merck Crop Bioscience Argentina S.A.

BIBLIOGRAFÍA

- Analytical Software. 2008. Statistix® 9 User's manual. Analytical Software. Tallahassee, FL. USA. 454 pp.
- Arias, N. 2009. Novedades sobre la inoculación de soja en el este de Entre Ríos. EEA INTA Concepción del Uruguay, *Boletín Técnico, Serie Producción Vegetal* 50: 93-96.
- Barbagelata, P; R Melchiori & O Papparotti. 2002. Phosphorus fertilization of soybean in clay soils of Entre Ríos province. *Better Crops Int.* 16: 3-5.
- Boschetti, G; R Valenti; C Vesco & M Sione. 2000. Contenidos de fósforo total en suelos con características vérticas de la provincia de Entre Ríos. *Rev. Fac. Agron. (UBA)*. 20: 53-58.
- Christiansen, I & PH Graham. 2002. Variation in di-nitrogen fixation among Andean bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes grown at low and high levels of phosphorus supply. *Field Crops Res.* 73: 133-142.
- De Battista, JJ; N Arias & A Peticari. 2003. Franjas de inoculación de soja. EEA INTA Concepción del Uruguay. Entre Ríos. *Boletín Técnico Serie Producción Vegetal* 44: 47-50. Argentina.
- Egli, DB. 1998. Seed Biology and the yield of grain crops. CAB international. 178pp.
- Fehr, WR & CE Caviness. 1977. Stages of soybean development. Special report 80. Iowa, EE.UU.
- Fontanetto H; M Díaz-Zorita & H Vivas. 2004. Inoculación y fertilización con fósforo y azufre sobre la nodulación y los rendimientos de soja. p. 143. *En: CE Quintero; NG Boschetti & E L Díaz (eds.)*. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo - II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Paraná, Entre Ríos, Argentina. 22-25 Junio 2004. Argentina. En CD.

- Gan, Y; I Stulen; H Van Keulen & PJC Kuiper. 2002. Physiological changes in soybean (*Glycine max.*) Wuyin9 in response to N and P nutrition. *Ann. Appl. Biol.* 140: 319-329.
- Gan, Y; I Stulen; H Van Keulen & PJC Kuiper. 2003. Effect of N fertilizer top-dressing at various reproductive stages on growth, N₂ fixation and yield of three soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) genotypes. *Field Crops Res* 80: 147-155.
- Israel, DW. 1987. Investigation of the role of phosphorus in symbiotic dinitrogen fixation. *Plant Physiol.* 84: 835-840.
- Maddonni, GA; RA Ruíz; P Vilariño & I García de Salamone. 2004. Fertilización en los cultivos para grano. *En: Satorre, E.; R Benech-Arnold, R.; GA Slafer, EB de la Fuente; DJ Miralles; ME Otegui & R Savín (eds.). Producción de Cultivos de Granos. Bases Funcionales para su Manejo.* Editorial Facultad de Agronomía UBA, Buenos Aires (Argentina), 499-557.
- Miao, SJ; YF Qiao; XZ Han & MD An. 2007. Nodule formation and development in soybeans (*Glycine max* L.) in response to phosphorus supply in solution culture. *Pedosphere* 17: 36-43.
- Panzieri, M; N Marchettini & TG Hallan. 2000. Importance of the *Bradyrhizobium japonicum* symbiosis for the sustainability of a soybean cultivation. *Ecol. Modell.* 135: 301-310.
- Perticari, R; N Arias; H Baigorri; JJ De Battista; L Lett *et al.*, 2003. Inoculación y fijación biológica de nitrógeno en el cultivo de soja. Pp. 69-78. *En: Satorre, EH (ed.). El libro de la soja*, SEMA, Buenos Aires. Argentina.
- Santos, D & R Vicentini. 2003. Fijación Biológica en soja: experiencias con isóneas con y sin capacidad de nodular. *En* http://www.inta.gov.ar/parana/info/documentos/produccion_vegetal/soja/evaluacion_manejo/fijacion.htm. (acceso en Enero, 2008).
- Systat Software Inc. 2002. TableCurve 2D Automated Curve Fitting and Equation Discovery. Systat Software Inc., San Jose, CA, USA. www.systat.com
- Tasi, HA; OF Paparotti & AN Farall. 1993. Carta de suelos de la República Argentina, Departamento de Federal, provincia de Entre Ríos. INTA, 84 pp.
- Tsvetkova, GE & GI Georgiev. 2003. Effect of phosphorus nutrition on the nodulation, nitrogen fixation and nutrient use efficiency of *Bradyrhizobium japonicum*-soybean (*Glycine max* L. Merr.) symbiosis. *Bulg. J. Plant. Physiol. Special Issue:* 331-335.
- Yahiya, M; Samiullah & A Fatma. 1995. Influence of phosphorus on nitrogen fixation in chickpea cultivars. *J. Plant Nutr.* 18: 719-727.