

CONTRIBUCIÓN DE DIFERENTES PRÁCTICAS DE MANEJO A LA OBTENCIÓN DE RENDIMIENTOS POTENCIALES EN SOJA

EFFECTOS SOBRE LA NODULACIÓN, EL RENDIMIENTO Y SU INTERACCIÓN CON PRÁCTICAS DE MANEJO

Proyecto Regional Agrícola. Campaña 2010/11

Ings. Agrs. Gustavo Ferraris y Lucrecia Couretot

Proyecto Regional Agrícola-CRBAN. UCT Agrícola - Área de Desarrollo Rural INTA EEA Pergamino.

Av Frondizi km 4,5 (B2700WAA) Pergamino

nferraris@pergamino.inta.gov.ar

Introducción

El Nitrógeno (N) es el elemento que presenta mayor demanda por parte del cultivo de soja, y la fijación biológica del nitrógeno (FBN) atmosférico el principal medio para abastecerlo, motivo por el cual el proceso debe ser optimizado. Con este fin, en las últimas campañas se han desarrollado inoculantes cuya formulación permite al *Bradyrhizobium* 1. Soportar condiciones de estrés y posibilitar la preinoculación. 2. Aportar mayor número de bacterias fijadoras de N 3. En ocasiones, contribuir con otros géneros y especies de microorganismos con efecto antipatogénico y promotor de crecimiento (PGPM), complementario a la FBN.

Los objetivos de este trabajo fueron 1) Cuantificar los efectos sobre la nodulación y el rendimiento de tratamientos de inoculación en soja con bacterias fijadoras de nitrógeno y microorganismos promotores de crecimiento vegetal (PGPM). 2) Estudiar la interacción con otras prácticas de cultivo como la fertilización fósforo-azufrada (PS) 3) Evaluar el efecto aditivo de tecnologías como la fertilización foliar y el uso de fungicidas en pos de alcanzar los rendimientos potenciales. Hipotetizamos que 1. Existe respuesta en nodulación y rendimiento a la inoculación conjunta de bacterias fijadoras de N y PGPM 2. La fertilización con PS favorece la FBN generando interacciones positivas entre tecnologías. 3. Los rendimientos potenciales se obtienen mediante el “apilado” de tecnologías que sinergizan entre sí de diversas formas.

Palabras clave: Soja, *Bradyrhizobium japonicum*, PGPM, fijación biológica, fertilización foliar, fungicidas, rendimientos máximos.

Materiales y métodos:

El ensayo se implantó en la localidad de Pergamino, sobre un suelo Serie Pergamino, fase ligeramente erosionada, de muy buena productividad. Los tratamientos fueron aplicados en soja de primera. La siembra se realizó el día 26 de noviembre, con la variedad Nidera A 4613 RG, en hileras espaciadas a 0,32 m. El sitio experimental registra una rotación agrícola continua con varios cultivos de soja en la secuencia.

El diseño del ensayo correspondió a bloques completos al azar con cuatro repeticiones y tratamientos dispuestos en arreglo factorial (5 x 2) siendo los factores: **1.** Tratamientos de inoculación, aportando bacterias fijadoras del género *Bradyrhizobium japonicum* junto a microorganismos PGPM, en conjunto con otras tecnologías como fertilización foliar y uso de fungicidas - y **2.** fertilización fósforo azufrada 1. PS 0 kg ha⁻¹ y 2. PS 100 kg ha⁻¹ de una mezcla física de composición (0-17-0-S7). Los microorganismos evaluados fueron *Bradyrhizobium*, *Azospirillum*, *Pseudomonas* y *Bacillus*. Como fertilizante foliar se utilizó una fuente conteniendo macro y microelementos en su formulación. El fungicida fue una mezcla de triazol y estrobilurina. Los tratamientos evaluados se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Tratamientos evaluados en el ensayo. Tecnologías para el cultivo de soja. Pergamino, campaña 2010/11.

Tratamiento	Factor 1: Tratamientos Tecnológicos	Factor 2: Estrategia fertilización
T1 F1	Control	PS 0 (Testigo)
T2 F1	Bacs + Bj + Azp + Psm	PS 0 (Testigo)
T3 F1	Bj + Azp + Psm	PS 0 (Testigo)
T4 F1	T3 + Fertilizante foliar	PS 0 (Testigo)
T5 F1	T3 + Fertilizante foliar + fungicida	PS 0 (Testigo)
T1 F2	Control	PS 100 kg/ha
T2 F2	Bacs subtilis + Bj + Azp + Psm	PS 100 kg/ha
T3 F2	Bj + Azp + Psm	PS 100 kg/ha
T4 F2	T3 + Fertilizante foliar	PS 100 kg/ha
T5 F2	T3 + Fertilizante foliar + fungicida	PS 100 kg/ha

Bacs: *Bacillus subtilis* **Bj:** *Bradyrhizobium japonicum*. **Azp:** *Azospirillum brasilense*. **Psm:** *Pseudomonas fluorescens*

Al momento de la siembra se tomaron muestras de suelo, y sobre las mismas se realizó un análisis químico, cuyos resultados se detallan en la Tabla 2:

Tabla 2: Análisis de suelo al momento de la siembra, promedio de tres repeticiones.

Prof	pH		Materia Orgánica	N total	Fósforo disponible	N-Nitratos (0-20) cm	N-Nitratos suelo 0-60 cm	S-Sulfatos suelo 0-20 cm
	agua 1:2,5		%		mg kg ⁻¹	ppm	kg ha ⁻¹	ppm
0-20	5,5		3,7	0,185	19,7	22,6	86,9	7,7
	Magnesio	Potasio	Calcio	Zinc	Manganeso	Cobre	Hierro	Boro
	ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm	ppm	ppm	ppm
0-20	203	609	1706	0,79	60,2	1,35	86,4	1,51
20-40								0,92

Se recontaron plantas, y en el estado V3 se realizó una evaluación de infectividad, considerando infectivas aquellas plantas con más de tres nódulos activos y morfológicamente normales. En R4 se cuantificó el número de nódulos efectivos (Nº) y el peso seco (PS) de los nódulos en raíz principal (RP) y secundaria (RS), sobre cinco plantas de cada parcela. Posteriormente, se pesaron sus raíces y se determinó la nodulación específica (PSE), como peso seco de nódulo por unidad de peso de raíz. En el mismo estado, se realizó una estimación indirecta del contenido de N por medio del medidor de clorofila Minolta Spad 502, la cobertura mediante procesamiento con software específico de imágenes digitales, y el vigor a través de un índice cuantitativo de calidad del cultivo. La recolección se realizó con una cosechadora experimental automotriz. Sobre una muestra de grano se determinaron los componentes numéricos del rendimiento, número (NG) y peso (PG) de los granos.

Resultados y discusión

a) Ambiente climático en el sitio experimental

En la Figura 1 se presentan las precipitaciones determinadas en el sitio experimental y la evapotranspiración del cultivo, así como el balance hídrico decádico. El ambiente climático sobre el que se desarrolló el experimento fue favorable, con un déficit hídrico moderado pero relativamente breve y excelentes condiciones de insolación y temperatura durante el llenado de los granos (Figura 1).

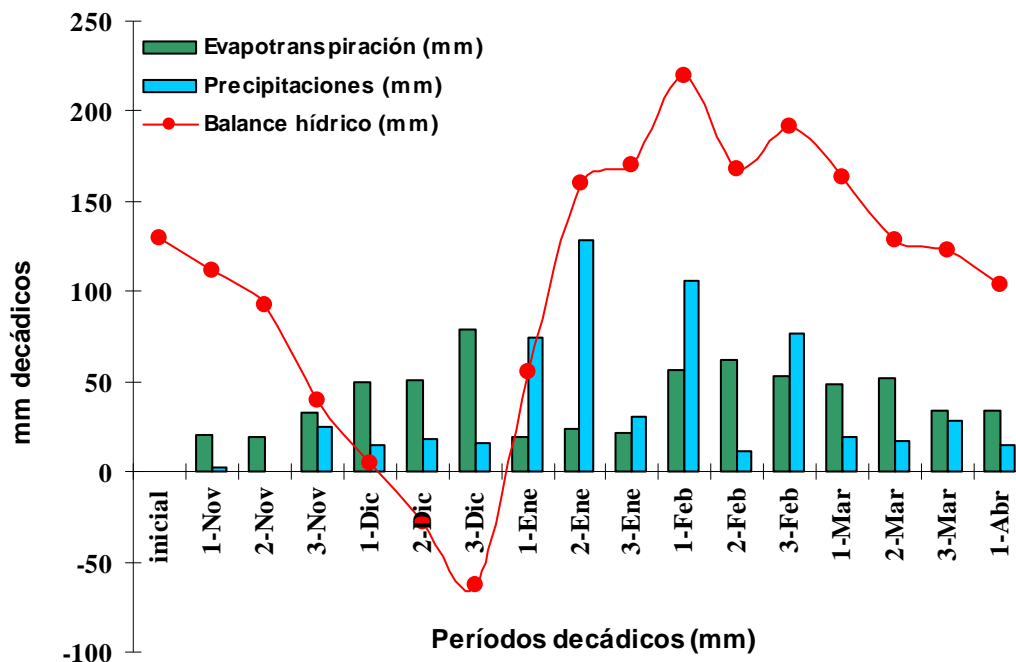


Figura 1: Precipitaciones, evapotranspiración y balance hídrico decádicos considerando 2 m de profundidad. Pergamino, Bs As, campaña 2010/11. Precipitaciones totales 581,6 mm. Déficit acumulado 91 mm.

b) Resultados de los experimentos y discusión.

En variables relacionadas con la nodulación, se reflejó una tendencia a favor de los tratamientos fertilizados con PS, con especial énfasis en aquellos que reúnen suma de tecnologías (inoculación con PGPR, fertilización foliar y fungicidas), probablemente a causa del sostenimiento de altas tasas de fotosíntesis a lo largo del tiempo (Tabla 3).

Tabla 3: Infektividad en V3, Número de nódulos (Nº) por planta en raíz principal (RP) y raíz secundaria (RS), plantas con nodulación concentrada mayormente en raíz principal (%), peso seco (PS) de nódulos en RP, PS de raíces y nodulación específica (PSE) (mg nódulo / g raíz) de los tratamientos evaluados en el ensayo. Para cada variable, en una misma dosis de fertilizante, se destacan en negrita los dos mejores tratamientos. Potencialidad de rendimiento en Soja. Pergamino, campaña 2010/11.

Trat	Fertilización	Infektividad V3	Nº RP	Nº RS	Plantas con Nod > RP (%)	PS (g/m2)	PS x raíz (g)	mg nódulo / g de raíz
T1	PS 0	100	4,2	15,5	0	14,4	92,8	0,15
T2		100	2,6	5,4	20	8,8	90,4	0,10
T3		100	3,9	12,0	0	11,2	86,4	0,13
T4		100	9,5	6,7	20	16,0	70,4	0,23
T5		100	5,4	7,9	20	9,6	61,6	0,16
T1	PS 100 kg	100	7,5	7,5	0	16,8	49,6	0,34
T2		100	6,0	16,5	0	21,6	81,6	0,26
T3		100	7,0	14,0	0	14,4	74,4	0,19
T4		100	11,5	17,5	0	16,0	57,6	0,28
T5		100	8,5	9,5	20	17,6	75,2	0,23

Parámetros morfo-fisiológicos y relacionados con la nutrición mostraron un comportamiento ambivalente: aquellos relacionados con el crecimiento como el vigor de planta fueron mejorados por inoculación, mientras que índices nutricionales como la intensidad de verde por Spad alcanzaron su máximo cuando a la inoculación se sumó el uso de fertilizante foliar y/o fungicida. (Tabla 4).

Tabla 4: Número de plantas emergidas, Cobertura, Índice verde (Unidades Spad), vuelco, vigor, rendimiento de grano, componentes y respuesta sobre el testigo. Para cada variable, en una misma dosis de fertilizante, se destacan en negrita los dos mejores tratamientos. Potencialidad de rendimiento en Soja. Pergamino, campaña 2010/11.

Trat	Fertilización	Densidad (pl/m ²)	Cobertura R3	MOR R6	Spad R4	Vuelco	Vigor	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	NG	PG	Respuesta Tn-T1 (kg ha ⁻¹)
T1	PS 0	46	> 95%	5	45,4	2	4,1	4828	2980	162,0	
T2		39	> 95%	4/5	46,4	2	4,4	4828	2965	162,8	0
T3		47	> 95%	5	46,1	2	4,3	4661	2748	169,6	-167
T4		41	> 95%	4/5	49,1	2	4,3	4831	2855	169,2	3
T5		49	> 95%	3	46,7	2	4,3	5533	3366	164,4	705
T1	PS 100 kg	48	> 95%	5	44,7	2,7	3,9	4821	2911	165,6	
T2		38	> 95%	3/4	46,2	2,5	4,2	5175	3095	167,2	354
T3		46	> 95%	3/4	46,0	2,5	4,1	5813	3295	176,4	992
T4		49	> 95%	3	47,2	2,6	4,0	6007	3485	172,4	1186
T5		60	> 95%	2/3	47,2	2,4	4,4	5806	3344	173,6	985
Tratamientos de inoculación (P=)								0,71			
Fertilización PS (P=)								0,04			
Interacción Pre-inoculación * Fertilización PS (P=)								0,46			
CV (%)								11,1			

R3 (inicio de formación de vainas), R4 (vaina de máximo tamaño) y R6 (granos de máximo tamaño) de acuerdo a la escala de Fehr y Caviness, 1974.

Índice de Vigor: Según escala 1: mínimo – 5: máximo.

Vuelco: Según escala 1: todas las plantas erectas – 5: todas las plantas volcadas.

Mancha Ojo de Rana (Cercospora sojina). Escala de Severidad 1(menor)-6 (máxima)

Los rendimientos del ensayo fueron muy elevados, siendo la media de 5230 kg ha⁻¹, y el rango de rendimientos observados de entre 4661 y 6007 kg ha⁻¹ (Tabla 4).

Las diferencias por inoculación con relación al testigo, fueron de 177 kg ha⁻¹ en T3 (Bs+Bj+Azp+Psm), llegando a 412 kg ha⁻¹ en T2 (Bj+Azp+Psm) (Tabla 4 y Figura 2). Las diferencias fueron consistentes cuando la inoculación se realizó con fertilización fosforada de base, permitiendo obtener respuestas sobre el testigo no inoculado de 992 y 354 kg ha⁻¹, para T3 y T2, respectivamente. No obstante, la interacción entre tratamientos tecnológicos (inoculación y otros) no presentó interacción estadística con la fertilización fósforo-azufrada (Tabla 4).

La fertilización fósforo-azufrada aportó un incremento de rendimiento adicional de 588 kg ha⁻¹, siendo estas diferencias estadísticamente significativas (P=0,04) (Figura 3).

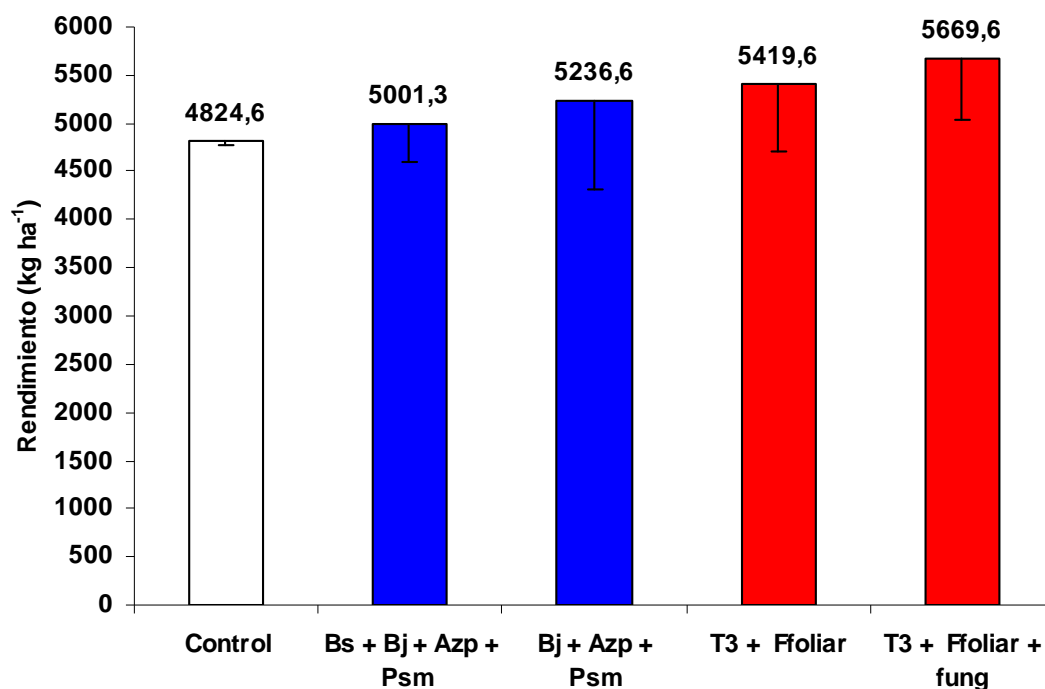


Figura 2: Rendimiento de grano de soja como resultado de la aplicación de tecnologías de inoculación combinada con fertilización foliar y uso de fungicidas, promedio de dos niveles de fertilización fósforo-azufrada inicial. Las líneas de error representan la desviación standard de la media. Bacs: *Bacillus subtilis*, Bj: *Bradyrhizobium japonicum*. Azp: *Azospirillum brasilense*. Psm: *Pseudomonas fluorescens*. Pergamino, campaña 2010/11.

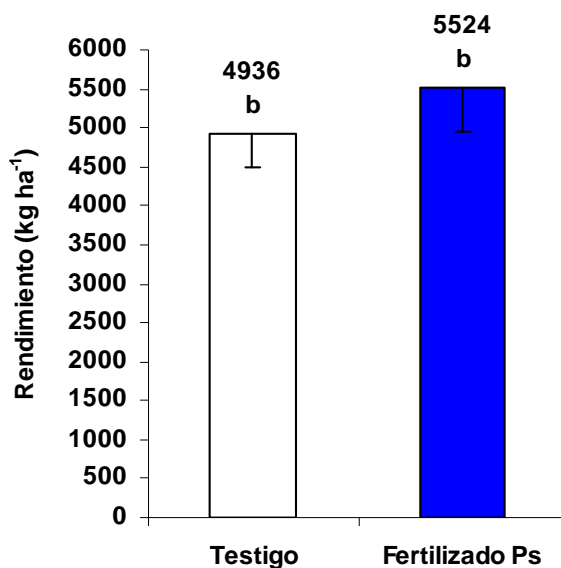


Figura 3: Rendimiento de grano de soja según nivel de fertilización fósforo-azufrada inicial, promedio de todos los tratamientos de inoculación ensayados. Letras distintas sobre las columnas señalan diferencias significativas entre tratamientos. Las líneas de error representan la desviación standard de la media. Pergamino, campaña 2010/11.

El principal componente de rendimiento afectado por los tratamientos fue NG, explicando el 93 % de las variaciones en los rendimientos ($R^2=0,93$). El peso de los granos fue menos afectado, aunque explicó una porción del rendimiento, especialmente a partir del efecto positivo de los tratamientos foliares con fertilizantes y fungicidas ($R^2=0,44$).

Un análisis global de los resultados de 4 años de experimentos permite señalar a los tratamientos biológicos como un factor relevante en pos de alcanzar los rendimientos potenciales en soja. Para los tratamientos convencionales con Bj la contribución alcanzó una media del 4,05%, logrando un aumento adicional de 3,93 % cuando se le sumaron microorganismos con efecto PGPM como Azp y Psm (Tabla 5).

La contribución de los tratamientos biológicos es máxima en ciclos húmedos y ambientes de alto rendimiento, siendo atenuada bajo condiciones de estrés que afecten la demanda de N por parte de la planta y reduzcan la supervivencia de los microorganismos. Por el contrario, los tratamientos de fertilización foliar serían una interesante herramienta para mitigar procesos de estrés, durante los cuales la absorción de nutrientes desde el suelo se encuentra comprometida. Asimismo, parece lógico sugerir que la respuesta a fungicidas se acrecienta en campañas húmedas y de buena productividad, en las cuales un período de llenado potencialmente prolongado torna de singular importancia el sostenimiento de área foliar como tejido fotosintéticamente activo (Figura 5).

Tabla 5: Contribución de diferentes tecnologías a la obtención de rendimientos máximos en soja, a través de diferentes años bajo condiciones ambientales contrastantes. Pergamino, campañas 2006/07 a 2010/11.

Tecnología	Incremento 2007/08 Año normal	Incremento 2008/09 Año seco	Incremento 2009/10 Año húmedo	Incremento 2010/11 Año normal	
Inoculación	0,6 %	4,0 %	8,0 %	3,6 %	Alta Productividad y ciclos húmedos
Uso PGPR	8,3 %	0,6 %	2,1 %	4,7 %	Productividad Impacto moderado
Fungicida foliar	12,9 %	-4,0 %	5,1 %	6,8 %	Productividad y ciclos húmedos
Fertilización foliar	8,6 %	11,1 %	4,9 %	3,5 %	Tolerancia a estrés?
Fertilización PS	8,4 %	8,4 %	5,8 %	12,5 %	Estabilidad de respuesta a través de los años.

Consideraciones finales

Este trabajo explora la contribución de diferentes tecnologías de insumos a la obtención de rendimientos elevados en soja. Su abordaje resulta relevante para posicionar diferentes tecnologías en ambientes productivos que estén en condiciones de responder positivamente a ellas.

De los resultados de cuatro años de experimentación, surge que algunas tecnologías como la inoculación con diferentes microorganismos -Bradyrhizobium y PGPM- y el uso de fungicidas foliares brindan una mayor contribución en ambientes y años con elevado potencial de rendimiento. Por el contrario, la fertilización foliar se posiciona como una práctica particularmente apropiada para cultivos creciendo en condiciones adversas. Finalmente, la fertilización de base, a partir del efecto del fósforo promoviendo el crecimiento de las vegetales, es un factor de estabilización y crecimiento del rendimiento, contribuyendo a elevar el piso productivo independientemente de la calidad del ambiente donde se esté cultivando.