

Soja de alto rendimiento: Ganancia genética y limitación por nitrógeno

O. Ortez^{1*}, F. Salvagiotti², J. Enrico² e I. Ciampitti¹

- *La mejora genética del rendimiento de soja desde la década de 1980 hasta la del 2010 representó 30% promediando en sitios ubicados en los Estados Unidos y Argentina. Para todas las pocas de liberación, la fertilización ad-libitum con N generó hasta un 20% de aumento en rendimientos en EE.UU., y un 5% en Argentina.*
- *Los resultados sugieren que soja de alta producción estaría limitada por N para expresar altos rendimientos y contenidos de proteínas, aunque quedan incógnitas acerca de la forma en que este N deba ser provisto.*
- *Cabe aclarar que el objetivo del ensayo no es recomendar aplicaciones de fertilizante nitrogenado en soja, pero entender mejor si el N es un factor limitante en el cultivo.*

Introducción

Los Estados Unidos (EE.UU.) y Argentina representan más del 50% de la producción mundial de soja (USDA, 2016). Dentro de los EE.UU., más del 85% del área cultivada con soja se encuentra en el “Cinturón Maicero”, donde más del 60% está implantada dentro de una rotación maíz-soja. En Argentina, la soja se siembra principalmente en la región pampeana y el gran chaco, bajo condiciones de secano, mayormente como monocultivo, y en menor proporción en rotación con trigo y/o maíz.

El potencial de rendimiento de soja está genéticamente determinado. Este potencial (Y_p) puede alcanzarse en condiciones “ideales” (genotipo \times ambiente \times prácticas de manejo, $G \times A \times M$), asumiendo la ausencia de limitaciones en la oferta de agua y nutrientes y de factores limitantes de rendimiento (por ej., insectos, enfermedades, malezas, granizo, etc.). Las diferencias entre Y_p y el rendimiento realmente alcanzado (Y_A) por el productor se definen principalmente por las prácticas de manejo de cultivos (por ej., fecha de siembra, aplicación de nutrientes, espaciamiento entre hileras, aplicación de fungicidas, entre otros) y las interacciones de éstas con el ambiente (suelo y clima). En este sentido, el logro de rendimientos más cercanos a los máximos de soja depende en gran medida de una nutrición balanceada y, en ausencia de déficit hídrico, el nitrógeno (N) limitaría los rendimientos de soja y la calidad de semilla, especialmente en ambientes de alto rendimiento (Ciampitti et al., 2016).

Las principales fuentes de N para el cultivo de soja son la fijación biológica y el suelo (mineral o fertilizante). La fijación biológica de N (FBN) convierte el N atmosférico (N_2) en amoníaco (NH_3), y luego en componentes orgánicos nitrogenados (Wright & Lenssen, 2013). Sin embargo, se ha documentado que el proceso de FBN no puede suministrar las necesidades totales del cultivo de soja. En general, solo el 50-60% del N necesario en soja

es usualmente suministrado por el proceso de fijación (Salvagiotti et al., 2008). En tal sentido, la habilidad del proceso de FBN para suministrar N a niveles variables (medios a altos) de rendimiento es un conocimiento científico aún sin dilucidar y es por eso que la adición de N en el sistema productivo de soja podría tener un impacto positivo incrementando así el máximo rendimiento alcanzable del cultivo a como también los niveles proteicos en grano.

El mejoramiento genético en soja ha logrado incrementos en los últimos 50 años, sin embargo, siempre se ha logrado a expensas de la disponibilidad de N provista por el suelo y la fijación biológica (FBN). En caso de existir una limitación por N, la interacción entre genotipos y limitación por N en soja aún no es conocida. Considerando genotipos de grupo de madurez (GM) II y III liberados entre las décadas de 1920's y 2000's, Rowntree et al. (2013) registraron una ganancia genética anual en soja en EE.UU. de aproximadamente 25 kg ha^{-1} para las siembras del mes de mayo. En los mismos resultados se reportó que el incremento en rendimientos de soja afectó negativamente los niveles de concentración de proteína en semilla ($0.191 \text{ g kg}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para GM II y $0.242 \text{ g kg}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para GM III). En distintos estudios realizados en la década del 2000 se observó un incremento anual en rendimiento de 31 kg ha^{-1} en EE.UU. (Specht et al., 1999) y 28 kg ha^{-1} a nivel global (Wilcox, 2004) entre 1970 y 2000's. Otros estudios han demostrado la estrecha relación lineal que existe entre N y rendimiento en soja (Salvagiotti et al., 2008; Tamagno et al., 2017). Por lo tanto, resulta válido hipotetizar si cultivos de soja de alto nivel de rendimiento logrados a través del proceso de mejora en las últimas décadas requerirán una mayor disponibilidad de N, que no pueda ser provista por la FBN y el suelo, que también mantenga o incremente el contenido de proteína del grano.

¹ KSUCrops, Equipo de Producción de Cultivos, Universidad Estatal de Kansas, Manhattan, Kansas, EE.UU.

² EEA INTA Oliveros, Santa Fe, Argentina

* Autor de contacto. Correo electrónico: oaortez@ksu.edu

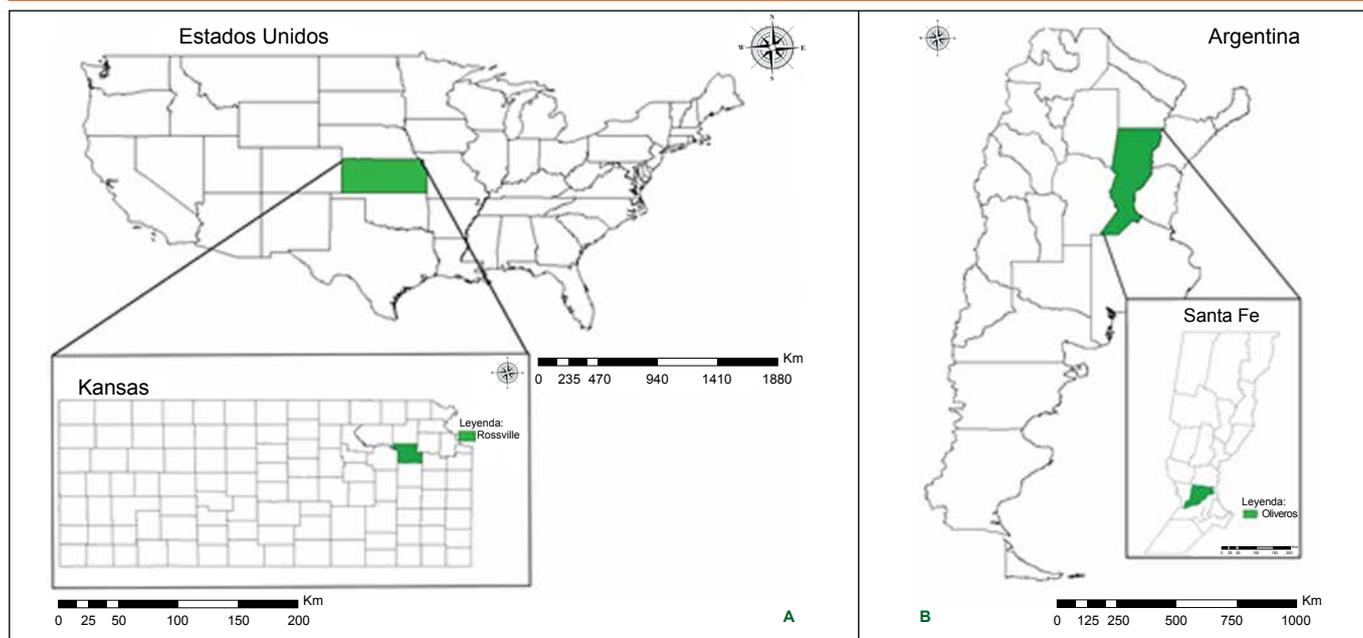


Figura 1. Ubicación geográfica de los 2 ensayos experimentales de soja realizados en el ciclo productivo 2016: Rossville (Kansas, EE.UU.) (A) y Oliveros (Santa Fe, Argentina) (B).

Objetivos

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) evaluar el rendimiento y extracción de N en grano en genotipos de soja liberados entre las décadas de 1980 y 2010; y 2) estudiar la contribución de fertilización nitrogenada bajo distintos escenarios (i) soja sembrada en condiciones normales de producción –sin aplicación de N, solo inoculadas–, (ii) soja con todo el requerimiento de N ofrecido mediante fertilización, y (iii) soja inoculada con un pequeño aporte de N en el estadio reproductivo del cultivo.

Materiales y métodos

Sitios

El proyecto se llevó a cabo en dos localidades durante el ciclo productivo 2016: Rossville (Kansas, EE.UU.) (Figura 1, A); y Oliveros (Santa Fe, Argentina) (Figura 1, B).

Diseño experimental y análisis estadístico

Los ensayos se condujeron en parcelas experimentales de 3 m de ancho por 9 m de largo en Rossville y una densidad de siembra de 254 000 semillas por ha. En Oliveros, el tamaño de las parcelas fue de 2.6 m de ancho por 7 m de largo y la densidad de siembra fue de 360 000 semillas por ha. En ambas localidades el experimento tuvo 4 repeticiones. En Rossville, el diseño experimental fue parcelas divididas, donde la parcela principal fue la aplicación de fertilización con N y como sub parcela el genotipo; en Oliveros, la parcela principal fue el genotipo y la sub parcela fue la aplicación de N. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) en cada localidad y para cada una de las variables presentadas. Se utilizó la prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS, Fisher's) para separar las medias en aquellos efectos que fueron significativos con un alfa inferior a 0.05. Todo el análisis

estadístico se condujo con el programa estadístico R (R Software, 2017).

Caracterización de sitios

Previo a la siembra, se colectaron muestras de suelo a 15 y 60 cm de profundidad en Rossville. Los análisis realizados en las muestras con profundidad de 0-15 cm fueron: pH; P Mehlich-3 / P Bray-1; capacidad de intercambio catiónico (CIC); materia orgánica (MO); y disponibilidad de calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K). Sobre las muestras tomadas a 60 cm de profundidad se analizó el nivel de N-nitrato ($N-NO_3$). En Oliveros, todas las muestras se colectaron a 20 cm de profundidad, y los análisis realizados fueron pH; P Bray-1, MO y $N-NO_3$ (Tabla 1).

Tabla 1. Caracterización de suelos previo a la siembra de soja en las localidades bajo estudio en la campaña 2016 en Rossville, EE.UU. y Oliveros, Argentina.

Variable de suelo	Localidad	
	Rossville	Oliveros
pH	6.9	5.5
P Mehlich-3 / P Bray-1 (ppm)	21.0	12.0
CIC (meq/100g)	11.0	-
MO (%)	2.2	2.1
K (ppm)	153	-
Ca (ppm)	2074	-
Mg (ppm)	202	-
$N-NO_3$ (ppm)	3.0	6.3



Figura 2. Parcelas experimentales en Rossville, EE.UU. y Oliveros, Argentina. Izquierda: aplicación de N líquido UAN (32-0-0) en Rossville después de siembra. Derecha: vista de parcelas con distintos genotipos y progreso al estadio R7-R8 en Oliveros.

Tratamientos

Los tratamientos realizados fueron una combinación de tres estrategias de aporte de N al cultivo combinadas con genotipos de soja de diferente época de liberación. Las estrategias de aporte de N fueron:

- **Estrategia 1 (E1):** manejo tradicional (control) sin aplicación de N, solo inoculación;
- **Estrategia 2 (E2):** todo el N requerido por la planta fue aplicado como fertilizante (491 kg N ha^{-1}). Esta dosis de N fue distribuida equitativamente en tres momentos del cultivo: siembra, floración (R1), y alrededor de formación de vainas (R3-R4);
- **Estrategia 3 (E3):** aplicación tardía de 45 kg N ha^{-1} aplicado en el estadio reproductivo R3 en Rossville, EE. UU. y en R4 para Oliveros, Argentina.

Las aplicaciones se realizaron al suelo (evitando el daño potencial de altas dosis de N sobre el cultivo) con fuente líquida de urea-nitrato de amonio (UAN, 32-0-0).

Los genotipos evaluados fueron un total de 21, 13 en EE.UU. y 8 en Argentina. El tiempo de liberación de los genotipos utilizados varió entre las décadas de 1980's al 2010's (**Tabla 2**). Los grupos de madurez estuvieron en el rango de III y IV para las dos localidades. Previo a la siembra, todas las semillas fueron inoculadas con dosis comercial recomendada.

Variables evaluadas

Se estimaron los rendimientos ajustados a contenido de humedad en grano del 13.5% a través de la cosecha de las dos hileras centrales en cada parcela. En madurez fisiológica se determinó materia seca total y en grano. Estas muestras fueron utilizadas para analizar el contenido de proteína (%) por medio de espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR).

El contenido de N en grano a cosecha fue calculado por medio de la multiplicación de la cantidad de biomasa seca de grano (kg ha^{-1}) y su concentración de N (%) siguiendo (**Ecuación 1**).

Tabla 2. Nombre de las variedades y década de liberación comercial de los materiales utilizados en los sitios experimentales, EE.UU. y Argentina.

Sitio	Década de liberación	Variedad
Rossville, EE.UU.	1980's	P3981, Williams 82, 9391
	1990's	9392, P93B82
	2000's	93Y92, 93B67, 93M90
	2010's	P34T43R2, P35T58R, P39T67R, 94Y23, P31T11R
Oliveros, Argentina	1980's	A4422, Williams
	1990's	A3910, DM49
	2000's	DM3700, DM4800
	2010's	NS4955, SRM3988

$$\text{Contenido de N en grano (kg ha}^{-1}\text{)} = \text{Biomasa (kg ha}^{-1}\text{)} \times \text{Concentración de N (\%)} \quad \text{(Ec. 1)}$$

El requerimiento de N en grano por cada tonelada de grano producida se calculó multiplicando la concentración de N en grano (%) por 10 (**Ecuación 2**).

$$\text{Requerimiento de N en grano (kg ton}^{-1}\text{)} = \text{Concentración de N (\%)} \times 10 \quad \text{(Ec. 2)}$$

Resultados

Condiciones meteorológicas durante los experimentos

Precipitación, temperaturas máximas y mínimas, y los valores de radiación solar se documentaron a lo largo del ciclo del cultivo en ambas localidades. En Rossville, se observaron temperaturas máximas de $32 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y mínimas de $7 \text{ }^{\circ}\text{C}$. La precipitación acumulada en esta localidad fue de 812 mm durante la campaña. En Oliveros, las temperaturas máximas fueron de $32 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y las mínimas de $17 \text{ }^{\circ}\text{C}$. La precipitación acumulada totalizó 686 mm. Los índices de radiación solar fueron similares en los dos sitios con alrededor de 80 000 Langley acumulados (Ly) durante el ciclo.

Ganancia en rendimiento y contenido de N en grano según década de liberación

Los factores evaluados en este estudio no mostraron una interacción estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$) para ninguna de las variables evaluadas, por lo que los resultados estarán descritos en función de los factores principales (fertilización nitrogenada y genotipos).

En Rossville, el rendimiento en grano varió entre 2200 y 5100 kg ha^{-1} , mientras que en Oliveros estuvo entre 2700 y 4700 kg ha^{-1} (Figura 3, A-B). En ambos sitios, los genotipos modernos liberados en la década 2010's registraron los niveles más altos de producción, respecto a aquellos liberados en décadas anteriores (1980's, 1990's y 2000's). Al contrastar el rendimiento promedio de las tres estrategias de fertilización de los cultivares liberados en la década del 2010's respecto del promedio del resto

de las variedades evaluadas se registró un incremento del 33% en Rossville y del 28% en Oliveros.

Respecto al N exportado en grano, los resultados oscilaron entre 125 y 270 kg N ha^{-1} en Rossville y 145 a 235 kg N ha^{-1} en Oliveros (Figura 3, C-D). La tendencia fue semejante a la de rendimientos y pese a que los niveles proteicos no fueron los mismos, las mayores cantidades de N fueron removidas en los materiales modernos (2010's). Se observó un incremento del 25% (Rossville) y 24% (Oliveros) en la exportación de N en los sistemas productivos aquí evaluados, al comparar medias generales de la década 2010's con el resto y como promedio general de los tres tratamientos de fertilización.

Valores de concentración en grano (base seca) para las dos localidades y promedio para los genotipos agrupados según décadas de liberación y como promedio general

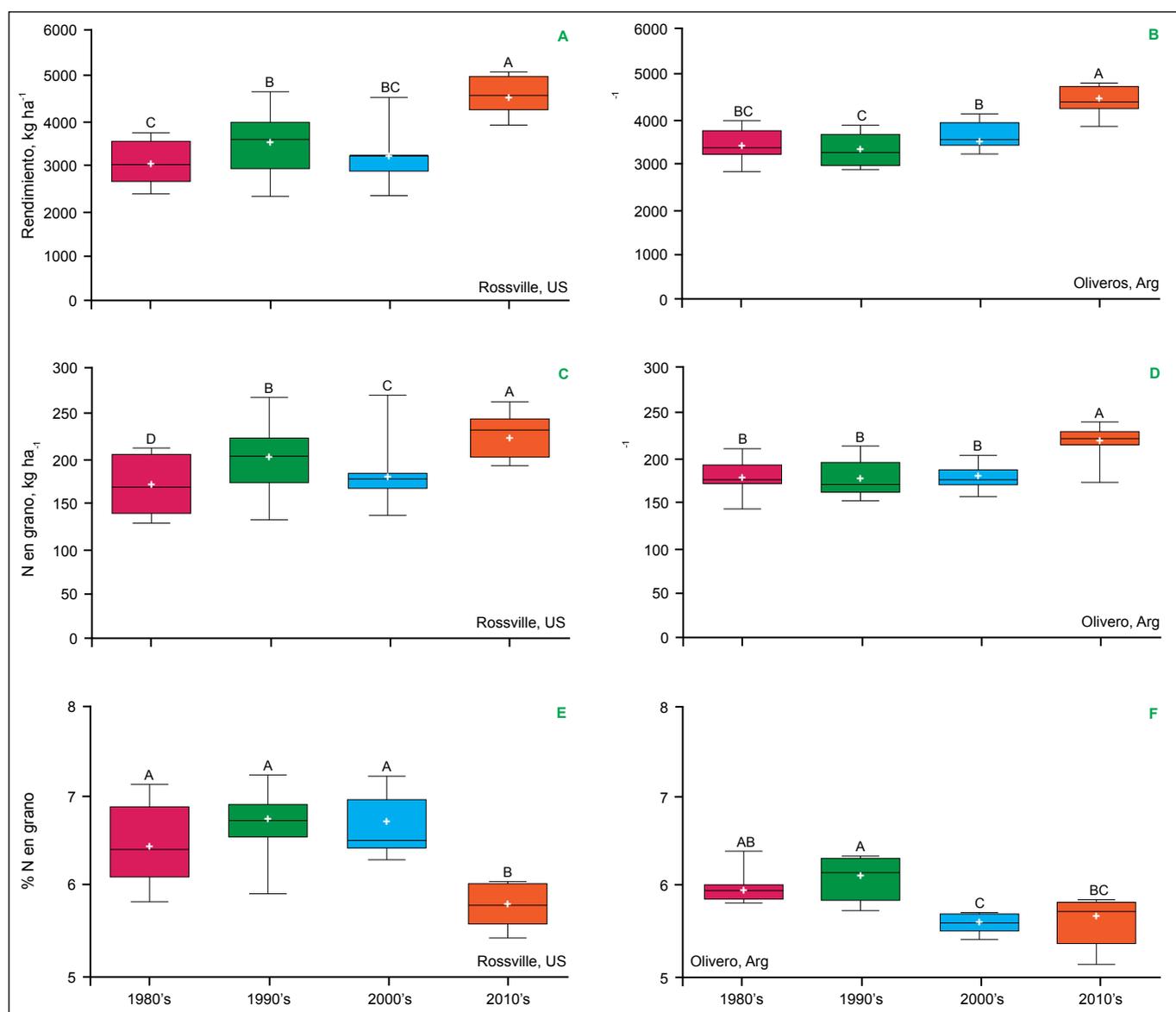


Figura 3. Rendimiento para el cultivo de soja expresado en kg ha^{-1} al 13.5% de contenido de humedad (A-B), N exportado en grano en kg ha^{-1} en base seca (C-D) y concentración de N en grano expresado en porcentaje con base seca (E-F). Letras distintas indican diferencias significativas entre décadas ($P \leq 0.05$). Cada barra incluye las observaciones máximas y mínimas, cuarto inferior (percentil 25), cuarto superior (percentil 75), la mediana (percentil 50) y, finalmente, la media denotada con el símbolo "+" para 21 genotipos agrupados según década de liberación (1980's, 1990's, 2000's y 2010's) y como promedio general de las tres estrategias de fertilización en Rossville (EE.UU.) y Oliveros (Argentina) durante la campaña 2016.

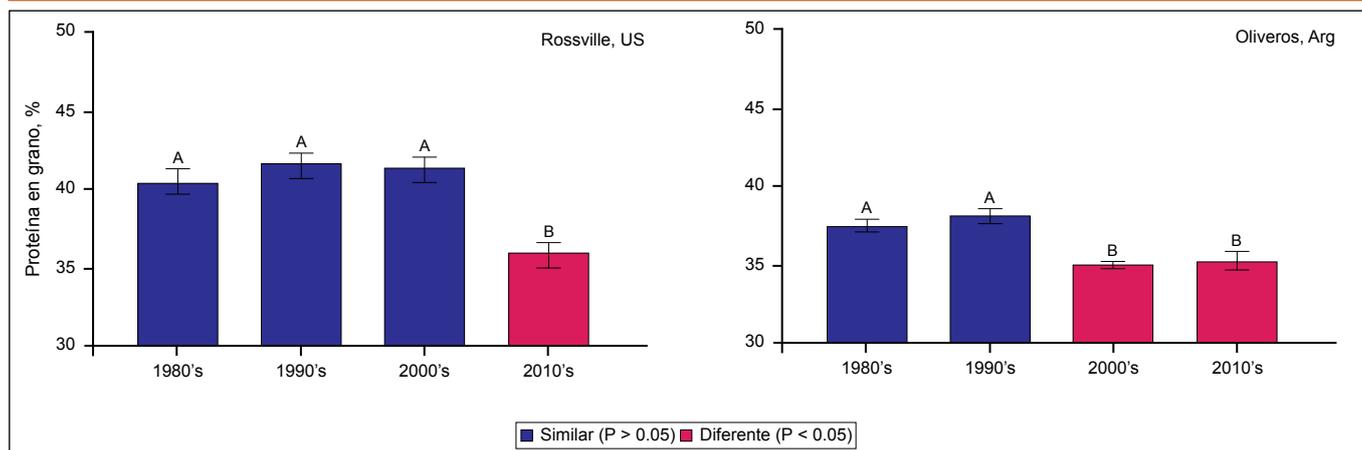


Figura 4. Contenido de proteína en grano de soja (%) en base seca para 21 genotipos agrupados en 4 décadas de liberación y como promedios generales de las tres estrategias de fertilización evaluados en Rossville (EE.UU.) y Oliveros (Argentina), campaña 2016. Letras distintas indican diferencias significativas entre décadas ($P \leq 0.05$).

de las tres estrategias de fertilización son presentados en la **Figura 3, E-F**. En Rossville, las concentraciones de N en grano oscilaron entre 5.5 y 7.2%. Concentraciones más altas de N se observaron con los genotipos de las décadas 1980's, 1990's y 2000's; y los niveles más bajos se observaron con genotipos de la última década de liberación (2010's). Para Oliveros, las concentraciones de N en grano fueron inferiores a las de Rossville y oscilaron entre 5.1 y 6.4%. Concentraciones más altas de N en grano en esta localidad fueron observadas con los genotipos de las décadas 1980's y 1990's. Los niveles más bajos se encontraron con los genotipos de las últimas décadas de liberación (2000 y 2010). Siendo N el factor principal determinante en la definición de los niveles de proteína en grano, los resultados en concentraciones de N aquí mostrados indican que altos niveles de rendimientos están asociados a los niveles más bajos de contenido proteico. Sin embargo, estos resultados serán evaluados con mayor precisión más adelante en este artículo.

El requerimiento de N en grano por cada tonelada de grano producido fue estimado en las dos localidades (**Ec. 2**). En Rossville, este requerimiento y con los genotipos de 1980's fue de 65 kg N/t, mientras que con los genotipos del 2010's el requerimiento se redujo a 58 kg. En Oliveros, el requerimiento para genotipos de la década 1980's fue de 60 kg N/t y para los genotipos del 2010's fue 56 kg N/t.

Niveles proteicos según las décadas de liberación

La concentración de proteína en grano varió entre 36 y 42% en Rossville, y entre 35 y 38% en Oliveros (**Figura 4**). Esta variable se redujo en la medida que aumentó la ganancia en rendimientos a través de las décadas, registrando los niveles proteicos más bajos con los genotipos de las décadas modernas 2000's y 2010's.

En Rossville, se registró una disminución del 5.8% de proteína en términos absolutos, que a su vez representó aproximadamente un 15% en términos relativos cuando se comparó genotipos de la década del 2010's respecto de las décadas previas. En Oliveros, se realizó una

comparación similar y resultó en una disminución del 2.4% de proteína en valores absolutos y aproximadamente un 7% en valores relativos al comparar genotipos liberados en las décadas 2000's y 2010's respecto de los liberados en las décadas 1980's y 1990's.

Ganancia en rendimiento y contenido de N en grano según disponibilidad de N

En términos generales, promediando los genotipos de distinta década de liberación, la mayor disponibilidad de N en el ciclo a través de la adición secuencial de 491 kg N por ha registró un impacto positivo en los rendimientos tanto en Rossville como en Oliveros ($P \leq 0.05$) (**Figura 5**). En Rossville, la E2 (491 kg N por ha) incrementó el rendimiento en un 20% respecto de E1 (sin fertilización N, control). El orden descendente de los resultados en Rossville se registró de la siguiente forma E2 >> E3 >> E1, siendo E1 la estrategia que produjo los niveles más bajos de productividad en el cultivo de soja. En Oliveros, la respuesta en rendimientos con la estrategia E2 fue del 5% al compararla con la E1 (sin fertilización N, control) y E3 (N 45 tardío). En esta misma localidad, E1 y E3 no presentaron diferencias significativas entre sí. En términos relativos, la respuesta de rendimiento a la fertilización nitrogenada fue consistente a través de los distintos genotipos, indicando la probable limitación de N para abastecer la demanda de este nutriente para el cultivo en niveles de media ($> 3 \text{ Mg ha}^{-1}$) a alta productividad ($> 4.5 \text{ Mg ha}^{-1}$).

Niveles proteicos según condiciones extremas de N

Al comparar condiciones contrastantes de N (491 kg ha^{-1} versus el control) se observó un 1.3% (absoluto) de aumento ($P \leq 0.05$) de la proteína en grano en Rossville (**Figura 6**). Este efecto no fue significativo en Oliveros. Este resultado sugiere que el N no solo puede llegar a representar una limitante para la formación del rendimiento sino también contribuir a mejorar el contenido proteico, que consecuentemente afecta la calidad del grano.

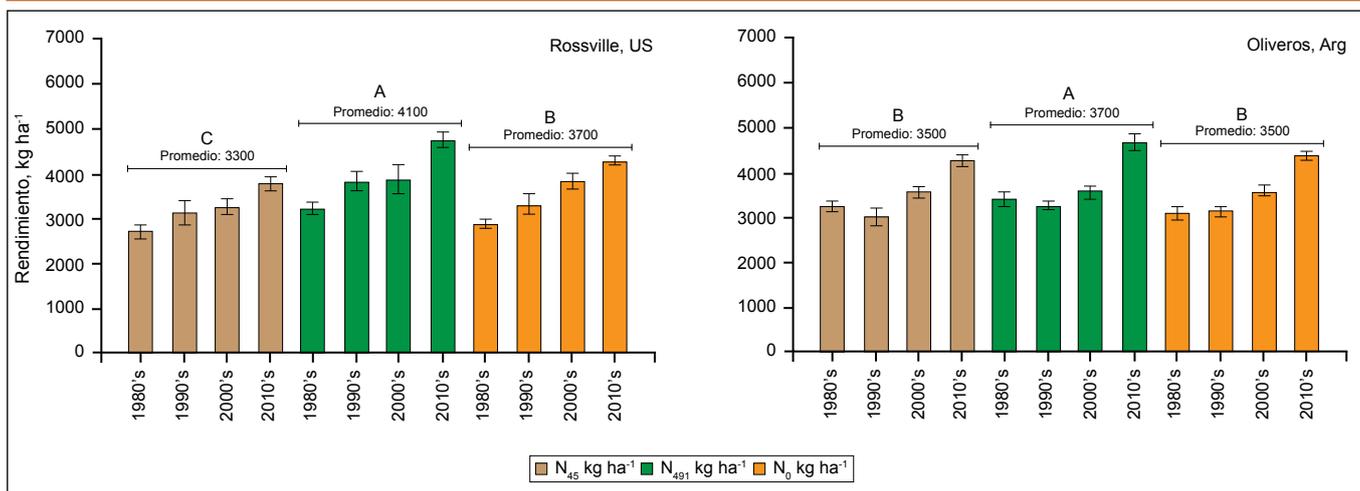


Figure 5. Rendimiento expresado en kg ha⁻¹ al 13.5% de contenido de humedad en grano de soja para genotipos liberados entre las décadas de 1980's al 2010's y bajo tres estrategias de manejo de N 1) no N aplicado; 2) 491 kg N ha⁻¹ aplicado en 3 tiempos (siembra, R1, R3-R4; y 3) 45 kg N ha⁻¹ aplicados en R3-R4. Rossville (EE.UU.) y Oliveros (Argentina) en la campaña productiva 2016. Letras distintas indican diferencias significativas entre estrategias de manejo de N ($P \leq 0.05$) como promedios generales sin separar décadas de liberación.

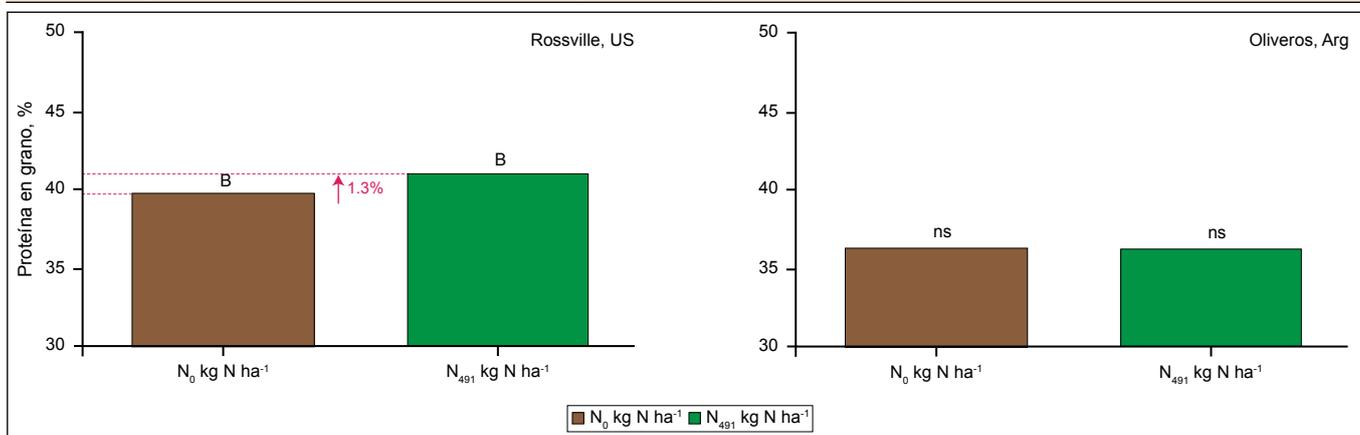


Figura 6. Efecto de la aplicación de N (N₀ vs N₄₉₁ kg N ha⁻¹) sobre el contenido de proteína en grano (%) para 21 genotipos de soja como medias generales evaluados en Rossville (EE.UU.) y Oliveros (Argentina) durante la campaña productiva del 2016. Barras de tratamiento seguida con distinta letra implica diferencia estadística de los dos tratamientos con $P \leq 0.05$, "ns" significa que el efecto no fue estadísticamente distinto.

Conclusiones

Se observaron incrementos en rendimiento en grano al comparar el progreso de los genotipos históricos (1980's) hacia los genotipos modernos (2010's) en Rossville (33%) y en Oliveros (28%).

Aunque la concentración de N en grano con genotipos modernos fue inferior en Rossville y Oliveros (12 y 5%, términos relativos), la exportación de N por unidad de área aumentó (25% en Rossville y 24% en Oliveros), dicho incremento en la exportación de N se debe al aumento en los niveles de rendimiento.

La respuesta del rendimiento de grano a la aplicación de N, al comparar las condiciones extremas de N₄₉₁ respecto del N₀ (control), varió entre 5% (Oliveros) a 20% (Rossville).

Los niveles proteicos del grano se redujeron con el incremento productivo a través de las décadas. La adición de 491 kg N ha⁻¹ durante el ciclo del cultivo incrementó los niveles proteicos del grano (aumentando 1.3% de proteína, valores absolutos) respecto a la no aplicación

de N en Rossville, EE.UU., sin presentar un efecto significativo en Oliveros, Argentina.

El sistema experimental utilizado en esta experiencia (i.e. aplicación repartida de una dosis alta de fertilizante nitrogenado) permitió entender mejor si la disponibilidad de N es un factor limitante en el cultivo, es decir, el objetivo no es recomendar la fertilización con N en soja.

A futuro es necesario mejorar los conocimientos básicos relacionados a explorar los factores de manejo que nos permitan no solo aumentar o sostener altos niveles de rendimiento, sino que también sostener o mejorar la calidad del grano (en este caso la concentración de nutrientes) y como se podría manejar la interacción N cultivo x N suelo x N FBN en sistemas de alta producción de soja.

Agradecimiento

El financiamiento principal de este proyecto fue obtenido del "Fluid Fertilization Foundation", Estados Unidos. Los colaboradores de este proyecto fueron el equipo de Producción de Cultivos "KSUCrops", la Estación

Experimental Agropecuaria EEA-INTA Oliveros, y el programa de investigación y extensión de la Universidad Estatal de Kansas. Este proyecto también forma parte de las actividades conjuntas IPNI-KSU-INTA Oliveros del Proyecto “Quebrando las barreras de rendimiento en soja” (IPNI GBL-62).

Bibliografía

Ciampitti, I.A., J. Kimball, E. Adee, y O. Ortez. 2016. High-Yielding Soybean: Genetic Gain × Fertilizer Nitrogen Interaction. Manhattan, KS: Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports.

Kansas State University. 2017. Kansas Mesonet – Historical Weather. Available URL: <http://mesonet.k-state.edu/weather/historical/>

Rowntree, S.C., J.J. Suhre, N.H. Weidenbenner, E.W. Wilson, V.M. Davis, S.L. Naeve, y A.S. Conley. 2013. Genetic Gain × Management Interactions in Soybean: I. Planting Date. *Crop Science*, 53: 1128-1138.

Software, R. 2017. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available at: <http://www.r-project.org>

Salvagiotti, F., K.G. Cassman, J.E. Specht, D.T. Walters, A. Weiss, y A. Dobermann. 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research*, 1-13.

Specht, J. E., Hume, D. J., and Kumudini, S. V. (1999). Soybean Yield Potential—A Genetic and Physiological Perspective. *Crop Sci.* 39, 1560-1570.

Tamagno, S., G.R. Balboa, Y. Assefa, P. Kovács, S.N. Casteel, y F. Salvagiotti. 2017. Nutrient partitioning and stoichiometry in soybean : A synthesis-analysis. *F. Crop. Res.* 200, 18-27.

USDA. 2016. Oil Seeds: World Markets and Trades. Retrieved from <http://usda.mannlib.cornell.edu/usda/fas/oilseed-trade//2010s/2016/oilseed-trade-05-10-2016.pdf>

Wilcox, J. R. 2004. World distribution and trade of soybean. 3rd ed. , ed. H.R. Boerma and J.E. Specht In: ASA, CSSA, ASSA.

Wright, D., y A.W. Lenssen. 2013. Inoculant Use on Soybean Seed. Agriculture and Environment Extension Publications.