

¿La disponibilidad de nitrógeno limita el rendimiento y la calidad de la soja?*

Nicolás Cafaro La Menza¹, Juan Pablo Monzon², Matías Cánepa³, y Patricio Grassini¹

- En la medida que los rendimientos de soja continúen aumentando es probable que la oferta de nitrógeno (N), proveniente de la fijación biológica y de la mineralización de la materia orgánica del suelo, sea insuficiente para satisfacer la demanda de N del cultivo.
- Los rendimientos de grano, proteína y aceite fueron mayores en los cultivos sin limitación de N en comparación con los cultivos que dependían de la fijación biológica y de la mineralización de N del suelo. Estas diferencias se incrementaron en condiciones de alto potencial de rendimiento ($> 4.5 \text{ t ha}^{-1}$).

Introducción

El rendimiento potencial de un cultivo (Y_p) está determinado por la radiación solar, la temperatura y otros factores que influyen sobre la duración de la estación de crecimiento, como pueden ser el ciclo del cultivar y la fecha de siembra. Para soja, el Y_p se estima que varía entre 6 y 8 t ha^{-1} en ambientes favorables del cinturón maicero americano y de la zona núcleo sojera de Argentina (Specht et al., 1999; Sinclair y Ruffy, 2012; Aramburu Merlos et al., 2015).

La soja necesita acumular aproximadamente 80 kg ha^{-1} de N en su biomasa aérea para producir una tonelada de grano (Salvagiotti et al., 2008; Tamagno et al., 2017). Por lo tanto, para lograr un rendimiento de soja de 3 t ha^{-1} , que es el promedio obtenido en los últimos 5 años en Argentina y EE.UU. (https://www.nass.usda.gov/Quick_Stats/; <https://datos.magyp.gob.ar/>), se requieren 240 kg N ha^{-1} , mientras que para alcanzar un Y_p de 6 a 8 t ha^{-1} son necesarios 480 a 640 kg N ha^{-1} .

A medida que los rendimientos de soja continúan aumentando, es necesario conocer el nivel de rendimiento por encima del cual la oferta de N proveniente de la fijación biológica y de la mineralización de la materia orgánica del suelo puede llegar a ser insuficiente para satisfacer la demanda de N del cultivo. Para obtener esta información se requiere de datos de cultivos de soja que crezcan en condiciones libres de estrés.

Para cubrir los requerimientos de N de un cultivo de soja se requiere sincronizar la oferta de N del suelo y de la fijación biológica con la demanda de N del cultivo (Cassman et al., 2002). Ningún estudio previo ha intentado explícitamente cultivar soja en ambientes de muy alto potencial asegurando condiciones de N no limitante (Salvagiotti et al., 2008). En este estudio planteamos que, en ausencia de otros factores limitantes, el grado de limitación por N en soja incrementa con el aumento en el Y_p del cultivo.

Materiales y métodos

Ensayos

Los ensayos se condujeron en Balcarce (BA), Argentina, durante dos estaciones de crecimiento (BA-Y1: 2014/2015 y BA-Y2: 2015/2016), y en cuatro localidades en el estado de Nebraska, EE.UU., durante una estación de crecimiento (2016) (Cafaro La Menza et al., 2017). Los experimentos en Balcarce consistieron en una combinación de fechas de siembra, variedades de diferente grupo de madurez, y tratamientos de N (-N y +N), mientras que los experimentos en Nebraska fueron realizados en cuatro campos de productores e incluyeron los mismos tratamientos de N (**Tabla 1**). En todos los experimentos los cultivos fueron regados, y manejados para asegurar condiciones óptimas de agua y nutrientes. En Balcarce, los ensayos fueron inoculados (Pack Nitragin Optimize II® Pack Apron® & Jumpstart); en Nebraska no se inoculó debido a la falta de respuesta a la re-inoculación en campos con historia de soja del cinturón maicero americano (de Bruin et al., 2015; Leggett et al., 2017).

Protocolo de fertilización

Se aplicaron dos tratamientos de N: -N y +N. El objetivo del tratamiento +N fue asegurar condiciones no limitantes de N durante toda la estación de crecimiento a través de cinco aplicaciones de fertilizante nitrogenado (urea, 46-0-0) (**Figura 1**). Por el contrario, en el tratamiento -N, la soja dependió del N inorgánico a la siembra, el N mineralizado durante la estación de crecimiento y el N proveniente de la fijación biológica.

El protocolo de fertilización fue diseñado para satisfacer los requerimientos de N para el Y_p calculado para cada ambiente utilizando el modelo de simulación CROPGRO-Soybean para Balcarce (Boote et al., 1998, Jones et al., 2003; Hoogenboom et al., 2010) y SoySim para Nebraska (Setiyono et al., 2010). El máximo Y_p en la serie simulada (25 años) fue de 7.2 t ha^{-1} (fecha de siembra temprana)

* Este artículo es un resumen de Cafaro La Menza et al. 2017. Field Crops Research 213:204-212

¹ Departamento de Agronomía y Horticultura, Universidad de Nebraska-Lincoln, P.O. Box 830915, Lincoln, NE 68583-0915, EE.UU.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Unidad Integrada Balcarce. Ruta 226 km. 73.5 Balcarce, Buenos Aires, Argentina 7620

³ Asesor privado

Autor de contacto. monzon.juanpablo@inta.gob.ar

Tabla 1. Descripción de los experimentos a campo llevados a cabo en Balcarce (Argentina) y en Nebraska, (EE.UU.).

Experimento	Estación de crecimiento	Ubicación	Variedad y grupo de madurez (GM)	Fecha de siembra
Balcarce (BA-Y1)	2014/2015	37.7647 S 58.3125 W 118 m a.s.l.	DM2200 (GM:2.1) DM3810 (GM:3.8) DM4612 (GM:4.6)	1 Nov, 27 Nov, 18 Dic, 6 Ene
Balcarce (BA-Y2)	2015/2016	37.7652 S 58.3117 W 118 m a.s.l.	DM2200 (GM:2.1) DM3312 (GM:3.3), DM3810 (GM:3.8)	3 Nov, 12 Dic, 11 Ene
Atkinson, NE	2016	42.6372 N 98.9561 W 635 m a.s.l.	AG2723 (GM:2.7)	25 Abril
Mead, NE	2016	41.2441 N 96.5016 W 368 m a.s.l.	AG2723 (GM:2.7)	8 Mayo
Saronville, NE	2016	40.6005 N 97.9658 W 538 m a.s.l.	AG2431 (GM:2.4)	26 Abril
Smithfield, NE	2016	40.5380 N 99.6833 W 769 m a.s.l.	P24T19 (GM:2.4)	13 Mayo

y 3.8 t ha⁻¹ (fecha de siembra tardía) en Balcarce y 7.5 t ha⁻¹ para los cuatro sitios de Nebraska. La cantidad de fertilizante aplicado se estimó en función del Yp máximo simulado para cada ambiente, y el requerimiento de 80 kg N t⁻¹ (Salvagiotti et al., 2008; Tamagno et al., 2017). No se tuvo en cuenta el aporte de N de la mineralización del suelo ni de la fijación biológica debido a la dificultad para calcular el N mineralizado y a los posibles efectos contrapuestos que se pueden generar entre la aplicación de fertilizante nitrogenado y la fijación biológica de N (Streeter, 1988). La cantidad total de fertilizante nitrogenado se incrementó en un 40% en Nebraska para compensar por las posibles pérdidas de N por volatilización o lavado debido a la posible falta de coordinación entre la aplicación de N y los eventos de precipitación o riego que permitieran incorporar el N. Por el contrario, en Balcarce se aplicó riego inmediatamente después de la aplicación de N, por lo tanto, la dosis de N solo se incrementó un 10%. Se aplicaron un total de 330 a 640 kg N ha⁻¹ a través de las fechas de siembra en Balcarce y, en promedio, 870 kg N ha⁻¹ en los campos de productores de Nebraska.

El total de N a aplicar se suministró al voleo en el entre surco en cinco momentos durante la estación de crecimiento para poder sincronizar la oferta de N con la demanda de N del cultivo (**Figura 1**). En este sentido, se usaron los patrones de absorción de N reportados por

Thies et al. (1995) y Bender et al. (2015) para asignar la cantidad total de N para cada una de las cinco aplicaciones en los estadios V2, V4, R1, R3, y R5 que fueron 10%, 10%, 20%, 30%, y 30% del total de fertilizante nitrogenado aplicado, respectivamente.

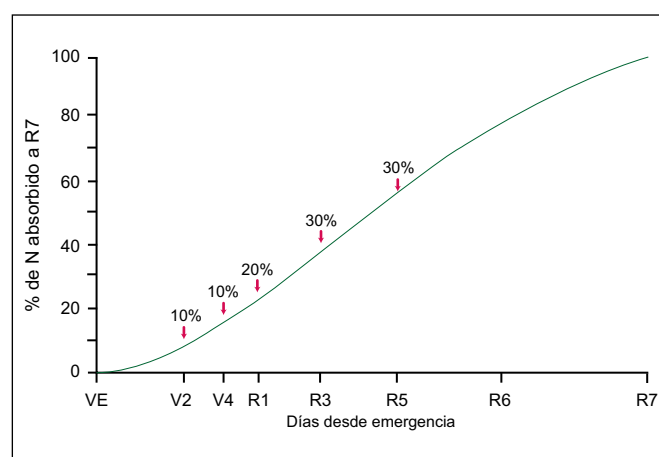


Figura 1. Esquema que muestra el protocolo de fertilización con nitrógeno (N) seguido en los ensayos. La cantidad total de fertilizante se dividió en 5 aplicaciones (flechas rojas) en función de la dinámica temporal de absorción de N por la soja (línea negra). Las aplicaciones de N fueron de un 10% en V2 y V4, 20% en R1, y 30% (R3 y R5) de la cantidad total de N a aplicar.

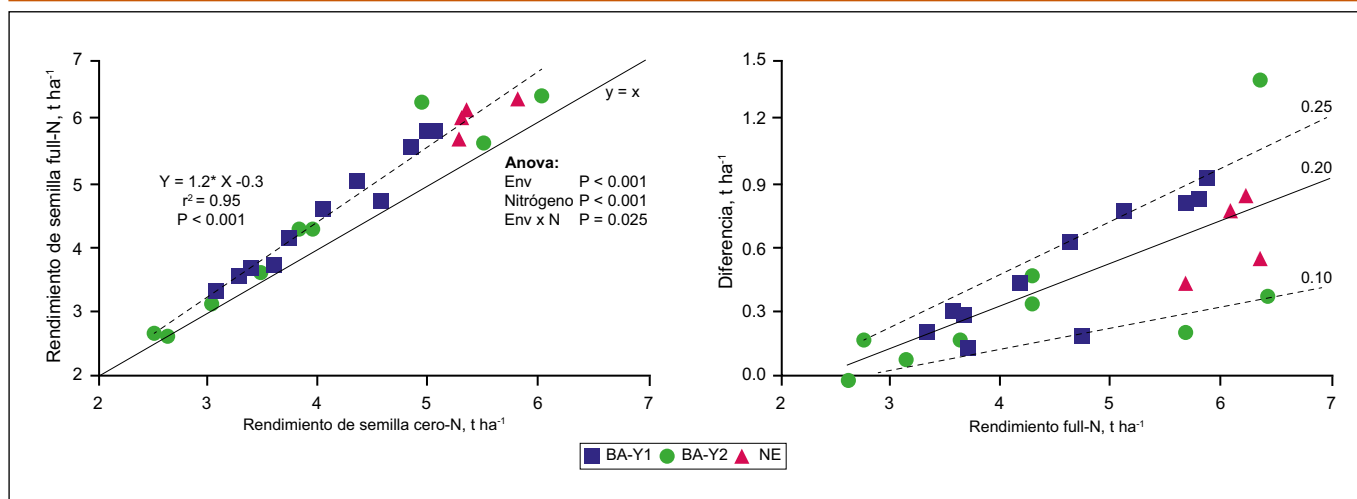


Figura 2. Rendimiento de grano de soja para el tratamiento full-N versus cero-N. Cada punto representa un ambiente que es el resultado de año x fecha de siembra x variedad (Balcarse, BA) o campo de productor (Nebraska, EE.UU.). La línea negra indica la relación $y = x$. El gráfico de la derecha muestra las diferencias en rendimiento entre el tratamiento full-N y cero-N, también se muestra la regresión lineal ajustada (línea negra, $y = 0.2x - 0.46$) y las pendientes representativas de las líneas límite para los percentiles 10% y 90% (líneas punteadas).

Mediciones

En todos los experimentos se midió la fenología del cultivo de forma semanal (escala de Fehr y Caviness, 1977). En R8 se cosecharon parcelas de 1.8 a 4.6 m² para estimar el rendimiento de grano. El rendimiento en grano se ajustó a humedad de 0.130 kg H₂O kg⁻¹. El rendimiento y la concentración de proteína y aceite se expresan en materia seca (0% humedad). Para cada tratamiento de N se midió la concentración de proteína y aceite en el grano usando un equipo FOSS InfratecTM 1241. El rendimiento de proteína o aceite (t ha⁻¹) se calculó multiplicando el rendimiento de grano por la concentración de proteína o aceite correspondiente.

Análisis de los datos

Se compararon gráficamente los diferentes parámetros (rendimiento de grano, proteína y aceite) para el tratamiento +N en función del tratamiento -N. Se evaluaron los desvíos de la relación 1:1 (que representa la hipótesis nula de no respuesta diferencial entre +N y -N) usando regresiones lineales y de percentiles (R Development Core Team, 2016). Para evaluar los cambios en proteína y aceite, se ajustaron regresiones lineales y cuadráticas entre el rendimiento en proteína y aceite vs el rendimiento de grano.

Resultados

Rendimiento de grano en función de los tratamientos de fertilización con N

La diversidad de localidades, estaciones de crecimiento, fechas de siembra y variedades nos permitió contar con un amplio rango de rendimientos de soja, desde 2.52 a 6.46 t ha⁻¹ (Figura 2). La mitad de los datos estuvo por encima de 4.5 t ha⁻¹, que es el umbral de rendimiento que se usa para definir ambientes de alto Yp para soja (Salvagiotti et al., 2008).

El agregado de N (+N) incrementó significativamente el rendimiento en grano ($P < 0.001$). En promedio a través de todos los ambientes, el rendimiento en el tratamiento +N fue de 0.46 t ha⁻¹ mayor (11%) que el tratamiento -N (Figura 2). El análisis combinado de varianzas (resumido en Figura 2) reveló una interacción significativa entre ambiente y N sobre el rendimiento ($P = 0.025$), que fue consistente con la separación de la regresión (pendiente = 1.2) de la línea 1:1 ($P < 0.001$, Figura 2). Por cada t ha⁻¹ que aumentó el rendimiento en el tratamiento -N por encima de 2.5 t ha⁻¹, el rendimiento del tratamiento +N aumentó 1.2 t ha⁻¹. La diferencia entre el tratamiento +N y -N aumentó con el aumento del Yp del ambiente o +N, desde cerca de cero en ambientes con bajo Yp (2-3 t ha⁻¹) hasta 0.9 t ha⁻¹ en ambientes con un Yp de 6 t ha⁻¹ (Figura 2).

Proteína y aceite en soja en función de los tratamientos de nitrógeno

La relación entre el rendimiento de proteína y el rendimiento de grano fue curvilínea para el tratamiento -N, lo que sugiere un efecto de "dilución" en el contenido de proteína a medida que el rendimiento aumenta (Figura 3, izquierda). En este sentido, la concentración de proteína disminuyó (de 41% a 38%) a medida que el rendimiento del tratamiento -N fue aumentando (de 2.5 a 6 t ha⁻¹). Sin embargo, no se observó un efecto de dilución en el tratamiento full-N donde se mantuvieron los mismos niveles de proteína a través del rango de rendimientos explorados (alrededor de 41% de proteína, Figura 3, izquierda). En otras palabras, estos patrones observados indicarían que, cuando se usó el protocolo de fertilización que asegura condiciones no limitantes de N, se aumentaron los niveles de rendimiento manteniendo los niveles de proteína. El impacto de la fertilización con N sobre el aceite en grano fue diferente, ya que la relación en ambos tratamientos fue curvilínea y positiva (Figura 3, derecha). Los rendimientos de aceite aumentaron en el tratamiento +N pero básicamente por un incremento

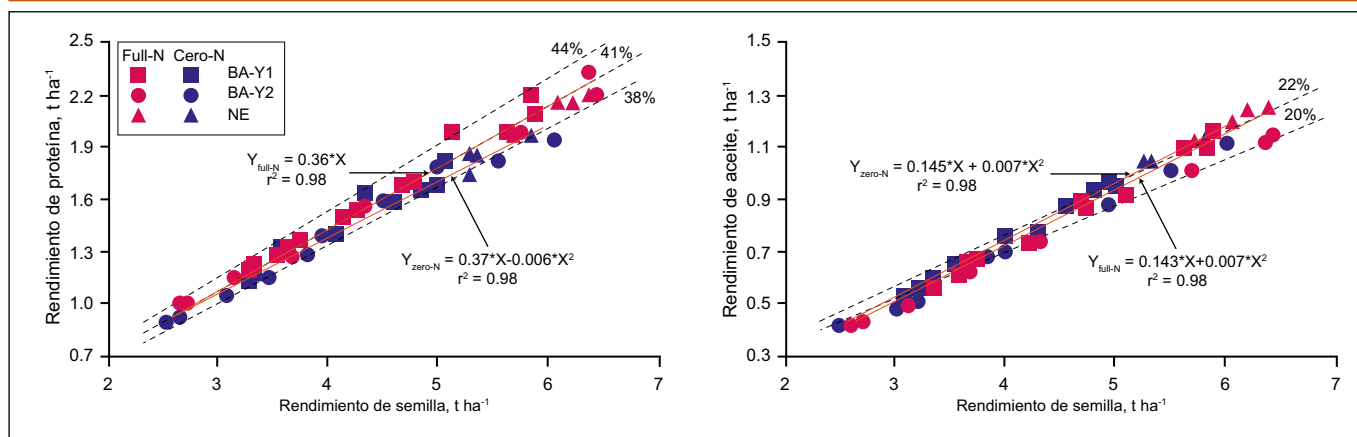


Figura 3. Rendimiento en proteína (izquierda) y aceite (derecha) en función del rendimiento de grano de soja en los tratamientos +N (símbolos rojos) y -N (símbolos azules). Cada punto corresponde a un tratamiento de fecha de siembra x variedad x N (Balcarce, BA), o a un tratamiento de campo de productor x N (Nebraska, NE). Se ajustaron regresiones cuadráticas o lineales y se muestran las isolíneas de los valores de concentración de proteína y aceite para comparar.

en el rendimiento de grano más que por un cambio en la concentración de aceite como sucedió con el contenido de proteína en el grano.

Discusión

Los resultados de este estudio ponen en duda la hipótesis de que “la fijación biológica de N puede abastecer los requerimientos de N independientemente del Yp del ambiente de producción”. Se encontró un incremento consistente en el rendimiento de grano, proteína y aceite en el tratamiento +N vs -N, especialmente en ambientes de alto Yp, sin efectos negativos en la concentración de proteína y aceite.

Los rendimientos de proteína fueron mayores en el tratamiento +N vs -N, sugiriendo una mayor absorción de N en los cultivos +N, y la magnitud del incremento dependió del nivel de Yp del ambiente de producción. Estas dos observaciones sugieren que hay un desequilibrio entre los requerimientos de N y la oferta de N (que involucra la fijación y la mineralización de N del suelo) y que ese desequilibrio es mayor a medida que aumenta la demanda de N necesaria en ambientes de alto Yp.

Si bien las cantidades de fertilizante nitrogenado aplicadas en este estudio están lejos de ser económicamente viables y amigables con el medioambiente, el protocolo de fertilización nitrogenada utilizado nos permitió identificar un umbral de Yp por encima del cual la fijación in situ de N y la mineralización de N del suelo no fueron capaces de sostener la demanda de N del cultivo. En promedio, el rendimiento de grano del tratamiento +N aumentó, en comparación con el tratamiento -N, en 200 kg por t de aumento en el Yp, pero esta respuesta en rendimiento solo fue evidente en cultivos con un Yp por encima de 2.5 t ha⁻¹, lo cual sugiere que la limitación por N se torna realmente importante en ambientes de alto Yp (>4.5 t ha⁻¹). También se logró establecer un límite superior respecto a los incrementos de rendimiento esperables si se logra remover la limitación por N. El límite superior para la respuesta en rendimiento de grano fue de 250 kg por cada t de aumento

en un rango de 2.5 t ha⁻¹ a 6 t ha⁻¹. La máxima respuesta que encontramos (≈ 0.9 t ha⁻¹ a Yp=6 t ha⁻¹) es consistente con el rango superior de respuestas a la fertilización con N reportadas por Salvagiotti et al., (2008) y Wilson et al., (2014). Los resultados de este trabajo ponen en duda las estimaciones actuales de Yp en soja derivadas de ensayos a campo donde se asume que la fijación biológica de N provee todo el N que la mineralización no alcanza a cubrir para satisfacer la demanda del cultivo.

Finalmente, nuestros resultados sugieren que la fijación de N sola no es suficiente para sostener las altas demandas de N de cultivos de soja que crecen en ambientes de producción con altos valores de Yp, lo cual incluye cultivos localizados en el cinturón sojero de Argentina y de las planicies centrales de Estados Unidos (Grassini et al., 2015). Por lo tanto, una insuficiente oferta de N puede explicar parte de las actuales brechas de rendimiento entre los Yp simulados y los rendimientos obtenidos por productores en estos ambientes de producción. Estimamos que al menos la mitad de la actual brecha de rendimiento en esos ambientes es el resultado de la limitación de N. En un contexto más amplio, especulamos que la oferta de N será posiblemente (sí ya no lo es) el mayor factor limitante del rendimiento en los sistemas de producción de soja con altos valores de Yp (Grassini et al., 2014; Specht et al., 2014).

Conclusiones

Encontramos que los rendimientos de soja están limitados por la oferta de N en ambientes con Yp por encima de 2.5 t ha⁻¹. Por encima de este umbral, la respuesta al fertilizante N tiene un límite máximo de 250 kg ha⁻¹ por t de incremento en el Yp, y la respuesta sería significativa en ambientes con más de 4.5 t ha⁻¹. Los rendimientos en proteína y aceite también fueron mayores en los tratamientos +N con respecto al -N debido a mayores rendimientos, con un pequeño aumento en la concentración de proteína. Es importante destacar que los cultivos +N mantuvieron el mismo nivel de concentración de proteína a través de todo el rango de rendimiento evaluado.

Bibliografía

- Aramburu Merlos, F., J.P. Monzon, J.L. Mercau, M. Taboada, F.H. Andrade, A.J. Hall, E. Jobbagy, K.G. Cassman, y P. Grassini. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research* 184:145-154.
- Bender, R.R., J.W. Haegerle, y F.E. Below. 2015. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern soybean varieties. *Agronomy Journal* 107:563-573.
- Boote, K.J., J.W. Jones, G. Hoogenboom. 1998. Simulation of crop growth: CROPGRO model. In: Peart, R.M., Curry, R.B. (Eds.), *Agricultural Systems Modeling and Simulation*. Marcel Dekker, Inc., New York, USA, pp. 651-692.
- Cafaro La Menza, N., J.P. Monzon, J.E. Specht, y P. Grassini. 2017. Is soybean yield limited by nitrogen supply? *Field Crops Research* 213:204-212.
- Cassman, K.G., A. Dobermann, y D.T. Walters. 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 31:132-140.
- de Bruin, J.L., P. Pedersen, S.P. Conley, J.M. Gaska, S.E. Naeve, J.E. Kurle, R.W. Elmore, L.J. Giesler, y L.J. Abendroth. 2015. Probability of yield response to inoculants in fields with a history of soybean. *Crop Science* 50:265-272.
- Fehr, W.R., y C.E. Caviness. 1977. Stages of soybean development. Special Report 80. Iowa Agriculture and Home Economics Experiment Station, Iowa State University, Ames.
- Grassini, P., J.A. Torrión, K.G. Cassman, H.S. Yang, y J.E. Specht. 2014. Drivers of spatial and temporal variation in soybean yield and irrigation requirements in the western US Corn Belt. *Field Crops Research* 163:32-46.
- Grassini, P., J.A. Torrión, H.S. Yang, J. Rees, D. Andersen, K.G. Cassman, y J.E. Specht. 2015. Soybean yield gaps and water productivity in the western US Corn Belt. *Field Crops Research* 179:150-163.
- Hoogenboom, G., J.W. Jones, P.W. Wilkens, C.H. Porter, K.J. Boote, L.A. Hunt, et al. 2010. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5. Univ. of Hawaii, Honolulu.
- Jones, J.W., G. Hoogenboom, C.H. Porter, K.J. Boote, D.W. Batchelor, L.A. Hunt, P.W. Wilkens, U. Singh, A.J. Gijssman, y J.T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of agronomy* 18:235-265.
- Leggett, M., M. Diaz-Zorita, M. Koivunen, R. Bowman, R. Pesek, C. Stevenson, y T. Leister. 2017. Soybean Response to Inoculation with in the United States and Argentina. *Agronomy Journal* 109:1031-1038.
- R Development Core Team. 2016. R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- 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* 108:1-13.
- Setiyono, T.D., K.G. Cassman, J.E. Specht, A. Dobermann, A. Weiss, H. Yang, S.P. Conley, A.P. Robinson, P. Pedersen, J.L. De Bruin. 2010. Simulation of soybean growth and yield in near-optimal growth conditions. *Field Crops Research* 119:161-174.
- Sinclair, T.R., y T.W. Rufty. 2012. Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics. *Global Food Security* 1:94-98.
- Specht, J.E., D.J. Hume, y S.V. Kumudini. 1999. Soybean yield potential—a genetic and physiological perspective. *Crop Science* 39:1560-1570.
- Specht, J.E., B.W. Diers, R.L. Nelson, J.F. Toledo, J.A. Torrión, y P. Grassini. 2014. Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). In: Smith JSC, Carver B, Diers BW, Specht JE (Eds.), *Yield Gains in Major US Field Crops: Contributing Factors and Future Prospects*. CSSA Special Publication #33, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.
- Streeter, J., y P.P. Wong. 1988. Inhibition of legume nodule formation and N₂ fixation by nitrate. *Critical Reviews in Plant Sciences* 71-23.
- Tamagno, S., G.R. Balboa, Y. Assefa, P. Kovács, S.N. Casteel, F. Salvagiotti, F.O. García, W.M. Stewart, e I.A. Ciampitti. 2017. Nutrient partitioning and stoichiometry in soybean: A synthesis-analysis. *Field Crops Research* 200:18-27.
- Thies, J.E., P.W. Singleton, y B.B. Bohlool. 1995. Phenology, growth, and yield of field-grown soybean and bush bean as a function of varying modes of N nutrition. *Soil Biology and Biochemistry* 27:575-583.
- Wilson, E.W., S.C. Rowntree, J.J. Suhre, N.H. Weidenbenner, S.P. Conley, V.M. Davis, B.W. Diers, P.D. Esker, S.L. Naeve, J.E. Specht, y S.N. Casteel. 2014. Genetic gain *management interactions in soybean: II. Nitrogen utilization. *Crop Science* 54(1):340-348.✿