

Evaluación del efecto de la densidad de siembra y el distanciamiento entre hileras sobre el rendimiento de soja en dos ambientes contrastantes

GDM - América Agroinnova
Campaña 2025-2026
Informe de resultados

1) Introducción y objetivos

Se llevó a cabo un experimento en el Campo Experimental de América Agroinnova (América, Buenos Aires) durante la campaña 2025-2026. El dispositivo experimental se consensuó entre el equipo técnico y de formación profesional de América Agroinnova y el área de desarrollo de GDM. El objetivo fue cuantificar la respuesta de la variedad de soja DM 46E25 a combinaciones de densidad de siembra y distanciamiento entre hileras en dos ambientes contrastantes: una loma más arenosa y de menor productividad potencial, y un bajo con menor proporción de arena, mayor contenido de materia orgánica y mayor productividad potencial.

También se evaluó cómo las configuraciones espaciales modificaron la implantación, la evolución del índice verde normalizado (NDVI) a lo largo del ciclo, los componentes numéricos del rendimiento y la productividad del cultivo. La rectangularidad del planteo, definida a partir de la relación entre la distancia entre hileras y la distancia media entre plantas dentro de la hilera también se usó como posible predictor de las respuestas productivas.

2) Materiales y Métodos

2.1 Descripción general del ensayo

El ensayo se sembró el 10 de noviembre de 2025, a 4 cm de profundidad, con una temperatura del suelo media superior a 16 °C y sin fertilización. Se evaluaron tres densidades de siembra y cuatro distanciamientos entre hileras en cada ambiente (Tabla 1). En el horizonte superficial (0-20 cm), el ambiente de bajo presentaba 65% de arena, mientras que el de loma presentaba 74% de arena.

Tabla 1. Descripción general del ensayo: variedad, tratamientos de densidad y distancia entre surcos sembrada, fecha de siembra y de emergencia.

Elemento	Descripción
Variedad	DM 46E25
Densidad sembrada	D1 = 150; D2 = 325; D3 = 450 mil semillas ha ⁻¹
Distanciamiento e/surcos	E1 = 17,5; E2 = 35; E3 = 52,5; E4 = 70 cm
Fecha de siembra	10/11/2025
Fecha de emergencia	17/11/2025

2.2 Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos resultaron de la combinación factorial de tres densidades de siembra y cuatro distanciamientos entre hileras. Los distanciamientos de 17,5 y 52,5 cm se sembraron con una máquina de distribución a chorrillo, regulada por chevrones y con distribución mecánica directa desde un cajón común. Los distanciamientos de 35 y 70 cm se sembraron con una máquina de precisión, con placa mecánica y distribución neumática.

El diseño fue en bloques completos, con cuatro repeticiones verdaderas de cada combinación de densidad y distanciamiento en cada ambiente. En total se dispusieron 96 parcelas independientes. Cabe destacar que, debido a que el tipo de sembradora quedó asociado al distanciamiento, las comparaciones entre 17,5 y 52,5 cm, y entre 35 y 70 cm, mantienen el sistema de dosificación; las comparaciones entre pares de distinto sistema incluyen simultáneamente diferencias de distanciamiento y de máquina.

2.3 Cosecha y variables evaluadas

En cada parcela se cosecharon 1,5 m lineales de los cuatro surcos centrales, equivalentes a 6 m lineales totales. El peso obtenido se dividió por el área efectiva de cosecha (Tabla 2), se corrigió a 13,5% de humedad y se convirtió de g m^{-2} a kg ha^{-1} . El rendimiento se recalculó a partir del peso bruto y la humedad de cada muestra.

Tabla 2. Características de las parcelas cosechadas para los diferentes tratamientos de espaciamiento descriptos según la distancia entre surcos de siembra, la longitud total lineal cosechada y el área cosechada.

Código	Distancia (cm)	Longitud total (m)	Área cosechada (m^2)
E1	17,5	6,0	1,05
E2	35,0	6,0	2,10
E3	52,5	6,0	3,15
E4	70,0	6,0	4,20

Durante el ciclo se registraron la densidad lograda y el NDVI en seis momentos, expresados como días desde la emergencia. A cosecha se determinaron el rendimiento, el peso de mil granos y el número de granos por unidad de superficie. La rectangularidad se estimó como la razón entre la mayor y la menor distancia de las dos direcciones del planteo; por definición, una distribución cuadrada presenta un valor igual a 1.

2.4 Análisis de datos

Se realizaron análisis de la varianza factoriales por ambiente, con la evaluación de los efectos de bloque, densidad, distanciamiento y su interacción. El análisis conjunto incluyó ambiente, bloque anidado en ambiente y todas las interacciones. Para evaluar el efecto de ambiente se utilizó bloque dentro de ambiente como denominador. Cuando el ANOVA detectó diferencias se aplicó la prueba LSD de Fisher ($\alpha = 0,05$).

Se realizaron regresiones, para cada ambiente, entre la densidad lograda y la siembra de los diferentes tratamientos. Para densidad lograda se compararon una recta común y rectas específicas por distanciamiento. La relación entre rendimiento y densidad sembrada se evaluó mediante regresiones cuadráticas. Se contrastaron una curva común, curvas paralelas con interceptos por distanciamiento y curvas de forma diferente. El efecto de la rectangularidad se evaluó a partir de la relación entre el rendimiento medio del ambiente y la rectangularidad, tomando todos los tratamientos en conjunto para el mismo modelo. El NDVI se integró entre 36 y 93 días desde la emergencia y se comparó el área bajo la curva del NDVI (integral) entre los diferentes tratamientos.

3) Resultados

3.1 Condiciones meteorológicas e implantación del cultivo

Las condiciones ambientales se caracterizaron por un inicio de primavera con precipitaciones inferiores al promedio histórico, con 106 mm acumulados entre septiembre y octubre. En noviembre, las precipitaciones totalizaron 107 mm, valor considerado típico para la región, mientras que en diciembre volvieron a ubicarse por debajo de la media, con 45 mm. Durante enero, cuando se inició la fructificación del cultivo (R3), se registraron 74 mm de precipitación y temperaturas superiores a 35 °C, es decir, eventos de golpe de calor. Aun así, las condiciones de ese mes se mantuvieron dentro del rango habitual para la región, con una mayor concentración de las precipitaciones en la segunda quincena. En febrero y marzo, períodos correspondientes a la fructificación y al llenado de granos, las precipitaciones también fueron inferiores a la media, con 53 mm y 96 mm, respectivamente. Se registro el estadio de R7 el 4 de abril de 2026.

La densidad lograda respondió a la siembra ($p < 0,0001$ en ambos ambientes), pero la relación cambió con el distanciamiento: $p = 0,0015$ en loma y $p = 0,0002$ en bajo (Figura 1, Tablas 3 y 4). En el bajo hubo interacción densidad $\times$ distanciamiento para el stand ($p = 0,0247$). En loma la interacción no alcanzó significancia ($p = 0,0919$), aunque sí hubo efectos principales de densidad y distanciamiento. El coeficiente de logro tendió a ser mayor para los sistemas a chorrillo. No obstante, cabe destacar que la uniformidad espacial visual de la estructura del cultivo fue considerablemente mejor para los distanciamientos con sistemas a placa (datos no mostrados).

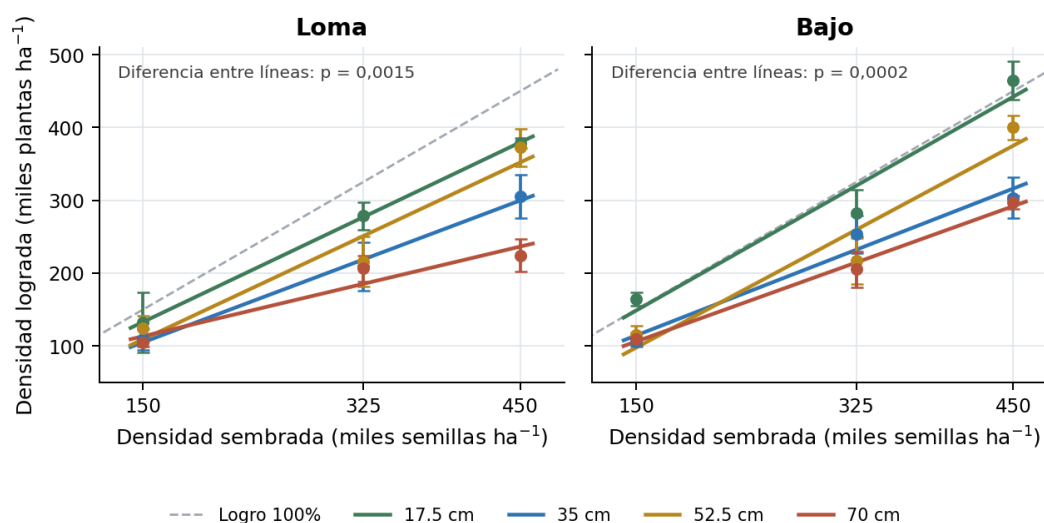


Figura 1. Densidad lograda de soja en función de la siembra para el ambiente de loma y de bajo. Se indica la media $\pm$ error estándar de cuatro repeticiones. Las líneas son las regresiones ajustadas para cada distanciamiento.

Tabla 3. Valores medios de densidad lograda y coeficiente de logro de soja para los diferentes tratamientos de distanciamiento entre surcos en los ambientes de loma y de bajo.

Ambiente	Distancia (cm)	Sistema	Densidad lograda (miles ha ⁻¹)	Logro medio
Loma	17,5	Chorrillo	263	86,0%
Loma	35,0	Precisión	208	68,3%
Loma	52,5	Chorrillo	237	77,2%
Loma	70,0	Precisión	178	61,0%
Bajo	17,5	Chorrillo	304	99,8%
Bajo	35,0	Precisión	221	71,9%
Bajo	52,5	Chorrillo	244	77,5%
Bajo	70,0	Precisión	204	67,5%

Tabla 4. Resultados del análisis de la varianza para el efecto de los tratamientos sobre la densidad lograda en cada ambiente.

Ambiente	Fuente	F	p
Loma	Densidad	66,04	<0,0001
Loma	Distanciamiento	6,47	0,0015
Loma	Densidad × distanciamiento	2,01	0,0919
Bajo	Densidad	119,44	<0,0001
Bajo	Distanciamiento	11,50	<0,0001
Bajo	Densidad × distanciamiento	2,83	0,0247

3.2 Efecto principal y de interacciones de los tratamientos sobre el rendimiento

El rendimiento fue mayor en el bajo que en la loma, y existió un efecto general del distanciamiento (Figura 2 y Tablas 5 y 6). Ninguna interacción entre los tratamientos y el ambiente fue significativa, por lo que la dirección de las respuestas de manejo fue similar entre loma y bajo. En la loma, distanciamiento mostró una tendencia ($p = 0,0568$) sin superar 5%. En el bajo, distanciamiento fue significativo ($p = 0,0056$); la interacción densidad $\times$ distanciamiento fue $p = 0,0609$ y se consideró no significativa.

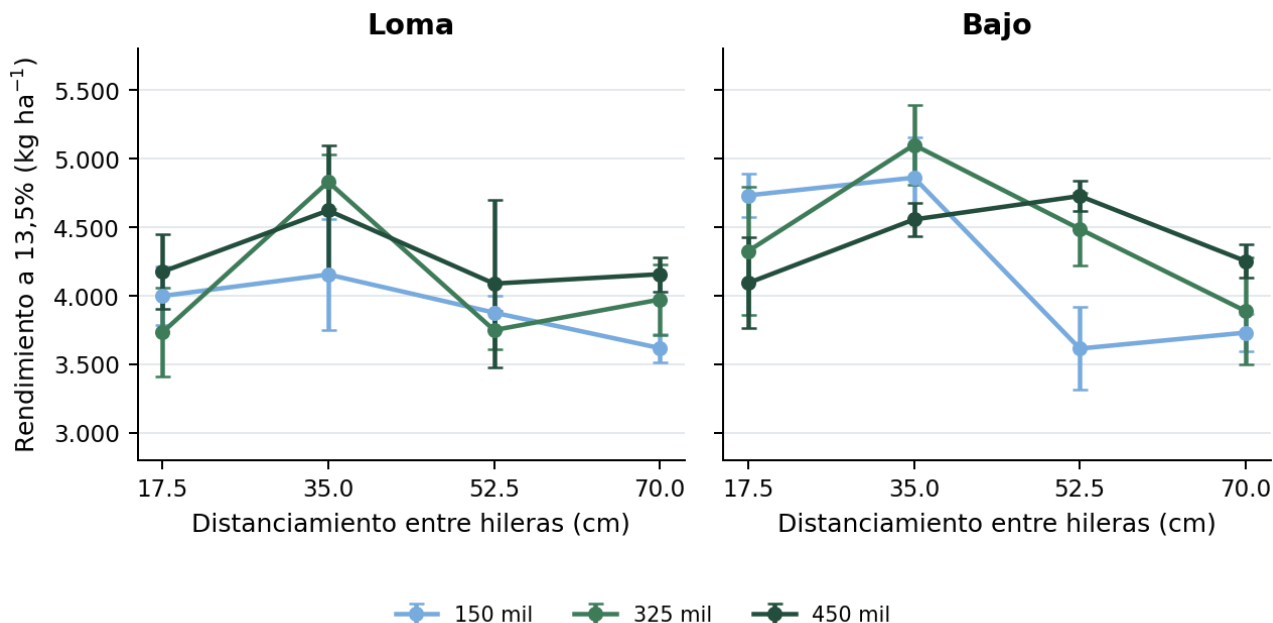


Figura 2. Rendimiento según densidad y distanciamiento. Puntos: medias; barras: ± 1 error estándar de cuatro repeticiones verdaderas.

Tabla 5. Resultados del análisis de la varianza para el efecto de los tratamientos sobre el rendimiento de soja, incluido el efecto del ambiente y sus interacciones.

Fuente	gl	F	p
Ambiente	1	13,58	0,0103
Bloque(Ambiente)	6	0,39	0,8808
Densidad	2	1,61	0,2080
Distanciamiento	3	7,07	0,0003
Ambiente $\times$ densidad	2	0,33	0,7222
Ambiente $\times$ distanciamiento	3	0,47	0,7062
Densidad $\times$ distanciamiento	6	1,46	0,2043
Ambiente $\times$ densidad $\times$ distanciamiento	6	1,11	0,3676

Tabla 6. Resultados de la comparación de medias por método LSD Fisher (alfa = 0,05) entre tratamientos de diferente distanciamiento entre surcos, para cada ambiente (interacción no significativa) y en el conjunto de ambos ambientes, a través de todas las densidades evaluadas.

Distancia (cm)	Loma kg ha ⁻¹	Grupo	Bajo kg ha ⁻¹	Grupo	Conjunto kg ha ⁻¹	Grupo
17,5	3.969	A	4.383	A	4.176	B
35,0	4.535	A	4.839	A	4.687	A
52,5	3.905	A	4.276	A	4.090	B
70,0	3.916	A	3.957	A	3.936	B

3.3 Efecto de la densidad sembrada y lograda sobre el rendimiento

La forma de respuesta no difirió entre distanciamientos: $p = 0,8001$ en la loma y $p = 0,0609$ en el bajo. Sí hubo desplazamientos entre distanciamientos con una curvatura común entre distanciamientos ($p = 0,0419$ y $0,0115$) (Figura 3 y Tabla 7). En el ambiente de loma no se justificaron rectas distintas ($p = 0,1948$), y la pendiente común tampoco difirió de cero ($p = 0,3080$; $R^2 = 0,054$) (Figura 4 y Tabla 7). En el bajo sí hubo rectas distintas ($p = 0,0044$); evidenciando respuestas espaciales diferentes (Figura 4 y Tabla 7).

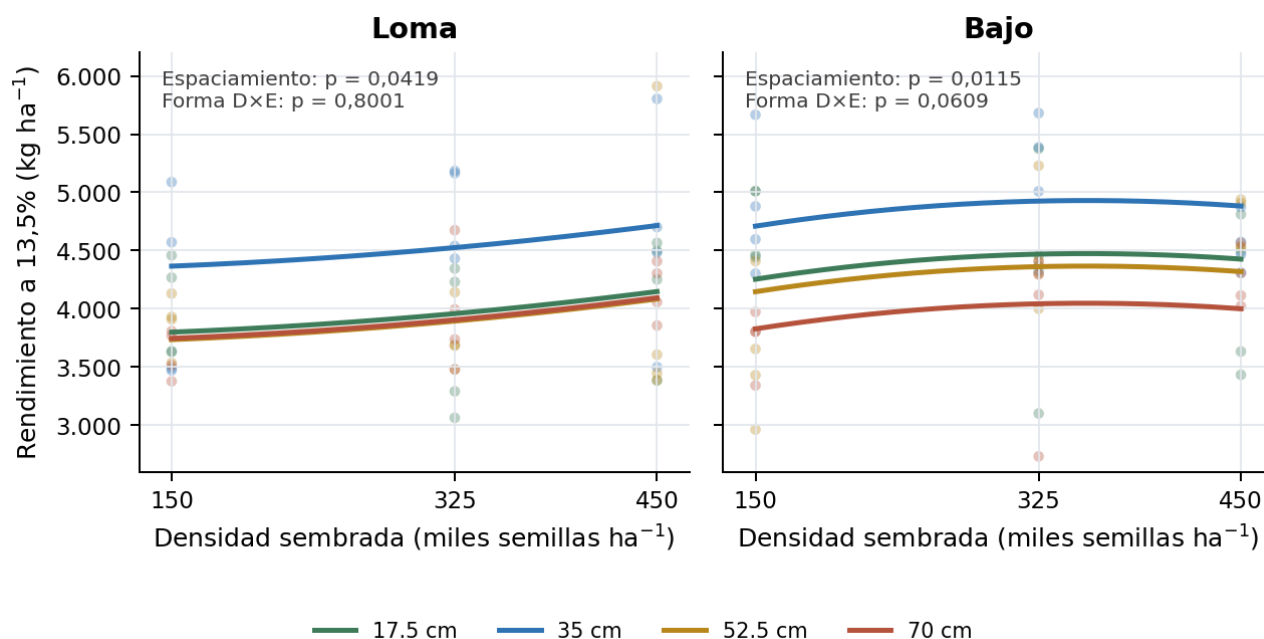


Figura 3. Rendimiento en función de densidad sembrada. Cada punto es una parcela. Curvas cuadráticas con forma común e interceptos por distanciamiento; son interpolaciones entre los tres niveles.

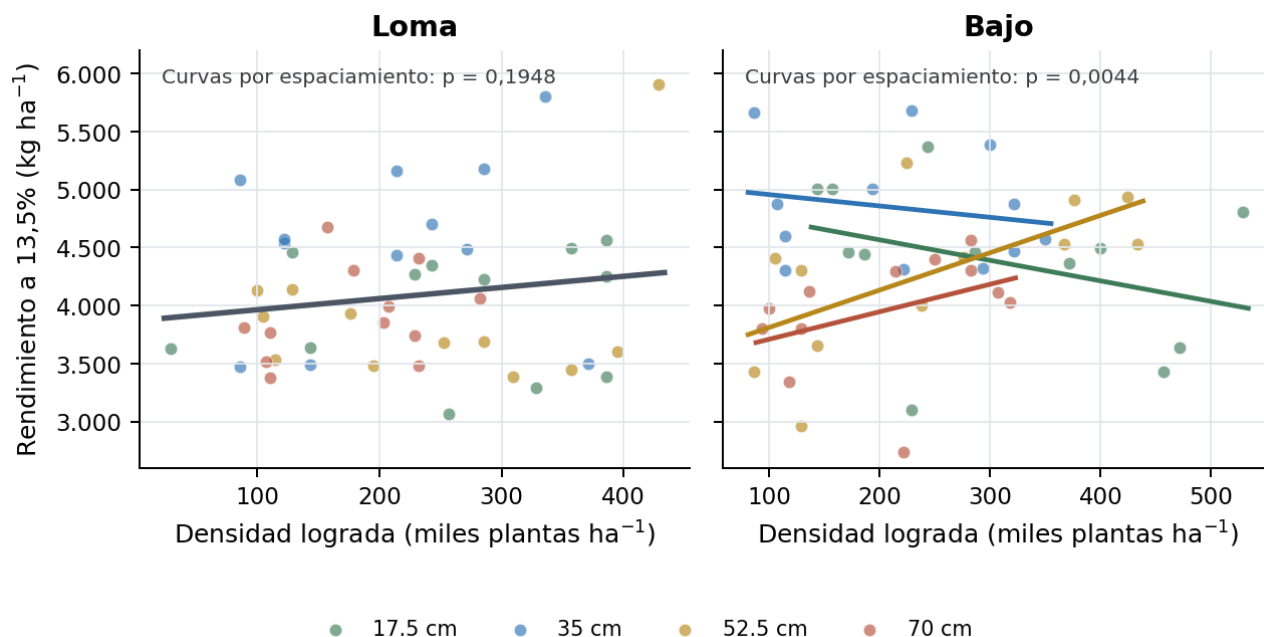


Figura 4. Rendimiento en función de densidad lograda. Cada punto es una parcela. En loma se ajustó recta común; en bajo, rectas por distanciamiento.

Tabla 7. Evaluación de modelos de respuesta del rendimiento de soja a la densidad sembrada y lograda (ver Figuras 3 y 4).

Ambiente	Predictor	Modelo seleccionado	p entre modelos	p cambio de forma e/densidades	R² modelo seleccionado
Loma	Densidad sembrada	Curvas paralelas por densidad	0,0419	0,8001	0,254
Loma	Densidad lograda	Común a todas las densidades	0,1948	—	0,054
Bajo	Densidad sembrada	Curvas paralelas por densidad	0,0115	0,0609	0,269
Bajo	Densidad lograda	Rectas por densidad individual	0,0044	—	0,399

3.4 Efecto de la rectangularidad del planteo sobre el rendimiento

La rectangularidad se definió como la distancia mayor dividida por la menor entre el espaciamiento entre hileras y la distancia media entre plantas dentro de la hilera. El índice es ≥ 1 y vale 1 para una distribución cuadrada (equidistante entre hileras y dentro de la hilera). Se estimó una con la densidad sembrada y otra con la densidad lograda con el recuento real. La rectangularidad sembrada varió entre 1,00 y 22,05; su pendiente fue -0,20 puntos porcentuales por unidad ($p = 0,4251$). La lograda varió entre 1,01 y 15,57, con pendiente -0,42 ($p = 0,2946$). Así, la relación tendió a ser lineal negativa, pero las pendientes no difirieron entre ambientes (Figura 5). La pendiente no significativa indicó que el índice de rectangularidad explicó muy poco de la variación del rendimiento. Las diferencias descriptas previamente entre densidades y, sobre todo, espaciamientos, no se atribuirían a efectos sobre la rectangularidad.

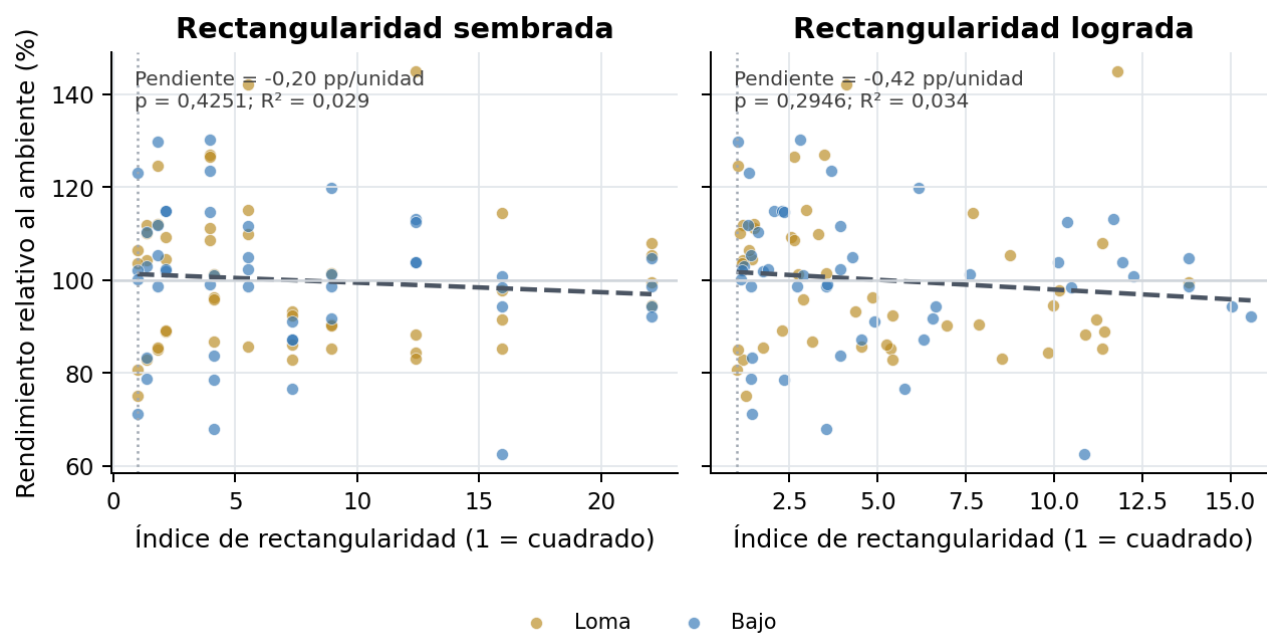


Figura 5. Rendimiento relativo al promedio de cada ambiente en función de rectangularidad sembrada y lograda. Cada punto es una parcela; líneas: regresiones comunes ajustadas por bloque.

3.5 Evolución del NDVI a lo largo del ciclo

El NDVI aumentó hasta 77–93 días desde la emergencia. Las hileras de 70 cm mostraron menor cobertura temprana, especialmente en el ambiente de loma; las diferencias se redujeron hacia febrero próximo al período crítico para la determinación del rendimiento (Figura 6). En el ambiente de bajo los cultivos sostuvieron valores superiores y mayor integral de NDVI respecto de la loma (Tablas 8 y 9). La integral presentó interacción densidad × distanciamiento en ambos ambientes ($p < 0,001$ en loma; $p = 0,0193$ en bajo) (Tabla 8).

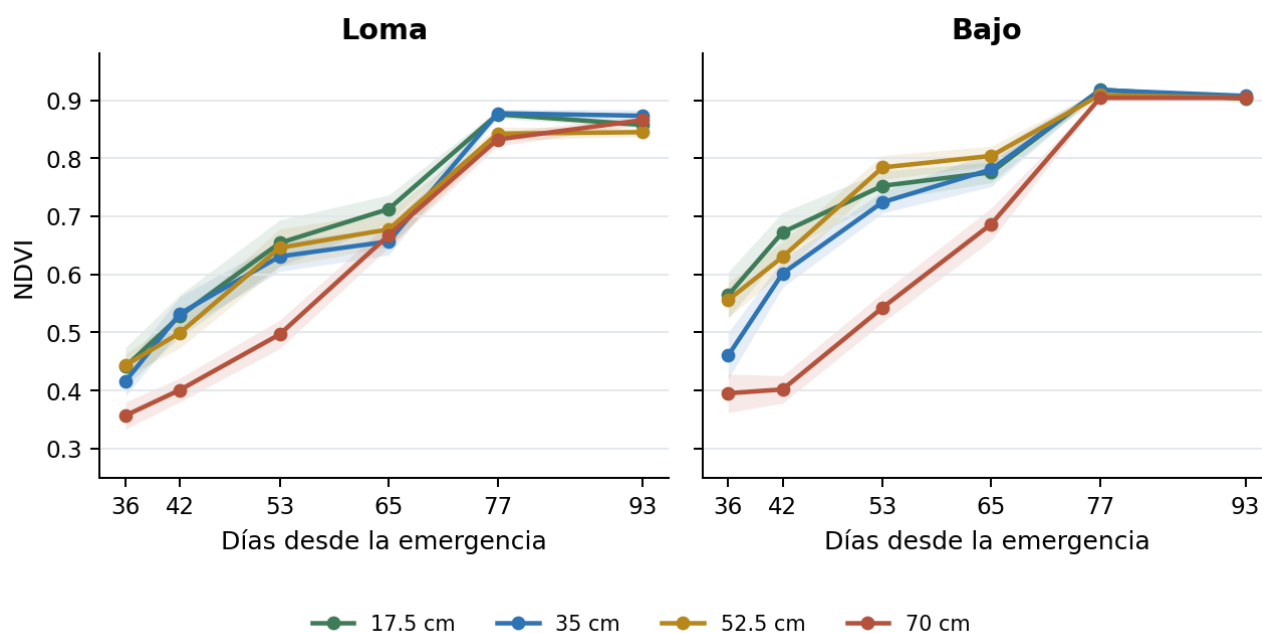


Figura 6. Evolución del NDVI en función de los días desde la emergencia del cultivo de soja para diferentes distanciamientos, promediado entre densidades, para el ambiente de loma y de bajo. Las líneas indican la media; las bandas indican ± 1 error estándar de 12 parcelas.

Tabla 8. Resultados del análisis de la varianza para el efecto de los tratamientos sobre la integral del NDVI, representativa de la eficiencia de intercepción de radiación acumulada durante el ciclo, incluido el efecto de la densidad, el espaciamiento entre surcos y su interacción, para experimentos en ambientes de loma y de bajo.

Ambiente	Fuente para integral NDVI 36-93 DDE	F	p
Loma	Densidad	44,22	<0,0001
Loma	Distanciamiento	22,68	<0,0001
Loma	Densidad × distanciamiento	9,99	<0,0001
Bajo	Densidad	21,22	<0,0001
Bajo	Distanciamiento	48,16	<0,0001
Bajo	Densidad × distanciamiento	2,98	0,0193

Tabla 9. Valores medios del NDVI de soja en función de los días de la emergencia (DDE) e integral de la curva de los valores de NDVI a lo largo del ciclo para diferentes distanciamientos en los ambientes de loma y de bajo.

Ambiente	cm	36 DDE	42 DDE	53 DDE	65 DDE	77 DDE	93 DDE	Integral
Loma	17,5	0,44	0,53	0,65	0,71	0,88	0,86	41,0
Loma	35,0	0,42	0,53	0,63	0,66	0,88	0,87	40,2
Loma	52,5	0,44	0,50	0,65	0,68	0,84	0,84	39,7
Loma	70,0	0,36	0,40	0,50	0,67	0,83	0,87	36,8
Bajo	17,5	0,56	0,67	0,75	0,78	0,92	0,90	45,4
Bajo	35,0	0,46	0,60	0,72	0,78	0,92	0,91	44,3
Bajo	52,5	0,56	0,63	0,78	0,80	0,91	0,90	45,7
Bajo	70,0	0,40	0,40	0,54	0,69	0,90	0,90	39,0

3.6 Rendimiento y relación con sus componentes numéricos

El número de granos explicó gran parte de la variación del rendimiento ($R^2 = 0,81$; $p < 0,0001$) (Figura 7). El peso de mil granos tuvo una asociación extremadamente débil o inexistente ($R^2 = 0,00$; $p = 0,8466$) (Figura 7). Como consecuencia, la respuesta productiva se vinculó principalmente a la variación en la fijación de granos. No se detectaron efectos significativos sobre peso de mil granos. Para número de granos, distanciamiento mostró una tendencia en loma ($p = 0,0604$), sin diferencias al 5% (Tabla 10).

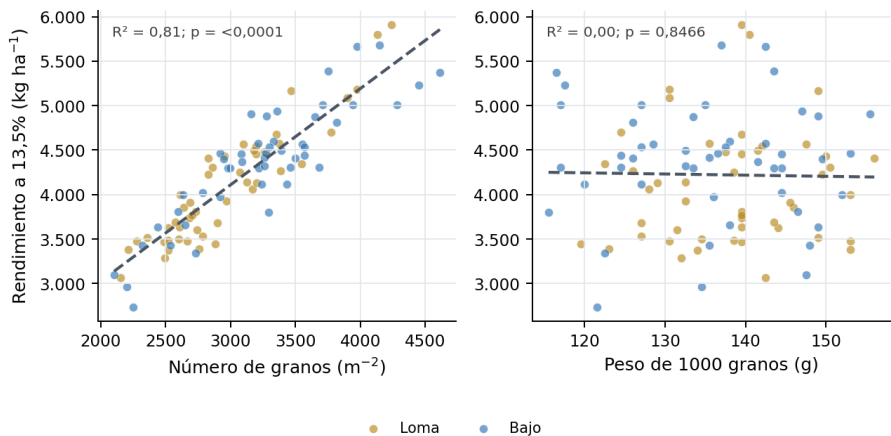


Figura 7. Rendimiento en función del número de granos y el peso de mil granos. Cada punto es una parcela; líneas: regresiones globales.

Tabla 10. Resultados del análisis de la varianza para el efecto de los tratamientos y sus interacciones sobre el número de granos y el peso de mil granos de soja, para experimentos en ambientes de loma y de bajo.

Ambiente	Variable	p densidad	p distanciamiento	p interacción
Loma	Granos m ⁻²	0,4427	0,0604	0,8877
Loma	Peso de 1000 granos	0,6487	0,1475	0,3546
Bajo	Granos m ⁻²	0,5245	0,1175	0,3809
Bajo	Peso de 1000 granos	0,9227	0,4021	0,8173

4) Conclusiones

El ambiente tuvo un efecto promedio menor al esperado sobre la productividad de soja, en un año relativamente húmedo respecto de la media zonal. El bajo superó a la loma en 283 kg ha^{-1} (6,9%; $p = 0,0103$). El logro del cultivo aumentó con la densidad sembrada, pero la relación varió entre distanciamientos (mayor a chorrillo que a placa), aunque la distribución registrada de manera visual fue considerablemente mejor en los distanciamientos sembrados a placa neumática.

El distanciamiento entre surcos fue el único factor de manejo con efecto significativo y consistente. En conjunto, 35 cm fue superior a los otros distanciamientos. No obstante, el efecto no se puede atribuir únicamente al distanciamiento debido a un posible efecto confundido con el sistema de siembra (chorrillo versus placa). Respecto del efecto de la densidad, las tres densidades diferentes evaluadas: 150 (baja densidad respecto al promedio zonal, simulando una mala calidad de implantación), 325 (densidad típica zonal) y 450 (alta densidad, en los límites máximos de la zona) mil semillas ha^{-1} no difirieron como efecto principal. Existieron tendencias generales al aumento del rendimiento con la densidad en ambos ambientes, con mayor respuesta descriptiva en el ambiente de loma, pero el máximo descriptivo a 325 mil y 35 cm en ambos ambientes no difirió estadísticamente del resto.

A pesar de una muy leve tendencia de disminución de rendimiento ante aumentos en la rectangularidad (distanciamientos entre hileras y plantas de la hilera menos equidistantes), el efecto no fue diferente de cero en términos estadísticos y la magnitud descriptiva fue muy reducida.

En línea con el coeficiente de logro y el planteo de distancia entre surcos determinado previamente, la densidad lograda y el distanciamiento afectaron la cobertura acumulada, con interacción en ambos ambientes. En general, las hileras más anchas retrasaron cobertura inicial. No obstante, hacia el período crítico todos los tratamientos evidenciaron valores parejos de cobertura y la integral de la curva del NDVI no generó diferencias, sugiriendo valores similares de captura de radiación global a lo largo del ciclo.

En síntesis, la plasticidad del cultivo de soja se evidenció fuertemente en ambos ambientes, con diferencias de productividad muy leves entre densidades, sugiriendo que la densidad media zonal podría disminuirse levemente en el caso de buscar el óptimo económico, sin perder productividad. Asimismo, la mayor productividad promedio de los tratamientos de 35 cm de distancia entre surcos con dosificación a placa neumática sugieren fuertemente sostener esa estructura de cultivo y sistema de siembra. La exploración de un mayor rango de densidades podría ser de interés para establecer con mayor precisión una curva de respuesta que permita establecer los niveles de densidad óptimos tanto agronómica como económicamente, para diferentes ambientes de productividad.