

Respuesta del rendimiento de soja a la densidad de siembra en ambientes de productividad contrastante

Deborah Gaso¹

¹ INIA La Estanzuela, Ruta 50 km 11, 7000 Colonia, Uruguay. Correo electrónico: dgaso@inia.org.uy

Recibido:11/07/2017 - Aceptado: 04/12/2018

Resumen

El incremento del costo de la semilla de soja ha conducido a una creciente preocupación por conocer la densidad óptima del cultivo. Por este motivo el objetivo de este trabajo fue cuantificar la respuesta en crecimiento y rendimiento a la densidad de siembras en ambientes de productividad contrastantes de Uruguay. Se evaluó la respuesta en rendimiento, número de granos por metro cuadrado (NG), peso de mil granos (PMG) e IAF máximo (IAF_max) en densidades de siembra de 10 a 60 pl m⁻², en tres ambientes de diferente potencial: ambiente limitante (AL), ambiente intermedio (AI) y ambiente alto (AA), dos fechas de siembra y dos años. El rendimiento promedio fue 2239, 3327 y 4139 kg ha⁻¹ para el AL, AI y AA respectivamente. La respuesta en rendimiento se observó únicamente por debajo de 30 pl m⁻². En dos de las seis situaciones el rendimiento se mantuvo estable entre 10 a 60 pl m⁻². No se constataron diferencias en el óptimo de plantas donde se maximiza el rendimiento entre los ambientes productivos. El NG y el PMG fueron estables en el rango de densidades evaluadas. El IAF_max superó los valores críticos en la mayoría de los ambientes, con excepción del año con menor disponibilidad hídrica en el AL. Estos resultados indican que es aconsejable que la densidad a sembrar sea superior al mínimo en el cual no ocurre reducción del rendimiento, como forma de contemplar los riesgos debidos a condiciones adversas aleatorias al momento de la implantación.

Palabras clave: costos de semilla, densidad óptima, rendimiento

Response of Soybean Yield to Planting Density in Environments of Contrasting Productivity

Summary

The increase in the cost of soybeans has led to growing concern about the optimum density of the crop. For this reason, the objective of this work was to quantify the response of growth and yield to the density of sowings in contrasting productivity environments of Uruguay. The response in yield, number of grains per square meter (NG), weight of a thousand grains (PMG) and maximum IAF (IAF_max) in planting densities of 10 to 60 pl m⁻² was evaluated in three environments of different potential: limiting environment (AL), intermediate environment (AI) and high environment (AA), two sowing dates and two years. The average yield was 2239, 3327 and 4139 kg ha⁻¹ for the AL, AI and AA respectively. Yield response was observed only below 30 pl m⁻². In two of the six situations the yield remained stable between 10 to 60 pl m⁻². No differences were found between the environments in regard to the plant optimum where yield is maximized. NG and the PMG showed stability for the range of densities evaluated. The IAF_max exceeded the critical values in most environments, with the exception of the year with the lowest water availability in the LA. These results indicate that it is advisable that the density planted is higher than the minimum where yield reduction does not occur, in order to contemplate the risks due to unpredictable adverse conditions at the time of implantation.

Keywords: seed cost, optimum population, yield

Introducción

La densidad de plantas óptima a sembrar por los agricultores es la cantidad de semillas con la cual se alcanza el mayor retorno económico. En los últimos años el valor de la semilla se ha incrementado debido a la incorporación de nuevos eventos transgénicos. Por lo cual, la semilla a utilizar es cada vez de mayor relevancia para los agricultores debido a lo que representa en la estructura de costos del cultivo. El incremento en 10 pl m⁻² en la densidad de siembra significaría un aumento de 18 dólares americanos por hectárea en el costo del cultivo si se asume un precio promedio del kilogramo de semilla de soja de 0,78 dólares (DIEA, 2015), el peso de mil granos (PMG) de 180 g y un coeficiente de germinación e implantación de 95 %. Por este motivo, conocer la densidad óptima puede resultar en una reducción significativa en los costos totales. En Uruguay, los agricultores siembran a una densidad de 72 y 77 kg ha⁻¹ en siembras de primera y segunda respectivamente (DIEA, 2016). Asumiendo un PMG de 180 g y un coeficiente de germinación e implantación de 90 %, los valores de densidad de siembra reportados por DIEA (2016) equivalen a una población objetivo de 32 y 35 pl m⁻².

La limitada respuesta del cultivo frente a variaciones en la densidad de plantas está asociada a la gran capacidad del mismo de cubrir los espacios entre plantas, debido a la compensación que ocurre por la forma de crecimiento y la capacidad de generar ramas (Cox y Cherney, 2011). Por este motivo, la respuesta positiva del rendimiento al incremento de la densidad de siembra ocurre en bajas densidades, donde no hay competencia entre las plantas y la compensación del cultivo no llega a suplir el aumento en rendimiento por el agregado de plantas; pasado este punto, el rendimiento se estabiliza y alcanza un plateau (Duncan, 1986).

Duncan (1986) define tres fases en la curva de respuesta del rendimiento de soja al incremento de la población: i) la fase I que comprende el rango de densidades de plantas donde incrementos en la densidad producen aumentos de rendimiento, debido a que no hay competencia entre plantas y el rendimiento es directamente proporcional a la densidad de plantas; ii) la fase II que comprende todas las densidades de plantas con las que la intercepción de luz es completa pero incrementos en la densidad de plantas producen aumentos de rendimiento; y iii) la fase III que comprende todas las densidades de plantas donde el rendimiento y la intercepción de luz son estables.

La capacidad de compensación a través del crecimiento y plasticidad del cultivo se traduce en estabilidad en el rendimiento en grano para un rango amplio de densidades de plantas, que puede ir desde 15 pl m⁻² hasta 53 pl m⁻² (Lueschen y Hicks, 1977; Oplinger y Philbrook, 1992; Thompson et al., 2015). En densidades muy bajas, menores a 15 pl m⁻², donde no existe competencia entre plantas, el número de ramas y vainas por planta aumenta, pero no alcanza a compensar la falta de plantas, por lo tanto se reduce el rendimiento (Egli, 1975). La capacidad del cultivo de compensar la reducción del número de plantas a través de crecimiento vegetativo y generación de estructuras reproductivas le confiere alta estabilidad en el rendimiento frente a un rango amplio de densidades de siembra. En contradicción con estos resultados, Cox y Cherney (2011) reportaron una respuesta cuadrática de baja magnitud del rendimiento para densidades de plantas entre 32 y 47 pl m⁻², en grupos de madurez cortos (I y II) y latitudes altas de Estados Unidos (New York). Dicha respuesta está asociada a que los grupos de madurez fueron extremadamente cortos y sembrados en latitudes altas.

La información generada para el cultivo a nivel local y regional (Argentina y Brasil) no es concluyente. Por un lado, en siembras de primera con grupos de madurez IV y V, en Uruguay (departamento de Paysandú), en un año sin deficiencias hídricas, Cepeda y Taran (2008) reportaron respuesta del rendimiento al incremento en la densidad de siembra hasta 75 pl m⁻². En cambio, en trabajos realizados en Brasil para latitudes de 21° y 34°, obtuvieron aumento de rendimiento únicamente hasta la densidad de 40 pl m⁻² (Vazquez, Peres y Tarsitano, 2014; Vernetti, 2002). En Argentina, Rodríguez et al. (2015) evaluaron la respuesta de rendimiento para un rango de 10 a 30 pl m⁻² en dos años, para una variedad del grupo de madurez VI, en siembras de segunda y encontraron que en los dos años la reducción de la densidad hasta 20 pl m⁻² no condujo a una pérdida significativa de rendimiento. Si bien el rendimiento se maximizó en las densidades de plantas más altas en los dos años evaluados, solo en uno de ellos la respuesta fue significativa.

El potencial productivo del ambiente puede condicionar la compensación que expresa el cultivo en crecimiento y rendimiento. Existe cierta controversia sobre el efecto que la productividad del ambiente tiene sobre la densidad de plantas que maximiza el rendimiento. De Bruin y Pedersen (2008a) evaluaron la respuesta a la densidad de siembra para una diversidad de ambientes con diferenciación en la disponibilidad hídrica para latitudes del centro y norte de

Estados Unidos. La productividad de cada uno de los ambientes fue definida en función del promedio de rendimientos para el estado. Los autores encontraron que para maximizar el rendimiento en aquellos ambientes de mayor potencial se requiere menor densidad de siembra que en los ambientes de potencial menor. En tanto, Kamara et al. (2014), reportaron que la densidad óptima es mayor en ambientes con condiciones favorables para el crecimiento. La extensión de la estación de crecimiento del cultivo dada por la combinación de latitud y fecha de siembra determina el potencial productivo del mismo en la medida en que define la radiación potencialmente interceptada. Ball et al. (2001) encontraron que en la medida en que la estación de crecimiento del cultivo se acorta, aumenta el impacto de la densidad de plantas en el rendimiento, debido a que cualquier reducción en el crecimiento vegetativo en densidades de plantas entre 25-35 pl m² puede resultar en menor número de nudos por metro cuadrado y reducir la capacidad de rendimiento.

Durante las últimas décadas, en Uruguay se ha sembrado soja utilizando una única densidad de siembra en suelos cuyo rendimiento potencial limitado por agua difiere. La información reportada muestra cierta controversia respecto a la respuesta del rendimiento a la densidad de siembra dependiendo del potencial productivo del ambiente. Se plantea como hipótesis que el retorno económico de la inversión en semilla depende, además del costo de la semilla y del precio de venta del grano, del número de plantas a la que se maximiza la respuesta del rendimiento al incremento en la densidad, y que este rango depende del ambiente de producción. El objetivo del trabajo es cuantificar la respuesta en crecimiento y rendimiento de la soja a la densidad de siembra en condiciones de disponibilidad hídrica diferencial generada por diversidad de suelos y aportes de agua.

Materiales y métodos

Sitios experimentales

Los experimentos fueron conducidos en tres ambientes de diferente potencial productivo: a. suelo superficial en régimen de seco, que representa el ambiente de potencial limitante (AL); b. suelo profundo en régimen de seco, que representa el ambiente de potencial intermedio (AI); c. suelo profundo con riego suplementario, que representa el ambiente de potencial alto (AA). Los experimentos en los ambientes AI y AA fueron conducidos durante dos años, en las zafas 2013-2014 y 2014-2015, mientras que los expe-

rimientos realizados en el AL se llevaron a cabo en los años 2014-2015 y 2015-2016.

Los ambientes productivos AI y AA fueron conducidos en la localidad de La Estanzuela durante los dos años de estudio, sobre un suelo de la unidad Ecilda Paullier en Las Brujas, según la carta de suelos 1:200.000 para el departamento de Colonia (Ministerio de Agricultura y Pesca, 1996), y al grupo CONEAT 10.6a. La capacidad de almacenaje de agua disponible de dicho suelo fue determinada en 152 mm para una profundidad de suelo de 90 cm. La diferenciación en productividad entre el AA y AI fue generada a través de la incorporación de riego suplementario. El AA tuvo 75 y 55 mm de riego en el año 2013-2014, y 120 y 115 mm de riego en el año 2014-2015, para la fecha de siembra de primera y segunda respectivamente. El AL fue instalado en una localidad situada en el departamento de Flores en la zafa 2014-2015 y en una localidad en el norte de San José en 2015-2016, sobre suelos de la unidad San Gabriel-Guaycurú, según la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay 1:1.000.000 (Ministerio de Agricultura y Pesca, 1976), y al grupo CONEAT 5.02b. Se consideró una capacidad de almacenaje de agua disponible para la unidad San Gabriel-Guaycurú de 92 mm (Molfin y Calífra, 2001). Como forma de caracterizar la disponibilidad hídrica en cada uno de los ambientes productivos se realizaron balances hídricos decádicos. Los datos de precipitación y evapotranspiración del AA e AI fueron extraídos de la estación meteorológica de INIA La Estanzuela. En el sitio AL estos datos fueron estimados de los mapas de INUMet (<https://inumet.gub.uy/ServCii/bh>).

Todos los sitios experimentales se encontraban en una rotación agrícola intensiva y fueron sembrados en siembra directa con una sembradora experimental. Todas las siembras de noviembre fueron en suelos que estuvieron sin cultivo durante el invierno (siembra de primera) y las siembras de diciembre fueron después de la cosecha de un cultivo de invierno (siembra de segunda).

Diseño experimental

Se evaluaron seis niveles de densidad de plantas: 5, 10, 20, 30, 45 y 60 pl m² y un rango de grupos de madurez entre V corto y VI largo. En el AL se utilizaron ocho variedades en 2014-2015: ACA 5814, DM 5663, NA 5009, NA 5509, NS 5019, RA 549, RA 626, SJ 10051, y nueve en el año 2015-2016: ACA 5814, DM 4915, DM 4955, DM 5351, DM 6563, LEO 1823, LEO 2939, NS 5019, NS 6909. En los ambientes AI y AA se utilizaron cuatro variedades en 2013-2014: DM 6.8, NA 5009, RA 549, RM 5500, y tres

variedades en 2014-2015: ACA 5814, DM 6563, NS 5019. El diseño experimental fue de parcelas subdivididas, donde la parcela principal fue la fecha de siembra; cada parcela principal se dividió en subparcelas donde se asignaron al azar los grupos de madurez y cada subparcela fue dividida en sub-subparcelas asignando al azar las densidades de siembra. El mismo diseño experimental se replicó en cada uno de los años y ambientes productivos. El tamaño de parcela fue de 30 m de largo, con cuatro surcos sembrados a una distancia entre la hilera de 0,38 m. En cada uno de los años y localidades, se sembró en dos fechas de forma de representar un ambiente productivo de siembra de primera y de segunda. Las siembras de primera se realizaron entre el 15 y 20 de noviembre y las siembras de segunda entre el 10 y 15 de diciembre sobre rastrojo de trigo o cebada. En todas las situaciones se utilizó una sembradora experimental, con semilla que fue inoculada siguiendo las indicaciones del fabricante. Para cada densidad de siembra se calculó la cantidad de semillas a sembrar según la población objetivo y el coeficiente de germinación de cada variedad, y se asumió 85 % de implantación en los niveles poblacionales de 10, 20 y 30 pl m⁻², 80 % en 40 pl m⁻² y 75 % en 60 pl m⁻². Todos los experimentos tuvieron control total de malezas, plagas y enfermedades.

Determinaciones en el cultivo

El número de plantas fue evaluado cuando el cultivo estuvo entre el estadio V2 y V4 (escala de Fehr y Caviness, 1977). Se realizó un conteo del número de plantas en dos surcos consecutivos en 5 m lineales en cada una de los surcos. No se realizó conteo al momento de cosecha debido a que no se observó muerte de plantas por enfermedades. Se calculó el porcentaje de implantación real obtenido considerando el número de semillas sembradas, el coeficiente de germinación y el número de plantas implantadas. Se realizaron determinaciones periódicas en el cultivo de la evolución del área foliar para determinar el índice de área foliar máximo que alcanzó el cultivo (IAF_max). La evolución del IAF se midió con un ceptómetro (AccuPAR LP-80) con una frecuencia semanal, entre las 12:00 y 15:00 horas, siempre y cuando existieran condiciones de cielo totalmente despejado durante dichas horas.

El rendimiento en grano fue cuantificado en el total de la parcela, con una cosechadora experimental. El porcentaje de humedad se evaluó en el grano cosechado de cada parcela y se corrigió el rendimiento en grano a 14 % de humedad. El peso de mil granos (PMG) se cuantificó para cada parcela a través del peso de dos muestras de 100

granos. El número de granos por metro cuadrado (NG) fue derivado del PMG y el rendimiento de la parcela.

Análisis estadístico

El efecto de la población de plantas en rendimiento, NG, PMG y IAF_max, se estudió analizando en forma conjunta las dos fechas de siembra, dentro de cada año y ambiente productivo. Para el análisis estadístico se utilizó el software Infostat. El análisis de varianza se realizó siguiendo las indicaciones descritas en Infostat para el modelo de parcelas subdivididas. Se utilizó el test de Duncan al 5 % de significancia para la comparación de medias. A continuación se describe el modelo utilizado:

$$y_{ijkl} = \mu + F_i + B_j + \varepsilon_{ij} + C_k + (FC)_{ik} + y_{ijk} + P_l + (FP)_{il} + (CP)_{kl} + (FCP)_{ikl} + \sigma_{ijkl}$$

donde y_{ijkl} correspondiente al i-ésimo tratamiento principal; k-ésimo tratamiento secundario; l-ésimo tratamiento terciario en el j-ésimo bloque; μ es la media general; F_i es el efecto del i-ésimo tratamiento principal, fecha de siembra; B_j es el efecto del j-ésimo bloque; ε_{ij} es el error de la parcela principal; C_k el efecto del k-ésimo tratamiento secundario, cultivar; $(FC)_{ik}$ es el efecto de la ik-ésima interacción; σ_{ijk} es el error de la sub-parcela; P_l es el efecto del l-ésimo tratamiento terciario, población; $(FP)_{il}$ es el efecto de la il-ésima interacción; $(CP)_{kl}$ es el efecto de la kl-ésima interacción; $(FCP)_{ikl}$ es el efecto de la ikl-ésima interacción; σ_{ijkl} es el error de la sub-subparcela.

Resultados

Caracterización hídrica de los ambientes productivos

La Figura 1 representa el porcentaje de agua disponible (% AD) y la evapotranspiración actual (ETa) en cada ambiente, año y fecha siembra. La diferencia en productividad del ambiente definido como AA y AI es consecuencia de la disponibilidad hídrica de cada situación (Figura 1A y B vs C y D), lo cual fue generado con la aplicación de riegos suplementarios. Dichos riegos atenuaron la reducción en % AD entre la tercera década de diciembre y enero en el año 2013-2014 y a partir de la primera década de febrero en el año 2014-2015. En el AL, que fue representado por un suelo superficial de 92 mm de capacidad de almacenaje, la estimación del % AD y la ETa en los dos años evaluados muestra que el cultivo tuvo eventos de estrés hídrico de mayor severidad que en el ambiente AI. En el año 2014-2015 se evidencian estas diferencias en disponibilidad hídrica entre los AI y AL (Figura 1D vs E). La mayor capacidad

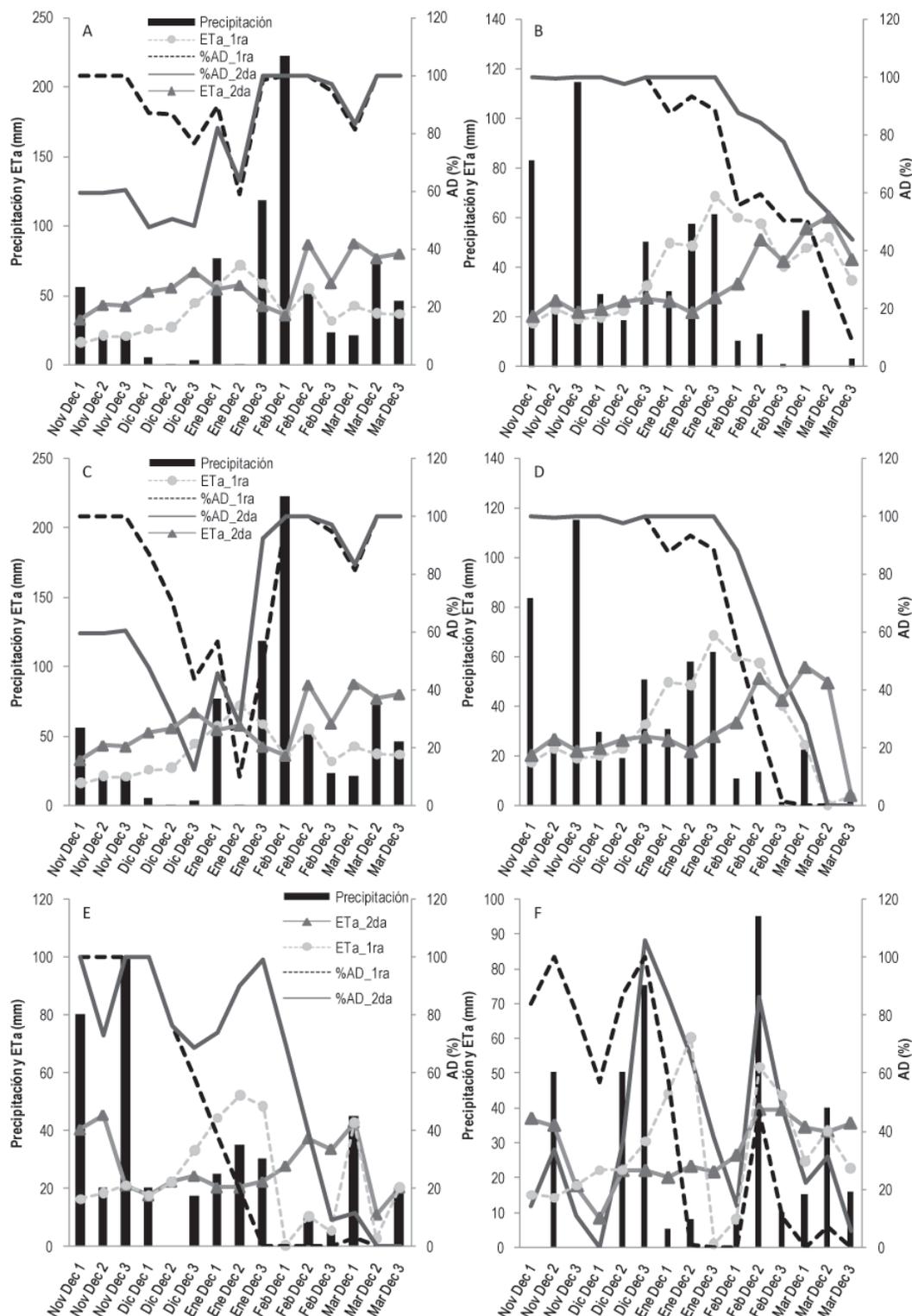


Figura 1. Precipitación, porcentaje de agua disponible en el suelo (%AD) y evapotranspiración actual (ETa) acumulado decádico para cada ambiente productivo, año y fecha de siembra en el periodo de noviembre a marzo. A, C y E año uno en el alto, intermedio y limitante respectivamente. B, D y F año dos en el alto, intermedio y limitante respectivamente.

de almacenaje del AI en comparación con el AL (152 vs 92 mm) amortiguó el agotamiento del suelo en dicho año.

Implantación

En los tres ambientes se logró implantar un rango amplio de densidad de plantas que fue desde 9 hasta 61 pl m⁻² (Cuadro 1). Si bien el número de plantas logrado no se corresponde exactamente con el objetivo, se obtienen incrementos progresivos para los distintos niveles de población objetivo que se diferencian estadísticamente (Cuadro 1). Esto indica que las poblaciones logradas pueden ser consideradas como niveles poblacionales diferentes.

En la mayoría de las situaciones conformadas por fechas de siembra, sitios y años, el coeficiente de implantación disminuyó con el incremento en la población objetivo (Cuadro 1). Esta tendencia se revirtió únicamente en el año

2 (correspondiente a 2014-2015) en las siembras de segunda del AI y AA, donde la implantación fue mayor en las poblaciones más altas. En la Figura 2 se representa cómo, en la medida que aumenta la población objetivo y por tanto la cantidad de semillas sembradas, se incrementa la dispersión en las plantas logradas. La reducción en el coeficiente de implantación de las poblaciones objetivo más altas (45 y 60 pl m⁻²) se refleja en la desviación de la línea 1:1.

Rendimiento

El rendimiento promedio de cada uno de los ambientes evidencia la variación de productividad de los mismos. La variabilidad en el rendimiento entre los años fue mayor en el AI y AL, mientras que en el AA dicha variabilidad fue atenuada con la incorporación de riegos suplementarios (Figura 3).

Cuadro 1. Población lograda por ambiente y año y porcentaje de implantación promedio por ambiente, año y fecha de siembra para cada población objetivo.

Ambiente	Población objetivo (pl m ⁻²)	Año 1		Año 2		Año 1		Año 2	
		Población lograda (pl m ⁻²)				Implantación (%)			
						Fecha de siembra			
Alto						Primera	Segunda	Primera	Segunda
	10	11	e	11	e		85	84	95
	20	21	d	20	d	94	93	78	79
	30	27	c	27	c	70	72	71	74
	45	38	b	49	b	78	59	73	100
	60	49	a	61	a	64	67	59	100
Intermedio									
	10	11	e	11	e		86	84	93
	20	20	d	19	d	92	93	78	77
	30	28	c	27	c	75	75	74	72
	45	37	b	47	b	73	60	75	92
	60	50	a	59	a	65	68	57	100
Limitante									
	10	10	e	9	e	69	92	81	58
	20	17	d	14	d	60	75	52	58
	30	25	c	20	c	60	72	59	40
	45	42	b	39	b	64	83	68	72
	60	46	a	54	a	52	70	72	72

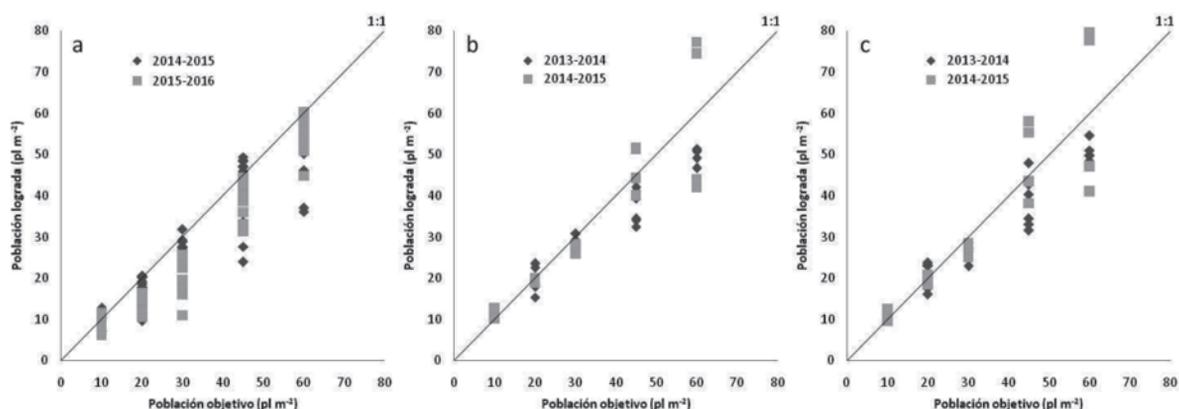


Figura 2. Plantas logradas para cada población objetivo, por año y por ambiente. Limitante (a), intermedio (b) y alto (c).

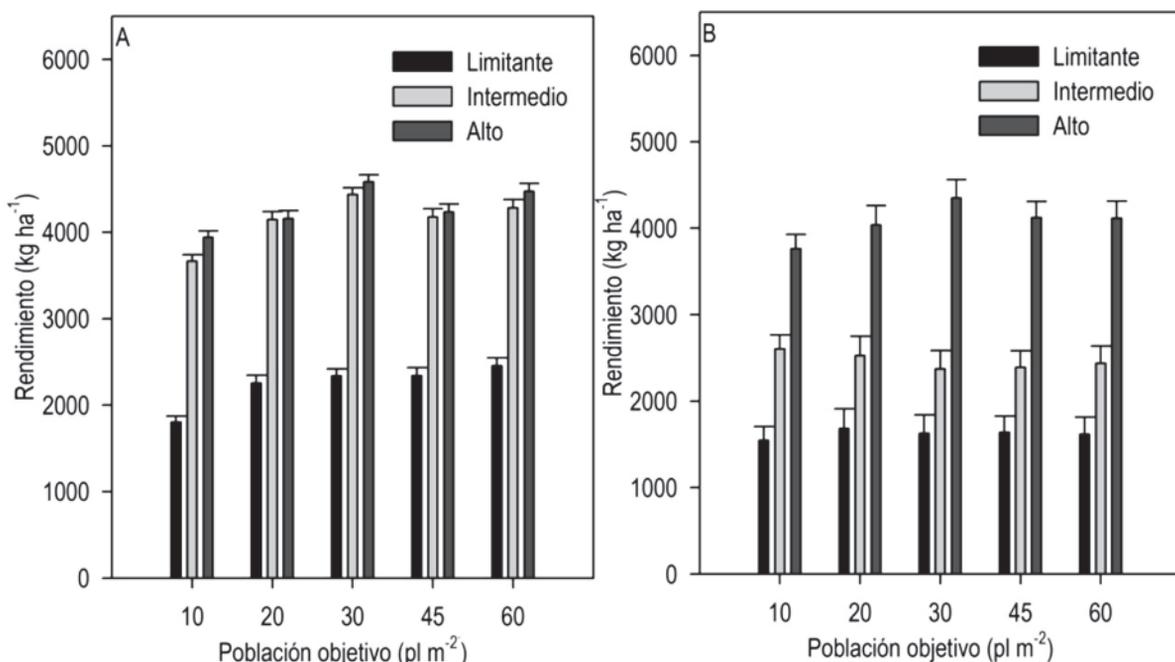


Figura 3. Rendimiento promedio (kg ha^{-1}) para cada población objetivo en el año uno (A) y dos (B) de cada uno de los ambientes. La barra de error se corresponde con el error estándar.

En la mayoría de los casos evaluados (combinación de ambiente productivo y año) se observó una respuesta positiva del rendimiento al incremento en el número de plantas por metro cuadrado. La zafra 2015-2016 en el AL y 2014-2015 en el AI fueron la excepción, el rendimiento se mantuvo estable con el incremento en el número de plantas (Figura 4). Si bien solo en dos de los casos estudiados se constató respuesta significativa del rendimiento al incremento del número de plantas, esta tendencia se observó en otras

situaciones como en 2013-2014 en los ambientes AI y AA. El incremento en rendimiento se observó hasta el nivel de 30 pl m^{-2} . En la medida que el ambiente presentó mayor productividad como en los dos años del AA y el 2013-2014 del AI, el incremento de rendimientos hasta la población de 30 pl m^{-2} fue más evidente (Figura 4B y C).

No se observó interacción entre la población de plantas y la fecha de siembra en ninguno de los seis casos analizados, a excepción de 2014-2015 en el AA ($p = 0,021$). En

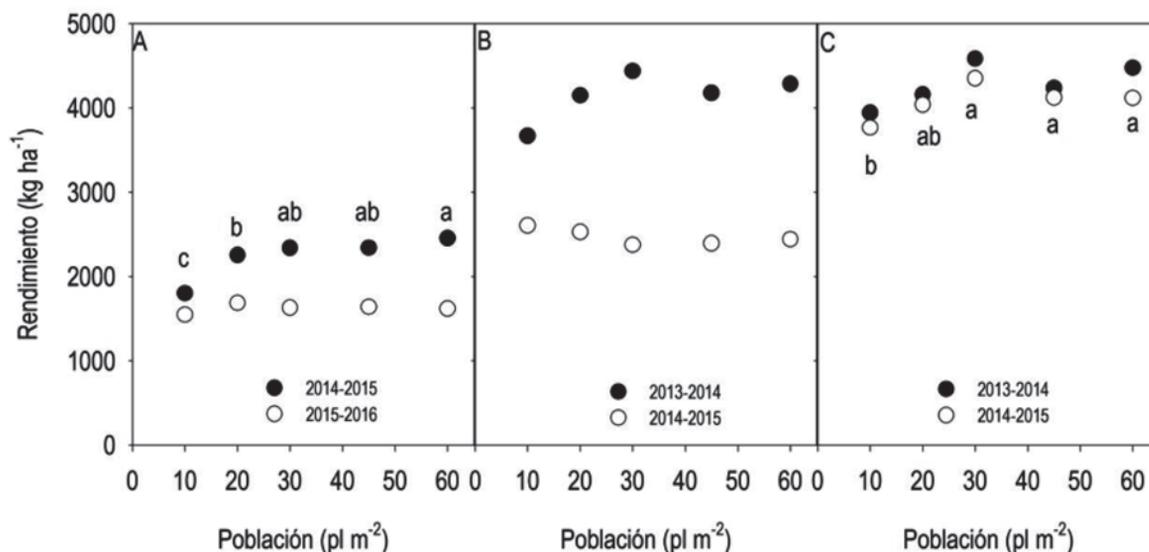


Figura 4. Rendimiento promedio para cada población objetivo por año en el ambiente limitante (A), intermedio (B) y alto (C). Letras distintas indican diferencia significativa en el test de Duncan ($p < 0,05$) entre las poblaciones objetivos para cada ambiente y año.

este ambiente el rendimiento se maximizó en la población de 30 pl m⁻² para la fecha de primera, mientras que en la segunda fue en 40 pl m⁻².

Componentes del rendimiento

El NG y PMG mostraron gran variabilidad entre los ambientes productivos, desde un mínimo de 1042 g m⁻² y 137 g para el NG y PMG respectivamente en el AL, hasta un máximo de 2645 g m⁻² y 182 g en el AA. En las seis situaciones dadas por la combinación de tres ambientes y dos años, ambos componentes manifestaron estabilidad en la medida que se incrementó la densidad de plantas.

Se observó una tendencia a reducir el PMG en la densidad de plantas más bajas del ambiente AI y AA. Esta tendencia se revirtió en 2014-2015 del AI, en que se dio un ambiente con baja disponibilidad hídrica y con incidencia de cancro de tallo durante el llenado de grano (Figura 5B). En este caso se observó un aumento significativo en el tamaño de grano para la población de 10 pl m⁻². La localización del estrés hídrico en cada uno de los años del AI llevó a que el comportamiento del PMG con el incremento en la densidad de plantas fuera desigual entre los años. Para el AL el PMG se mantuvo estable entre las poblaciones de plantas (Figura 5A).

Se constató estabilidad en el NG en la medida que se incrementó la población de plantas para todas las situaciones evaluadas, excepto para uno de los años del AL donde

el NG fue significativamente menor en la densidad de 10 pl m⁻² (Figura 5D). Esto indica que en la mayoría de las situaciones el cultivo expresó la capacidad de compensación a través de la ramificación y del incremento de las estructuras reproductivas por planta, lo que conduce a que el NG manifieste estabilidad en un rango amplio de poblaciones de plantas.

Evolución del índice de área foliar

La Figura 6 ilustra la dinámica del IAF en seis situaciones conformadas por la combinación de fecha de siembra y ambiente productivo para el año 2014-2015. En los ambientes de mayor productividad donde los valores de IAF_max son altos existen mínimas diferencias entre el IAF de poblaciones contrastantes (Figura 6A). En cambio, en el ambiente más restrictivo como es el caso de la fecha de segunda en el AL, se observa mayor dispersión entre la evolución de las curvas de evolución de IAF y el valor de IAF_max. En la siembra de segunda del AA y AI el IAF_max se alcanzó en menor cantidad de días en la densidad más alta (Figura 6D y E). En ambas situaciones fue posible adelantar el momento de total cobertura del cultivo con el incremento en el número de plantas, debido a que no ocurrieron restricciones hídricas durante el período de crecimiento vegetativo de 2014-2015.

El incremento en el número de plantas condujo a aumentos progresivos en el IAF_max en el AL. En cambio,

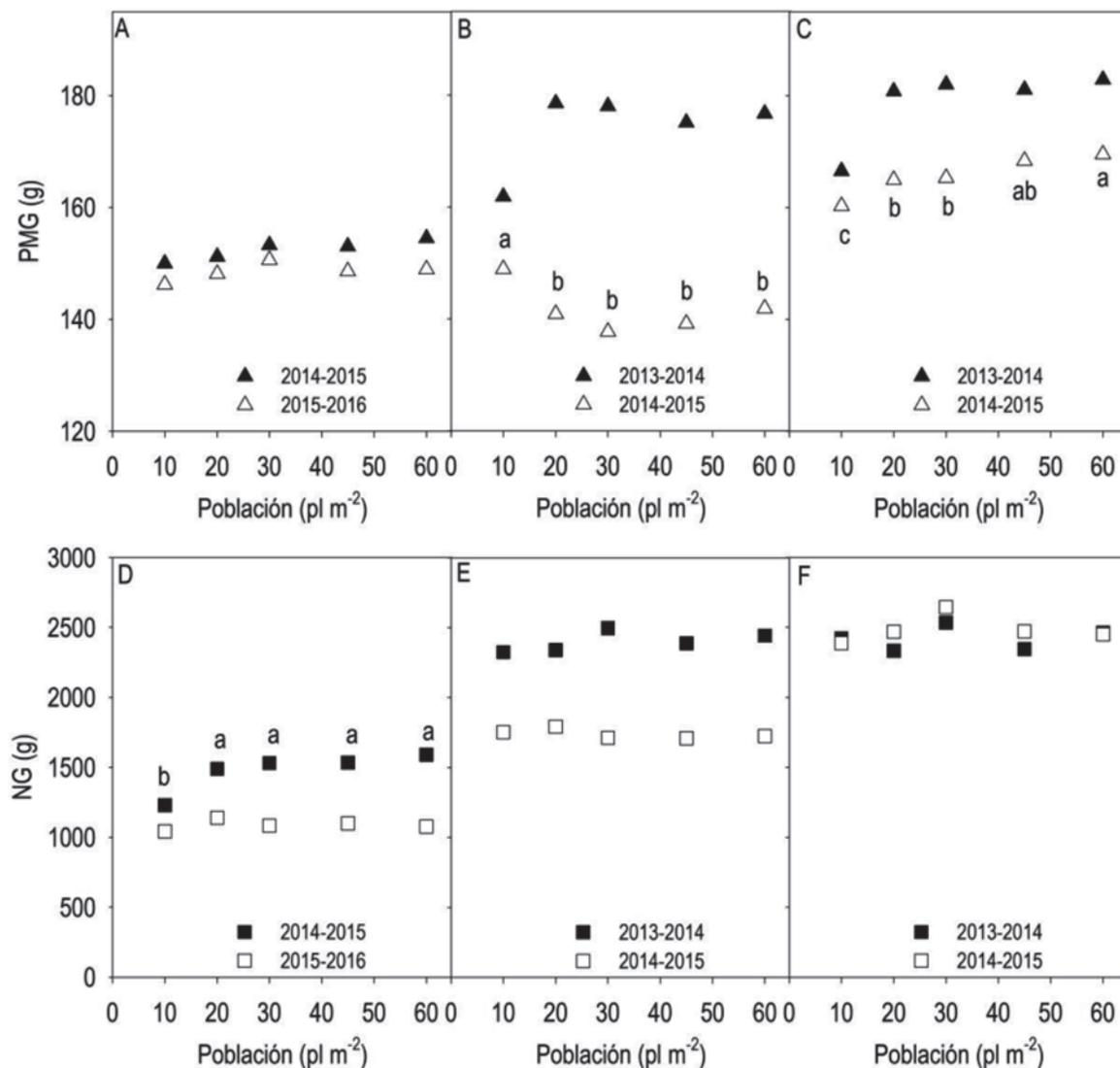


Figura 5. Peso de mil granos (PMG) y número de granos por metro cuadrado (NG) para cada población objetivo por año, en el ambiente limitante (A y D), intermedio (B y E) y alto (C y F). Letras distintas indican diferencia significativa en el test de Duncan ($p < 0,05$) entre las poblaciones objetivo por año.

en el ambiente AI y AA el aumento en los niveles poblacionales produjo incrementos de IAF, pero solamente la población de 10 pl m^{-2} se diferenció significativamente de las más altas (Figura 7). Los bajos valores de IAF_max en la zafra 2015-2016 del AL en todas las poblaciones evaluadas indican que en algunos años, en suelos superficiales del centro del país, no se alcanza el valor de IAF crítico para lograr el 95 % de intercepción de luz (3,5-4) aún en poblaciones tan altas como 60 pl m^{-2} .

Discusión

Se verificó aumento de rendimiento hasta 30 pl m^{-2} en cuatro de los seis casos evaluados, mientras que en los dos restantes el rendimiento se mantuvo estable en todas las poblaciones. Estos resultados son concordantes con los reportados por varios autores, donde se muestra que se produce incremento de rendimiento cuando aumenta la densidad de plantas hasta cierto nivel, por encima del cual el rendimiento se estabiliza o en algunos casos baja

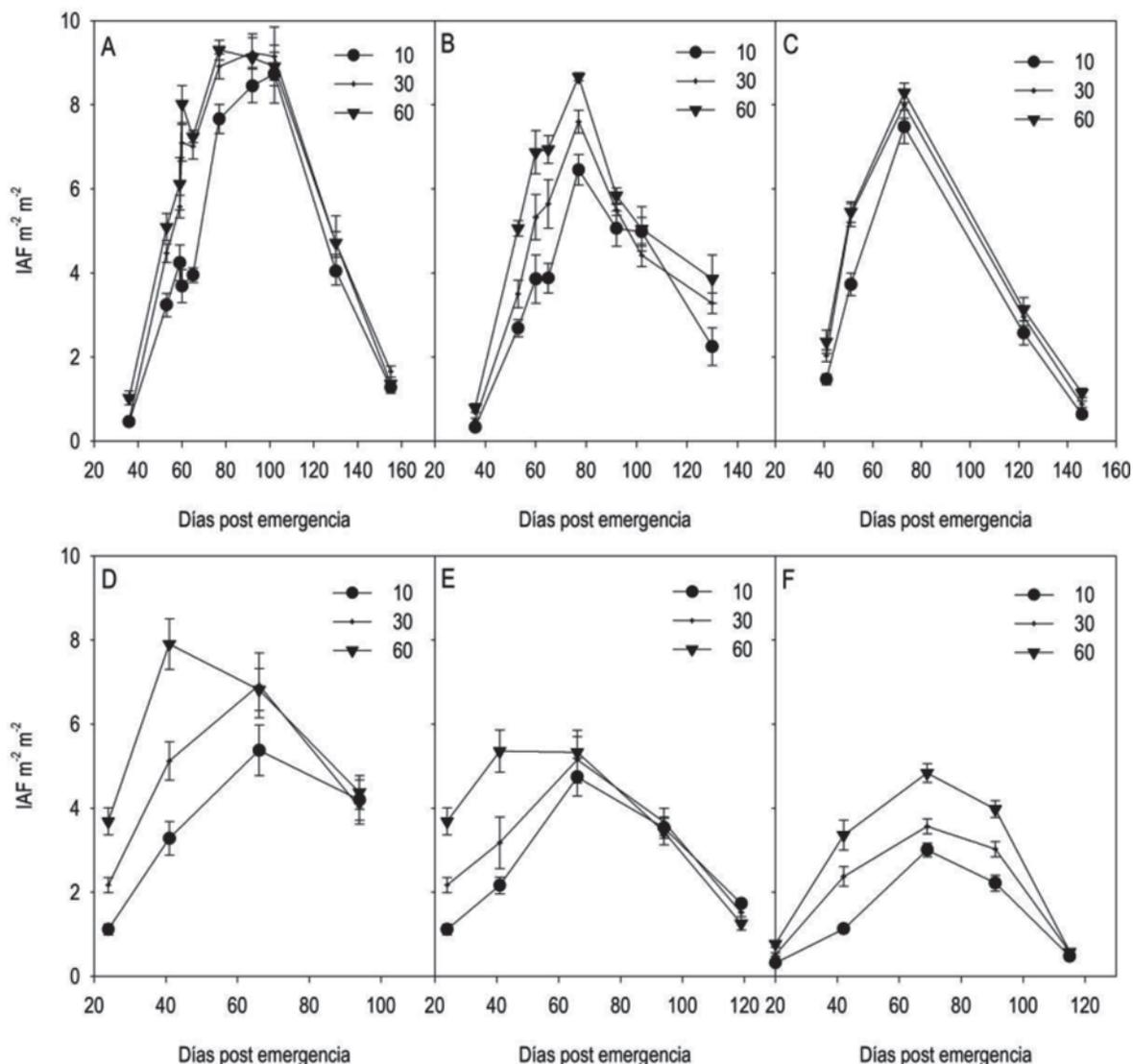


Figura 6. Evolución del índice de área foliar (IAF) en el ambiente alto, intermedio y limitante en fecha de siembra de primera y segunda para el año 2014-2015. A, B y C corresponden con alto, intermedio y limitante en primera respectivamente y D, E y F con alto, intermedio y limitante en segunda respectivamente.

(Weber, Shibles y Byth, 1966; Egli, 1988; Ball, Purcell y Vories, 2000a; Lueschen y Hicks, 1977, Board, 2000, De Bruin y Pedersen, 2008b, Edwards y Purcell, 2005). En cambio en algunas situaciones el plateau en el rendimiento se ha observado para un rango amplio de densidades de siembra, que fue de 10 hasta 60 pl m^{-2} (Lee, Egli y TeKrony, 2008, Thompson et al., 2015).

Si bien existen resultados opuestos en relación al efecto de la productividad del ambiente en el óptimo de la densidad de siembra, en este trabajo no se constató dicho efecto. En

tanto, De Bruin y Pedersen (2008a) reportaron que el óptimo de densidad es menor en los ambientes de mayor productividad, y Kamara et al. (2014) encontraron resultados opuestos: densidad óptima superior en los ambientes de mayor productividad. Los resultados de este trabajo confirman que para los tres ambientes evaluados en Uruguay no se verificó un efecto del ambiente en el óptimo en densidad de plantas.

La respuesta del cultivo en crecimiento, rendimiento y componentes numéricos frente a variaciones en la densi-

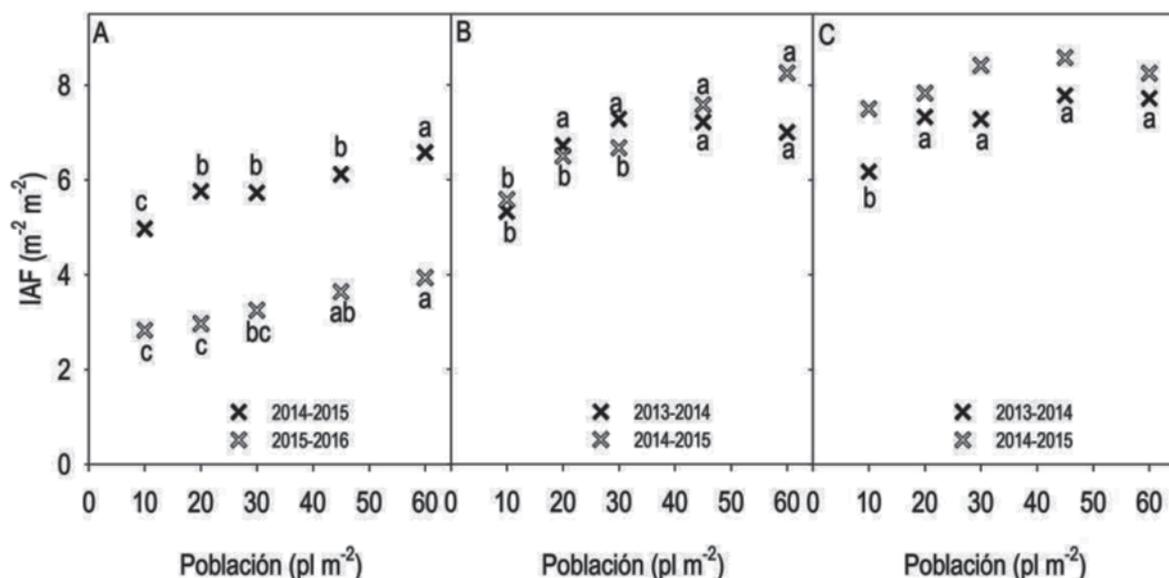


Figura 7. Índice de área foliar máximo (IAF_max) para cada población objetivo por año, en el ambiente limitante (A), intermedio (B) y alto (C). Letras distintas indican diferencia significativa en el test de Duncan ($p < 0,05$) entre las poblaciones objetivo por año.

dad de plantas fue similar entre los ambientes, lo cual explica la falta de diferencia entre los mismos. En ambientes que proporcionan los recursos necesarios para el crecimiento es posible que se exprese la plasticidad a través del crecimiento del cultivo. De este modo, en ambientes de alta productividad, el incremento en la población de plantas podría compensar el atraso en el inicio de la etapa de crecimiento lineal del cultivo, debido a que se adelanta el momento donde se alcanza el 95 % de intercepción de radiación (Ball, Purcell y Vories, 2000b). Este hecho llevaría a que la densidad óptima en dichos ambientes sea menor debido a la posibilidad de expresar la plasticidad del cultivo. Esto no se constató en este estudio, el IAF_max se redujo al disminuir la población de plantas independientemente del ambiente, lo cual ocasionó que el óptimo en densidad de plantas sea similar entre los ambientes.

Como es ampliamente conocido el NG es el componente numérico que explica la pérdida de rendimiento cuando se reduce la densidad de siembra (Egli, 1988; Gan et al., 2002). Sin embargo, en este trabajo este hecho se observó solo en una de las seis situaciones evaluadas (zafra 2014-2015 del AL), donde el detrimento en el rendimiento en la densidad más baja se asoció principalmente a la reducción en el NG. En el resto de las situaciones el NG no manifestó variación con la densidad de plantas, lo cual evidencia que

la plasticidad del cultivo permitió mantener la tasa de crecimiento durante el período crítico para el rango de poblaciones evaluadas. La estabilidad en el NG frente a variaciones en la población de plantas en los tres ambientes evaluados evidencia la igualdad en la respuesta del cultivo entre los ambientes.

Los resultados de este trabajo conducen a ciertas implicancias prácticas en las decisiones de manejo de la población de plantas a sembrar por los productores. Considerando un precio de venta del grano en 330 dólares y que el costo de aumentar 10 pl m⁻² es de 18 dólares, un incremento de rendimiento mayor a 55 kg ha⁻¹ justificaría el aumento en 10 pl m⁻² en la densidad de siembra. Por la tanto, en función de la ganancia de rendimiento por el incremento en la población de plantas y los riesgos de obtener una implantación desfavorable por la ocurrencia de factores adversos (bajas temperaturas y excesos o déficit hídricos), es aconsejable que la población objetivo a sembrar sea superior al mínimo para obtener los máximos rendimientos. En concordancia con esta idea, Lueschen y Hicks (1977) proponen que es preferible no utilizar la mínima densidad de plantas donde se maximiza el retorno económico, como forma de asegurar que la población final no sea menor al valor límite donde ocurre detrimento del rendimiento debido a fallas en la implantación.

Conclusiones

En los tres ambientes (AL, AI y AA) el aumento de la densidad de plantas hasta 30 pl m² condujo a incrementos de rendimiento. En dos de las seis situaciones evaluadas, se constató estabilidad del rendimiento para el rango entre 10 y 60 pl m², la cual se asoció a la ocurrencia de restricciones hídricas (2015-2016 en el AL y 2014-2015 en el AI).

Si bien los resultados muestran que el rendimiento se puede maximizar con poblaciones bajas, de 30 pl m² y en otros casos fue estable para todo el rango de densidades evaluadas, la ocurrencia de condiciones adversas en la implantación implicaría un riesgo eminente de pérdida de plantas y por lo tanto que la población final lograda estuviera por debajo de ese valor límite donde no ocurre reducción del rendimiento. Considerando el bajo costo que significa incrementar 10 pl m² respecto a la ganancia en rendimiento, es aconsejable que la densidad de siembra sea superior al mínimo donde no ocurre reducción del rendimiento, como forma de contemplar los riesgos debidos a condiciones adversas aleatorias.

Agradecimientos

A la sección de ecofisiología y manejo de cultivos y a la sección de riego de INIA La Estanzuela.

Bibliografía

- Ball, R. A., Purcell, L. C. y Vories, E. D. (2000a). Short-season soybean yield compensation in response to population and water regime. *Crop Science*, 40(4), 1070-1078.
- Ball, R. A., Purcell, L. C. y Vories, E. D. (2000b). Optimizing soybean plant population for a short-season production system in the Southern USA. *Crop Science*, 40(3), 757-764.
- Ball, R. A., Mcnew, R. W., Vories, E. D., Keisling, T. C. y Purcell, L. C. (2001). Path analyses of population density effects on short-season soybean yield. *Agronomy Journal*, 93(1), 187-195.
- Board, J. (2000). Light interception efficiency and light quality affect yield compensation of soybean at low plant populations. *Crop Science*, 40 (5), 1285-1294.
- Cepeda, C. S. y Taran, S. H. (2008). *Impacto de la población, distancia entre hileras y cultivar en el rendimiento de soja* (Tesis de grado). Facultad de Agronomía, Montevideo, Uruguay.
- Cox, W. J. y Cherney, J. H. (2011). Growth and yield responses of soybean to row spacing and seeding rate. *Agronomy Journal*, 103(1), 123-128.
- De Bruin, J. L. y Pedersen, P. (2008a). soybean seed yield response to planting date and seeding rate in the Upper Midwest. *Agronomy Journal*, 100(3), 696-703.
- De Bruin, J. L. y Pedersen, P. (2008b). Effect of row spacing and seeding rate on soybean yield. *Agronomy Journal*, 100(3), 704-710.
- DIEA. (2015). *Anuario de precios 2015*. Recuperado de <http://www2.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,diea,diea-pre-productos-insumos-bienes-de-capital-y-servicios,O,es,0>
- DIEA. (2016). *Encuesta Agrícola Primavera 2015*. Montevideo: MGAP. (Serie Encuestas No. 335). Recuperado de http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/encuesta_agricola_primavera_2015.pdf
- Duncan, W. G. (1986). Planting patterns and soybean yields. *Crop Science*, 26(3), 449-453.
- Edwards, J. T. y Purcell, L. C. (2005). Soybean yield and biomass responses to increasing plant population among diverse maturity groups. *Crop Science*, 45(5), 1770-1777.
- Egli, D. B. (1975). Rate of accumulation of dry weight in seed of soybeans and its relationship to yield. *Canadian Journal of Plant Science*, 55(1), 215-219.
- Egli, D. B. (1988). Plant density and soybean yield. *Crop Science*, 28(6), 977-981.
- Fehr, W. R. y Caviness, C. E. (1977). *Stages of soybean development*. Ames, Iowa: Iowa State University.
- Gan, Y., Stulen, I., Keulen, H. V. y Kuiper, P. J. C. (2002). Physiological response of soybean genotypes to plant density. *Field Crops Research*, 74(2-3), 231-241.
- Kamara, A. Y., Ewansiha, S. U., Boahen, S. y Tofa, A. I. (2014). Agronomic response of soybean varieties to plant population in the Guinea savannas of Nigeria. *Agronomy Journal*, 106(3), 1051-1059.
- Lee, C. D., Egli, D. B. y TeKrony, D. M. (2008). Soybean response to plant population at early and late planting dates in the Mid-South. *Agronomy Journal*, 100(4), 971-976.
- Lueschen, W. E. y Hicks, D. R. (1977). Influence of plant population on field performance of three soybean cultivars. *Agronomy Journal*, 69(1), 390-393.
- Ministerio de Agricultura y Pesca. (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay a escala 1/1.000.000*. Montevideo: MAP.
- Ministerio de Agricultura y Pesca. (1996). *Carta de suelos digital a escala 1:200.000 del departamento de Colonia*. Montevideo: MAP.
- Molfino, J. H. y Califra, A. (2001). *Agua disponible de las tierras del Uruguay*. Recuperado de http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/multimedia/2082_1395761584AguadisponibleenSuelosdelUruguayversioncorr.pdf
- Oplinger, E. S. y Philbrook, B. D. (1992). Soybean planting date, row width, and seeding rate response in three tillage systems. *Journal of Production Agriculture*, 5(1), 94-99.
- Rodríguez, H., De Battista, J., Arias, N., García, E., Sosa, F., Alaluf, C. y Rochás, M. (2015). *Efectos de la reducción de la densidad de siembra en soja*. Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-reduccion_de_la_densidad_de_siembra_en_soja.pdf
- Thompson, N. M., Larson, J. A., Lambert, D. M., Roberts, R. K., Mengistu, A., Bellaloui, N. y Walker, E. R. (2015). Mid-south soybean yield and net return as affected by plant population and row spacing. *Agronomy Journal*, 107(3), 979-989.
- Vazquez, G. H., Peres, A. R. y Tarsitano, M. A. A. (2014). Redução na população de plantas de soja e o retorno econômico na produção de grãos. *Científica, Jaboticabal*, 42(2), 108-117.
- Vernetti F. de J. (2002). *Efeito da população e do arranjo de plantas sobre três cultivares de soja de ciclos diferentes em Área de Várzea*. Pelotas: Embrapa. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 1). Recuperado de <https://www.embrapa.br/clima-temperado/busca-de-publicacoes/-/publicacao/744153/efeito-da-populacao-e-do-arranjo-de-plantas-sobre-tres-cultivares-de-soja-de-ciclos-diferentes-em-area-de-varzea>
- Weber, C. R., Shibies, R. M. y Byth, D. E. (1966). Effect of plant population and row spacing on soybean development and production. *Agronomy Journal*, 58(1), 99-102.