

EFICIENCIA DE USO DEL AGUA DE CULTIVARES DE SOJA DESARROLLADOS PARA LA PAMPA CENTRAL ARGENTINA: EFECTOS DEL MEJORAMIENTO GENÉTICO Y DEL AMBIENTE

S.R. Avalos Brítez¹, A.D. Severini², A.G. Cirilo², M.E. Otegui³

1 Becaria doctoral, BECAL-FAUBA. Ruta 32, km 4,5, Pergamino (2700), Buenos Aires, Argentina. savalos@agro.uba.ar. 2 INTA EEA Pergamino. Ruta 32, km 4,5, Pergamino (2700), Buenos Aires, Argentina. severini.alan@inta.gob.ar, cirilo.alfredo@inta.gob.ar. 3 CONICET-INTA-FAUBA, Av. San Martín 4453 (1417), CABA, Argentina. otegui@agro.uba.ar

Palabras claves: soja, grupos de madurez, eficiencia de uso de agua, evapotranspiración, biomasa, ganancia genética.

INTRODUCCIÓN

En los próximos años se prevé un aumento importante en la demanda mundial de alimentos como producto de un incremento de la población. Para cubrir esa demanda, la producción deberá aumentar a casi el doble (Ray *et al.*, 2013). Argentina es uno de los principales países productores y exportadores de soja *Glycine max* (L.) Merr. Si se quiere aumentar la producción sin extender la agricultura hacia los ambientes más frágiles se debe aumentar el rendimiento en ambientes aptos. Para lograrlo resulta crítico efectuar estudios sobre ganancia genética para rasgos secundarios en el ambiente para el cual los genotipos fueron seleccionados, en particular cuando se trata de evaluar la respuesta a estrés (Bänziger *et al.*, 1997). Sin embargo, es casi inexistente el conocimiento de los efectos de los programas de mejoramiento genético sobre los determinantes fisiológicos del rendimiento de soja en la región. La única evidencia disponible corresponde a condiciones potenciales de crecimiento (de Felipe *et al.*, 2016), siendo nula la información referida al requerimiento y consumo de agua.

El objetivo de este trabajo fue caracterizar la productividad de biomasa, el consumo de agua y la eficiencia en el uso del agua (EUA) de un grupo acotado de variedades de soja pertenecientes a grupos de madurez (GM) IV-V liberadas entre 1982 y 2016.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se evaluaron en condiciones de campo variedades de soja pertenecientes a GMs IV- V liberadas al mercado entre 1982 a 2016 en dos campañas agrícolas contrastantes (año 1: 2016/17; año 2: 2017/18) en la Estación Experimental Agropecuaria Pergamino (INTA) (33° 56' S, 60° 33' W), sobre un suelo arcillo-limoso (Argiudol Típico de la serie Pergamino), con una profundidad efectiva del perfil superior a 2 m. Se utilizaron 14 variedades liberadas entre 1982 y 2016. Cada unidad experimental consistió en una parcela de 6 surcos con 5 m de largo, con un espaciamiento entre hileras de 0,35 m (año 1) y 0,52 m (año 2). Las siembras se efectuaron el 23 y 17 de noviembre de cada año, respectivamente, a una densidad de 300000 plantas ha⁻¹. Se distribuyó a las variedades en un diseño en bloques completos aleatorizados con 4 repeticiones. En ambos años se determinó la biomasa aérea total (BT) en las etapas R1, R3, R5, R6 y R7 (Fehr y Caviness, 1977), la evapotranspiración del cultivo (ETc) desde emergencia a R7 (consumo medido hasta 2 m de profundidad) por medio de sonda de neutrones y el rendimiento en grano (RG) en R7. Se analizó la acumulación de biomasa y del consumo de agua (de aquí en más evapotranspiración acumulada, ETc) por medio de modelos sigmoideos ajustados como regresiones bayesianas en Stan (Carpenter *et al.*, 2017) a través del paquete *brms* (Bürkner, 2017) de R (R CoreTeam, 2019).

El modelo ajustado tanto para BT (kg ha⁻¹) como para ETc (mm) fue:

$$y = \frac{a}{1 + (x-b)^c}$$

donde y es la variable respuesta (BT o ETc); x son los días desde la emergencia del cultivo; a es la asíntota (i.e. el máximo valor que puede tomar la función); b es un parámetro que equivale a los días desde la emergencia cuando la función vale $a/2$; y c es un parámetro que caracteriza a la pendiente en el punto de inflexión.

Los parámetros a , b y c fueron modelados como función del año experimental, la variedad, y la interacción año \times variedad a través de modelos jerárquicos. Se eligió al modelo más parsimonioso (e.g. a de la sigmoidea de biomasa mejor explicado por el año, sin efecto de la variedad o de la interacción año \times variedad), tanto para biomasa como para ETc, por medio de criterios de información determinados por medio de *leave-one-out cross-validation* con el paquete *loo* (Vehtari et al., 2017) en R. Para calcular la eficiencia de uso de agua (EUA), se procedió en tres pasos. Primero, se calcularon las tasas de crecimiento del cultivo (TCC) y la tasa de ETc derivando sus respectivas funciones sigmoideas. La función derivada de cada modelo elegido fue:

$$dy/dx = a \frac{(e^{(b-x)c}c)}{(1 + (b-x)c)^2}$$

Luego, se calculó el máximo de cada función como:

$$\text{TCC max o Tasa de ETc max} = \frac{4a}{c}$$

Por último, se calculó la EUA como el cociente entre la TCC máxima y la tasa de ETc máxima. Debido a que en los momentos a los cuales se alcanzaron las máximas tasas el cultivo se encontraba en cobertura total y/o con registros nulos de precipitación, lo cual supone minimizar la evaporación del suelo, el cociente entonces equivale a la eficiencia transpiratoria.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Durante el ciclo del cultivo se registraron precipitaciones de 835 mm y de 351 mm para el año 1 y el año 2, respectivamente, lo cual permitió explorar condiciones climáticas contrastantes. Los rendimientos promedios para ambas campañas fueron de 5.365 y 3.015 kg ha⁻¹, con una producción de biomasa aérea total de 13.738 y 9.624 kg ha⁻¹, respectivamente.

El modelo que mejor explicó el crecimiento en biomasa tuvo parámetros b y c únicos para todas las variedades y años experimentales, pero una asíntota a mayor en el año 1 que en el año 2. El crecimiento, entonces, no difirió entre variedades. En cuanto a la ETc a lo largo del ciclo, el parámetro c fue único para todas las variedades y para ambos años, pero existieron efectos del año para b y efectos del año y de la variedad sobre la asíntota a . No existieron interacciones año \times variedad sobre ninguno de los parámetros, ni en el modelo de BT ni en el de ETc. El valor de a fue de 453 mm para el año 1 y de 355 mm para el año 2 (Fig. 1a). Por su parte, las variedades que más difirieron en a fueron DM5.8i (a = 460 mm) y NA4990RG (a = 420 mm) (Fig. 1b).

La EUA fue afectada por el año experimental, siendo mayor en el año 1 que en el año 2 (Tabla 1). Esto pudo en parte deberse al mayor déficit de presión de vapor (DPV), centrado 15 días alrededor del momento de máximas TCC y ETc, de la segunda campaña respecto a la primera (0,83 vs 0,67 kPa). Pese a que las variedades no difirieron en acumulación de biomasa, se observó una leve tendencia de las variedades más modernas a consumir menos agua en todo el ciclo (Tabla 1). Como consecuencia, existió una tendencia a mayor EUA a medida que aumentó el año de liberación (Fig. 2), con una pendiente de 0,02 kg ha⁻¹ año⁻¹ (intervalo de confianza entre -0,01 y 0,04 kg ha⁻¹ año⁻¹).

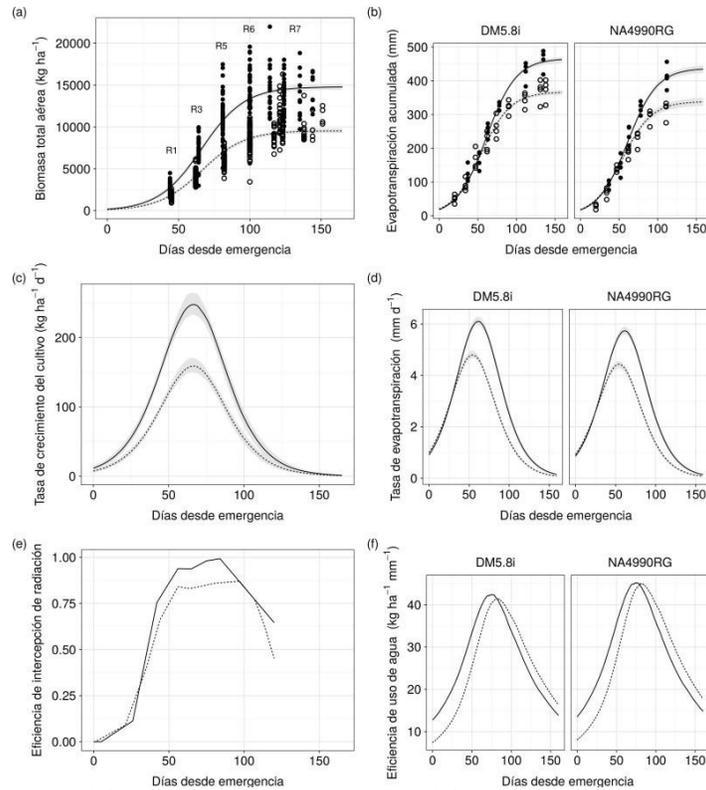


Figura 1. Evolución de (a) la biomasa total aérea y (b) la evapotranspiración acumulada del cultivo (ETc) durante el ciclo de 14 variedades de soja analizadas a campo durante dos campañas (2016/17, 2017/18). En (a) se denotan los estados fenológicos, de manera orientativa, como promedios de todas las variedades. En (b) se destaca la ETc de las dos más contrastantes en EUA (Fig. 2). En (c) se observa la derivada de la sigmoidea de biomasa, i.e. la tasa de crecimiento del cultivo, y en (d) se ve la derivada de la ETc, i.e. la tasa de ETc, sólo para las variedades contrastantes. En (e) se observa la eficiencia de intercepción de radiación desde la emergencia, con máximos de 0,97 y de 0,84 promedio para cada año, y en (f) la evolución de la eficiencia de uso del agua para producir biomasa de las dos variedades contrastantes. Las líneas continuas con círculos llenos corresponden a la campaña 2016/17 y líneas discontinuas con círculos vacíos al 2017/18.

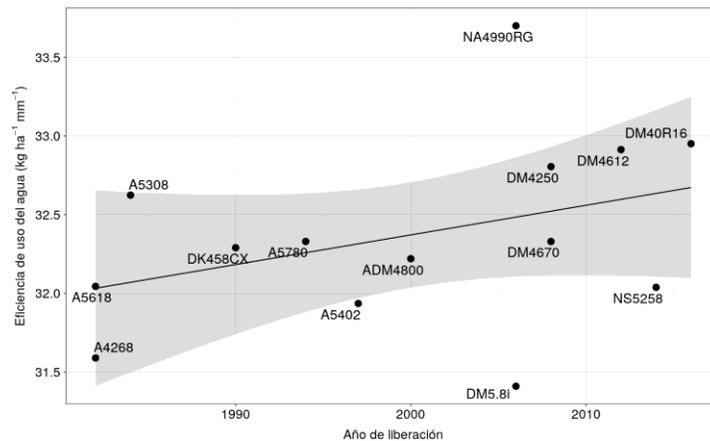


Figura 2. Relación entre la eficiencia de uso de agua para producir biomasa ($\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$) y el año de liberación de 14 variedades de soja cultivadas entre 1982 y 2016 con un $R^2 = 0,16$.

Tabla 1. Evapotranspiración del cultivo (ETc) total y máxima (ETc máx), biomasa total (BT) a R7, tasa de crecimiento del cultivo máxima (TCC máx) y eficiencia de uso del agua para producir biomasa (EUA BT) de 14 variedades de soja liberadas entre 1982 y 2016, para las dos campañas (2016/17 y 2017/18).

Año de Liberación	Variedad	2016/17					2017/18				
		ETc total (mm)	BT (kg ha ⁻²)	ETc máx (mm d ⁻¹)	TCC máx (kg ha ⁻² d ⁻¹)	EUA BT (kg ha ⁻² mm ⁻²)	ETc total (mm)	BT (kg ha ⁻²)	ETc máx (mm d ⁻¹)	TCC máx (kg ha ⁻² d ⁻¹)	EUA BT (kg ha ⁻² mm ⁻²)
		14809,6			247,4057		9535,35		159,2428		
1982	Asgrow 4268	463,38		6,07		40,79		364,59		4,77	33,37
1982	A5618	457,64		5,99		41,31		358,86		4,70	33,91
1984	Asgrow 5308	449,97		5,89		42,02		351,17		4,60	34,65
1990	DK 458CX	453,88		5,94		41,64		355,14		4,65	34,26
1994	A5780	453,55		5,94		41,68		354,82		4,64	34,29
1997	A5402	458,74		6,00		41,22		359,86		4,71	33,81
2000	ADM4800	455,20		5,96		41,53		356,38		4,66	34,14
2006	DM5.8i	465,68		6,09		40,62		366,83		4,80	33,18
2006	NA 4990 RG	437,48		5,73		43,20		338,72		4,43	35,93
2008	DM4250	447,80		5,86		42,23		348,97		4,57	34,87
2008	DM4670	453,88		5,94		41,64		355,14		4,65	34,26
2012	DM 4612 RSF	446,16		5,84		42,36		347,41		4,55	35,02
2014	NS5258	457,49		5,99		41,33		358,64		4,69	33,92
2016	DM40R16	446,60		5,85		42,31		347,83		4,55	34,98
	Promedio	453,39		5,93		41,71		354,60		4,64	34,33

La sequía registrada en el año 2 afectó tanto a la ETc como a la BT, pero no modificó de manera relevante la eficiencia transpiratoria (EUA max), a diferencia de lo sugerido por Liu et al. (2005) al contrastar tratamientos de déficit hídrico y riego en condiciones controladas de crecimiento. La ausencia de diferencias en EUA max de nuestro estudio podría atribuirse a efectos diferenciales del DPV entre años (Abbate et al., 2004). Las variedades modernas consumieron menos agua en todo el ciclo que las antiguas. Puesto que la producción de biomasa no cambió entre ellas, se observó una ganancia en la eficiencia de uso del agua de 0,02 kg ha⁻¹ año⁻¹ nunca antes reportada en soja creciendo a campo.

BIBLIOGRAFÍA

- ABBATE, PE., DARDANELLI, PE., CANTARERO, MG., MATURANO, M., MELCHIORI, RJM., SUERO, EE. 2004. Climatic and water availability effects on water-use efficiency in wheat. *CropSci.* 44:474–483
 - BÄNZIGER, M., LAFITTE, HR. 1997 Efficiency of secondary traits for improving maize for low-nitrogen target environments. *Crop Science* 37:1110-1117.
 - BÜRKNER, M., 2017.brms: An R package for Bayesian multilevel models using Stan. *Journal of Statistical Software.* Volume 80, Issue 1. doi: 10.18637
 - CARPENTER, B., GELMAN, A., HOFFMAN, MD., LEE, D., GOODRICH, B., BETANCOURT, M., BRUBAKER, M., GUO, J., LI, P., RIDDELL, A. 2017. Stan: A Probabilistic Programming Language. *Journal of Statistical Software* 76.
 - DE FELIPE, M., GERDE, JA., ROTUNDO, JL., 2016. Soybean Genetic Gain in Maturity Groups III to V in Argentina from 1980 to 2015. *Crop science*, 56:3066:77
 - FEHR, WR., CAVINESS, CE.1977.Stages of soybean development. *SpecialReport80.* Iowa StateUniversity, Ames, Iowa. 11p.
 - LIU, F., ANDERSEN, MN., JACOBSEN, SE., JENSEN, CR., 2005. Stomatal control and water use efficiency of soybean (*Glycine max* L. Merr.) during progressive soil drying. Elsevier doi: 10.1016
 - R CORE TEAM. 2019. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
 - RAY, DK., MUELLER, ND., WEST, PC., FOLEY, JA. 2013. Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *PLoS ONE* 8.
 - VEHTARI, A., GELMAN, A., GABRY, J., 2017. Practical Bayesian model evaluation using leave-one-out cross-validation and WAIC. *Statistics and Computing* 27, 1413–1432.
- Este trabajo fue financiado por FONCYT (PICT 2015/2671 y 2016/1504) e INTA (PNCYO-1127042).*