

SIMULACION DE LA CONTRIBUCION AL RENDIMIENTO DE UNA MAYOR LA DURACION DEL PERIODO POSTFLORACION EN SOJA

A.G. Kantolic^{1*}, J.L. Mercou², Gustavo A. Slafer³, Víctor O. Sadras⁴

¹Cátedra de Cultivos Industriales y ²Cerealicultura, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453, C1417DSE Buenos Aires. Argentina; ³IRTA y Dpto. de Prod. Vegetal y Forestal, Universidad de Lleida, España; ⁴SARDI y School of Agric. Food & Wine, The University of Adelaide, Australia. * akantoli@agro.uba.ar.

Introducción

En experimentos a campo se demostró que la extensión del fotoperíodo luego de floración incrementa la duración de la fase de producción de vainas ("período crítico") y el número de granos establecidos en sojas indeterminadas (Kantolic y Slafer, 2001; Kantolic y Slafer, 2005). Esto ha llevado a la idea de que el mejoramiento podría aumentar los rendimientos de soja seleccionando cultivares con una mayor duración del período crítico. Sin embargo, esta característica debería acompañarse con una reducción del tiempo a floración (i.e. menor sensibilidad fotoperiódica en pre-floración), para no prolongar la duración total del ciclo. Esta especulación parece posible ya que: i) los factores que regulan la sensibilidad fotoperiódica antes y después de floración son parcialmente independientes (Upadhyay et al., 1994; Summerfield et al., 1998) y ii) cultivares con una misma fecha de floración presentan diferentes duraciones del período crítico (Kantolic y Slafer, 2001; Kantolic, 2005).

Los modelos de simulación que capturan la variabilidad intra-específica de procesos ecofisiológicos son herramientas sumamente útiles para explorar el comportamiento de cultivares hipotéticos y sus interacciones con el ambiente. En este trabajo se evaluó la probable contribución al rendimiento de genotipos de igual ciclo total que posean una mayor duración del período crítico, simulando su desarrollo y rendimiento en 6 localidades de la Región Pampeana Argentina.

Método

Se evaluó, primero, la habilidad del modelo CROPGRO-soybean V3.5 (Boote et al., 1998) para reproducir la fenología y las relaciones funcionales encontradas en experimentos realizados en Buenos Aires con A5409 (campañas 1998/99 y 1999/2000) y con A5409RG (campaña 2001/02) sin restricciones hídricas, sanitarias ni nutricionales. Las simulaciones utilizaron los coeficientes calibrados para A5409RG (variante 1, Tabla 1), y cultivares hipotéticos (variantes 2 a 5, Tabla 1) que tenían igual duración del ciclo total pero una mayor duración de las fases post-floración a expensas de un menor tiempo a floración. Esto se logró i) aumentando los coeficientes genéticos que regulan la duración de las fases (variantes 2-4) o ii) modificando los coeficientes que regulan la respuesta fotoperiódica (variante 5). Posteriormente, se simuló el comportamiento de los cultivares hipotéticos para condiciones de secano y sin limitaciones hídricas con una serie de 28 años climáticos en Balcarce (37°45'S; 58°18'W), Bordenave (37°51'S; 63°01'W), Pergamino (33°56'S; 60°33'W), Laboulaye (34°13'S; 63°40'W), Rafaela (31°12'S; 61°30'W) y Pilar (31°67'S; 63°08'W).

Resultados y Discusión

Mediante el uso del modelo con las condiciones meteorológicas de Buenos Aires, se logró una adecuada predicción de la fenología del cultivo (RMSE < 3 d). Con el cambio de los coeficientes genéticos se adelantó la floración sin modificar la duración total del ciclo en las 6 localidades evaluadas (Fig. 1). Con la variante más extrema (5) se extendió el período post-floración entre 27 d (Bordenave y Balcarce) y 18 d (Pilar y Rafaela). Más aún, los cambios en la duración del período crítico obtenidos con este cultivar hipotético parecen realistas y alcanzables mediante mejoramiento: experimentos realizados con líneas casi-isogénicas para los genes que regulan la respuesta fotoperiódica (Cober et al., 2001) tuvieron hasta 7 d de

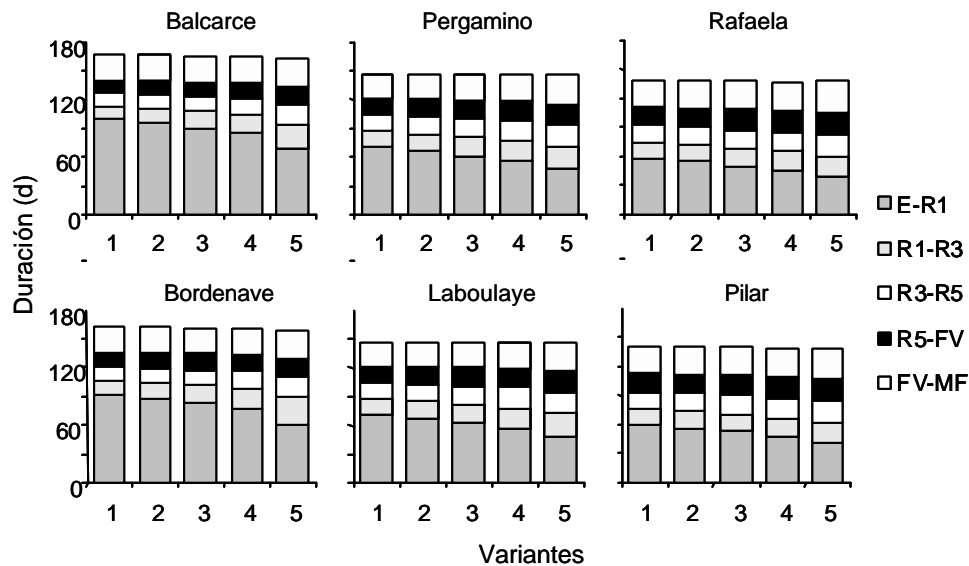
diferencia en la duración de la rase R1-R6 en cultivos con igual tiempo a floración (Kantolic, 2005) mientras que en las simulaciones realizadas con la variante 5, el tiempo entre primera y última vaina aumentó en alrededor de 10 d. El cambio de los coeficientes genéticos tuvo un efecto mínimo (< 4 d) luego del final de la de la fase de adición de vainas.

Tabla 1. Coeficientes genéticos de A5409-RG y sus variantes. Los parámetros originales de A5409-RG (variante 1) fueron calibrados por J.L. Mercau (inédito) .

Variante	Coeficientes genéticos ⁽¹⁾						
	CSDL (h)	PPSEN (h ⁻¹)	EM-FL (PTD) ⁽²⁾	FL-SH (PTD)	FL-SD (PTD)	SD-PM (PTD)	R1PRO (h)
1	12.7	0.345	22.5	6.0	13.5	35.0	0.4
2	12.7	0.345	21.0	6.1	13.8	36.0	0.4
3	12.7	0.345	19.0	6.3	14.3	37.0	0.4
4	12.7	0.345	17.0	6.5	14.8	37.7	0.4
5	13.5	0.345	21.0	6.7	15.2	39.4	1.2

- (1) coeficientes genéticos: fotoperíodo crítico (CSDL); sensibilidad fotoperiódica (PPSEN); días fototermales entre emergencia y floración (EM-FL), floración y primera vaina (FL-SH), floración y primera semilla (FL-SD) y primera semilla a madurez (SD-PM); incremento de la sensibilidad fotoperiódica luego de floración (R1PRO). ⁽²⁾ PTD: días fototermales (1 día fototermal equivale a 1 día calendario bajo condiciones de temperatura óptima y fotoperíodo inferior al crítico).

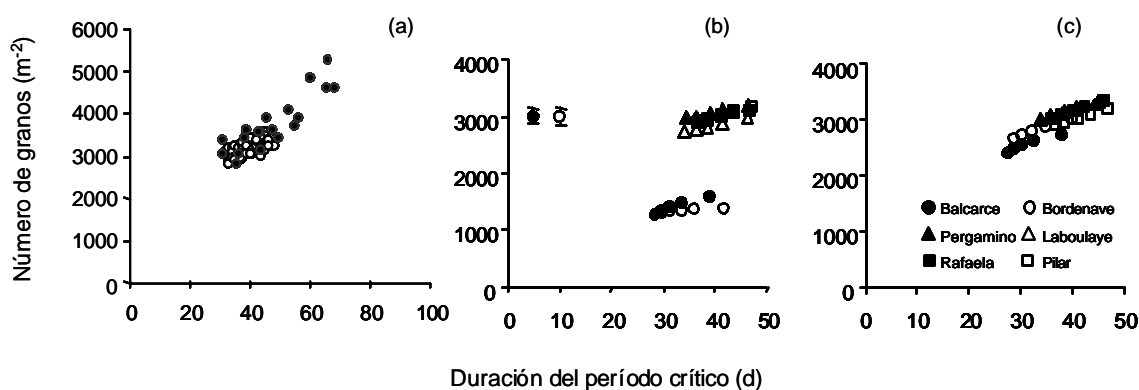
Fig. 1. Duración de las fases de desarrollo en A5409-RG (1) y sus variantes con modificaciones en los coeficientes genéticos (2-5). Las fases se indican en la escala de Fehr y Caviness (1977) salvo E (emergencia) y FV (fin del período de adición de vainas).



El modelo también logró reproducir la relación entre el número de granos y la duración del período crítico hallada en experimentos previos (Fig. 2a). En las simulaciones multianuales, una mayor duración del período crítico aumentó el número de granos (Fig. 2b y 2c), con efectos de localidad marcados principalmente en los cultivos de secano en Balcarce y Bordenave. Dentro de cada sitio, la misma relación se observó independientemente del mecanismo utilizado para alargar la fase crítica, i.e, cambiando los requerimientos fototermales (variantes 2-4) o la sensibilidad fotoperiódica (variante 5). Esto sugiere que el

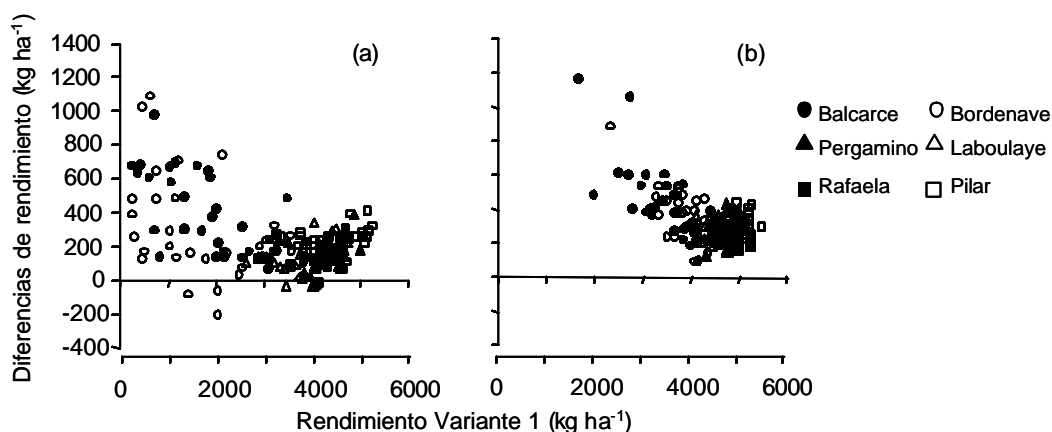
número de granos estaría asociado más a la duración de las fases posteriores a floración que a los mecanismos específicos que modulan las tasas de desarrollo.

Fig. 2. Relación entre el número de granos y el período crítico: a) simulada (símbolos abiertos) y medida (símbolos cerrados) para condiciones de Buenos Aires sin limitaciones hídricas, nutricionales ni sanitarias; b) simulada para 6 localidades bajo condiciones de secano y c) simulada para 6 localidades sin limitaciones hídricas. Cada punto en b y c corresponden al promedio de 29 campañas; se muestran los errores estandar cuando son mas grandes que los símbolos



El rendimiento estuvo altamente correlacionado con el número de granos ($y=1.47x$; $r^2=0.96$, $p<0.001$). El cultivar hipotético simulado con la variante 5 aumentó el rendimiento en todos los años y en todas las localidades bajo condiciones de irrigación, mientras que en secano su ventaja se produjo en un 95% de los escenarios analizados (Fig. 3).

Fig. 3. Diferencias en el rendimiento simulado entre las variantes 1 y 5 para condiciones de secano (a) e irrigación (b)

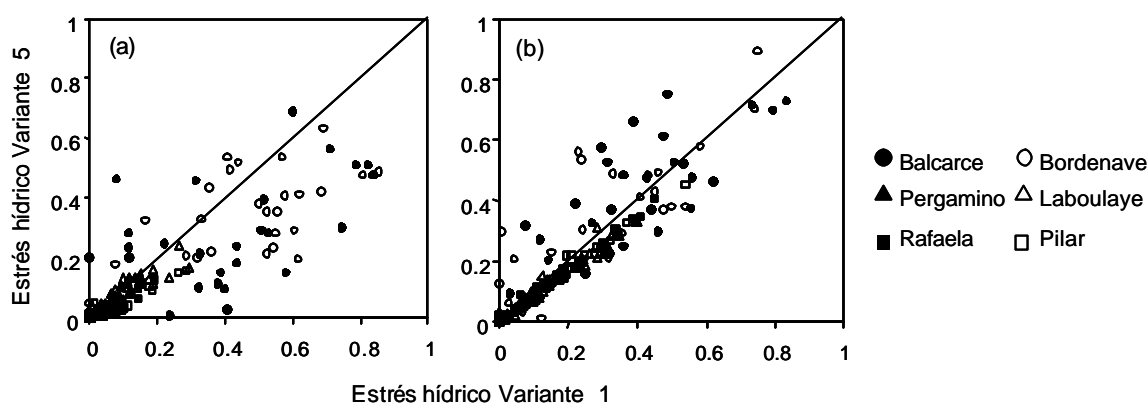


Las diferencias en rendimiento entre las variantes 1 y 5 fueron particularmente grandes en Balcarce y Bordenave y en años de malos rendimientos (Fig. 3). Asimismo, la alta variabilidad inter-anual de los rendimientos simulados en estas localidades bajo condiciones de secano ($CV=60\%$) se redujo con el cultivar hipotético de la variante 5 ($CV=40\%$). Estos efectos asociados a la localidad pueden estar relacionados con el cambio en el patrón fenológico en relación con las principales variables ambientales en cada sitio. El rendimiento simulado en Balcarce y Bordenave estuvo asociado con las temperaturas mínimas entre primera semilla y madurez ($r^2=0.73$, $p<0.001$). Al adelantar la floración, el establecimiento y llenado de las semillas estuvo menos limitado por las bajas temperaturas y el rendimiento aumentó. En las restantes localidades, la radiación acumulada entre floración y madurez fue la variable que mejor explicó las variaciones del rendimiento ($0.14 = r^2 = 0.42$; $p<0.05$). Por lo tanto, el menor

impacto de la modificación de los coeficientes genéticos en las latitudes más bajas estuvo relacionado probablemente con i) un menor impacto en la fenología y ii) menores limitaciones térmicas.

El rendimiento simulado bajo condiciones de secano estuvo fuertemente asociado con el estrés hídrico entre floración y primera semilla ($r^2 = 0.77$; $p < 0.001$). En Balcarce y Bordenave, fue frecuente la ocurrencia de stress hídrico severo en este período y, al adelantar la floración con la variante 5, se redujo el estrés, particularmente en los años secos (Fig. 4). Estos resultados sugieren que el adelantamiento de la floración permitiría, además, diferir una mayor parte del consumo del agua al período más crítico para la definición del rendimiento.

Fig. 4. Relación entre el estrés hídrico simulado con las variantes 1 y 5 durante (a) floración-primerasemilla y (b) primerasemilla-madurez. La magnitud del estrés está valorada con un índice (0: sin estrés; 1: máximo estrés) para cada año y localidad. La recta representa la relación 1:1.



Los resultados simulados sugieren que el mecanismo de adelantar la floración sin modificar la duración total del ciclo aumentaría los rendimientos de soja en un amplio rango de latitudes y condiciones ambientales. Para cultivos de secano en el norte de la Región Pampeana, la ganancia estimada en el rendimiento por esta estrategia fue, en promedio, del 3 al 6%, mientras que para localidades del sur esta ganancia alcanzó el 16%.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la ANPCyT y la Universidad de Buenos Aires

Bibliografía

- BOOTE, K.J., J.W. JONES, G. HOOGENBOOM. 1998. Simulation of crop growth: CROPGRO model. En: Peart, R.M., R.B. Curtis (Ed.) Agricultural systems modeling and simulation. Marcel Dekker Inc., New York, USA, pp. 651-692
- COBER, E.R., D.W. STEWART, H.D. VOLDENG. 2001. Photoperiod and temperature responses in early-maturing, near-isogenic soybean lines. *Crop Sci.* 41, 721-727
- FEHR, W. R., C.E. CAVINESS. 1977. Stages of soybean development. Spec. Rep. 80. Iowa State Univ., Ames, Iowa. 11 p.
- KANTOLIC, A. 2005. Variabilidad en el desarrollo post-floración en líneas casi isogénicas para los genes de respuesta al fotoperíodo. Congreso Latinoamericano de Fisiología Vegetal, Recife, Brasil. 11-16 septiembre 2005. Trabajo N° 290
- KANTOLIC, A.G., G. A. SLAFER. 2001. Photoperiod sensitivity after flowering and seed number determination in indeterminate soybean cultivars. *Field Crops Res.* 72, 109-118
- KANTOLIC, A.G., G. A. SLAFER. 2005. Reproductive development and yield components in indeterminate soybean as affected by post-flowering photoperiod. *Field Crops Research* 93, 212-222
- SUMMERFIELD, R.J., H. ASUMADU, R.H. ELLIS, A.QI. 1998. Characterization of the photoperiodic response of post-flowering development in maturity isolines of soybean [*Glycine max (L.) Merrill*] 'Clark'. *Ann. Bot.* 82, 765-771
- UPADHYAY, A. P., R.J. SUMMERFIELD, R.H. ELLIS, E.H. ROBERTS, A. Qi. 1994. Variation in the duration of the photoperiod-sensitive and photoperiod insensitive phases of development to flowering among eight maturity isolines of soya bean (*Glycine max (L.) Merrill*). *Ann. Bot.* 74, 97-101