

ARTICULO TÉCNICO

Leonardo Rey,¹
Yamel López,²
Alejandro Jaramillo²
y Jeffrey W. White.³

ABSTRACT

Title: Evaluation of a Growth Simulation Model Applied to Soybean Genotypes ((*Glycine max.* L. Merr) Under Tropical Conditions

The crop growth simulation model of soybean (*Glycine max* (L) Merr) Soygro V5.42, was tested under tropical conditions, using experimental data from a field experiment in which two genotypes (Soyica P-33 and Soyica Ariari-1) with different growth habit, were grown under two plant densities, at the Palmira Research Centre of the Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, located at 3°32' north latitude and 76°17' west longitude, on a Mollisol soil classified as Isohyperthermic Aquic Hapludoll. Thirteen genetic coefficients were calibrated and showed sensitivity to the model. The validation of the model was made using previous experimental data from the same genotypes. The narrow line observed vs predicted seed yield was close to the 1:1 slope, indicating that, the simulating was not skewed. Thus, the model explained well the variation due to planting dates and plant spatial distribution in the field. The simulation of planting dates effects in relation to climatic variation at three different soybean production regions, is in agreement with the traditional planting dates used by the soybean growers of Colombia.

1. Centro de Investigación Nataima, CORPOICA. Apartado Postal 40, Espinal, Tolima, Colombia; 2. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Colombia; 3. Programa de Fisiología del Frijol. Centro Internacional para la Agricultura Tropical, CIAT. Apartado Aéreo 6713, Cali, Colombia

Evaluación de un Modelo de Simulación de Crecimiento Aplicado a Genotipos de Soya (*Glycine max.* L. Merr) bajo Condiciones Tropicales

RESUMEN

El modelo de simulación de crecimiento y producción de soya (*Glycine max.* (L) Merr) Soygro V5.42, fué validado a nivel del trópico con datos experimentales de un ensayo en el cual se evaluaron dos genotipos Soyica P-33 e ICA-Ariari-1, con diferente hábito de crecimiento, bajo dos densidades de plantas, en el Centro de Investigación Palmira de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Corpoica, localizado a 3°32' de latitud norte y 76°17' de longitud oeste, en un Mollisol, clasificado como Isohipertérmico Aquico Hapludoll.

Las salidas del modelo fueron sensibles a los ajustes en trece coeficientes genéticos, los cuales se calibraron sistemática e iterativamente. La calibración del modelo presentó una estrecha relación entre lo observado y lo simulado para las principales variables de respuesta. Su validación con base en datos de experimentos de campo anteriores, presentó una relación muy estrecha $R^2 = 0.86$, entre lo observado y lo simulado; lo cual indicó, que el modelo explica acertadamente la variación en las épocas de siembra y las densidades de plantas. Como resultado de la simulación del efecto de las épocas de siembra con variaciones de clima, bajo diferentes ambientes (3 localidades), se encontró que el modelo se ajusta a las condiciones de siembra utilizadas por los agricultores en Colombia.

Palabras Claves: Soya, modelo de crecimiento, simulación, calibración.

INTRODUCCIÓN

LA EVALUACIÓN del modelo de simulación del cultivo de la soya (*Glycine max* (L) Merr) Soygro V5.42, bajo condiciones de trópico, permite ajustar la información generada a través de los hallazgos de investigación en países de la zona templada. Su comprensión cuantitativa, es importante en nuestro medio para la planeación y el desarrollo de actividades de investigación y de transferencia de tecnología. La utilización apropiada del modelo, puede eventualmente, reducir los costos y el número de ensayos y permite además, efectuar selección de materiales por ideotipos. Así mismo, es útil para el estudio de áreas donde se carece de información, y en la generación de hipótesis como base para el diseño de nuevos ensayos a nivel de campo.

Dada la importancia del cultivo de la soya en el país, el trabajo se orientó a calibrar el modelo de simulación de crecimiento "Soygro V.542" utilizando variables de crecimiento, desarrollo y producción de dos variedades de soya, con diferente hábito de crecimiento en condiciones de trópico, y a verificar su validez, utilizando datos experimentales obtenidos en dife-

rentes épocas y bajo distintas condiciones ambientales.

Materiales y Métodos

El modelo de crecimiento y producción de soya SOYGROV5.42.

El modelo de simulación de crecimiento y producción de soya SOYGRO validado en este trabajo, fué desarrollado por un equipo de investigación multidisciplinario (Wilkerson et al., 1983) en la Universidad de la Florida, y es considerado un instrumento de apoyo en el manejo y toma de decisiones sobre estrategias de riego y control de plagas y enfermedades en este cultivo.

La versión de SOYGROV5.42 incluye el acoplamiento de un modelo de balance de agua en el suelo, de alta sensibilidad en un amplio rango de suelos y ambientes; y define los coeficientes fenológicos y genéticos para un rango de variedades de soya de distinto grado de madurez (Jones et al., 1989a.).

El modelo SOYGRO, tiene una estructura que permite describir las tasas de cambio de lámina foliar, tallo, vainas, semillas y componentes de la raíz en térmi-

nos de gramos de materia seca por metro cuadrado, resultante de los cambios en fotosíntesis, respiración, síntesis de tejidos y senescencia (Wilkerson et al., 1983). Las bases del modelo fenológico usado en SOYGRO, son una relación multiplicativa que calcula las tasas de desarrollo en cada fase de crecimiento y de estado reproductivo (Fehr et al., 1971), como una función de la temperatura y la duración nocturna (Jones et al., 1988).

La estructura matemática del modelo está constituida por trece ecuaciones diferenciales y escrito en Fortran IV, permite intervalos de tiempo de un día (Wilkerson et al., 1983) en una serie de subrutinas para la simulación de procesos o eventos orientados como WATBAL, WCALC, GPHEN, PHOTOGROW, todos manejados por la subrutina CROP (Jones et al., 1989).

Epocas de siembra y cosecha del cultivo.

Las fechas de siembra y cosecha fueron el 28 de Septiembre de 1991 y el 10 de Enero de 1992, respectivamente. Se registraron diariamente datos climáticos como temperatura máxima y mínima, radiación solar (MJ/m^2) y precipitación pluvial (mm). Durante el ciclo del cultivo se realizaron seis riegos de 30 mm aplicados a los 11, 19, 25, 45, 66 y 79 días de edad del cultivo.

Diseño experimental. Los genotipos utilizados fueron Soyica P-33 y Soyica Ariari-1 en dos densidades poblacionales, dispuestos en bloques completos al azar, con arreglo factorial de 2×2 , con tres repeticiones. Las unidades experimentales estaban definidas por ocho surcos de seis metros espaciados a 0.6 metros.

Se cosecharon 5 plantas en un metro cuadrado de terreno por parcela, con frecuencia semanal, durante el ciclo del cultivo, separando sus diferentes componentes; los cuales se secaron en estufa a 60°C hasta obtener peso constante. El resultado de la suma hoja + tallo + vaina + peciolo + raíz + semilla, se multiplicó por el porcentaje (%) de materia seca de las plantas cosechadas en el metro cuadrado.

Se efectuaron evaluaciones fenológicas y de producción, descritas según Fehr et al., (1971). La producción se cuantificó por las siguientes variables: número de plantas cosechadas, peso seco de biomasa sin raíces, peso seco de semilla, número de semillas, número de vainas, peso seco de hojas,

peciolos, tallos, vainas y raíz, además del índice de área foliar.

El orden de calibración de los coeficientes genéticos se inició con los de fenología, seguido por los coeficientes de crecimiento reproductivo (Jones et al., 1989).

Validación del modelo. Para validar el modelo se utilizaron datos de experimentos anteriores e independientes al de la calibración, realizados en el C.I. Palmira, evaluando épocas de siembra y densidades en las cuales se encontraban los genotipos Soyica P-33 e ICA Ariari-1.

También se utilizaron los datos climáticos de varios años de las localidades C.I. Palmira, C.I. Nataima (El Espinal), y C.I. Carimagua (Orinoquia), para realizar evaluaciones de épocas de siembra cada 15 días como una respuesta de la producción a los cambios climáticos en los años simulados.

La entrada de los registros al modelo SOYGRO se realizó mediante un paquete computarizado llamado "Sistema de Apoyo Decisional para la Transferencia de Agrotecnología" DSSAT (IBSNAT Project, 1989).

Resultados y Discusión

El comportamiento climático durante el ciclo del cultivo fue bastante seco, razón por la cual se suministró riego.

Los resultados muestran que Soyica P-33 es más precoz que Soyica Ariari-1 en siete días, tanto en floración como en madurez fisiológica; lo cual, se tradujo en mayor peso seco de biomasa, tallos, hojas, vainas y semillas y un mayor índice de área foliar (Tabla 1).

Debido a que las variedades evaluadas no tienen definido a qué grupo de madurez pertenecen, las simulaciones a través de

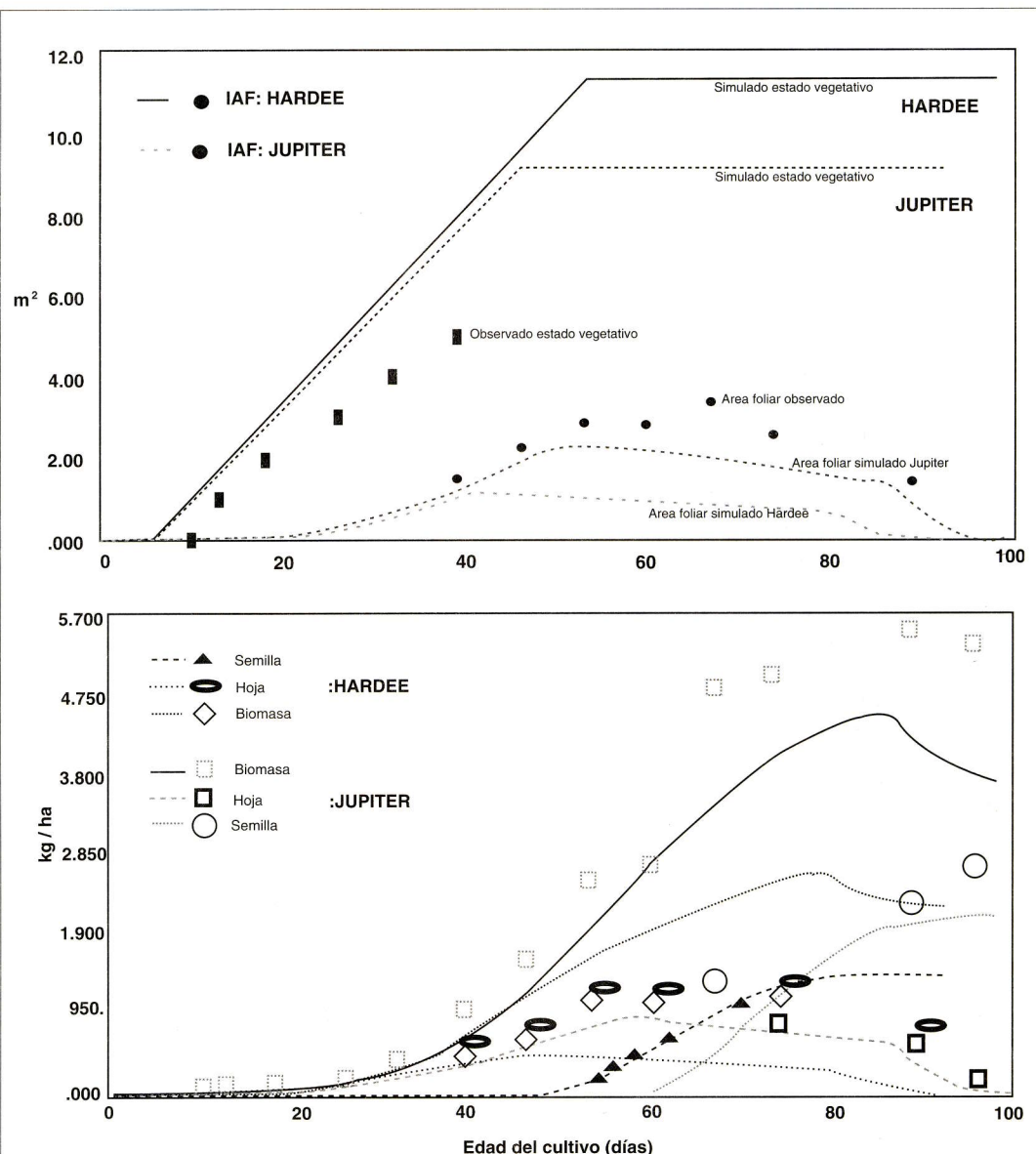


Figura 1. Datos simulados (—) y observados (·) para los grupos de madurez VIII (Hardee) y IX Jupiter en A) estado vegetativo y área foliar y B) en peso de semilla, hoja y biomasa, de los genotipos Soyica P-33 y Ariari-1.

Tabla 1. Valores de las variables de respuesta de los genotipos de soya Soyica P-33 y Ariari-1 obtenidos en el ensayo de campo para evaluación del modelo SOYGRO V5-42. C.I., Palmira, 1991.

G E N O T I P O S				
Variables de respuesta	Número de plantas por hectárea			
	111,111	333,333	111,111	333,333
Fecha de floración (edad días)	46	46	53	53
Inicio primeras vainas (días)	60	60	67	67
Llenado de vainas (días)	67	67	74	74
Madurez fisiológica (días)	89	89	96	96
Producción de vainas (kg/ha)	3850	4250	4260	6170
Producción de semillas (kg/ha)	2720	3037	2830	4020
Porcentaje de llenado (%)	70.66	71.43	66.30	65.16
Peso de una semilla (g)	0.182	0.091	0.182	0.159
Número de semillas (m²)	1500	3390	1550	2540
Semillas / vaina	2.65	2.52	2.00	2.29
Máximo índice de área foliar (m²)	3.42	5.24	4.37	6.67
Biomasa (kg/ha)	5060	5670	6520	8470
Tallo (kg/ha)	1110	1390	1650	1950
Índice de cosecha	0.538	0.536	0.433	0.474

Tabla 2. Valores observados y simulados de las variables de respuesta de los genotipos de soya Soyica P-33 y Ariari-1 para grupos de madurez VIII, IX y X en el C.I. de Palmira

G E N O T I P O S					
Variable de respuesta	Genotipos		Simulación grupos de madurez		
	SOYICA P-33	ARIARI-1	VIII	IX	X
Observado					
Fecha de floración (días)	46	53	35	44	37
Inicio primeras vainas (días)	60	67	41	53	44
Llenado de vainas (días)	67	74	45	54	48
Madurez fisiológica (días)	89	96	80	88	82
Producción de vainas (kg/ha)	3850	4260	1820	2920	2260
Producción de semillas (kg/ha)	2720	2820	1330	2210	1700
Porcentaje de llenado (%)	70.66	66.28	72.91	71.85	75.03
Peso de una semilla (g)	0.182	0.182	0.112	0.119	0.118
Número de semillas /m	1500	1550	1190	1780	1440
Semillas por vaina	2.65	2.0	2.0	2.1	2.1
Máximo índice de área foliar(m²)	3.42	4.37	1.01	2.3	1.41
Biomasa kg/ha	5060	6520	2140	3770	2720
Tallo kg/ha	1110	1640	293	788	442
índice de cosecha	0.538	0.433	0.623	0.561	0.624

tres grupos de madurez seleccionados de acuerdo con la latitud geográfica del campo experimental, permitieron seleccionar la variedad Júpiter del grupo de madurez IX, entre las variedades Hardee (GM VIII) y Vicoja (GM X) (Figura 1). Las diferencias porcentuales entre los datos observados y simulados variaron entre 20% y 85% para los tres grupos de madurez seleccionados (Tabla 2).

El modelo SOYGRO fué sensible a la variación de cinco coeficientes genéticos de tipo fenológico VARTH 3, VARTH 4, VARTH 6, VARTH 8 y VARTH 10. Los

nueve coeficientes restantes no presentaron modificaciones importantes al ser alterados (Figura 2).

El modelo también fué sensible a la variación de los coeficientes genéticos vegetativos TRIFOL, SIZELF y SLAVAR y de los reproductivos SDPVAR, PODVAR, FIVAR, SHVAR y SDVAR (Tabla 3). Mediante el análisis de sensibilidad del modelo, se modificaron sistemáticamente los valores de coeficientes genéticos, presentando valores óptimos para los coeficientes VARTH 4 y VARTH 8, por encima de los cuales no se afecta la duración del estado reproductivo.

Los coeficientes VARTH 6 y VARTH 10, tienen efectos inversos sobre la producción de semilla debido a que un incremento en el primero prolonga la duración del inicio del crecimiento de la vaina, reduciendo la producción, mientras que al incrementarse el segundo, se alarga la duración del estado reproductivo, incrementando la producción de semilla. Los cuatro coeficientes restantes tienen un efecto directo sobre la producción, por estar comprometidos en forma tangible en los componentes de rendimiento.

Las simulaciones con los parámetros ajustados a partir de los valores de los coeficientes genéticos de la variedad Júpiter, significaron un ajuste de un día adicional tanto al inicio de floración como en la madurez fisiológica.

El ajuste para cada uno de los parámetros fué el siguiente: en producción de semilla, 513 kg/ha; 932 kg/ha en producción de vainas; en biomasa de 775 kg/ha; en peso de una semilla de 0.032 kg y en área foliar máxima de 1.87 m², establecidos mediante la modificación de los diferentes coeficientes genéticos.

El período comprendido entre la máxima expansión de la primera hoja verdadera y la inducción de la floración VARTH 4, fué menor en la variedad Soyica P-33. Tanto el período que va desde la aparición de las primeras flores hasta el fin de la expansión de la última hoja VARTH 8, como la duración de toda la fase reproductiva, fueron menores en Soyica P-33 que en Soyica Ariari-1 dándole ventajas comparativas a esta última, debido a un mayor tiempo de actividad fotosintética y un prolongado período de formación y llenado de vainas y semillas, que reflejan una diferencia de 100 kg/ha en producción de semillas, y de 410 kg/ha en producción de vainas (Figuras 3 y 4).

El ajuste entre lo observado y lo simulado para las diferentes variables de respuesta del modelo, variaron desde cero (ajuste cerrado) para madurez fisiológica, hasta 38.63% para el peso del tallo. En las principales variables de los componentes de producción, el ajuste fué de 1.4% para la producción de vainas, hasta un 17% para el peso de una semilla (Tabla 4).

El modelo fue sensible a la variación de las épocas de siembra cuando se simuló con base en datos de campo de ensayos anteriores. La línea de ajustes fué muy cercana a la línea de 1:1, lo que indica una buena confiabilidad de la simulación (Figura 5).

El comportamiento de las fechas de siembra resultantes de cambios de clima

Tabla 3. Ajuste de los coeficientes genéticos de los genotipos de soya del ensayo de campo. C.I. Palmira**COEFICIENTES GENÉTICOS**

Genotipo	VARTHR (4)	VARTHR (6)	VARTHR (7)	VARTHR (8)	VARTHR (10)	TRIFOL	SIZELF	SLAVAR	SDPDVR	PODVAR	FLVAR	SHVAR	SDVAR
SOYICA	6.0	8.5	14.2	24.5	42.0	0.34	200.0	390.0	2.65	250.0	500.0	27.0	7.0
ARIARI	1.5	8.5	14.2	26.0	43.0	0.34	180.0	390.0	2.00	250.0	500.0	22.0	8.0

DESARROLLO REPRODUCTIVO (FENOLOGIA)

VARTHR (4): Duración de la fase de inducción. Período que va desde la máxima expansión de la primera hoja verdadera hasta la inducción de la floración a temperaturas óptimas.

VARTHR (6): Duración del período desde la aparición de las primeras flores al inicio del crecimiento de las vainas (Vainas de 0.5 cm)

VARTHR (7): Llenado de vainas.

VARTHR (8): Duración del período desde la aparición de las primeras flores al fin de la expansión de la última hoja.

VARTHR (10): Duración de toda la fase reproductiva desde la aparición de las primeras flores hasta la madurez fisiológica.

CRECIMIENTO VEGETATIVO

TRIFOL: Estados vegetativos en tiempo (Número de trifolios producidos por día)

SIZELF: Índice de área foliar en el tiempo, prioritariamente en V-6 (Área de una hoja normal entre los nudos 8 y 10)

CRECIMIENTO REPRODUCTIVO

SDPDVR: Número de semillas/número de vainas cosechadas

PODVAR: Número de vainas/m vs tiempo (número de vainas producidas por día)

FLVAR: Número de flores/m vs tiempo (número de flores producidas por día).

SHVAR: Peso pared de la vaina g/m vs tiempo (tasa de acumulación de materia seca de las vainas en la mitad de su tamaño máximo hasta tamaño de llenado, pero antes del inicio del crecimiento de la semilla)

SDVAR: Peso de la semilla g. vs tiempo (tasa de llenado de las semillas).

Tabla 4. Bondad de ajuste para los valores observados y simulados de las variables de respuesta con los coeficientes genéticos ajustados para los genotipos P-33 y ARIARI-1 con base en el grupo de madurez IX.

Variables de respuesta	SOYICA P33			ARIARI 1		
	Observado	Esperado (simulado)	Bondad de* ajuste (%)	Observado	Esperado (Simulado)	Bondad de Ajuste (%)
Floración (días)	46	45	2.17	53	53	0.0
Inicio primeras vainas (días)	60	54	10.0	67	62	7.46
Llenado de vainas (días)	67	60	10.44	74	68	8.1
Madurez fisiológica (días)	89	89	0.0	96	96	0.0
Producción de vainas (kg/ha)	3850	3790	1.4	4260	3720	12.87
Producción de semillas (kg/ha)	2720	2620	3.63	2820	2610	7.5
Porcentaje de llenado (%)	70.66	69.05	2.27	66.28	70.37	6.17
Peso de una semilla (g)	0.182	.151	17.0	0.182	0.162	10.98
Número de semillas (m2)	1498	1732	15.62	1553	1609	3.6
Semillas/Vaina	2.65	2.65	0.0	2.0	2.0	0.0
Máximo Índice de Área Foliar (m2)	3.42	4.17	21.92	4.39	5.65	29.29
Biomasa (kg/ha)	5063	4525	10.62	6520	4950	24.0
Tallo (kg/ha)	1110	690	38.63	1640	1190	27.9
Índice de cosecha	0.538	0.580	7.8	0.433	0.527	21.7

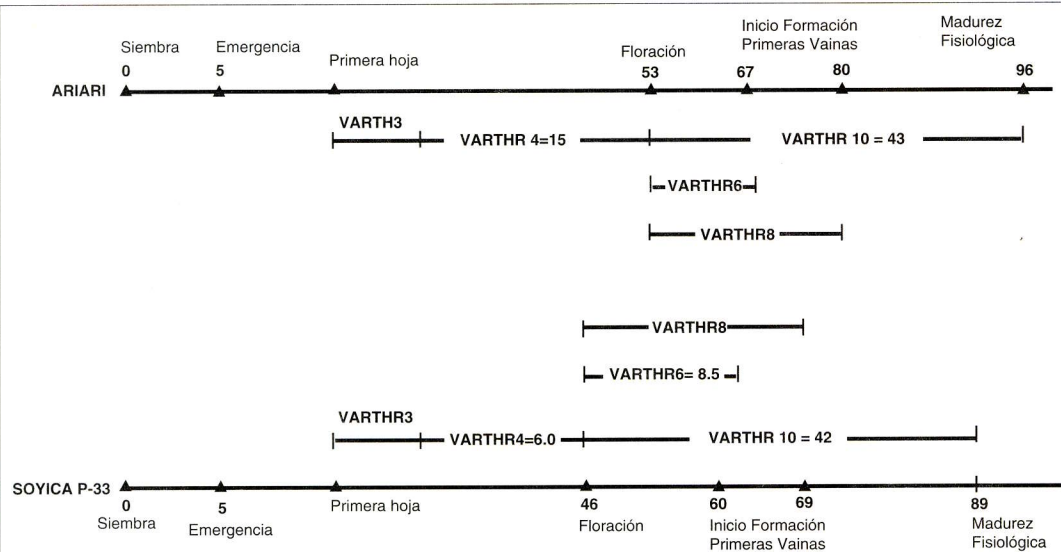


Figura 2. Principales coeficientes genéticos en los dos genotipos de Soya.

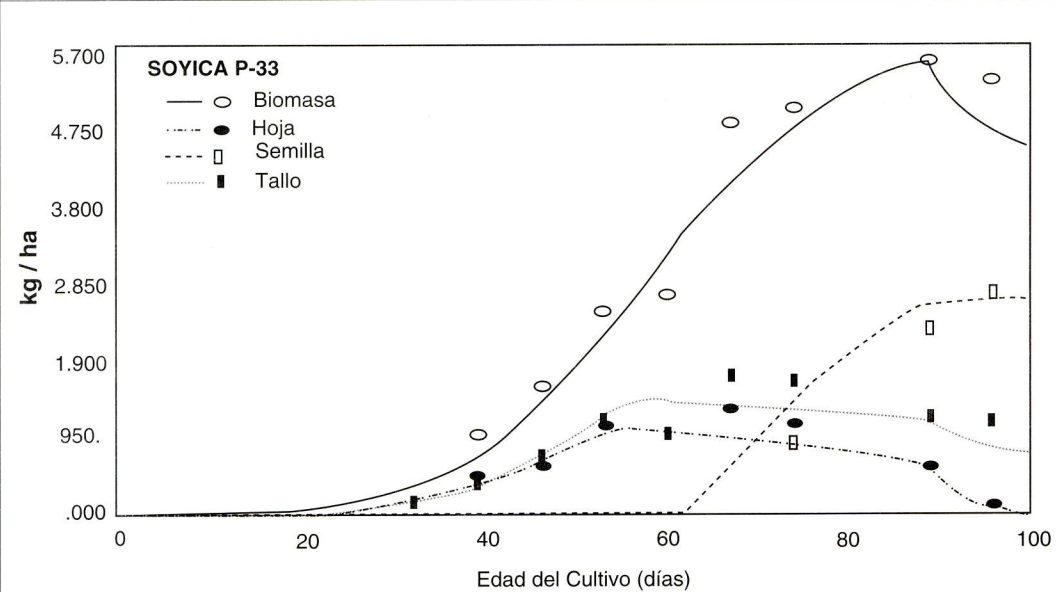


Figura 3. Datos simulados (—) y observados (•) de peso de semilla, hoja, tallo y biomasa en la variedad Soyica P-33.

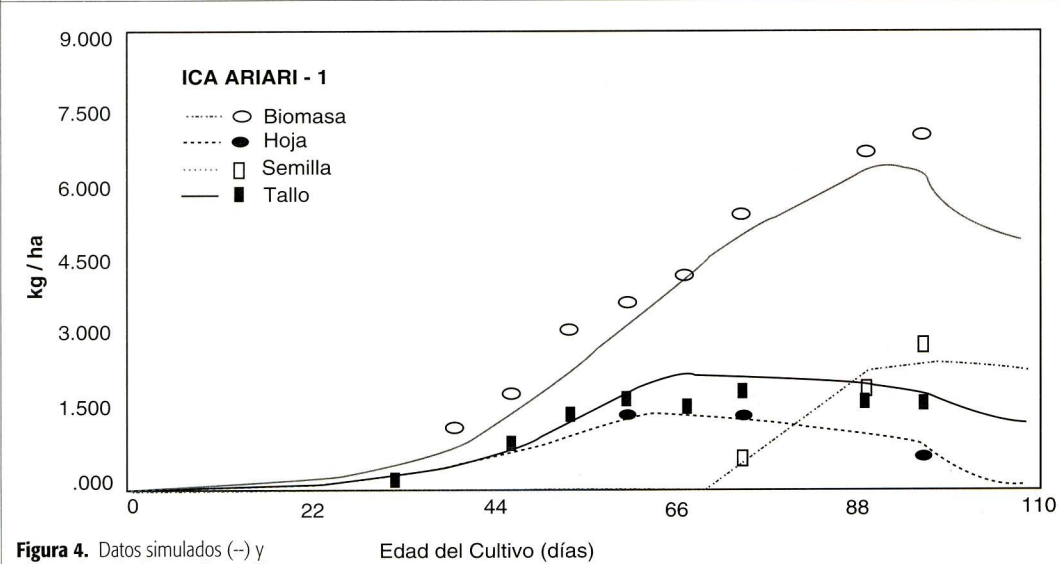


Figura 4. Datos simulados (—) y observados (○) de peso de semilla, hojas, tallo y biomasa en la variedad Soyica Ariari-1.

en tres localidades de interés en la producción de soya, muestra una variación fuerte, dependiendo principalmente de la abundancia de la precipitación. Para Palmira, Valle, los picos de rendimiento más altos coincidieron con las fechas de siembra tradicionales realizadas por los agricultores (Figura 6).

Conclusiones

Bajo las condiciones del C.I. Palmira el modelo de simulación Soygro V5.42, presentó un buen comportamiento en cuanto a estructura y parámetros. La calibración de los coeficientes genéticos de las variedades Soyica P-33 e ICA Ariari-1, estableció una cerrada relación entre lo observado y lo simulado para la mayoría de las salidas del modelo.

La calibración del modelo, fué sensible a trece coeficientes genéticos, cinco de los cuales tienen que ver con aspectos fenológicos, VARTH 4, VARTH 6, VARTH 7, VARTH 8 y VARTH 10, tres con aspectos vegetativos, TRI-FOL, SIZELFY SLAVAR, y cinco con aspectos reproductivos, SDPVR, PODVAR, SHVAR, ,VARY SDVAR.

La validación del modelo con datos de producción de semilla, de ensayos anteriores en el C.I. Palmira, exhibe una alta correlación entre los datos de campo y los valores obtenidos en la simulación, y permite concluir que el modelo predice bien la variación debida a épocas de siembra y a la población de plantas en el campo.

La optimización de la producción en función de las variaciones del clima, en tres regiones de interés en la producción de soya, mostró que a través de nueve años en la localidad de Palmira, las fechas de siembra por parte de los productores coincide con lo predicho por el modelo; igualmente, ocurrió en la localidad del Espinal. La localidad de Carimagua, se presenta como una zona potencial para la producción de soya. Las simulaciones realizadas para cinco años, muestran producciones altas y estables que indican una alta sostenibilidad de esta alternativa de producción. Sin embargo, es

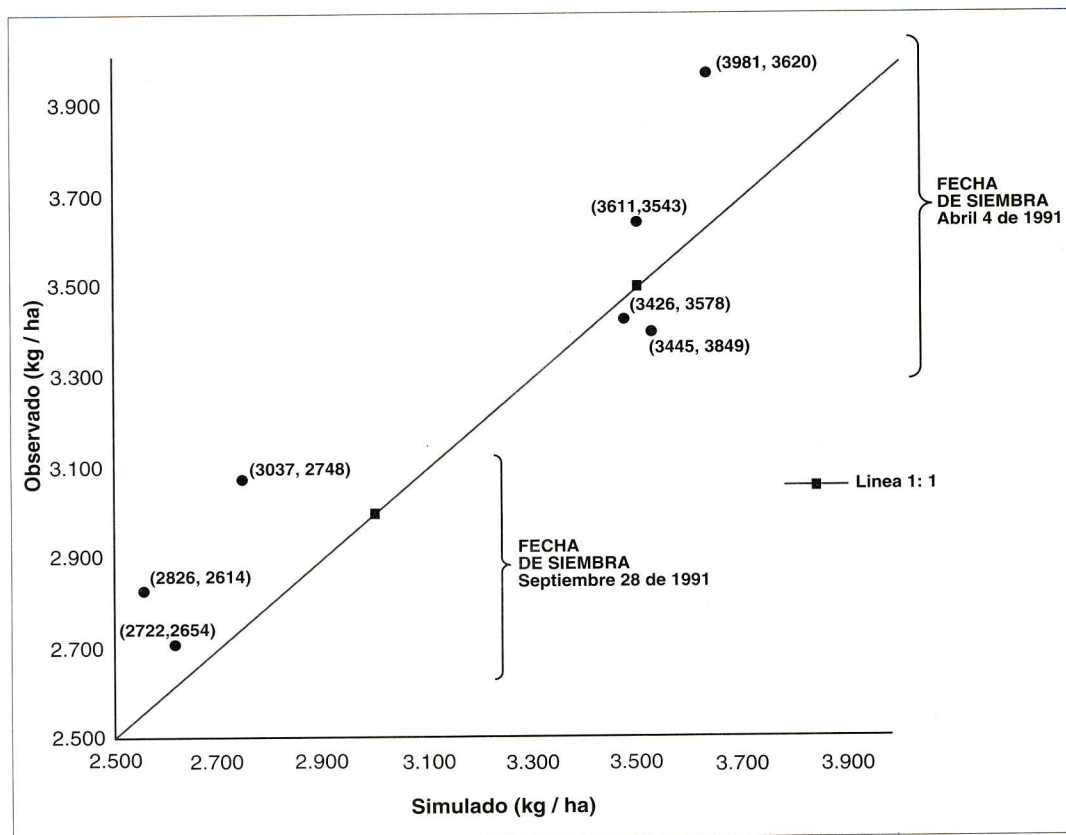


Figura 5. Verificación de la validación del modelo SOYGRO, con resultados de ensayos anteriores en el C.I. Palmira.

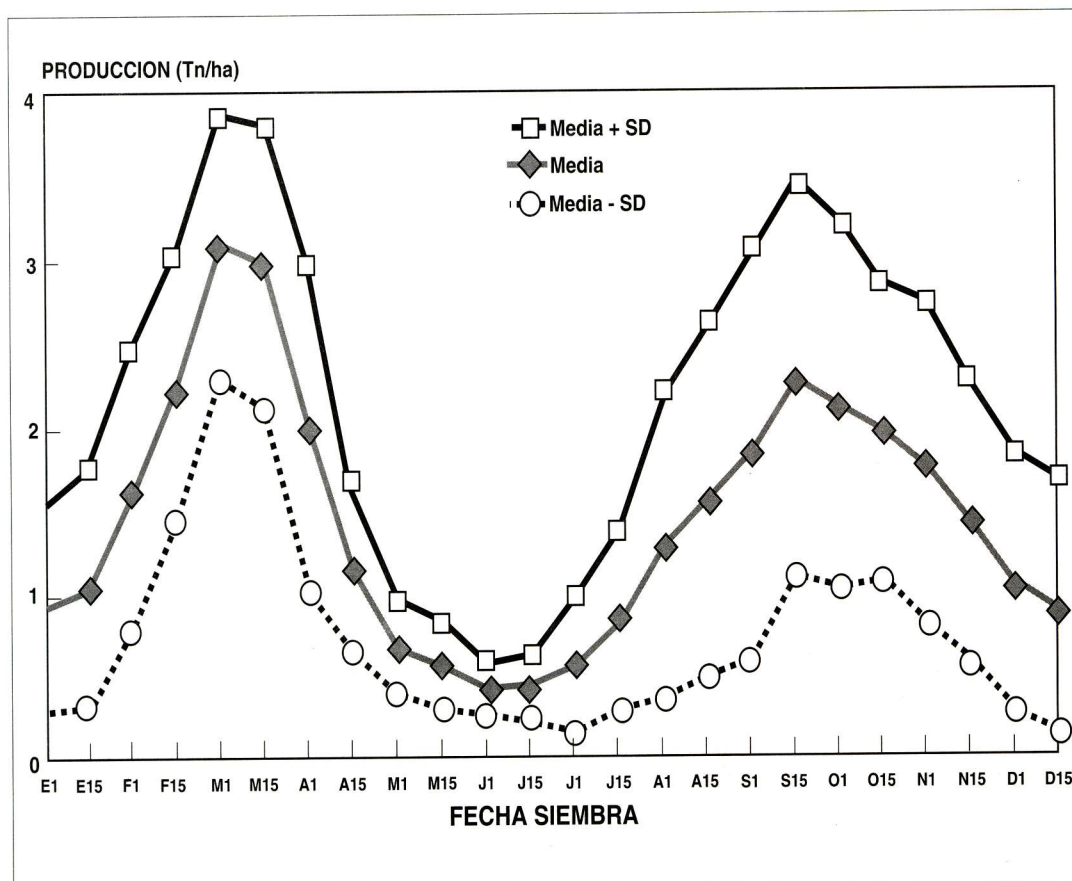


Figura 6. Producción de soja simulando fechas de siembra en Palmira.

necesario tener en cuenta algunas restricciones que el modelo no asume, como la concentración de aluminio intercambiable, el posible ataque de plagas y la definición de un manejo agronómico específico para esta zona.

BIBLIOGRAFÍA

Fehr, W.R. and Caviness, C.E. 1971. Stage of development descriptions for soybeans, Glycine max (L) Merrill. Crop Sci. 11: 929-931.

Ibsnat Project. 1989. International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer. Technical Report 1. Experimental design and data collection procedures for IBSNAT. The minimum data sets for systems analysis and crop simulations. 3rd. edition revised. Dept Agronomy and Soil Sci; College of Trop. Agr. and Human Resources. University of Hawaii, Honolulu. Hawaii, 76 p.

Jones, J.W.; Boote, K.J.; Hoogenboom, G.; Jagtap, S.S. and Wilkerson, G.G. 1989. Soygro V5.42 soybean crop growth Agricultural Engineering Department and Agronomy Department. University of Florida and IBSNAT project, Department of Agronomy and Soil Science, University of Hawaii. 75 p.

Jones, J.W.; Boote, K.J.; Jagtap, S.S. and Mishoe, J.W. 1988. Soybean development plant and soil systems Agronomy Monograph No 31. ASA-CSSA-SSA. 677 S. Segoe F. Madison. WI 53711 USA.

Lim, T.J.; Gold, H.J.; Wilkerson, G.G. and Raper, D.C. 1990. A Monte Carlo response surface strategy for sensitivity analysis application to a dynamic model of vegetative plant growth. Appl. Math. Modelling. 13:479-484.

Wilkerson, G.G.; Jones, J.W.; Boote, K.J.; Ingra, K.T.; and Mishoe, J.W. 1983. Modeling soybean growth for crop management. Transaction of the ASAE. p. 63-73.