

Parametrización del modelo CROPGRO-soybean y su uso como herramienta para evaluar el impacto del cambio climático sobre el cultivo de soja

Parameterization of CROPGRO-soybean model and its use as a tool to assess the impact of climate change on the soybean crop

Adriana Confalone ¹, Carlos Vilatte ¹, Laura Lázaro ¹, Núria Roca ^{1,2}, Silvia Mestelan ¹, Laura Aguas ¹, Miguel Navarro ¹, Federico Sau ³

Originales: *Recepción:* 09/12/2014 - *Aceptación:* 23/02/2016

RESUMEN

Antes de su uso para la toma de decisiones, los modelos de cultivos deben ser calibrados con datos de campo de la región en la cual serán utilizados. Los objetivos del trabajo fueron calibrar y validar la capacidad predictiva del modelo CROPGRO-soybean. Se utilizaron datos de dos cultivares del grupo de madurez IV (Asgrow 4656 y Don Mario DM4700) y tres años de experimentos de campo en condiciones no limitantes en Azul, Buenos Aires, Argentina. La calibración comenzó con los coeficientes del grupo IV que por defecto se encuentran en los archivos: especie, ecotipo y cultivar. Modificaciones menores fueron hechas para ajustar la fenología y dinámica del crecimiento para ambos cultivares. Con el archivo especie original la materia seca, el aumento del número de vainas y el crecimiento de las mismas fue subestimado. La temperatura base cardinal para la fotosíntesis y formación de vainas se redujeron, con estas modificaciones se obtuvieron buenas predicciones para crecimiento y rendimiento. Con el CROPGRO-soybean calibrado y utilizando las proyecciones para la región del modelo climático regional PRECIS bajo el escenario SRESA2 en los años 2030 y 2060, se evaluaron los efectos del cambio climático global futuro en los rendimientos del cultivo de soja. Bajo esos escenarios y en condiciones de secano, se prevén aumentos del rendimiento de 34 y 38% para cada uno de los años estudiados, con una leve mejora atrasando la fecha de siembra respecto de la óptima actual.

Palabras clave

cambio climático • modelo de cultivo • rendimiento • soja

1 Facultad de Agronomía. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA). Av. República de Italia 780 (B7300). Azul, Buenos Aires, Argentina. aec@faa.unicen.edu.ar

2 Departamento de Biología Vegetal. Facultad de Biología. Universidad de Barcelona, España.

3 Departamento de Biología Vegetal. ETSI Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid, España.

ABSTRACT

Prior to their use in decision-making, crop models need to be calibrated with field data from the region where the model will be used. The objectives of this research were to calibrate and validate the predictive ability of the CROPGRO-soybean model. Data from two cultivars maturity group IV (Asgrow 4656 and Don Mario DM4700) and three years of field experiments in conditions not limiting in Azul, Buenos Aires, Argentina were used. Calibration started with the coefficients of group IV that by default are in files: species, ecotype and cultivate. With the original species file, dry matter, increasing the number of pods and growth were underestimated. Minor changes in file were made to adjust phenology and growth dynamics for both cultivars. The cardinal base temperatures for photosynthesis and pod formation were reduced; with these modifications good predictions for growth and yield were obtained. With the CROPGRO-soybean calibrated and using projections for the region from the PRECIS regional climate model under the SRESA2 scenario in the years 2030 and 2060, the effects of global climate change in future soybean crop yield were evaluated. Under these scenarios and rainfed conditions, anticipated yield increases of 34 and 38% for each of the years studied with a slight improvement delaying the planting date, respect to current optimum date.

Keywords

climate change • crop model • yield • soybean

INTRODUCCIÓN

El desarrollo y utilización de modelos de cultivo en agricultura ha aumentado con rapidez en los años recientes. Las aplicaciones de los modelos comprenden numerosas posibilidades, como la simulación del rendimiento de los cultivos y de distintos procesos a escala de planta y cultivo, así como la evaluación de alternativas culturales y de manejo, la planificación de la agricultura y el análisis del riesgo. Además, se han convertido en una metodología que permite examinar los efectos del cambio climático sobre la agricultura, ayudando en la evaluación biofísica del impacto del clima sobre el crecimiento, desarrollo y rendimiento de cada cultivo (8, 24, 28, 31, 38, 43, 44, 47, 53).

Entre los modelos mecanicistas de leguminosas se destaca el modelo

CROPGRO (4). CROPGRO-soybean es un modelo específico de soja y su versión más reciente es la incluida en el paquete DSSAT V4.5 (Decision Support System for Agrotechnology Transfer-Cropping system model) (18), el cual presenta mejoras útiles en cuestiones de evaluación de producción sustentable, respecto de versiones anteriores (41). Este modelo ha sido empleado bajo una amplia gama de condiciones ambientales (13, 17, 23, 35, 45, 46) y también ha sido aplicado a los impactos de las proyecciones de condiciones climáticas de diversas partes del mundo (10, 11, 26, 27, 29, 40, 50).

De la misma forma que se realiza con otros modelos menos mecanicistas, antes de utilizarlos para cualquiera de sus múltiples usos, es preciso realizar la

parametrización (calibración y validación) con datos experimentales obtenidos "in situ" (45, 46).

El cambio climático ya está afectando a los sistemas agrícolas en varias regiones del mundo. Los informes del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (21, 22) incluyen una lista de agroecosistemas con suficientes evidencias científicas de tal efecto.

En Argentina se han detectado cambios significativos en el clima desde finales del siglo XX, que han influido en la producción de los cultivos (12, 34), y han contribuido en el aumento de los rendimientos de secano (28). Este cambio en las condiciones climáticas, sumado a las condiciones económicas produjo modificaciones en el uso de la tierra, destacándose la expansión del cultivo de soja en Argentina, Brasil y Uruguay, en detrimento de otros cultivos.

En la Argentina en particular, el aumento de la superficie destinada a esta oleaginosa es muy grande y en las últimas 3 campañas (2012 a 2015), se sembraron alrededor de 20 millones de hectáreas de soja (48). El partido de Azul no ha estado ajeno a este proceso y en la actualidad presenta 200.000 ha ocupadas por cultivos anuales -prácticamente el 90% de la superficie cultivable del partido- de las cuales la soja ocupa algo más de 180.000 ha, con una producción en la campaña 2013/2014 de 331.982 t (48). Este incremento de la soja puede poner en riesgo la sustentabilidad de los suelos (32) y de los agroecosistemas en general (42).

El clima de Azul es templado húmedo con influencia oceánica, del tipo Cfb (25), característico de la región centro-este de la provincia de Buenos Aires. La temperatura media anual es de 13,9°C, siendo de 21,3°C la del mes más cálido y 7,4°C la del mes más frío. Desde el punto de vista climático,

analizando la serie 1931-2006, el incremento de la temperatura media anual del partido fue de 0,9°C, a una tasa de 0,012°C/año, y mostró un quiebre de tendencia en las anomalías térmicas entre 1967-1968 sin que la variabilidad anual se haya modificado, por lo que ese incremento no se debe a fluctuaciones propias en la variabilidad climática sino a un aumento sostenido en el balance de ondas largas (37).

La construcción de escenarios futuros por medio de modelos climáticos regionales como MM5, PRECIS y RegCM3 proyectan para la región centro y sudeste de la provincia de Buenos Aires un aumento de temperatura inferior a los 2°C hasta la década de 2050-2060 (2, 6, 30).

Si bien se han identificado los impactos potenciales del cambio climático sobre los sistemas agrícolas para varios cultivos en la región pampeana utilizando los modelos del paquete DSSAT (27, 28, 50), los resultados presentan una gran variabilidad espacial, sumado al hecho de que los modelos no fueron calibrados localmente.

En Azul, esos estudios son incipientes. Se están realizando trabajos preliminares que permiten analizar el impacto que el cambio climático pueda tener sobre los cultivos que se siembran en el partido, partiendo de calibraciones realizadas con datos locales (51).

Objetivos

Calibrar el modelo CROPGRO-soybean en las condiciones agroclimáticas de la zona central de Azul.

Hacer un ejercicio que permita determinar el impacto que el clima futuro pueda tener sobre el rendimiento del cultivo de soja, utilizando las proyecciones climáticas dadas por el modelo climático regional PRECIS para los años 2030 y 2060.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ensayos de campo

Se utilizaron datos de ensayos de tres años consecutivos (1999-2002) de cultivo de soja de grupo IV realizados en la Chacra Experimental de la Facultad de Agronomía-UNCPBA (Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Buenos Aires (latitud: 36°45' S; longitud: 59°50' O, altitud: 132m). Los datos agrometeorológicos diarios (radiación solar, temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación, humedad relativa y viento) provienen de la estación del Centro Regional de Agrometeorología de la Facultad de Agronomía (CRAGM) (9). Durante los ciclos agrícolas 1999-2000 y 2000-2001 se sembraron los cultivares Asgrow 4656 (de aquí en adelante, Asgrow) y Don Mario DM4700 (resistente a glifosato y que será nombrada como Don Mario de aquí en adelante).

El cultivo fue regado y creció en condiciones no limitantes desde el punto de vista nutricional e hídrico, en un suelo Argiudol típico (49), característico de esta región del partido (20, 32). Durante el ciclo de cultivo 2001-2002 se sembraron ambos cultivares en condiciones de secano.

En los tres años, la siembra de los dos cultivares de soja del grupo IV se realizó a mano durante la primera quincena de noviembre con una densidad de siembra de 30 plantas/m². Se utilizó un diseño experimental en bloques completos al azar, con tres repeticiones, cada unidad experimental ocupaba una superficie de 45 m².

En el cultivo irrigado, el suelo se mantuvo próximo a la capacidad de campo, determinado con el método de Cassel y Nielsen (1986).

El contenido de humedad en el suelo fue monitoreado semanalmente según el método gravimétrico (15).

La lámina de agua aplicada diariamente como complemento de la precipitación en los cultivos irrigados, fue distribuida por medio de un sistema de riego por goteo y fue calculada mediante la metodología recomendada por la FAO (3).

Las distintas fases fenológicas del cultivo se determinaron siguiendo la clave de Fehr y Caviness (1977) con las modificaciones que opera el modelo CROPGRO (5), indicando la plenitud de cada fase cuando el 50% de las plantas marcadas para las observaciones alcanzaban dicho estado fenológico.

FL (R1), indica que las plantas tienen al menos una flor abierta en cualquier nudo de la planta; SH (R4), las plantas presentan una vaina totalmente expandida en cualquier nudo de la planta; SD (R6), se visualiza una vaina que contiene semillas verdes que llenan la cavidad de la vaina en cualquier nudo de la planta; PM (R7), se observa una vaina de color amarillento en cualquier nudo de la planta, indicando que se alcanza la madurez fisiológica. Todas estas son fases fenológicas importantes para el modelo CROPGRO ya que determinan cambios en la partición de asimilados y madurez del cultivo.

Cada 10-15 días fueron determinados el índice de área foliar (IAF) y el peso seco de 0,5 m² de cultivo que fue particionado en tallos, hojas, vainas, granos. Posteriormente a la cosecha, las plantas fueron llevadas a estufa a una temperatura de 65°C, hasta peso constante. El IAF se midió con un analizador de dosel (LAI 2000, LI-COR, inc). La cosecha final para determinar la producción de granos se realizó sobre las dos hileras centrales de cada parcela.

La calibración se realizó con los datos provenientes de los dos primeros años de cultivo regado y para la validación se usaron los datos del último año del experimento en condiciones de secano.

Para el análisis de impacto de clima futuro se utilizó el modelo calibrado con el cv. Don Mario. También se realizó un nuevo test del modelo previamente parametrizado, con datos provenientes de un ensayo en siembra directa; los detalles de este experimento pueden encontrarse en Ressa *et al.* (43).

Modelo de cultivo

Se utilizó el modelo CROPGRO-soybean (4) incluido en el paquete DSSAT V4.5 (18) que permite la unificación de los formatos de datos de entrada y salida con los modelos de diferentes cultivos.

Los datos requeridos son los relacionados con:

a) el clima (temperatura máxima y mínima, radiación global, precipitación) que conforman el archivo climático estándar (*.WTH), cargado con datos meteorológicos provenientes del CRAGM (9).

b) el suelo (propiedades físicas y químicas de cada horizonte del perfil) que conforman el archivo de suelo estándar (*.SOIL), cargado con perfiles de suelos reales (38).

c) el manejo (residuos, fechas de siembra, fertilización, riego) considerados en el archivo (*.X).

d) los coeficientes genéticos de los cultivares.

Cabe señalar que en estudios de cambio climático, el modelo debe trabajar con los valores previstos de concentración de CO₂, y no con los valores que usa por defecto.

El modelo CROPGRO está compuesto por cuatro módulos que interactúan: desarrollo, balance de carbono, balance de agua y balance de nitrógeno. Aunque el

modelo es de paso diario, algunos procesos como la fotosíntesis o la evolución fenológica utilizan un paso horario. Para ello, el modelo estima temperaturas horarias a partir de las temperaturas máximas y mínimas diarias.

Todas las variables de estado del modelo son calculadas diariamente y se visualizan en las salidas de las simulaciones (*.OUT). Además, el modelo simula los componentes del rendimiento, cuantificando y graficando el crecimiento diario del cultivo hasta el estadio de madurez fisiológica y de cosecha. La subrutina de desarrollo del cultivo utiliza diferentes ecuaciones así como diferentes valores de temperaturas base, óptima y máxima en función del subperíodo fenológico considerado. Esta subrutina genérica funciona para diferentes especies y cultivares. Las características genéticas de un cultivo están consideradas en los parámetros o coeficientes genéticos contenidos en tres archivos: especie (*.SPE), ecotipo (*.ECO) y cultivar (*.CUL). El lenguaje de programación del actual módulo y del modelo CROPGRO es Fortran y el paso de cálculo principal es el diario; la descripción de las tasas de cambio de materia seca, acumulación y remoción de proteínas y cambios en el número de vainas y semillas se realiza con ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden (18).

Parametrización del modelo

La calibración es el proceso iterativo de búsqueda de los valores de los coeficientes genéticos que produzcan la menor discrepancia entre resultados simulados por el modelo y observados en el experimento, lo cual requiere la medición, estimación o ajuste de sus valores para mejorar la precisión predictiva del modelo con respecto de algunas variables.

El modelo calibrado debe ser posteriormente contrastado con datos independientes, para ser aceptados como válidos los nuevos valores de los coeficientes previamente calibrados (validación).

Para cuantificar la precisión en la parametrización se utilizó como indicador el RMSE, que es la raíz del cuadrado medio del error (Ecuación 1) y un índice de ajuste (d ; Ecuación 2) (52).

$$RMSE = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2 / (n - 1)\right)} \quad (1)$$

donde:

O_i y S_i = valores observados y simulados del i -ésimo par de datos

n = el número de observaciones

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S'_i| + |O'_i|)^2} \right], \text{ con } 0 \leq d \leq 1, \quad (2)$$

donde:

n = número de observaciones

\bar{O} = valor medio observado de la variable

O_i y S_i = valores observados y simulados del i -ésimo par de datos respectivamente

$$S'_i = S_i - \bar{O}$$

$$O'_i = O_i - \bar{O}$$

Modelo climático regional

Para el análisis del impacto de clima futuro sobre el rendimiento del cultivo de soja, se trabajó con los datos obtenidos del Atlas Ambiental de Buenos Aires (1), siguiendo la línea evolutiva SRES A2 (Special Report on Emissions Scenarios A2) (36) por ser una de las más severas.

Este escenario, desde una visión social, representa un mundo muy heterogéneo con una población mundial en crecimiento continuo y con una orientación regional de crecimiento económico, que está más fragmentado y más lento que en otras líneas evolutivas.

El escenario de emisiones de gases de efecto invernadero denominado A2 fue generado por el Centro de Previsión del Tiempo y Estudios Climáticos (CPTEC) de Brasil, a partir de la información del modelo climático regional de alta resolución PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies) desarrollado por el Hadley Centre (Reino Unido) (1). Considera cambios en la concentración de CO_2 , en la temperatura media anual y precipitación anual acumulada para una región de Sudamérica que incluye la región centro de Buenos Aires.

Las proyecciones para esta región son: 614 ppm y 820 ppm de CO_2 , 1°C y 2°C de aumento de temperatura para los años 2030 y 2060, respectivamente. Con respecto a las precipitaciones, el modelo proyecta un aumento de 3% para el año 2060, manteniendo sin modificaciones las de 2030. Estos valores se utilizaron para modificar el archivo estacional del DSSAT, cargado con los datos diarios del período 1988-2014 de la estación del CRAGM (9).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Si bien los archivos de datos meteorológicos con los que trabaja el DSSAT tienen una marcha cronológica diaria, en la tabla 1 (pág. 55) se muestran datos mensuales de temperatura y precipitaciones durante el período del experimento.

Tabla 1. Promedio mensual de los elementos del clima: radiación global (RG), temperatura máxima (TMAX), temperatura mínima (TMIN) y precipitación acumulada (PP) durante los años del experimento.

Table 1. Monthly average of global radiation (RG), maximum temperature (TMAX), minimum temperature (TMIN) and cumulative monthly precipitation (PP) during the years of the experiment.

	RG (MJ.m ⁻² .d ⁻¹)	TMAX (°C)	TMIN (°C)	PP (mm.mes ⁻¹)
1999/2000				
Noviembre	25,7	24,4	10,3	26,0
Diciembre	25,4	27,4	12,7	113,8
Enero	27,4	30,7	15,1	112,3
Febrero	26,3	27,2	14,5	240,3
Marzo	21,1	24,2	11,4	84,5
Abril	13,3	20,7	8,8	53,7
2000/2001				
Noviembre	24,5	21,5	8,6	9,6
Diciembre	32,4	27,3	10,5	55,0
Enero	24,6	28,2	15,1	137,0
Febrero	27,9	30,3	14,9	209,9
Marzo	16,2	24,7	14,0	163,5
Abril	14,0	19,7	7,6	43,3
2001/2002				
Noviembre	26,4	21,8	10,5	223,7
Diciembre	24,9	25,8	12,8	76,8
Enero	26,4	28,6	14,8	108,3
Febrero	21,8	26,5	12,7	188,0
Marzo	16,2	24,7	14,0	284,0
Abril	13,5	18,1	7,1	70,5

El año agrícola 1999/2000 presentó los valores más altos de radiación y temperatura, mientras que en el último año (2001/2002) hubo mayor nivel de precipitaciones y se observaron los valores más bajos de radiación global y temperatura máxima de todo el experimento.

Para realizar la parametrización del modelo, en primer lugar, se calibraron los coeficientes genéticos relacionados con la fenología del cultivo y a continuación se calibraron los coeficientes de crecimiento.

Se partió de la simulación con los coeficientes genéticos genéricos (se pueden seleccionar por defecto para ejecutar el modelo) de un cultivar grupo de madurez IV de soja, los que a continuación se modificaron manualmente en el archivo que caracteriza los mismos (SBGRO045. CUL) hasta obtener el menor desvío entre los datos simulados y los observados en los años agrícolas 1999-2000 y 2000-2001 para cada cultivar de soja.

El archivo SBGRO045.SPE que caracteriza la especie fue modificado con los siguientes cambios que afectan la fotosíntesis: la temperatura base se disminuyó de 8°C a 6°C y también se modificaron los valores umbrales para la función que calcula el efecto de la temperatura mínima sobre la tasa fotosintética del próximo día a saturación de luz, cambiándolos de 0°C y 19°C a -2°C y 17°C. Esta necesidad de cambio en la temperatura base para la fotosíntesis (K. Boote, comunicación personal) fue realizada previamente por otros autores (45, 46) y demuestra la capacidad de adaptación del cultivo a condiciones de temperatura más bajas que las original-

mente incluidas en el modelo. Además, para lograr un mejor ajuste, se modificó la temperatura para la formación de vainas, pasando de 14 a 10°C. En este sentido, otros autores ya habían notado la necesidad de cambio de las temperaturas cardinales para esta fase fenológica (14, 19).

En la figura 1 se puede observar la evolución de la biomasa total y de vainas medidas y simuladas por el modelo CROPGRO-soybean durante el ciclo agrícola 1999-2000, para los dos cultivares utilizados en el experimento con los coeficientes originales (izquierda) y calibrados (derecha) luego de modificar los archivos cultivar y especie.

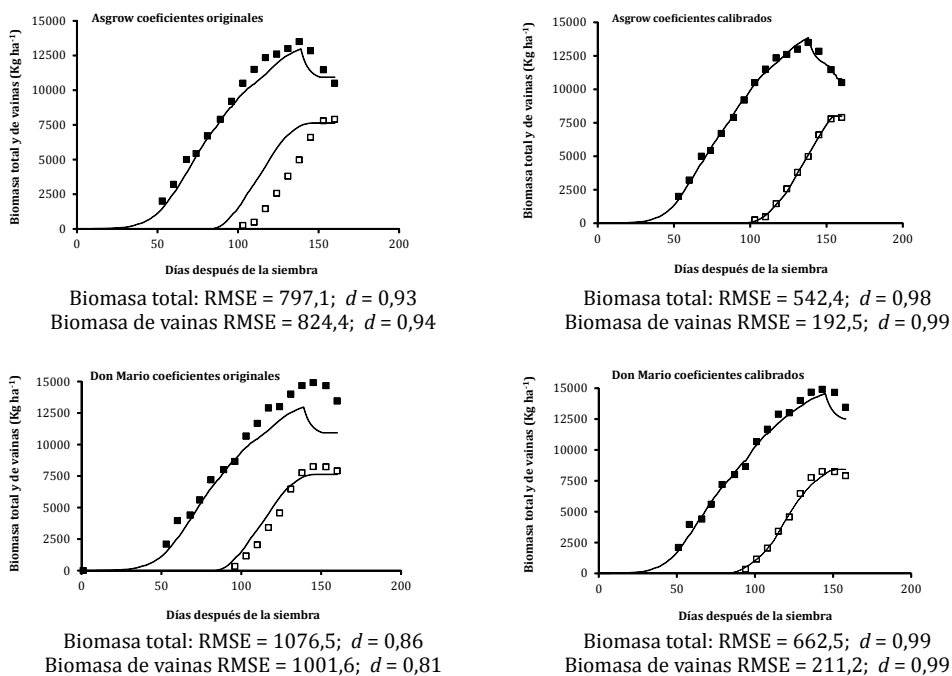


Figura 1. Evolución estacional de biomasa total y de vainas simulada (línea) y medida: total (■) y vainas (□) para el cv. Asgrow 4656 y para el cv. Don Mario DM4700 durante el ciclo agrícola 1999/2000 con los coeficientes originales (derecha) y modificados (izquierda).

Figure 1. Seasonal evolution of biomass (total and pods) simulated (line) and measured (symbols) total (■) and pods (□) for cv. Asgrow 4656 and for cv. Don Mario DM4700 during the 1999/2000 crop season with the original (right) and modified coefficients (left).

La calibración logró una visible mejora en la simulación, obteniéndose valores más bajos en el RMSE y un índice *d* cercano a 1, lo que confirma la bondad del ajuste y cuya mejora se puede observar en los estadísticos que se encuentran al pie de cada figura.

En la tabla 2 se pueden comparar los valores de rendimiento del año agrícola 2000-2001 simulados por el modelo utilizando los coeficientes originales para una soja del grupo 4, con los coeficientes modificados luego de la calibración.

La diferencia entre rendimiento simulado y observado con los coeficientes originales fue de 42,7% y 34,9% para Don Mario y Asgrow, respectivamente.

Luego del proceso de calibración, esta diferencia pasó a ser de 1,3% y 3,3% para ambos cultivares. El RMSE de la soja Don Mario disminuyó de 1107,8 a 99,6, mientras en Asgrow, pasó de 842,5 a 102,6 cuando se utilizaron los coeficientes originales y los calibrados, respectivamente.

En la validación con datos del último año de ensayo (tabla 3, pág. 58) se puede observar que las fechas de ocurrencia de las fases fenológicas de los dos culti-

vares de soja analizados presentan, como máximo, diferencias de 2 días entre los datos observados y simulados.

En algunos subperíodos fenológicos no se observan diferencias entre los datos simulados con los observados.

La diferencia porcentual en IAF máximo fue de 7,60% y 9,35%, mientras el rendimiento alcanzó diferencias de 1,1% y 4,9% para la soja Don Mario y Asgrow, respectivamente.

Debido a que los valores hallados de RMSE para los dos cultivares de soja fueron bajos, se aceptaron como válidos los coeficientes genéticos calibrados.

Además, a fin de contrastar los resultados del modelo calibrado con datos provenientes de otro lugar, se realizó un test con datos de rendimiento provenientes de un cultivo realizado bajo siembra directa (43), hallándose un error medio de estimación menor al 10%. Esta diferencia se consideró aceptable (33, 41) por lo que se utilizaron estos nuevos coeficientes obtenidos en el ejercicio del impacto de cambio climático sobre el rendimiento del cultivo.

Tabla 2. Rendimiento (Kg ha⁻¹) simulado (Sim.) y observado (Obs.). RMSE: raíz del cuadrado medio del error. Dif.: Diferencia = [(Sim.- Obs.)/Obs.] * 100 durante el ciclo agrícola 2000/2001, ejecutando el modelo con los coeficientes genéticos originales (soja grupo 4) y con los coeficientes modificados después de la calibración.

Table 2. Yield (Kg ha⁻¹) simulated (Sim.) and observed (Obs.). RMSE: root-mean-square error. Dif.: difference = [(Sim.- Obs.)/Obs.] * 100 during the 2000/2001 crop season, running the model with the original genetic coefficients (soybean group 4) and with the modified coefficients after calibration.

	Don Mario				Asgrow			
	Sim.	Obs.	RMSE	Dif.	Sim.	Obs.	RMSE	Dif.
Con coeficientes originales	2888	5040	1107,8	42,7	2888	4434	842,5	34,9
Con coeficientes calibrados	4977	5040	99,6	1,3	4286	4434	102,6	3,3

Tabla 3. Validación del modelo CROPGRO-soybean durante el ciclo agrícola 2001/02 con los coeficientes previamente calibrados. Datos en fecha juliana para estados fenológicos y en Kg ha⁻¹ para rendimiento. Sim.: datos simulados por el modelo. Obs.: datos observados en el experimento. RMSE: raíz del cuadrado medio del error. Dif.: Diferencia = (Sim.-Obs.) en días, para estadios fenológicos R1 a R7; Diferencia = [(Sim.- Obs.)/Obs.] * 100, para el resto de las variables.

Table 3. Validation of CROPGRO-soybean model during the season 2001/02 with the coefficients previously calibrated. Data in julian dates for phenological stages and Kg ha⁻¹ for yield. Sim.: data simulated by the model. Obs.: data observed in the experiment (Obs.). RMSE: root-mean-square error. Dif.: difference = (Sim.-Obs.) in days, for R1 to R7 phenological stages; difference = [(Sim.- Obs.)/Obs.] * 100, for the other variables.

	Don Mario				Asgrow			
	Sim.	Obs.	RMSE	Dif.	Sim.	Obs.	RMSE	Dif.
R1	11	12	1,123	-1	5	5	1,077	0
R4	36	36	0,453	0	25	24	1,985	1
R6	56	55	1,432	1	51	53	3,043	-2
R7	97	97	0,791	0	91	93	2,892	-2
rendimiento	4411	4363	97,866	1,1	3788	3611	190,334	4,9
IAF máx.	7,46	8,27	1,234	7,60	6,90	6,31	1,331	9,35

R1: día cuando el 50% de las plantas tienen al menos una flor abierta en cualquier nudo de la planta en cualquier tallo; R4: día cuando el 50% de las plantas tienen al menos una vaina totalmente expandida en cualquier tallo; R6: día cuando el 50% de las plantas muestran al menos una vaina conteniendo semillas verdes, que llenan la cavidad de la vaina en cualquier tallo; R7: día cuando el 50% de las plantas tienen al menos una vaina de color amarillento en cualquier tallo. Madurez fisiológica.

R1: day when 50% of plants have at least one flower at any node on the plant in any stem; R4: day when 50% of plants have at least one fully expanded pod in any stem; R6: day when 50% of plants have at least one pod containing a full-sized green seed in any stem; R7: day when 50% of plants first have at least one pod that is yellowing in any stem. Physiological maturity.

Con los coeficientes ajustados, el modelo se transforma en una herramienta más efectiva para ser utilizada en planificación, manejo de cultivos y sus consecuencias, así como diseñar distintas estrategias ante el cambio climático y el pronóstico de rendimiento.

La lista de los coeficientes genéticos (originales y obtenidos después de la parametrización) se puede ver en la tabla 4 (pág. 59).

Si se analiza el impacto del cambio climático sobre el rendimiento (figura 2, pág. 60) en porcentajes proyectados para los años 2030 y 2060, en comparación con el clima actual, para la fecha de siembra considerada normal en la región (12 de noviembre) y en condiciones de sequo, se observa que la misma genética presentaría un 34 y 38% de aumento del rendimiento para las proyecciones climáticas de las décadas 2030 y 2060, respectivamente.

Los aumentos se deberían al incremento en la tasa de fotosíntesis, como consecuencia del aumento en la concentración de CO₂ para una planta C₃ como es la soja. Además, la concentración de CO₂ y su efecto interactúan con la temperatura y las precipitaciones, resultando un análisis complejo y aún bajo estudio (27).

Tabla 4. Coeficientes genéticos originales (soja del grupo IV) y calibrados para los cultivares Asgrow 4656 y Don Mario DM4700.

Table 4. Genetic coefficients: original (group IV soybeans) and calibrated for Asgrow 4656 and Don Mario DM4700 cultivars.

Código	Originales	Asgrow	Don Mario
CSDL fotoperíodo crítico (horas) por debajo del cual el desarrollo reproductivo no es afectado por la longitud del día	13,09	13,20	12,95
PPSEN pendiente de la tasa relativa (1/horas) de desarrollo para longitudes del día superiores a CSDL o sensibilidad fotoperiódica	0,294	0,294	0,294
EM-FL tiempo (días fototermales) desde el final de la fase juvenil a la primera flor, duración mínima con temperatura (T) y fotoperíodos (F) óptimos (T F op)	19,4	12,5	15,0
FL-SH tiempo (días fototermales) desde la primera flor a la primera vaina (T F op)	7,0	8,5	9,7
FL-SD tiempo (días fototermales) desde la primera flor a la primera vaina con semillas (T F op)	15,0	15,0	19,4
SD-PM tiempo (días fototermales) desde la primera vaina conteniendo semillas a madurez fisiológica (T F op)	34,0	28,0	35,1
FL-LF tiempo (días fototermales) desde la primera flor al final del crecimiento de hojas (T F op)	26,0	26,0	26,0
LFMAX tasa fotosintética máxima (m.mol. CO ₂ /m ² .s) con saturación lumínica y temperatura óptima	1,03	1,25	1,10
SLAVAR área foliar específica (cm ² /g) para hojas nuevas durante el pico de crecimiento vegetativo	375	400	390
XFRUIT fracción máxima de la fotosíntesis bruta diaria disponible para semillas y vainas	1,0	1,0	1,0
WTPSD: peso máximo de semilla (g) bajo condiciones no limitantes de sustrato	0,19	0,19	0,19
SFDUR: duración (días fisiológicos) de llenado de semilla	23,0	21,0	21,0
SDPDV número de semillas por vaina	2,20	2,10	2,10
PODUR tiempo (días fisiológicos) para que el cultivo adquiera la carga completa de vainas en condiciones óptimas	10,0	12,0	16,0

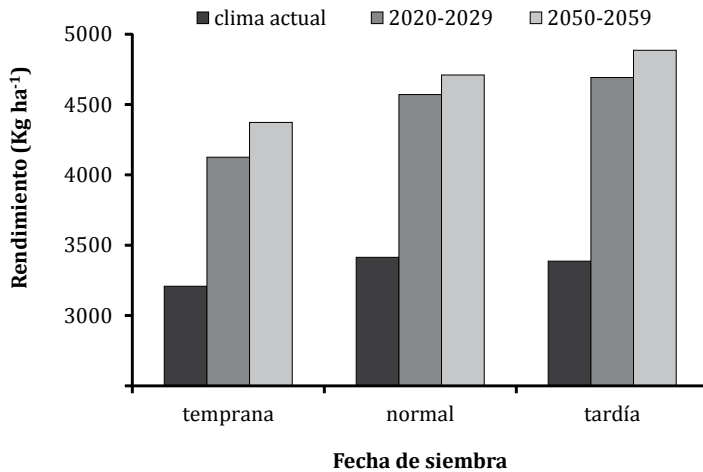


Figura 2. Estimaciones de rendimiento actual de soja y proyecciones para las décadas 2020/29 y 2050/59 de soja, para tres fechas de siembra: normal (12 de noviembre), 15 días antes (temprana) y 15 días después, en las condiciones agroclimáticas de Azul.

Figura 2. Estimates of current soybean yield and projections for the decades 2020/29 and 2050/59 for three sowing dates. Standard (November 12), 15 days before (early) and 15 days later, in the agroclimatic conditions of Azul.

Aumentos en el rendimiento para el cultivo de soja de 24, 44 y 54% fueron previstos para las décadas de 2020, 2050 y 2080 en trabajos realizados por Murgida *et al.* (2014) usando proyecciones del modelo PRECIS. Otros trabajos han previsto aumentos del 68% (promedio para la Región pampeana) en el rendimiento de soja para finales del siglo XXI utilizando versiones anteriores del DSSAT y el modelo regional MM5-CIMA bajo el mismo escenario SRES A1 (27, 28).

El cambio en el clima debe acompañar lo que en Agrometeorología se denomina *sincronización*, que consiste en sembrar el cultivo cuando los elementos del tiempo y el clima son óptimos para el mismo y constituye una medida de adaptación a los nuevos escenarios climáticos.

En la figura 2 también se puede observar la variación del rendimiento simulado en una fecha de siembra temprana y tardía en comparación con la fecha de siembra normal para el cultivo creciendo en condiciones de secano en el clima actual y futuro.

En las condiciones de clima actual, cualquier cambio en la fecha de siembra no refleja mejoras en el rendimiento del cultivo, sino por el contrario, presenta disminuciones entre 6 y 10% para fechas tempranas y tardías, respectivamente.

Para los escenarios simulados, el adelanto de la fecha de siembra tampoco favorece el rendimiento (-10% para 2030 y -7% para 2060 respectivamente).

En cambio, atrasando 15 días la fecha de siembra se observan aumentos de 3 y 4% para el clima 2030 y 2060, respectivamente.

El atraso en la fecha de siembra muestra un aumento en los rendimientos porque los cambios de temperatura proyectados permitirían desplazar el ciclo del cultivo hacia condiciones térmicas más favorables sin correr riesgos de heladas. Mejoras en el rendimiento para el cultivo de maíz con siembras tardías fueron encontrados para esta misma zona (51).

Es necesario aclarar que en este estudio no se ha tenido en cuenta el efecto de las plagas y enfermedades sobre el cultivo, ni los efectos de aclimatación que el mismo podría tener a las nuevas condiciones climáticas. Además, la estimación de los impactos potenciales del cambio incluye la confiabilidad de los escenarios climáticos definidos con proyecciones que fueron realizadas para un período de 10 años, lo cual impide evaluar aspectos de suma importancia para la actividad agrícola como lo es la variabilidad interanual.

Estos resultados preliminares muestran que los impactos a nivel de rendimiento son positivos y altos, indicando que el cultivo de soja sería poco

afectado por los escenarios climáticos futuros. Esto indica que existe una alta probabilidad de que la tendencia a la expansión del cultivo continúe.

CONCLUSIONES

El modelo CROPGRO-soybean ajustado para las condiciones locales, es una herramienta útil para simular el comportamiento de cultivos de soja en condiciones reales.

El modelo puede ser utilizado como herramienta de planificación, permitiendo cuantificar el impacto y formular distintas estrategias de manejo ante diversos escenarios climáticos.

Con el CROPGRO-soybean calibrado y validado, el análisis del impacto del clima futuro, generado por el modelo PRECIS y desarrollado para las décadas 2020 y 2050 bajo el escenario socioeconómico futuro A2 predice un aumento de rendimiento en el cultivo de soja para las próximas décadas. La estrategia de atraso en la fecha de siembra puede ser beneficiosa para aumentar aún más los rendimientos, aprovechando las nuevas condiciones ambientales que tendrán un período libre de heladas más extenso que el actual.

BIBLIOGRAFÍA

1. AABA. Atlas Ambiental de Buenos Aires. 2010. Disponible en: <http://www.atlasdebuenosaires.gov.ar>. (Fecha de consulta: 16/02/2014).
2. Alves, L.; Marengo, J. 2010. Assessment of regional seasonal predictability using the PRECIS regional climate modeling system over South America. *Theoretical and Applied Climatology*. 100: 337-350.
3. Allen, R.; Pereira, L.; Raes, D.; Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper n° 56. FAO. Roma.
4. Boote, K.; Jones, J.; Hoogenboom, G. 1998. Simulation of crop growth: CROPGRO model. En: Peart, R. M., Curry, R.B. (eds.). *Agricultural systems modelling and simulation*. Marcel Dekker, New York. p. 651-692.
5. Boote, K.; Jones, J.; Hoogenboom, G.; Batchelor, W.; Porter, C. 2010. CROPGRO: crop growth and partitioning module. En: J. W. Jones, G. Hoogenboom, P. W. Wilkens, C. H. Porter, and G. Y. Tsuji (Ed.). *Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0. Volume 4. DSSAT v4.5: Crop Model Documentation*. University of Hawaii. Honolulu, H I.

6. Cabré M.; Solman S.; Nuñez M. 2010. Creating regional climate change scenarios over southern South America for the 2020's and 2050's using the pattern scaling technique: validity and limitations. *Climatic Change*. 98: 449-469.
7. Cassel, D.; Nielsen, D. 1986. Field capacity and available water capacity. In KLUTE, A. (ed). *Methods of soil analysis*, Madison, ASA-SSSA, Monograph N°9. 25 p.
8. Confalone, A.; Boote, K.; Lizaso Sau, F. 2011. Temperature and Photoperiod Effects on Vicia faba Phenology Simulated by CROPGRO-Fababean. *Agronomy Journal*. 103: 1036-1050.
9. CRAGM. Boletín del Centro Regional de Agrometeorología. Boletín Agrometeorológico del Centro-Sur de la Provincia de Buenos Aires. 1988-2014. Facultad. Agron. Azul. Buenos Aires.
10. Curry, R.; Peart, R.; Jones, J.; Boote, K.; Allen, L. 1990. Response of crop yield to predicted changes in climate and atmospheric CO₂ using simulation. *Trans Am Soc Agron Eng*. 33: 1383-1390.
11. Curry, R.; Jones, J.; Boote, K.; Peart, R.; Allen, L.; Pickering, N. 1995. Response of soybean to predicted climate change in the USA. In: *Climate change and agriculture: analysis of potential international impacts*. ASA special publication N° 9, American Society of Agronomy, Madison. p. 163-182.
12. Deis, L.; de Rosas, M. I.; Malovini, E.; Cavagnaro, M.; Cavagnaro, J. B. 2015. Impacto del cambio climático en Mendoza. Variación climática en los últimos 50 años. Mirada desde la fisiología de la vid. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. 47(1): 67-92.
13. Egli, D.; Bruening, W. 1992. Planting date and soybean yield: Evaluation of environmental effects with a crop simulation model: SOYGRO. *Agric For Meteorol*. 62: 19-29.
14. Egli, D.; Tekrony, D.; Heitholt, J.; Rupe, J. 2005. Air temperature during seed filling and soybean seed germination and Vigor. *Crop Sci*. 45: 1329-1335.
15. Fehr, W.; Caviness, C. 1977. Stages of soybean development, Special Report 80, Iowa State University of Science and Technology, Ames, IA.
16. Gardner, W. 1986. Water content (Ed.) *Methods of soil analysis*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. p. 493-594.
17. Hoogenboom, G.; Boote, K.; Jones, J. 1997. Modeling and risk management of soybean. In: *Proc World soybean research conference*, Kasetsart University Press, Bangkok. p 292-298.
18. Hoogenboom, G.; Jones, J.; Wilkens, P.; Porter, C.; Boote, K.; Hunt, L.; Singh, U.; Lizaso, J.; White, J.; Uryasev, O.; Royce, F.; Ogoshi, R.; Gijsman, A.; Tsuji, G.; Koo, J. 2012. DSSAT. Decision Support System for Agrotechnology Transfer, version 4.5 [CD-ROM]. University of Hawaii. Honolulu.
19. Hume, D.; Jackson, A. 1981. Pod formation in soybeans at low temperature. *Crop Science*. 21: 933-937.
20. INTA. 1973. Cuadernillo de la carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3760-16. Azul. Buenos Aires.
21. IPCC. Intergovernmental Panel on climate change. 2001. McCarthy, J.; Canziani, O.; Leary, N.; Dokken, D.; White, K. (ed). *Climate change. impacts, adaptation and vulnerability, contribution of working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
22. IPCC. Intergovernmental Panel on climate change 2014. Report: *Climate Change 2014*. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>. (Fecha de consulta: 20/09/2014).
23. Jones, J.; Ritchie, J. 1991. Crop growth models. In: *Management of farm irrigation systems*. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph. p. 69-98.
24. Jones, J.; Hoogenboom, G.; Porter, C.; Boote, K.; Batchelor, W. 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*. 18: 235-265.
25. Köppen, W. 1931. *Grundriss der Klimakunde*, Walter de Gruyter Co, Berlin und Leipzig. 388 p.
26. Lal, M.; Singh, K.; Srinivasan, G.; Rathore, L.; Naidu, D.; Tripathi, C. 1999. Growth and yield response of soybean in Madhya Pradesh, India to climate variability and change. *Agric. Forest Meteorol*. 93: 53-70.
27. Magrin, G.; Travasso, M.; Díaz, R.; Rodríguez, R. 1997. Vulnerability of the agricultural systems of Argentina to climate change. *Climate Research*. 9: 31-36.

28. Magrín, G.; Gay García, C.; Cruz Choque, D.; Giménez, J.; Moreno, A.; Nagy, G.; Nobre, C.; Villamizar, A. 2007. Latin America. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (ed. M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, C. E. Hanson). Cambridge University Press, UK. 581-615.
29. Mall, R.; Lal, M.; Bhatia, V.; Rathore, L.; Singh, R. 2004. Mitigating climate change impact on soybean productivity in India: a simulation study. *Agricultural and Forest Meteorology*. 121: 113-125.
30. Marengo, J.; Jones, R.; Alves, M.; Muniz, L.; Valverde, M. 2009. Future change of temperature and precipitation extremes in south America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *Int J Climatol*. 29: 2241-2255.
31. Marin, F.; Ribeiro, R.; Marchiori, P. 2014. How can crop modeling and plant physiology help to understand the plant responses to climate change? A case study with sugarcane. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*. 26: 49-63.
32. Mestelan, S. 2011. Características, distribución y usos de los suelos del partido de Azul. En: Requesens, E. (coordinador). Bases agroambientales para un desarrollo sustentable del partido de Azul. Docuprint S.A., Buenos Aires. 136 p.
33. Murgida, A.; Travasso, M.; González, S.; Rodríguez, G. 2014. Evaluación de impactos del cambio climático sobre la producción agrícola en la Argentina. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. 2014. Serie Medio Ambiente y Desarrollo. N° 155.
34. Mussetta, P.; Barrientos, M. J. 2015. Vulnerabilidad de productores rurales de Mendoza ante el Cambio Ambiental Global: clima, agua, economía y sociedad. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina*. 47(2): 145-170.
35. Nagarajan, K.; O'Neil, R.; Lowenberg-Deboer J.; Edwards C. 1993. Indiana Soybean system model (ISSM): I. Crop model evaluation. *Agric Syst*. 43: 357-379.
36. Nakicenovic, N.; Alcamo, J.; Davis, G.; De Vries, B.; Fenhann, J.; Gaffin, S.; Gregory, K.; Grübler, A.; Yong, J. 2000. Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, U. K. 599 p. Disponible en: <http://www.grida.no/climate/pcc/emission/index.htm>. (Consultado el 24/06/2013).
37. Navarro, M.; Confalone, A.; Vilatte, C.; Aguas, L. 2011. Bases agroambientales para un desarrollo sustentable del partido de Azul. Docuprint S.A., Buenos Aires. 136 p.
38. Palosuo, T.; Kersebaum, K.; Angulo, C.; Hlavinka, P.; Moriondo, M.; Olesen, J.; Patil, R.; Ruget, F.; Rumbaur, C. 2011. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. *Eur J. Agron*. 35: 103-114.
39. Pazos, M. S. 2009. Los Phaeozem pampeanos en la WRB 2006. *Geociencias*. 16: 19-22.
40. Pickering, N.; Jones, J.; Boote, K. 1995. Adapting SOYGRO V5.42 for prediction under climate change conditions. In: *Climate change and agriculture: analysis of potential international impacts*, ASA special publication N° 59, American Society of Agronomy, Madison. p. 77-98.
41. Porter, C.; Jones, J.; Adiku, S.; Gijsman, A.; Gargiulo, O.; Naab, J. 2010. Modeling organic carbon and carbon-mediated soil processes in DSSAT v 4.5. *Operational Research*. 10: 247-278.
42. Requesens, E. 2011. Capítulo V. Integración agroecológica del partido de Azul. En: Requesens, E. (coordinador). Bases agroambientales para un desarrollo sustentable del partido de Azul. Docuprint S.A., Buenos Aires. 136 p.
43. Ressia, J.; Lázaro, L.; Lett, L.; Mendivil, G.; Portela, G.; Balbuena, H. 2003. Sistemas de labranza e inoculación en soja. Efectos sobre el crecimiento y rendimiento del cultivo. *Agrociencia* 37: 167-176.
44. Rosenzweig, C.; Jones, J.; Hatfield, J.; Ruane, A.; Boote, K.; Thorburn, P.; Antle, J.; Nelson, G.; Porter C.; Janssen, S.; Asseng, S.; Basso, B.; Ewert, F.; Wallach, D.; Baigorria, G. Winter, J. 2013. The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): protocols and pilot studies. *Agric For Meteorol*. 170:166-182.

45. Ruíz-Nogueira, B.; Boote, K; Sau, F. 2001. Calibration and use of CROPGRO-soybean model for improving soybean management under rainfed conditions. *Agricultural Systems*. 68: 151- 173.
46. Sau, F; Boote, K; Ruíz-Nogueira, B. 1999. Evaluation and improvement of CROPGRO-soybean model for a cool environment in Galicia, northwest Spain. *Field Crop Research*. 61: 273-291.
47. Seiler, R.; Vinocur, M. 1995. Evaluación de un modelo de rendimiento como herramienta para la planificación y el manejo de cultivo. *Agriscientia*. 12: 53-59.
48. SIIA. Sistema Integrado de Información Agropecuaria. Programa de Servicios Agrícolas Provinciales, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Disponible en: <http://www.siiia.gov.ar/series>.(Fecha de consulta: 12/09/2015).
49. Soil Survey Staff. 2014. Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
50. Travasso, M.; Magrin, G.; Rodriguez, G.; Solman, S.; Nunez, M. 2007. Climate change impacts on regional maize yields and possible adaptation measures in Argentina. *International Journal of Global Warming*. 1: 201-213.
51. Vilatte, C.; Confalone, A. 2012. Impacto del cambio climático sobre el cultivo de maíz en el centro de la Provincia de Buenos Aires. Editorial Académica Española. 81p.
52. Willmott, C. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society* 63:1309-1313.
53. Wolf, J. 2002. Comparison of two soya bean simulation models under climate change. II. Application of climate change scenarios. *Climate Research*. 20:71-81.