

SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO DE MAÍCES PRECOCES EN CONDICIONES DE SECANO¹

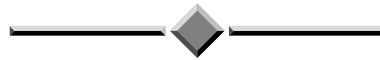
Ricardo E. Preciado², Mauricio Erazo², J. Angel Quijano², Arturo Terrón², Roberto Paredes²

RESUMEN

Simulación del crecimiento de maíces precoces en condiciones de secano. En el presente trabajo se plantea el uso de modelos de simulación para asistir la selección de materiales de ciclo precoz adaptados a dichos ambientes. Durante el verano de 1997 en el Campo Experimental Bajío (CEBAJ) se realizó un análisis de crecimiento en 99 colectas precoces de maíz. Con dicha información se calibraron los coeficientes genéticos requeridos para utilizar el modelo CERES-MAIZE. A partir de los valores de emergencia a floración (P1) y floración a madurez (P5) se identificaron ocho grupos dentro de las 99 colectas. Con estos resultados, aunados a la utilización de datos históricos de clima y características específicas del suelo, es posible simular el rendimiento potencial de las colectas para cualquier ambiente. A manera de ejemplo: los coeficientes genéticos de colectas representativas de cada uno de los ocho grupos identificados, se usaron para simular su rendimiento potencial en la región del norte de Guanajuato, donde se registra una precipitación anual de 300 a 600 mm y el maíz se siembra bajo condiciones de temporal (secano). La rutina utilizada fue Seasonal del DSSAT V.3.1. Se emplearon datos climáticos históricos de 11 años. En dicho ambiente el rendimiento de la colecta 36 fue el más alto, tanto en condiciones de temporal, como sin restricción de humedad, mientras que en el CEBAJ el rendimiento de esta colecta había sido uno de los más bajos. El presente trabajo permitió corroborar la utilidad de los modelos de simulación, para identificar la adaptación específica de genotipos a un ambiente determinado.

ABSTRACT

Growth simulation of early corn landraces for specific dry land regions. The use of crop modeling methodology for the selection of early materials adapted to those regions was considered in this assay. A growth analysis of 99 early corn landraces was conducted at INIFAP's Bajío Experiment Station (CEBAJ) during the summer of 1997. Using the CERES-MAIZE crop model, the genetic coefficients were adjusted with such information. Eight groups were identified in the 99 landraces according to the "emergence to tasseling" and "tasselling to maturity" values (P1 and P5). With these results, it is possible to simulate yield potential of the landraces under different rainfed environments using soil and historical weather information. As an example, the genetic coefficients of the eight corn landraces representing each group, were used to simulate their yield potential at the northern Guanajuato region, where corn is grown mainly under dry land conditions, (300 to 600 mm of annual precipitation). Simulation was conducted using seasonal routine of CERES-MAIZE crop model included on DSSAT V 3.1. Eleven years of historical weather information were used for this simulation. For this location, Landrace 36 presented the highest grain yield under both conditions. At CEBAJ, Landrace 36 showed the lowest yield out of eight. These results support the use of crop modeling in the selection of genotypes for specific environments.



INTRODUCCIÓN

En México se siembran cerca de un millón de hectáreas de maíz de temporal, en condiciones de mediana y baja productividad (Turrent *et al.* 1998), esta región

se caracteriza por la errática precipitación, y por una amplia gama de sistemas de producción, donde los productores hacen un escaso uso de tecnología mejorada, y como consecuencia se obtienen rendimientos muy bajos (de 0,5 a 3,0 t/ha), y la producción se destina casi en

¹ Recibido para publicación el 2 de mayo del 2000. Presentado en la XLVI Reunión Anual PCCMCA, Puerto Rico, 2000.

² Programa de Maíz del Campo Experimental Bajío, Apdo. Postal 112, 38000, Celaya, Gto. México. Tel. (52) 461-153-23 ext. 123, e-mail: preciado@cirpac.inifap.conacyt.mx

su totalidad al autoconsumo. Las condiciones climáticas en estas regiones de temporal son de moderada a extremadamente secas, con una precipitación anual entre 300 y 700 mm. Para regiones de temporal (secano), donde las condiciones son aún más drásticas, se requieren variedades precoces de polinización libre, con resistencia o tolerancia a sequía, que respondan de manera eficiente a los factores climáticos adversos de producción, y que posean un alto potencial de rendimiento.

Por otro lado, en México en algunas regiones de los estados de Guanajuato, Querétaro, Aguascalientes, Michoacán, Zacatecas y Durango, donde actualmente se cultiva maíz en condiciones de riego, sólo se recarga una pequeña parte del agua que se extrae de los mantos acuíferos. Por esta razón, en el futuro el uso del agua para cultivos como el maíz estará más restringido, por lo que en estas superficies también se requerirá de híbridos precoces, de alto potencial de rendimiento, para contribuir a sostener la producción de maíz.

De acuerdo con la problemática mencionada, los investigadores que realizan mejoramiento genético de maíz, enfrentan el reto de desarrollar genotipos apropiados para las condiciones de producción mencionadas.

Una herramienta que facilita los esquemas de mejoramiento genético, son los modelos de simulación los cuales se utilizan con datos de clima, suelo y manejo del cultivo en ambientes específicos, para estimar el rendimiento potencial de cada región.

Las variables que utilizan los modelos de simulación pueden ser agrupadas de acuerdo con los componentes de la ecuación del fenotipo, $F = G + A + GA$, donde G (genotipo) está representado por la información fisiológica, A (ambiente) por la información climática, edáfica y de manejo; y GA (interacción genotipo-ambiente) representada por variables como el índice de área foliar. Al correr los modelos de simulación es posible hacer variar algunos componentes de la ecuación, con el objeto de estimar su efecto sobre el rendimiento potencial.

La utilidad de los modelos de simulación, desde el punto de vista de mejoramiento genético, se puede resumir de la siguiente manera: i) permiten definir el potencial de rendimiento y el tipo de híbridos más apropiados para regiones específicas, donde exista información climática y edáfica disponible; ii) permiten definir criterios de selección para aprovechar un ambiente particular en regiones de interés; iii) permiten identificar caracteres que influyan de manera importante en el rendimiento como criterio de selección, en la medida que se puedan hacer variar los componentes en los modelos de simulación.

Cuando existe una alta correlación genética aditiva entre un carácter primario, como el rendimiento de grano, y un carácter secundario, puede ser ventajoso mejorar el rendimiento mediante la selección de un carácter secundario. La respuesta correlacionada por selección indirecta puede ser más alta que la respuesta a la selección directa (Nevado y Cross 1990). Debido a que la herencia de dichos caracteres puede ser más simple que el mismo rendimiento (Blum 1989).

Shorter *et al.* (1991), al discutir diversos enfoques que involucran el mejoramiento genético, la fisiología y los modelos de simulación, para evaluar la adaptación de genotipos en ambientes específicos, indican que los modelos de simulación proveen los medios para identificar y priorizar algunos caracteres de adaptación de manera cuantitativa a través de un amplio rango de ambientes específicos. Agregan los autores, que es necesario entender los factores climáticos involucrados que condicionan la adaptación a los ambientes, los procesos fisiológicos y sus bases genéticas, y la naturaleza y amplitud de las respuestas genotípicas a dichos factores. Si se entienden los procesos, los objetivos del mejoramiento pueden ser formulados de manera explícita, y definir de manera directa los criterios de selección, de acuerdo a los procesos específicos o caracteres involucrados.

Los modelos de simulación que involucran con detalle los procesos fisiológicos se han usado como una herramienta de investigación, una estructura de trabajo para el análisis de resultados experimentales, y además en el estudio del efecto de procesos individuales de crecimiento del cultivo en relación con el ambiente (Spitters 1990). Este tipo de modelos explican las tasas de crecimiento observadas debidas a procesos fisiológicos en relación con algunos factores ambientales.

De acuerdo con Spitters (1990) los “modelos fisiológicos” son útiles para:

- Integrar y resumir el conocimiento de una forma cuantitativa.
- Iniciar nuevas investigaciones, modelos que dan información para plantear hipótesis.
- Facilitan la extrapolación de resultados de laboratorio controlados a la simulación del crecimiento de todo el cultivo.
- Evaluar diferentes escenarios.

Cuando se evalúa la adaptación de híbridos a una región particular a través de modelos de simulación utilizando datos históricos de clima de varios años, se obtiene una visión más amplia, que cuando se evalúa con

base en los resultados obtenidos de experimentos conducidos durante un número limitado de años (Shorter *et al.* 1991). Esta información puede asistir la selección de genotipos que reúnan características de potencial de rendimiento y reducción de riesgos a factores adversos de producción.

Con el objetivo de generar criterios de selección, Preciado *et al.* (1995), utilizaron un modelo de simulación en el que se utilizaron datos climáticos generados de 50 años en tres localidades del estado de Nebraska, USA. En este trabajo se informó que híbridos hipotéticos con un período de llenado de grano más amplio mostraron mayores rendimientos en comparación con los híbridos testigo. Singels y De Jager (1991), al trabajar con variedades hipotéticas de trigo, que variaban en su sensibilidad al fotoperíodo y vernalización, demostró el potencial de los modelos de simulación para determinar las características óptimas de un genotipo, en un clima y suelo determinados, y concluyeron que esta herramienta puede ser muy importante en el futuro para la planeación de estrategias de mejoramiento y criterios de selección.

Para adaptar genotipos a una región específica Shorter *et al.* (1991), indican la necesidad de entender los factores ambientales involucrados que condicionan la adaptación a los ambientes, los procesos físicos que influyen en estos factores, y la naturaleza y variación de las respuestas genotípicas a dichos factores. También es importante entender las bases genéticas de los procesos fisiológicos involucrados.

CERES-Maize V 1.0. Este modelo simula el crecimiento y el rendimiento potencial de maíz al incorporar algoritmos para la transpiración del cultivo, balance de agua en el suelo, desarrollo del área foliar y la partición de materia seca. El modelo se utiliza con información genética, ambiental y de manejo del cultivo (Jones y Kiniry 1986).

El objetivo de este trabajo fue utilizar modelos de simulación como una herramienta para orientar la selección de genotipos adecuados a condiciones de temporal en regiones específicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el Campo Experimental Bajío (CEBAJ), dependiente del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), durante el ciclo primavera-verano de 1997, se caracterizaron 246 materiales criollos de maíz colectados en las regiones temporales del estado de Guanajuato. De este grupo

de colectas se seleccionaron las 99 más precoces, en las cuales se midieron las siguientes características: i) altura y sanidad de planta y de mazorca, tolerancia al acame y rendimiento en kg/ha; ii) color y textura del grano, número de hileras, número de granos por hilera, y número de granos por mazorca; y iii) floración femenina y masculina y madurez fisiológica.

En las 99 colectas también se realizó un análisis de crecimiento a partir de la floración, para lo cual se realizaron muestreos a intervalos semanales de tres plantas por colecta, para obtener el área foliar por planta, se midió largo x ancho de todas las hojas. Además se determinó el peso seco de cada una de las partes de la planta. Con los valores de peso seco se estimó la ganancia en peso de los órganos y las tasas de crecimiento en las colectas estudiadas.

Como una herramienta para procesar la información del análisis de crecimiento, se utilizó el modelo de simulación CERES-MAIZE incluido en el DSSAT V 3.1 para comparar los datos observados y los datos predichos de las 99 colectas. Esta herramienta fue utilizada para calibrar los coeficientes genéticos requeridos para alimentar el modelo CERES-MAIZE.

Posteriormente con algunos coeficientes genéticos obtenidos de las colectas, se realizó la simulación, para lo cual se utilizaron datos diarios de temperatura máxima y mínima, radiación solar y precipitación obtenidos durante 11 años en la estación agroclimática del Campo Experimental Norte de Guanajuato, perteneciente al INIFAP. Para las condiciones edáficas se asumió que los materiales se establecieron en un suelo de textura arcillosa. Considerando además que el agua es uno de los factores limitantes para el crecimiento y desarrollo de los cultivos en dicha región, la simulación se realizó tanto para condiciones de temporal como sin restricción de humedad la cual se manejó mediante la opción de riego automático, incluida en el modelo. El programa utilizado fue SEASONAL del DSSAT V.3.1, para realizar simulaciones múltiples, incluyendo ocho genotipos y 11 años de clima.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las 246 colectas de maíz establecidas en campo provenientes de diversas regiones temporales de Guanajuato, se seleccionaron las 99 más precoces que alcanzaron el 50% de floración masculina entre los 58 a 64 días. En el Cuadro 1 se presentan las características fenológicas de algunas de las colectas superiores en rendimiento, y mayor precocidad.

Cuadro 1. Rendimiento y características fenológicas de las colectas de maíz realizadas en Guanajuato y seleccionadas por precocidad en el Campo Experimental el Bajío, Guanajuato, México, 1997.

Colecta	Floración masculina (días)	Floración femenina (días)	Madurez fisiológica (días)	Rendimiento (t/ha)	
1	15	61	63	133	12,58
2	87	61	62	135	10,72
3	35	61	63	134	10,55
4	53	63	64	135	10,40
5	77	62	62	134	9,65
6	95	60	62	133	9,46
7	84	60	62	134	9,31
8	32	62	63	127	9,11
9	96	61	62	133	8,98
10	148	62	63	121	8,82
11	98	61	62	135	8,10
12	114	61	63	134	8,05
13	160	62	62	137	7,96
14	75	58	60	125	7,91
15	60	61	63	120	7,82
.
.
.
99	34	61	63	127	0,78
Media	60,93	62,48	130,97		5,75
STD	1,26	1,26	5,04		2,16

Es pertinente aclarar que para la temperatura media en el verano a 1.800 msnm, donde se encuentra el CE-BAJ, un material que florea a los 61 días, se considera muy precoz. Los días a floración de las 99 colectas seleccionadas estuvieron entre 60 y 63 días que las ubica dentro de este rango de precocidad. También se puede observar que bajo las condiciones de riego del CEBAJ, algunos materiales precoces presentaron altos rendimientos, tal es el caso de la colecta 15 con una producción de 12,58 t/ha.

Análisis de crecimiento. El análisis de crecimiento se realizó mediante muestreos semanales a partir de la floración en las 99 colectas precoces seleccionadas.

En el Cuadro 2 se presentan los datos, obtenidos de la Colecta 15 como un ejemplo de la información registrada para cada material. A través del procesamiento de los datos de peso seco de los componentes de la planta registrados en el análisis de crecimiento, se determinaron las tasas de crecimiento de cada una de las variables.

Para calibrar los coeficientes genéticos de las 99 colectas evaluadas, se compararon los datos observados a través del análisis de crecimiento con los simulados con el modelo CERES-MAIZE. Con base en los coeficientes genéticos obtenidos P_1 (estimado a través de la acumulación de unidades calor de la emergencia a la floración) y P_5 (estimado a través de la acumulación de unidades calor de la floración a la madurez fisiológica) se identificaron ocho grupos cuyas colectas representativas se presentan en el Cuadro 3.

La importancia de los coeficientes genéticos de las 99 colectas radica en que permitirán simular el potencial de rendimiento en ambientes específicos utilizando datos históricos de clima. El uso de modelos de simulación constituye una nueva línea de trabajo que facilitará la selección y el diseño de materiales para regiones específicas.

Con base en los coeficientes genéticos obtenidos, es importante enfatizar en la importancia de la floración a madurez que representa la acumulación de materia seca de la floración a la madurez fisiológica, la cual se estima a través de las unidades térmicas acumuladas en ese periodo. Este coeficiente es importante puesto que tiene una relación directa con el rendimiento, a medida que la floración a madurez fue mayor, el rendimiento de grano se incrementó debido a que existió un mayor número de días, en que se acumularon asimilados en el grano.

En la Figura 1 se presentan a manera de ilustración los valores simulados diariamente de la tasa de llenado de grano en comparación con los datos observados de la colecta 15, representativa de uno de los ocho grupos identificados.

Cuadro 2. Variables registradas para el análisis de crecimiento en la Colecta 15. Campo Experimental el Bajío, Guanajuato, México, 1997.

Muestreo	IAF	Hoja	Tallo	Vaina	Peso Seco (t/ha)				
					Esp.	Totomox	Grano	Olote	Jilote
1	2,05	1,04	4,02	0,67	0,21				0,58
2	2,79	2,22	3,97	1,74	1,03				3,09
3	2,67	2,13	3,78	1,83	0,99				6,05
4	2,74	2,58	4,97	1,95	0,97	2,24	2,98	1,64	
5	1,99	1,96	2,23	1,83	0,97	1,96	5,24	2,01	
6	2,59	2,66	6,10	2,10	0,94	2,44	9,30	1,88	
7	1,99	2,43	5,00	2,08	0,86	2,15	12,6	2,09	

Cuadro 3. Coeficientes genéticos de colectas representativas de los ocho grupos identificados a partir del análisis de crecimiento de 99 colectas. Campo Experimental el Bajío, Guanajuato, México, 1997.

Colecta	Emergencia a floración	Sensibilidad al fotoperíodo	Floración a madurez	Número potencial de granos	Tasa de crecimiento del grano	Rend. Obs. (kg/ha)	Rend. Sim. (kg/ha)
36	230	0	930	400	7,2	6175	6132
97	216	0	870	430	8,7	7517	7538
87	218	0	850	500	11,6	10721	10683
35	218	0	840	500	11,6	10548	10551
15	218	0	830	520	14,1	12583	12594
32	218	0	790	520	10,7	9111	9147
148	218	0	730	530	11,4	8820	8827
20	218	0	682	370	7,8	4184	4196

Con los coeficientes genéticos estimados de las ocho colectas representativas de cada uno de los grupos identificados, se simuló su comportamiento utilizando once años de datos climáticos históricos del Campo Experimental Norte de Guanajuato. En el Cuadro 4 se presentan algunas de las variables obtenidas como resultado de las simulaciones. Se puede apreciar que los materiales presentaron un período mayor de emergencia a antesis y de antesis a madurez fisiológica debido a las temperaturas más frescas que se presentan durante el verano en aquella región. Cabe resaltar el comportamiento de la colecta 36, que fue el material más precoz y con mayor rendimiento. Se esperaría que en estas condiciones la colecta 15 presentara un comportamiento similar al mostrado en el CEBAJ en condiciones de riego (Cuadro 1). Este resultado es interesante debido a que la

Cuadro 4. Variables simuladas en las colectas precoces en condiciones de temporal y sin restricción de humedad en el norte de Guanajuato, a partir de 11 años de datos históricos de clima. Campo Experimental el Bajío, Guanajuato, México, 1997.

Número de colecta	Antesis (días)	Madurez fisiológica (días)	Rendimiento (t/ha)	
			Sin restricción de humedad	Temporal
36	78,1	150,4	6,90	4,20
97	76,7	170,4	6,00	3,80
87	76,7	169,3	5,50	3,50
35	76,7	169,3	5,50	3,50
15	73,8	167,7	5,50	3,60
32	76,7	154,3	4,50	2,90
148	78,1	155,9	4,50	3,00
20	76,7	146,9	4,50	3,00

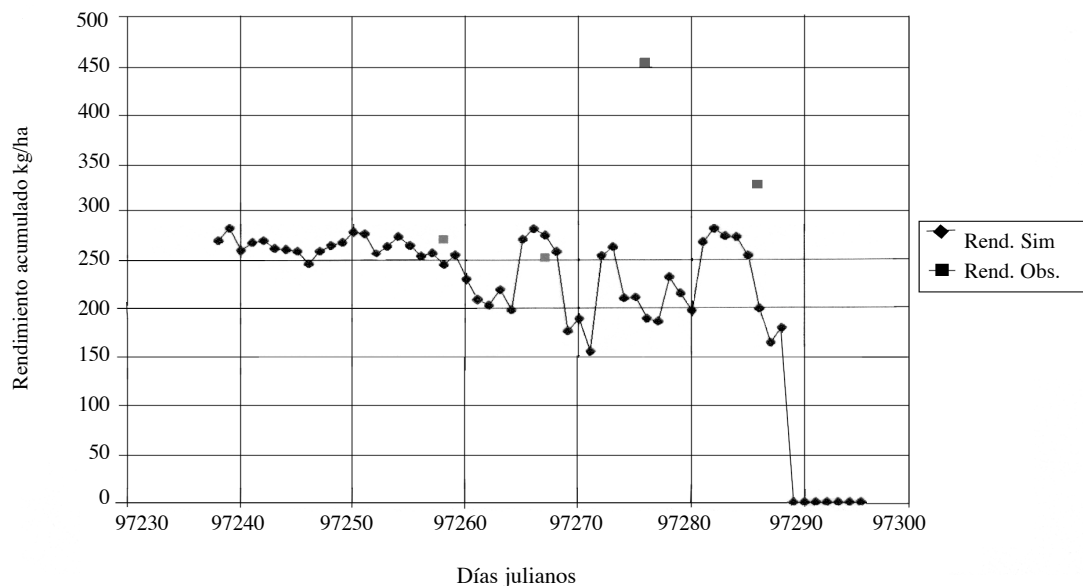


Figura 1. Datos observados y estimados a través del modelo de simulación para calibrar los coeficientes genéticos, ejemplo de la colecta 15. Campo Experimental el Bajío, Guanajuato, México, 1997.

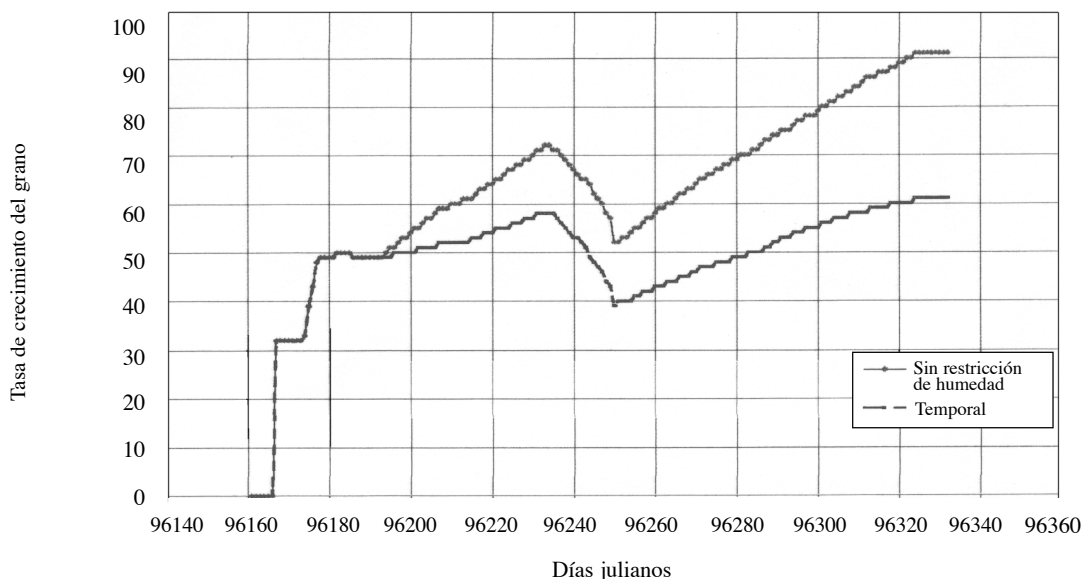


Figura 2. Comportamiento observado de la colecta 36 por medio de la rutina Seasonal del modelo de simulación CERES-MAIZE. Campo Experimental el Bajío, Guanajuato, México, 1997.

colecta 36 en el CEBAJ presentó un bajo rendimiento. Lo anterior evidencia el gran potencial de los modelos de simulación en la identificación de genotipos con capacidad de adaptación a condiciones específicas.

En la Figura 2 se presentan los valores simulados de la tasa diaria de crecimiento del grano en condiciones de temporal y sin restricción de humedad de la colecta 36. Como puede apreciarse, existe una diferencia marcada entre la tasa estimada de crecimiento del grano bajo condiciones de riego y temporal, lo cual refleja la importancia de este factor en esa zona del estado.

Con base en los datos obtenidos se puede decir que los modelos de simulación son una herramienta útil para identificar la adaptación específica de genotipos a un ambiente determinado. Además, si un modelo de simulación permite manipular posibles respuestas de características específicas de las plantas y si éstas son seleccionables, los modelos de simulación constituyen una herramienta muy útil para el mejoramiento genético, para “confeccionar” genotipos adecuados a condiciones específicas de clima, suelo y manejo agronómico. Además, los modelos de simulación pueden retroalimentar los programas de selección que deben enfocar sus esfuerzos a la obtención de genotipos eficientes en el uso de agua y nitrógeno.

LITERATURA CITADA

- BLUM, A. 1989. Breeding methods for drought resistance. In: Jones, H; Flowers, T.; Jones, M. eds. Plants under stress. Cambridge, Cambridge University Press. p. 197-215.
- JONES, C.A.; KINIRY, J.R. 1986. CERES-MAIZE. A simulation model of maize growth and development. Texas A & M University Press. College Station. 194 p.
- NEVADO, M.E.; CROSS, H.Z. 1990. Diallel analysis of relative growth rates in maize synthetics. *Crop Sci.* 30: 549-552.
- PRECIADO, R.; WEISS, A.; JOHNSON, B. 1995. Developing prototype maize (*Zea mays* L.) hybrids by crop modeling for specific rainfed regions. *Maydica* 40: 191-197.
- SHORTER, R.; LAWN, R.J.; HAMMER, G.L. 1991. Improving genotypic adaptation in crops – a role for breeders, physiologists and modelers. *Expl. Agric.* 27:155-175.
- SINGELS, A.; DE JAGER, J.M. 1991. Determination of optimum wheat cultivar characteristics using a growth model. *Agric. Systems.* 37: 25-38.
- SPITTERS, C.J.T. 1990. Crop growth models: their usefulness and limitations. *Acta Horticulture.* 267 (1990): 346-368
- TURRENT, A.; GÓMEZ, N.; RAMÍREZ, J.; MEJÍA, H.; ORTERGA, A.; LUNA, M. 1998. Plan de investigación del sistema maíz-tortilla en los Estados Unidos Mexicanos. México, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (Documento de circulación interna).