

USO DEL MODELO EPIC PARA ESTIMAR RENDIMIENTOS DE MAÍZ CON BASE EN VARIABLES FISIOTÉCNICAS EN EL ORIENTE DEL ESTADO DE MÉXICO

Use of the EPIC Model for Estimating Corn Yield Based upon Crop-Physiological Variables in East Region of State of Mexico

Justina Licona-Santana¹, Mario R. Martínez-Menes¹, Leopoldo E. Mendoza-Onofre^{2*},
Benjamín Figueroa-Sandoval¹ y Demetrio S. Fernández-Reynoso¹

RESUMEN

En México, la estimación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) normalmente se hace mediante métodos de campo que son costosos y requieren de tiempo para su ejecución. El aplicar modelos de simulación calibrados con datos provenientes de experimentos establecidos en el campo, es una alternativa rápida y menos cara. El objetivo de esta investigación fue calibrar y validar el modelo EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) para estimar rendimientos de maíz en el DDR 003-Textcoco. Para calibrar el modelo se reunió información de rendimiento, prácticas de manejo y otras características de 56 parcelas cultivadas con este cereal (ubicación geográfica, pendiente y dimensiones de parcelas), así como información climática y de caracterización física y química de los suelos. Además, por primera vez en México, se incorporaron variables fisiotécnicas como relación biomasa-energía, índice de área foliar potencial e índice de cosecha. Los rendimientos simulados se compararon con los observados. Posteriormente, se realizó un ajuste de las variables fisiotécnicas, se corrió nuevamente el modelo, volviéndose a comparar los rendimientos observados con los simulados. Para validar el modelo, se compararon los rendimientos reportados en 65 puntos de evaluación por la Secretaría de Desarrollo Agropecuario (SEDAGRO) con los rendimientos simulados con el modelo después del ajuste de las variables. Los resultados de la etapa de calibración, antes del ajuste de variables, indicaron que la suma de cuadrados del error (SEE) fue 1.65 en riego y 1.68 en seco; después del ajuste, la SEE disminuyó a 0.05 y 0.22, respectivamente. En

la etapa de validación hubo valores altos de SEE (9.66), atribuido a que en los puntos de muestreo de SEDAGRO los productores no reportan información precisa de todas las labores culturales aplicadas al cultivo. Es necesario incorporar variables fisiotécnicas en los registros rutinarios de campo, para mejorar la validación del modelo.

Palabras clave: modelos de simulación, modelos de validación, calibración de modelos, validación y predicción de rendimientos.

SUMMARY

In Mexico, estimation of corn (*Zea mays* L.) yields has been performed through field methods which, besides costly, are time consuming. Simulation models stand as a good option, once they are calibrated with data from field experiments, because they are faster and less expensive. The objective of this study was to apply both calibration and validation phases for the EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) Model to estimate corn yields in the DDR 003-Textcoco. In the calibration phase, local information on corn yields, crop practices, general characteristics of 56 sites grown with this cereal (geographical position, slope, and land area), climate, and physical and chemical properties of soils was gathered. Furthermore, for the first time in Mexico, crop physiological variables (as biomass-energy relationship, leaf area index potential, and harvest index) were incorporated to the model. Simulated and observed yields were compared; then crop variables were adjusted. The model was rerun and a new comparison between observed and simulated yields was made. The model was validated by comparing yields of 65 production plots, reported by Secretaría de Desarrollo Agropecuario (SEDAGRO), with simulated yields obtained once the adjustment of variables was done. The results of the calibration phase, before the adjustment of crop physiological variables,

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, estado de México.

² Autor responsable (leopoldo@colpos.mx)

indicated that sum of squares for the error (SEE) were 1.65 and 1.68 for irrigated and rain-fed plots, respectively. After the adjustment of variables, corresponding SEE decreased to 0.05 and 0.22. In the validation phase, SEE values of 9.66 were found, possibly because farmers do not report to SEDAGRO all the crop practices applied during the growing season precisely. For better model validation, it is necessary to register crop physiological variables in the common field formats.

Index words. simulation models, validation models, calibration of models, validation and prediction of yields.

INTRODUCCIÓN

En cualquier situación, la producción de un cultivo depende de su superficie sembrada y de su rendimiento unitario. Con frecuencia es necesario pronosticar la producción en una superficie amplia de alguna región, lo que, en general, se realiza mediante recorridos de campo y aplicación de encuestas. En regiones como los valles altos de México, este tipo de estimaciones, además de ser costosas y demandantes de tiempo, presentan limitaciones por la gran variabilidad de los rendimientos, ocasionada por la heterogeneidad en la topografía, el clima, el manejo de suelo y las prácticas agrícolas durante la estación de crecimiento, en especial en condiciones de secano, por las variaciones anuales y estacionales de la precipitación pluvial. En contraste, los modelos de simulación permiten estimar los rendimientos de manera más rápida y precisa; sin embargo, se requiere "alimentarlos" con información confiable. Por ello, es necesario conjuntar los métodos de campo con la aplicación de modelos. Entre los modelos de simulación empleados para predecir rendimientos de maíz (*Zea mays* L.) destacan el "Crop Estimation through Resources and Environmental Synthesis" (CERES), el "CORN-AP" y el "Erosion Productivity Impact Calculator" (EPIC).

En otros países, el modelo EPIC ha tenido una amplia gama de aplicaciones, entre otras la evaluación del impacto del cambio climático sobre el rendimiento de diversos cultivos (Easterling *et al.*, 1992b; McKenney *et al.*, 1992; Rosenberg *et al.*, 1992; Gyanedra *et al.*, 1997). Otros autores han estudiado la relación entre la pérdida de suelo por erosión (eólica e hídrica) con los rendimientos de maíz (Lee *et al.*, 1996), además

del impacto de las prácticas de conservación de suelo sobre los rendimientos de esta misma especie (Easterling *et al.*, 1997).

El modelo EPIC, cuando se alimenta con información específica, predice resultados puntuales. Cuando la información no es precisa, pueden emplearse interfaces del modelo con los Sistemas de Información Geográfica (SIG). El modelo provee información de clima, suelo y variables del cultivo, y el SIG se encarga de presentar esta información en mapas o cuadros, lo que es de gran importancia al realizar un análisis de variación espacial y temporal (Easterling *et al.*, 1992a; Ellen y Gyanedra, 1995; Dewi *et al.*, 1999).

En México, Tiscareño *et al.* (2003) emplearon el modelo EPIC para evaluar el impacto del cambio climático sobre la producción de maíz, frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y trigo (*Triticum aestivum* L.), mientras que Villar *et al.* (1998) lo aplicaron para estudiar el efecto de la erosión sobre la productividad del maíz. Sin embargo, en estos estudios no se incluyeron las variables fisiotécnicas del cultivo que el modelo requiere.

Debido a que en México no se había empleado el modelo EPIC para estimar rendimientos de maíz, considerando variables fisiotécnicas del cultivo como la relación biomasa-energía, el índice de cosecha y el índice de área foliar, el objetivo de este estudio fue calibrar y validar el modelo para simular tales rendimientos, utilizando esas variables del cultivo. Cabe destacar que ese tipo de variables no son frecuentes de registrar en el país, por lo que la investigación se efectuó en el Distrito de Desarrollo Rural (DDR) 003 Texcoco, debido a que es en éste donde se ubican la mayoría de las instituciones de investigación que han obtenido resultados de las variables de maíz, necesarias para alimentar al modelo. La hipótesis planteada fue que los rendimientos de maíz pueden predecirse con precisión mediante el uso del modelo de simulación EPIC.

MATERIALES Y MÉTODOS

Con base en lo indicado por Sharpley y Williams (1990) y Williams *et al.* (1990), la información requerida por el modelo EPIC se agrupó en cinco categorías: a) datos generales (dimensiones del área, ubicación geográfica y elevación, entre otras), b) clima (temperatura máxima y mínima, precipitación, humedad relativa, evaporación y radiación), c) características generales del suelo y descripción fisicoquímica de cada capa del suelo, d) manejo del cultivo (fechas y prácticas

agrícolas aplicadas al cultivo), y e) variables fisiotécnicas del cultivo (altura de planta, índice de área foliar, relación biomasa-energía e índice de cosecha).

Calibración

La información de clima, suelo, ubicación geográfica, elevación y topografía se obtuvo del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Los datos de clima se tomaron de las estaciones meteorológicas cercanas a las 56 parcelas seleccionadas en el DDR 03. Estas parcelas se eligieron con base en la variedad sembrada, la disponibilidad de los variables

fisiotécnicas y el tipo de suelo en que se ubica cada una. Las características físicas y químicas de los suelos se obtuvieron de los perfiles descritos en la parcela o del INEGI. Las prácticas de manejo del cultivo y sus fechas de realización (Cuadro 1), así como los parámetros de cultivo para calibrar el modelo EPIC (Versión 0941), se obtuvieron de investigaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) y el Colegio de Postgraduados (CP) en el área de estudio, en el periodo 1975-1998. Finalmente, el DDR se dividió en tres regiones (Texcoco riego y seco, y Amecameca seco), de acuerdo con la condición de humedad.

Cuadro 1. Manejo del cultivo de maíz en las parcelas experimentales en el DDR 003 Texcoco (1975 - 1998).

Parcela	Barbecho	Rastra	Surcado Siembra	Escarda		Fertilización		Fórmula (N, P, K) ha ⁻¹	Riego			Cosecha	
				1ra	2da	1ra	2da		1ro	2do	3ro		Total
	M/D	M/D	M/D	M/D	M/D	M/D	M/D		M/D	M/D	M/D	mm	M/D
6	4/17	4/19	4/23	5/18	6/2	4/23	5/23	120-50-00	4/27	5/1	5/8	400	9/5
7, 8, 9		5/15	5/31			6/31	7/20	265-132-00	5/31	6/16	7/30	450	10/28
20, 21, 22	4/17	4/19	4/22			4/24	5/24	90-46-00	4/30	5/12	5/25	300	10/14
57	4/11	4/14	4/24	5/22	6/5	4/24	5/22	90-50-00	4/28	5/15	5/24	330	9/7
25	4/17	4/20	4/30	5/30	7/15	4/30	5/20	90-50-00	5/1	5/21	6/14	360	10/21
24	4/17	4/20	4/25	5/30	7/15	4/30	7/15	90-46-00	4/30	5/17	6.2	360	10/23
30, 32, 33, 35	5/2	5/6	5/12	6/21	7/31	5/12	7/31	100-50-00	5/20	5/31	6/14	300	12/11
31, 34	5/2	5/6	5/12	6/21	7/31	5/12	7/31	90-46-00	5/20	5/31	6/14	400	12/11
41, 42, 44, 45, 47	6/2	6/13	6/20	7/8	8/6	6/20	8/6	120-50-00	8/25	9/13	9/27	330	10/23
43, 46	6/2	6/13	6/20	7/8	8/6	6/20	8/6	120-50-00	8/25	9/13	9/27	400	11/2
48		5/15	5/31			6/31	7/20	265-132-00	5/31	6/16	7/30	350	10/28
55	3/18	3/21	4/18			4/23	5/20	100-50-00	4/19	5/24	6/2	450	9/5
56	2/26	2/28	3/9			3/9	4/12	120-50-00	3/11	4/18	5/8	390	9/5
1,3	5/28	5/2	5/10	5/31	6/16	5/10	6/9	90-50-00					9/30
2,5	5/23	5/27	6/2	7/4	7/19	6/5	7/5	90-50-00					10/23
4	5/21	5/26	6/26	7/12	7/29	5/26	6/26	80-50-00					10/24
10	5/9	5/15	5/18	6/3	6/23	6/3	6/23	120-50-00					10/25
11	4/30	5/9	5/15	6/1	6/23	6/1	6/23	90-60-00					10/12
12	4/26	4/29	5/3	5/28	6/17	5/28	6/17	90-30-00					10/10
13	3/2	3/10	3/14	5/30	6/16	5/30	6/16	60-30-00					6/21
14	4/21	4/28	5/3	5/31	6/22	5/31	6/22	90-60-00					10/10
15	5/2	5/9	5/13	5/30	6/17	5/30	6/17	90-30-00					10/20
16	4/22	4/29	5/4	6/1	6/22	6/1	6/22	90-30-00					10/20
17	4/6	4/14	4/19	6/2	6/22	6/2	6/22	90-30-00					9/26
18	5/7	5/15	5/22	6/11	7/4	5/22	6/11	90-50-00					10/19
19	5/21	5/26	6/3	6/23	7/13	6/3	6/23	90-50-00					8/17
23	4/16	4/19	4/22			4/22	5/20	80-40-00					10/15
26, 27	4/20	4/26	5/3			5/3	6/17	90-50-00					11/2
28, 29	5/22	5/27	6/3			6/3	7/18	90-50-00					11/19
36, 38	4/4	4/8	4/16	5/16	6/1	4/16	5/16	120-60-00					10/23
37	4/19	4/26	5/2	6/4	6/27	5/2	6/4	120-60-00					11/8
39, 40	4/9	4/14	4/23	5/25	6/15	4/23	5/25	120-60-00					10/30
49, 50	3/25	3/31	4/18			4/18	5/24	80-60-00					10/31
51	3/16	3/22	3/26			4/28	5/28	100-40-00					9/25
52, 53	5/20	5/24	5/30	6/29		5/30	6/29	90-40-00					11/1
54	6/16	6/19	6/24	7/24		6/24	7/24	80-40-00					11/18

M/D: mes (1, enero;.....12, diciembre) y día de la actividad

Para estandarizar los parámetros del cultivo, se aplicó un análisis de similitud entre los genotipos sembrados, con base en altura de planta, y días a floración y a madurez fisiológica; los híbridos H-30 y H-32 se identificaron como representativos de la región. Sin embargo, al utilizar la superficie ocupada por cada uno como criterio adicional, se consideró al H-30 como el genotipo más representativo.

Los valores iniciales de las variables fisiotécnicas de cultivo se ajustaron dentro del intervalo reportado en la literatura y el valor máximo aceptado por el modelo. El intervalo de ajuste fue para: relación biomasa-energía (WA), 18.30 a 40.00; índice de cosecha (HI), 0.21 a 0.50; índice de área foliar máxima (DMLA), 2.85 a 5.00; y altura de planta (HMX), 1.50 a 3.00. El ajuste de las variables consistió en modificar su valor inicial y realizar la corrida del modelo; si la diferencia entre los rendimientos simulados y los observados era mayor que 15%, se iniciaba el ajuste; cuando el parámetro ya no se podía modificar por rebasar el valor máximo permitido, se iniciaba el ajuste de otro parámetro, repitiendo la corrida. Para medir el grado de ajuste del modelo, se calculó la suma de cuadrados del error (SEE). El Cuadro 2 muestra el promedio final de cada variable para cada una de las regiones del DDR.

Validación

En esta etapa, se utilizó la información de 65 puntos de evaluación de rendimientos de maíz generados por la SEDAGRO para el año 2000; 11 de ellos ubicados en el área de riego y 54 en condiciones de secano. La información climática se obtuvo con los generadores climáticos WXPARM y WXGEN del modelo; además, se generaron funciones para interpolar precipitación y temperatura en un punto determinado del DDR con base en su ubicación geográfica y elevación; del INEGI se obtuvieron las características físicas y químicas de los suelos. Las actividades de manejo fueron las recomendaciones técnicas del INIFAP para las tres regiones del DDR (Cuadro 3). Con esta información se corrió el modelo y se realizó la comparación de rendimientos simulados y observados.

Para evaluar el grado de ajuste de los rendimientos simulados, antes y después del ajuste de parámetros del modelo (RSAA y RSDA), con los rendimientos observados (RO), se empleó la técnica de cuadrados mínimos (Overton y Meadows, 1976); el grado de ajuste se evaluó con base en la magnitud del error estándar (S) y la suma de cuadrados del error (SEE) entre rendimientos observados y simulados.

Cuadro 2. Valores promedio finales de variables fisiotécnicas del cultivo utilizadas en la etapa de validación del modelo.

Variable	Siglas	Texcoco-riego	Texcoco-secano y Amecameca-secano
Relación biomasa energía	WA	35.54	36.39
Índice de cosecha	HI	0.46	0.39
Índice de área foliar máxima potencial	DMLA	4.86	4.15
Altura máxima del cultivo	HMX	2.79	2.24

Cuadro 3. Recomendaciones técnicas para el cultivo de maíz en el DDR 003 Texcoco utilizadas en la etapa de validación del modelo.

Zona	Barbecho	Rastreo	Surcado siembra	Escarda		Fertilización			Riego				Cosecha	
				1 ^{ra}	2 ^{da}	1 ^{ra}	2 ^{da}	Fórmula	1 ^{ro}	2 ^{do}	3 ^{ro}	4 ^{to}		Total
	M/D	M/D	M/D	M/D	M/D	M/D	M/D		M/D	M/D	M/D	M/D		M/D
Texcoco-riego	2/22	3/30	4/7	5/10	5/25	4/7	5/25	120-60-00	4/4	4/30	5.23	6/29	520	9/4
Texcoco-secano	4/13	4/20	5/5	6/7	6/27	5/5	6/27	90-60-00						10/27
Amecameca-secano	5/10	5/21	5/30	6/25	7/15	5/30	7/15	80-35-00						10/2

M/D: mes (1, enero;.....12, diciembre) y día de la actividad.

Fuente: INIFAP (1990).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calibración

Los rendimientos observados en las parcelas experimentales ubicadas en las áreas de riego variaron de 4.49 a 6.92 t ha⁻¹, con un rendimiento promedio de 5.62 t ha⁻¹. Antes del ajuste, los rendimientos simulados variaron de 3.10 a 7.60 t ha⁻¹, con un valor promedio de 4.85 t ha⁻¹. Los resultados de las corridas iniciales muestran que en la mayoría de las parcelas el modelo subestimó los rendimientos (Cuadro 4). Para esta modalidad, la SEE antes del ajuste fue de 1.65, lo que indica variaciones medias de 1.28 t ha⁻¹. Después del ajuste, el promedio de los RSDA mejoró notablemente

(5.47 t ha⁻¹) y aunque el modelo siguió subestimándolos, el valor de las SEE de los rendimientos simulados disminuyó a 0.05; es decir, el ajuste minimizó la diferencia con respecto a los rendimientos observados.

En maíz cultivado en condiciones de secano, los rendimientos observados mostraron gran variación, de 2.05 a 6.00 t ha⁻¹ con un rendimiento promedio de 4.36 t ha⁻¹, lo cual corrobora la variación en tiempo y en espacio de la precipitación, así como en el tipo de suelo y en el manejo a que este cultivo está sujeto en la región. Los rendimientos simulados antes del ajuste presentaron un rendimiento promedio similar (4.39 t ha⁻¹) (Cuadro 5), con un valor mínimo de 2.00 t ha⁻¹ y un máximo de 6.10 t ha⁻¹. Antes del ajuste, el valor de SEE fue 1.68, lo que equivale a una variación media de 1.28 t ha⁻¹ entre

Cuadro 4. Rendimientos observados (RO) y simulados antes (RSAA) y después del ajuste de variables fisiotécnicas (RSDA) en maíz de riego.

Parcela	Lugar		RO	RSAA	(RO-RSAA) ²	(RO-MRSAA ¹) ²	RSDA	(RO-RSDA) ²	(RO-MRSDA ¹) ²
6	Chapingo	Sn. Martín	5.20	3.20	4.00	0.12	5.00	0.04	0.08
7	Coatlinchán	Sta. Lucía	4.49	3.10	1.93	0.13	4.60	0.01	0.97
8	Coatlinchán	Sta. Lucía	6.92	5.10	3.31	4.28	6.50	0.18	2.09
9	Coatlinchán	Sta. Lucía	5.25	4.40	0.72	0.16	5.10	0.02	0.05
20	Chapingo	Sn. Martín	5.90	7.60	2.89	1.10	5.80	0.01	0.18
21	Chapingo	Sn. Martín	6.00	7.50	2.25	1.32	6.23	0.05	0.28
22	Chapingo	Sn. Martín	6.10	4.50	2.56	1.56	6.11	0.00	0.39
25	Chapingo	CEVAMEX	4.80	6.40	2.56	0.00	4.80	0.00	0.46
24	Chapingo	CEVAMEX	5.90	6.20	0.09	1.10	5.70	0.04	0.18
30	Chapingo	CEVAMEX	4.50	4.00	0.25	0.12	4.30	0.04	0.95
31	Chapingo	CEVAMEX	5.70	4.50	1.44	0.72	5.10	0.36	0.05
32	Chapingo	CEVAMEX	4.70	4.20	0.25	0.02	4.60	0.01	0.60
33	Chapingo	CEVAMEX	5.30	4.20	1.21	0.20	5.00	0.09	0.03
34	Texcoco	CEVAMEX	5.50	4.00	2.25	0.42	5.42	0.01	0.00
35	Texcoco	CEVAMEX	5.50	4.20	1.69	0.42	5.43	0.00	0.00
41	Chapingo	Sn. Martín	6.00	4.50	2.25	1.32	5.86	0.02	0.28
42	Chapingo	Sn. Martín	5.50	4.40	1.21	0.42	5.30	0.04	0.00
43	Chapingo	Sn. Martín	6.00	4.20	3.24	1.32	6.12	0.01	0.28
44	Chapingo	Sn. Martín	6.00	4.50	2.25	1.32	5.70	0.09	0.28
45	Chapingo	Sn. Martín	5.50	4.40	1.21	0.42	5.30	0.04	0.00
46	Chapingo	Sn. Martín	6.00	4.50	2.25	1.32	5.80	0.04	0.28
47	Chapingo	Sn. Martín	5.20	4.50	0.49	0.12	5.10	0.01	0.08
48	Chapingo	Sn. Martín	6.92	6.80	0.01	4.28	6.80	0.01	2.09
55	Chapingo	Xaltepa 1	6.20	5.20	1.00	1.82	6.00	0.04	0.53
56	Montecillo	Lote E3	5.40	5.20	0.04	0.30	5.20	0.04	0.01
		Suma			41.36			1.21	
		Media	5.62	4.85			5.47		
		SEE			1.65			0.05	
		RSEE			1.28			0.22	

Los rendimientos RO, RSAA y RSDA se encuentran en t ha⁻¹; ¹ Media de los rendimientos simulados antes y después del ajuste; RSEE: raíz cuadrada de la suma de cuadrados del error (SEE); CEVAMEX: Campo Experimental Valle de México.

los RO y los RSAA. Una vez aplicado el ajuste, la diferencia entre el promedio de los RO (4.36 t ha⁻¹) respecto al promedio de los rendimientos simulados después del ajuste (RSDA) (4.13 t ha⁻¹) fue 0.23 t ha⁻¹, lo que muestra que el ajuste aumentó las diferencias entre RO y RS de 0.03 a 0.23 t ha⁻¹ (Cuadro 5); sin embargo, la SEE disminuyó de 1.68 a 0.22; es decir, a pesar de que las diferencias en los valores medios aumentaron, las diferencias individuales entre los RO y los RS disminuyeron y se obtuvo un mejor ajuste del modelo. En este caso, en la modalidad de siembra en condiciones de secano, es evidente que el rendimiento promedio no es el mejor indicador de la bondad del ajuste del modelo; en cambio, la SEE, al minimizar la variación entre los RO y los RSDA, resulta un mejor indicador (Cuadros 4 y 5). Aun así, se concluye que en condiciones de secano también existe una buena relación entre los rendimientos observados (RO) y los simulados (RSDA) durante la etapa de calibración.

Cuadro 5. Rendimientos observados (RO) y simulados antes (RSAA) y después del ajuste de variables fisiotécnicas (RSDA) para maíz en condiciones de secano.

Parcela	Lugar	RO	RSAA	(RO-RSAA) ²	(RO-MRSAA ¹) ²	RSDA	(RO-RSDA) ²	(RO-MRSDA ¹) ²	
1	Chapingo	Xaltepa 1	4.41	3.70	0.50	0.00	3.80	0.37	0.08
2	Texcoco	Totalzingo	5.00	4.00	1.00	0.38	4.40	0.36	0.75
3	Chapingo	Sn. Martín	4.05	3.70	0.12	0.11	3.80	0.06	0.01
4	Texcoco	Chicoloapan	3.30	4.80	2.25	1.18	2.85	0.20	0.69
5	Texcoco	Tezoyuca	3.20	3.60	0.16	1.41	3.21	0.00	0.87
10	Coatlinchan	Sta. Lucía	4.40	5.70	1.69	0.00	4.00	0.16	0.07
11	Coatlinchan	Sta. Lucía	4.10	5.40	1.69	0.08	3.80	0.09	0.00
12	Montecillo	Sta. Lucía	6.00	4.80	1.44	2.60	5.20	0.64	3.49
13	CEVAMEX	Sta. Lucía	3.50	2.00	2.25	0.79	3.70	0.04	0.40
14	CEVAMEX	Sta. Lucía	3.45	4.20	0.56	0.88	3.60	0.02	0.47
15	CEVAMEX	Sta. Lucía	2.90	4.70	3.24	2.21	3.20	0.09	1.52
16	CEVAMEX	Sta. Lucía	4.00	4.50	0.25	0.15	3.60	0.16	0.02
17	Montecillo	-	3.40	3.90	0.25	0.97	3.90	0.25	0.54
18	Tecámac	-	5.90	4.00	3.61	2.29	5.80	0.01	3.13
19	Chapingo	Xaltepa 1	3.50	3.50	0.00	0.79	3.00	0.25	0.40
23	Montecillo	-	5.80	4.40	1.96	2.00	4.90	0.81	2.78
26	Tecámac	-	3.50	6.10	6.76	0.79	3.90	0.16	0.40
27	Chapingo	CEVAMEX	4.80	6.10	1.69	0.17	4.10	0.49	0.45
28	Chapingo	CEVAMEX	3.50	5.70	4.84	0.79	3.90	0.16	0.40
29	Chapingo	C Sn. Juan	5.50	6.10	0.36	1.24	5.00	0.25	1.87
36	Montecillo	-	5.50	4.90	0.36	1.24	4.80	0.49	1.87
37	Tecámac	-	4.70	5.60	0.81	0.10	4.00	0.49	0.32
38	Chapingo	Xaltepa 15	5.80	2.90	8.41	2.00	5.20	0.36	2.78
39	Amecameca	Zoyatzingo	5.39	4.70	0.48	1.01	5.71	0.10	1.58
40	Atlautla	Tehuixtitlan	4.99	5.50	0.26	0.36	5.29	0.09	0.74
49	Cocotitlán	Cocotitlan	4.82	2.20	6.86	0.19	4.38	0.19	0.47
50	Chalco	Huexoculco	2.05	2.20	0.02	5.46	2.30	0.06	4.33
51	Juchitepec	Cuijingo	4.34	4.40	0.00	0.00	3.92	0.18	0.04
52	Temamatla	Temamatla	4.84	4.40	0.19	0.21	4.59	0.06	0.50
53	Tenango del Aire	Tepolula	4.71	4.80	0.01	0.10	4.37	0.12	0.33
54	Tlamanalco	Tlalmimilán	3.80	3.50	0.09	0.34	3.87	0.00	0.11
		Suma			52.13			6.73	
		Media	4.36	4.39			4.13		
		SEE			1.68			0.22	
		RSEE			1.29			0.46	

El rendimiento RO, RSAA y RSDA se encuentra en t ha⁻¹; ¹ Media de los rendimientos simulados antes y después del ajuste; RSEE: raíz cuadrada de la suma de cuadrados del error (SEE). CEVAMEX: Campo Experimental Valle de México.

La diferencia entre rendimientos observados y simulados en riego, respecto a los obtenidos en condiciones de secano, en esta etapa de calibración, se explican por el contraste en las prácticas de manejo proporcionadas al cultivo, así como en las mejores condiciones climáticas y tipos de suelo que normalmente imperan en las áreas irrigadas. Lo anterior concuerda con lo observado por Easterling *et al.* (1992b) y Rosenberg *et al.* (1992), quienes modificaron el manejo para maíz (fechas de siembra y variedades) y encontraron una disminución en la predicción del rendimiento de maíz en condiciones de secano y un incremento en riego.

Validación

En las parcelas utilizadas para la validación, los rendimientos de maíz observados en las 11 parcelas con riego (Cuadro 6) variaron de 0.58 a 4.74 t ha⁻¹, con un rendimiento promedio de 2.40 t ha⁻¹; los rendimientos

simulados presentaron un rendimiento promedio de 7.36 t ha⁻¹, con una diferencia de 4.96 t ha⁻¹. Al comparar el valor de SEE resultante de la calibración (0.05, Cuadro 4) y de la validación (24.67), es evidente que los rendimientos simulados en riego para la etapa de validación presentan amplias diferencias con respecto a los observados. Las diferencias entre los rendimientos estimados y los observados se atribuye, primero, a que los productores no aplican totalmente el paquete tecnológico recomendado por INIFAP (que fue el utilizado para alimentar el modelo en esta fase), ni con la suficiente precisión, y, segundo, a que en los puntos muestreados por SEDAGRO la información del manejo del cultivo y del genotipo empleado es incompleta, pues esta dependencia sólo recolecta la información requerida para realizar la estimación de rendimientos (número de plantas y distancia entre éstas, número de mazorcas por planta, peso de grano por mazorca y distancia entre surcos).

En condiciones de secano (Cuadro 7), los 54 puntos de muestreo de SEDAGRO reportan un rendimiento promedio de 2.98 t ha⁻¹, mientras que la simulación genera un valor de 5.36 t ha⁻¹; al comparar los rendimientos promedio anteriores con los obtenidos para la etapa de calibración (RO = 4.36 y RS = 4.13 t ha⁻¹) vuelven a resaltar las diferencias entre los resultados obtenidos para la etapa de calibración y validación. Como se comentó al analizar los resultados obtenidos en condiciones de riego, las diferencias entre los rendimientos simulados y los observados durante la etapa de validación, ahora en áreas de secano, también se atribuyen a que en los puntos de SEDAGRO la información del manejo del cultivo es imprecisa e incompleta. Esto corrobora que, para validar cualquier modelo de estimación, debe utilizarse información de calidad, lo cual no se obtiene en los cuestionarios empleados por SEDAGRO.

Por otro lado, es de esperarse que la mayoría de los productores cuyas parcelas presentan bajos rendimientos, serían los que menos aplican las recomendaciones tecnológicas del INIFAP, mientras que los productores cuyas parcelas presentan altos rendimientos serían los que más aplican tal paquete, por lo que es válido suponer que si los productores de maíz emplearan el paquete tecnológico recomendado por el INIFAP podrían incrementarse los rendimientos, aunque también cabe la posibilidad de que, como el modelo no considera los efectos de plagas y enfermedades, así como la

Cuadro 6. Rendimientos observados (SEDAGRO) y simulados (RO y RS) de maíz de riego para el año 2000.

Punto de muestreo	RO	RS	(RO-RS)	(RO-RS) ²	(RO-MRS ¹) ²
15	4.74	7.21	-2.47	6.08	6.88
16	2.77	7.92	-5.15	26.57	21.10
18	2.69	7.86	-5.17	26.70	21.84
19	4.06	7.88	-3.82	14.61	10.91
21	2.31	7.77	-5.46	29.83	25.54
22	2.18	7.77	-5.59	31.22	26.87
23	0.63	7.78	-7.15	51.10	45.34
24	4.22	7.78	-3.56	12.65	9.88
25	0.58	7.20	-6.62	43.76	46.02
26	2.16	4.49	-2.33	5.41	27.08
28	2.36	7.20	-4.84	23.39	25.04
Suma				271.33	266.52
Media	2.40	7.36			
SEE				24.67	

¹ Media de los rendimientos (t ha⁻¹) simulados antes y después del ajuste.

competencia de malezas por nutrimentos, luz y agua en el cultivo, los rendimientos simulados se sobrestimen.

Si bien, en el presente estudio no se pretendía utilizar el modelo EPIC para propósitos de pronóstico, es claro que otro factor para explicar el reducido valor predictivo del modelo durante la etapa de validación, es que sólo se emplearon los rendimientos de un año.

Lo anterior muestra que el uso de los modelos de simulación es una herramienta que requiere de una base de datos amplia y confiable para poder simular los rendimientos de un cultivo. Como en México la información requerida por los modelos no es muy abundante ni confiable, debe buscarse la manera de registrar las variables fisiotécnicas requeridas por los modelos para poder calibrarlos y validarlos, para que, posteriormente, puedan aplicarse con fines de pronóstico en las regiones agrícolas de México.

CONCLUSIONES

En la etapa de calibración, hubo una disminución de la suma de cuadrados del error en la simulación de los rendimientos, tanto en condiciones de riego, como de secano. En condición de riego, el modelo presentó un mejor ajuste que en condiciones de secano. Las variables fisiotécnicas empleadas en esta investigación: relación biomasa-energía, índice de cosecha e índice de área foliar potencial, son confiables y deberían registrarse rutinariamente para complementar la información de

Cuadro 7. Rendimientos observados (SEDAGRO) y simulados (RO y RS) de maíz en condiciones de sequo para el año 2000.

Punto de muestreo	RO	RS	(RO-RS) ²	(RO-MRS ¹) ²	Punto de muestreo	RO	RS	(RO-RS) ²	(RO-MRS ¹) ²
1	1.87	4.69	7.96	12.20	41	0.52	5.24	22.31	23.46
2	0.40	4.65	18.05	24.63	42	0.52	5.24	22.31	23.46
3	2.15	4.64	6.22	10.33	43	5.56	4.97	0.35	0.04
4	1.05	4.67	13.11	18.60	44	4.00	5.39	1.94	1.86
5	2.75	7.33	20.94	6.83	45	5.66	5.36	0.09	0.09
6	0.95	4.53	12.84	19.48	46	3.44	5.31	3.49	3.70
7	0.88	4.53	13.34	20.10	47	5.69	5.34	0.13	0.11
8	2.92	6.54	13.09	5.97	48	6.25	5.24	1.02	0.79
9	5.22	4.53	0.48	0.02	49	6.82	5.35	2.16	2.12
10	3.04	6.41	11.34	5.40	50	4.10	5.24	1.29	1.60
11	2.42	4.52	4.41	8.66	51	4.16	2.80	1.86	1.45
12	0.65	4.53	15.05	22.21	52	3.37	4.90	2.33	3.97
13	3.04	6.59	12.63	5.40	53	3.82	3.01	0.65	2.38
14	7.75	7.87	0.01	5.70	54	5.18	3.10	4.34	0.03
17	2.36	7.93	31.01	9.02	55	3.77	4.73	0.92	2.54
20	2.82	7.50	21.95	6.47	56	2.07	4.85	7.74	10.85
27	3.64	7.21	12.72	2.97	57	1.72	5.27	12.59	13.27
29	4.74	7.21	6.08	0.39	58	1.26	5.27	16.05	16.84
30	3.87	7.22	11.20	2.23	59	1.91	5.34	11.78	11.93
31	2.28	4.06	3.17	9.51	60	2.72	5.31	6.72	6.99
32	3.18	7.35	17.43	4.77	61	2.32	5.29	8.81	9.26
33	2.84	3.09	0.06	6.37	62	1.95	4.93	8.90	11.65
34	4.12	2.79	1.77	1.55	63	1.98	5.01	9.16	11.45
35	1.76	7.24	30.00	12.98	64	2.70	4.94	5.03	7.09
36	3.96	7.23	10.68	1.97	65	1.20	5.08	15.09	17.33
37	1.18	7.24	36.76	17.50	Suma			521.84	454.98
38	1.72	5.04	10.99	13.27	Media	2.98	5.36		
39	2.46	5.03	6.63	8.43	SEE			9.66	
40	2.12	5.10	8.87	10.52					

¹ Media de los rendimientos (t ha⁻¹) simulados antes y después del ajuste.

campo. Los rendimientos de maíz, reportados por la SEDAGRO y utilizados en la etapa de validación del modelo de simulación, generaron un bajo ajuste entre los rendimientos estimados y simulados.

LITERATURA CITADA

- Dewi, A. H., W. J. White y G. Hoogenboom. 1999. Simulation & modeling: interfacing geographic information systems with agronomic modeling: a review. *Agron. J.* 91:761-772.
- Easterling, W. E., E. M. McKenney, N. J. Rosenberg y K. M. Lemon. 1992a. Simulation of crop responses to climate change: effects with present technology and no adjustments (the 'dumb farmer' scenario). *Agric. Ecosystems Environ.* 59: 53-73.
- Easterling, W. E., N. J. Rosenberg, K. M. Lemon y E. M. McKenney. 1992b. Simulation of crop responses to climate change: effects with present technology and currently available adjustments (the 'smart farmer' scenario). *Agric. For. Meteorol.* 59: 75-102.
- Easterling, W. E., C. J. Hays, E. M. McKenney y J. R. Brandle. 1997. Modelling the effect of shelterbelts on maize productivity under climate change: an application of the EPIC Model. *Agric. Ecosystems Environ.* 61: 163-176.
- Ellen, J. C. y B. D. Gyanedra. 1995. A solar radiation model for use in biological applications in the South and Southeastern USA. *Agric. For. Meteorol.* 78: 31-51.
- Gyanedra, B. D., C. L. Campbell, S. K. LeDuc y E. J. Cooter. 1997. Maize growth: assessing the effects of global warming and CO₂ fertilization with crop models. *Agric. For. Meteorol.* 87: 253-272.
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). 1990. Guía para la Asistencia Técnica Agrícola: área de influencia del Campo Agrícola Experimental Valle de México. Chapingo, estado de México.
- Lee, J. J., D. L. Phillips y R. F. Dodson. 1996. Sensitivity of the US Corn Belt to climate change and elevated CO₂: II. Soil erosion and organic carbon. *Agric. Systems* 52: 503-521.
- McKenney, E. M., W. E. Easterling y N. J. Rosenberg. 1992. Simulation of crop productivity and responses to climate change in the year 2030: the role of future technologies, adjustments and adaptations. *Agric. For. Meteorol.* 59: 103-127.
- Overton, D. E. y M. E. Meadows. 1976. Stormwater modelling. Academic Press. New York, NY, USA.
- Rosenberg, N. J., E. M. McKenney, W. E. Easterling y K. M. Lemon. 1992. Validation of EPIC model simulations of crop responses to current climate and CO₂ conditions: comparisons with census, expert judgement and experimental plot data. *Agric. For. Meteorol.* 59: 35-51.

Sharpley, A. N. y J. R. Williams. 1990. EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. Technical Bulletin 1768. US Department of Agriculture. Washington, DC, USA.

Tiscareño-López, M., C. Izaurralde, N. J. Rosenberg, A. D. Báez-González y J. Salinas-García. 2003. Modeling El Niño Southern Oscillation climate impact on Mexican agriculture. *Geofísica Internacional* 42: 331-339.

Villar-Sánchez, B., B. Figueroa-Sandoval, J. L. Oropeza-Mota, L. Landois-Palencia y V. Volke-Haller. 1998. Erosionabilidad de suelos y su impacto en la productividad del maíz en el trópico mexicano. *Agrociencia* 32: 199-207.

Williams, J. R., P. T. Dyke, W. W. Fuchs, V. W. Benson, O. W. Rice y E. D. Taylor. 1990. EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator: 2. User Manual. Technical Bulletin 1768. US Department of Agriculture. Washington, DC, USA.