

Simulación del crecimiento y rendimiento de trigo (*triticum turgidum* L.) Júpare c2001 con el modelo CERES-trigo

Simulation of growth and yield of wheat (*triticum turgidum* L.)
Jupare c2001 with model CERES - wheat

Raúl Rodríguez-García^{1*}, Verónica Cortez-Maldonado¹, Diana Jasso-Cantú¹,
Fidel Maximiano Peña-Ramos¹, Alejandro Zermeño-González¹

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. C.P. 25315.
Email: rrodriguez_uaan@hotmail.com (*autor responsable).

RESUMEN

El rendimiento promedio nacional de trigo en México es de cinco toneladas por hectárea, y en Coahuila de tres, principalmente de trigo duro o cristalino, por lo que es necesario establecer estrategias de manejo para incrementar el rendimiento de este cultivo en el estado. Los modelos de cultivo pueden ser de gran utilidad para simular la respuesta del trigo en diferentes escenarios de conducción agronómica, con la finalidad de ahorrar tiempo en el proceso de investigación. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue calibrar y validar el modelo CERES-Trigo de DSSAT para la variedad de trigo duro Júpare C2001, con el propósito de simular con alta confiabilidad el desarrollo y crecimiento del cultivo sembrado en dos fechas y diferentes regímenes de riego, para así disponer de una herramienta que simule y prediga el comportamiento del cultivo en otras localidades en el estado.

El estudio se realizó de noviembre de 2015 a junio de 2016, en Buenavista, Saltillo, sede de la Universidad, con un experimento en bloques al azar de cinco tratamientos con cuatro repeticiones. Para la variedad **Júpare C2001**, los coeficientes genéticos se obtuvieron y validaron experimentalmente para el tratamiento óptimo, que se obtuvo en la segunda fecha; el modelo simuló con precisión aceptable los días a la antesis (diferencias de -12 a +8 días), días a la madurez (-10 a +11 días), y en el rendimiento de grano sólo dos tratamientos de la segunda fecha tuvieron buen ajuste. Para materia seca total, índice de área foliar y materia seca en hojas hubo un buen ajuste en los tratamientos de la segunda fecha de siembra, no así para los tratamientos de la primera fecha ya que tuvieron un ajuste bajo, lo cual indica que los coeficientes genéticos obtenidos para una fecha de siembra, no son adecuados para efectuar una simulación aceptable en otra fecha.

Palabras clave: DSSAT, modelo, simulación, CERES-Trigo, coeficientes genéticos, *Triticum turgidum* L.

INTRODUCCIÓN

Los modelos mecanicistas de simulación de los cultivos, son representaciones matemáticas de los principales procesos implicados en el desarrollo, crecimiento y producción de un cultivo, y tienen diferentes aplicaciones actuales y potenciales en respuesta a temas relacionados con la investiga-

ción, el manejo y la planificación agrícola (Hernández *et al.*, 2009); la implementación de estos modelos reduce los riesgos económicos y de producción, y ayuda a tomar decisiones más acertadas (De Jonge *et al.*, 2007).

Los modelos de simulación específicos para diferentes cultivos se encuentran integrados en sistemas computacionales. El sistema DSSAT (Siste-

ma de Apoyo para la Toma de Decisiones en la Transferencia de Agrotecnología) se ha utilizado con éxito en todo el mundo, en una abundante gama de condiciones y para una amplia variedad de propósitos agronómicos (Jones *et al.*, 2003). Este sistema, que consta de nueve modelos para 28 cultivos de importancia económica, integra el modelo CERES-Trigo (Hoogenboom *et al.*, 2010), que simula los efectos del clima, genotipo, propiedades del suelo y manejo agronómico, y las del nitrógeno en planta y suelo (Andarzian *et al.*, 2015), además de simular la producción de uno o varios ciclos continuos del cultivo (Wu *et al.*, 2013).

El modelo CERES-Trigo se ha probado en una amplia gama de ambientes alrededor del mundo; se puede citar que Arora *et al.* (2007) en Punjab, India, evaluaron el modelo bajo condiciones variables de clima, diferentes regímenes de riego y de fertilización nitrogenada. El análisis de evaluación mostró estrecha correlación entre datos medidos y observados en la fenología del cultivo, acumulación de biomasa, rendimiento de grano, contenido de agua en el suelo. Rezzoug *et al.* (2008), en la región de Tiaret, Argelia, calibraron y evaluaron el modelo para nueve variedades de trigo a partir de datos experimentales de tres ciclos; los resultados mostraron buen ajuste en la simulación de la antesis y madurez y en el rendimiento de grano. Singh *et al.* (2008), en los ecosistemas semiáridos de la India, predijeron el crecimiento y rendimiento bajo diferentes condiciones de riego y fertilización, y encontraron resultados satisfactorios del modelo en la simulación de la fenología y rendimiento, sin embargo, el modelo subestimó la biomasa. Dettori *et al.* (2011), para el sur de Cerdeña, Italia, calibraron y evaluaron el modelo para tres variedades de trigo duro haciendo uso de información de campo de treinta años, y obtuvieron buen ajuste para predecir el rendimiento de grano y el periodo a la antesis, no así para peso y número de granos. Palosuo *et al.* (2011) compararon el desempeño de ocho diferentes modelos de simulación aplicables al trigo en ocho localidades del noroeste, centro y sur de Europa; el modelo CERES-Trigo tuvo un buen desempeño con los valores más bajos de RMSE y los más altos del índice de concordancia.

Asimismo, en la provincia de Anhui, de China, Wu *et al.* (2013) simularon el efecto de diferentes fechas de siembra y densidades de población sobre el rendimiento de grano de la variedad Yangmai-13, y demostraron que en las fechas de siembra tempranas, los mayores rendimientos se obtienen con las

menores densidades de población, mientras que en las fechas tardías, con las mayores densidades de población. Valizadeh *et al.* (2014) para dos regiones de Irán, simularon los efectos en el trigo de tres futuros escenarios de cambio climático, y el ciclo de cultivo en los tres escenarios fue reducido debido al incremento de temperatura, que influyó en disminución del rendimiento de grano. Andarzian *et al.* (2015) utilizaron el modelo para seleccionar de ocho fechas de siembra, la más adecuada para la obtención del mayor rendimiento. A su vez, Li *et al.* (2015) simularon en la rotación de maíz (*Zea mays* L.) y trigo (*Triticum aestivum* L.) el efecto de diferentes niveles de fertilización en el rendimiento y el contenido de carbono orgánico y nitrógeno, y según los autores, se obtuvieron datos razonables y creíbles en las diversas condiciones de manejo. Ahmed *et al.* (2016) calibraron el modelo para cinco variedades durante la primavera y bajo la modalidad de temporal, y concluyeron que el modelo es una herramienta con buen potencial para simular la fenología, acumulación de biomasa, máximo índice de área foliar y rendimiento de grano.

El trigo es uno de los cereales más importantes en México ya que se consumen en el país cerca de siete millones de toneladas al año, mientras que la producción estimada es de cuatro, por lo cual se requiere importar tres millones de toneladas (SFA, 2011); además, el rendimiento nacional promedio es de cinco toneladas por hectárea y en Coahuila es de tres, principalmente de trigo duro o cristalino (Caballero-De Loya y Velázquez-Monter, 2010), por lo que es necesario establecer estrategias de manejo pertinentes para incrementar el rendimiento del cultivo en el estado. Para tal propósito, el objetivo de la presente investigación fue calibrar el modelo CERES-Trigo, ya que puede ser una herramienta de gran utilidad para simular la respuesta de la variedad de trigo duro Júpate C2001 en diferentes escenarios de manejo –dos fechas de siembra con diferentes regímenes de riego– y en diversas condiciones ambientales, lo que permitiría que el tiempo de desarrollo de nuevas estrategias se acorte considerablemente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y descripción del experimento

La investigación se llevó a cabo en el campus universitario de Buenavista, Saltillo, cuyas coordenadas geográficas son: 25°21'5" N y 101°1'47" O, a una altitud de 1743 m.

Se evaluaron dos diferentes fechas de siembra en el ciclo invierno-primavera 2015-2016; en la primera siembra se evaluaron dos regímenes de riego y en la segunda, tres (Cuadro 1).

Cuadro 1. Tratamientos o condiciones de manejo evaluados en la investigación.

Tratamiento	RR (%)	Fecha de siembra
1	100	18 de noviembre de 2015
2	70	18 de noviembre de 2015
3	100	15 de diciembre de 2015
4	85	15 de diciembre de 2015
5	60	15 de diciembre de 2015

†RR=requerimiento de riego.

En la primera fecha de siembra el cultivo tuvo un ciclo de 163 días para alcanzar madurez fisiológica, mientras que en la segunda el ciclo fue de 150 días. El experimento se realizó bajo el diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones. Cada tratamiento de riego estuvo ubicado en una parcela de 10 m de ancho y 30 m de largo, la cual se dividió en cuatro unidades experimentales o repeticiones. Se utilizó la variedad Júpate C2001, trigo duro o cristalino, que se sembró en líneas separadas a 0.20 m, con una densidad de siembra de 170 kg ha⁻¹ y 250 plantas m² emergidas, en promedio. La fertilización para todos los tratamientos fue de 170-90-00: previo a la siembra se suministró la dosis 100-90-00 (N-P-K; kg ha⁻¹) y el resto del nitrógeno en la etapa de amacollo; la aplicación se realizó manualmente, en líneas, a una distancia de 0.20 m. La fuente de nitrógeno fue el sulfato de amonio granulado (20.5% N) y la del fósforo, el superfosfato simple granulado (20%). El riego se aplicó por el método de aspersión. Inicialmente, a todos los tratamientos se les dio un riego de presiembra de 30 mm que se complementó con un riego a la emergencia de 50 mm; posteriormente, los riegos se efectuaron en las etapas fenológicas de: fase amacollo, encañe, espigado, floración y llenado del grano en la primera siembra, en tanto que en la segunda en: fases de amacollo, encañe, espigado y floración, ya que el ciclo se acortó para evitar problemas de acame. La cantidad total aportada durante estas fases a los diferentes tratamientos fueron: T1=

650 mm, T2= 459 mm, T3= 380 mm, T4= 323 mm y T5= 245 mm.

Evaluación de campo

Para calibrar y evaluar el modelo, la información requerida se obtuvo en campo. Respecto a la fenología, se contaron los días para alcanzar los estados fenológicos más importantes como la floración y madurez, y para identificar el momento de riego. El área foliar se determinó tomando cinco plantas por repetición, se separaron las hojas, se calculó el área de cada una mediante el método de Stickler *et al.* (1961); para determinar el índice de área foliar, se utilizó el método usado por Fageria y Santos (2008). En la medición de la acumulación de materia seca, se cortó 0.50 m de surco de planta (0.1 m²), se separaron las partes de la planta y se colocaron en un horno de secado a 65° C durante 48 horas y se pesaron, y posteriormente se calculó la acumulación de biomasa parcial y total en kg ha⁻¹. Para el rendimiento se cosechó por repetición una superficie de 5 m², se contó el número de espigas, se pesó la materia seca total cosechada y, posteriormente, se separó y pesó el grano para calcular el rendimiento en kg ha⁻¹; también se seleccionaron veinte espigas por repetición para contabilizar el número de espiguillas, de granos por espiga y el peso del grano.

Los requerimientos de riego se estimaron con el método gravimétrico (Radulovich, 2009): se obtuvieron muestras a estratos de 0.20 m, hasta una profundidad de 0.80 m.

Información meteorológica y de suelo

Se obtuvo la información meteorológica diaria requerida por el modelo: radiación solar, velocidad del viento, humedad relativa, temperatura del aire máxima y mínima, precipitación e insolación, se obtuvo de la estación climática de la Conagua, localizada a 350 m del área de estudio (Cuadro 2). Antes de la siembra se realizó un análisis de suelo del que se obtuvieron: las propiedades físico-químicas en las parcelas, la textura del suelo es franco arcilloso (Cuadro 3), el contenido nitrógeno, fósforo y potasio en las parcelas (Cuadro 4).

Descripción del modelo

El submodelo de crecimiento en CERES-Trigo considera el desarrollo de fases fenológicas en función de un tiempo térmico (grado día de desarrollo, GDD); calcula la acumulación de biomasa como un producto de la eficiencia en el uso de la radiación

Cuadro 2. Datos promedio diarios mensuales de las variables climáticas observadas durante el ciclo del cultivo de trigo.

Variables climáticas	Meses						
	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Radiación solar (MJ m ⁻² día ⁻¹)	14.19	13.02	15.07	18.68	18.35	22.23	22.45
Temperaturas máximas (°C)	22.17	18.54	16.34	21.31	22.40	26.46	28.67
Temperaturas mínimas (°C)	8.24	5.51	1.86	5.09	8.70	11.12	13.63
Precipitación (mm)	0.12	0.00	0.75	0.00	0.95	0.80	2.15
Velocidad del viento (km día ⁻¹)	227.60	271.29	213.61	213.00	259.48	265.30	350.06
Insolación (hrs)	6.83	6.70	7.90	9.14	7.16	8.64	8.32
Humedad relativa (%)	62.57	53.94	54.23	42.72	49.13	50.50	60.84

Cuadro 3. Propiedades físicas del suelo de las parcelas antes de la siembra, valores promedio del estrato 00-80 cm.

Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Mo (%)	Da g cm ⁻³	$\theta_{v_{cc}}$ cm ³ cm ⁻³	$\theta_{v_{pmp}}$ cm ³ cm ⁻³
37.5	23.1	39.4	2.8	1.21	28	14

Mo = materia orgánica; Da = densidad aparente; $\theta_{v_{cc}}$ = contenido de agua a capacidad de campo; $\theta_{v_{pmp}}$ = contenido de agua a punto de marchitez permanente.

Cuadro 4. Contenido de nitrógeno fósforo y potasio del suelo correspondiente a cada parcela.

Tratamiento	N (%)	P (kg ha ⁻¹)	K (kg ha ⁻¹)
T1	0.095	15.08	203.62
T2	0.138	15.2	148.5
T3	0.138	30.06	491
T4	0.203	6.86	+900
T5	0.129	19.70	456

por el cultivo y de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la cubierta foliar; el número de hojas que crecen en función de la tasa de aparición de hojas (filocrono, PHINT, grados día) y la duración del llenado de grado por el tiempo térmico (P5, grados día). La extensión de la hoja depende de un coeficiente potencial del órgano y es limitada por temperaturas subóptimas, y por el estrés hídrico y de nitrógeno. El desarrollo de las fases influye en los coeficientes de partición de la biomasa seca en las partes de la planta. El rendimiento de grano es modelado como un producto del número de granos (G1), densidad de población y peso de grano a la madurez (G2) (Andarzian *et al.*, 2015).

Calibración del modelo

Para el desarrollo de la investigación se utilizó el sistema computacional DSSAT versión 4.5 de la Universidad de Hawaii, EUA (Hoogenboom *et al.*, 2010), el cual se alimentó con la información del cultivo, suelo y meteorológica. Con el propósito de calibrar el modelo para la variedad Júpate C2001, se obtuvieron los siete coeficientes genéticos (Cuadro 5), que determinan la fenología: P1V, P1D, P5 y PHINT, y el creci-

miento reproductivo: G1, G2 y G3 (Wu *et al.*, 2013; Andarzian *et al.*, 2015). La calibración se basó en el tratamiento tres en condiciones óptimas de manejo, del que se obtuvo el mayor rendimiento de grano.

El coeficiente P5 se calculó considerando los grados día de desarrollo (GDD) acumulados durante la fase de llenado de grano, y para PHINT se consideró la acumulación de GDD de la etapa vegetativa dividida entre el máximo número de hojas promedio por planta, y el GDD se calculó a partir de una temperatura base de 0°C para trigo (Prabhakar *et al.*, 2007). El coeficiente P1V representa los días de temperatura óptima requeridos para la vernalización completa, y para P1D se consideró que es de día corto (Wang y Engel, 1998). El coeficiente G1 se obtuvo con información del peso y número de espiguillas formadas a la antesis; para estimar G2 y G3 fue necesario utilizar la información de los muestreos realizados a la cosecha. La calibración para obtener los coeficientes genéticos se realizó manualmente, y el ajuste de los parámetros consistió en minimizar el RMSE entre los datos simulados y observados para las diferentes variables que se evaluaron (Ahmed *et al.*, 2016).

Cuadro 5. Descripción de los coeficientes genéticos del modelo CERES para trigo.

Coeficiente	Descripción	Unidades
P1D	Coeficiente de sensibilidad al fotoperiodo (porcentaje de reducción en la tasa de desarrollo /en relación con las 10 h menor que el límite del umbral)	%
P1V	Coeficiente de vernalización, días con temperatura óptima necesarios para completarla	Días
P5	Tiempo térmico de la fase de llenado del grano a la madurez	GDD
G1	Número de granos por espiga por unidad de peso en la antesis	no g ⁻¹
G2	Peso potencial del grano en condición óptima	mg
G3	Peso seco seco del vástago en condición óptima a la madurez (incluyendo grano)	g
PHINT	Intervalo del filocrono (tiempo térmico entre la aparición sucesiva de las hojas)	GDD [†]

[†]GDD =grados día de desarrollo (Jones *et al.*, 2003).

Análisis estadístico

Para evaluar el comportamiento del modelo, se utilizaron los estadísticos: raíz del error cuadrado medio (RMSE), que ilustra el error de la predicción del modelo para los datos medidos y simulados; cuanto menor sea este valor, mejor es el desempeño de la simulación (Loague y Green, 1991) (Ecuación 1). El índice de concordancia (d) se utilizó para indicar la relación de las variables que se comparan (Ecuación 2) y el coeficiente de determinación (R^2) (Ecuación 3) para determinar la precisión de la simulación. Respecto a estos dos estadísticos, cuando el valor es más cercano a uno, es mejor la relación entre las dos variables que se comparan (Willmott, 1985; Wallach, 2006). Para cuantificar las diferencias de los valores simulados y observados se utilizó la diferencia porcentual (Fórmula 4), donde un valor positivo indica el grado de sobreestimación y un negativo la subestimación de la simulación (Wu *et al.*, 2013).

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right]^{0.5} \quad (1)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(P_i - \bar{O}) - (P_i - \bar{O})^2]}{\sum_{i=1}^n [(|P_i - \bar{O}|) - (|P_i - \bar{O}|)^2]} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

$$\text{Diferencia \%} = \left(\frac{P_i - O_i}{O_i} \right) * 100 \quad (4)$$

Donde P_i y O_i son los valores simulados y observados de las variables de estudio, n es el número de observaciones y \bar{O} es la media de los valores observados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Coefficientes genéticos obtenidos de la calibración

La combinación de los coeficientes genéticos que presentaron un mejor ajuste en la simulación del crecimiento y rendimiento para el tratamiento T3, utilizado para la calibración de la variedad de trigo duro Júpate C2001, se presentan en el Cuadro 6.

Desarrollo fenológico

Los resultados de la simulación de la fenología del cultivo, mostraron que en los dos tratamientos de la primera fecha de siembra (T1 y T2), el modelo sobrestimó los días para alcanzar las etapas de floración en + 5 a + 8 días y los días para la madurez en + 7 a + 11 días (Cuadro 7). En los tratamientos de la segunda fecha de siembra (T3, T4 y T5), el modelo subestimó los días a la floración y a la madurez en un rango de -2 a -12 días (Cuadro 7). Wu *et al.* (2013) obtuvieron resultados similares al evaluar el modelo en trigo en el este de China; los autores indicaron que, con diferencias en estos rangos, se puede considerar un buen ajuste del modelo. Dettori *et al.* (2011) reportaron diferencias de entre - 9 y + 1 días en antesis, cercanos a los valores obtenidos en esta investigación. Ottman (2008) citó la importancia de los coeficientes genéticos adecuados para disminuir el error en la simulación de la floración. Bannayan *et al.* (2003) reportaron diferencias similares en la antesis a las mostradas en esta investigación.

Simulación del rendimiento y sus componentes a la cosecha

La simulación del rendimiento del grano y peso de grano para los tratamientos T3 y T4 mostró un buen ajuste entre valores simulados y observados. Las diferencias porcentuales estuvieron dentro de un rango + 0.4 a + 7.9% para rendimiento de grano y de 0% a 11.53 % para peso de grano (Cuadro 8). El tratamiento T3 también tuvo un buen ajuste en el número de granos por m^2 (+ 4.05). Estos resultados concuerdan con los de Singh *et al.* (2008), quienes encontraron un buen ajuste en la simulación del rendimiento de trigo al evaluar diferentes condiciones de manejo en riego. El modelo sobrestimó por porcentajes elevados el rendimiento de grano en los tratamientos de la primera fecha de siembra en T1 y T2, y en la segunda fecha en T5, al mostrar que el modelo no tuvo la capacidad de simular las condiciones que influyeron en un menor rendimiento en condiciones reales, debido a las diferentes fechas de siembra o al déficit de riego o menor disponibilidad de agua en el suelo. El modelo simula un número elevado de granos por m^2 , los que determinan el rendimiento elevado en estos tratamientos. Langensiepen *et al.* (2008) reportaron que el modelo subestima y sobrestima el rendimiento de grano de trigo, y citan que la magnitud error no permite la aplicación práctica del modelo. Lal *et al.* (1998) presentaron algo similar donde CERES-Trigo sobreestima el rendimiento. A su vez, Moreno y Weiss (2004) encontraron que el modelo sobreestimó 10% el rendimiento,

Cuadro 6. Valores de los coeficientes genéticos obtenidos para la variedad Júpare C- 2001.

Cultivar	Coeficientes genéticos						
	P1V %	P1D días	P5 Grados día	G1 no g ⁻¹	G2 mg	G3 g	PHINT Grados día
Júpare C2001	0	130	466	33	23	7	100

Cuadro 7. Desarrollo fenológico simulado y observado (en días después de la siembra) para los cinco tratamientos del cultivo de trigo variedad Júpare C2001.

Desarrollo fenológico	Floración (DDS)				Madurez (DDS)			
	Simulado	Observado	Dif. [†]	Dif. (%)	Simulado	Observado	Dif.	Dif. (%)
T1	137	132	5	+ 3.8	170	163	+ 7	+ 4.29
T2	137	129	8	+ 6.20	170	159	+ 11	+ 6.92
T3	113	125	- 12	- 9.60	144	153	- 9	- 5.9
T4	113	123	- 10	- 8.1	144	150	- 6	- 4.00
T5	113	120	- 7	- 5.8	144	146	- 2	- 1.4

[†]Dif. = diferencia días; DDS= días después de la siembra.

Cuadro 8. Valores simulados y observados de rendimiento y sus componentes obtenidos a la cosecha de los 5 tratamientos del cultivo de trigo variedad Júpare C2001.

Tratamiento	Rendimiento kg ha ⁻¹			Peso de un grano (mg)			Granos cosechados por m ²		
	Simulado	Observado	Dif. (%)	Simulado	Observado	Dif. (%)	Simulado	Observado	Dif. (%)
T1	8759	3950	+121.74	23	18	+ 27.78	38081	23166	+ 64.38
T2	8280	4225	+ 95.98	23	21	+ 9.52	36001	18440	+ 95.23
T3	7221	6979	+ 0.40	23	23	0.00	31562	30343	+ 4.05
T4	7122	6600	+ 7.90	23	26	+ 11.53	31128	25062	+ 24.20
T5	6008	4525	- 32.77	23	17	+ 35.29	26262	25885	+ 4.30

[†]Dif. = Diferencia.

aunque subestimó el peso de un grano en -11.45% . Dettori *et al.* (2011) reportaron valores similares en la simulación de peso de un grano.

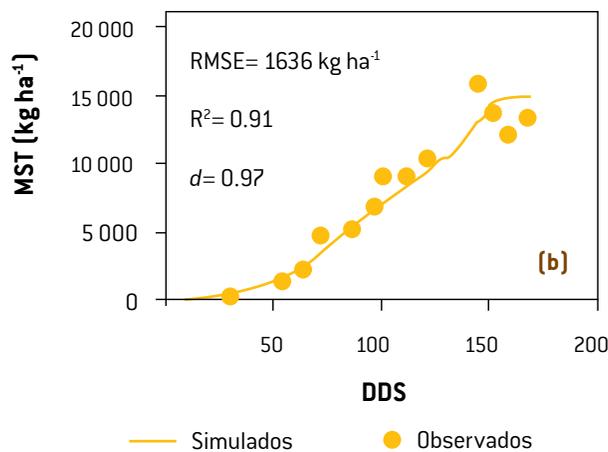
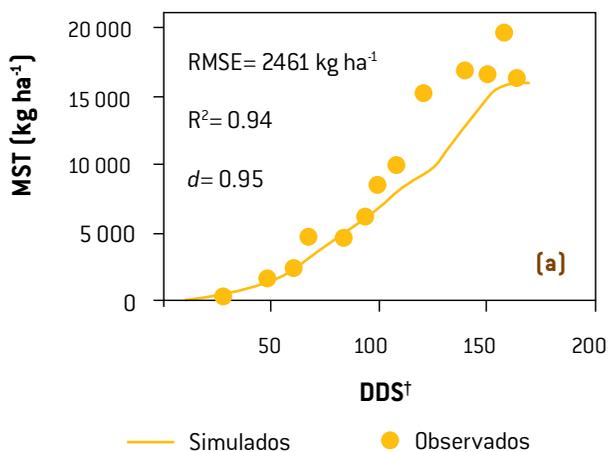
En la presente investigación se obtienen los mayores rendimientos en la segunda fecha de siembra. Mavromatis (2014) encontró que al sembrar en la fecha adecuada es posible obtener mayores rendimientos debido a la influencia de los factores agroclimáticos y por lo que la recomendó como una estrategia a la modelación regional.

Simulación de la materia seca total durante el ciclo del cultivo

En los cinco tratamientos el índice de concordancia (d) y el de coeficiente de determinación fueron

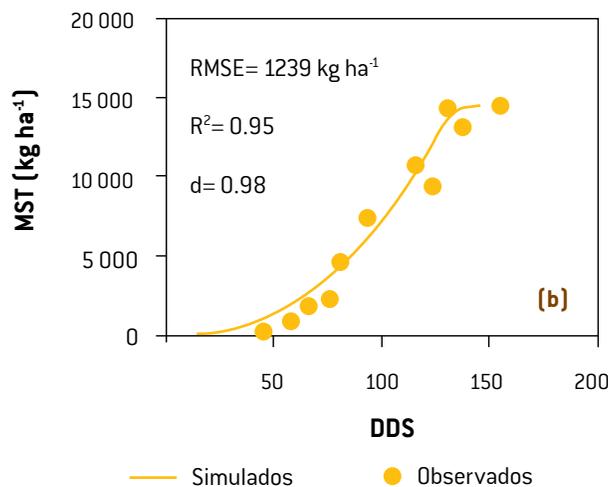
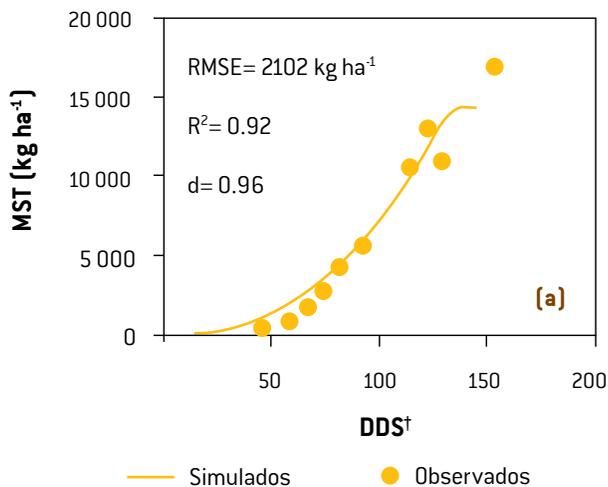
elevados, superiores a 0.9, por lo que se observa un buen ajuste entre valores simulados y observados en la mayor parte del ciclo del cultivo (Figuras 1 y 2). El tratamiento T4 presenta el menor RMSE= 1239 kg ha^{-1} , lo que indica la mejor simulación; las mayores diferencias entre valores simulados y observados se presentaron al final del ciclo, como se muestra en el Cuadro 9, donde el modelo subestima la materia seca total en los tratamientos T1, T3, T4, T5 con bajos porcentajes.

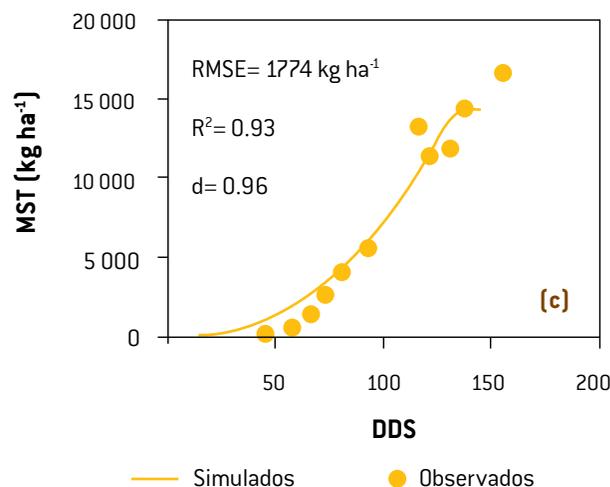
Langensiepen *et al.* (2008) encontraron valores de RMSE de 3.2 ton ha^{-1} , cifra mayor a la presentada en este estudio, por lo que se considera que el modelo es una herramienta adecuada para la estimación de la materia seca total.



[†]DDS=días después de la siembra.

Figura 1. Valores simulados y observados de la materia seca total durante el ciclo del cultivo de la primera siembra de la variedad Júpare C2001. T1 (a); T2 (b).





†DDS=días después de la siembra.

Figura 2. Valores simulados y observados de la materia seca total durante el ciclo del cultivo de la segunda siembra de la variedad Júpare C2001. T3 (a); T4 (b); T5 (c).

Cuadro 9. Valores absolutos simulados y observados de la materia seca total a la cosecha.

Materia seca total (kg ha ⁻¹)				
Tratamientos	Simulado	Observado	Diferencia	Rel.† (%)
T1	15790	21 462	-5672	- 16.00
T2	14954	14962	-8	+ 0.05
T3	15071	16917	-1846	- 10.91
T4	15171	16688	-1517	- 9.09
T5	13192	14562	-1370	- 9.40

†Rel.= relación.

Simulación del índice de área foliar durante el ciclo del cultivo

Para índice de área foliar en T3, T4 y T5 se obtuvo el mejor ajuste de los datos simulados con los observados ($R^2 > 0.81$, $d > 0.85$ y el RMSE entre 0.76 y 1.59) (Figura 4). En los tratamientos T1 y T2 el ajuste no fue bueno, ya que los valores de R^2 fueron bajos (0.47 y 0.49) y los de RMSE altos (2.22 y 2.29) (Figura 3). En la variable índice de área foliar máximo, en los tratamientos T3, T4 y T5 los valores simulados fueron muy cercanos a los observados (Cuadro 9), no así en T2 donde las diferencias

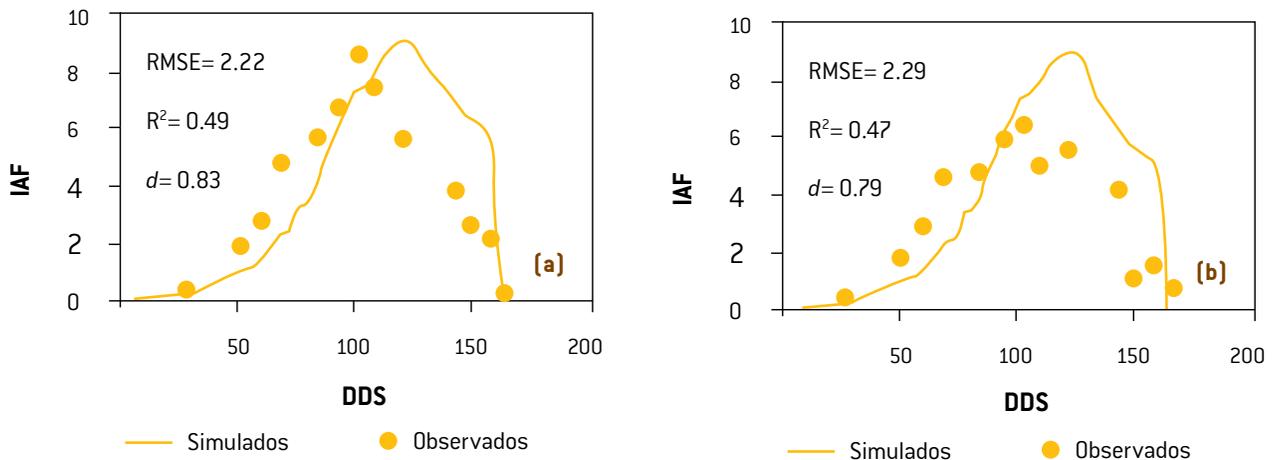
fueron elevadas. Resultados similares a T3, T4 y T5 reportaron Andarzian *et al.* (2015) quienes encontraron que aun con diferencias de esta magnitud, la simulación es aceptable. Singh *et al.* (2008) encontraron que el modelo subestimó el índice de área foliar en -15.63% para un tratamiento en condición óptima, cifra mayor a la reportada en la presente investigación para el tratamiento optimo (Cuadro 10).

El mejor ajuste de los tratamientos de la segunda fecha de siembra que los de la primera indican que los coeficientes genéticos obtenidos con el tra-

tamiento T3 no simularon con precisión aceptable la fenología y crecimiento del cultivo en la primera.

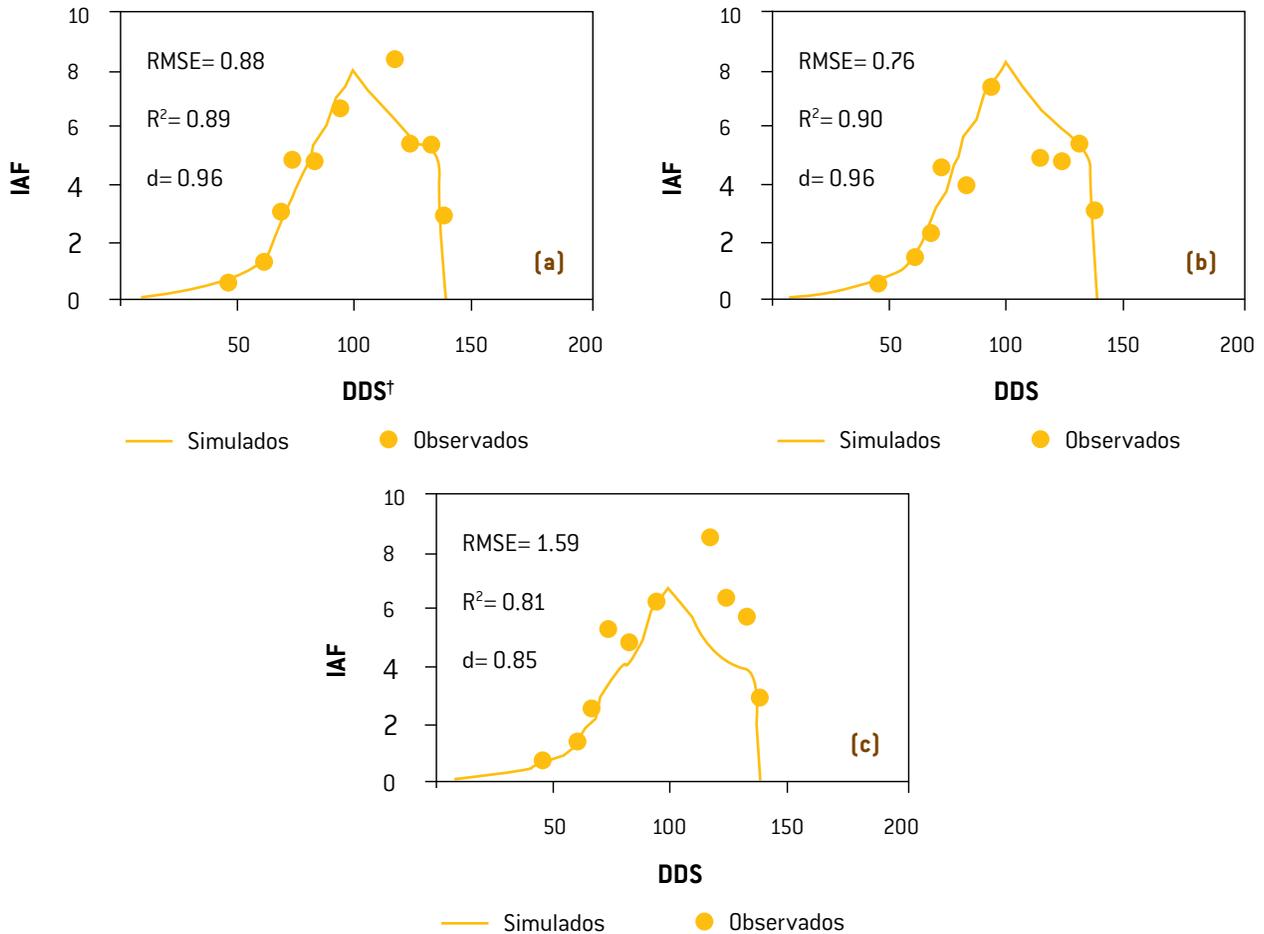
Wu *et al.* (2013) reportaron la obtención de índices de área foliar menores a los obtenidos en esta

investigación, aun cuando el cultivo se manejó bajo condiciones óptimas; ellos citan que el modelo es una herramienta útil para diferenciar las condiciones de suelo y clima de la región de estudio.



†DDS=días después de la siembra.

Figura 3. Valores simulados y observados del índice de área foliar durante el ciclo del cultivo de la primera siembra de trigo variedad Júpate C2001. T1 (a); T2 (b).



†DDS=días después de la siembra.

Figura 4. Valores simulados y observados del índice de área foliar durante el ciclo del cultivo de la segunda siembra de trigo variedad Júpate C2001. T3 (a); T4 (b); T5 (c).

Cuadro 10. Valores del máximo índice de área foliar observado y simulado para cada tratamiento del cultivo de trigo variedad Júpate C2001.

Máximo índice de área foliar			
Tratamientos	Simulado	Observado	Dif. (%)
T1	9.2	8.6	+ 6.98
T2	9.0	6.5	+ 38.46
T3	7.8	8.4	- 7.14
T4	8.2	8.4	+ 2.38
T5	6.9	7.3	- 5.48

a ¹IAF= Dif.= Diferencia.

Simulación de materia seca en hojas

En la simulación de peso seco de hojas durante el ciclo del cultivo, los tratamientos T3 y T4 mostraron un buen ajuste de los valores simulados respecto a los observados: $R^2 = 0.85$ y 0.89 , $d = 0.90$ y 0.93 , y los valores de RMSE de 718 y 615 kg ha^{-1} (Figura 6). En T5 el ajuste fue menor, con valores de $R^2 = 0.72$, valores de $d = 0.78$ y el valor de $\text{RMSE} = 1020$ kg ha^{-1} (Figura 6). Los tratamientos T1 y T2 tuvieron un bajo ajuste, ya que en la mayor parte del ciclo el modelo subestimó el peso seco de hoja, cuyos valores fueron: $R^2 = 0.74$ y 0.57 , $d = 0.78$ y 0.72 , y los valores de RMSE de 1393 y 1499 kg ha^{-1} (Figura 5).

Singh *et al.* (2008) reportaron que el modelo subestimó en todos los tratamientos la acumulación de materia seca, y explicaron como posible causa un error en la partición de la biomasa.

Bannayan *et al.* (2003) encontraron una tendencia del modelo a subestimar la producción de bio-

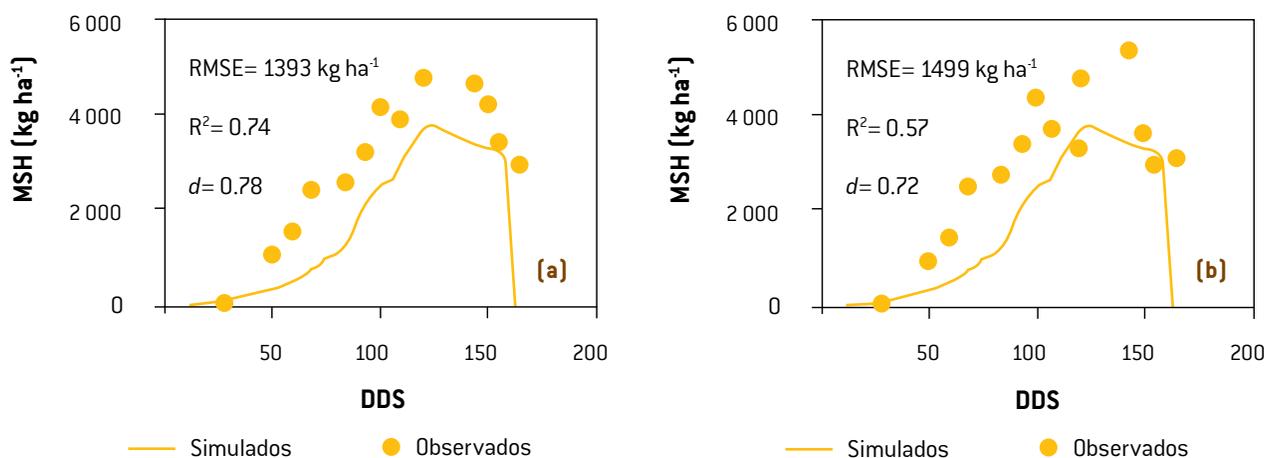
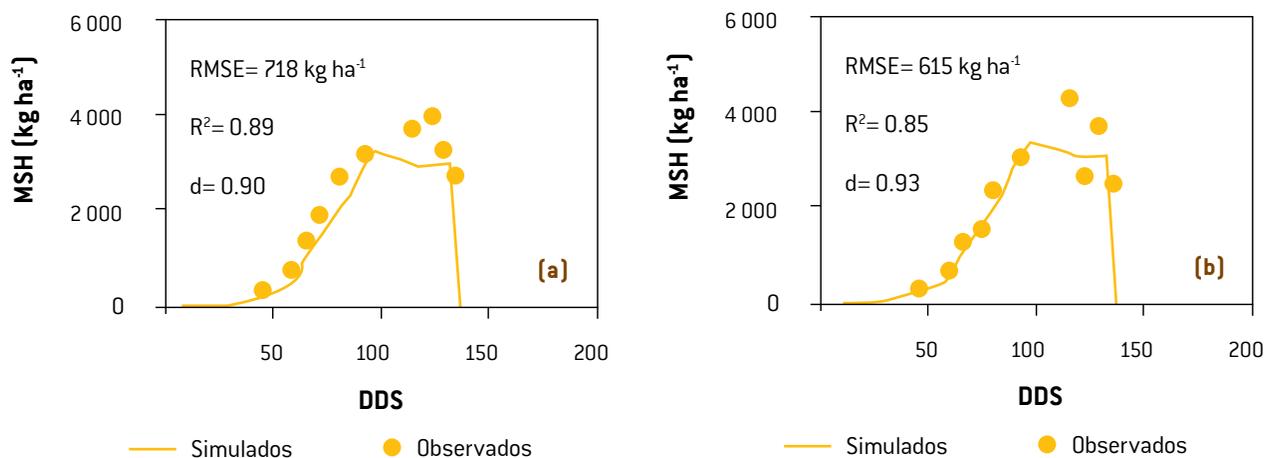


Figura 5. Valores simulados y observados de la materia seca parcial en hojas durante el ciclo del cultivo de la primera siembra variedad Júpate C2001. T1 (a); T2 (b).



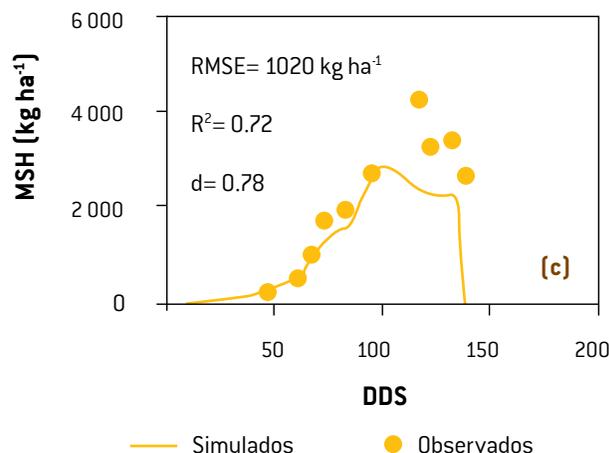


Figura 6. Valores simulados y observados de la materia seca parcial en hojas durante el ciclo del cultivo de la segunda siembra variedad Júpate C2001. T3 (a); T4 (b); T5 (c).

masa en casi todos sus tratamientos y lo atribuyeron a un desajuste en los parámetros de producción del dosel como lo es el área específica (área peso⁻¹), a los coeficientes de partición de biomasa, a la tasa de senescencia o a la absorción de la radiación solar para la producción de biomasa. Langensiepen *et al.* (2008) encontraron errores en la predicción del rendimiento y la acumulación de materia seca (biomasa), lo que atribuyeron a las diferencias de tiempo (clima) y la combinación de coeficientes genéticos utilizados en la calibración.

CONCLUSIONES

Se obtuvieron los coeficientes genéticos para la variedad de trigo Júpate C2001 con el tratamiento en condición de manejo óptima, en la segunda fecha de siembra. En los tratamientos de la segunda fecha de siembra el modelo simuló con buen ajuste: etapas de desarrollo del cultivo, así como rendimiento de grano, materia seca total, índice de área foliar y materia seca en hojas, no así en los tratamientos de la primera siembra, donde el modelo tuvo una baja predicción en la simulación en: rendimiento de grano, materia seca total, índice de área foliar y materia seca en hojas, lo cual muestra que los coeficientes genéticos obtenidos para una fecha de siembra, no son adecuados para efectuar la simulación aceptable en la otra fecha de siembra o ambiente, lo cual puede limitar su uso como herramienta de predicción bajo otras condiciones ambientales.

LITERATURA CITADA

- AHMED, M., M.N. Akram, M. Asim, M. Aslam, F. Hassan, S. Higgins, C.O. Stöckle, and G. Hoogenboom. 2016. Calibration and validation of APSIM-wheat and CERES-wheat for spring wheat under rainfed conditions: models evaluation and application. *Comput. Electron. Agric.* 123: 384-401.
- ANDARZIAN, B., G. Hoogenboom, M. Bannayan, M. Shiralí, and B. Andarzian. 2015. Determining optimum sowing date of wheat using CSM-CERES-wheat model. *J. Saudi Soc. For Agric. Sci.* 14: 189-199.
- ARORA, V.K., H. Singh, and B. Singh. 2007. Analyzing wheat productivity responses to climatic, irrigation and fertilizer-nitrogen regimes in a semi-arid sub-tropical environment using the CERES-wheat model. *Agr Water Manage.* 94: 22-30.
- BANNAYAN, M. N.M.J. Crout, and G. Hoogenboom. 2003. Application of the CERES-wheat model for within-season prediction of winter wheat yield in the United Kingdom. *Agron. J.* 95: 114-125.
- BOOTE, K.J., J. W. Jones, G. Hoogenboom, and J.W. White. 2010. The role of crop systems simulation in agriculture and environment. *Int. J. Agr. Environ. Inform. Syst.* 1: 41-54.
- BOOTE, K. J., J. W. Jones, J. W. White, S. Asseng, and J.I. Lizaso. 2013. Putting mechanisms into crop production models. *Plant Cell Environ.* 36: 1658-1672.
- BOUMAN, B. A. M., H. Van Keulen, H. H. Van Laarh, and R. Rabbingeh. 1996. The 'School of de Wit' crop growth simulation models: A pedigree and historical overview. The 'School of de Wit' crop growth simulation models:

- A pedigree and historical overview. The 'school of de wit' crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. *Agric. Sys.* 52: 171-198.
- CABALLERO-DELOYA, M. y A. Velázquez-Monter. 2010. Estudio de gran visión y factibilidad económica y financiera para el desarrollo de infraestructura de almacenamiento y distribución de granos y oleaginosas para el mediano y largo plazo a nivel nacional. Subsecretaría de fomento a los Agronegocios de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Fideicomiso de Riesgo Compartido, Comité Nacional Sistema-Producto Oleaginosas A.C., Colegio de Postgraduados. SAGARPA. México. 237 p.
- DEJONGE, K.C., A. L. Kaleita, and K. R. Thorp. 2007. Simulating the effects of spatially variable irrigation on corn yields, costs, and revenue in Iowa. *Agr Water Manage.* 92: 99-109.
- DETTORI, M., C. Cesaraccio, A. Motroni, D. Spano, and P. Duce. 2011. Using CERES-wheat to simulate durum wheat production and phenology in southern Sardinia, Italy. *Field Crop Res.* 120: 179-188.
- EVANS, R.G., and B.A. King. 2012. Site -especific sprinkler irrigation in a water-limited future. *T. Asabe.* 55: 493-504.
- FAGERIA, N. K. and A. B. Santos. 2008. Yield physiology of dry bean. *J. Plant Nutr.* 31: 983-1004.
- HAEFNER, J. W. 2005. Modeling biological system: principles and applications (Segunda edición). Springer, New York, USA, 475 p.
- HERNÁNDEZ, N., F. Soto, y A. Caballero. 2009. Modelos de simulación de cultivos, características y usos. *Cultivos Tropicales.* 30: 73-82.
- HOOGENBOOM, G., J.W. Jones, R.W. Wilkens, W.D. Batchelor, L.A. Hunt, K.J. Boot, U. Singh, O. Uryasev, W. T. Bowen, A. J. Gijnsman, A. Du Toit, J.W. White, and G.Y. Tsuji. 2010. Decision support system for agrotechnology transfer (DSSAT) version 4.5 [CD-ROM]. University of Hawaii, Honolulu, HI, USA.
- JONES, J. W., G. Hoogenboom, C.H. Porter, K.J. Boote, W.D. Batchelor, L.A. Hunt, P.W. Wilkens, U. Singh, A.J. Gijnsman, and J.T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* 18: 235-265.
- LAL, M., K.K. Singh, L.S. Rathore, G. Srinivasan, and S.A. Saseendran. 1998. Vulnerability of rice and wheat yields in nw India to future changes in climate. *Agr Forest Meteorol.* 89: 101-114.
- LANGENSIEPEN, M., H. Hanus, P. Schoop, and W. Grasl. 2008. Validating CERES-wheat under north - German environmental conditions. *Agri. Syst.* 97: 34-47.
- LI, Z. T., J. Y. Yang, C.F. Drury, and G. Hoogenboom. 2015. Evaluation of the DSSAT-CSM for simulating yield and soil organic C and N of a long-term maize and wheat rotation experiment in the loess Plateau of northwestern China. *Agric. Syst.* 135: 90-104.
- LOAGUE, K. and R.E. Green. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *J. Contam. Hydrol.* 7, 51-73.
- MAVROMATIS, T. 2014. Pre-season prediction of regional rainfed wheat yield in northern Greece with CERES-wheat. *Theor Appl Climatol.* 117: 653-665.
- MCCOWN, R.L., G.L. Hammer, J.N.G. Hargreaves, D.P. Holzworth, and D.M. Freebairn. 1996. APSIM: a novel software system for model development, model testing, and simulation in agricultural systems research. *Agric. Syst.* 50: 255-271.
- MORENO, S. and A. Weiss. 2004. Improvements in the simulation of kernel number and grain yield in CERES-Wheat. *Field Crop Res.* 88: 157-169.
- OTTMAN, M.J. 2008. Predicting wheat growth using the CSM-Cropsim-CERES-wheat crop model. *Forage and Grain Report.* October 2008. 156: 12-20.
- PALOSUO, T. A., K.C. Kersebaum, C. Angulo, P. Hlavinka, M. M. Torinese, J. E. Olesen, R. H. Patil, F. O. Ruget, C. Rumbaur, J. Takac, M. Trnka, M. Bindi, B. Aldag, F. Ewert, R. Ferrise, W. Mirschel, L. Saylan, B. Siska, and R. Rotter. 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.
- PORTER, J.R., P. D. Jamieson, and D. R. Wilson. 1993. Comparison of the wheat simulation models AFR-CWHEAT2, CERES-wheat and SWHEAT for non-limiting conditions of crop growth. *Field Crop Res.* 33: 131-157.
- PRABHAKAR, B. N., A. S. Halepyati, B. K. Desai, and B. T. Pujari. 2007. Growing degree days and photo thermal units accumulation of wheat (*Triticum aestivum* L. and *T. durum* Desf.) genotypes as influenced by dates of sowing. *Karnataka J. Agric. Sci.* 20: 594-595.
- PRECIADO, R. E., M. Erazo, J. A. Quijano, A. Terrón, y R. Paredes. 2002. Simulación del crecimiento de maíces precoces en condiciones de secano. *Agronomía Mesoamericana,* 13: 123-128.
- RADULOVICH, R. 2009. Método gravimétrico para determinar in situ la humedad volumétrica del suelo. *Agron. Costarric.* 33(1): 121-124.
- REZZOUG, W., B. Gabrielle, A. Suleiman, and K. Benabdeli. 2008. Application and evaluation of the DSSAT wheat in the Tiaret region of Algeria. *Afr. J. Agric. Res.* 3: 284-296.
- SFA. 2011. Perspectivas de largo plazo para el sector agropecuario de México 2011-2020. Subsecretaría de Fomento a los Agronegocios. SAGARPA. México. 43 p.

- SINGH, A. K., R. Tripathy, and U. K. Chopra. 2008. Evaluation of CERES-wheat and CropSyst models for water nitrogen interactions in wheat crop. *Agr. Water Manage.* 95: 776-786.
- STICKLER, F.C., S. Wearden, and A. W. Pauli. 1961. Leaf area determination in grain sorghum. *Agr. Jour.* 53: 187-188.
- VALIZADEH, J., S. M. Ziaei, and S. M. Mazlounzadeh. 2014. Assessing climate change impacts on wheat production. *J. Saudi Soc. Agr. Sci.* 13:107-115.
- WALLACH, D. 2006. Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization and applications. Elsevier. Amsterdam, Reino Unido. 447 p.
- WANG, E. and T. Engel. 1998. Simulation of phenological development of wheat crops. *Agric. Syst.* 58:1-24.
- WILLMOTT, C. J., G.S. Akleson, R.E. Davis, J.J. Fedema, K.M. Klink, D.R. Legates, J. Odonnel, and C.M. Rowe. 1985. Statistic for the evaluation and comparison of models. *J. Geophys. Res.* 90: 8995-9005.
- WU, CH., R. Anlauf, and Y. Ma. 2013. Application of the DSSAT model to simulate wheat growth in eastern China. *J. Agric. Sci.* 5:198-208.