

1

REVISIÓN CIENTÍFICA

MODELOS DE SIMULACIÓN DEL CULTIVO DE MAÍZ: FUNDAMENTOS Y APLICACIONES EN ESPAÑA

F. SAU¹, F. X. LÓPEZ CEDRÓN², A. E. CONFALONE³, J. I. LIZASO⁴

¹Departamento de Biología Vegetal. ETSI Agrónomos-UPM. Ciudad Universitaria. 28040 Madrid (España).

federico.sau@upm.es.

²Consellería do Medio Rural. 27003 Lugo (España).

³Agrometeorología-Facultad de Agronomía - UNCPBA. Azul. 7300 Buenos Aires (Argentina).

⁴Departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia. ETSI Agrónomos-UPM. Ciudad Universitaria. 28040 Madrid (España).

RESUMEN

Un modelo de simulación del crecimiento de un cultivo es cualquier colección de algoritmos que describe matemáticamente la respuesta de un sistema de cultivo a su entorno. La idea inicial de los modelos de crecimiento de los cultivos parte de la necesidad de integrar los conocimientos de suelo, clima, cultivos y prácticas agrícolas en una herramienta que facilite la toma de decisiones. Existe un gran número de modelos matemáticos de simulación del maíz, pero el más empleado es CERES-Maize. Se trata de un modelo desarrollado en 1986 que ha sido mejorado en versiones sucesivas para hacer su empleo más fiable en entornos y condiciones de manejo más diversos.

Durante el ciclo, CERES-Maize calcula cada día, el avance de la fenología, la tasa de crecimiento y el reparto de la biomasa entre los órganos en fase de crecimiento. Cuando el agua y el nitrógeno no limitan el crecimiento (crecimiento potencial), los procesos simulados se ven afectados por los valores que toman las principales variables ambientales (radiación solar, temperatura máxima y mínima diaria, y concentración de CO₂ atmosférico), de factores específicos del cultivar, y de las prácticas de cultivo. Cuando el agua y el nitrógeno pueden limitar el crecimiento potencial del cultivo, CERES-Maize efectúa balances de agua y de nitrógeno diarios para estimar el impacto del déficit en el crecimiento del cultivo. Finalmente, se presentan algunos problemas que tiene CERES-Maize y, por tanto, aspectos susceptibles de mejora. También se mencionan algunos trabajos realizados en España apoyándose en diferentes modelos de simulación del cultivo del maíz.

Palabras claves: CERES-Maize, modelo matemático, crecimiento, desarrollo, rendimiento, coeficientes genéticos, *Zea mays*.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de información para tomar decisiones en agricultura está aumentando rápidamente debido a la demanda creciente de productos agrícolas, fibras y, más recientemente, biocombustibles. Este uso competitivo que se ejerce sobre la tierra, el agua y otros recursos naturales, hace imprescindible un manejo cada vez más eficiente de los mismos que permita aumentar los rendimientos agrícolas, prestar servicios ambientales añadidos y asegurar la sostenibilidad del sistema. Por otro lado, el cambio climático está provocando un cambio progresivo del medio en el que se desarrollan y crecen los cultivos, lo cual requiere una adaptación adicional de los sistemas agrícolas para, por lo menos, mantener su productividad en el nuevo entorno climático.

En este contexto, la obtención de nuevos datos mediante la experimentación agronómica y la publicación posterior de los resultados no es suficiente para cubrir esta demanda creciente de información, ya que además de ser económicamente costosa, al realizarse la investigación agronómica en un punto concreto del espacio y del tiempo, los resultados obtenidos son específicos para un lugar y una estación de crecimiento (Jones *et al.*, 2003).

Según Campbell y Stockle (1994), un modelo de simulación del crecimiento de un cultivo es cualquier algoritmo que trata de describir de modo cuantitativo la respuesta del sistema de cultivo a su entorno. La idea inicial de los modelos de crecimiento de los cultivos parte de la necesidad de integrar los conocimientos de suelo, clima, cultivos y prácticas agrícolas en una herramienta que facilite la toma de decisiones acertadas, a la hora de transferir tecnología agrícola desde una localidad a otras, con diferentes suelos y climas (IBSNAT, 1993). El enfoque de análisis de sistemas suministra un marco de trabajo en el que se lleva a cabo una investigación para entender el funcionamiento del sistema y de sus componentes (el sistema de cultivo en este caso, y sus componentes, el suelo + los factores meteorológicos + la especie y el cultivar + las prácticas de cultivo). Esta visión del comportamiento del sistema se plasma a continuación en un modelo matemático que permite reproducir la dinámica del mismo en unas condiciones dadas y, una vez que se considera que el modelo simula de modo adecuado la realidad, se pueden realizar múltiples experimentos de ordenador (simulaciones) para facilitar el contraste de hipótesis de teorías cuantitativas o tratar de optimizar el manejo del sistema.

Con este enfoque fueron apareciendo progresivamente modelos de crecimiento genéricos (aplicables a todo tipo de especies cultivadas mediante adaptación de sus parámetros) o específicos de cultivos a partir de la década de los 70 del siglo pasado (de Wit *et al.*, 1970; Arkin *et al.*, 1976). Los primeros modelos matemáticos de cultivos eran de difícil manejo y estaban exclusivamente destinados a ser usados por la comunidad científica. Más adelante, la amplia difusión de los ordenadores personales y el diseño de programas más amigables han hecho más asequible el uso de estas herramientas

para la toma de decisiones en la agricultura. De este modo, se han unido algunos de los modelos en paquetes informáticos que facilitan su uso, al utilizar todos la misma estructura de archivos y permitir simular situaciones más complejas, como rotaciones de cultivo mantenidas en un mismo suelo durante un periodo prolongado. Por ejemplo, el paquete de modelos del “Decision Support System for Agrotechnology Transfer” (DSSAT) (<http://www.icasa.net/dssat/index.html>), ha sido diseñado con este enfoque, lo cual ha facilitado su empleo para resolver todo tipo de problemas agronómicos (Jones *et al.*, 2003).

Muchos de los modelos, incluidos en el DSSAT son modelos exitosos y han sido usados ampliamente (CERES-Wheat, CERES-Maize, CROPGRO-Soybean, etc). En concreto, CERES-Maize (Jones y Kiniry, 1986) fijó muy alto el nivel de los estándares de la modelización de cultivos y es, desde entonces, el modelo de maíz más empleado (Lizaso *et al.*, 2011). Por ello, en él se han apoyado muchos de los modelos de maíz posteriores que han tratado de mejorar su capacidad de predicción. A continuación, se describen los principales componentes del modelo CERES-Maize (Las ecuaciones descritas corresponden a la versión 4.5).

EL MODELO MATEMÁTICO DE SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO CERES-MAIZE

Son muchos los modelos matemáticos de simulación del maíz que se han desarrollado con el objetivo de predecir su rendimiento en biomasa y en grano en años climáticos sucesivos y en entornos muy distintos. Entre estos modelos se incluyen “Splinter Model” (Splinter, 1974), “SIMAIZ” (Duncan, 1975), “Bio-photo-thermal Model” (Coligado y Brown, 1975), “Energy-Crop Growth Model” (Coelho y Dale, 1980), “CORNF” (Stapper y Arkin, 1980), “CERES-Maize” (Jones y Kiniry, 1986), “ALMANAC” (Kiniry *et al.*, 1997; Kiniry y Bockholt, 1998) y más recientemente CSM-IXIM (Lizaso *et al.*, 2011).

CERES-Maize (Crop Environmental Resource Synthesis) es un modelo dinámico, con algunas partes mecanicistas y otras empíricas, que simula el desarrollo, el crecimiento y el rendimiento del maíz (Jones y Kiniry, 1986). Durante el ciclo, el modelo calcula cada día, el avance de la fenología, la tasa de crecimiento y el reparto de la biomasa entre los órganos en fase de crecimiento. Cuando el agua y el nitrógeno no limitan el crecimiento (crecimiento potencial del cultivo), los procesos simulados se ven afectados por los valores que toman las principales variables ambientales (radiación solar, temperatura máxima y mínima diaria, y concentración de CO₂ atmosférico), factores específicos del cultivar empleado (seis coeficientes genéticos definidos en la Tabla 1), y las prácticas de cultivo (v.g. fecha de siembra, densidad de plantas y

distancia entre líneas). Este modelo de cultivo, como todos los incluidos en el software del DSSAT, permite también simular el desarrollo y crecimiento del cultivo en entornos donde el agua y el nitrógeno son limitantes, cuando las opciones de balance de agua y nitrógeno están activadas. En estas circunstancias, el modelo realiza a diario un balance hídrico y de nitrógeno del cual deriva unos factores de déficit que permiten modular el crecimiento respecto del potencial.

TABLA 1

Coefficientes genéticos de CERES-Maize para el cultivar Clarica (López-Cedrón et al., 2005).
CERES-Maize genetic coefficients for Clarica maize cultivar (López-Cedrón et al., 2005).

P1	175,0	Grados día con base 8 °C desde emergencia hasta el final de la fase juvenil.
P2	0,0	Sensibilidad al fotoperíodo (días de retraso en la iniciación de la flor masculina por hora de incremento del fotoperíodo. 0 para cultivares no sensibles al fotoperíodo).
P5	630,0	Grados día con base 8 °C desde 75% de emisión de sedas hasta madurez fisiológica.
G2	936,0	Número potencial de granos por planta.
G3	8,0	Tasa potencial de crecimiento de los granos (mg grano ⁻¹ d ⁻¹).
PHINT	38,3	Grados día con base 8 °C entre la aparición de dos hojas sucesivas.

Desde su primera versión (Jones y Kiniry, 1986), los múltiples procesos de calibración, validación y adaptación de CERES-Maize realizados por diferentes grupos de investigación han conducido a que exista en la actualidad un gran número de versiones, no siempre bien descritas en la literatura científica, que difieren todas ligeramente del modelo original. Se trata de un fenómeno generalizado en los modelos de crecimiento de los cultivos pero es especialmente frecuente en el caso de modelos relativamente simples y de amplio uso como CERES-Maize (Carberry *et al.*, 1989; Lahrouni *et al.*, 1993; Castrignano *et al.*, 1998; du Toit *et al.*, 2002; Ben Nouna *et al.*, 2003), probablemente porque resultan más fáciles de comprender y de modificar.

Por otro lado, los investigadores que desarrollaron la primera versión de CERES-Maize y sus sucesores han ido aportando modificaciones tratando de mejorar progresivamente el modelo y así conseguir que sus estimaciones fueran fiables en un rango creciente de sistemas de cultivo y de entornos (Kiniry *et al.*, 1997; Kiniry y Bockholt, 1998; IBSNAT, 1993; Jones *et al.*, 2003). Estas versiones “oficiales” de CERES-Maize son las que figuran en las sucesivas versiones del DSSAT.

COMPONENTES BÁSICOS DE LA SIMULACION CON CERES-MAIZE

CERES-Maize utiliza la ecuación más sencilla que permite estimar la biomasa total (B_T , g planta⁻¹) producida por una planta:

$$B_T = g * d \quad [1]$$

donde g (g planta⁻¹ d⁻¹) es la tasa de crecimiento medio diario y d (días) es la duración del crecimiento (Ritchie *et al.*, 1998).

Una vez calculado el crecimiento diario, g , el modelo lo reparte entre los principales órganos que están creciendo. Para decidir qué órganos están creciendo y qué prioridades asignar, se estima en paralelo la progresión del desarrollo fásico.

El desarrollo fásico se refiere a cambios en los estadios de desarrollo y está casi siempre asociado con grandes cambios en el reparto de asimilados entre los principales órganos de la planta. Existe una gran variabilidad en el desarrollo fásico entre cultivares. Esta diversidad permite seleccionar cultivares cuyo ciclo se adapte al período donde tanto el régimen de temperaturas como la disponibilidad hídrica sean menos limitantes. Este aspecto de la modelización es de gran importancia cuando se trata de analizar los riesgos asociados con la producción de un cultivo.

El principal factor ambiental que afecta al desarrollo es la temperatura de la parte de la planta en crecimiento. Por otro lado, el fotoperiodo también puede afectar al desarrollo. No obstante, existen importantes diferencias entre cultivares en su respuesta a este factor ambiental.

Una razón lógica para separar las ecuaciones que describen los procesos de crecimiento y desarrollo es poder plasmar de modo cuantitativo en el modelo, cómo diferentes niveles de disponibilidad de agua y nitrógeno afectan a cada uno de estos procesos.

DESARROLLO DEL CULTIVO

En CERES-Maize, el submodelo de desarrollo fásico cuantifica la edad fisiológica del cultivo y describe la duración de 8 fases (Ritchie *et al.*, 1998):

- Siembra – germinación.
- Germinación – emergencia.
- Emergencia – fin del período juvenil.
- Fin del período juvenil – iniciación floral.
- Iniciación floral – floración femenina y fin del crecimiento de las hojas.
- Fin del crecimiento foliar – principio del llenado del grano.

- Principio del llenado del grano – madurez fisiológica.
- Madurez fisiológica – cosecha.

La evolución fenológica del cultivo depende de la temperatura, del fotoperíodo y de la sensibilidad al fotoperíodo del cv (P2 en Tabla 1).

El modelo asume que la tasa de desarrollo aumenta linealmente, en función de la temperatura base (8 °C) hasta los 34 °C, y decrece linealmente hasta cero cuando la temperatura se incrementa desde 34 a 44 °C. Así mismo, se considera que las tasas de iniciación de hojas y aparición de hojas cambian linealmente y de modo similar en estos dos rangos de temperaturas. El maíz es sensible al fotoperíodo solamente durante la inducción floral. Al ser el maíz una especie de día corto, la inducción fotoperiódica es más rápida en días cortos (menos de 12,5 horas) y se demora más con días más largos (Kiniry, 1991). Esta demora es mayor en cultivares más sensibles al fotoperíodo (Figura 1).

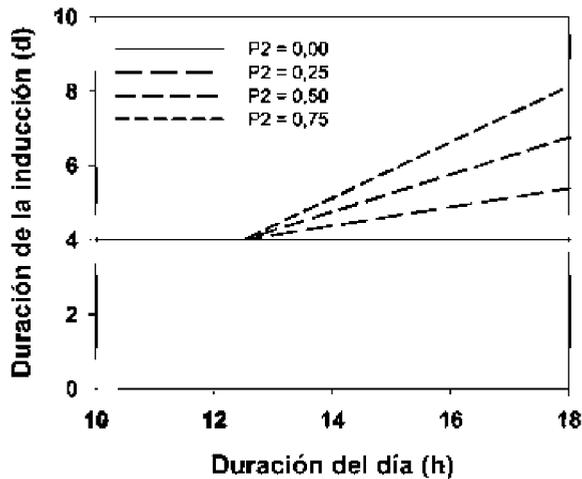


FIGURA 1

Efecto del fotoperíodo durante la inducción floral simulado por CERES-Maize. P2 es un coeficiente genético específico para cada cultivar que indica la sensibilidad al fotoperíodo (días de retraso en la iniciación de la flor masculina por hora de incremento del fotoperíodo).

Effect of photoperiod during floral induction simulated by CERES-Maize. P2 is a specific genetic coefficient of each cultivar quantifying its photoperiod sensitivity (days delay in tassel initiation per hour increase in photoperiod; zero for non-sensitive cultivars).

Respuesta térmica de la tasa de desarrollo

El término considerado más apropiado para describir la duración del desarrollo es el denominado “tiempo térmico” (TT) definido como el sumatorio diario acumulado del “tiempo térmico diario” (DTT). DTT se calcula como sigue:

$$DTT = \text{TEMPM} - \text{TBASE}, \quad \text{TEMPM} > \text{TBASE} \quad [2]$$

Donde TEMPM es la temperatura media diaria y TBASE es la temperatura base del proceso (temperatura por debajo de la cual el desarrollo fenológico se detiene), que para el maíz se establece en 8 °C.

Por otro lado, DTT, para un día determinado, es igual a cero si la temperatura máxima diaria (TMAX) es menor que TBASE, es decir no hay DTT diarias negativas. El método de cómputo de DTT cambia si TMAX es mayor que TBASE y la temperatura mínima diaria (TMIN) es menor que TBASE, o si TMAX supera los 34 °C. La unidad de DTT y TT es el grado centígrado día (°Cd).

Siembra-emergencia

Asumiendo una adecuada humedad en el suelo, el período de siembra a emergencia requiere un día para la germinación de la semilla, 45 °Cd para el desarrollo del coleoptilo subterráneo más 6 °Cd por cada cm de profundidad de la semilla.

Emergencia-floración femenina

Durante este período, se alcanza el número total de hojas del cultivo (TLNO, total leaf number, número total de hojas producidas por la planta). TLNO resulta de añadir a los cinco primordios foliares preexistentes en el embrión los que se forman entre la emergencia y la iniciación floral. La fecha de inicio de la inducción floral se calcula usando un valor de TT determinado (coeficiente genético P1; Tabla 1). El modelo asume que se precisa un plastocrono (tiempo térmico constante requerido para la formación de un nuevo primordio de hoja) para que se inicie un nuevo primordio de hoja en el meristemo apical entre emergencia e iniciación floral y que transcurre un filocrono (tiempo térmico constante que transcurre entre el despunte de dos hojas) entre el despunte de dos hojas sucesivas. La duración en tiempo térmico del filocrono es controlada por el coeficiente PHINT (phyllochron interval: filocrono, ver Tabla 1), mientras que el plastocrono es la mitad del filocrono. El modelo asume también que durante la fase de inducción floral continua la diferenciación de primordios foliares. La fecha de floración femenina, que en el modelo coincide con el final del crecimiento foliar, se determina a partir de TLNO y del filocrono.

Durante la inducción floral, la progresión del desarrollo deja de responder a la temperatura para responder al fotoperíodo. CERES-Maize considera que todos los

cv's completan la iniciación floral cuatro días después del final del período juvenil en fotoperíodos cortos (menores o iguales a 12,5 h). Para fotoperíodos largos, se calcula la tasa de inducción fotoperiódica (RATEIN) como sigue:

$$\text{RATEIN} = 1/[4 + P2 * (\text{HRLT} - 12,5)] \quad [3]$$

HRLT es el número de horas de luz y P2 es un coeficiente genético específico para la sensibilidad al fotoperíodo del cv (Tabla 1 y Figura 1). Las plantas alcanzan el estadio de iniciación floral cuando la suma diaria acumulada de RATEIN es mayor o igual que 1,0.

Una vez completada la iniciación floral, el meristemo apical cambia y pasa de diferenciar primordios foliares a diferenciar primordios florales. El número de hojas queda entonces determinado así como la fecha de la floración femenina.

Floración femenina - madurez fisiológica

Siguiendo la descripción de Johnson y Tanner (1972), el modelo divide este período en tres fases. Estas fases incluyen un período no efectivo de llenado del grano, un período de llenado efectivo del grano y un período desde el final del llenado efectivo del grano hasta la madurez fisiológica.

CERES-Maize asume un tiempo térmico desde floración femenina hasta madurez fisiológica específico para cada cv (coeficiente genético P5; Tabla 1). El período de llenado no efectivo precisa de 170 °Cd, mientras que el de llenado efectivo finaliza cuando se ha acumulado el 95% de los °Cd requeridos desde floración a madurez fisiológica (P5).

CRECIMIENTO DEL CULTIVO

CERES-Maize utiliza el concepto de Eficiencia de Uso de la Radiación (EUR; 4,2 g MJ⁻¹ (PAR)) para estimar la acumulación potencial de biomasa por planta (PCARB, g planta⁻¹ d⁻¹) reduciendo al mínimo, así, el número de ecuaciones necesarias para estimar la fotosíntesis neta:

$$\text{PCARB} = \text{EUR} * \text{IPAR}/\text{PLTPOP} * \text{FCO2} \quad [4]$$

$$\text{IPAR} = \text{PAR} * [1 - \exp(-\text{EXT} * \text{IAF})] \quad [5]$$

donde FCO2 es un factor relativo adimensional que estima el efecto en el crecimiento de la concentración de CO₂ en el aire, IPAR es la radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada por la cubierta (MJ m⁻² d⁻¹), PLTPOP es la densidad de plantas por unidad de superficie (planta m⁻²), IAF es el índice de área foliar y EXT es el coeficiente de extinción de PAR dentro de la cubierta.

La producción real de biomasa por planta (CARBO, g planta⁻¹ d⁻¹) puede ser inferior a PCARB debido a temperaturas subóptimas o al déficit de agua o nitrógeno:

$$\text{CARBO} = \text{PCARB} * \min(\text{PRFT}, \text{SWFAC}, \text{NFAC}) \quad [6]$$

donde PRFT, SWFAC y NFAC son factores reductores de estrés de temperatura, agua y nitrógeno, respectivamente. Estos factores, como se describe más adelante, pueden variar entre 0 (máximo estrés) y 1 (sin estrés). El modelo escoge cada día el factor más limitante. Cuando el agua y el nitrógeno no son factores limitantes, y la temperatura transcurre dentro de los óptimos (PRFT=1; ver Fig. 2 y descripción posterior), la EUR alcanza su máximo valor.

Después de calcular CARBO, el modelo reparte los asimilados entre raíces y hojas desde emergencia hasta iniciación floral y entre raíces, tallos, hojas y espiga (cuando se inicia su crecimiento) desde la iniciación floral hasta la emisión de estigmas (floración femenina). El crecimiento de la espiga (GROEAR, g planta⁻¹ d⁻¹) utiliza una función sigmoideal propuesta por Lizaso *et al.* (2007) y empieza a calcularse 250 °Cd antes de la floración femenina (modificado de Otegui y Bonhomme, 1998). Después de la floración se detiene la acumulación de biomasa en hojas, pero tanto los tallos como las raíces pueden seguir ganando peso, si existe suficiente disponibilidad de asimilados para cubrir la demanda del sumidero prioritario: la espiga.

Efecto de la temperatura en el crecimiento (PRFT)

PRFT es una función de temperatura que afecta EUR y que se computa cada día. Adopta valores comprendidos entre 0 y 1 y está representada en la Figura 2, la cual muestra PRFT *versus* temperatura media durante las horas de luz diurna. La función está ponderada hacia TMAX con el objetivo de tener en cuenta las temperaturas medias durante las horas de luz en las que se produce la fotosíntesis. Las temperaturas usadas para calcular PRFT y RGFILL (ver más adelante) pueden modificarse en el archivo de especie (MZCER045.SPE).

Removilización de materia seca hacia el grano

El modelo removiliza materia seca hacia el grano cuando la producción diaria de asimilados (CARBO) es menor que la tasa potencial de crecimiento del grano (GROGRN). En estas circunstancias, una cantidad limitada de materia seca vegetativa (hasta 15% del peso del tallo a la floración) puede ser translocada desde los tallos y las hojas hacia el grano.

En CERES-Maize v4.5, como en la versión original (Jones y Kiniry, 1986), la pérdida de 1,0 g de biomasa de los tallos permite un incremento de 1,0 g en la biomasa de los granos.

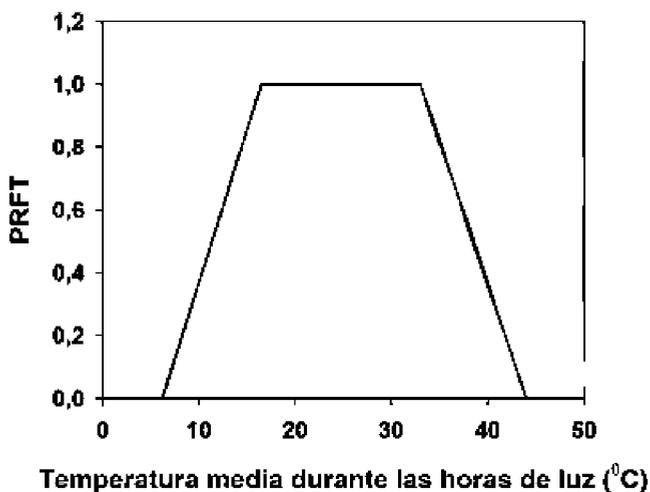


FIGURA 2

Función de temperatura diaria usada para calcular el factor reductor de la fotosíntesis (PRFT) en CERES-Maize v4.5.

Daily temperature function used to compute the photosynthesis reduction factor (PRFT) in CERES-Maize v4.5.

Número de granos por planta y tasa de crecimiento del grano

Como en otros cereales, el rendimiento en grano del maíz está directamente relacionado con el número de granos m^{-2} en cosecha. Por tanto, resulta crucial tener una estimación precisa del número de granos por planta (GPP) para que el modelo consiga predecir correctamente la producción (Ritchie y Alargarswamy, 2003).

Al iniciarse el llenado de grano efectivo, el modelo estima el número de semillas por planta (GPP, granos $planta^{-1}$) como una función de la tasa media diaria de fotosíntesis durante la fase desde anthesis hasta el período de llenado efectivo del grano (PSKER) y del número potencial de semillas por planta (G2 en Tabla 1). PSKER se calcula con los valores de CARBO durante esta fase y, por lo tanto, se ve afectado linealmente por las condiciones de estrés de agua y nitrógeno:

$$GPP = G2 * PSKER / 7200,0 + 50,0 \quad [7]$$

CERES-Maize utiliza un procedimiento “fuente-sumidero-reserva” (Ritchie *et al.*, 1998) que permite estimar la tasa total de crecimiento de grano por planta (GROGRN, $g\ planta^{-1}\ d^{-1}$). GROGRN depende de la temperatura (RGFILL, Figura 3), del número de semillas por planta (GPP), de la tasa de crecimiento potencial de las semillas (G3, $mg\ semilla^{-1}\ d^{-1}$; ver Tabla 1) y del factor de déficit hídrico (SWFAC):

$$GROGRN = RGFILL * GPP * G3 * 0,001 * (0,45 + 0,55 * SWFAC) \quad [8]$$

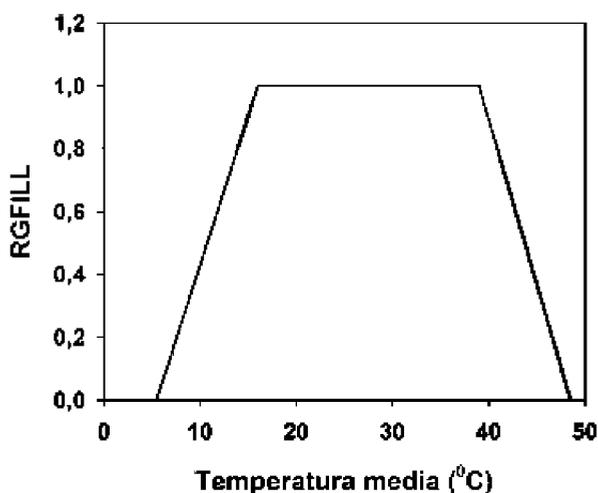


FIGURA 3

Función de temperatura diaria usada para estimar el factor de llenado de grano (RGFILL) en CERES-Maize v4.5.

Daily temperature function affecting the relative rate of grain filling (RGFILL) in CERES-Maize v4.5.

Efecto de la temperatura en el llenado de grano (RGFILL)

RGFILL es una función de temperatura que adopta valores comprendidos entre 0 y 1 y se calcula diariamente. Esta función afecta el crecimiento diario del grano (Figura 3). Cuando el agua y el nitrógeno no son limitantes y la temperatura discurre entre valores óptimos (RGFILL=1), el crecimiento del grano ocurre a la tasa potencial determinada por el coeficiente genético G3 (Tabla 1).

BALANCE DE AGUA EN EL SUELO Y CÁLCULO DE LOS FACTORES DE ESTRÉS HÍDRICO DEL CULTIVO

Balance de agua del suelo, crecimiento de las raíces, y extracción de agua

En CERES-Maize 4.5, como en todos los modelos incluidos en DSSAT-4.5, para realizar el balance diario del agua del suelo se utiliza el balance unidimensional de Ritchie (1985), llamado modelo de “tipping bucket” o de cubo desbordante, que simula el flujo y la extracción de agua para cada uno de los horizontes del perfil del suelo.

Para que el modelo pueda realizar el balance hídrico diario, es preciso que las siguientes características físicas de cada una de las capas del perfil estén definidas en

el archivo de suelos: el límite superior de drenaje o capacidad de campo (DUL, $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O cm}^{-3}$ suelo), el límite inferior o punto de marchitez permanente (LL, $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O cm}^{-3}$ suelo) el contenido de agua a saturación (SAT, $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O cm}^{-3}$ suelo), y una función de preferencia de distribución de las raíces en el suelo (SRGF, 0-1) o factor de distribución relativa de la longitud de raíces que cuantifica la hospitalidad potencial de una capa de suelo determinada (0: hospitalidad mínima; 1: hospitalidad máxima). El modelo cuenta también con algoritmos internos para estimar otras variables usadas en los cálculos.

La profundidad de enraizamiento (RTDEP, cm) avanza como una función diaria del tiempo térmico. La función es modulada por la humedad y la hospitalidad de la capa de suelo en la que se produce el frente de avance radicular.

Una vez calculada la profundidad de enraizamiento se estima la cantidad de raíces por capa de suelo. La densidad de raíces en cada capa de suelo (RLV, cm raíz cm^{-3} suelo) depende de la cantidad de materia seca asignada a las raíces (GRORT, $\text{g planta}^{-1} \text{d}^{-1}$), de un factor que convierte biomasa en longitud de raíces (RLWR, $\text{cm g}^{-1} \times 10^4$) disponible en el archivo de especie (SPE) y de un factor relativo (RLDF) que pondera las condiciones más o menos favorables de la capa de suelo para la proliferación de raíces. En el cálculo de RLDF interviene la disponibilidad de agua, de nitrógeno y la hospitalidad de la capa (SRGF).

La extracción potencial de agua por las raíces en una capa de suelo (RWU, cm d^{-1}) es una función del contenido de agua por encima de LL y de la densidad de raíces (RLV). RWU puede verse reducida si durante dos días consecutivos el contenido de agua es tan elevado como para no permitir una adecuada difusión de oxígeno y de la aireación de raíces. Para ello el modelo cuenta con un parámetro (PORM, cm^3 aire cm^3 suelo) disponible en el archivo de especie (SPE). PORM es el volumen mínimo de poros llenos de aire requerido para asegurar un suministro adecuado de oxígeno a las raíces. Finalmente, la extracción potencial de agua por el conjunto del sistema radical del cultivo (TRWU) se calcula como la suma de las extracciones potenciales en todas las capas enraizadas del perfil del suelo.

Cuando TRWU no es suficiente como para cubrir la transpiración potencial del cultivo (EP0) que demanda la atmósfera, entonces la transpiración real del cultivo (EP) se hace igual a TRWU, y el factor de estrés hídrico sobre la fotosíntesis se calcula como SWFAC = EP/EP0, donde 0 corresponde al estrés hídrico máximo (no se produce transpiración ni fotosíntesis) y 1 a la ausencia de estrés. Como se vio, un SWFAC inferior a 1 reduce en proporción directa la producción neta de biomasa del día (CARBO). Además, cuando TRWU es menor que $1,5 * EP0$, el factor de turgor (TURFAC = EP/1,5 * EP0) adopta valores inferiores a 1 y empieza a limitar la tasa de expansión foliar. El factor 1,5 de la ecuación de TURFAC permite que el proceso de expansión foliar sea más sensible al déficit hídrico que los procesos de acumulación de biomasa, vinculados a los flujos de CO_2 a través de los estomas.

Opciones de cálculo de la evapotranspiración en CERES-4.5

CERES-4.5 permite el uso de diferentes algoritmos para calcular la evapotranspiración potencial del cultivo (E_0 , mm d^{-1}), que se puede considerar como equivalente a la “evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándares” o (ET_c) tal como lo definen Allen *et al.* (1998): de Priestley-Taylor (modificado por Ritchie, 1972, 1985), llamado PT de aquí en adelante, y de Penman-Monteith-FAO56 (Allen *et al.*, 1998), llamado PF de aquí en adelante. PT es la opción que emplea por defecto el modelo y generalmente la más empleada, debido en gran medida a que requiere menos datos climáticos (datos diarios de radiación solar y temperatura mínima y máxima). PF, requiere además, datos diarios de la temperatura del punto de rocío y de la velocidad del viento. En la actualidad, el cálculo de este último método se realiza empleando un coeficiente de cultivo (K_c) de 1,00, constante a lo largo de todo el ciclo, no permitiendo en consecuencia que E_0 supere la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0). Las ecuaciones utilizadas por estas dos opciones para el cálculo de E_0 han sido descritas por Sau *et al.* (2004). En CROPGRO-4.5, modelo de simulación de leguminosas incluido en DSSAT-4.5, existe otra opción que permite que K_c varíe con el IAF; sería conveniente que esta opción, más próxima a las recomendaciones de la FAO (Allen *et al.*, 1998) se incluyera en las futuras actualizaciones de CERES-Maize.

Reparto de la evapotranspiración potencial (EO) entre evaporación potencial (EOS) y transpiración potencial (EOP)

El modelo divide EO entre evaporación potencial de agua del suelo (EOS) y transpiración potencial del cultivo (EOP), utilizando el método propuesto por Ritchie (1972, 1985). Éste considera que, cuando el suelo está húmedo, la porción de radiación solar (SR) que alcanza el suelo es utilizada en forma de energía latente para evaporar agua desde la superficie. La fracción de SR que llega al suelo es una función del índice de área foliar (IAF, Eq. [9]). Posteriormente, la evaporación del agua del suelo (ES) y el agua perdida por transpiración por el cultivo en un día concreto (EP) dependen de que haya suficiente agua disponible para cubrir la tasa potencial de evapotranspiración.

En DSSAT V4.5, la evaporación potencial de agua del suelo (EOS) se calcula como sigue:

$$EOS = E_0 * \exp(-KEP * IAF) \quad [9]$$

donde KEP es el coeficiente de extinción de la cubierta del cultivo para la radiación solar global cuyo valor está establecido en 0,685 en el DSSAT-4.5.

El modelo de evaporación del suelo de Ritchie (1985) asume que la evaporación del agua del suelo (ES) se produce en dos fases: (1) la fase constante limitada por la energía

(fase 1; $ES=EOS$) y (2) la fase de tasa decreciente calculada como una función de la raíz cuadrada del tiempo (fase 2). Durante la fase 2, ES es más pequeño que EOS .

La parte de EO asignada a la transpiración potencial del cultivo (EOP) se calcula con la Eq. [10], donde se emplea el mismo coeficiente de extinción ($KEP=0,685$) ya utilizado en el cálculo de EOS :

$$EOP = EO * (1,0 - EXP(-KEP * IAF)) \quad [10]$$

Si los componentes potenciales de transpiración y evaporación suman más que la evapotranspiración potencial, se reajusta la transpiración. Si $EOP + EOS > EO$, entonces

$$EOP = EO - EOS \quad [11]$$

Finalmente, el modelo calcula la transpiración del cultivo (EP), el factor de déficit hídrico que afecta a la fotosíntesis ($SWFAC$) y el factor de turgor ($TURFAC$) que afecta a la expansión celular.

SIMULACION DEL NITRÓGENO EN LA PLANTA

Todos los modelos de cultivo en DSSAT usan las mismas rutinas de simulación del agua y el nitrógeno en el suelo. Con ello se hace posible representar rotaciones de cultivo, donde se cambia el cultivo pero se mantiene la continuidad de los procesos de agua y nitrógeno durante todo el período. En el caso de la simulación del nitrógeno, la dinámica del N interactúa con la dinámica de la descomposición de la materia orgánica y los procesos asociados de nitrificación, desnitrificación, inmovilización y lixiviación de N . DSSAT v4.5 ofrece dos opciones para simular esta dinámica: 1) Godwin-Jones (Godwin y Jones, 1991), y 2) Century (Parton *et al.*, 1994; Gijssman *et al.*, 2002).

La simulación diaria de la dinámica de N en la planta sigue la siguiente secuencia: 1) Determinación del estatus nitrogenado de la planta; 2) Absorción de N ; 3) Reparto del N entre los órganos de la planta; 4) Removilización de N hacia el grano. CERES-Maize simula el N en la planta con dos compartimentos, raíces y parte aérea. Durante la fase de llenado efectivo del grano parte del N de la parte aérea es removilizado hacia el grano.

Determinación del estatus nitrogenado de la planta

El modelo cuenta con unas concentraciones de N en parte aérea y raíces (Figura 4) definidas como adecuadas (N_c) para el crecimiento máximo y unas concentraciones mínimas (N_m) donde se asume que se detiene el crecimiento (Jones, 1983). Cada día en función de la edad relativa de la planta, se evalúa la concentración de N en los tejidos (N_a) en relación con N_c y N_m . El índice estimado, NF , permite el cálculo de las necesidades de N en los tejidos de la planta. El modelo estima la demanda diaria de N como la suma de dos componentes: 1) la cantidad necesaria para que los tejidos

existentes alcancen N_c , y 2) la cantidad necesaria para que la concentración de N en el crecimiento diario sea N_c . Basado en el NF, se calcula también los coeficientes de estrés que afectan al crecimiento, la expansión foliar y la concentración de N en el grano.

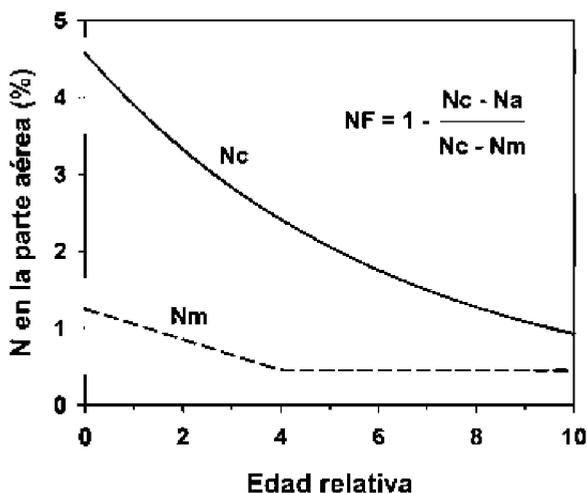


FIGURA 4

Concentraciones crítica (N_c) y mínima (N_m) de N en la parte aérea (Jones, 1983) simuladas por CERES-Maize como objetivo de una nutrición adecuada y mínima respectivamente. NF es un indicador del estatus nitrogenado; N_a es la concentración de N de la parte aérea en el día estudiado. La edad relativa es una escala fenológica relativa semejante a la usada por Jones (1983): 0=emergencia; 4,5=floración; 10=madurez fisiológica.

Critical (N_c) and minimum (N_m) N concentrations of shoots (Jones, 1983) simulated by CERES-Maize as target of an adequate and minimum nutrition, respectively. NF is an indicator of the nitrogen status; N_a is the nitrogen content of the shoots on a given day. Relative age is a relative phenological scale similar to that used by Jones (1983): 0=emergence; 4,5=flowering; 10=physiological maturity.

Absorción de nitrógeno

El modelo estima la capacidad potencial del perfil enraizado para suministrar N a la planta. Los cálculos se hacen por separado tomando en cuenta las concentraciones de NO_3^- y de NH_4^+ en cada capa de suelo. La capacidad de suplir N incluye los efectos de la densidad de raíces, la humedad del suelo y la hospitalidad de la capa. Cuando la hospitalidad no ofrece limitaciones ($\text{SRGF}=1$), se asume una absorción diaria máxima igual al 7,5% del nitrato o del amonio presentes en la capa. La absorción de N finalmente se estima como el valor menor entre la demanda de la planta y la capacidad del suelo para suministrar N.

Reparto de N entre los órganos de la planta

Una vez que el N ha sido adquirido del suelo, el modelo procede a distribuirlo entre sus dos compartimentos, parte aérea y raíces, basado en las demandas relativas de cada uno. Posteriormente, y para efectos de los archivos de salida, el N de la parte aérea se reparte entre hojas y tallos. Este reparto se hace en función de la biomasa presente en cada órgano. Por lo tanto, el modelo supone implícitamente que la concentración de N en hojas y tallos es la misma.

Removilización del N hacia el grano

Durante la fase de llenado efectivo del grano se estiman diariamente las necesidades de N por parte de los granos en crecimiento activo, convertidos en el principal sumidero de asimilados. A diferencia de los cálculos para raíces y parte aérea, no existe un objetivo de concentración de N que cambie con la edad relativa. En el caso del grano, la concentración de N deseada está determinada primero como una función del nivel relativo de N en la parte aérea de la planta (NF, Figura 4), que sitúa esa concentración entre 0,4 y 1,6%, pero luego puede ser aumentada por condiciones desfavorables de estrés hídrico o de temperatura elevada (superior a 25 °C).

A continuación se estima el N disponible para cubrir la demanda del grano. Se calculan las ofertas disponibles en la parte aérea y en las raíces como el N por encima de la concentración mínima (Nm, Figura 4). Después se estima cuánto de ese N disponible puede ser removilizado en un día (15-40%) dependiendo de la condición nitrogenada de la planta.

Finalmente, el N efectivamente removilizado dependerá del balance entre el N demandado por el grano y el N ofrecido por la parte aérea y raíces.

ALGUNAS LIMITACIONES DE CERES-MAIZE Y POSIBLES MEJORAS DEL MODELO

Simulación del índice de área foliar (IAF)

Las cubiertas del cultivo de maíz pueden alcanzar IAFs muy distintos (Elings, 2000; Birch *et al.*, 2003). Incluso híbridos sembrados con la misma densidad y que tienen el mismo número final de hojas pueden mostrar patrones de crecimiento de la cubierta de hojas muy distintos. CERES-Maize no permite que el área foliar varíe para un determinado número final de hojas y, probablemente, por esto, son numerosos los trabajos donde la simulación del IAF es imprecisa y las simulaciones en general tienden a infraestimar el IAF (Carberry *et al.*, 1989; Keating y Wafula, 1992; Lizaso y Ritchie,

1997, Ben Nouna *et al.*, 2000; López-Cedrón *et al.*, 2005). Este hecho puede conducir a que la radiación PAR interceptada por el cultivo, que simula el modelo, sea inferior a la realmente interceptada y que debido a esto, se obtenga un valor de biomasa total producida incorrecto. Este problema de CERES-Maize está subsanado en un nuevo modelo de maíz, IXIM, recientemente incorporado al DSSAT (Lizaso *et al.*, 2011). Se trata de un modelo que caracteriza mejor las diferencias entre cultivares, pero adolece del inconveniente de requerir dos coeficientes genéticos adicionales: AX (superficie de la hoja más grande ($\text{cm}^2 \text{ hoja}^{-1}$) y LX (longevidad de la hoja de vida activa más larga (grados día)). En este modelo, el desarrollo y la expansión foliar siguen esencialmente las ecuaciones descritas por Lizaso *et al.* (2003).

Simulación de la fotosíntesis neta de la cubierta vegetal

Como se describió más arriba, CERES-Maize simula la acumulación de biomasa en el cultivo mediante unas ecuaciones muy simples ([4], [5] y [6]) que se apoyan en el concepto de la eficiencia en el uso de la radiación (EUR). Algunos autores han sugerido que una aproximación más mecanicista que permita cuantificar la fotosíntesis bruta y la respiración por separado podría mejorar las simulaciones (Yang *et al.*, 2004), ya que la fotosíntesis y la respiración responden de modo diferente a las condiciones ambientales. Por ejemplo, la asimilación de CO_2 aumenta con la temperatura hasta aproximadamente $35\text{ }^\circ\text{C}$ para decrecer a continuación (Oberhuber y Edwards, 1993; Naidu *et al.*, 2003), mientras la respiración sigue aumentando (Naidu *et al.*, 2003). El modelo IXIM (Lizaso *et al.*, 2011), al separar la simulaciones de la fotosíntesis y de la respiración, tiene en cuenta su diferente comportamiento frente a la temperatura.

Extracciones de nitrógeno por el cultivo

Aunque CERES-Maize permita simular correctamente el nitrógeno total acumulado por el cultivo a final de ciclo, se ha observado que suele sobreestimar la cantidad de N absorbido inmediatamente después de una aplicación de fertilizante. En IXIM, se han modificado las ecuaciones de extracción de N del suelo para tratar de corregir este problema (Lizaso *et al.*, 2011).

Impacto de las altas temperaturas sobre la polinización y el cuajado de los granos

Numerosas evidencias sugieren que temperaturas superiores a $35\text{ }^\circ\text{C}$ tienen un impacto negativo sobre el desarrollo floral, la dinámica reproductiva y el rendimiento en grano final del maíz, y que estas respuestas están determinadas genéticamente (Paulsen, 1994). Los modelos de maíz comúnmente utilizados para realizar estudios de cambio climático no tienen en cuenta estos efectos.

Estas limitaciones son especialmente relevantes cuando se tiene en cuenta las proyecciones de clima futuro, que indican un calentamiento global y un aumento de la frecuencia de episodios extremos, como las olas de calor, por lo que es muy deseable incluir nuevos algoritmos en los modelos de maíz existentes que traten de simular el efecto de las altas temperatura sobre los aspectos de la biología reproductiva del cultivo, que tienen consecuencias importantes sobre el rendimiento final.

UTILIZACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN DEL MAÍZ EN ESPAÑA

En España se han realizado numerosos trabajos en los que se han empleado modelos de simulación del crecimiento del maíz. No cabe duda de que muchos de estos trabajos no han sido publicados, por lo que una revisión bibliográfica nos da una visión incompleta del conjunto de los trabajos científicos o técnicos que se han apoyado en este tipo de herramientas. Entre otros, se pueden mencionar los trabajos que se comentan a continuación.

Farré *et al.* (2000), tras parametrizar y adaptar el modelo LINTUL, consiguieron simular correctamente cultivos de maíz llevados a cabo en el valle del Ebro, con diferentes niveles de riego: riego que permite cubrir la totalidad de la demanda evapotranspirativa y diferentes niveles de riego deficitario. Concluyen que este modelo puede ser usado como herramienta para estudiar las consecuencias de aplicar diferentes estrategias de riego. Por otro lado, identifican algunos procesos en los que las predicciones del modelo LINTUL son poco acertadas y, por tanto, son susceptibles de mejora.

López-Cedrón *et al.* (2005) probaron diferentes variantes del modelo CERES-Maize en Galicia y observaron que CERES-Maize v4.0 consigue mejores predicciones de la cosecha que CERES-Maize v3.5, gracias a unas funciones PRFT y RGFILL menos sensibles a la temperatura. Así mismo, López-Cedrón *et al.* (2008) muestran que, en estas mismas condiciones ambientales, la opción de cálculo de la evapotranspiración PF (Penman-Monteith-FAO56) da mejores resultados que la opción PT (Priestley-Taylor).

Por su parte, Utset *et al.* (2006) utilizaron el modelo SWAP para estudiar de modo teórico el uso del agua por cultivos de maíz regados por gravedad en el valle del Ebro mediante dos estrategias: riego que trata de cubrir toda la demanda evapotranspirativa y riego deficitario (ambos con capa freática superficial y sin ella).

Una de las herramientas más empleadas para estudiar el posible impacto del cambio climático sobre las producciones agrícolas, así como para diseñar estrategias de mitigación, es utilizar las salidas de las proyecciones de clima de los modelos de Circulación General de la Atmósfera (CGMs), como variables de entrada en los modelos de simulación de cultivos. En estos trabajos se suman dos tipos de incertidumbres:

1) las derivadas de los CGMs, 2) las asociadas a los modelos de simulación de los cultivos. Se han realizado varios trabajos en los que se cuantifica el impacto del cambio climático sobre el cultivo del maíz en España (Iglesias y Mínguez, 1995; Mínguez *et al.*, 2007). Estos muestran como, si se mantienen los cultivares actuales, el aumento de las temperaturas provoca una caída de los rendimientos, incluso bajo condiciones no limitantes de agua, debido al acortamiento del ciclo de cultivo. Por tanto, sería conveniente adelantar progresivamente la fecha de siembra y recurrir a ciclos más largos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper n° 56*, FAO, Roma.
- ARKIN, G. F.; VANDERLEEP, R. L.; RITCHIE, J. T., 1976. A dynamic grain sorghum growth model. *Trans. ASAE*, **19**, 622-630.
- BEN NOUNA, B.; KATERJI, N.; MASTRORILLI, M., 2000. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment: evaluation of model performance. *Eur. J. Agron.*, **13**, 309-322.
- BEN NOUNA, B.; KATERJI, N.; MASTRORILLI, M., 2003. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment. New modeling of leaf area and water stress functions. *Eur. J. Agron.*, **19**, 115-123.
- BIRCH, C. J.; VOS, J.; VAN DER PUTTEN, P. E. L., 2003. Plant development and leaf area production in contrasting cultivars in a cool temperate environment in the field. *Eur. J. Agron.*, **19**, 173-188.
- CAMPBELL, G. S.; STOCKLE, C. O., 1994. *Principles and applications of cropping systems simulation modeling*. Manual del Curso de Postgrado. Universidad de Lleida. Lleida (España).
- CARBERRY, P. S.; MUCHOW, R. C.; MC COWN, R. L., 1989. Testing the CERES-maize model in a semi-arid tropical environment. *Field Crop Res.*, **20**, 297-315.
- CASTRIGNANO, A.; KATERJI, N.; KARAM, F.; MASTRORILLI, M.; HAMDY, A., 1998. A modified version of CERES-Maize model for predicting crop response to salinity stress. *Ecol. Model.*, **111**, 107-120.
- COELHO, D. T.; DALE, R. F., 1980. An energy-crop growth variable and temperature function for predicting corn growth and development: planting to silking. *Agron. J.*, **72**, 503-510.
- COLIGADO, M. C.; BROWN, D. M., 1975. A bio-photo-thermal model to predict tassel initiation time in corn (*Zea mays* L.). *Agríc. Meteorol.*, **15**, 11-31.
- DUNCAN, W. G., 1975. SIMAIZ: A model simulating growth and yield in corn. En: *The application of systems methods to crop production*, 32-48. Proc. Symp. Mississippi Agríc. For. Exp. Stn. Mississippi (EEUU).
- ELINGS, A., 2000. Estimation of leaf area in tropical maize. *Agron. J.*, **92**, 436-444.
- FARRÉ, I.; OIJEN, M. VAN; LEFFELAAR, P. A.; FACI, J. M., 2000. Analysis of maize growth for different irrigation strategies in northeastern Spain. *Eur. J. Agron.*, **12**, 225-238.
- GIJSMAN, A. J.; HOOGENBOOM, G.; PARTON, W. J.; KERRIDGE, P. C., 2002. Modifying DSSAT crop models for low-input agricultural systems using a soil organic matter-residue module from CENTURY. *Agron. J.*, **94**, 462-474.

- GODWIN, D. C.; JONES, C. A., 1991. Nitrogen dynamics in the soil-plant systems. En: *Modeling Soil and Plant Systems*, 289-321. Ed. J. HANKS, J.T. RITCHIE. ASA Monograph 31. American Society of Agronomy, Madison, WI (EEUU).
- IBSNAT, INTERNATIONAL BENCHMARK SITES NETWORK FOR AGROTECHNOLOGY TRANSFER, 1993. *The IBSNAT decade*. Department of Agronomy and Soil Science, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii. Honolulu, HI 96822 Hawaii (EEUU).
- IGLESIAS, A.; MÍNGUEZ, M. I., 1995. Perspectives for maize production in Spain under climate change. En: *Climate change and agriculture: analysis of potential international impacts*, vol. 13, 259-273. Ed. C. ROSENZWEIG *et al.* American Society of Agronomy, Madison, WI (EEUU).
- JOHNSON, D. R. ; TANNER, J. W., 1972. Calculation of the rate and duration of grain filling in corn (*Zea mays* L.). *Crop Sci.*, **12**, 485-486.
- JONES, C. A., 1983. A survey of the variability in tissue nitrogen and phosphorus concentrations in maize and grain sorghum. *Field Crops Res.*, **6**, 133-147.
- JONES, C. A.; KINIRY, J. R. (Ed.), 1986. *CERES-Maize: a Simulation Model of Maize Growth and Development*. Texas A&M Univ. Press, College Station, Texas (EEUU).
- JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. T., 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.*, **18**, 235-265.
- KEATING, B. A.; WAFULA, B.M., 1992. Modelling the fully expanded area of maize leaves. *Field Crops Res.*, **29**, 163-176.
- KINIRY, J. R., 1991. Maize phasic development. En: *Modelling plant and soil systems*, 55-70. Ed. J. HANKS, J. T. RITCHIE. ASA/CSSA/SSSA agronomy monograph N° 31. Madison, Wisconsin (EEUU).
- KINIRY, J. R.; BOCKHOLT, A. J., 1998. Maize and sorghum simulations in diverse Texas environments. *Agron. J.*, **90**, 682-687.
- KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R.; VANDERLIP, R. L.; ATWOOD, J. D.; REICOSKY, D. C.; MULLIKEN, J.; COX, W. J.; MASCAGNI, H. J.; JR., HOLLINGER, S. E.; WIEBOLD, W. J., 1997. Evaluation of two maize models for nine U.S. locations. *Agron. J.*, **89**, 421-426.
- LAHROUNI, A. ; LEDENT, J. F. ; CAZANGA, R. S. ; MOURAUX, D., 1993. Testing the CERES-Maize model in Belgian conditions. *Eur. J. Agron.*, **2**, 193-203.
- LIZASO, J. I.; BATCHELOR, W. D.; WESTGATE, M. E., 2003. A leaf area model to simulate cultivar-specific expansion and senescence of maize leaves. *Field Crops Res.*, **80**, 1-17.
- LIZASO, J. I.; BOOTE, K. J.; CHERR, C. M.; SCHOLBERG, J.M.S.; CASANOVA, J. J.; JUDGE, J.; JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G., 2007. Developing a sweet corn simulation model to predict fresh market yield and quality of ears. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **132**, 415-422.
- LIZASO, J. I.; BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; PORTER, C. H.; ECHARTE, L.; WESTGATE, M. E.; SONOHAT, G., 2011. CSM-IXIM: A new simulation model for DSSAT version 4.5. *Agron. J.*, **103**, 1-14.
- LIZASO, J. I.; RITCHIE, J. T., 1997. A modified version of CERES to predict the impact of soil water excess on maize crop growth and development. En: *Applications of systems approaches at the field level* (Vol. 2.), 153-167. Ed. M.J. KROPFF *et al.* Kluwer Acad. Publ., Londres (Reino Unido).
- LOPEZ CEDRÓN, F. X.; BOOTE, K. J.; RUÍZ-NOGUEIRA, B.; SAU, F., 2005. Testing CERES-Maize versions to estimate maize production in a cool environment. *Eur. J. Agron.*, **23**, 89-102.
- LOPEZ CEDRÓN, F. X.; BOOTE, K. J.; PIÑEIRO, J.; SAU, F., 2008. Improving the CERES-Maize model ability to simulate water deficit impact on maize production and yield components. *Agron. J.*, **100**, 296-307.

- MÍNGUEZ, M. I.; RUIZ-RAMOS, M.; DÍAZ-AMBRONA, C. H.; QUEMADA, M.; SAU, F., 2007. First-order impacts on winter and summer crops assessed with various high-resolution climate models in the Iberian Peninsula. *Climatic Change.*, **81**, 343-355.
- NAIDU, S. L., MOOSE, S. P.; AL-SHOAIBI, A. K.; RAINES, C. A.; LONG, S. P., 2003. Cold tolerance of *C₄* photosynthetic in *Miscanthus x giganteus*: adaptation in amounts and sequence of *C₄* photosynthetic enzymes. *Plant Physiol.*, **132**, 1688-1697.
- OBERHUBER, W.; EDWARDS, G. E., 1993. Temperature dependence of the linkage of quantum yield of photosystem II to CO₂ fixation in *C₄* and *C₃* plants. *Plant Physiol.*, **101**, 507-512.
- OTEGUI, M. E.; BONHOMME, R., 1998. Grain yield components in maize. I- Ear growth and kernel set. *Field Crops Res.*, **56**, 247-256.
- PARTON, W.J.; OJIMA, D. S.; COLE, C. V.; SCHIMEL, D. S., 1994. A general model for soil organic matter dynamics: Sensitivity to litter chemistry, texture and management. En: *Quantitative modeling of soil forming processes*, 147-167. Ed. R.B. BRYANT, R.W. ARNOLD. SSSA Spec. Publ. 39. SSSA, Madison, WI (EEUU).
- SAU, F.; BOOTE, K. J.; BOSTICK, W. McN.; JONES, J. J.; MÍNGUEZ, M. I., 2004. Testing and improving soil water balance of DSSAT3.5 models. *Agron. J.*, **96**, 1243-1257.
- PAULSEN, G. M., 1994. High temperature responses of crop plants. En: *Physiology and determination of crop yield*, 365-389. Ed. K.J. BOOTE *et al.* ASA, CSSA, and SSSA. Madison, WI (EEUU).
- RITCHIE, J. T., 1972. Model for predicting evapotranspiration from a row crop with incomplete cover. *Water Resou. Res.*, **8**, 1204-1213.
- RITCHIE, J. T., 1985. A user-oriented model of the soil water balance in wheat. En: *Wheat growth and modeling*, 293-305. Ed. E. FRY, T. K. ATKIN. NATO-ASI Series. Plenum Press (EEUU).
- RITCHIE, J. T.; ALARGARSWAMY, G., 2003. Model concepts to express genetic differences in maize yield components. *Agron. J.*, **95**, 4-9.
- RITCHIE, J. T., SINGH, U., GODWIN, D. C. y BOWEN, W. T., 1998. Cereal growth, development and yield. En: *Understanding options for agricultural production*, 79-98. Ed. G. Y. TSUJI *et al.* Kluwer Academic Publishers in cooperation with ICASA. Dordrecht/Boston/Londres (Los Países Bajos).
- SPLINTER, W. E., 1974. Modeling of plant growth for yield prediction. *Agric. Meteorol.*, **14**, 243-253.
- STAPPER, M.; ARKIN, G. F., 1980. *CORNF: A dynamic growth and development model for maize (Zea mays L.)*. Texas Agric. Exp. Sto. Res. Ctr. Program and Model Documentation. 80-2. Texas.
- TOIT, A. S. DU ; PRINSLOO, M. A. ; WAFULA, B. M. ; THORNTON, P. K., 2002. Incorporating a water-logging routine into CERES-Maize, and some preliminary evaluations. *Water Sa.*, **28**, 323-328.
- UTSET, A.; MARTÍNEZ-COB, A.; FARRÉ, I.; CAVERO, J., 2006. Simulating the effects of extreme dry and wet years on the water use of flooding-irrigated maize in a Mediterranean plane. *Agric. Water Manage.*, **85**, 77-84.
- WIT, C. T. DE.; BROUWER, R.; VRIES, F. W. T. P., 1970. The simulation of photosynthetic systems. En: *Prediction and measurements of photosynthetic productivity*, 47-70. Ed. I. SETLIK, Pudoc, Wageningen (Los Países Bajos).
- YANG, H. S.; DOBERMANN, J. L.; LINDQUIST, J. L.; WALTERS, D. T.; ARKEBAUER, T. J.; CASSMAN, K. G., 2004. Hybrid maize: a maize simulation model that combines two crop modeling approaches. *Field Crops Res.*, **87**, 131-154.

SIMULATION MODELS OF THE MAIZE CROP: BASIS AND APPLICATIONS IN SPAIN

SUMMARY

A crop simulation model is a collection of algorithms describing mathematically the response of a cropping system to the environment. The original idea of crop growth models was the attempt to integrate the understanding of the soil, climate, genetics, and management into a decision-making tool. There are many mathematical maize models, but CERES-Maize is the most used. First published in 1986, it has been improved in successive versions making it more reliable in a wider range of management and environments.

During the crop cycle, CERES-Maize daily computes phenology, growth, and biomass distribution between the different growing organs. When water and nitrogen do not limit growth (potential growth), the simulated processes are mostly determined by weather variables (solar radiation, maximum and minimum temperatures, and atmospheric CO₂ concentration), specific cultivar factors, and crop management practices. When water and nitrogen limit crop potential growth, CERES-Maize computes daily water and N balances to estimate the impact of deficits on crop growth and yield. A number of issues concerning CERES-Maize simulations are discussed pointing at possible ways to improve maize models. In addition, some studies are commented where maize models have been used in Spain.

Keywords: CERES-Maize, mathematic model, growth, development, yield, genetic coefficients, *Zea mays*.