

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

Trabajo Final presentado para optar al Grado de Ingeniero Agrónomo

Modalidad: Proyecto.

CALIBRACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN SWB (*Soil Water
Balance*) PARA CUATROS HÍBRIDOS DE MAIZ DE RECIENTE
SALIDA AL MERCADO.

Alan J. Savini

33.538.401

Director: Ing. Agr. Morla Federico.

Co-Director: Ing. Agr. MSc. Espósito Gabriel.

Río Cuarto - Córdoba

Noviembre de 2013

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Título del Trabajo **Final: Calibración del modelo de simulación SWB (*Soil Water Balance*) para cuatro híbridos de maíz de reciente salida al mercado.**

Autor: Savini, Alan José

DNI: 33.538.401

Director: Ing. Agr. Morla Federico.

Co-Director: Ing. Agr. MSc. Esposito, Gabriel Pablo

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias de la Comisión Evaluadora:

Ing. Agr. MSc. Plevich, José O. _____

Ing. Agr. Balboa, Guillermo R. _____

Ing. Agr. Morla, Federico D. _____

Fecha de Presentación: ____/____/____.

Secretario Académico

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional de Río Cuarto y en particular a la Facultad de Agronomía y Veterinaria por su contribución a mi formación profesional y humana, brindada durante la carrera.

A mi director de tesis, Morla, Federico y Co-Director Esposito, Gabriel, por su apoyo, tiempo y dedicación.

A mi familia en general por el apoyo recibido en estos años de carrera, en especial a mis padres por el esfuerzo y sacrificio, que hicieron para darme esta oportunidad; y a mis hermanos por el respaldo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|------|
| INDICE DE CUADROS | VI |
| INDICE DE FIGURAS | VII |
| RESUMEN..... | VIII |
| SUMMARY | IX |
| | |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| I.1. HIPÓTESIS: | 4 |
| I.2. OBJETIVOS: | 4 |
| I.2.1. OBJETIVO GENERAL:..... | 4 |
| I.2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS: | 4 |
| | |
| II. MATERIALES Y MÉTODOS | 5 |
| II.1. Descripción general del ensayo experimental | 5 |
| II.2. Descripción de las evaluaciones realizadas | 6 |
| II.2.1. Determinación de los estadios fenológicos..... | 6 |
| II.2.2. Contenido de agua del suelo..... | 6 |
| II.2.3. Intercepción de la radiación | 7 |
| II.2.4. Eficiencia de uso de la radiación..... | 8 |
| II.2.5. Eficiencia de uso del agua | 8 |
| II.2.6. Área foliar específica | 10 |
| II.2.7. Materia seca aérea | 11 |
| II.2.8. Rendimiento de grano y componentes del mismo | 11 |
| II.3. ANÁLISIS DE DATOS | 12 |
| | |
| III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 14 |
| III.1. Descripción climática del sitio de estudio..... | 14 |
| III.2. Análisis de sensibilidad | 15 |
| III.3. Determinación de los estadios fenológicos | 18 |
| III.4. Contenido de agua del suelo..... | 19 |
| III.5. Intercepción de la radiación..... | 20 |
| III.6. Eficiencia de uso de la radiación..... | 21 |
| III.7. Eficiencia de uso del agua | 22 |
| III.8. Índice de área foliar y área foliar específica..... | 23 |
| III.9. Materia seca aérea | 24 |
| III.10. Rendimiento y componentes | 25 |

| | |
|---|----|
| III.11. Calibración del modelo soil wáter balance (SWB) | 26 |
| IV. CONCLUSIONES | 31 |
| V. BIBLIOGRAFÍA..... | 32 |

INDICE DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Características del perfil del suelo del estudio.. | 7 |
| Cuadro 2. Análisis de sensibilidad al modelo, variando en un rango de $\pm 30\%$, las variables cargadas por defecto en el modelo. | 16 |
| Cuadro 3. Fecha de ocurrencia y duración de los estadios fenológicos de los híbridos de maíz. | 18 |
| Cuadro 4. Fracción de intercepción de radiación de cada híbrido para los estadios fenológicos V_T , R_3 y R_6 | 20 |
| Cuadro 5. Eficiencia de uso de la radiación (EUR) determinada en ($g MJ m^{-2}$), correspondiente a cada híbrido. | 21 |
| Cuadro 6. Producción de biomasa aérea, en función del agua consumida (EUA) determinada en ($g m^{-2} mm_{trans}^{-1} kPa^{-1}$), correspondiente a cada híbrido. | 23 |
| Cuadro 7. Índice de área foliar (IAF) para los estadios V_{13} , R_3 y R_6 y área foliar específica (AFE, m^2/Kg), para cada uno de los híbridos. | 24 |
| Cuadro 8. Valores observados de biomasa acumulada ($kg MS ha^{-1}$) por estadio fenológico para los híbridos de maíz. | 25 |
| Cuadro 9. Rendimiento, componentes directos e índices de cosecha (IC) de cada híbrido. | 26 |
| Cuadro 10. Índices de ajuste para Índice de área foliar máximo e Intercepción de la radiación máxima, obtenidos durante la validación del modelo de simulación SWB. | 27 |
| Cuadro 11. Índices de ajuste para Biomasa total ($Tn MS ha^{-1}$), Índice de cosecha (IC) y Rendimiento en ($Tn ha^{-1}$), obtenidos durante la validación del modelo de simulación SWB. | 29 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Esquema representativo del ensayo experimental | 5 |
| Figura 2. Precipitaciones decádicas y medias normales en Río Cuarto durante la campaña 2010/2011 y promedio (1977/2006)..... | 15 |
| Figura 3. Evolución de la lámina total de agua del suelo en 100 cm desde siembra hasta madurez fisiológica del cultivo de maíz. | 19 |
| Figura 4. Eficiencia de uso de la radiación (EUR) correspondiente a los cuatro híbridos durante el ciclo productivo..... | 22 |
| Figura 5. Valores simulados y observados de producción de materia seca total (Tn MS ha ⁻¹) correspondiente a cada híbrido a lo largo del ciclo productivo..... | 30 |

RESUMEN

Un modelo de simulación es una representación simple y manejable de los procesos y funciones de fenómenos físicos y biológicos, con el fin de facilitar la comprensión e incrementar la predicción. El objetivo del presente trabajo fue evaluar diferencias genéticas en híbridos de maíz asociadas a los parámetros más sensibles requeridos durante la calibración del modelo SWB (*Soil Water Balance*) en condiciones de crecimiento de Río Cuarto. Para ello se estableció un ensayo experimental de maíz con cuatro híbridos de reciente salida al mercado: AX 886, DK 692, NK 910 y P2053Y, ubicado en el campo de docencia y experimentación FAV - UNRC, durante la campaña 2010–11. El diseño experimental fue en bloques completamente aleatorizados con 3 repeticiones, a una densidad de 90000 plantas ha⁻¹. En los estadios fenológicos V₁₃, V_T, R₃ y R₆ se tomaron muestras de materia seca; el contenido de agua del suelo fue medido cada 15 días a lo largo del ciclo del cultivo y la intercepción de la radiación se midió en los estadios V_T, R₃ y R₆. Los resultados obtenidos fueron analizados mediante ANAVA, los valores simulados y observados a través de estadísticas basadas en diferencia y análisis de regresión. Mediante el análisis de sensibilidad se determinó que los parámetros de entrada, de mayor sensibilidad para el cultivo son: el Coeficiente de extinción de la radiación, la EUA, la EUR, la temperatura para el crecimiento óptimo limitado por radiación, la Partición a hoja/tallo, el Área foliar específica y la Duración de hojas. Los resultados mostraron que los parámetros de cultivo, EUR, EUA, AFE y K, requeridos por el modelo SWB no difieren entre los distintos híbridos de maíz, el modelo sobrestimó los valores de rendimiento del cultivo y subestimó los valores de salida de Biomasa total, IC, IAF e IR.

Palabras claves: Modelo de simulación, maíz, híbridos y parámetros.

SUMMARY

A simulation model is a simple and manageable representation of the processes and functions of physical and biological phenomena to facilitate understanding and increase prediction. The aim of this study was to evaluate genetic differences in maize hybrids associated with the most sensitive parameters required for the calibration of the SWB (Soil Water Balance) model under the climate conditions of Rio Cuarto. This trial was established with four experimental maize hybrids that have been release recently: AX 886, DK 692, NK 910 and P2053Y located in the FAV-UNRC during the season 2010-2011. The experimental design was done in completely randomized blocks with 3 replications, at a density of 90000 plants ha⁻¹. In phenological stages V₁₃, V_T, R₃ and R₆ dry matter samples were taken, the soil water content was measured every 15 days throughout the crop cycle and, radiation interception was measured in stadiums V_T, R₃ and R₆. The results were analyzed using ANOVA and the valves were simulated and measured through statistics based on difference and regression analysis. Through sensitivity analysis it was determined that the most sensitive cultivation parameters to the model are: the Extinction coefficient of radiation, the EUA, the EUR, the Temperature for optimum growth limited by radiation, Partition to leaf / stem, Specific leaf area and Leaf duration. The results showed that crop parameters, EUR, EUA, AFE and K required by the SWB model do not differ among maize hybrids. The model overestimated the crop yield values and underestimated the output values of total biomass, IC, IAF and IR.

Keywords: Simulation Model, maize, hybrids, parameters.

I. INTRODUCCIÓN

La predicción del rendimiento de los cultivos ha sido un objetivo prioritario, tanto con el fin de aumentar el conocimiento de las relaciones clima-suelo-cultivo, como para generar información que se pueda aprovechar oportunamente en la planificación y manejo de la producción agropecuaria a nivel predial (Tittonell, 2005).

Mediante el uso de modelos, es posible extrapolar el conocimiento en el tiempo y en el espacio, haciendo un uso eficiente de los recursos de investigación y complementando a la experimentación clásica.

Los modelos permiten cuantificar el grado de riesgo de la, o las estrategias, de producción elegidas, en un momento anterior a la implantación del cultivo, a través del análisis que combina la variabilidad genética y ambiental en una serie histórica de datos climáticos diarios.

Las técnicas de estimación del rendimiento se incrementaron con el desarrollo de la tecnología, dando lugar a una gama de posibilidades que comprenden, además de los procedimientos con modelos matemáticos de simulación de cultivos, a aquellas que emplean información exclusivamente satelital, como así también los que integran ambas fuentes de datos (Weiss *et al.*, 2001; Doraiswamy *et al.*, 2003).

Un modelo de simulación es un programa que permite describir mediante algoritmos matemáticos diferentes procesos, mecanismos e interacciones que ocurren dentro de un sistema biológico, y que permite representar conceptualmente una simplificación del sistema de producción, como ejemplo un cultivo interactuando con las variables de clima, de suelo y las prácticas de manejo (Guevara, 2013).

La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias, dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos, para el funcionamiento del sistema (Shannon y Johannes, 1976).

Los modelos de simulación de cultivo pueden ser usados para la resolución de problemas, una vez que ellos fueron cuidadosamente parametrizados y testeados en el ambiente designado (Aggarwal, 1995; Pankuk *et al.*, 1998). La parametrización es el proceso de obtención del juego de parámetros que describen como un cultivo utiliza los factores ambientales tales como la radiación, temperatura, agua y nutrientes (Irmak *et al.*, 2000; Mavromatis *et al.*, 2001; Welch *et al.*, 2003).

En este contexto, los modelos permiten complementar la información experimental. No obstante, antes de aplicar un modelo es necesaria una evaluación de su capacidad de simulación en las condiciones de suelo, clima, cultivo y manejo existentes en la zona (Ferrer *et al.* 2000).

Actualmente, existen varias familias de modelos, las cuales se diferencian por su “motor de crecimiento” (Azam Ali *et al.*, 1994). Por un lado, existe la familia de modelos basados en relaciones mecánicas establecidas entre procesos que comprenden a la radiación y el crecimiento del cultivo –modelos direccionados por radiación solar – pe. Ceres (Jones *et al.*, 1998) y EPIC (Williams *et al.*, 1984). Por otro lado, se agrupan los modelos direccionados por la relación transpiración y crecimiento del cultivo –direccionados por agua – pe. AquaCrop (Steduto *et al.*, 2009). Algunos modelos incluyen ambos motores de crecimiento en paralelo – motor de crecimiento dual – pe. Cropsyst (Stockle *et al.*, 1994; Stockle *et al.*, 2003), Parch (Azam Ali *et al.*, 2001) y SWB (Marcos, 1997; Marcos y Campbell, 2002).

SWB (*Soil Water Balance*) es un modelo de simulación diseñado para el análisis de la productividad de diferentes cultivos y en diversos agroecosistemas, siendo posible su aplicación para un amplio rango de condiciones ecológicas.

Este modelo fue implementado y luego usado para evaluar la producción de maíz como cultivo de secano alternativo, en el este del estado de Washington, USA (Marcos, 1997). Opera en forma diaria y requiere datos y parámetros de entrada de clima, suelo, cultivos e información inicial del estado hídrico del suelo.

El SWB fue utilizado en Argentina por Espósito (2002) para evaluar el balance hídrico en maíz, por Pergolini (2003) para estudiar el balance hídrico en trigo, y Videla Mensague (2006) para cuantificar el efecto de la capa freática en soja. También fue utilizado para estudiar la producción de maíz en el noroeste de Estados Unidos (Marcos, 1997) y cuantificar el balance hídrico en maíces bajo riego en las tierras áridas de Castilla de la Mancha, España (Espósito *et al.*, 2011).

Pérez (2009) utilizó el modelo de simulación SWB para la determinación de transpiración y evaporación de maíz, ya que estos datos no pueden ser medidos en forma precisa. Para que el modelo Soil Water Balance sea coherente con los valores reales obtenidos, en este ensayo se llevó a cabo la calibración del mismo, realizando un ajuste de los parámetros del modelo en dos situaciones: “Sin fertilización nitrogenada” y “Con fertilización nitrogenada”. Todos los parámetros fenológicos y de crecimiento fueron ajustados hasta que los valores simulados y observados mostraran máxima concordancia, la cual fue evaluada con los coeficientes de regresión lineal para la simulación de la lámina total de agua y para la biomasa del cultivo. El modelo calibrado y validado fue utilizado para la determinación del balance hídrico de cada unidad experimental, mediante la variación de los valores de densidad aparente del suelo (DAP) y cobertura de rastrojo, obtenidos en cada parcela.

Una vez calibrado SWB puede ser usado para la evaluación de la dinámica de agua en el suelo y la producción de cultivos. A su vez, para simulaciones a largo plazo, puede ser

combinado con un generador climático llamado Climgen (Campbell, 1996), el cual está incluido en el modelo.

Para la evaluación de la capacidad predictiva de los modelos es imperante efectuar la validación del mismo contrastando algunas de las variables estimadas con las observadas (Videla Mensegue, 2006).

Para el proceso antes mencionado es necesaria la obtención de distintos parámetros del cultivo, altamente relacionados a los genotipos y a la relación entre estos genotipos y el ambiente donde se desarrollan. Los experimentos para la medición y cálculo de estos parámetros se realiza contemplando la variabilidad ambiental, sin limitación hídrica ni nutricional, utilizando distintas fechas de siembra para cada condición ambiental específica, de manera de conocer el comportamiento de los cultivares en un rango amplio de escenarios.

Los objetivos de este trabajo son obtener los parámetros del cultivo de maíz que representan la mayor sensibilidad en el SWB; determinar si estos difieren entre los distintos híbridos presentes en el mercado y calibrar el modelo acorde a las condiciones de crecimiento de Río Cuarto, logrando obtener una herramienta practica que sirva como complemento y ayuda en la toma de decisiones, facilitando la comprensión e incrementando la predicción.

I.1. HIPÓTESIS.

Los parámetros de cultivo con mayor sensibilidad requeridos por el modelo SWB, difieren entre los distintos híbridos de maíz de reciente salida al mercado.

I.2. OBJETIVOS.

I.2.1. OBJETIVO GENERAL.

Calibración del SWB evaluando diferencias en los coeficientes genéticos asociados a los parámetros más sensibles del maíz en las condiciones de crecimiento de Río Cuarto.

I.2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.

Determinar mediante un análisis de sensibilidad los parámetros diferenciales de mayor importancia para el cultivo de maíz.

Calibrar el modelo de simulación SWB (*Soil Water Balance*) para la zona agrícola de Río Cuarto, utilizando cuatro híbridos de maíz de reciente salida al mercado.

Comparar los parámetros de cada híbrido utilizados en la calibración del SWB.

II. MATERIALES Y MÉTODOS.

II.1. Descripción general del ensayo experimental:

El presente trabajo se llevó a cabo en la localidad de Río Cuarto y los datos de los parámetros de entrada del modelo fueron tomados de un ensayo experimental ubicado en el campo de docencia y experimentación (CAMDOCEX) de la facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Nacional de Río Cuarto (33° 07' Latitud Sur, 64° 14' Longitud Oeste, 421 msnm), durante la campaña 2010 – 2011. El trabajo consistió en la evaluación de cuatro híbridos de reciente salida al mercado, los mismos son: AX 886, DK 692, NK 910 y P2053Y.

Los híbridos se sembraron el 1/11/2010, en parcelas de 80 m de largo y cinco surcos de ancho, a 52 cm de distancia entre hileras y una densidad de 90000 plantas ha⁻¹, el cultivo antecesor fue trigo, con la función de dar cobertura al suelo.

El diseño experimental fue en bloques completos al azar con cuatro tratamientos (híbridos de maíz) y tres repeticiones (Figura 1).

Se realizó una fertilización de base de 150 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico (18-46-0) en el momento de la siembra, y se refertilizó en sexta hoja desplegada del cultivo con nitrógeno, empleando UAN a razón de 200 kg ha⁻¹ (28-0-0). Durante el ciclo del cultivo se realizaron aplicaciones de herbicidas e insecticidas, necesarios para mantener el ensayo libre de malezas y plagas respectivamente.

La cosecha se realizó manualmente el 19/04/2011, donde se tomaron, en cada parcela, las plantas presentes en tres metros lineales, donde las plantas se encontraban en competencia perfecta.



Figura 1: Esquema representativo del ensayo experimental.

Para la determinación de los parámetros del cultivo, que se utilizan como valores de entrada al modelo, se procedió a realizar un análisis de sensibilidad al mismo. Variando los valores de los parámetros de entrada en un rango de $\pm 30\%$, y mediante el coeficiente de variación de la salida del modelo se seleccionaron aquellos para los cuales el modelo muestra mayor sensibilidad.

Identificando el Coeficiente de Extinción de la Radiación; la EUA; la EUR; la temperatura para el crecimiento óptimo limitado por radiación; partición a hojas; área foliar específica y duración de hojas, como las variables de entrada al modelo que representaban mayor sensibilidad en la salida, ante variaciones, las cuales fueron evaluadas y medidas a campo.

Los parámetros restantes de entrada al modelo fueron estimados a través de datos bibliográficos:

Máxima profundidad de enraizamiento (m).

Fracción de materia seca del canopeo translocada a grano.

Potencial agua de la hoja a transpiración máxima.

Potencial agua de la hoja a marchitez.

Máximo posible de transpiración (mm día^{-1}).

II.2. Descripción de las evaluaciones realizadas:

II.2.1. Determinación de los estadios fenológicos: Se utilizó la escala fenológica de Ritchie y Hanway (1982) para describir el crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz, que se basa en caracteres morfológicos externos. Registrando la fecha respectiva a Emergencia, V_{10} , V_{13} , V_T , R_3 y R_6 .

II.2.2. Contenido de agua del suelo: De cada parcela se tomaron 3 muestras de suelo mediante barreno, a las profundidades de 0-20cm (horizontes A1 y A2); 20-40cm (horizonte Bw1); 40-60cm (horizonte Bw2); 60-80cm (horizonte BC); y finalmente de 80-100cm (horizonte C) (Cuadro 1). La frecuencia de medición fue de 15 días, desde emergencia a madurez fisiológica. Las muestras se llevaron a estufa a 105 °C hasta peso constante, de modo de determinar la humedad gravimétrica mediante la siguiente ecuación:

$$HG = \frac{(PH - PS)}{PS} \times 100 \quad [I]$$

Donde:

PH, es el peso del suelo húmedo (g)

PS, es el peso del suelo seco (g)

HG, es la humedad gravimétrica (%)

Cuadro 1. Características del perfil del suelo del estudio.

| Horizonte | A1 | A2 | Bw1 | Bw2 | BC | C |
|---|-------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Profundidad (cm) | 0 - 5 | 5 - 20 | 20 - 36 | 36 - 60 | 60 - 81 | 81 - 99 |
| Da (gr/cm ³) | 1,23 | 1,32 | 1,36 | 1,26 | 1,26 | 1,26 |
| CC (cm ³ /cm ³) | 25,49 | 28,67 | 30,18 | 24,71 | 22,54 | 23,34 |
| PMP (cm ³ /cm ³) | 10,44 | 14,34 | 14,12 | 11,45 | 10,19 | 9,99 |
| AU (cm ³ /cm ³) | 15,04 | 14,34 | 16,06 | 13,26 | 12,35 | 13,34 |

Da, densidad aparente del suelo. CC, Capacidad de Campo, contenido volumétrico de agua a -0,3bares. PMP, Punto de Marchitez Permanente, contenido volumétrico de agua a -15 bares. AU, Agua Útil, contenido volumétrico de agua útil. Datos recopilados de Rivetti (2007).

II.2.3. Intercepción de la radiación: Se midió en los estadios fenológicos V_T; R₃ y R₆ se empleó el sensor lineal LI-191SA Quantum, conjuntamente con LI-COR LI-1400 Datalogger (LI-COR, Lincoln, NE, USA). En cada tratamiento se tomo una medición a cielo abierto (I₀) y tres debajo del dosel del cultivo, en forma transversal a las líneas de siembra (I).

La intercepción de la radiación (IR%) se determinó como:

$$IR(\%) = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) * 100 \quad [II]$$

Donde:

IR: Intercepción de la radiación.

I: Medición debajo del dosel.

I₀: Medición a cielo abierto.

Los valores de IR (%) fueron utilizados para obtener la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) mediante la siguiente ecuación:

$$RFAi = IR\% * RFA \quad [III]$$

Donde RFA es la radiación fotosintéticamente activa incidente, la cual se obtuvo multiplicando a la radiación global (RG) por 0,48 (Echarte *et al.*, 2006). El dato de RG fue obtenido de la estación meteorológica de la UNRC.

II.2.4. Eficiencia de uso de la radiación: Se determinó en los estadios fenológicos (V_{13} , V_T y R_3), a partir de las siguientes fórmulas:

$$EUR_{MS} = \frac{\Delta Biomasa}{\sum RAFi} \text{ (g MJ}^{-1}\text{) [IV]}$$

Donde:

EUR_{MS} es la eficiencia en el uso de la radiación para la producción de materia seca en cada subperíodo del ciclo del cultivo.

Δ Biomasa es la acumulación de biomasa para cada subperíodo analizado (g m^{-2}).

$RAFi$, es la radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada para cada subperíodo analizado (MJ m^{-2}).

II.2.5. Eficiencia de uso del agua (EUA): Los ingresos hídricos al sistema incluyen lluvias, riego, aporte superficial y sub-superficial y ascenso capilar, mientras que las pérdidas comprenden, evaporación del suelo, transpiración, escurrimiento y drenaje (Bernardo *et al.*, 2008). De manera simplificada Ritchie (1985) ha propuesto la siguiente ecuación para calcular el Balance hídrico de un cultivo:

$$(E+T) = M + I_r - N - F - \Delta W \quad \text{[V]}$$

Donde:

(E+T): Evapotranspiración (mm)

M: Precipitación (mm).

I_r : Riego (mm).

N: Escorrentía (mm).

F: Drenaje (mm).

ΔW : Diferencia de lámina útil entre etapas (mm).

El modelo SWB estima el escurrimiento (N) modificar por N mediante el modelo de Curva Número del U.S. Soil Conservation Service que calcula el escurrimiento de una lluvia en 24 hs a partir de un umbral crítico de escurrimiento (P_0) definido por el tipo de suelo y condición de superficie del mismo. La ecuación matemática es la siguiente:

$$N = \frac{(Pt - P_0)^2}{Pt + 4P_0} \quad [\text{VI}]$$

Donde:

N: Esguerrimiento (mm)

Pt: Precipitación en 24 horas (mm)

P₀: Umbral de esgurrentía (mm)

E = 0 si Pt ≤ P₀; E ≠ 0 si Pt > P₀

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP), el SWB emplea varios métodos. En este trabajo se utilizó el método de Penman-Monteith que estima ETP con la siguiente fórmula (Allen *et al.*, 2006):

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad [\text{VII}]$$

Donde:

ET_o: evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹).

R_n: Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹).

R_a: Radiación extraterrestre (mm día⁻¹).

G: Flujo del calor de suelo (MJ m⁻² día⁻¹).

T: Temperatura media del aire a 2 m de altura (°C).

u₂: Velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹).

e_s: Presión de vapor de saturación (kPa).

e_a: Presión real de vapor (kPa).

e_s - e_a: Déficit de presión de vapor (kPa).

Δ: Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹).

Γ: Constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

Los datos requeridos para el cálculo de las ecuaciones V, VI y VII, se tomaron de la estación meteorológica ASEAGRO, ubicada en el campo de experimentación y docencia (CAMDOCEX) de la Universidad Nacional de Río Cuarto, en cercanías del ensayo experimental.

El crecimiento del cultivo limitado por agua es calculado por el modelo mediante la fórmula propuesta por Tanner and Sinclair (1983).

$$B = \frac{kT}{VPD} \quad [\text{VIII}]$$

Donde B es en kg de MS m⁻² d⁻¹, k es un parámetro de cultivo obtenido experimentalmente de la relación entre la materia seca y el uso del agua, determinándose un valor de 9 kPa (Esposito, 2002), T es la transpiración del cultivo (kg m⁻² d⁻¹) y VPD es el déficit de vapor diario (kPa) (Allen *et al.*, 2006). Esta relación se basa en el hecho de que si el suministro de agua hacia las hojas es restringido, la pérdida de agua disminuye como así también el ingreso de CO₂ y la acumulación de materia seca.

Se cuantificó la eficiencia de uso del agua transpirada (EUA), mediante la siguiente ecuación:

$$EUA = \frac{BIOMASA}{T} \quad [\text{IX}]$$

Donde:

T es la transpiración (mm).

La transpiración fue obtenida a través del producto entre la evapotranspiración potencial (ETP) y la intercepción de la radiación (IR%).no le des bola a esto

$$T = ETP * IR\% \quad [\text{X}]$$

Donde:

ETP es evapotranspiración potencial (mm).

IR es intercepción de la radiación (%).

Estos valores se determinaron en los estadios fenológicos (V_T, R₃, y R₆).

II.2.6. Área foliar específica: en los estadios fenológicos (V₁₃, R₃, y R₆), se tomaron tres plantas de cada parcela, a las cuales se les determinó el área foliar específica (AFE). Definida como la relación entre el área foliar y el peso seco de las hojas y se expresa en cm² g⁻¹ (Garnier *et al.*, 2004).

El área foliar por planta se obtuvo como la suma de las áreas de las hojas individuales, que se obtenían multiplicando la longitud de la hoja por el ancho máximo de la hoja y por el coeficiente 0,75 (Montgomery, 1911).

Luego, de medir e identificar debidamente las hojas se colocaron a secar en estufa a 80 °C hasta peso constante. Cada hoja se pesó con una balanza digital con el fin de obtener su peso seco. Posteriormente con los datos de área foliar y peso seco se realizó el cálculo del área foliar específica (AFE):

$$\text{AFE} = \text{área foliar (cm}^2\text{)} / \text{peso seco (g)}$$

Una vez obtenidos los datos de AFE se pasaron a unidad de m² los valores de superficie foliar y a Kg los correspondientes al peso, debido a que el modelo de simulación trabaja con dichas unidades.

II.2.7. Materia seca aérea: se tomaron muestras de tres plantas en cada parcela en los estadios fenológicos (V₁₃, V_T, R₃, y R₆). Las mismas fueron particionadas en hojas, tallo (V₁₃, V_T) y órganos reproductivos (R₃, y R₆), llevándose a estufa a 80 °C hasta peso constante. A partir de los datos de biomasa particionados en R₆, se estimó el índice de cosecha (IC).

II.2.8. Rendimiento de grano y componentes del mismo: Para la determinación del rendimiento de grano, se llevó a cabo la recolección manual de las espigas en competencia perfecta, tomando 5 muestras por bloque de 1,92 m lineales en el cultivo. Se procedió con el desgranado de las mismas, para obtener la relación marlo grano existente en cada híbrido. Posteriormente, se extrajo una alícuota de granos de cada parcela con el objetivo de realizar mediciones de humedad para que a continuación se corrigiera el peso de los granos.

Para determinar el peso individual de los granos, se separaron en forma aleatoria tres muestras de 100 granos de cada parcela, cada una fue pesada y corregido su peso por humedad.

Los resultados de rendimiento se expresaron en kg ha⁻¹. La estimación se realizó mediante la relación propuesta por (Satorre *et al.*, 2003):

$$\text{Rendimiento (kg ha}^{-1}\text{)} = N^{\circ} \text{ granos/espiga} \times N^{\circ} \text{ espigas/planta} \times N^{\circ} \text{ plantas/m}^2 \times \text{peso medio de un grano} \times 10000$$

Con los parámetros evaluados en cada híbrido de maíz, se realizó la calibración del modelo, obteniéndose datos de producción de cada híbrido, en la zona de Rio Cuarto.

II.3. Análisis de datos:

El modelo fue calibrado ajustando datos de la simulación con los datos obtenidos de cada híbrido y parcela mediante la metodología descrita por Wiltmont (1982) y Mitchell (1997).

Una vez calibrado, se obtuvieron los parámetros de cultivo de cada híbrido, con los mismos se determinaron diferencias entre genotipos mediante un análisis de ANAVA empleando el test de comparaciones múltiples LSD Fisher ($\alpha=0,05$).

La comparación entre valores simulados y observados se hizo a través de gráficos x-y entre simulados y observados, su pendiente y el coeficiente de determinación (r), además en términos de estadísticas basadas en diferencia y en regresión, que obtuvieron mediante el empleo del sistema Integrated Resources for Evaluating Numerical Estimates (IRENE; Fila *et al.*, 2001). Los índices con los que se evaluó fueron: el Índice de coincidencia, D (Ecuación 1), la raíz cuadrada del cuadrado medio del error, RMSE (Ecuación 2), la eficiencia del modelo, EF (Ecuación 3) y el error relativo, que es la relación porcentual del RMSE sobre el promedio de valores observados de Rendimiento, Biomasa total, IC, IAFmax e IRmax, según Wilmott, (1982).

$$D = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i| + |O_i|)^2} \right] \quad 0 \leq D \leq 1 \quad \text{[XI]}$$

Donde:

D: Índice de coincidencia

N: Número de casos

Pi: Datos simulados

Oi: Datos observados

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

Donde:

RMSE: Raíz cuadrada media del error

N: Número de casos

Pi: Datos simulados

Oi: Datos observados

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad \text{[XIII]}$$

Donde:

EF: Eficiencia del modelo

N: Número de casos

E: Datos simulados

M: Datos observados

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

III.1. Descripción climática del sitio de estudio: El departamento de Río Cuarto se caracteriza por poseer un régimen climático templado sub húmedo con invierno seco. El régimen de precipitaciones presenta una distribución anual del tipo monzónico con un 80% de las lluvias concentradas en el período primavera estival, la precipitación media anual es de 801,2 mm. El régimen térmico es mesotermal, la temperatura media del mes más cálido (enero) es de 23°C con una máxima absoluta de 39,5°C. La temperatura media del mes más frío (julio) es de 9,1°C con una mínima absoluta de -11,5°C. La amplitud térmica media anual es de 13,9°C. La fecha media de la primera helada es el 25 de mayo y la de última es el 12 de septiembre, siendo el período libre de heladas 255 días en promedio (Seiler *et al.*, 1995).

En la Figura 2 se pueden apreciar las precipitaciones ocurridas entre noviembre y primera década de abril (período de crecimiento del cultivo), durante la campaña 2010/2011, estas fueron de 619,2 mm, algo superior a los 598,6 mm medios registrados para la zona entre 1977 y 2006, indicando un 3,4% superior a los registros promedios, pudiéndose considerar a este ciclo como uno normal.

Por otro lado en septiembre y octubre, las precipitaciones fueron de 143,9 mm, siendo el valor promedio para esos meses de 105,2 mm, es decir un 36% superior al promedio normal, representando de esta manera una buena recarga de agua en el perfil del suelo previo a la siembra.

Para una mejor interpretación del efecto de las precipitaciones sobre la producción del maíz, se analizaron las mismas por períodos, dividiendo al ciclo del cultivo en tres etapas importantes, S-V₁₃, período en el cual se determina el área foliar, V₁₃-R₃, donde queda definido el número de grano, y por último, R₃-R₆, etapa en la cual se fija el peso de los granos.

Las precipitaciones para cada período fueron, 211,6 mm entre S-V₁₃, entre V₁₃- R₃ 201,4 mm y para R₃-R₆ 206,2 mm, siendo el registro promedio (1977/2006) para S-V₁₃ de 249,7 mm, entre V₁₃- R₃ 137,7 mm y para el período comprendido entre R₃-R₆ las precipitaciones fueron de 211,2 mm. Así las lluvias fueron un 15% inferiores respecto de la media, entre S-V₁₃, para V₁₃- R₃, 46% superior al promedio y para la última etapa (R₃-R₆) las lluvias fueron un 2,3% inferiores a la media histórica.

Esta situación determinó que el cultivo recibiera la mayor cantidad de precipitaciones en el período crítico de definición del rendimiento (V₁₃-R₃), pero la distribución de la misma fue concentrada en los últimos diez días de enero, los registros anteriores a esta etapa fueron inferiores, observándose una deficiencia desde mediados de diciembre, respecto de los valores medios registrados.

En los registros posteriores al periodo crítico no se observan deficiencias notables en la distribución de las lluvias respecto de la media histórica.

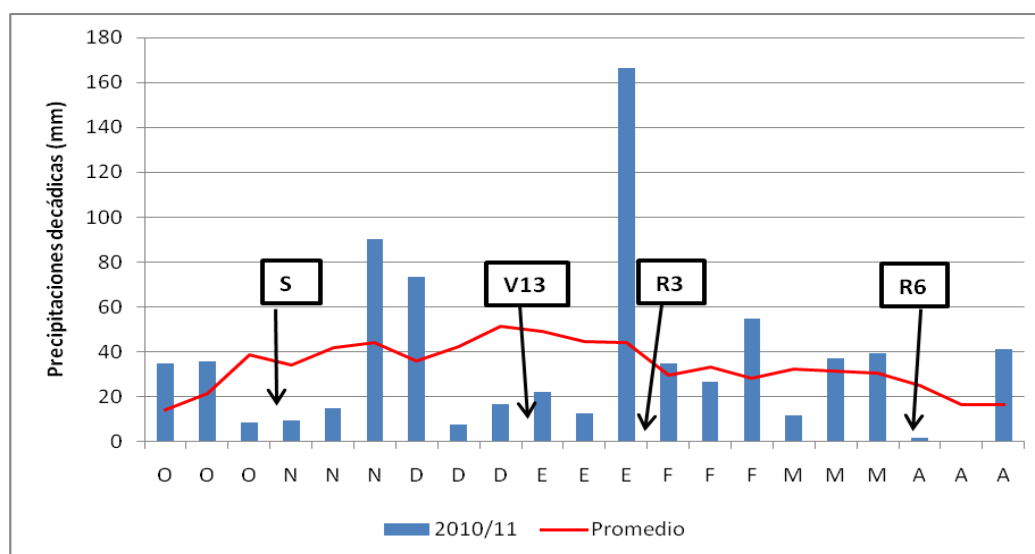


Figura 2. Precipitaciones decádicas (barras) y medias normales (línea) en Río Cuarto durante la campaña 2010/2011 y promedio (1977/2006). S: Siembra, V₁₃: Estado de 13 hojas, R₃: Grano lechoso, R₆: Madurez fisiológica. Flechas indican ocurrencia de estadios fenológicos.

III.2. Análisis de sensibilidad del modelo de simulación: De los 12 parámetros del cultivo que se utilizan como entrada al modelo, se realizó el análisis de sensibilidad variando sus valores en $\pm 30\%$. Los parámetros que no presentaron variación son:

- Máxima profundidad de enraizamiento (m).
- Fracción de materia seca del canopeo translocada a grano.
- Potencial agua de la hoja a transpiración máxima.
- Potencial agua de la hoja a marchitez.
- Máximo posible de transpiración (mm día^{-1}).

En el Cuadro 2, se presentan los 7 parámetros restantes, que al realizar el proceso de variación en sus valores y examinar los resultados, se observó un mayor cambio en la salida del modelo, determinándose como parámetros sensibles del cultivo para la entrada del modelo.

Para el parámetro, Coeficiente de Extinción de la Radiación se determinó que genera los mayores cambios en las salidas del modelo, en cuanto a Materia Seca Total y Rendimiento observándose una variación de 4,07 y 4,96% respectivamente.

Con respecto a EUA los valores de salida más afectados, ante variaciones de $\pm 30\%$, son los correspondientes a Materia Seca total en un 10,66% y Rendimiento en un 11,21%.

EUR, el parámetro de salida que representó mayor variación ante cambios del valor cargado en el modelo, fue la Materia Seca Total (13,12%), dado a que este parámetro toma la relación entre la radiación interceptada respecto de la biomasa producida.

Temperatura para el crecimiento óptimo limitado por radiación, cuando se realizó el análisis de sensibilidad variando en $\pm 30\%$ este dato de entrada, se determinó que los resultados de Materia Seca Total son los más afectados en un 16,99% en la salida del modelo.

Partición hoja/tallo, al variar este coeficiente se observó mayor repercusión en el valor de salida de Rendimiento (12,30%) e IAF máx (17,57%), cuando el valor hoja/tallo baja, dichos parámetros aumentan, de esta manera se verificó que a medida que este coeficiente baja se destina mayor proporción de materia seca total a la producción de hojas, generando un aumento directo en el IAF, logrando con esta mayor superficie foliar aumentar el Rendimiento.

Área foliar específica, el parámetro de salida que fue afectado en mayor medida es el IAF en un 21,85%, dado a que el AFE es la componente definida como la división del área foliar entre el peso seco de la hoja, lo cual al generar disminuciones o aumentos en el mismo, se va a estar afectando de forma directa los valores de IAF que representan la superficie de hojas de cada planta, respecto de la superficie de suelo.

Duración de hoja, al modificar este coeficiente en el rango porcentual del análisis, se determinó una variación del 12,73% en la producción de MS total, de aumento o disminución, debido a la persistencia de hojas o a la pérdida prematura de las mismas respectivamente. En cuanto a Rendimiento en grano se observó una variación de 28,73%, es de esperar aumentos o disminuciones debido a que existe una mayor o menor translocación de fotoasimilados por parte de las hojas hacia los órganos de cosecha, afectando de manera directa los valores correspondientes a IC (17,44%) como se observa en el cuadro.

Cuadro 2. *Análisis de sensibilidad al modelo, variando en un rango de $\pm 30\%$, las variables cargadas por defecto en el modelo.*

| | Variación | MS total Tn ha ⁻¹ | Rto. Tn ha ⁻¹ | IC | IAF max | FI max |
|---|-------------|---------------------------------|-----------------------------|------|---------|--------|
| Coeficiente de extinción de la radiación. | -30% | -6,18 | -6,52 | 0,00 | 0,29 | -6,11 |
| | -20% | -4,57 | -5,39 | 0,00 | 0,38 | -3,73 |
| | -10% | -0,96 | -0,30 | 0,00 | 0,47 | -1,34 |
| | 10% | 3,03 | 4,58 | 0,00 | 0,69 | 1,09 |
| | 20% | 3,14 | 4,69 | 0,00 | 0,91 | 1,78 |
| | 30% | 4,52 | 5,96 | 0,00 | 1,37 | 2,27 |
| | CV | 4,07 | 4,96 | 0 | 0,45 | 3,12 |

Cuadro 2. Continuación.

| | Variación | MS total Tn ha ⁻¹ | Rto. Tn ha ⁻¹ | IC | IAF max | FI max |
|---|-------------|---------------------------------|-----------------------------|--------|---------|--------|
| EUA normalizada por déficit presión de vapor (g m ⁻² mm trans, ⁻¹ kPa ⁻¹) | -30% | -18,90 | -20,64 | -2,94 | -16,32 | -2,59 |
| | -20% | -11,51 | -11,64 | 0,00 | -1,77 | -0,22 |
| | -10% | -5,98 | -6,15 | 0,00 | -1,07 | -0,13 |
| | 10% | 4,20 | 5,61 | 0,00 | 0,46 | 0,05 |
| | 20% | 5,95 | 5,22 | 0,00 | -0,03 | 0,00 |
| | 30% | 10,39 | 10,12 | 0,00 | 1,19 | 0,14 |
| | CV | 10,66 | 11,21 | 1,12 | 6,33 | 0,98 |
| EUR (g/MJ), | -30% | -21,37 | -15,22 | 5,88 | -5,65 | -0,74 |
| | -20% | -13,84 | -10,84 | 2,94 | -3,15 | -0,39 |
| | -10% | -6,82 | -4,48 | 2,94 | -2,41 | -0,30 |
| | 10% | 5,67 | 2,88 | -2,94 | 1,21 | 0,14 |
| | 20% | 10,10 | 4,36 | -5,88 | 2,77 | 0,31 |
| | 30% | 13,82 | 4,88 | -8,82 | 3,80 | 0,42 |
| | CV | 13,12 | 8,09 | 5,34 | 3,42 | 0,42 |
| Temp, para el crecimiento óptimo limitado por radiación (°C), | -30% | 25,06 | 6,85 | -14,71 | 6,15 | 0,66 |
| | -20% | 16,75 | 5,45 | -8,82 | 4,04 | 0,45 |
| | -10% | 8,44 | 5,51 | -2,94 | 1,92 | 0,22 |
| | 10% | -9,18 | -6,65 | 2,94 | -2,96 | -0,37 |
| | 20% | -16,01 | -12,48 | 2,94 | -4,80 | -0,62 |
| | 30% | -20,86 | -15,94 | 5,88 | -6,45 | -0,86 |
| | CV | 16,99 | 9,53 | 7,50 | 4,68 | 0,56 |
| Partición a hoja/tallo. | -30% | 5,16 | 17,30 | 11,76 | 30,94 | 2,28 |
| | -20% | 3,84 | 12,56 | 8,82 | 19,87 | 1,72 |
| | -10% | 1,57 | 5,10 | 2,94 | 9,14 | 0,93 |
| | 10% | -1,52 | -4,73 | -2,94 | -7,08 | -0,95 |
| | 20% | -2,39 | -7,51 | -5,88 | -13,21 | -1,98 |
| | 30% | -3,52 | -18,90 | -8,82 | -19,05 | -3,18 |
| | CV | 3,22 | 12,30 | 7,48 | 17,57 | 1,99 |

Cuadro 2. Continuación.

| | Variación | MS total Tn ha ⁻¹ | Rto. Tn ha ⁻¹ | IC | IAF max | FI max |
|--------------------------------|-------------|---------------------------------|-----------------------------|--------|---------|--------|
| Área foliar específica. | | | | | | |
| | -30% | -6,78 | -6,65 | 0,00 | -30,17 | -6,24 |
| | -20% | -4,23 | -3,44 | 0,00 | -20,07 | -3,42 |
| | -10% | -1,88 | -3,06 | -2,94 | -9,98 | -1,41 |
| | 10% | 2,81 | 3,19 | 0,00 | 11,19 | 1,11 |
| | 20% | 4,20 | 7,13 | 2,94 | 20,95 | 1,78 |
| | 30% | 3,76 | 6,37 | 2,94 | 30,09 | 2,24 |
| | CV | 4,22 | 5,22 | 2,02 | 21,85 | 3,11 |
| Duración de hojas (°C). | | | | | | |
| | -30% | -17,52 | -41,69 | -29,41 | -0,70 | -0,08 |
| | -20% | -12,54 | -30,04 | -20,59 | -0,40 | -0,07 |
| | -10% | -7,88 | -17,19 | -11,76 | -0,15 | -0,02 |
| | 10% | 5,79 | 14,85 | 8,82 | -0,15 | -0,02 |
| | 20% | 11,48 | 22,41 | 8,82 | 0,30 | 0,04 |
| | 30% | 16,50 | 32,88 | 14,71 | 0,80 | 0,09 |
| | CV | 12,73 | 28,73 | 17,44 | 0,49 | 0,06 |

III.3. Determinación de los estadios fenológicos: En el Cuadro 3, se presentan todos los estadios fenológicos con sus correspondientes fechas de ocurrencia.

Todos los híbridos cumplieron su ciclo en 157 días. Las diferentes etapas de desarrollo se manifestaron acordes a las condiciones ambientales que se presentaron durante el período comprendido entre el 1/11/2010 y el 7/04/2011. La fecha de floración fue el 17/01/2011 a los 77 días después de siembra.

Cuadro 3. Fecha de ocurrencia y duración de los estadios fenológicos de los híbridos de maíz.

| Estadios | Fecha | Duración del período (días) | Días acumulados. |
|-----------------------|------------|--------------------------------|---------------------|
| Siembra | 01/11/2010 | 0 | 0 |
| E | 10/11/2010 | 9 | 9 |
| V₁₀ | 27/12/2010 | 47 | 56 |
| V₁₃ | 02/01/2011 | 6 | 62 |
| V_T | 17/01/2011 | 15 | 77 |
| R₃ | 31/01/2011 | 14 | 91 |
| R₄ | 02/03/2011 | 30 | 121 |
| R₅ | 16/03/2011 | 14 | 135 |
| R₆ | 07/04/2011 | 22 | 157 |

Escala según Ritchie and Hanway (1982). E: Emergencia; V: estadios vegetativos y R: estadios reproductivos.

III.4. Contenido de agua del suelo: En la Figura 3 se puede observar la evolución del contenido hídrico del suelo hasta los 100 cm de profundidad.

Para el ciclo del cultivo, la lámina almacenada hasta los 100 cm de profundidad fue aumentando desde la siembra hasta 28 días después de la misma, como consecuencia de las precipitaciones producidas en ese período.

A partir del día 28 la lámina almacenada fue disminuyendo debido al consumo de agua por parte del cultivo y de la demanda atmosférica, situación que se mantuvo hasta aproximadamente 56 días después de la siembra. En este momento se registraron nuevamente precipitaciones, provocando un aumento del contenido hídrico del suelo, superando el valor establecido como umbral de riego a un 60% de la capacidad de almacenamiento del perfil.

Posterior a este registro se observa una disminución leve del contenido hídrico del suelo, hasta finalizado el periodo de crecimiento.

El periodo crítico ($V_{13} - R_3$), quedó situado entre los 62 y 91 días después de siembra respectivamente, determinándose que en el comienzo de este periodo el contenido de agua en el suelo fue inferior al umbral establecido y por lo tanto el cultivo sufrió un stress hídrico importante, esta situación se debió a la distribución de las precipitaciones explicadas en el punto III.1., A partir de este momento ocurrió un aumento progresivo hasta las 100 días después de siembra, como se observó en la Figura 2 esta recarga de agua se debe a la gran cantidad de precipitaciones ocurridas en los últimos diez días del mes de enero.

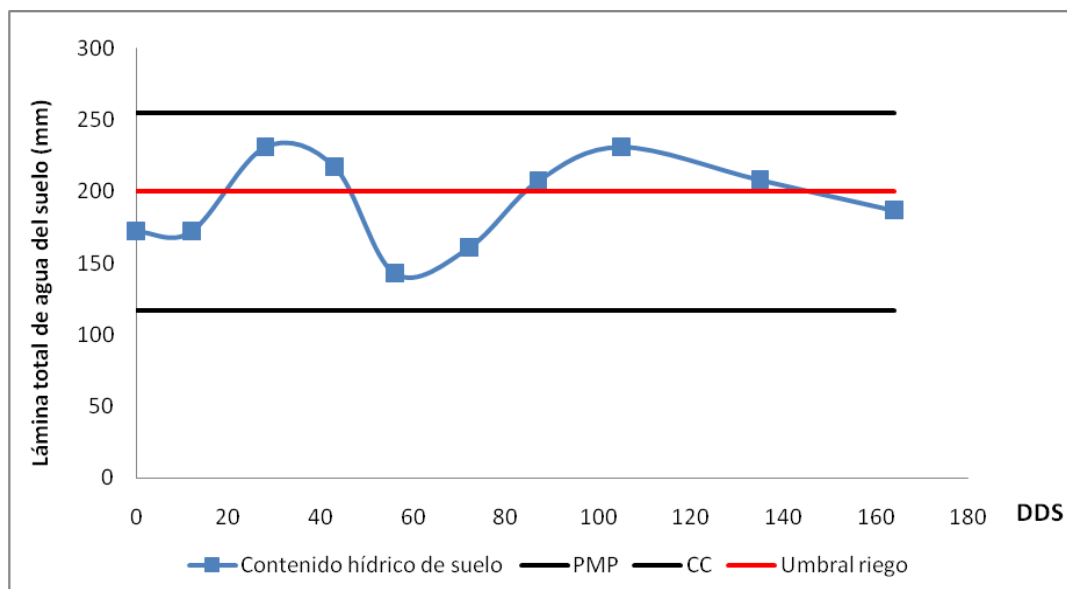


Figura 3. Evolución de la lámina total de agua del suelo en 100 cm desde siembra hasta madurez fisiológica del cultivo de maíz.

III.5. Intercepción de la radiación: Se determinó la fracción de intercepción de la radiación solar en los estadios fenológicos V_T , R_3 y R_6 (Cuadro 4), observándose que la intercepción para el primero de estos estadios es mayor en los híbridos NK 910 y AX 886, presentando diferencias significativas respecto de los híbridos P2053Y y DK 692. Este patrón se repitió cuando se analizó el valor de intercepción de radiación del 95%, también denominado IAF crítico, alcanzado a los 76 días después de siembra por el híbrido NK 910, a los 77 días después de siembra por el híbrido AX 886, a los 85 días después de siembra por el híbrido P2053Y y a los 87 DDS por el híbrido DK 692.

En R_3 , las diferencias encontradas explican una menor fracción de intercepción lograda por el híbrido DK 692, del orden del 2,89%, respecto del híbrido NK 910. En R_6 , NK 910 es el único híbrido que presenta diferencias estadísticamente significativas respecto de los restantes, siendo su valor de intercepción 91,91 %.

Como se observa, el híbrido NK 910 fue superior en valores de intercepción de la radiación, para los tres estadios evaluados, por lo contrario, el híbrido DK 692 presentó siempre valores inferiores al resto de los híbridos en estudio.

Los resultados obtenidos pueden deberse a que el valor de IAF fue superior en todas las etapas de medición para el híbrido NK 910 (ver Cuadro 7), lo cual puede estar explicando el motivo de esta mayor intercepción alcanzada. Permitiendo así un cierre anticipado del surco y una mayor captura de radiación a lo largo de todo el ciclo del cultivo. Otro factor que puede estar explicando estas diferencias puede ser la disposición de las hojas de los híbridos, como se explicará posteriormente.

El índice de área foliar (IAF) es un importante parámetro biofísico para analizar la cantidad de radiación fotosintéticamente capaz de ser captada por un cultivo. Un aumento en el IAF proporciona incrementos en la producción de biomasa; pero debido al auto-sombreamiento de las hojas la tasa fotosintética media por unidad de área foliar decrece (Lucchesi, 1987).

Cuadro 4. Fracción de intercepción de radiación de cada híbrido para los estadios fenológicos V_T , R_3 y R_6 .

| Híbrido | V_T IR (%) | R_3 IR (%) | R_6 IR (%) |
|---------------|--------------|--------------|--------------|
| AX 886 | 94,63 a | 98,33 ab | 85,98 b |
| DK 692 | 90,24 b | 96,22 c | 85,97 b |
| NK 910 | 96,44 a | 99,11 a | 91,91 a |
| P2053Y | 90,70 b | 97,99 b | 87,18 b |
| DMS | 3,83 | 1,02 | 4,44 |
| CV | 4,29 | 1,09 | 5,26 |

En columnas, letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según prueba de Fisher (Infostat, 2011). DMS, diferencia mínima significativa. CV, Coeficiente de variación.

El patrón de hojas verticales en la parte superior y más horizontales en la parte inferior permite que las hojas superiores intercepten menos radiación y dejen pasar más luz hacia las hojas inferiores, logrando que la radiación sea distribuida más equitativamente sobre el total del área foliar (Loomis y Williams, 1969).

Se ha observado que los doseles de maíz con hojas con tendencia vertical, arriba de la espiga, pueden ser más productivos comparados con aquellos que sus hojas tienen una posición horizontal (Pendleton y Hammond, 1969).

A medida que el área foliar se desarrolla, la radiación interceptada por las hojas se incrementa. Inicialmente, el área foliar aumenta a una tasa exponencial, pero ésta, al comienzo es pequeña y la radiación interceptada no es significativa, debido a que la superficie foliar por planta es pequeña. Cuando se llega a floración masculina (V_T) el desarrollo del área foliar finaliza, siendo el objetivo de las prácticas culturales maximizar la fotosíntesis del cultivo interceptando prácticamente toda la radiación solar incidente. Esto es un patrón eficiente para cultivos graníferos, en donde la mayoría del peso de la semilla proviene de la fotosíntesis luego de la floración (Gardner *et al.*, 1985).

III.6. Eficiencia de uso de la radiación: La radiación solar fotosintéticamente activa interceptada por los cultivos es transformada en biomasa. La pendiente de la relación entre ambas variables es denominada eficiencia de uso de la radiación (EUR) y se expresa en gramos de biomasa por unidad de radiación interceptada (Satorre *et al.*, 2003).

No se observan diferencias significativas (Cuadro 5) para los valores de EUR obtenidos a campo para los cuatro híbridos de maíz. Se puede decir que el híbrido P2053Y, tiene una tendencia de mayor EUR respecto de los demás híbridos con un valor de 5,48 g MJ⁻².

Cuadro 5. Eficiencia de uso de la radiación (EUR) determinada en (g MJ⁻²), correspondiente a cada híbrido.

| Híbrido | EUR |
|---------------|--------|
| AX 886 | 5,28 a |
| DK 692 | 5,26 a |
| NK 910 | 5,25 a |
| P2053Y | 5,48 a |
| DMS | 0,732 |
| CV | 6,90 |

En columnas, letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según prueba de Fisher (Infostat, 2011). DMS, diferencia mínima significativa. CV, Coeficiente de variación.

Los datos obtenidos, son mayores a los encontrados en la bibliografía, Marcos (2000) cita valores de eficiencia de uso de la radiación correspondientes a 2,6 g MJ⁻¹ m⁻². La eficiencia con

que la radiación fotosintéticamente activa interceptada es convertida en biomasa aérea vegetal de maíz es de aproximadamente $2,8 \text{ g MJ}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (Andrade *et al.*, 1992; Andrade, 1995). Stockle *et al.* (1997) obtuvo valores de EUR de $4 \text{ g MJ}^{-1} \text{ m}^{-2}$ comparando el rendimiento obtenido con el modelo CropSyst para el uso del agua en el suroeste de Francia con submodelos de diferentes niveles de complejidad. Otegui *et al.*, (1995) determino valores de $4,14 \text{ g MJ}^{-1} \text{ m}^{-2}$ antes de la floración femenina y de $2,45 \text{ g MJ}^{-1} \text{ m}^{-2}$ después de la misma.

Estas diferencias en mayor valor de EUR obtenidos, puede ser debido a que los híbridos utilizados por dichos autores, sean de materiales genéticos más antiguos a los evaluados en este trabajo, considerando que los híbridos actuales poseen una mayor eficiencia en la conversión de la radiación.

Analizando el comportamiento de los cuatro híbridos en forma conjunta (Figura 4), se obtiene un valor de R^2 de 98 %, apreciándose el comportamiento semejante de los cuatro materiales genéticos.

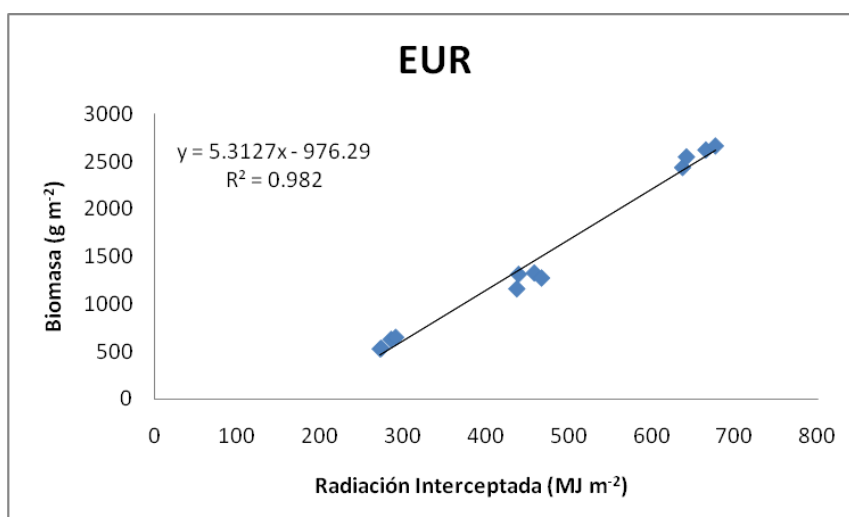


Figura 4. Eficiencia de uso de la radiación (EUR) correspondiente a los cuatro híbridos durante el ciclo productivo.

III.7. Eficiencia de uso del agua:

Se entiende por EUA como la relación existente entre la biomasa presente en un determinado momento en un cultivo por unidad de agua utilizada por este. El agua utilizada, se considera como toda el agua que ingresa al sistema.

En el Cuadro 6, se muestran los valores de EUA ($\text{g m}^{-2} \text{ mm}_{\text{trans}}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$) obtenidos en cada uno de los híbridos, observándose que no se encontraron diferencias significativas. Siendo el mayor de ellos el alcanzado por el híbrido P2053Y de $16,09 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}_{\text{trans}}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ y el menor el correspondiente al híbrido NK 910 con $15,22 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}_{\text{trans}}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$.

Ferrer *et al.* (2000), determinaron valores de EUA correspondientes a $10 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}_{\text{trans}}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ en la evaluación del modelo de simulación CropSyst para maíz de regadío en el valle del Ebro. Ferrer-Alegre y Stockle (1999), obtuvieron valores de EUA de $9,6 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}_{\text{trans}}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$, para maíz con el modelo CropSyst para evaluar la respuesta de los cultivos a la salinidad, en Fort Collins, EE.UU.

Cuadro 6. Producción de biomasa aérea, en función del agua consumida (EUA) determinada en ($\text{g m}^{-2} \text{ mm}_{\text{trans}}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$), correspondiente a cada híbrido.

| Híbrido | EUA |
|---------------|---------|
| AX 886 | 15,52 a |
| DK 692 | 15,38 a |
| NK 910 | 15,22 a |
| P2053Y | 16,09 a |
| DMS | 2,101 |
| CV | 6,76 |

En columnas, letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según prueba de Fisher (Infostat, 2011). DMS, diferencia mínima significativa. CV, Coeficiente de variación.

III.8. Índice de área foliar y área foliar específica: En el Cuadro 7 se indican los valores de IAF obtenidos en los estadios V_{13} , R_3 y R_6 y el área foliar específica media de dichos estadios (AFE), para los híbridos cuatro híbridos en estudio.

Los datos medidos (Cuadro 7) evidencian que no existieron diferencias significativas entre los híbridos.

NK 910 es el híbrido que mayores valores de IAF presentó en las mediciones realizadas en los diferentes estadios. Este es uno de los motivos que explicarían la mayor interceptación de la radiación mencionada en el punto (III.5).

Estos valores de mayor superficie foliar, medidos en el híbrido NK 910, llevan a la determinación de que sus hojas son de poco espesor, livianas, dado a que el AFE obtenida en todos los materiales no difiere.

En el estadio de madurez fisiológica (R_6), los menores valores de IAF para el híbrido P2053Y, pueden deberse a la senescencia prematura de sus hojas.

Cuadro 7. Índice de área foliar (IAF) para los estadios V₁₃, R₃ y R₆ y área foliar específica (AFE, m²/Kg), para cada uno de los híbridos.

| Híbrido | IAF V ₁₃ | IAF R ₃ | IAF R ₆ | AFE |
|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------|
| AX 886 | 3,79 b | 5,32 a | 2,88 b | 11.49 a |
| DK 692 | 3,66 b | 4,82 b | 2,70 b | 12.90 a |
| NK 910 | 4,31 a | 5,57 a | 3,19 a | 11.81 a |
| P2053Y | 3,45 b | 4,89 b | 1,72 c | 11.77 a |
| DMS | 0,40 | 0,34 | 0,28 | 1.47 |
| CV | 11,01 | 7,01 | 11,34 | 12.74 |

En columnas, letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según prueba de Fisher (Infostat, 2011). DMS, diferencia mínima significativa. CV, Coeficiente de variación.

Ferrer *et al.* (2000), determinaron valores de AFE correspondientes a 18 m² Kg⁻¹ en la evaluación del modelo de simulación CropSyst para maíz de regadío en el valle del Ebro. Marcos (1997), obtuvo valores de AFE de 20 m² Kg⁻¹ con producción de maíz bajo condiciones de secano en el este de Washington, USA.

Como se puede evidenciar los valores de AFE obtenidos por los autores mencionados anteriormente, son superiores a los logrados en este trabajo, se podría sobreestimar que el método de medición utilizado aquí y propuesto por Montgomery (1911), sobre estima la superficie foliar de cada planta.

El área foliar específica (AFE) explica en mayor parte la variación de crecimiento entre las especies. Las especies con crecimiento más rápido, bajo óptimas condiciones, son aquellas que tienen la mayor área foliar específica (Poorter, 1999).

Un incremento en el área foliar específica implica que la hoja invierte menos biomasa por unidad de área. Esta variable se correlaciona fuertemente con una variedad de parámetros fisiológicos y químicos. Las especies con alta AFE poseen altas concentraciones de componentes citoplasmáticos como proteínas, minerales y ácidos orgánicos. Asimismo presentan altas concentraciones de N y altas tasas de actividad fotosintética. Especies con baja AFE poseen mayor cantidad de componentes de pared celular, especialmente lignina (Poorter, 2002).

III.9. Materia seca aérea: En el cuadro 8 se presenta la acumulación de materia seca por estadios fenológicos para cada uno de los híbridos en estudio

Como puede apreciarse, no se observaron diferencias significativas entre los cuatro híbridos de maíz, para los estadios V₁₃, V_T, R₃ y R₆.

Los valores en producción de biomasa aérea son mayores para el Híbrido NK 910, como ya se destacó su superioridad, en valores de intercepción de radiación e IAF, determinados en los puntos III.5 y III.8, respectivamente.

Cuadro 8. Valores observados de biomasa acumulada (kg MS ha⁻¹) por estadio fenológico para los híbridos de maíz.

| Híbrido | V ₁₃ | V _T | R ₃ | R ₆ |
|---------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| AX 886 | 6348,9 a | 13353,9 a | 26503,5 a | 31703,9 a |
| DK 692 | 5355,6 a | 11686,7a | 24418,2 a | 30267,7 a |
| NK 910 | 6617,4 a | 12920,1a | 26680,8 a | 36645,5 a |
| P2053Y | 5420 a | 13192,5a | 25530,6 a | 32073,3 a |
| DMS | 168,97 | 203,53 | 401,49 | 714,64 |
| CV | 29,57 | 16,53 | 16,17 | 22,65 |

En columnas, letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según prueba de Fisher (Infostat, 2011). DMS, diferencia mínima significativa. CV, Coeficiente de variación.

Seiler (2010) obtuvo valores de producción de biomasa aérea en Río Cuarto, con el híbrido AX 877, en R₁ de 5798,9 y 12922,2 kg MS ha⁻¹ (R₆); y con el híbrido DK 615 en R₁ de 8370,1 y 10977,3 kg MS ha⁻¹ (R₆) a una densidad de 72000 semillas ha⁻¹.

Durante la campaña 2006-2007, Pérez (2009) determinó, en La Aguada, Dpto. Río Cuarto, Pcia. de Córdoba, valores de biomasa en R₆ para maíz (AX 882 IT) fertilizado y no fertilizado de 16105 y 9315 kg MS ha⁻¹ respectivamente, con 72000 semillas por hectárea.

Los valores de producción de biomasa obtenidos en este trabajo son superiores a los citados, el motivo de esta diferencia se debe a la mayor densidad de plantas por hectárea en la que se sembró este ensayo (90000 semillas ha⁻¹), determinando así una mayor producción por superficie.

III.10. Rendimiento y componentes: El rendimiento en grano no muestra diferencias significativas (Cuadro 9) en cuanto a los híbridos AX 886, DK 692 y P2053Y. Siendo el híbrido NK 910, el de menor rendimiento con 11016,3 Kg ha⁻¹.

El rendimiento del maíz puede ser estudiado a través de sus componentes numéricos: el número de granos por unidad de superficie (NG) y su peso individual. A su vez, el NG es producto del número de plantas por unidad de superficie, del número de espigas granadas por planta y del número de granos por espiga. El peso del grano, por su parte, es función de la duración del período de llenado y de la tasa de llenado (g m⁻² día⁻¹) (Cárcova, *et al*; 2004).

El menor valor de rendimiento correspondiente a NK 910, fue debido a su menor peso de granos (Cuadro 9), por otro lado su NG por superficie no difiere significativamente respecto de los demás híbridos situándose en un valor intermedio en los resultados obtenidos a campo.

Con los resultados obtenidos, se encontraron diferencias significativas para los IC de cada híbrido, siendo superior el valor registrado por el híbrido P2053Y, determinando de esta manera que se trata de un híbrido que destina gran parte de su biomasa total a biomasa cosechable.

Cuadro 9. Rendimiento, componentes directos e índices de cosecha (IC) de cada híbrido.

| Híbrido | Rto Kg ha ⁻¹ | Peso de mil granos | NG m ² | IC |
|---------------|-------------------------|--------------------|-------------------|---------|
| AX 886 | 13055 a | 337,2 b | 3906,6 a | 0,49 c |
| DK 692 | 12581,6 a | 363 a | 3466,3 b | 0,54 ab |
| NK 910 | 11016,3 b | 304,5 c | 3628 ab | 0,51 bc |
| P2053Y | 12632,4 a | 367,7 a | 3436,4 b | 0,58 a |
| DMS | 1335,24 | 12,28 | 424,36 | 0,04 |
| CV | 11,26 | 3,72 | 12,21 | 8,26 |

En columnas, letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según prueba de Fisher (Infostat, 2011). DMS, diferencia mínima significativa. CV, Coeficiente de variación.

El rendimiento del maíz depende de la cantidad de biomasa que se distribuye al grano. Esto se refleja en el índice de cosecha (IC) que es la masa de grano como proporción del total de biomasa que el cultivo tiene sobre la tierra. El IC del maíz cultivado en condiciones favorables varía de 0,2 en cultivares locales no mejorados a cerca de 0,3-0,4 en cultivares tropicales mejorados y a mas de 0,5 en cultivares precoces de zonas templadas (Fischer y Palmer, 1984).

Gallini, (2007) obtuvo valores de índice de cosecha entre 0,53 y 0,67. En tratamientos que variaban la distancia entre hileras en 52 y 70 cm y la densidad de siembra en 45000; 60000 y 80000 plantas ha⁻¹.

Pérez (2009) determinó en su tesis final de grado, un valor de índice de cosecha para maíz correspondiente al 40%.

III.11. Calibración del modelo Soil Water Balance (SWB): Para que el modelo Soil Water Balance sea coherente con los valores reales obtenidos en el ensayo, se llevó a cabo la calibración del mismo. Para ello se realizó un ajuste de los parámetros del modelo para cada uno de los híbridos correspondientes.

Para tener una apreciación de la capacidad predictiva del modelo, los resultados obtenidos de las simulaciones se compararon con los datos experimentales de campo, evaluando la habilidad del modelo para reproducir el funcionamiento del sistema real.

Todos los parámetros fenológicos y de crecimiento fueron ajustados hasta que los valores simulados y observados mostraran máxima concordancia, logrando de esta manera representar correctamente la evolución fenológica del cultivo, de emergencia, floración y madurez fisiológica.

El período simulado fue del 17 de septiembre del 2010 hasta el 20 de abril del 2011, la fecha de siembra fue el 1 de noviembre.

Los datos climáticos cargados al modelo son los presentados anteriormente en el punto III.1. y los de suelo los correspondientes al Cuadro 1, utilizados para la simulación.

La precipitación total simulada en el período analizado fue de 627,6 mm, con una precipitación efectiva de 586,5 mm. La evapotranspiración potencial fue de 1057 mm y la real correspondió a 451 mm para el híbrido P2053Y de los cuales el 82 % fue transpiración del cultivo y el resto evaporación; 455 mm para DK692, representando la transpiración al igual que el primer caso un 82 % y 459 mm de evapotranspiración real para los híbridos AX 886 y NK 910, obteniendo valores de transpiración directa por el cultivo de un 82 %.

Para el análisis de la exactitud y precisión de la capacidad predictiva del modelo se procedió a realizar el cálculo de medidas descriptivas de la diferencia entre los valores observados y simulados, se utilizaron algunas de las propuestas por Willmott (1982), Loague y Green (1991). Tanto el índice de concordancia (D) y la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RCEM) de Willmott (1982), como la Eficiencia del Modelo (EF) propuesto por Loague y Green (1991), son índices relativos de la discrepancia entre los valores simulados y observados.

En el Cuadro 10 se muestran los indicadores de ajuste del modelo, el Índice de coincidencia (D), la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE), la eficiencia del modelo (EF) y el error relativo (relación porcentual entre el RMSE y el promedio de valores observados), para IAF_{máx} e IR_{máx} en los cuatro híbridos en estudio.

Cuadro 10. Índices de ajuste para Índice de área foliar máximo (IAF max) e Intercepción de la radiación máxima (IR max), obtenidos durante la validación del modelo de simulación SWB.

| | IAF max | IR max |
|---------------------------|----------------|---------------|
| D | 0,3009 | 0,5363 |
| RMSE | 0,939 | 0,0205 |
| EF | -4,877 | -1,3715 |
| Error Relativo (%) | 18,23 | 2,09 |

Donde: D: Índice de coincidencia, RCEM: Raíz cuadrada del cuadrado medio del error, EF: Eficiencia del modelo y Error relativo: Relación porcentual entre el RCEM y el promedio de los valores observados de IAF max e IR max.

Se obtuvo un bajo ajuste por el índice de coincidencia (D) para el caso de IAF (0,30) y ubicándose en términos medios (0,53) para el valor de IR. De la misma manera, se puede destacar que el RMSE indica un mayor diferencial entre la simulación y las determinaciones a campo para IAF que para IR, siendo este último un valor más cercano a 0.

Los valores de eficiencia del modelo (EF) son menores a cero y están indicando que no es un buen ajuste, dado a que modelos con buen desempeño tienen una EF cercana a 1 y cuando más negativo es el valor peor es el ajuste; para este caso el valor de IAF indica que la capacidad del modelo para simular esta variable no es buena.

Al analizar conjuntamente el Error Relativo con D se observa que existe una concordancia lógica entre variables, IR tiene un valor D superior al obtenido por IAF y por ende más cercano a 1, revelando una menor contribución al error, lo cual se puede observar en el cuadro 10. El hecho de que exista una coherencia entre el Error Relativo y D, indica que el modelo tiene un mejor comportamiento en la simulación. Haciendo el mismo análisis para IAF, su valor D (0,30), más lejano a 1, determina que Error Relativo es mayor (18,23 %).

El mismo análisis fue llevado a cabo con la Biomasa total, el Rendimiento e IC en el cuadro 11.

El grado de ajuste logrado por el índice de coincidencia (D) entre resultados observados y simulados marcó valores de ajustes para Biomasa y Rendimiento de 0,40 y 0,48 respectivamente, no ocurriendo lo mismo para el IC (0,27) que se encuentra muy lejos del valor 1 que representa total concordancia entre lo simulado y lo observado.

El RMSE está indicando que existió un diferencial en Biomasa y Rendimiento de 8,14 y 1,77 Tn ha⁻¹, respectivamente.

Los índices D y EF calculados dieron valores poco cercanos a la unidad, lo que confirma cierta diferencia relativa entre los datos observados y las predicciones del modelo.

Estos valores indican que el modelo no es capaz de predecir correctamente la producción en Biomasa e IC debido a las importantes diferencias encontradas entre los resultados simulados y observados a campo. El Rendimiento se puede considerar como lógico por más que no sea un ajuste perfecto.

Cuadro 11. Índices de ajuste para Biomasa total ($Tn MS ha^{-1}$), Índice de cosecha (IC) y Rendimiento en ($Tn ha^{-1}$), obtenidos durante la validación del modelo de simulación SWB.

| | BM total | IC | Rto. |
|---------------------------|-----------------|-----------|-------------|
| D | 0,40881 | 0,2735 | 0,4848 |
| RMSE | 8,142 | 0,0642 | 1,7756 |
| EF | -1,8709 | -0,2127 | -1,7532 |
| Error Relativo (%) | 24,92 | 12,11 | 14,41 |

Donde: D: Índice de coincidencia, RCEM: Raíz cuadrada del cuadrado medio del error, EF: Eficiencia del modelo y Error relativo: Relación porcentual entre el RCEM y el promedio de los valores observados de BM total, IC y Rto.

En la Figura 5 se determinó el coeficiente de correlación (r^2), que representa una medida cuantitativa de asociación entre los valores simulados y observados de las dos variables; y la relación 1:1 que indica la línea de predicción perfecta, expresada por la ecuación de una recta con pendiente 1 e intercepto igual a 0, incluida en las gráficas como nivel de referencia de los resultados simulados y observados de producción de materia seca total ($Tn ha^{-1}$), correspondiente a cada híbrido para los estadios fenológicos V_{13} , V_T , R_3 y R_6 .

Se puede observar que el grado de ajuste logrado por el modelo fue de valores entre el 48 y 50% aproximadamente, para los cuatro híbridos en estudio.

Al evaluar la relación 1:1, se observa que las diferencias para alcanzar el valor 1 de relación exacta en la pendiente entre datos observados y simulados, para AX 886 es de 0,3; para DK 692 es de 0,9; para NK 910 y P2053Y se observan diferencias en valores de 0,6 y 0,7 decimas respectivamente.

Los valores de Biomasa que predice el modelo, a lo largo del ciclo del cultivo, son en los estadios vegetativos superiores a los medidos a campo en un 64% para el estadio V_{13} y en un 36% para V_T . En los estadios reproductivos son subestimados, siendo los datos simulados inferiores en un 17% para R_3 y un 19% para R_6 .

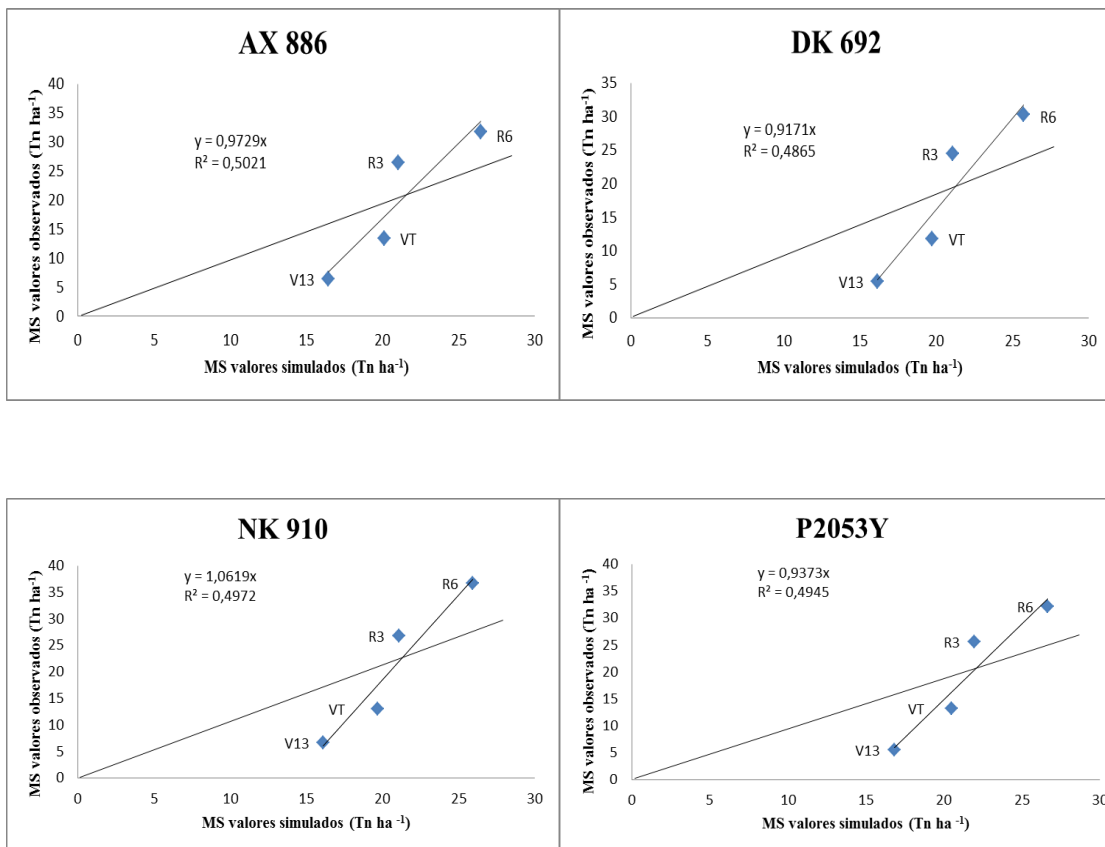


Figura 5. Valores simulados y observados de producción de materia seca total (Tn MS ha⁻¹) correspondiente a cada híbrido a lo largo del ciclo productivo.

Debe tenerse presente que debido a la carencia de la totalidad de los datos requeridos por el modelo, que no pueden ser determinados a campo, fue necesario recurrir a datos bibliográficos, como por ejemplo la máxima profundidad de enraizamiento (m), el máximo posible de transpiración (mm día⁻¹), la fracción de materia seca del canopeo translocada a grano; la duración de las hojas (°C); el potencial agua de la hoja a transpiración máxima; la Temperatura para el crecimiento óptimo limitado por radiación (°C). Las incertidumbres o imprecisiones asociadas a estos datos pueden colaborar, en diferente medida, en el funcionamiento del modelo afectando la calidad de las simulaciones.

La fiabilidad de los datos de campo, tanto referidos a los datos necesarios para la inicialización de las simulaciones, como a las variables contrastadas con el modelo, y la magnitud del error experimental (calidad), son aspectos esenciales a la hora de interpretar los resultados.

IV. CONCLUSIONES

En base a la hipótesis planteada, los parámetros de cultivo, EUR, EUA, AFE y K, requeridos por el modelo SWB no difieren entre los distintos híbridos de maíz de reciente salida al mercado evaluados en este trabajo.

Mediante el análisis de sensibilidad se determinó que los parámetros de entrada al modelo de mayor importancia para el cultivo son: el Coeficiente de extinción de la radiación, la EUA, la EUR, la Temperatura para el crecimiento óptimo limitado por radiación, la Partición a hoja/tallo, el Área foliar específica y la Duración de hojas.

El SWB sobrestimó los valores de rendimiento del cultivo y subestimó los valores de salida de Biomasa total, IC, IAF e IR.

Se determinó que el modelo sobrestimó los valores de producción de Materia Seca Total en los estadios vegetativos analizados V_T y V_{13} , y que subestimó los valores obtenidos en los estadios reproductivos R_3 y R_6 .

El modelo SWB resultó difícil de calibrar debido a la cantidad de procesos que considera. Las diversas variables que se pueden modificar permiten ajustar una salida final, sin que exista una correcta representación de procesos intermedios, como es el caso de la producción de biomasa a lo largo del ciclo del cultivo.

Para el uso general del modelo en la zona, se requiere de la generación experimental de mayor cantidad de datos, de diferentes campañas agrícolas, fechas de siembra y variabilidad de manejos agronómicos. Esto permitirá refinar ciertos aspectos del modelo incrementando, de esta manera, su capacidad de predicción del crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz en estas condiciones.

V. BIBLIOGRAFIA

- AGGARWAL, P.K., 1995. Uncertainties in crop, soil and weather inputs used in growth models: implications for simulated outputs and their applications. *Agric. Syst.* 48: 361-384.
- ALLEN R. G., PEREIRA L. S., RAES D., SMITH M., 2006. FAO 56: Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma. p: 299.
- ANDRADE, F.H.; S.A. UHART; G.G. ARGUISSAIN, y R.A. RUIZ., 1992. Radiation use efficiency of maize grown at a cool area. *Field Crops Research* 28:345-354.
- ANDRADE, F.H., 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Research.* 41:1-12.
- AZAM ALI, S.N., CROUT, N.M., BRADLEY, G.R., 1994. Perspectives in modelling resource capture by crops. In: Monteith, J.L., Unsworth, M.H., Scott, R.K. (Eds.), *Proceedings of the 52nd university of nottingham eastern school on resource capture by crops.* Nottingham University Press. p: 125–148.
- AZAM ALI, S.N., SESAY, A., KARIKARI, S.K., MASSAWE, F.J., AGUILAR-MANJARREZ, J., BANNAYAN, M., HAMPSON, K.J., 2001. Assessing the potential of an underutilized crop – a case study using bambara groundnut. *Experimental Agriculture* 37: 433-472.
- BERNARDO, I.; BONADEO, E.; MORENO I.; BONGIOVANNI, M.; MAZARI R., 2008. Sistema Suelo-planta. Agua en el suelo. Material de apoyo para el curso de grado: Sistema Suelo-Planta. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto. p: 66.
- CAMPBELL, G. S., 1996. ClimGen: weather generator software, a program that generated weather data (precipitation, maximum and minimum temperatures). Department of Crop and Soils Sciences. Washington State University. Material inédito.

- CARCOVA, J.; G. ABELEDO; M. LOPEZ PEREIRA., 2004. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. Producción de granos, Bases funcionales para su manejo. Facultad Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Argentina, pp. 75-94.
- DORAISWAMY, P.C., S. MOULIN, P.W. COOK, AND A. STERN. 2003. Crop yield assessment from remote sensing. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 69(6):665-674.
- ECHARTE L.; L. MALENA y A. DELLA MAGGIORA. 2006. Caracterización agroclimática del período crítico del cultivo de maíz en Balcarce (Argentina). **XI REUNION ARGENTINA DE AGROMETEOROLOGIA**. La Plata , Argentina. p: 37:40.
- ESPOSITO, G. P., 2002. *Propiedades hidrofísicas del suelo asociadas a diferentes sistemas de labranza en el cultivo de maíz*. Tesis de Maestría. Fac. Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Rio Cuarto, Rio Cuarto, Argentina. 113 p.
- ESPÓSITO GOYA, G., VALIENTE GÓMEZ, M., CALERA BELMONTE, A., CASTILLO, C., BALBOA, G., VIDELA MENEGUE, H., 2011. Siembra directa y eficiencia en el uso de agua de riego en maíz.
- FERRER-ALEGRE, F. Y C. STOCKLE. 1999. A model for assessing crop response to salinity. *Irrig. Sci.* 19: 15-23.
- FERRER, F. VILLAR, J.M. y C.O. STOCKLE., 2000. Evaluación del modelo de simulación CropSyst para maíz de regadío en el valle del Ebro. *Invest. Agr.: Prot. Veg.* 15: 237-251.
- FILA, G., G. BELLOCHI, M. ACUTIS and M. DONATELLI. 2001. IRENE: Integrated Resources for Evaluating Numerical Estimates. ISCI, Bologna, Italy. <http://www.isci.it/tools>.
- FISCHER, K.S. & PALMER, A.F.E., 1984. Tropical maize. In P.R. Goldsworthy & N.M. Fisher, eds. *The physiology of tropical field crops*, p. 213-248. New York, NY, USA, J. Wiley & Sons.

- GALLINI, M. G., 2007. *Intercepción de la radiación y consumo de agua del maíz con diferentes diseños de plantación*. Tesis final de grado. Fac. Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Rio Cuarto, Rio Cuarto, Argentina.
- GARDNER, F.P.; BRENT PEARCE, R; MITCHEL, R.L., 1985. Carbon fixation by crop canopies. In: *Physiology of Crop Plants*. Iowa State University Press. Pp. 31-57.
- GARNIER, E., B. SHIPLEY, C. ROUMET, and G. LAURENT., 2004. A standardized protocol for the determination of specific leaf area and leaf dry matter content. *Funct. Ecol.* 15:688-695.
- GUEVARA, E., 2013. La simulación del desarrollo, crecimiento y rendimiento en maíz. INTA EEA Pergamino. En:
<http://agrolluvia.com/wp-content/uploads/2010/06/Simulacion-Desarrollo-Crecimiento-y-Rendimiento-En-Maiz.pdf>
Consultado: 27-03-2013.
- IRMAK, A., JONES, J.W., MAVROMATIS, T., WELCH, S.M., BOOTE, K.J., WILKERSON, G.G., 2000. Evaluating Methods for Simulating Soybean Cultivar Responses Using Cross Validation. *Agron J* 92, 1140-1149.
- JONES, C.W., TSUJI, G.I., HOOGNBOOM, G., HUNT, L.A., THORNTON, P.K., WILKENS, P.W., IMAMURA, D.T., BOWEN, W.T., SINGH, U., 1998. Decision Support System for Agrotechnology Transfer: DSSAT v3. In: Tsuji, G.I., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers. p. 157-177.
- LOAGUE K., GREEN R.E., 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *J. Contam. Hydrol.*, 7, 51-73.
- LOOMIS RS, WA WILLIAMS., 1969. Productivity and the morphology of crop stands: patterns and leaves. En Eastin JD, Haskins FA, Sullivan CY, van Bavel CHM (eds), pp 28-45. *Physiological aspects of crop yield*. CSSA and ASA. Madison, WI.
- LUCCHESI, A.A., 1987. Fatores da produção vegetal. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. (Ed.). *Ecofisiologia da produção agrícola*. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, p.1-II.

- MARCOS, J., 1997. Corn Production under dryland conditions in Eastern Washington. Masters Thesis, Department of Crop and Soil Sciences. Washington State University, Pullman, Washington, USA. Material inédito.
- MARCOS, J., 2000. Simulation-based assessment of alternative crops in the dryland Pacific Northwest. Ph. D. Dissertation. Washington State University. 171 pp.
- MARCOS, J., Campbell, G.S., 2002. SWBModel 11. Modelo de simulación de balance hídrico del suelo y crecimiento de cultivos, Río Cuarto, Argentina. Material inédito.
- MAVROMATIS, T., BOOTE, K.J., JONES, J.W., IRMAK, A., SHINDE, D., HOOGENBOOM, G., 2001. Developing Genetic Coefficients for Crop Simulation Models with Data from Crop Performance Trials. *Crop Sci* 41, 40-51.
- MITCHELL, P.L., 1997. Misuse of regression for empirical validation of models. *Agricultural Systems* 54: 313-326.
- MONTGOMERY, E. G., 1911. Correlation studies of corn. Nebraska Agricultural Station Annual Report. Lincoln, v 24, p. 108-159.
- OTEGUI M. E., NICOLINI M. G., RUIZ R. A. Y DODDS P. A., 1995. Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agr. J.* 87: 29-33.
- PANKUK, C.D., STOCKLE, C.O., PAPENDICK, R.I., 1998. Evaluating CropSyst simulations of wheat management in a wheat - fallow region of the US Pacific Northwest. *Agric. Syst.* 57.
- PENDLETON, J.W., HAMMOND, J.J., 1969. Relative photosynthetic potential for grain yield of various leaf canopy levels of corn. *Agronomy Journal* 61 911.
- PEREZ, NICOLAS A., 2009. Efecto de la fertilización nitrogenada bajo siembra directa sobre la eficiencia en el uso del agua, producción de materia seca y rendimiento de maíz. Trabajo Final presentado para optar al Grado de Ingeniero Agrónomo. Fac. Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina. 22 p.

- PERGOLINI, S.O., 2003. Comportamiento de cultivares de trigo ante cambios en la disponibilidad hídrica y nutricional. Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina.
- POORTER, H., DE JONG, R. 1999. A comparison of specific leaf area, chemical composition and leaf construction costs of field plants from 15 habitats differing in productivity. *New Phytologist*, 143: 163-176.
- POORTER, H., 2002. Plant Growth and Carbon Economy. *Encyclopedia of life science*. Macmillian Publishers Ltd, Nature Publishing Group. www.els.net
- RITCHIE, J. 1985. A user orientated model of the soil water balance in Wheat. In: Day W. Atkins RK (eds) *wheat growth and modeling*. Plenum Publishing Corporation. NATO-ASI. Series pp: 239-305.
- RITCHIE, S. W. and J. J. HANWAY., 1982. How a Corn Plant Develops. Special Report N° 48. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Ames. Iowa. Disponible on line www.iastate.edu
- RIVETTI, ANA ROSA., 2007. *Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina. II. Producción de materia seca*. En: *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, Vol. 39, no. 1, 29-39 p. Dirección URL del artículo: <http://bdigital.uncu.edu.ar/1527>.
- SATORRE, H .E.; R. L. BENECH ARNOLD; G. A. SLAFER; E. B. DE LA FUENTE; D. J. MILLARES; M. E. OTEGUI; R. SAVIN. 2003. Producción de granos: bases funcionales para su manejo. 1ª ed. Ed. Facultad de Agronomía, UBA, Argentina. 75-94p.
- SEILER J., 2010. *Producción de biomasa, rendimiento y competencia entre plantas de maíz (Zea mays L.) según su variabilidad temporal en la emergencia*. Trabajo Final presentado para optar al Grado de Ingeniero Agrónomo. Fac. Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina.
- SEILER, R., R. FABRICIUS , V. ROTONDO y M. VINOCUR. 1995. *Agroclimatología de Río Cuarto – 1974 / 1993*. Volumen I. UNRC. 68p.

- SHANNON, R., JOHANNES, J. 1976. Systems simulation: the art and science. IEEE Traductions on Systems, Man and Cybernetics. p. 723-724.
- STEDUTO, P., HSIAO, T.C., RAES, D., FERERES, E., 2009. AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. Agron. J. 101:426-437.
- STOCKLE, C.O., MARTIN, S., CAMPBELL, G.S., 1994. CropSyst, a cropping systems model: water/nitrogen budgets and crop yield. Agric. Syst. 46:335-359.
- STOCKLE, C.; CABELGUENNE, M.; y P. DEBAEKE., 1997. Comparison of CropSyst performance for water management in southwestern France using submodels of different levels of complexity. Eur. J. Agronomy 7: 89-98.
- STOCKLE, C.O., DONATELLI, M., NELSON, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. European J. Agron. 18:289-307.
- TANNER, C. and T. SINCLAIR. 1983. Efficient water use in crop production: Research or Reasearch?. In: Limitations to efficient water use in crop production, 1-27 H. M. Taylor Eds. Pub by ASA, CSSA and SSSA. Madison. WI.
- TITTONELL, P., VANLAUWE, B., LEFFELAAR, P.A., GILLER, K.E., 2005. Estimating yields of tropical maize genotypes from non-destructive, on-farm plant morphological measurements. Agric. Ecosyst. Environ. 105: 213–220.
- VIDELA MENSEGUE, H., 2006. *Producción de soja en suelos con capa freática somera en el dpto. Roque Sáenz Peña. (Córdoba)*. Trabajo Final presentado para optar al Grado de Ingeniero Agrónomo. Fac. Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Rio Cuarto, Rio Cuarto, Argentina. 38 p.
- WEISS, M., D. TROUFLEAU, F. BARET, H. CHAUKI, L. PRÉVOT, A. OLIOSO, *et al.* 2001. Coupling canopy functioning and radiative transfer models for remote sensing data assimilation. Agric. For. Meteorol. 108:113-128.
- WELCH, S.M., ROE, J.L., DONG, Z., 2003. A Genetic Neural Network Model of Flowering Time Control in Arabidopsis thaliana. Agronomy Journal 95, 71-81.

WILLIAMS, J.R., JONES, C.A., DYKE, P.T., 1984. A modelling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Trans. ASAE 27:129-144.

WILLMOTT, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bulletin American Meteorological Society. Vol. 63, N° 11.;1309-1313.