

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO CROPSYST PARA LAS  
CONDICIONES DE PRODUCCIÓN DEL LITORAL-OESTE DEL URUGUAY  
EN UN HÍBRIDO DE MAÍZ**

**por**

**Nicolás BERRUTTI DUTRA**

**TESIS presentada como uno de los  
requisitos para obtener el título de  
Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2009**

Tesis aprobada por:

Director: .....

Ing. Agr. Sebastián Mazzilli

.....  
Ing. Agr. Osvaldo Ernst

.....  
Ing. Agr. PhD. Santiago Dogliotti

Fecha: 27 de mayo de 2009

Autor: .....  
Nicolás Berrutti Dutra

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad de la República, Facultad de Agronomía y las personas que la integran, por haberme brindado los conocimientos generados por la institución gratuitamente.

A la EEMAC, los docentes y demás personas que trabajan en ella, por haberme brindado la posibilidad de poner en práctica los conocimientos adquiridos a lo largo de toda la carrera y vivir una experiencia personal inolvidable durante el año en que estuve allí.

Al Ing. Agr. Sebastián R. Mazzilli por la invaluable dedicación durante el trabajo de tesis y los conocimientos transmitidos.

A mi padre, Juan M. Berrutti, por el apoyo e incentivo constante a lo largo de toda la carrera. A mi madre, Ana Dutra, mis hermanos, María Paz y Matías, y Sofía (mi novia) por acompañarme y apoyarme siempre.

A mis amigos por haberme dado el gusto de conocerlos.

A todos ellos, mis más sinceras gracias.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PAGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
<b>1. <u>INTRODUCCIÓN</u></b> .....	<b>1</b>
<b>2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u></b> .....	<b>2</b>
<b>2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CULTIVO DE MAÍZ</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1.1. <u>Factores que afectan el crecimiento y desarrollo</u></b> .....	<b>2</b>
2.1.1.1. Temperatura .....	3
2.1.1.2. Fotoperíodo .....	3
2.1.1.3. Radiación .....	4
2.1.1.4. Agua.....	4
<b>2.1.2. <u>Descripción del ciclo ontogénico de la planta de maíz</u></b> .....	<b>5</b>
2.1.2.1. Período vegetativo .....	5
2.1.2.2. Período reproductivo .....	7
<b>2.1.3. <u>Fisiología de la generación del rendimiento</u></b> .....	<b>8</b>
2.1.3.1. Componentes mas importantes en la generación del rendimiento .....	9
<b>2.2. MODELO DE SIMULACIÓN: CROPSYST</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2.1. <u>Simulación de los procesos relacionados al ciclo del nitrógeno</u></b> .....	<b>12</b>
2.2.1.1. Transporte de N en suelo .....	12
2.2.1.2. Transformaciones del N en el suelo .....	14
2.2.1.3. Absorción de N del suelo por parte de las plantas .....	17
2.2.1.4. Mineralización del N presente en los residuos.....	19
2.2.1.5. Fertilización con N .....	20
<b>3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u></b> .....	<b>21</b>
<b>3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TRABAJO</b> .....	<b>21</b>
<b>3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>21</b>
<b>3.3 MANEJO DEL CULTIVO</b> .....	<b>21</b>
<b>3.4. PARÁMETROS MEDIDOS DEL SUELO</b> .....	<b>22</b>
3.4.1. <u>Textura, materia orgánica y densidad aparente</u> .....	22
3.4.2. <u>Humedad gravimétrica</u> .....	22
3.4.3. <u>Nitrógeno</u> .....	23

3.5. PARÁMETROS MEDIDOS DEL CULTIVO .....	23
3.5.1. <u>Población y fenología</u> .....	23
3.5.2. <u>Biomasa aérea acumulada e índice de área foliar (IAF)</u> .....	24
3.5.3. <u>Rendimiento en grano</u> .....	24
3.6. CALIBRACIÓN DEL MODELO .....	25
3.7. VALIDACIÓN DEL MODELO .....	28
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	29
4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO EN QUE REALIZÓ EL ENSAYO (VERANO 07/08).....	29
4.1.1. <u>Evolución de la temperatura</u> .....	29
4.1.2. <u>Régimen pluviométrico</u> .....	30
4.1.3. <u>Evolución de la radiación</u> .....	31
4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS SITIOS DE MUESTREO .....	32
4.2.1. <u>Rendimiento y factores que lo determinan</u> .....	32
4.2.2. <u>Evolución de la producción de biomasa y área foliar</u> .....	34
4.2.3. <u>Contenido de agua en el suelo</u> .....	35
4.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO .....	37
4.3.1. <u>Ajuste del índice de área foliar, intercepción de luz y biomasa                 aérea</u> .....	38
4.3.2. <u>Ajuste del consumo de agua</u> .....	43
4.3.3. <u>Ajuste del rendimiento en grano</u> .....	46
4.4. VALIDACIÓN DEL MODELO .....	47
4.5. POSIBILIDADES DE USO DE CROPSYST EN SITUACIONES COMERCIALES.....	50
4.5.1. <u>Impacto del atraso de la fecha de siembra sobre la acumulación de                 biomasa</u> .....	50
4.5.2. <u>Impacto del contenido de agua en el suelo a la siembra sobre la                 producción de biomasa</u> .....	52
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	55
6. <u>RESUMEN</u> .....	57
7. <u>SUMMARY</u> .....	58
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	59

**9. ANEXOS .....66**

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

<b>Cuadro No.</b>	<b>Página</b>
1. Características generales de los grupos de suelos utilizados en la calibración...	<b>26</b>
2. Características generales de los suelos utilizados en la validación.....	<b>28</b>
3. Rendimiento y factores asociados.....	<b>33</b>
4. Correlaciones entre parámetros asociados al rendimiento (por debajo de la diagonal) y su significancia (por encima de la diagonal).....	<b>33</b>
5. Algunos parámetros ingresados al modelo que lograron el mejor ajuste entre observado y simulado.....	<b>37</b>
6. RMSE para biomasa acumulada (simulada y observada) de los grupos de suelo 1 (A), 2 (B) y 3 (C) para las distintas fechas de muestreo.....	<b>41</b>
7. RMSE para contenido de agua en el suelo (simulado y observado) de los grupos de suelo 1 (A), 2 (B) y 3 (C) para las distintas fechas de muestreo.....	<b>45</b>
8. RMSE para rendimiento, biomasa a cosecha e índice de cosecha (observado y simulado) para los grupos de suelo 1 (A), 2 (B), 3 (C).	<b>46</b>
9. Entradas y salidas de agua del suelo para tres sitios de muestreo, en maíz de segunda.....	<b>49</b>

### **Figura No.**

1. Temperaturas máximas y mínimas de la zona (Paysandú, Uruguay) durante el ciclo del cultivo (verano 07/08) en comparación con datos obtenidos para la serie histórica 1971-1995.....	<b>30</b>
--	-----------

2. Precipitaciones sucedidas en la zona (Paysandú, Uruguay) durante el ciclo del cultivo (verano 07/08) en comparación con datos obtenidos para la serie histórica 1971-1995.....	<b>31</b>
3. Radiación solar en la zona (Paysandú, Uruguay) durante el ciclo del cultivo (verano 07/08) en comparación con datos obtenidos para la serie histórica 1971-1995.....	<b>32</b>
4. Asociación entre número de granos y el rendimiento para la totalidad de los sitios de muestreo.....	<b>34</b>
5. Evolución de la biomasa aérea acumulada y evolución del índice de área foliar a lo largo del ciclo del cultivo para sitios de muestreo, maíz de primera y segunda.....	<b>35</b>
6. Contenido de agua en suelo a la siembra para los 4 grupos de suelos utilizados en la calibración del modelo (maíz de 1 <sup>a</sup> ), y tres sitios de muestreo (maíz de 2 <sup>a</sup> ).....	<b>36</b>
7. Evolución del IAF (observada y simulada) para los grupos de suelo 1 (A), 2 (B), 3 (C) y 4 (D) utilizados en la calibración.....	<b>39</b>
8. Evolución de la radiación interceptada (observada y simulada) para los grupos de suelo 1 (A), 2 (B), 3 (C) y 4 (D) utilizados en la calibración.....	<b>40</b>
9. Asociación entre el IAF y la intercepción de la radiación (adaptado de Gardner et al., 1985).....	<b>41</b>
10. Evolución de la biomasa aérea acumulada (observada y simulada) para los grupos de suelo 1 (A), 2 (B), 3 (C) y 4 (D) utilizados en la calibración.....	<b>42</b>
11. Lineal 1:1 de biomasa aérea acumulada (simulada y observada), para los grupos de suelo 1 (A), 2 (B) y 3 (C) a lo largo del ciclo del cultivo.....	<b>43</b>
12. Evolución del contenido de agua en el suelo (observada y simulada) para los grupos de suelo 1 (A), 2 (B), 3 (C) y 4 (D) utilizados en la calibración.....	<b>44</b>
13. Lineal 1:1 de contenido de agua del suelo (simulada y observada), para los grupos de suelo 1 (A), 2 (B) y 3 (C) a lo largo del ciclo del cultivo.....	<b>45</b>
14. Índice de estrés simulado durante el ciclo del cultivo para los grupos de suelo 1 (A), 2 (B), 3 (C) y 4 (D).....	<b>47</b>



15. Ajuste de la biomasa aérea acumulada (observada y simulada) para tres sitios de muestreo 10a (A), 10m (B) y 10b (C), maíz de segunda.....	<b>48</b>
16. Simulación de la producción de biomasa e índice de estrés para dos cultivos de maíz de primera, sembrados a inicios y fines de diciembre 2007 como únicas medidas de manejo diferente.....	<b>51</b>
17. Simulación de la evolución del agua en el suelo e índice de estrés para dos cultivos de maíz de primera, sembrados a inicios y fines de diciembre 2007 como únicas medidas de manejo diferente.....	<b>51</b>
18. Simulación de la intercepción de la radiación por el cultivo para dos cultivos de maíz de primera, sembrados a inicios y fines de diciembre 2007 como únicas medidas de manejo diferente.....	<b>52</b>
19. Simulación del contenido de agua en suelo e índice de estrés hídrico para dos situaciones de contenido de agua útil a la siembra (90 y 45 %)......	<b>53</b>
20. Simulación de la producción de biomasa e índice de estrés hídrico para dos situaciones de contenido de agua disponible en suelo a la siembra (90 y 45 %)......	<b>54</b>

## **1. INTRODUCCIÓN**

Los modelos de simulación están siendo ampliamente aplicados en agricultura para realizar predicciones acerca de las consecuencias agronómicas, ambientales y económicas de complejas interacciones entre manejo de cultivo, suelo y atmósfera (Ferrer et al. 2000, Bellocchi et al. 2002, Sadrás et al. 2002a, Monzón et al. 2006). En nuestro país existen antecedentes aislados y discontinuados de uso de modelos de simulación. Esto determina que no se disponga de esta herramienta para su aplicación en el diseño y evaluación de sistemas de cultivos. Una de las principales limitantes para su aplicación es la falta de parámetros de desarrollo y crecimiento de los diferentes cultivos sembrados.

Si bien existe información sobre el cultivo en estudio, poder contar con una herramienta de simulación que permita explorar rápidamente situaciones de manejo como fecha de siembra, distribución, entre otras ayudaría al diseño de experimentos de campo dirigidos a los problemas más importantes, así como integrarlos en la evaluación de secuencias de cultivos.

El modelo seleccionado para el trabajo es CropSyst (Cropping System Simulation Model). Este modelo de simulación de cultivos es de paso diario y permite el uso con rotaciones de cultivos. Tiene una interfase con el usuario amigable y es de libre distribución. Fue diseñado para servir como herramienta analítica para estudiar el efecto del ambiente, del sistema de rotación y el manejo sobre la productividad de los cultivos que integran la rotación (Stockle y Nelson, 1999).

Los objetivos del trabajo son los siguientes:

- obtener los parámetros requeridos por CropSyst para la simulación de un híbrido de maíz;
- calibrar y validar la rutina de agua del modelo;
- calibrar y evaluar la capacidad del modelo de predecir rendimiento en grano;
- evaluar resultados en diversos escenarios de producción.

## **2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CULTIVO DE MAÍZ**

El maíz es uno de los cereales de mayor importancia económica y social a nivel mundial, el grano se utiliza para consumo humano y animal, es un insumo para varias industrias en relación con la elaboración de fructosa, almidón, combustibles y fundamentalmente como ingrediente para elaborar raciones balanceadas (Watson, citado por Andrade et al., 1996).

Es una especie que se adapta a diversos tipos de clima y regiones que van desde el nivel del mar hasta los 4000 metros de altitud, una gran variabilidad en latitud en ambos hemisferios, haciéndose presente en los 5 continentes. Esto se debe a la gran diversidad de hábitos de crecimiento, largo de ciclo, productividad entre otras características que aportan a su plasticidad geográfica.

El maíz (*Zea mays L.*) pertenece a la familia de las gramíneas, de hábito de vida anual y ciclo de crecimiento estival. Es una planta de hábito de crecimiento determinado donde la diferenciación de estructuras vegetativas cesa en el momento en que el meristema apical pasa a reproductivo. Su alto potencial de crecimiento y sensibilidad del rendimiento al estrés hacen al maíz un cultivo con alta respuesta biológica a manejos adecuados como el uso de riego, fertilizantes e insumos en general.

Su característica más sobresaliente reside en su alta productividad. La misma es consecuencia directa de su sistema fotosintético del tipo C4 (alta tasa fotosintética), el bajo valor energético de la materia seca producida, la adecuada estructura de cultivo, además de poseer la capacidad de transformar más del 50 % de la biomasa producida en grano (Andrade et al., 1996).

En contraparte el cultivo presenta poca plasticidad foliar, escasa capacidad de macollaje y poca prolificidad, por lo que las posibilidades de compensar bajas poblaciones son muy escasas. Por otro lado su alta sensibilidad al estrés le confiere intolerancia al aumento de la densidad de plantas y atraso en la fecha de siembra (Andrade et al., 1996).

#### **2.1.1. Factores que afectan el crecimiento y desarrollo**

En el ciclo de vida de una planta o un cultivo transcurren dos tipos de procesos simultáneos e interdependientes: el crecimiento y el desarrollo. El crecimiento involucra aumento de tamaño (área, volumen, masa) mientras que el desarrollo es la sucesión progresiva de estados diferenciados fisiológica y/o morfológicamente. Ambos procesos

se encuentran bajo control genético y están regulados por factores ambientales, siendo los de mayor importancia temperatura y fotoperíodo (Andrade et al., 1996).

### 2.1.1.1. Temperatura

El tiempo real que transcurre hasta que un cultivo alcanza un estadio de desarrollo no es constante, en general los estadios se cumplen más rápidamente a medida que aumenta la temperatura. Sin embargo la respuesta de la tasa de desarrollo a la temperatura es aproximadamente lineal dentro de un rango térmico comprendido entre una temperatura base ( $T_b$ ) y una temperatura óptima ( $T_o$ ) (Warrington y Kanemasu 1983, Ellis et al. 1992, Campbell y Norman 1998). En maíz la  $T_b$  se ubica en un rango entre los 6 y 12 °C, siendo de 8 °C para los estudiados en nuestra región (Otegui 1992, Cirilo y Andrade 1994, Giménez 2001), en concordancia con otros datos de maíces en regiones templadas (Ritchie y Nesmith, 1991). La  $T_o$  por encima de la cual la velocidad de desarrollo deja de aumentar en forma lineal, se ubica entre 30 y 34 °C (Gilmore y Rogers, Blacklow, Tollenaar et al., Kiniry y Bonhomme, citados por Andrade et al., 1996), mientras que la temperatura máxima a la cual cesa el desarrollo se encuentra entre 40 y 44 °C (Blacklow, Kiniry y Bonhomme, citados por Andrade et al., 1996).

La duración de las etapas fenológicas de un cultivo de maíz se puede expresar en tiempo térmico (°C día), definido como la suma de la diferencia entre la temperatura media diaria ( $T_m$ ) y la  $T_b$  (Ritchie y Nesmith 1991, Campbell y Norman 1998) como se muestra a continuación.

$$\text{Tiempo térmico (°C día)} = \sum (T_m - T_b) \quad [1]$$

### 2.1.1.2. Fotoperíodo

El fotoperíodo (duración de las horas de luz del día) puede determinar que el cultivo modifique su ciclo aun en términos de tiempo térmico. El maíz responde al fotoperíodo como una especie cuantitativa de día corto (Kieselbach, Rood y Major, citados por Andrade et al., 1996), esto significa que la tasa de desarrollo se acelera a medida que se acortan los días. Existe un fotoperíodo umbral, que varía entre genotipos y oscila entre 12 y 13 horas de luz (Kiniry et al. 1983, Hesketh, Breuer, citados por Andrade et al. 1996), por debajo del cual las variaciones en la duración del día no lo afectan.

En maíz, durante los primeros estadios de su fase vegetativa (fase juvenil) la planta es insensible al fotoperíodo (Calder, 1964), y la duración de dicha insensibilidad varía según el genotipo (Otegui y Andrade, 2000). Luego le sigue una fase inductiva en

el que el ápice sigue diferenciando estructuras vegetativas pero es sensible al fotoperíodo. Una vez que el fotoperíodo se ubica en valores por debajo del umbral se produce la inducción floral y diferenciación de la panoja. Diferenciado el ápice el fotoperíodo no ejerce efectos significativos sobre el desarrollo (Allison y Daynard, 1979).

Existe gran variabilidad genotípica en relación con la respuesta fotoperiódica. En general ciclos largos, de origen subtropical de maduración tardía, tienen respuesta a las condiciones fotoperiódicas antes planteadas, mientras que híbridos de ciclos intermedios y cortos provenientes de climas templados son neutros al fotoperíodo (Kiniry et al., 1983).

### 2.1.1.3. Radiación

Este cultivo presenta una alta respuesta en producción de biomasa y por lo tanto en rendimiento a incrementos en la radiación solar incidente durante el ciclo. Esto se da gracias a la alta capacidad de absorción y baja saturación lumínica por parte de las plantas, lo que determina altas tasas fotosintéticas y así mayor producción de materia seca (MS).

La tasa de producción de MS se puede definir como:

$$\text{TCC} = \text{RFA}_{\text{inc}} * \text{ei} * \text{ec}$$

[2]

Donde:

**TCC** ( $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) es la tasa de crecimiento del cultivo;

**RFA<sub>inc.</sub>** ( $\text{Mj m}^{-2}$ ) es la radiación fotosintéticamente activa incidente;

**ei** (0-1) es la eficiencia de interceptación;

**ec** (0-1) es la eficiencia de conversión.

La superficie de área foliar de un cultivo expresada por unidad de superficie de suelo se conoce como índice de área foliar (IAF). Cuando el cultivo logra interceptar el 95 % de la RFA incidente se logra la máxima tasa de crecimiento del cultivo y se ha alcanzado el IAF crítico (Arguisain, 1990).

### 2.1.1.4. Agua

El contenido de agua disponible en el suelo es el principal factor, en condiciones extensivas que limita el crecimiento y rendimiento en maíz. En condiciones templadas de nuestra región el consumo total de agua durante el ciclo del cultivo oscila alrededor

de 550 mm promedio (Totis de Keljkovich y Robella 1980, Otegui 1992, Andrade y Gardiol 1995).

Otra característica en relación con el agua es la sensibilidad diferencial a las deficiencias hídricas de acuerdo a la etapa fenológica en que se produzca. Durante pre-floración, floración hasta cuajado del grano (período crítico), cualquier estrés de esta índole producirá mermas muy importantes del rendimiento. En períodos vegetativos el crecimiento se asocia a la fijación de CO<sub>2</sub>, las deficiencias hídricas afectan a este factor por medio de la transpiración en la apertura y cierre estomático, de manera que una disminución en la tasa transpiratoria producirá una disminución de la fijación de CO<sub>2</sub> y de la tasa fotosintética, determinando una caída en la producción de biomasa y así afectaría el índice de cosecha (Hanks 1983, Sinclair et al. 1984). En consecuencia, el crecimiento de la planta se ve reducido cuando el contenido hídrico en la zona radicular se encuentra por debajo del 40-60 % de la fracción de agua disponible en el suelo para el cultivo, dependiendo de la sensibilidad de la etapa fenológica en que se encuentre el cultivo (Shaw 1988, Muchow y Sinclair 1989).

### **2.1.2. Descripción del ciclo ontogénico de la planta de maíz**

Una de las escalas más utilizadas para describir el desarrollo del cultivo de maíz es la de Ritchie y Hanway (1982) que denomina con una V (vegetativo) a los estadios previos a floración y con una R (reproductivo) a los que le siguen a esa etapa. A continuación se describe la escala propuesta por dichos autores.

#### **2.1.2.1. Período vegetativo: germinación y emergencia (VE)**

En el embrión se encuentran ya diferenciadas las primeras hojas (en general 5) y la radícula. Para una buena germinación la semilla debe absorber entre un 30 y 40 % de su peso en agua (Sadrás et al., 2002a). Durante la germinación primero aparece la radícula y luego la plúmula cubierta por el coleoptile. Luego comienzan a desarrollarse las raíces seminales y se elonga el mesocótilo elevando a la plúmula a la superficie. Asumiendo que no hay mayores restricciones para la germinación y emergencia se puede predecir el tiempo de emergencia de un cultivo de maíz considerando un requerimiento de 61 °C día por sobre una temperatura base de 9,8 °C (Angus et al., 1981). Una vez emergida la planta el ápice diferencia hojas (plastocrón) a una tasa de 21 °C día hoja tomando como Tb 8 °C (Ritchie y Nesmith, 1991). Al final de esta etapa la planta se encuentra con dos hojas emergidas y el ápice se encuentra a 3 cm por debajo de la superficie del suelo.

## **Diferenciación, formación y expansión de hojas**

El número final de hojas de la planta estará dado por el genotipo y el ambiente dado durante el período de crecimiento (Cárcova et al., 2003). Para identificar los estadios durante la formación y expansión de hojas se utiliza el subíndice  $V_n$  el cual indica el número de hojas totalmente expandidas (lígula visible a simple vista) al momento. Durante toda la emisión de hojas el meristema apical permanece bajo el nivel del suelo formando primordios de hojas y yemas axilares en sucesión acrópeta. Durante esta etapa aparecen hojas con un filocrono que varía entre 38 y 45 °C día tomando 8 °C como  $T_b$  (Ritchie y Nesmith, 1991). Luego comienzan a desarrollarse las raíces nodales, también en sucesión acrópeta, y las seminales pierden importancia al ser reemplazadas por estas últimas.

## **Inducción meristemática o floral (V4-V6)**

El final del período juvenil se da con la inducción del meristema apical e inmediata diferenciación de las espiguillas estaminadas (V6, diferenciación de la panoja), quedando definido el número de hojas y por lo tanto al área foliar potencial alcanzable por la planta (Stevens et al., 1986). El período juvenil tiene una duración de aproximadamente 110 y 390 °C día para híbridos de ciclo corto y largos tropicales respectivamente según Kiniry (1991), mientras que para algunos híbridos utilizados en climas templados en nuestra región se estimó en el entorno de los 165 y 235 °C día (Otegui, 1996a).

Una vez que el meristema se induce comienza a responder al acortamiento de los días acelerando su desarrollo a medida que el fotoperíodo se hace menor. A partir de este momento comienzan a diferenciarse los primordios florales en las yemas axilares que darán origen a la espiga (V7-V9). La primera yema axilar en diferenciarse es la de la quinta a séptima hoja por debajo de la posición de la panoja, aunque estas son las últimas en pasar de estado vegetativo (diferenciación de chalas) a reproductivo (diferenciación de espiguillas) (Lejeune y Bernier, 1996). En cada yema axilar que comienza su periodo reproductivo cesa la diferenciación de hojas y muy tempranamente queda definido el número de hileras de la espiga (carácter fuertemente controlado por el genotipo) (Otegui 1996a, Otegui y Melon 1997). La diferenciación de las espiguillas progresa a una tasa de 7,7 °C día hasta una o dos semanas antes de la emergencia de estigmas (Sadrás et al., 2002a).

Es durante este estadio (aproximadamente V9) en que queda definido el número potencial de flores y consecuentemente el número potencial de granos por espiga. El tiempo desde la iniciación de la panoja hasta la floración masculina (VT) dependerá de que transcurra la expansión de todos los primordios foliares diferenciados y aun no visibles (Sadrás et al., 2002a).

## **Final del período vegetativo**

La elongación de entrenudos (encañazón) comienza conjuntamente con la inducción meristemática (aproximadamente V6). A medida que se diferencia el ápice los entrenudos se elongan en sentido acrópeto elevándolo, este fenómeno prosigue hasta la floración femenina. El período vegetativo culmina una vez que la inflorescencia masculina (meristema apical) ha salido completamente fuera de la última hoja en formarse en la planta.

### **2.1.2.2. Período reproductivo: panojamiento (VT) y floración (R1)**

Una vez que emerge la totalidad de la inflorescencia masculina a través del cogollo (VT: panojamiento) se produce la antesis (aparición de anteras de las flores de la panoja) y comienza la liberación de polen. La misma progresa hacia la base del eje y hacia las ramificaciones de la inflorescencia. La emisión de polen puede extenderse algunos días pero a nivel de cultivo el desfase entre plantas asegura la polinización por varios días. En este estadio la planta alcanza su máxima altura y área foliar (Sadrás et al., 2002a).

La floración femenina (R1) consiste en la emergencia de los estigmas desde las chalas de la espiga. En general los primeros estigmas en aparecer pertenecen a espiguillas del tercio inferior de la espiga ya que se desarrollaron antes. Los de la mitad de la espiga o tercio superior, si bien son más tardíos en su desarrollo, deben recorrer una menor distancia para emerger, lo que la emergencia se da prácticamente al mismo tiempo que los primeros. Cuando un estigma es fecundado, cesa su crecimiento inmediatamente de lo contrario continua con su crecimiento hasta 10 días luego de su emergencia. No obstante la receptividad de los estigmas cae marcadamente a partir del sexto día de su emergencia. A nivel de todo el cultivo la duración del proceso de emergencia de estigmas es variable según las condiciones ambientales y el genotipo.

Una mayor sincronía floral en el desarrollo de ambas inflorescencias (masculina y femenina) aumenta la posibilidad de fecundación de una gran cantidad de espiguillas en condiciones de campo. En ausencia de restricciones ambientales la emergencia de estigmas ocurre un par de días después de la antesis (protandria), sin embargo en condiciones ambientales favorables y baja densidad de plantas el proceso puede invertirse apareciendo primero los estigmas que las anteras (protoginia). Situaciones de restricciones hídricas, nutricionales, de baja irradiancia o altas densidades de plantas pueden postergar la liberación de polen, pero fundamentalmente provocar un importante retraso en la emergencia de estigmas, afectando el número final de granos por espiga (Hall et al., 1982).

El número de óvulos fecundados queda definido al final de la liberación de polen, sin embargo el número de granos por planta puede disminuir durante el periodo



de cuajado (R2). El mismo se extiende de 10 a 20 días luego de culminada la floración, dependiendo de la temperatura y el genotipo considerado (Cirilo y Andrade 1994, Otegui y Andrade 2000). Es aquí donde queda definido el principal determinante del rendimiento: el número de granos por espiga. El número de espigas granadas por planta (prolificidad) depende del material genético y la disponibilidad de recursos por planta, principalmente en el período que transcurre entre 15 días pre-floración hasta la floración femenina (Cárcova et al., 2003).

### **Llenado de grano (R2, R3, R4, R5) y madurez fisiológica (R6)**

El período de llenado de los granos se extiende desde la fecundación hasta la madurez fisiológica. El cuajado (R2) constituye una fase de activa división celular donde se generan las células espermáticas del grano (Otegui y Andrade, 2000). Durante R3 (grano lechoso) el grano ya formado comienza una fase de llenado efectivo o crecimiento lineal donde se produce una gran acumulación de almidón, mientras que el aumento en el número de células por división es mínimo. Limitantes ambientales, nutricionales o sanitarios durante esta etapa causan principalmente disminución del peso final de los granos y casi insignificantes pérdidas en el número de granos por planta (Sadrás et al., 2002a).

Dado la continua acumulación de almidón en el endosperma, el grano comienza a volverse pastoso (R4, aproximadamente 25 días post-floración). Al final de esta etapa se ha completado la diferenciación de hojas embrionarias y raíces seminales laterales de la semilla (Sadrás et al., 2002a). El estadio de R5, grano duro o dentado, se alcanza aproximadamente a los 40 días de ocurrida la floración. Los granos pierden humedad desde la parte superior donde se genera una capa blanca de almidón de consistencia sólida.

La acumulación de materia seca se hace máxima y cesa en madurez fisiológica (R6) con la necrosis de los haces vasculares que conectan el grano con los tejidos maternos (capa negra) (Daynard y Duncan, 1969). Queda así definido el rendimiento del cultivo ya que a partir de este momento solo se pierde humedad a tasas controladas por las condiciones del ambiente (Otegui y Slafer, 1996b). Dependiendo del genotipo el tiempo térmico entre floración y madurez fisiológica varía entre 600 y 900 °C días (Cirilo y Andrade 1994, Sadrás et al. 2002a).

### **2.1.3. Fisiología de la generación del rendimiento**

Tanto en maíz como en la mayoría de los cultivos existe una estrecha relación entre rendimiento en grano y producción de biomasa aérea, la cual depende de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el canopeo (Otegui y Melon, 1997). El maíz por su sistema fotosintético (C4) presenta una alta eficiencia en la conversión de la radiación en biomasa. Sin embargo la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) varía

con la temperatura, disminuyendo cuando se dan temperaturas frescas (Andrade et al., 1993), y con la etapa del ciclo considerada (Otegui et al., 1995b). También relaciones fuente-fosa altas durante el llenado de granos determinan disminuciones en la EUR en post-floración (Borrás y Otegui, 2001).

Considerando que el valor de EUR es relativamente constante (Andrade et al., 1996), la producción de biomasa dependerá fundamentalmente de la duración del ciclo del cultivo y de la eficiencia con que capture la luz. La no variación que existe en el índice de cosecha cuando no hay déficits hídricos (Sinclair et al., 1990) ni temperaturas de crecimiento bajas (Wilson et al., 1995) hace que los mayores rendimientos se alcancen con mayores valores de biomasa total.

La variable que más se asocia a la cantidad de radiación interceptada es la eficiencia de intercepción de luz ( $e_i$ ) por parte del cultivo. Esta está fuertemente asociada a la generación y mantenimiento del área foliar. El manejo adecuado de la fecha de siembra, densidad de plantas y uniformidad de siembra, asociado principalmente a la temperatura cobran mucha importancia en la maximización del índice de área foliar, e indirectamente una mayor  $e_i$ .

En comparación con otros cultivos cultivados en similares ambientes como soja y girasol, la mayor cantidad de radiación interceptada a lo largo de la estación de crecimiento (800, 720, 700  $Mj. m^{-2}$ , para maíz, soja y girasol respectivamente) sumado a la mayor eficiencia de conversión del maíz (2,77  $g. MJ^{-1}$ , comparado con 1,9  $g. MJ^{-1}$  para girasol y 1,7  $g. MJ^{-1}$  para la soja) hace que este cultivo presente una producción de biomasa muy superior a los anteriormente nombrados.

### **2.1.3.1. Componentes más importantes en la generación del rendimiento**

Una de las formas de determinar el rendimiento en grano de un cultivo de maíz es multiplicar el número de granos producidos por su peso promedio. El número de granos por unidad de superficie es función del número de granos por espiga, el número de espigas por planta y el número de plantas por unidad de superficie (población). Por otra parte el peso de los granos está dado por la duración del período de llenado de granos y la tasa de llenado (Andrade et al., 1996).

#### **Número de granos**

En maíz el componente que más se asocia al rendimiento es el número de granos logrados por unidad de superficie (NG), presentando un coeficiente de correlación de 0,92 (Andrade et al., 1996). Sin embargo la generación de estructuras capases de dar origen a un grano no sería un factor determinante del número final de granos a cosecha. Varios autores (Cirilo y Andrade 1994, Otegui y Melon 1997, Otegui y Andrade 2000)

señalan que tiene mayor efecto en el rendimiento aumentar la sobrevivencia de dichas estructuras que el número potencial de granos.

Para este cultivo en particular el NG queda definido en el entorno a la floración (entre 15 y 20 días antes y después de anthesis). Es por eso que a ese lapso de tiempo pre y post-floración se lo considera como el período crítico del cultivo. Estrés hídricos (Hall et al. 1981, Westgate y Boyer 1986, Grant et al. 1989) o lumínicos (Fisher y Palmer 1984, Kiniry y Ritchie 1985) provocan mayores mermas en el rendimiento si se dan durante este período que coincide con el crecimiento activo de la espiga, emergencia de estigmas, polinización y fecundación e inicio de llenado de grano o cuajado.

Existe una estrecha relación entre la tasa de crecimiento por planta (TCP) durante el período crítico y la capacidad de fijar granos (Andrade et al., 1999) ya que es un indicador de la condición fisiológica de la planta. La TCP depende de numerosos factores como densidad de siembra, temperatura, radiación, disponibilidad de agua y nutrientes y del material genético (Otegui y Andrade 2000, Andrade et al. 2002). La respuesta a la TCP en el NG se caracteriza por un umbral por debajo del cual no se produce fijación de granos, un valor de TCP por encima del cual incrementos en la TCP no generan casi aumento en el NG, y un umbral de TCP donde se logra obtener prolificidad (más de una espiga por planta) (Andrade et al., 2002).

La dinámica de polinización (sincronía entre espigas y dentro de espigas (Cárcova et al. 2000, Cárcova y Otegui 2001), dinámica de emisión de estigmas (Uribarrea et al., 2002), además de la disponibilidad de asimilados, son otros de los factores que afectan el número final de granos logrados.

### **Peso de granos**

Aunque el peso del grano (PG) es considerado el componente más estable del rendimiento es muy importante en la generación del mismo. El llenado del grano comienza a partir de la fecundación del ovario. Existen varias etapas durante el llenado, la primera es conocida como fase “lag”. Se caracteriza por ser una etapa de alta división celular y lenta acumulación de materia seca donde se establece el número de células endospermáticas y se generan los amiloplastos para la futura deposición de almidón (Reddy y Daynard, 1983). Esta fase se superpone con el período post-floración y de determinación del número de granos (período crítico), lo que es de gran importancia en la concreción del rendimiento (Cirilo y Andrade, 1994).

En maíz el PG se encuentra muy asociado tanto al número de células endospermáticas como a la cantidad de gránulos de almidón formados (Capitano et al. 1983, Reddy y Daynard 1983) ya que es en esta etapa donde se define la capacidad potencial de acumulación de reservas. Temperaturas muy elevadas durante la fase

pueden disminuir el peso potencial del grano por un menor número de células endospermáticas formadas (Jones et al., 1985) determinando un menor PG.

Le sigue una fase de “llenado efectivo” donde se da más del 80 % de la acumulación de materia seca en el grano. Altos PG se asocian a períodos de llenado efectivo largos, altas tasas de llenado durante esta fase y altos valores de gránulos de almidón por grano en todo el endosperma (Reddy y Daynard, 1983). Variaciones de las condiciones ambientales, tales como altas temperaturas (Thompson, 1986), baja radiación (siembras muy tardías) (Wilson et al., 1995), tanto como la cantidad de fuente disponible por grano (Tollenaar y Daynard, 1978) son los responsables del peso final de los mismos. Por último existe una relación negativa entre NG y PG a madurez fisiológica, a medida que aumenta el número de granos por planta, aumenta el rendimiento, pero el peso medio de los granos disminuye (Borrás y Otegui, 2001).

## **2.2. MODELO DE SIMULACIÓN: CROPSYST**

Las primeras referencias de modelos de simulación de crecimiento de cultivos datan de la década del 70'. Recién en los 80' aparecieron las primeras versiones de modelos orientados al apoyo en la toma de decisiones de manejo de cultivos como el riego suplementario y los controles de plagas, malezas y enfermedades y hacia fines de la década se reportaron antecedentes de uso y aplicaciones de los modelos generados en sistemas comerciales. El desarrollo de CropSyst comenzó en los primeros años de la década del 90 a raíz de una importante demanda por modelos de simulación que abarcarán rotaciones y no cultivos aislados (Stockle y Campbell, 1989).

Para el análisis de sistemas de producción agrícola resulta de vital importancia la capacidad de simular rotaciones de cultivos para evaluar su impacto económico y ambiental. Los modelos CERES y CROPGRO incluidos en la carcasa DSSAT pueden ser utilizados en el diseño y evaluación de rotaciones (Jones et al., 1985). Sin embargo DSSAT tuvo dificultades en integrar diversas plataformas de simulación que permitieran simplificar la simulación de rotaciones de cultivos (Jones et al., 1985). El desarrollo del modelo EPIC permitió alcanzar estos objetivos, sin embargo este modelo presentó limitantes en cuanto a la precisión en la simulación y descripción de los procesos biofísicos involucrados en el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

Cropsyst fue diseñado siguiendo la línea de EPIC, pero incorporando mayor precisión en la simulación del crecimiento de los cultivos y su interacción con el ambiente y las prácticas de manejo. También se atribuyó mucha importancia al diseño del software para mantener un equilibrio entre la precisión alcanzada en las simulaciones y la facilidad de uso y acceso al programa desde sus comienzos (Stockle y Campbell, 1989). Se trata de un modelo de simulación de paso diario capaz de abarcar varios cultivos y varios años. Fue desarrollado como una herramienta analítica para el estudio

del efecto del clima, del suelo y del manejo de los cultivos en la productividad de los sistemas agrícolas y sobre el ambiente (Stockle y Campbell, 1989).

Este modelo simula evolución de contenido de agua y nitrógeno en el suelo, desarrollo fenológico, producción de biomasa, crecimiento aéreo (área foliar) y radical, rendimiento en grano, producción y descomposición de residuos y erosión del suelo. Estos procesos están afectados por factores diversos como el clima, características del suelo, del cultivo y medidas de manejo como rotación de cultivos, elección del cultivar, riego, fertilización, laboreos, y manejo de rastrojos (Stockle y Nelson, 1999).

A continuación se describirá la forma en que CropSyst modela todos los procesos relacionados al ciclo del nitrógeno en el suelo. La forma en que se simulan otros procesos como el uso del agua y la radiación son abordados por Baroffio y Ramos (2009).

### **2.2.1. Simulación de los procesos relacionados al ciclo del nitrógeno**

CropSyst simula los siguientes procesos relacionados al nitrógeno (N): transporte, transformación, absorción por parte del cultivo, fijación biológica y mineralización neta por parte de los residuos del suelo. En maíz por tratarse de una gramínea no existe fijación biológica de N lo que no se tratará ya que no se hará uso de ese “in put” para este cultivo.

#### **2.2.1.1. Transporte de N en suelo**

El transporte de N ha sido modelado de muchas formas por distintos autores (Murali y Aylmore 1981, Rose et al. 1982, Flerchinger 1987, Wagnet y Hudson 1989, Corwin et al. 1991). CropSyst ha tomado el modelo propuesto por Corwin et al. (1991) que si bien es mas simplista que los anteriores en su estimación del proceso se adapta mejor en este tipo de modelos de simulación que involucran muchos procesos en los ciclos de rotaciones de cultivos.

El método consiste en aplicar los conceptos propuestos por Corwin et al. (1991) y estudiar el transporte del N en el suelo en un momento del día, en aquellos días en que existe infiltración de agua al suelo. Estos autores proponen un coeficiente del bypass (CB) que describe la fracción de agua en el perfil que no es desplazada hacia capas más profundas, mientras que 1-CB hace referencia a la fracción de agua en el suelo que es desplazada de la capa donde se encuentra por el agua que infiltra. A este desplazamiento del agua presente en el perfil por el agua que infiltra Corwin lo llama “desplazamiento de tipo pistón”.

Cuando el agua infiltra a una capa de suelo, si el agua es suficiente, llena la capa hasta capacidad de campo. De seguir entrando al perfil, el agua comienza a desplazar la “fracción móvil” del agua presente en el suelo hasta que la desplaza totalmente (si el agua que infiltra es suficiente). Una vez desplazada toda el agua que estaba en el suelo previo a la infiltración, la misma que entra al suelo percola hacia capas más profundas.

Dependiendo del contenido inicial y de la cantidad de agua infiltrada para alcanzar una capa de suelo, la concentración de N del agua remanente y de la que fluye hacia capas más profundas puede calcularse de tres formas.

- 1<sup>er</sup>. caso: el agua que infiltra es capaz de llevar a la capa de suelo a capacidad de campo y desplazar a toda la fracción móvil del agua existente en la capa de suelo. La concentración de N de la capa se calcula como se muestra a continuación.

$$CN_{A.Despl.} = \frac{\overbrace{(P_{Inf.} * CN_{A.Ent.})}^{\text{Cantidad total de N aportado por el agua entrante a la capa.}} - \overbrace{\{P_c * CN_{A.Ent.} [CC - (CB * A_{pre-inf.})]\}}^{\text{Cantidad de N en la capa aportado por el agua infiltrada hasta llegar a capacidad de campo.}} + \overbrace{[P_c * CN_{pre-inf.} (1 - CB) A_{pre-inf.}] }^{\text{Capacidad de almacenaje de agua de la capa hasta capacidad de campo, menos agua "inmovil".}}}{P_{A.Despl.}} + \overbrace{[P_c * CN_{pre-inf.} (1 - CB) A_{pre-inf.}] }^{\text{Cantidad de N del agua móvil de la capa, (agua desplazada).}}$$

[3]

Donde:

$CN_{A.Despl.}$  ( $kg\ N\ m^{-3}\ H_2O$ ) es la concentración de N del agua desplazada de la capa;

$P_{Inf.}$  (m) es la profundidad de infiltración del agua en el suelo;

$CN_{A.Ent.}$  ( $kg\ N\ m^{-3}\ H_2O$ ) es la concentración de N del agua que infiltra a la capa;

$P_c$  (m): es la profundidad de la capa;

$CC$  ( $m^3\ H_2O\ m^{-3}\ suelo$ ) es capacidad de campo;

$CB$  (0-1) es el coeficiente de “bypass”;

$A_{pre-inf.}$  ( $m^3\ H_2O\ m^{-3}\ suelo$ ) es el contenido de agua del suelo anterior a la infiltración;

$CN_{pre-inf.}$  ( $kg\ N\ m^{-3}\ H_2O$ ) es la concentración de N del agua en suelo previo a la infiltración;

$P_{A.Despl.}$  (m) es la profundidad de infiltración del agua desplazada hacia capas más profundas.

- 2<sup>do</sup>. caso: la cantidad de agua que infiltra a la capa no es suficiente para desplazar completamente la fracción móvil del agua del perfil pero es suficiente como para llevar el suelo a capacidad de campo. Entonces,

$$CN_{A.Despl.} = CN_{pre-inf.}$$

[4]

- 3<sup>er</sup>. caso: la cantidad que infiltra no es suficiente para llevar el suelo a capacidad de campo.

$$CN_{A.Despl.} = 0$$

[5]

### 2.2.1.2. Transformaciones del N en el suelo

CropSyst modela los siguientes procesos de transformación del N: mineralización, nitrificación, denitrificación y absorción del amonio. Los mismos se simulan usando cinéticas de primer orden (Stöckle y Campbell, 1989) y se asume que se dan entre los 30 y 50 cm de profundidad del perfil.

#### • Mineralización

La cantidad de N mineralizado proveniente de la materia orgánica (MO) se calcula de la siguiente manera.

$$NMO_{min.} = NMO_{Pot.min.} (1 - M * e^{(-k_{min.} * \Delta t)})$$

[6]

Donde:

$NMO_{min.}$  (kg ha<sup>-1</sup>) es el N orgánico mineralizado en un tiempo t (1 día);

$NMO_{Pot.min.}$  (kg ha<sup>-1</sup>) es el potencial de N orgánico capaz de ser mineralizado;

$M$  es la función del mojado del suelo;

$k_{min.}$  (d<sup>-1</sup>) es la constante de la tasa de mineralización de la MO;

$\Delta t$  (d) es el tiempo.

La constante de la tasa de mineralización se calcula con la fórmula mostrada debajo.

$$k_{min.} = \frac{1}{7} e^{\left[ \frac{17,753 - 6350,6}{T_{s.} - 273} \right]}$$

[7]

Donde:

$T_{s.}$  (°C) es la temperatura del suelo;

**273** se utiliza para convertir grados Celsius a grados Kelvin.

M es dependiente de la fracción del espacio de poros ocupado por agua y se determina de la siguiente manera:

$$\mathbf{M} = \begin{cases} 1,11 & \text{si } S \leq 0,9 \\ 10 - (10 * DS) & \text{si } S > 0,9 \end{cases}$$

Donde:

DS (0-1) es el grado de saturación del suelo con agua. Se obtiene de la siguiente ecuación.

### • Nitrificación

La cantidad diaria de amonio nitrificado se calcula usando:

$$\mathbf{NIT} = \mathbf{NH}_4(1 - e^{(-k_{nit} * \Delta t)})\mathbf{M}$$

[8]

Donde:

**NIT** (kg NH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>) es el amonio transformado en nitrato en el tiempo t (1 día);

**NH<sub>4</sub>** (kg ha<sup>-1</sup>) es el amonio disponible para la nitrificación;

**k<sub>nit</sub>** (1 d<sup>-1</sup>) es la constante de la tasa de nitrificación;

**Δt** (d) es el tiempo;

**M** es la función del mojado del suelo.

La constante de la tasa de nitrificación está dada por la misma a 35 °C, multiplicado por una función de la temperatura del suelo.

$$k_{nit} = \begin{cases} (0,0105 * T_s + 0,00095 * k_{nit,35^\circ C}) & \text{si } T_s \leq 10^\circ C \\ (0,032 * T_s - 0,12) k_{nit,35^\circ C} & \text{si } 10^\circ C \leq T_s \leq 35^\circ C \\ (0,1 * T_s + 4,5) k_{nit,35^\circ C} & \text{si } T_s > 35^\circ C \end{cases}$$

[9, 10, 11]

$$k_{nit,35^\circ C} = 0,8 \text{ (1/día)}$$

[12]

Donde:

**K<sub>nit, 35 °C</sub>** es la constante de la tasa de nitrificación a 35 °C;



$T_s$  (°C) es la temperatura del suelo.

- **Desnitrificación**

La cantidad que ocurre diariamente de desnitrificación se determina por:

$$DNIT = NO_3 (1 - e^{(-k_{Denit} \cdot \Delta t)}) \quad [13]$$

Donde:

**DNIT** (kg N ha<sup>-1</sup>) es el nitrato desnitrificado a N gaseoso en el tiempo t (1 día);

**NO<sub>3</sub>** (kg ha<sup>-1</sup>) es el nitrato disponible para la desnitrificación;

**k<sub>Denit.</sub>** (1 d<sup>-1</sup>) es la constante de la tasa de desnitrificación;

**Δt** (d) es el tiempo.

La  $k_{Denit.}$  se determina de la tasa de desnitrificación a 15 °C modificado por una función de la temperatura del suelo y una función del agua del suelo.

$$k_{Denit.} = \begin{cases} (0,67 * e^{(0,43 * (T_s - 10))} * k_{Denit. 15^\circ C} * CCA) \dots \dots \dots \text{ si } T_s \leq 10^\circ C \\ (e^{(0,08 - (T_s - 15))} * k_{Denit. 15^\circ C} * CCA) \dots \dots \dots \text{ si } T_s > 10^\circ C \end{cases} \quad [14, 15]$$

Donde:

$T_s$  (°C) es la temperatura del suelo;

**k<sub>Denit. 15 °C</sub>** (1 d<sup>-1</sup>) es la constante de la tasa de desnitrificación a 15 °C;

**CCA** es el corrector del contenido de agua en suelo. Está dado por la siguiente ecuación.

$$CCA = e^{(0,304 + 2,94 * CA_{Sat.} - CA) - (47 (CA_{Sat.} - CA)^2)} \quad [16]$$

Donde:

**CA<sub>sat.</sub>** (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) es el contenido de agua del suelo saturado;

**CA** (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) es el contenido de agua en suelo.

- **Absorción de amonio**

En amonio en el suelo es adsorbido tanto por la fase sólida como por la fase

líquida del suelo, y de esta manera es capaz de moverse con el agua. Por medio de la relación de Langmiur se puede obtener el contenido de amonio existente en la fase sólida y líquida del suelo.

$$\text{NH}_{4\text{Ret.}} = \frac{k * q * \text{NH}_{4\text{s.}}}{1 + C * \text{NH}_{4\text{s.}}} \quad [17]$$

Donde:

$\text{NH}_{4\text{Ret.}}$  (kg kg<sup>-1</sup> suelo) es el amonio retenido en sitios de intercambio;  
 $k$  y  $q$  (kg kg<sup>-1</sup>) son las constantes según tipos de suelos y solutos;  
 $\text{NH}_{4\text{s.}}$  (kg kg<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O) es el amonio en la solución del suelo.

El contenido total de amonio en una capa de suelo está relacionado con el amonio en solución y el amonio adsorbido.

$$\text{NH}_{4\text{Tot.}} = (\text{NH}_{4\text{Ads.}} + \text{A}_{\text{gr.}} * \text{NH}_{4\text{s.}}) \text{D}_{\text{ap.}} \quad [18]$$

Donde:

$\text{NH}_{4\text{Tot.}}$  (kg m<sup>-3</sup>) es el amonio total en el suelo;  
 $\text{NH}_{4\text{Ads.}}$  (kg kg<sup>-1</sup> suelo) es el amonio adsorbido en suelo;  
 $\text{A}_{\text{gr.}}$  (kg kg<sup>-1</sup> suelo) es el contenido de agua gravimétrica;  
 $\text{NH}_{4\text{s.}}$  (kg m<sup>-3</sup>) es la concentración de amonio en la solución del suelo;  
 $\text{D}_{\text{Ap.}}$  (tt cm<sup>-3</sup>) es la densidad aparente.

Combinando ambas ecuaciones (amonio total y amonio retenido en sitios de intercambio) se obtiene una ecuación cuadrática donde se obtiene la cantidad de amonio en solución.

### 2.2.1.3. Absorción de N del suelo por parte de las plantas

De manera de estimar la absorción de N por parte del cultivo CropSyst utiliza el modelo propuesto por Godwin y Jones (1991). El mismo determina que la absorción resulta del mínimo entre la demanda de N por parte del cultivo para alcanzar el crecimiento potencial (ya corregido por limitantes de radiación, agua, temperatura o algún otro nutriente) y el potencial de absorción del nutriente.

La demanda de N por el cultivo se calcula de la siguiente manera.

$$\text{DN}_{\text{cult.}} = [(\text{CN}_{\text{max.}} - \text{CN}_{\text{p}}) * (\text{BA}_{\text{p.}} + \text{BR}_{\text{p}})] + [\text{CN}_{\text{max.}} * (\text{BA}_{\text{p.-m.}} + \text{BR}_{\text{p.-m.}})]$$

[19]

Donde:

**DN<sub>cult.</sub>** (kg N ha<sup>-1</sup>) es la demanda de N por parte del cultivo;  
**CN<sub>max.</sub>** (kg N kg de MS<sup>-1</sup>) es la máxima concentración de N en el cultivo;  
**CN<sub>p.</sub>** (kg N kg de MS<sup>-1</sup>) es la concentración de N en planta previa al nuevo crecimiento;  
**BA<sub>p.</sub>** (kg ha<sup>-1</sup>) es la biomasa aérea acumulada previa al nuevo crecimiento;  
**BR<sub>p.</sub>** (kg ha<sup>-1</sup>) es la biomasa radicular acumulada previa al nuevo crecimiento;  
**BA<sub>p.-m.</sub>** (kg ha<sup>-1</sup>) es el crecimiento potencial en biomasa aérea desde el presente hasta la madurez del cultivo;  
**BR<sub>p.-m.</sub>** (kg ha<sup>-1</sup>) es el crecimiento potencial en biomasa radicular desde el presente hasta la madurez del cultivo.

El primer término de la ecuación calcula el déficit de N que presenta el cultivo, mientras que el segundo estima la demanda potencial que tendrá el cultivo desde el presente hasta la madurez. Es posible obtener deficiencias de N negativas, esto sucede cuando el cultivo madura y concentración máxima de N decae más rápido que el crecimiento del cultivo. En estos el aporte de N por parte del suelo es suficiente.

La absorción potencial de N se calcula como la sumatoria del valor obtenido para cada capa del suelo.

$$N_{\text{Abs. pot. 1}} = N_{\text{Abs. max.}} * LR * D_N * AD_{\text{Relat.}}^2 \quad [20]$$

Donde:

**N<sub>Abs. pot.1</sub>** (kg N ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>) es el potencial de N absorbido por el cultivo de la capa 1 del suelo;  
**N<sub>Abs.max.</sub>** (kg N m<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>) es la máxima absorción de N por las raíces;  
**LR<sub>1</sub>** (m ha<sup>-1</sup>) es la longitud de las raíces en capa 1;  
**D<sub>N</sub>** (0-1) es el factor de corrección según la disponibilidad del N en el suelo (Godwin y Jones, 1991);  
**AD<sub>Relat.1</sub>** (0-1) es el agua disponible relativa en el suelo para las plantas en capa 1.

Según Godwin y Jones (1991) la disponibilidad con que se presenta el N en el suelo puede calcularse de la manera siguiente.

$$D_N = 1 - e^{(-K * CN_{s,1})} \quad [21]$$

Donde:

**K** es la constante para nitrato (0,0275) y amonio (0,2025);  
**CNs.1** (kg ha<sup>-1</sup>) es la concentración de N en el suelo para la capa 1.

Mientras que el agua disponible relativa para cada capa de suelo se obtiene por la ecuación.

$$\mathbf{AD}_{\text{Relat.1}} = \frac{\mathbf{AD}_1 - \mathbf{PMP}_1}{\mathbf{CC}_1 - \mathbf{PMP}_1} \quad [22]$$

Donde:

**AD<sub>1</sub>** (mm<sup>3</sup> mm<sup>-3</sup>) es el agua disponible en la capa 1 de suelo;  
**PMP<sub>1</sub>** (mm<sup>3</sup> mm<sup>-3</sup>) es el punto de marchitez permanente de la capa 1 del suelo;  
**CC<sub>1</sub>** (mm<sup>3</sup> mm<sup>-3</sup>) es la capacidad de campo en la capa 1 del suelo.

#### 2.2.1.4. Mineralización del N presente en los residuos

En la descomposición de residuos existe mineralización de N. El N es tomado o liberado al suelo dependiendo de la relación carbono/nitrógeno del material en descomposición.

Según Shaffer et al. (1991) la cantidad de N mineralizado a partir de la descomposición de residuos orgánicos se calcula de la siguiente manera.

$$\mathbf{N}_{\text{min.neta}} = \Delta\mathbf{R} * \mathbf{C}_{\text{MO}} \left[ \frac{1}{\mathbf{R}_{\text{C/N}} - 0,042} \right] \quad [23]$$

Donde:

**N<sub>min. neta</sub>** (kg m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) es el N neto mineralizado a partir del residuo en un día;  
**ΔR** (kg m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) es el residuo descompuesto en un día;  
**C<sub>MO</sub>** es la proporción de C en la materia orgánica. Tomado como 0,4;  
**0,42** es el inverso a una relación C/N igual a 24;  
**R<sub>C/N</sub>** es la relación C/N del residuo. Se determina con la formula presente a continuación.

$$\mathbf{R}_{\text{C/N}} = \frac{\mathbf{C}_{\text{MO}} * \mathbf{m}_r}{\mathbf{N}_r} \quad [24]$$

Donde:

$N_r$ . ( $\text{kg m}^{-2}$ ) es el contenido de N del residuo;  
 $m_r$ . ( $\text{kg m}^{-2}$ ) es la masa de residuo del día.

Supuestos:

- la mineralización neta del N presente en residuos da valores negativos o cero a relaciones C/N mayores o iguales a 24.
- la relación C/N de los microbios del suelo es 6 (Shaffer et al., 1991).

Si  $N_{\text{min. neta}}$  es negativa se extrae N mineral del pool del suelo cuyo límite está dado por el contenido de N mineral disponible en el suelo. Esto sucede mayoritariamente en las primeras etapas de la descomposición de residuos frescos pobres en N (altas relaciones C/N). Al avanzar la descomposición el incremento de la microfauna comienza a estabilizarse, la relación C/N disminuye y comienza a hacerse disponible el N mineralizado.

El contenido de N remanente en los residuos debe ser diariamente recalculada ya que es un proceso en cambio continuo.

$$N_r = N_r - N_{\text{min. neta}}$$

[25]

El 80 % del N liberado fruto de la descomposición de residuos orgánicos pasa a formar parte del pool de amonio del suelo mientras que el 20 % restante va a ser parte del pool de N asociado a la fase estable de la MO.

### 2.2.1.5. Fertilización con N

La fertilización nitrogenada puede efectuarse de las siguientes formas y sus combinaciones: enmiendas orgánicas,  $\text{NH}_3$  orgánico,  $\text{NH}_4$  y  $\text{NO}_3$ . Las aplicaciones pueden ser planificadas en fechas determinadas o de lo contrario el modelo cuenta con una función en que agrega N automáticamente. De la primera forma, es posible aplicar cualquier forma de las ya citadas, en el momento (día) deseado. Si se deja correr automáticamente, el modelo mantiene cubiertos los requerimientos del cultivo constantemente actualizando los niveles de N diariamente. Bajo esta forma el crecimiento nunca será limitado por N.

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TRABAJO**

El trabajo contó con dos ensayos de campo en donde se instalaron parcelas experimentales con el objetivo de realizar las mediciones necesarias que permitan calibrar y validar el modelo de simulación CropSyst para un cultivar de maíz. Los ensayos se instalaron en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni sobre el km 363 de la ruta 3, departamento de Paysandú, Uruguay (32° 22' S 58° 03' W).

Los suelos sobre los que se desarrollaron los ensayos corresponden a brunosoles éutricos y subéutricos ubicados sobre la formación Fray Bentos, unidad San Manuel de la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (Altamirano et al., 1976, escala 1:1.000.000). Pertenecen al grupo de suelos 11.3, presentando fertilidad alta, textura franco arcillo limosa y drenaje moderado a imperfecto con presencia de “blanqueales”. Las pendientes varían entre 2 y 6 % y la profundidad del perfil de suelo varía entre 30 y 105 cm según la parcela.

#### **3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL**

No existe un diseño experimental en particular sino que simplemente se seleccionaron sitios de muestreo dentro de las parcelas, en los cuales se realizan las mediciones pertinentes. La variabilidad buscada en los sitios tuvo el objetivo de generar una base de datos lo suficientemente heterogénea que permita lograr la calibración del modelo.

#### **3.3 MANEJO DEL CULTIVO**

La siembra se realizó en la totalidad de las parcelas el 6 de diciembre del 2007, sin embargo los antecesores no fueron los mismos para todas las situaciones. Algunas parcelas se sembraron sobre una pradera vieja con alta presencia de *Cynodon dactylon* muy bien controlado por una aplicación de herbicida (glifosato) 100 días antes de la siembra, por lo que tuvo un adecuado manejo del barbecho. Otras se instalaron sobre un rastrojo de trigo que fue cosechado el 18 de noviembre, con un rendimiento de 3,2 t ha<sup>-1</sup>, por lo que el largo de barbecho fue de 20 días. Esto trae consigo diferencias importantes entre ambas situaciones, en especial en lo que se refiere a la cantidad de agua presente en el suelo al comienzo del desarrollo del cultivo.

La siembra se realizó con un equipo de siembra directa (Semeato SHM-11 de 4 surcos), a una distancia entre hileras de 0,52 m y 6 semillas m<sup>-1</sup> de manera de lograr una población objetivo de 80 mil plantas m<sup>-1</sup>, suponiendo una germinación de 95 % y una implantación de 80 %). De manera de asegurarse de que el rendimiento no esté limitado

por fósforo y/o nitrógeno a la siembra se aplicaron 52 y 12 unidades de estos nutrientes respectivamente ( $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de 12-52-52-0). Posteriormente, en V6, se aplicaron 70 unidades de nitrógeno  $\text{ha}^{-1}$  en forma de urea al “voleo”. Con el mismo propósito se mantuvo el cultivo libre de plagas mediante la aplicación de un insecticida fisiológico durante V4-5 (Intrepid), así como también se controlaron las malezas pre-siembra mediante la aplicación de glifosato y productos pre-emergentes ( $1 \text{ kg ha}^{-1}$  atrazina y  $2 \text{ l ha}^{-1}$  acetoclor). Una vez instalado el cultivo los controles de malezas se realizaron con aplicaciones de glifosato manuales localizadas.

El híbrido utilizado fue MASS 484 MG del criadero Dow Agrosience. Se trata de un híbrido de ciclo intermedio, 60-70 días a floración y alrededor de 13 días a madurez fisiológica. Es un material que supera levemente en altura a otros híbridos de características similares (puede superar los 2 metros de altura en condiciones de secano).

### **3.4. PARÁMETROS MEDIDOS DEL SUELO**

#### **3.4.1. Textura, materia orgánica y densidad aparente**

Inmediatamente anterior a la siembra se tomaron muestras de suelo con un barreno de 7,5 cm de diámetro de cada sitio, fraccionando las muestras en las siguientes profundidades para las siembras de primera: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-70, 70-100 cm mientras que para el maíz de segunda se fraccionaron de 0-15, 15-30, 30-45, 45-60, 60-75 y 75-90 cm o hasta la profundidad máxima que presentara el suelo. Parte de la muestra fue tamizada a 2 mm, secada en estufa a  $60^\circ\text{C}$  durante 48 horas y posteriormente se le realizó análisis de textura mediante el método de Bouyoucos (1936) y materia orgánica con el método de Nelson y Sommers (1982). La submuestra restante fue utilizada para el cálculo de densidad aparente secándose a estufa de  $105^\circ\text{C}$  durante 48 horas.

#### **3.4.2. Humedad gravimétrica**

Mediante el uso de un calador (1,8 cm de diámetro y 100 cm de largo) se extrajeron muestras de todo el perfil en cada sitio, fraccionándolas de la manera descrita anteriormente para cada caso. Esto se repitió en 5 momentos durante el transcurso del cultivo: V4-5, V10, R1, R2-3 y R3-4.

Estas muestras se colocaron en estufa a  $105^\circ\text{C}$  hasta alcanzar peso constante y luego se calculó humedad gravimétrica con la siguiente ecuación:

$$Hg = (M_T - M_S) / M_S$$

[26]

Donde:

**Hg.** ( $\text{g g}^{-1}$ ) es la humedad gravimétrica, masa de agua en una masa de suelo determinada;  
**Mt.** (g) es la masa total, suelo y agua;  
**Ms.** (g) es la masa de suelo, luego de secado en la estufa.

Posteriormente con el dato de densidad aparente ( $D_{ap}$ ) se procedió a estimar la humedad volumétrica:

$$H_v = H_g \cdot D_{ap}$$

[27]

Donde:

**Hv.** ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) es la humedad volumétrica;  
**D<sub>ap</sub>.** ( $\text{g cm}^{-3}$ ) es la densidad aparente del suelo.

Una forma de expresar el contenido de agua en el perfil de suelo es como lámina de agua, considerando la profundidad de cada estrato en mm y la humedad volumétrica en cada capa. Así se obtienen los mm de agua en todo el perfil.

### **3.4.3. Nitrógeno**

Para la determinación de nitrógeno en suelo (medido en ppm de N-NO<sub>3</sub>) se muestreó de la misma forma que para humedad. Se realizó el muestreo en las mismas fechas que los otros muestreos de suelo. Las muestras se secaron en estufas a 60 °C durante 48 horas y luego fueron molidas para analizar. Las mediciones se realizaron en el laboratorio de Facultad de Agronomía (EEMAC, Paysandú) con la técnica de electrodos de nitratos, mediante un equipo Orion modelo 93-07 y con CaSO<sub>4</sub> como floculante.

## **3.5. PARÁMETROS MEDIDOS DEL CULTIVO**

### **3.5.1. Población y fenología**

En V4-5 y a cosecha se realizaron conteos de plantas en 5 metros lineales para todos los sitios de muestreo, con lo que se calculó la población (plantas ha<sup>-1</sup>).

A partir de la siembra y hasta el final del ciclo del cultivo se realizaron lecturas de fenología aproximadamente cada 15 días. Para ello se usó la escala de Ritchie y Hanway (1973).



### 3.5.2. Biomasa aérea acumulada e índice de área foliar (IAF)

La medición de estos parámetros se realizó mediante el corte al ras del suelo de 2 plantas promedio en el sitio de muestreo. Se realizaron 5 cortes de los cuales se midió biomasa a todos, pero solamente a 3 de esos cortes se le midió IAF. Los estadios en los que se midió IAF fueron V4-5, V10 y R2, y en el caso de biomasa se midieron los anteriores y además en R3-4 y madurez fisiológica.

Para la obtención del IAF se midió el largo y ancho de todas las hojas verdes de las plantas cortadas. Mediante la siguiente fórmula se obtiene el área foliar total:

$$AF = \sum_{h=1}^{h=n} ((L * A) * 0,75)$$

[28]

Donde:

**AF** (m<sup>2</sup>) es el área foliar total;

**n** es el número total de hojas en un corte, sitio de muestreo;

**L** (m<sup>2</sup>) es el largo de la hoja, desde la lígula hasta el ápice;

**A** (m<sup>2</sup>) es el ancho de la hoja en el lugar más ancho.

Luego las muestras (plantas) se secaron en estufas a 60 °C hasta alcanzar un peso constante y se pesaron para calcular la biomasa aérea total (kg MS ha<sup>-1</sup>).

Indirectamente, a través del valor de IAF se estimó la intercepción de luz del cultivo. Para ello se utilizó la siguiente ecuación:

$$R_i = 1 - e^{(-k * IAF)} * (R_{f.a.})$$

[29]

Donde:

**R<sub>i</sub>** (Mj.m<sup>-2</sup>) es la radiación incidente;

**k** es el coeficiente de extinción de la luz;

**IAF** (m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>) es el índice de área foliar;

**R<sub>f.a.</sub>** (Mj. m<sup>-2</sup>) es la radiación fotosintéticamente activa.

### 3.5.3. Rendimiento en grano

El 24 de abril se realizó la cosecha (manual) cortando a ras del suelo 3 hileras de un metro de largo (1,68 m<sup>2</sup>) en cada sitio de muestreo. Se contaron las plantas y mazorcas cortadas y se pesó la totalidad de la muestra en fresco. Luego se trillaron las

mazorcas de cada sitio con una desgranadora manual y se llevó a la estufa a 60 °C durante 2 días de manera de bajar la humedad de los granos a valores por debajo de 14 %. A partir de este dato y la superficie muestreada se estimó el rendimiento en grano por hectárea. También se extrajo una submuestra de las partes no reproductivas (tallo y hojas) de la muestra de cada sitio a las que se midió porcentaje de materia seca en la estufa, y así se estimó la biomasa total producida a cosecha.

### **3.6. CALIBRACIÓN DEL MODELO**

La versión de CropSyst utilizada fue la del 4.09.01 disponible gratuitamente desde el año 2007 en <http://www.bsye.wsu.edu/cropsyst>.

Los coeficientes genéticos del cultivo necesarios para la modelación por CropSyst se pueden obtener de cuatro fuentes distintas: i) mediciones obtenidas en los ensayos a campo; ii) valores citados en la bibliografía disponible; iii) por “default” (valor propuesto por el modelo), y v) tomando el valor obtenido de la calibración, producto de correr el modelo hasta que el resultado de la predicción coincida con los valores obtenidos en los ensayos de campo, y corroborando que estos valores estén dentro de valores posibles citados en la bibliografía.

Las propiedades hidráulicas en cada capa de suelo, así como el contenido de nitrógeno inicial (en  $\text{kg ha}^{-1}$ ) para cada uno de los diferentes suelos en que se instalaron las parcelas fueron estimadas a partir de la información de los muestreos realizados al inicio del cultivo. Las primeras fueron calculadas a partir de los valores obtenidos de textura, materia orgánica y densidad aparente por medio de las ecuaciones desarrolladas por Saxton y Rawls (2006) y la segunda a partir del dato de laboratorio en ppm de  $\text{N-NO}_3^-$ .

Se seleccionaron los sitios del cultivo sembrado de primera para la calibración ya que el cultivo tuvo un mejor desempeño y por tanto facilitan la tarea de calibración. Una vez obtenidos los resultados de textura, % MO, Dap y profundidad de los distintos sitios, se observó que muchos de estos tenían características semejantes y por lo tanto no tenía sentido manejarlos como unidades diferentes y así de la totalidad de sitios de muestreo se formaron 4 grupos que se distinguen claramente entre sí. Los mismos se detallan a continuación.

Cuadro No. 1. Características generales de los grupos de suelos utilizados en la calibración

	Prof. ef. (cm)	Información de campo					Estimados	
		Textura (%)			MO. (%)	Dap. (Mg m <sup>-3</sup> )	PMP. (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	CC. (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )
		Ar.	Ac.	L.				
Grupo de suelos 1	0-5	25,5	18,0	57,3	5,0	1,06	0,14	0,33
	5-10	24,0	17,2	58,8	3,8	1,24	0,13	0,32
	10-20	24,2	19,4	56,4	3,4	1,23	0,14	0,32
	20-30	22,2	21,1	56,7	3,2	1,20	0,15	0,33
	30-50	17,0	31,4	51,7	2,2	1,28	0,20	0,36
	50-70	14,9	39,5	45,7	1,7	1,06	0,24	0,39
	70-103	17,1	28,0	54,9	0,7	1,19	0,17	0,34
Grupo de suelos 2	0-5	25,0	19,6	55,4	4,9	1,16	0,15	0,34
	5-10	25,4	17,4	54,0	3,6	1,23	0,13	0,32
	10-20	24,4	24,7	51,0	3,3	1,23	0,17	0,34
	20-30	18,5	36,0	45,4	2,3	1,22	0,22	0,38
	30-50	16,1	45,1	38,8	1,6	1,14	0,27	0,41
	50-70	15,8	42,6	41,7	1,3	1,25	0,25	0,40
	70-102	17,6	23,9	58,5	0,5	1,23	0,15	0,32
Grupo de suelos 3	0-5	10,5	18,3	71,3	5,4	1,10	0,14	0,37
	5-10	12,3	18,5	69,2	5,2	0,95	0,14	0,36
	10-20	13,2	20,1	66,7	4,0	1,13	0,14	0,35
	20-30	11,1	23,2	65,7	3,6	1,09	0,16	0,36
	30-50	7,1	19,6	73,4	2,5	1,08	0,13	0,35
	50-70	8,4	36,7	54,9	1,8	1,04	0,22	0,39
	70-104	11,6	37,6	50,8	1,4	1,20	0,23	0,39
Grupo de suelos 4	0-5	26,0	11,4	62,6	3,5	1,26	0,10	0,29
	5-10	26,0	15,0	59,0	3,2	1,21	0,11	0,30
	10-20	29,7	21,0	49,3	2,5	1,46	0,14	0,31
	20-30	28,0	26,2	45,8	2,9	1,25	0,17	0,33
	30-50	12,8	34,7	54,5	1,9	1,19	0,21	0,38
	50-70	18,4	21,0	60,6	0,9	1,25	0,13	0,32
	70-101	20,0	20,6	59,4	0,4	1,27	0,13	0,31

Los datos del clima fueron cargados por medio del uso del software denominado "ClimGen". Las variables ingresadas al programa fueron temperatura máxima y mínima,

precipitaciones, radiación y humedad relativa. En lo que se refiere al cultivar se cargaron coeficientes genéticos fisiológicos y fenológicos del híbrido tomados de las fuentes de información mencionadas en párrafos anteriores. Por último se agregaron las características de suelo mencionadas anteriormente y se agregó el manejo del cultivo que incluyó fecha de siembra y cosecha, fertilización (tipo y cantidad) y labores al momento de la siembra.

Los valores simulados luego de una corrida para un escenario dado de suelo, clima, híbrido y manejo pueden corresponderse o no con los valores observados de los ensayos (ajuste o calibración). En caso de que el modelo no ajuste con la realidad se procede a analizar la información relacionada al híbrido (coeficientes fisiológicos, fenológicos, entre otros) y modificar los valores de algunos parámetros que se consideren erróneos de manera de lograr que el ajuste mejore.

Las corridas del modelo fueron realizadas asumiendo que no existían limitaciones de nitrógeno, lo cual es altamente probable considerando el manejo realizado (altos niveles de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> a siembra y V6 y agregados de N como urea por encima de los niveles críticos) ya que no fue posible contar con la información de nitrógeno absorbido en planta.

La radiación diaria interceptada por el cultivo fue calculada indirectamente a partir de los valores obtenidos de IAF, por medio de la siguiente ecuación.

$$\mathbf{R I}_{fa} = (1 - e^{(-k \mathbf{IAF})})(\mathbf{R}/2) \quad [30]$$

Donde:

**RI<sub>fa</sub>** (kj. m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) es la radiación interceptada fotosintéticamente activa;

**k** es el coeficiente de extinción de la luz;

**IAF** (m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>) es el índice de área foliar;

**R** (kj m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) es la radiación total incidente.

Por último la evaluación de la calibración (ajuste de los valores simulados por el modelo y los medidos en los ensayos de campo) se efectuó por medio del método de la línea 1:1 y el cálculo de la raíz del cuadrado medio del error (RMSE). El primero consiste en un método visual mientras que el segundo evalúa la variación promedio existente entre datos observados y simulados por medio de la siguiente fórmula:

$$\mathbf{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\mathbf{S}_i - \mathbf{O}_j)^2}{n}} \quad [31]$$

Donde:

$S_i$  son los valores simulados por el modelo;

$O_j$  son los valores medidos a campo;

$n$  es el número de medidas, sitios de muestreo.

### 3.7. VALIDACIÓN DEL MODELO

La etapa de validación permite corroborar la capacidad de simular con certeza otras situaciones diferentes a las simuladas en la calibración. Con este objetivo se corrió el modelo manteniendo los coeficientes genéticos del híbrido, el clima y el manejo, pero sobre suelos distintos a los utilizados en la calibración (topografía, profundidad, contenido de agua a la siembra, textura, etcétera). Para ello se utilizaron los sitios de muestreo de maíz de segunda ya que fue la única fuente de información con la que se contaba para la realización de este trabajo.

Las características de los suelos utilizados para esta etapa del trabajo se detallan a continuación.

Cuadro No. 2. Características generales de los suelos utilizados en la validación

	Prof. ef. (cm)	Información de campo					Estimados	
		Textura (%)			MO. (%)	Dap. (Mg m <sup>-3</sup> )	PMP. (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	CC. (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )
		Ar	Ac	L				
10a	0-15	21,0	29,2	49,8	4,6	1,29	0,19	0,37
	15-30	19,0	34,4	46,6	3,9	1,35	0,22	0,38
	30-45	10,2	56,4	33,4	3,2	1,42	0,33	0,44
	45-60	10,1	51,3	38,7	2,1	1,28	0,30	0,43
10m	0-15	28,0	27,0	45,0	3,8	1,37	0,18	0,34
	15-30	18,4	40,0	41,6	2,4	1,24	0,24	0,39
	30-45	16,0	48,1	40,0	1,6	1,33	0,28	0,42
	45-60	12,1	51,0	36,9	1,5	1,49	0,30	0,43
10b	0-15	28,0	26,0	46,0	4,4	1,38	0,18	0,35
	15-30	18,0	49,1	32,9	2,2	1,36	0,29	0,42
	30-45	14,1	51,0	34,9	2,0	1,35	0,30	0,43

Los parámetros del cultivo analizados en esta etapa del trabajo son los mismos que para la calibración (acumulación de biomasa, IAF, intercepción de la radiación, IC y rendimiento en grano) y se sigue la misma lógica de razonamiento en cuanto a la interpretación de los procesos. De esta forma la metodología de evaluación del ajuste sigue siendo el mismo que el utilizado anteriormente.

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO EN QUE SE REALIZÓ EL ENSAYO (VERANO 07/08)**

De manera de poder interpretar los datos obtenidos en los ensayos y los obtenidos de la simulación del modelo, se presentan a continuación los datos de clima durante el período de desarrollo del cultivo y los valores promedio de una serie histórica (1971-1995) para la zona donde se realizó el estudio. De esta forma se dará una idea de cómo fueron las condiciones del ensayo en relación al promedio de los años. Se recabaron los datos de precipitaciones, temperatura y radiación dada su importancia para el desarrollo y crecimiento del cultivo.

#### **4.1.1. Evolución de la temperatura**

La temperatura ejerce una gran influencia en el desarrollo del cultivo. Si tenemos en cuenta las temperaturas cardinales de las distintas etapas fenológicas para maíz en comparación con las sucedidas durante el ciclo del cultivo, la temperatura media resultó levemente inferior a la óptima para el desarrollo y crecimiento del cultivo (23 °C en comparación con 25-30 °C). Las temperaturas máximas (29 °C promedio) fueron muy inferiores a las tolerables por el cultivo mientras que las mínimas (16 °C en promedio) fueron algo elevadas si las comparamos con una temperatura base de 8 °C. Esto resultó en una baja amplitud térmica repercutiendo en el resultado final del cultivo. Una mayor amplitud térmica, temperaturas diurnas entre 30 y 40 °C acompañado de temperaturas nocturnas frescas (cercanas a la  $T_b$ ), determinan altas tasas de crecimiento durante el día y una mayor duración del ciclo del cultivo, traducándose en mayores producciones de biomasa e indirectamente mayores rendimientos a través del índice de cosecha (Andrade 1992, Cantarero et al. 1999).

A continuación se detalla la evolución de la temperatura a lo largo del ciclo del cultivo en relación a lo que sucede en el promedio de los años.

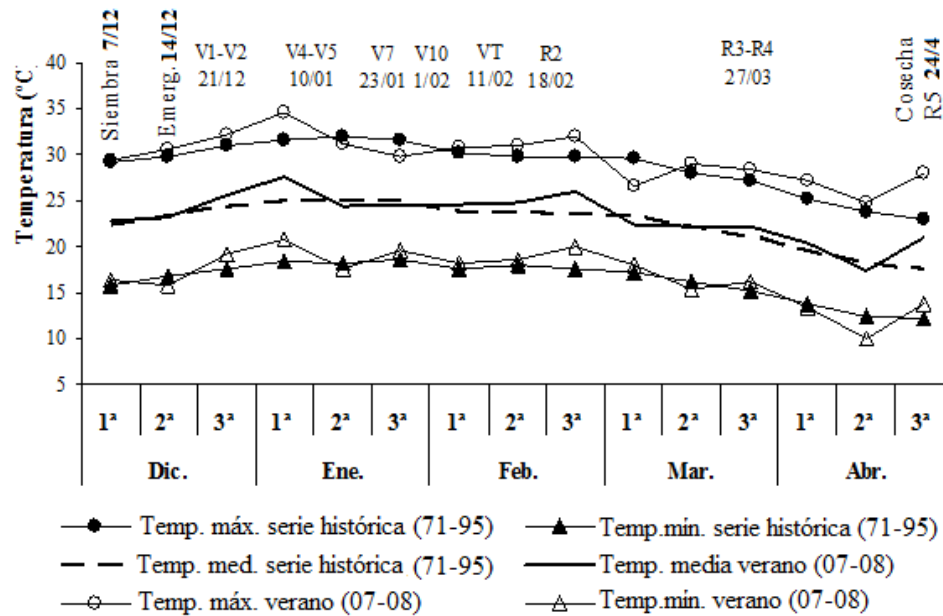


Figura No. 1. Temperaturas máximas y mínimas de la zona (Paysandú, Uruguay) durante el ciclo del cultivo (verano 07/08) en comparación con datos obtenidos para la serie histórica 1971-1995

#### 4.1.2. Régimen pluviométrico

Las precipitaciones son un factor fundamental para el crecimiento y desarrollo del cultivo. En situaciones sin riego, como este caso, las lluvias determinan el nivel de agua disponible en el suelo para las plantas. De esta forma influyen sobre la nutrición (en el transporte y absorción de nutrientes), la transpiración (determinando la tasa de crecimiento), entre otros tantos procesos en los cuales el agua está involucrada.

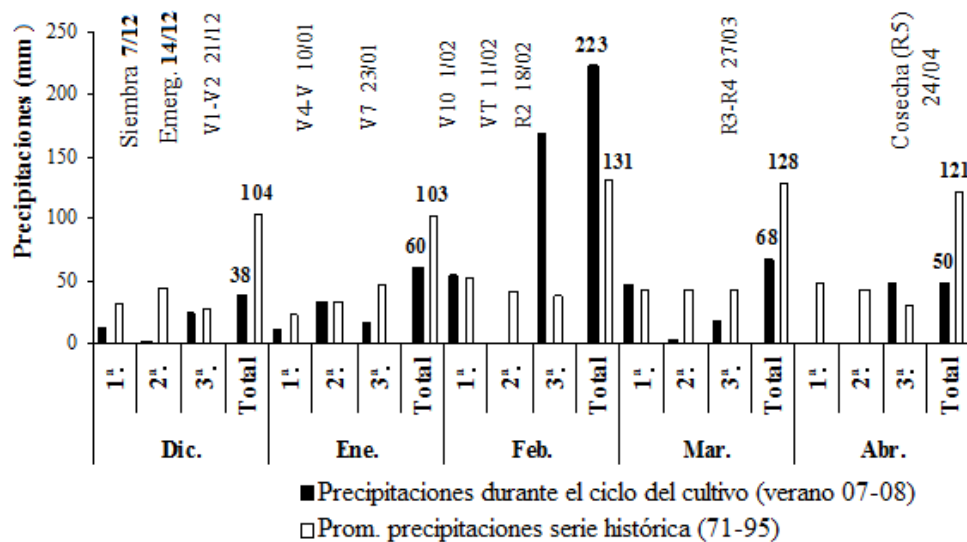


Figura No. 2. Precipitaciones sucedidas en la zona (Paysandú, Uruguay) durante el ciclo del cultivo (verano 07/08) en comparación con datos obtenidos para la serie histórica 1971-1995

De la figura anterior lo primero a destacar es la heterogeneidad en la distribución de las precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo en comparación con el promedio histórico, donde el 50,8 % de las precipitaciones totales ocurrieron en el mes de febrero y el 40,4 % en una sola lluvia (28 y 29 de febrero). Por otro lado durante los meses analizados la de lluvias estuvo un 25,2 % por debajo de lo normal, 439 mm (verano 07/08) contra 587 mm (media histórica).

Si bien las precipitaciones fueron deficientes con relación al promedio de los años, sucedieron en momentos claves para el desarrollo del cultivo. A la siembra, producto de un buen manejo del barbecho, el agua fue suficiente para el logro de una buena implantación del cultivo, y fueron muy importantes las lluvias ocurridas a principios del mes de febrero, coincidiendo con el inicio del período crítico (aproximadamente 15 días pre-floración) y la lluvia siguiente a comienzos del llenado de grano (cuajado).

#### **4.1.3. Evolución de la radiación**

El promedio de radiación diaria durante el ciclo del cultivo estuvo levemente por encima del promedio de los últimos 30 años (18,83 y 17,86  $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$  respectivamente) lo que determinó que la radiación total del período fuera un 7,1 % mayor que el promedio de la serie (2664 vs 2468,5  $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$  respectivamente). En la figura siguiente se muestra la evolución de la radiación a lo largo del ciclo del cultivo.



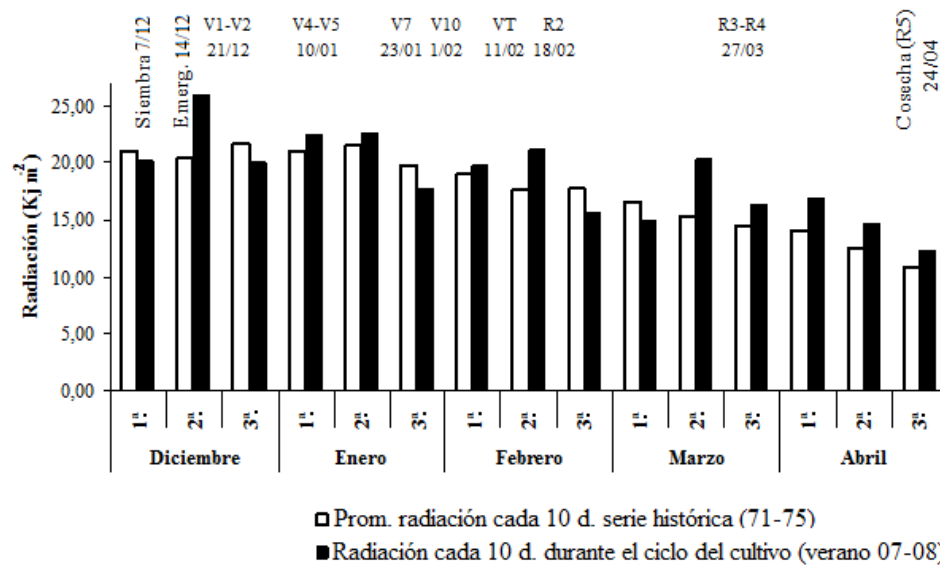


Figura No. 3. Radiación solar en la zona (Paysandú, Uruguay) durante el ciclo del cultivo (verano 07/08) en comparación con datos obtenidos para la serie histórica 1971-1995

## 4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS SITIOS DE MUESTREO

Las parcelas evaluadas presentaron una variabilidad de resultados muy interesante dado el objetivo buscado. Las fuentes de variación más importantes fueron el tipo de suelo (en especial la profundidad del perfil y la pendiente del terreno) y el manejo anterior a la siembra del cultivo (fundamentalmente el contenido de agua del suelo a la siembra). Las prácticas de manejo sobre el cultivo fueron igual para todos los sitios de muestreo lo que no aportan a la variabilidad entre los mismos.

### 4.2.1. Rendimiento y factores que lo determinan

A continuación se dan a conocer los resultados obtenidos a campo en cuanto a rendimiento en grano y producción de biomasa total, y algunos componentes del resultado final como el número y peso de granos.

Cuadro No. 3. Rendimiento y factores asociados

	Máx.	Mín.	Prom.	Desv.	CV.
<b>Rend. (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	10365	3718	7361	1616	22,0%
<b>Biomasa cosecha (kg MS ha<sup>-1</sup>)</b>	24946	11882	19574	3545	18,1%
<b>Población (pl ha<sup>-1</sup>)</b>	134615	73077	105609	15263	14,5%
<b>Índice de cosecha</b>	0,42	0,31	0,37	0,03	7,6%
<b>No. granos m<sup>-2</sup></b>	3238	1349	2364	476	20,1%
<b>Peso de mil granos (g)</b>	329	276	310	14	4,6%

Los parámetros medidos se podrían clasificar en dos grupos según la variabilidad encontrada entre los distintos sitios de muestreo. Mientras rendimiento, biomasa, población y número de granos presentan una heterogeneidad importante entre parcelas, el índice de cosecha y peso de granos casi no varían. Los rendimientos más elevados corresponden a parcelas ubicadas sobre suelos de mayor perfil mientras que los peores resultados se obtuvieron sobre suelos más superficiales o asociados a “blanqueales”. Lo mismo sucedió con la producción de biomasa y el número de granos.

Cuadro No. 4. Correlaciones entre parámetros asociados al rendimiento (por debajo de la diagonal) y su significancia (por encima de la diagonal)

	Biomasa			No.		
	Rend.	Cosecha	Pobl.	IC	granos	PMG
<b>Rend.</b>	<b>1</b>	<0,0001	0,0844	0,0004	<0,0001	0,0041
<b>Biomasa Cosecha</b>	<b>0,90</b>	<b>1</b>	0,0096	0,0501	<0,0001	0,0023
<b>Pobl.</b>	0,13	0,27	<b>1</b>	0,3844	0,0677	0,6477
<b>IC</b>	0,44	0,16	0,04	<b>1</b>	0,0003	0,2086
<b>No. granos</b>	<b>0,97</b>	<b>0,86</b>	0,14	0,45	<b>1</b>	0,0426
<b>PMG</b>	0,32	0,35	0,01	0,08	0,18	<b>1</b>

El resultado final obtenido en las parcelas, medido como rendimiento en grano, estuvo claramente relacionado con el número de granos logrados por unidad de superficie. En la figura No. 4 se muestra la asociación de ambos parámetros.

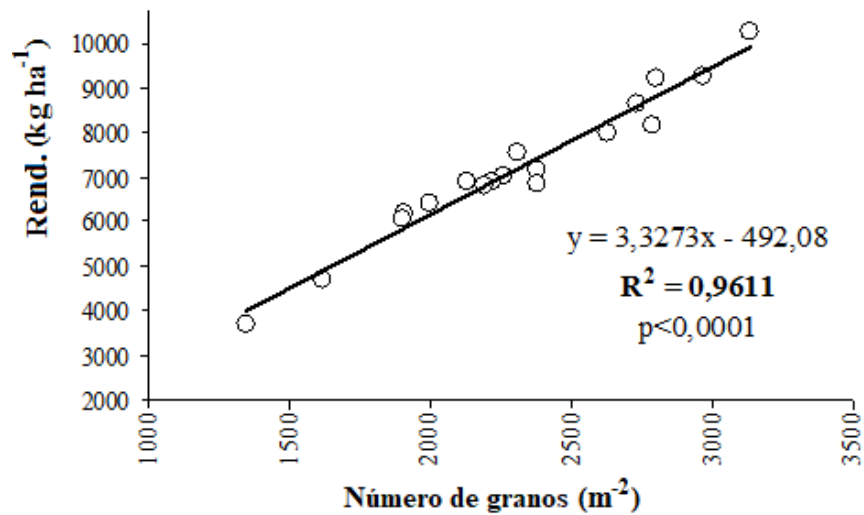


Figura No. 4. Asociación entre número de granos y el rendimiento para la totalidad de los sitios de muestreo

Tal como fuera comentado anteriormente, los resultados experimentales están de acuerdo con lo citado en la bibliografía revisada, dado que el rendimiento en grano queda explicado por la producción de biomasa y presenta una alta asociación con el número de granos logrados por unidad de superficie. Como era esperable el peso de los granos presenta poca variación entre parcelas y no explica el rendimiento como tampoco lo hacen el índice de cosecha o la población (Andrade et al., 1996).

#### **4.2.2. Evolución de la producción de biomasa y área foliar**

Para el análisis de estos dos parámetros se separaron las parcelas que fueron sembradas sobre rastrojo de trigo (maíz de 2<sup>a</sup>) de las sembradas sobre pradera (maíz de 1<sup>a</sup>), ya que debido a las diferencias en el manejo del barbecho, la disponibilidad de agua en el suelo a la siembra, al menos durante las primeras etapas de desarrollo del cultivo, deberían verse reflejadas en la performance del cultivo.

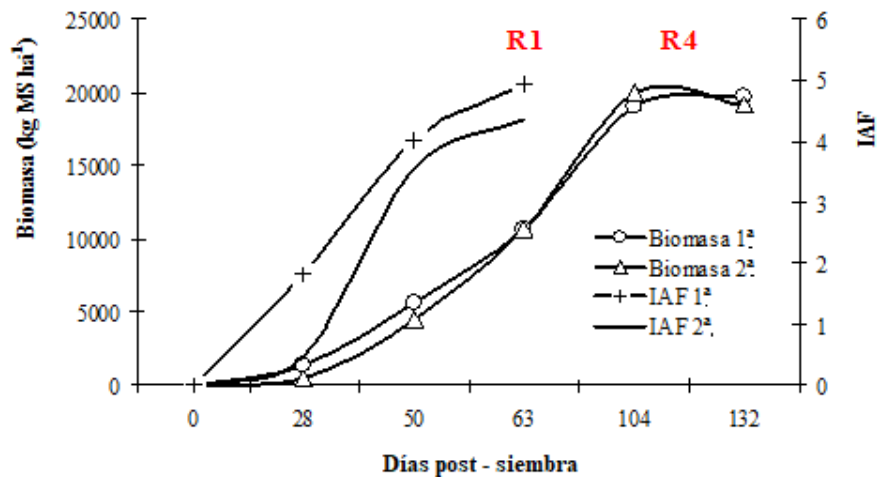


Figura No. 5. Evolución de la biomasa aérea acumulada y evolución del índice de área foliar a lo largo del ciclo del cultivo para sitios de muestreo, maíz de primera y segunda

La acumulación de biomasa así como la evolución del IAF resultaron muy similares para ambas situaciones. La producción de materia seca alcanzó los valores máximos en llenado de grano, más precisamente en el estadio de grano pastoso-dentado (R4-5) en ambos casos.

En lo que se refiere a IAF se aprecia claramente como al inicio de la etapa de crecimiento (siembra-V5) las situaciones sembradas con un buen largo de barbecho y en consecuencia mayor acumulación de agua en el perfil, presentaron un IAF muy superior a las situaciones de maíz de segunda. Por otra parte los sitios de muestreo de maíz de primera lograron una implantación mejor a los de segunda, por lo que las poblaciones fueron mayores (20 mil pl. ha<sup>-1</sup> más que los sitios sobre rastrojo de trigo) lo que resultó en IAF mas altos en las primeras etapas de desarrollo del cultivo. Si bien no hay lecturas de IAF posteriores a floración (R1), es probable que en este estadio se alcanzara el máximo valor de IAF. A partir de ese momento es esperable que los valores caigan hasta llegar a cero en madurez fisiológica.

#### **4.2.3. Contenido de agua en el suelo**

La cuantificación del contenido de agua total en suelo y la disponibilidad de agua útil son un factor importante ya que determinan gran parte del comportamiento del cultivo durante las primeras etapas de desarrollo. En la figura No. 6 se muestran los contenidos de agua en el suelo para los distintos grupos y sitios. Estos presentaron una importante variación explicada principalmente por las diferencias de suelos presente entre grupos y sitios (profundidad, posición topográfica, textura) y el antecesor vinculado al manejo del barbecho pre-siembra.

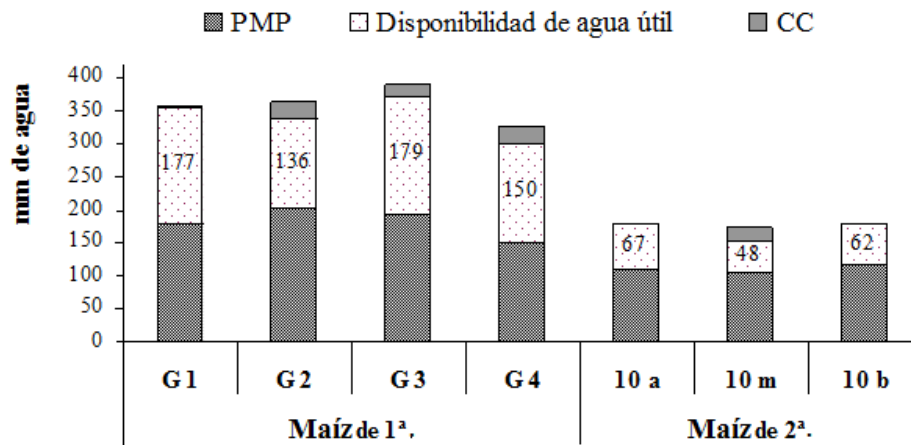


Figura No. 6. Contenido de agua en suelo a la siembra para los 4 grupos de suelos utilizados en la calibración del modelo (maíz de 1<sup>a</sup>), y tres sitios de muestreo de maíz de 2<sup>a</sup>.

Las mayores diferencias se observan entre los sitios sembrados sobre pradera en comparación con los sembrados sobre rastrojo de trigo, en especial en lo que se refiere a contenido de agua total. Mientras los primeros se ubicaron sobre perfiles cercanos al metro de profundidad (con variaciones dependiendo del sitio de muestreo) los otros fueron sembrados sobre suelos más superficiales (entre 45-60 cm).

Por otro lado la disponibilidad de agua útil, expresada como porcentaje del agua disponible total para el cultivo, presentó valores muy altos para las dos situaciones de siembra (89% en promedio) generando condiciones muy favorables para la implantación y primeras etapas del desarrollo del cultivo. Si bien era dable esperar valores de disponibilidad del agua útil menores en los sitios sobre rastrojo de trigo, las precipitaciones ocurridas antes de la siembra sumado a la baja extracción de agua por el cultivo anterior, dada su mala performance en producción de biomasa, y la baja capacidad de almacenaje de los suelos, resultaron en una recarga casi total del perfil. Por otro lado los altos contenidos de agua disponible en suelos con alta capacidad de almacenaje en los sitios de siembra de primera le confieren una gran independencia en relación a la necesidad de agua proveniente de precipitaciones, al menos en etapas tempranas del cultivo, en contraposición de lo que sucede en sitios de segunda sobre suelos con menor capacidad de almacenaje y por lo tanto menor cantidad de agua útil.

No se encontró asociación alguna del contenido total y/o la disponibilidad inicial de agua en suelo con los resultados obtenidos en biomasa y rendimiento, presentando coeficientes de correlación muy bajos para todas las situaciones ( $R^2 < 0,1$ ) (ver anexo No. 3). Esto se explica porque la extracción de agua por el cultivo, aun en los suelos de mayor capacidad de almacenaje, no son suficientes para cubrir sus requerimientos hídricos desde emergencia hasta transcurrido el período crítico (aproximadamente 75

días post siembra) sin que ocurran precipitaciones durante este período que recarguen el perfil. Esto hace que en la mayoría de las situaciones las precipitaciones determinen el éxito o el fracaso del cultivo en relación a sus necesidades hídricas.

### 4.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO

Luego de cargados todos los datos al modelo (clima, cultivar, suelo y manejo) se procedió a la realización de la calibración. Luego de sucesivas corridas del programa contrastando los resultados obtenidos en la simulación con lo observado en la realidad y modificando los coeficientes genéticos del cultivo se logró llegar a un ajuste considerado aceptable según los métodos de evaluación utilizados. En el cuadro siguiente se muestran los valores de algunos parámetros importantes que fueron modificados para lograr un ajuste adecuado del modelo.

Cuadro No. 5. Algunos parámetros ingresados al modelo que lograron el mejor ajuste entre observado y simulado

Parámetro	Fuente	Valor
<b>Crecimiento</b>		
Coef. de conversión transpiración/biomasa (kPa. Kg. m <sup>-3</sup> )	B	10
Ef. de uso de la radiación (g Mj <sup>-1</sup> )	B	4
<b>Hoja</b>		
Índice de área foliar verde inicial (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	B	0,060
Índice de área foliar máximo esperado (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	B	7
Área foliar específica (m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> )	B	18
Coef. de partición tallo/hoja	B	1,5
Duración del área foliar (°C d <sup>-1</sup> )	C	1200
Fracción del máx. IAF a madurez fisiológica	C	0,9
<b>Raíz</b>		
Largo de raíz máx. (m)	C	1,7
<b>Transpiración</b>		
Coef. de extinción de la radiación	D	0,5
Coef. de evapotranspiración a máx. canopeo	B	1,1
Consumo máx. de agua (mm d <sup>-1</sup> )	B	14
Potencial hídrico al inicio del cierre estomático (J kg <sup>-1</sup> )	B	-1200
Potencial hídrico para marchitamiento foliar (J kg <sup>-1</sup> )	B	-1800
<b>Fenología</b>		
Emergencia (°C d <sup>-1</sup> )	M	150
Fin de crec. vegetativo (°C d <sup>-1</sup> )	M	980
Inicio de floración (°C d <sup>-1</sup> )	M	1060

Inicio de llenado ( $^{\circ}\text{C d}^{-1}$ )	M	1280
Madurez fisiológica ( $^{\circ}\text{C d}^{-1}$ )	M	2000
<b>Tiempo térmico acumulado</b>		
Temperatura base ( $^{\circ}\text{C}$ )	B	8
Temperatura media óptima ( $^{\circ}\text{C}$ )	C	10
Temperatura máxima ( $^{\circ}\text{C}$ )	B	35
<b>Cosecha</b>		
Índice de cosecha	C	0,40

B tomado de Bibliografía; D “default”, valor propuesto por el modelo; M medido a campo; y C calibrado.

Para analizar la información de los resultados del ajuste se deben tener en cuenta algunas consideraciones. En primer lugar el grupo de suelos 4 (cuadrante D de las figuras No. 7, No. 8 y No. 10) se ubicó sobre un suelo de “blanqueal”, que entre otras características presenta altas concentraciones de sodio. Este indicador no fue medido a campo y por lo tanto no fue cargado al modelo cuando fueron ingresados los datos del suelo. Esto explica por qué el modelo sobreestima los valores de IAF, biomasa y otros ya que el modelo no está considerando el estrés causado por el efecto “blanqueal” referido a la alta concentración de sodio, falta de estructura, problemas de drenaje, falta de oxigenación, etcétera.

Por otra parte, dada la metodología de muestreo de plantas (ver capítulo 3.3.2.2.) se cree que los cortes no fueron lo suficientemente representativos (pocas plantas cortadas por fecha y sitio de muestreo por ejemplo), por lo que en muchas ocasiones el muestreo pudo haber estado sesgado hacia partes mejores o peores del cultivo según el sitio. Esto puede dar lugar a errores en la interpretación de los datos en la calibración ya que puede que los puntos observado-simulado no coincidan, pero que no se trate de un error en la simulación sino de la medición del dato en el campo.

Por último aclarar que para el análisis del ajuste del contenido de agua en suelo, se realizaron las comparaciones hasta 70 cm ya que en algunas fechas no fue posible obtener la muestra a mayor profundidad consecuencia de la resistencia a la penetración del taladro dado el bajo contenido de humedad del suelo.

#### **4.3.1. Ajuste del índice de área foliar, interceptación de luz y biomasa aérea**

La acumulación de biomasa depende fundamentalmente de la cantidad de radiación interceptada por el cultivo a lo largo del ciclo (fuente de energía para la producción cadenas carbonadas), y de aquí la importancia de la producción de hojas y estructuras verdes que sean capas de interceptar la mayor cantidad de radiación fotosintéticamente activa.

Con esta lógica se deben interpretar los resultados obtenidos de la simulación del modelo. Este debería ser capaz de presentar un buen ajuste en la simulación de la evolución del IAF de manera de lograr una adecuada intercepción de luz por el canopeo y así por medio del uso de esa energía lumínica simular correctamente la evolución de la producción de biomasa, quedando de esta manera solo limitada por agua. En la figura siguiente se muestra la evolución del IAF simulado y observado para los distintos grupos de suelo.

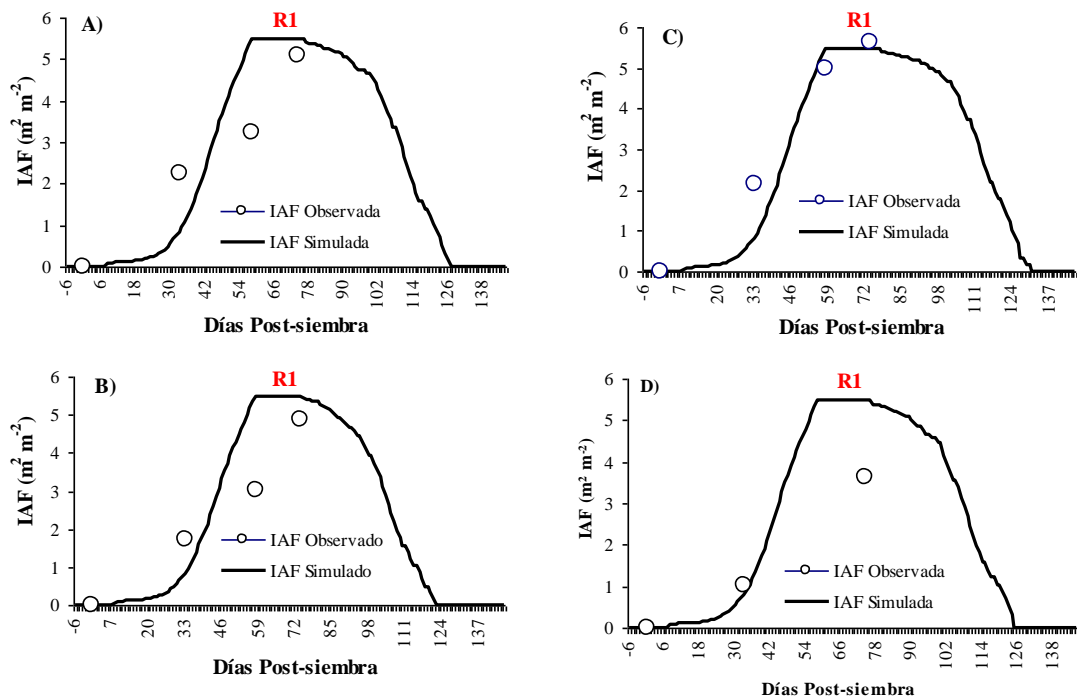


Figura No. 7. Evolución del IAF (observada y simulada) para los grupos de suelo 1 (A), 2 (B), 3 (C) y 4 (D) utilizados en la calibración

Si bien el ajuste a primera vista parece no ser muy bueno, se pueden hacer algunas apreciaciones que explican los resultados obtenidos. En primer lugar se observa una subestimación por parte del modelo en todos los grupos en la primera fecha de muestreo (33 días post-siembra). Esto puede ser producto de las altas poblaciones obtenidas por error a la siembra (105 mil pl. ha<sup>-1</sup> promedio) lo que determinó que en etapas tempranas del desarrollo del cultivo se obtuvieran valores de IAF muy altos. El modelo supone que se trabaja con poblaciones “normales” lo que explica el valor simulado, dada la menor cantidad de plantas y hojas por unidad de superficie en poblaciones inferiores en comparación con las obtenidas en los ensayos.



Por otra parte el valor de IAF máximo simulado, a excepción del grupo 4 (el cual no será tenido en cuenta en el análisis), logró un muy buen ajuste con los valores observados en los sitios de muestreo, tanto en la magnitud del valor como en el momento del ciclo en que se logró (R1: floración femenina), presentando un RMSE de 8 % (si no se tiene en cuenta el grupo 4) (ver anexo No. 4).

Continuando con la línea de razonamiento planteada anteriormente se presenta a continuación la simulación de la intercepción de radiación por el modelo y los valores obtenidos indirectamente a través del IAF medido.

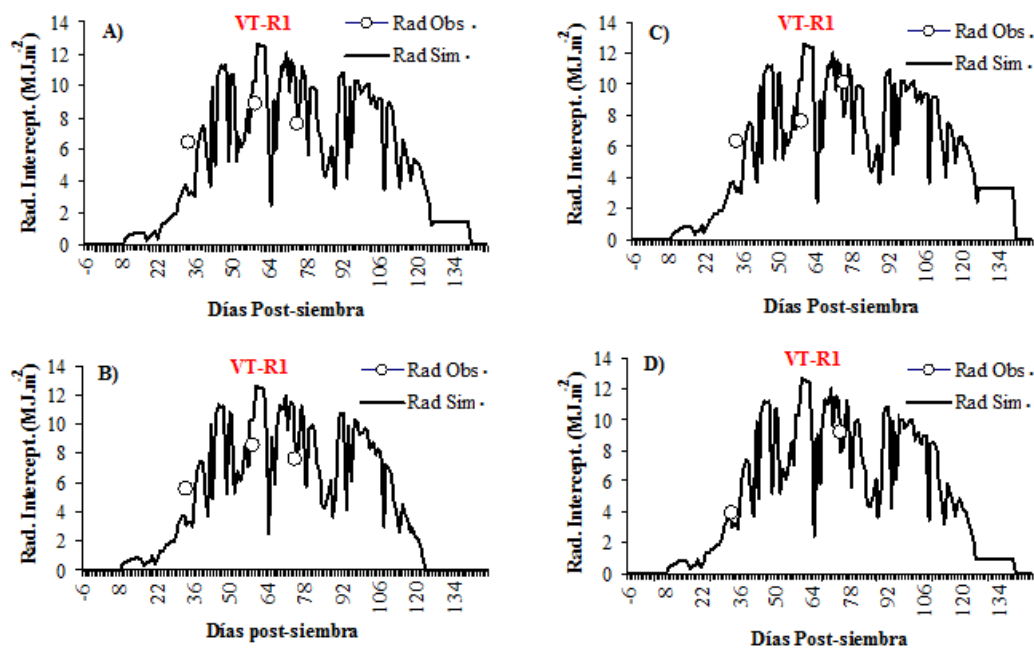


Figura No. 8. Evolución de la radiación interceptada (observada y simulada) para los grupos de suelo 1 (A), 2 (B), 3 (C) y 4 (D) utilizados en la calibración

Se observa en la figura anterior que el modelo logró copiar muy de cerca lo sucedido en la realidad en relación a la intercepción de la radiación, lo que se lo considera un ajuste muy aceptable, aun mejor que el logrado para IAF, presentando una variación promedio entre los valores simulados y observados de un 27 % (ver anexo No. 6). Los valores máximos de intercepción se dieron algunos días antes que los valores máximos de IAF, siendo esto producto de que los mayores valores de radiación diaria se dan a mediados del mes de enero, algunos días antes de haberse logrado el IAF máximo.

Los valores alcanzados de intercepción de radiación se pueden explicar por medio de la relación que existe entre intercepción y el IAF. La figura No. 9 muestra como incrementos del IAF por encima del IAF óptimo (valor con el cual se logra

interceptar el 90 % o 95 % de la radiación incidente fotosintéticamente activa) presentan poco peso relativo en la acumulación de biomasa. El modelo logró simular valores de IAF lo suficientemente altos como para interceptar una adecuada cantidad de radiación, lo que es esperable que se logre una adecuada acumulación de biomasa, o al menos no limitada por ese parámetro.

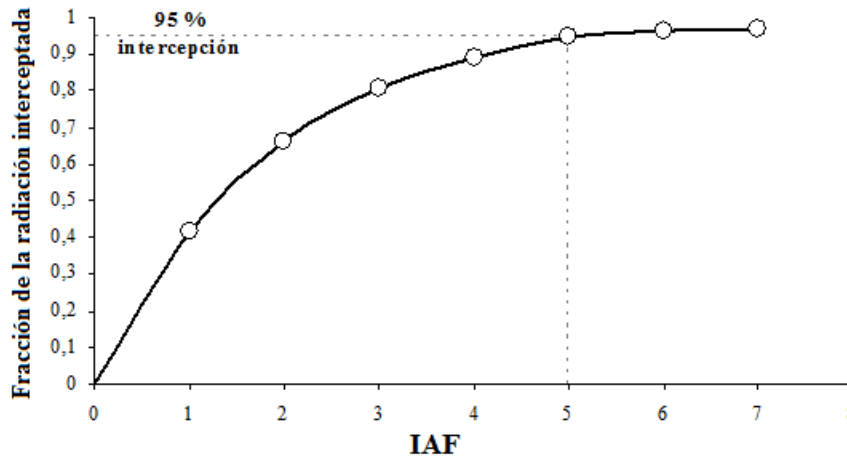


Figura No. 9. Asociación entre el IAF y la interceptación de la radiación (adaptado de Gardner et al., 1985)

Dado que el modelo logró simular valores de IAF lo suficientemente altos como para interceptar una adecuada cantidad de radiación, es esperable que se logre una adecuada acumulación de biomasa, o al menos no limitada por ese parámetro. En el cuadro a continuación se muestra el ajuste que presentó el modelo para la producción de biomasa aérea.

Cuadro No. 6. RMSE para biomasa acumulada (simulada y observada) de los grupos de suelo 1(A), 2 (B) y 3 (C) para las distintas fechas de muestreo

Fecha	Media obs.	Media sim.	RMSE	RMSE (%)
<b>11 Ene.</b>	1625,2	751,9	888,4	54,7
<b>02 Feb.</b>	4804,6	5840,0	2139,2	44,5
<b>15 Feb.</b>	11897,7	9698,3	2395,8	20,1
<b>27 Mar.</b>	19837,3	19590,1	805,4	4,1
<b>24 Abr.</b>	20920,7	21294,6	2504,6	12,0
<b>Media</b>	<b>11817,1</b>	<b>11435,0</b>	<b>1898,8</b>	<b>16,1</b>

La producción de biomasa a lo largo del ciclo del cultivo presentó un ajuste muy bueno por el modelo, con una variación promedio entre valores simulados y observados

para las distintas fechas de muestreo y grupos de  $1900 \text{ kg ha}^{-1}$  (16 %). Las mayores diferencias se dieron durante las primeras etapas del cultivo, explicado por el mismo motivo que la subestimación del IAF en párrafos anteriores relacionado a la población. Durante las últimas etapas de desarrollo (llenado de grano y madurez fisiológica) el ajuste fue excelente, presentando valores de RMSE del entorno de 10 %, lo que en promedio de todo el ciclo hace a un buen ajuste. A continuación se observan las curvas de producción de biomasa, avalando lo dicho anteriormente.

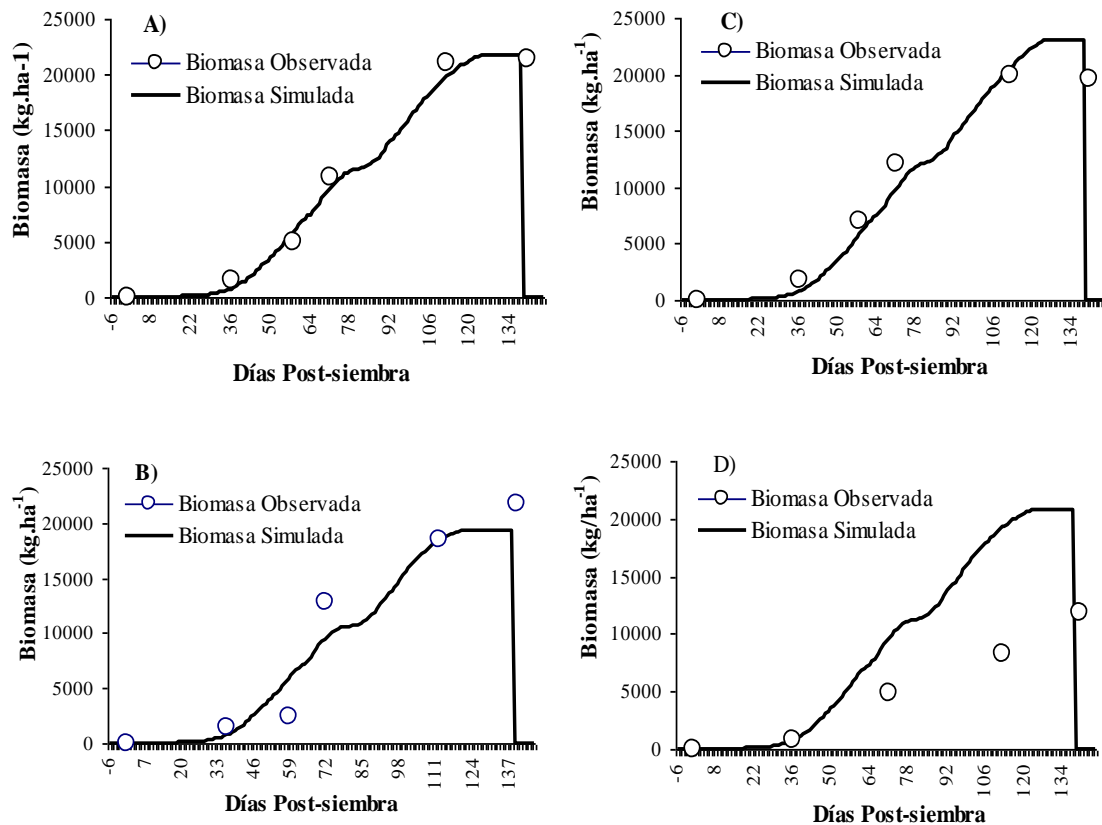


Figura No. 10. Evolución de la biomasa aérea acumulada (observada y simulada) para los grupos de suelo 1 (A), 2 (B), 3 (C) y 4 (D) utilizados en la calibración

Otra forma de ver la calibración lograda puede hacerse visualmente a través de la línea 1:1 como se muestra en la figura No. 11. Los valores simulados y observados se encuentran claramente alineados sobre la línea 1:1 presentando un coeficiente de correlación muy alto ( $R^2 = 0,94$ ) lo que afirma que el ajuste logrado por el modelo es bueno.

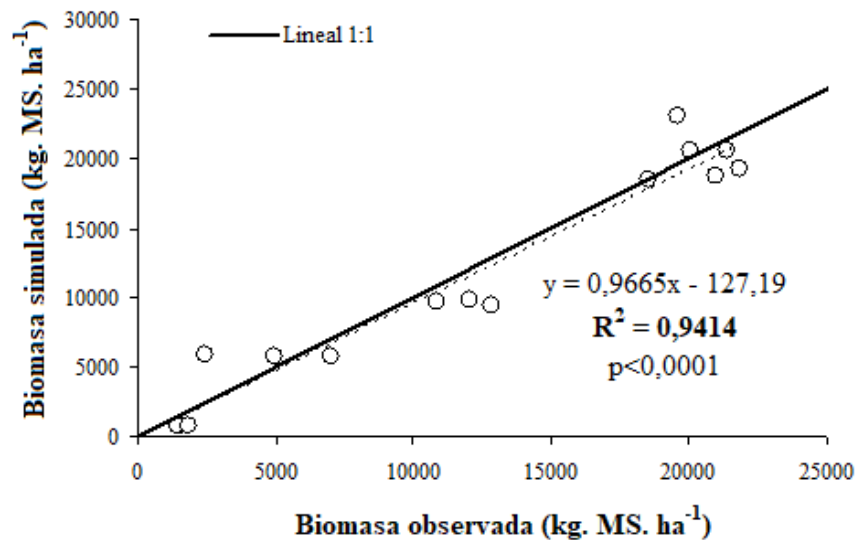


Figura No. 11. Lineal 1:1 de biomasa aérea acumulada (simulada y observada), para los grupos de suelo 1 (A), 2 (B) y 3 (C) a lo largo del ciclo del cultivo

En líneas generales se cree que el ajuste que presentó el modelo para la producción de biomasa y algunas variables que la determinan (IAF e intercepción de luz) es razonable dadas las limitantes comentadas al inicio del capítulo. Se debe destacar el resultado obtenido en el ajuste de la primera, considerándose muy bueno por la metodología de evaluación. También se pudo ver como ajustes no tan acertados del IAF no son una limitante para la calibración de la biomasa u otros resultados productivos que dependan indirectamente de él, dada la relación existente entre este y la intercepción de luz (figura No. 9).

#### **4.3.2. Ajuste del consumo de agua**

Si continuamos analizando los datos con la lógica de funcionamiento del modelo, es dable esperar que si se logró un ajuste adecuado de la acumulación de biomasa, la evolución del contenido de agua en el suelo ajuste en forma adecuada ya que el consumo de agua por el cultivo es función directa del crecimiento. El agua transpirada por el cultivo y las precipitaciones explican la mayor parte de las oscilaciones en el volumen de agua en el perfil a lo largo del ciclo del cultivo. A continuación se muestra la evolución del contenido de agua para los 4 grupos de suelo.

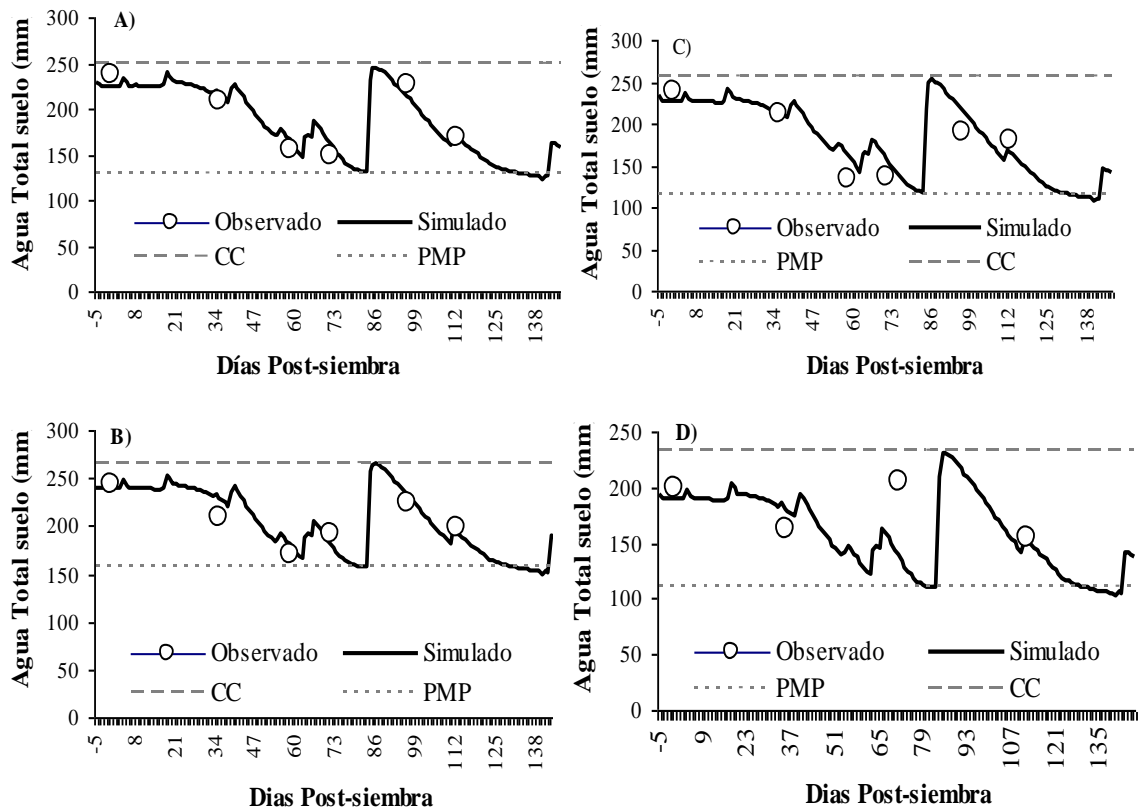


Figura No. 12. Evolución del contenido de agua en el suelo (observada y simulada) para los grupos de suelo 1 (A), 2 (B), 3 (C) y 4 (D) utilizados en la calibración

Existe una clara superposición entre lo simulado y observado a excepción del grupo 4 (cuadrante D de la figura No. 12). Durante las primeras etapas de desarrollo del cultivo y hasta fin de floración se da una caída continua a tasas crecientes del contenido de agua del suelo con muy bajos niveles de recarga (pequeños picos a lo largo del descenso en el contenido de agua total). Al final del período crítico (R2) ocurren lluvias abundantes y se puede observar la recarga total del perfil alcanzándose valores de CC. A partir de este momento, durante todo el llenado de granos y hasta madurez fisiológica el contenido de agua desciende nuevamente pero a tasas decrecientes hasta alcanzar valores muy bajos iguales o algo inferiores a PMP.

De manera de visualizar mejor la calibración se presenta a continuación (figura No. 14) la línea 1:1 donde se confirma el buen ajuste que presentó el modelo para con esta variable, donde se ve una nube de puntos entorno de la línea 1:1 y un coeficiente de correlación mayor al 80 % con un alto grado de significancia.

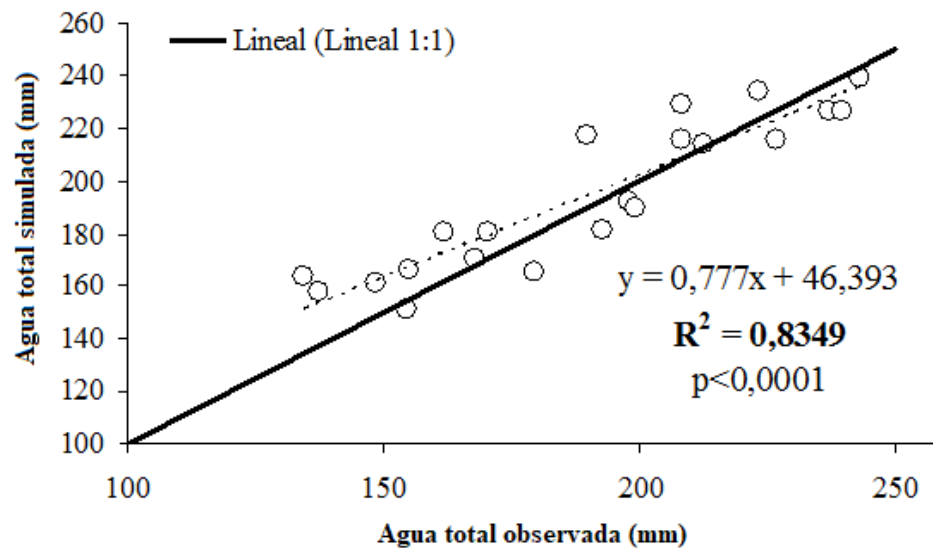


Figura No. 13. Lineal 1:1 de contenido de agua del suelo (simulada y observada), para los grupos de suelo 1 (A), 2 (B) y 3 (C) a lo largo del ciclo del cultivo

La evaluación del ajuste por medio del análisis de la variación promedio de los datos simulados y observados afirma lo comentado hasta el momento acerca del buen ajuste que presenta el modelo en relación a esta variable. El descenso del contenido de agua por el consumo del cultivo a medida que avanza el ciclo así como la recarga por ocurrencia de precipitaciones es simulado en tiempo y forma con una variabilidad promedio entre valores observados y simulados de 15 mm (7 %) como se muestra en el cuadro No. 7.

Cuadro No. 7. RMSE para contenido de agua en el suelo (simulado y observado) de los grupos de suelo 1 (A), 2 (B) y 3 (C) en las distintas fechas de muestreo

Fecha	Media obs.	Media sim.	RMSE	RMSE (%)
<b>6 Feb.</b>	240,1	230,7	10,4	4,2
<b>10 Ene.</b>	210,0	219,5	14,2	5,9
<b>02 Feb.</b>	153,3	170,0	18,8	12,3
<b>15 Feb.</b>	159,7	166,6	35,9	9,6
<b>11 Mar.</b>	213,3	222,3	18,6	8,6
<b>27 Mar.</b>	181,9	175,7	8,1	5,1
<b>Media</b>	<b>193,1</b>	<b>197,5</b>	<b>14,5</b>	<b>7,5</b>

La variable contenido de agua en el suelo fue la que presentó el mejor ajuste en este trabajo dejando en evidencia la potencialidad de esta herramienta para el análisis de rotaciones de cultivos en cuanto a la dinámica de agua en suelo.

### 4.3.3. Ajuste del rendimiento en grano

Para la calibración del resultado final expresado como rendimiento en grano se cargó al modelo un índice de cosecha (IC) potencial del híbrido de 0,40 dado que fue el valor que presentó el mejor ajuste entre lo predicho por el modelo y los valores medidos en los sitios de muestreo (ver cuadro No. 5). Los valores de índice de cosecha obtenidos de las parcelas oscilaron entre 0,31 (grupo 4, blanqueal) y 0,39 para el grupo que obtuvo el valor más alto, lo que resultó en un promedio de 0,36. A continuación se describe la variación que presentaron los valores simulados y observados de IC, rendimiento y biomasa acumulada a cosecha en los distintos grupos de suelo, dejando de lado al grupo 4.

Cuadro No. 8. RMSE para rendimiento, biomasa a cosecha e índice de cosecha (observado y simulado) para los grupos de suelo 1 (A), 2 (B), 3 (C)

	G1		G2		G3		G4		RMSE	RMSE (%)
	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.		
<b>Rend. (tt ha<sup>-1</sup>)</b>	7,8	8,2	8,4	7,7	7,0	9,2	3,7	8,3	<b>1,4</b>	<b>17,4</b>
<b>Biomasa (tt MS ha<sup>-1</sup>)</b>	21,4	20,5	21,8	19,3	19,6	23,1	11,9	20,8	<b>2,6</b>	<b>12,2</b>
<b>Índice de cosecha</b>	0,37	0,40	0,39	0,40	0,36	0,40	0,31	0,40	<b>0,03</b>	<b>8,6</b>

El ajuste logrado para el IC es muy bueno presentando diferencias muy bajas (9 %) entre los valores simulados y observados. En consecuencia, si la producción de biomasa también ajustó adecuadamente, sería esperable que el rendimiento presente un buen ajuste, dado que es función directa de estas dos variables. Sin tener en cuenta los resultados obtenidos por el grupo 4 el modelo logró, como se esperaba, un ajuste aceptable, con una variación promedio de 17 % entre los valores simulados y los medidos.

Como se puede observar los valores simulados de IC fueron iguales al valor potencial para el híbrido. Esto es consecuencia de la no existencia de estreses importantes durante floración y llenado de grano. En la figura No. 14 se puede ver claramente los momentos en que el crecimiento se vio limitado por déficit hídrico, donde solamente durante dos momentos del ciclo del cultivo (a fines del período crítico (inicio de llenado de granos) y a fines del ciclo (madures fisiológica)) el modelo reportó estreses hídricos importantes, lo que explica los valores simulados de IC.

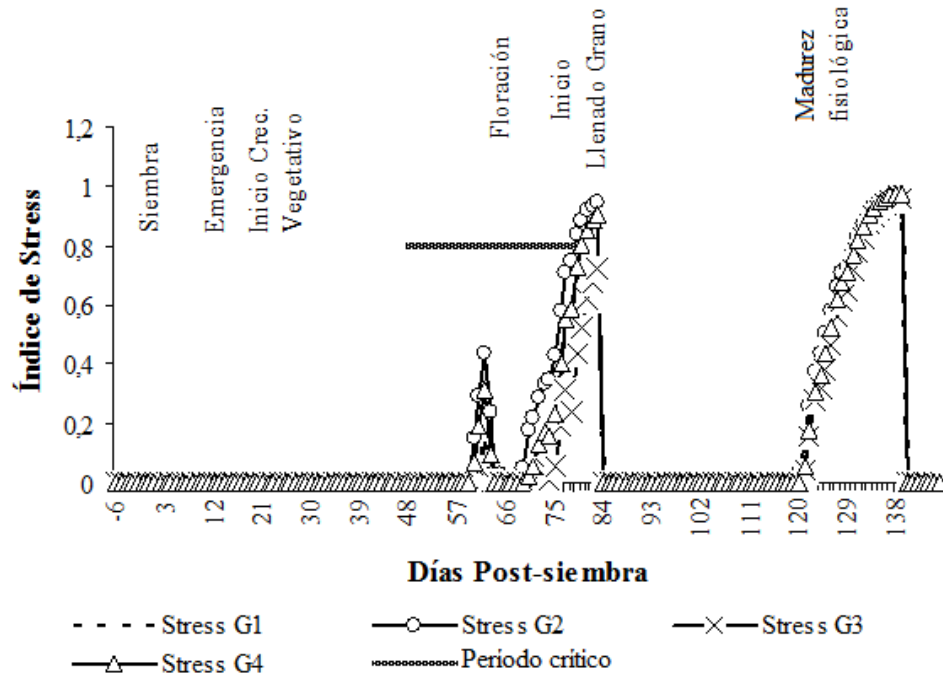


Figura No. 14. Índice de estrés simulado durante el ciclo del cultivo para los grupos de suelo 1 (A), 2 (B), 3 (C) y 4 (D)

#### 4.4. VALIDACIÓN DEL MODELO

Como fue explicado en el capítulo 3.6. la validación se efectuó utilizando los sitios de muestreo sembrados sobre rastrojo de trigo, o sea cultivos de segunda. Los sitios de este grupo de ensayos tuvieron la particularidad de presentar una importante variabilidad en lo que se refiere a las características del suelo entre y dentro de los distintos sitios de muestreo, en especial profundidad de suelo. Esto determina que existan imprecisiones y por lo tanto poca confiabilidad en las mediciones efectuadas a campo a lo largo del ciclo del cultivo. Dado las características del muestreo de plantas (ver capítulo 3.5.2.) y el no haber tenido en cuenta la variabilidad del suelo en un mismo sitio, a lo largo del desarrollo del cultivo el lugar de muestreo fue cambiando de una fecha a la otra dentro del sitio de muestreo. Esto puede determinar que en algunos casos las muestras posteriores a la primera medición no representaran de forma correcta a la realidad existente sobre el suelo que le fue ingresado al modelo al inicio del cultivo, ya que habían sido tomadas de un lugar muy cercano al lugar original pero las características edáficas de este nuevo punto eran distintas al primero. O sea que es posible que el modelo esté simulando el desarrollo y crecimiento del un cultivo basado en las características de un suelo distinto al presente en el lugar donde se efectuaron los siguientes muestreos. Esto puede estar explicando gran parte de las diferencias entre los valores simulados por el modelo y los medidos en las parcelas experimentales. Luego de



esto se darán a conocer algunos resultados obtenidos de la simulación en relación a los obtenidos a través de las mediciones de campo.

En la figura siguiente se expone la acumulación de biomasa simulada y medida a lo largo del ciclo del cultivo.

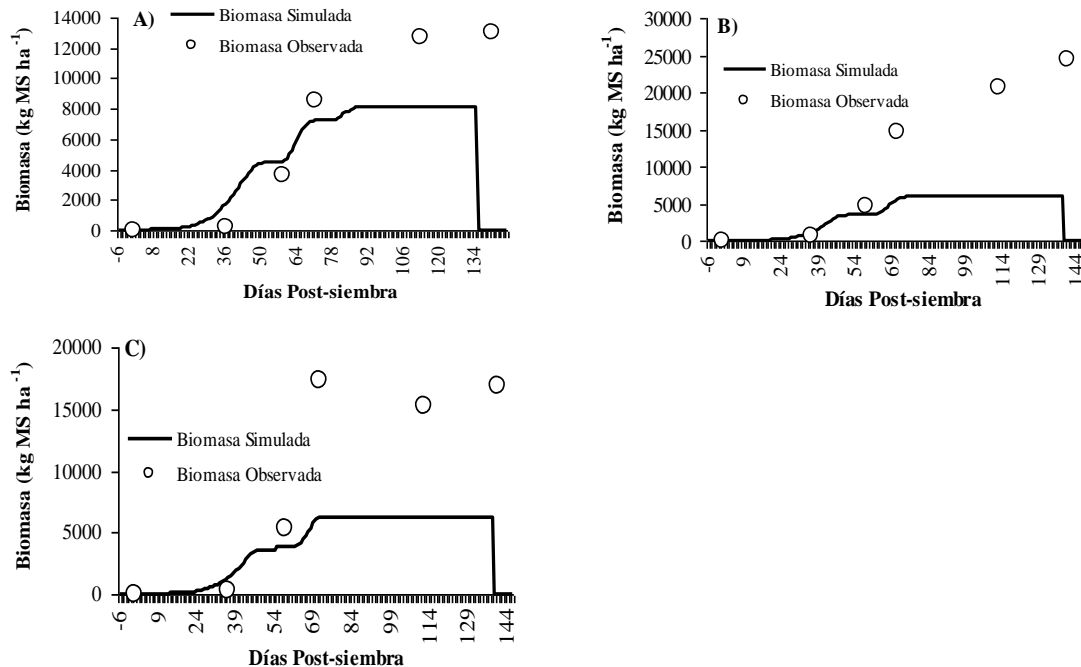


Figura No. 15. Ajuste de la biomasa aérea acumulada (observada y simulada) para tres sitios de muestreo 10a (A), 10m (B) y 10b (C), maíz de segunda

Como se puede ver los valores simulados no conciben con los valores reales obtenidos en las mediciones. Si bien queda claro que el modelo no logró copiar lo sucedido en los sitios de muestreo, gran parte de las diferencias pueden estar explicadas por la gran variabilidad del suelo y el problema que conlleva como fue explicado en párrafos anteriores.

Como se puede observar el modelo subestimó la producción de biomasa en las tres situaciones, presentando valores de 37, 75 y 62 puntos porcentuales por debajo de los valores observados respectivamente. Algo muy similar ocurrió en la simulación de un cultivar de soja bajo las mismas condiciones de suelo (Baroffio y Ramos, 2009), en que el modelo no fue capaz de alcanzar los niveles de producción reportados en los ensayos. En el cuadro No. 2, en el que se detallan las principales características de estos suelos, se puede observar la escasa profundidad que presentan, encontrando horizontes calcáreos entre los 45 y 60 cm, haciendo muy difícil explicar los resultados obtenidos en biomasa de las parcelas experimentales.

Una de las hipótesis que podría explicar lo sucedido plantea la posibilidad de que el cultivo haya logrado extraer agua de capas más profundas que la profundidad de muestreo, es decir de horizontes calcáreos, ya que el agua presente en las capas muestreadas no sería suficiente para producir las cantidades de biomasa observadas. En el cuadro No. 9 se muestra la necesidad de agua que presenta un cultivo para producir los valores de biomasa a cosecha reportados por medio de la siguiente ecuación:

$$\mathbf{B = T (k / VPD)} \quad [32]$$

Donde:

**B** (kg MS ha<sup>-1</sup>) es la biomasa acumulada a cosecha;  
**T** (mm) es el total de agua transpirada en todo el ciclo;  
**k** (kPa kg<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup>) es el coeficiente de transpiración;  
**VPD** (Pa) es el déficit de presión de vapor.

Cuadro No. 9. Entradas y salidas de agua del suelo para tres sitios de muestreo, en maíz de segunda

	Biomasa cosecha medida (kgMSha <sup>-1</sup> )	Consum. transp. (mm)	Cont. H2O a siembra (mm)	Lluvia (mm)	Evapor. (mm)	Escurrem. y otros (mm)	Result. final (mm)
<b>10 Alto</b>	12994,7	259,9	86,3	397	126,7	127,2	<b>-30,5</b>
<b>10 Med.</b>	24418,2	488,4	48,2	397	129,6	123	<b>-295,8</b>
<b>10 Bajo</b>	16849,2	337,0	62,4	397	129,7	145,9	<b>-153,1</b>

Se concluye mediante el análisis del cuadro anterior que el agua presente en el perfil a la siembra, sumado a las precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo no fueron suficientes para cubrir los requerimientos necesarios para producir los valores de biomasa obtenidos. Esto nos lleva a pensar que el cultivo debe haber extraído agua de capas más profundas (horizontes calcáreos), desde 30 mm en el caso del sitio 10a hasta valores cercanos a los 300 mm para la parcela 10m a lo largo del ciclo del cultivo.

En conclusión el modelo no logró simular lo ocurrido en la realidad para la producción de biomasa. Por otra parte los datos obtenidos de los ensayos son de mala calidad para el propósito deseado, de manera que no se tiene la certeza de que estén representando adecuadamente lo ocurrido sobre el suelo cargado al modelo. Es así que no se puede afirmar que el modelo tenga problemas en el ajuste para este tipo de situaciones, sino que se deben realizar trabajos que superen las limitantes que se plantearon de manera de poder concluir de manera correcta.

Visto que la variable acumulación de biomasa aérea no presentó ajustes razonables dados los inconvenientes que se tuvieron durante esta etapa del trabajo, se

consideró que no era conveniente analizar el ajuste logrado para otras variables de interés ya que los valores medidos en los ensayos sobre este tipo de suelos no son del todo confiables y por lo tanto no se puede llegar a conclusiones bien fundamentadas.

#### **4.5. POSIBILIDADES DE USO DE CROPSYST EN SITUACIONES COMERCIALES**

Uno de los objetivos de este trabajo consiste en lograr que CropSyst sirva como herramienta en la toma de decisiones técnicas en situaciones reales y/o en el análisis y explicación de resultados obtenidos a campo, por medio de la realización de corridas en diversos escenarios ya sea climáticos, edáficos, de manejo u otras, y evaluar su impacto sobre las variables de interés del cultivo. Se tomará como variable de interés la acumulación de biomasa por haber presentado un buen ajuste por el modelo en la calibración y presentar un alto grado de asociación con el rendimiento en grano, siendo este el resultado más importante desde el punto de vista productivo. Para ello se utilizará el suelo del grupo 1, ya que presentó un buen ajuste tanto en biomasa como en las otras variables analizadas. A continuación se verán algunos ejemplos muy sencillos de situaciones en que puede ser de utilidad el uso de esta herramienta.

##### **4.5.1. Impacto del atraso de la fecha de siembra sobre la acumulación de biomasa**

La fecha de siembra en que se realizó el cultivo para este trabajo es considerada tardía para un híbrido de ciclo intermedio como lo es MASS 484 MG, para las condiciones del litoral oeste del país en siembras de primera. Fechas de siembra tardía implican que el período crítico se de en momentos con menores niveles de radiación (tasas de crecimiento inferiores durante PC) además de una cantidad de radiación interceptada total también menor, determinando mermas en el rendimiento en comparación con siembras en fecha optima (1-10/11). En este sentido se analizó cual sería el impacto sobre la producción de biomasa de atrasar la fecha de siembra, si en lugar de que la siembra ocurriera a inicios del mes de diciembre (6/12) se llevara a cabo a fines del mismo mes (27/12), manteniendo la misma situación climática, de suelos y de manejo.

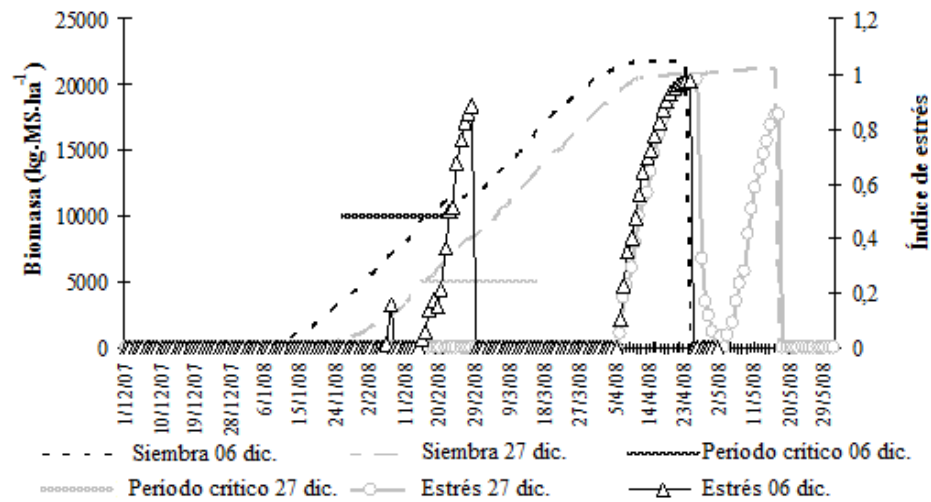


Figura No. 16. Simulación de la producción de biomasa e índice de estrés para dos cultivos de maíz de primera, sembrados a inicios y fines de diciembre 2007 como únicas medidas de manejo diferente

En primer lugar el atraso en la fecha de siembra para la zafra 07/08 no ocasionó mermas en la producción de biomasa acumulada con respecto a la fecha más temprana, alcanzando valores mayores a 20 ton MS ha<sup>-1</sup> en ambas situaciones. A modo de explicación de lo ocurrido con la producción de biomasa presentan a continuación las diferencias en consumo de agua por el cultivo a lo largo del ciclo en ambas situaciones.

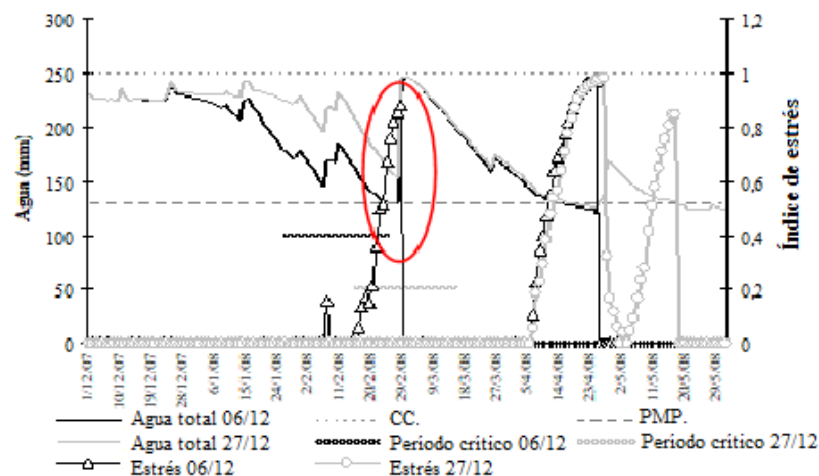


Figura No. 17. Simulación de la evolución del agua en el suelo e índice de estrés para dos cultivos de maíz de primera, sembrados a inicios y fines de diciembre 2007 como únicas medidas de manejo diferente

La similitud en los resultados observados para ambas fechas de siembra se explica por medio de las diferencias en la evolución del contenido de agua en el suelo. Como se puede ver en la figura anterior la situación sembrada a inicios del mes de diciembre presenta un período de estrés severo a fines de floración e inicios de llenado de grano, lo que causa en conjunto con el estrés a fines del llenado un acortamiento en el ciclo del cultivo. Esto determina que la radiación total interceptada termine siendo igual que para la siembra tardía, la que al ser sembrada más tarde no presenta estreses hídricos durante el período crítico (por presentar menores consumos de agua hasta ese momento) y desarrolla el ciclo normalmente resultando más prolongado que para la siembra temprana (142 vs. 126 días a madurez fisiológica respectivamente, figura No. 18).

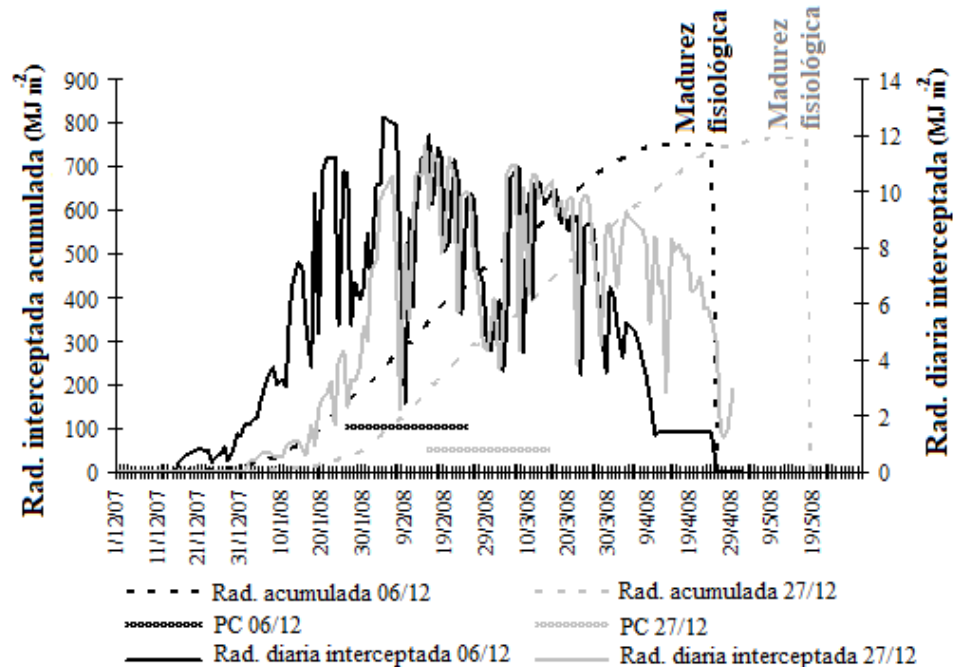


Figura No. 18. Simulación de la interceptación de la radiación por el cultivo para dos cultivos de maíz de primera, sembrados a inicios y fines de diciembre 2007 como únicas medidas de manejo diferente

#### **4.5.2. Impacto del contenido de agua en el suelo a la siembra sobre la producción de biomasa**

Otro análisis interesante puede ser vinculado a la discusión de la conveniencia o no de realizar doble cultivos, es decir un cultivo de invierno seguido de un cultivo de verano de según da en contraposición de un solo cultivo de primera. Las diferencias en relación a la disponibilidad de agua en el suelo para ambas situaciones podrían estar determinando gran parte de los resultados finales obtenidos. Para ello se tomó el mismo

grupo de sitios que para la situación anterior (G1) disminuyendo el contenido de agua a la siembra al 50% del agua disponible en ese momento, dejando el resto de las variables iguales para ambas situaciones (clima, suelo, manejo).

A continuación se muestra la evolución del contenido de agua en el perfil para las dos situaciones planteadas.

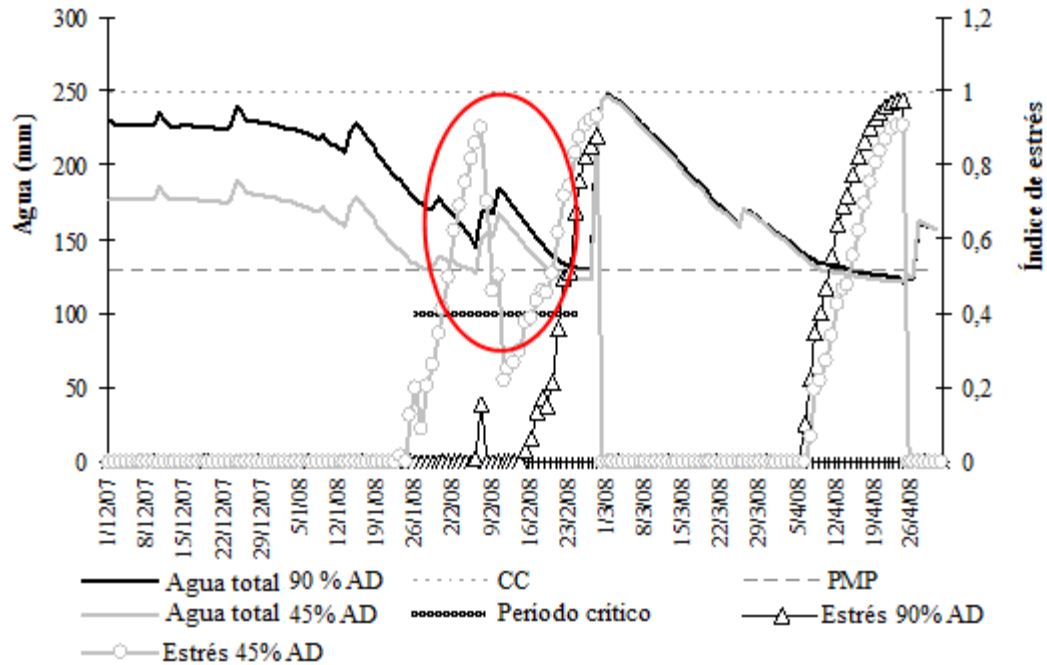


Figura No. 19. Simulación del contenido de agua en suelo e índice de estrés hídrico para dos situaciones de contenido de agua útil a la siembra (90 y 45 %)

Como se dijo anteriormente mientras una situación de siembra partió con 226 mm de agua total en el perfil, la otra presentó 176 mm totales, determinando que esta última haya presentado altos índices de estrés durante gran parte del período crítico en contraposición de lo sucedido en el suelo con mayor contenido de agua.

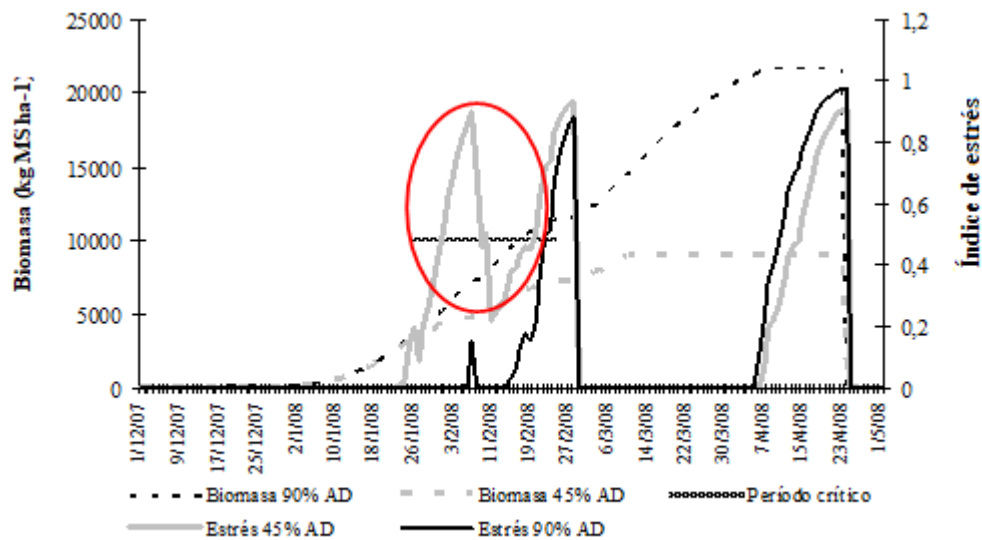


Figura No. 20. Simulación de la producción de biomasa e índice de estrés hídrico para dos situaciones de contenido de agua disponible en suelo a la siembra (90 y 45 %)

Como se puede observar la producción de biomasa se depreció en un 58 % al disminuir el contenido de agua útil a la siembra a la mitad. El hecho de partir con un bajo contenido de agua en el suelo determinó que en etapas tempranas del ciclo el cultivo ya presentara altos índices de estrés hídrico (figura No. 19). Si bien se comentó en el capítulo de resultados y discusiones que el contenido de agua a la siembra no se asocia con la producción de biomasa y el rendimiento (ver anexo No. 3), existen casos como este en que marca una diferencia muy importante entre los resultados obtenidos en una y otra situación.

La situación planteada podría ser comparada con un escenario de siembra de segunda con un tiempo de barbecho corto donde el contenido de agua en el perfil del suelo es bajo por el consumo del cultivo anterior y la falta de tiempo para que se pueda recargar el perfil. De esta forma se pueden conocer los riesgos que se asumen al realizar un cultivo bajo estas condiciones, con bajos contenidos de agua disponible en el perfil a la siembra y/o suelos con baja capacidad de almacenaje de agua.

## **5. CONCLUSIONES**

Si bien la variabilidad entre tipos de suelo fue buscada de manera de poner a prueba la capacidad de predictiva de CropSyst, la heterogeneidad edáfica dentro de un mismo sitio de muestreo en algunos sitios de muestreo dificultó la interpretación y análisis de las salidas arrojadas por el modelo. Esto resultó en una información poco útil para el objetivo perseguido en los sitios mencionados.

La falta de información acerca del comportamiento de los distintos materiales genéticos en nuestras condiciones en cuanto a producción de biomasa, IAF, rendimiento, IC y aun mayor en lo que se refiere a coeficientes genéticos del cultivo y la especie también dificultaron enormemente el trabajo, habiendo que generar la información por medio de la realización de parcelas experimentales y la posterior medición de variables de interés. En relación a la información generada (del suelo y el híbrido) el hecho de contar con información solamente de un año y una fecha de siembra limitan las potencialidades de este tipo de herramientas por contar con pocos escenarios para evaluar.

Referido al programa, en el proceso de calibración CropSyst cuenta con una gran cantidad de parámetros que pueden ser modificados con el objetivo de corregir posibles diferencias entre los valores propuestos por el modelo y los considerados correctos por el usuario. Sería importante su jerarquización en el sentido del impacto que tiene cada uno sobre los resultados finales obtenidos en las salidas, de manera de facilitar su manipulación.

Si bien la simulación del IAF y la intercepción de la radiación no presentaron un ajuste tan correcto como el que se esperaba, no parecen haber sido una limitante para la simulación de variables de mayor importancia como la acumulación de biomasa aérea, IC y rendimiento en grano. En relación a la dinámica del agua en el suelo CropSyst demostró simular de forma muy correcta las variaciones ocurridas a lo largo del desarrollo del cultivo. El ajuste logrado por el modelo, de las variables producción de biomasa y agua en el suelo fueron muy correctos en la etapa de calibración demostrando la potencialidad de este tipo de herramientas para su uso en rotaciones agrícolas.

Por otra parte el modelo no logró simular lo ocurrido en los sitios de muestreo utilizados para la validación. Se cree que la heterogeneidad presente en el suelo dentro de un mismo sitio de muestreo, fundamentalmente en profundidad del perfil, en conjunto con las características de horizontes calcáreos ubicados en capas más profundas determinaron las falencias que tuvo el modelo para simular lo ocurrido.

Se cree que CropSyst presentó buenos resultados cuando se corrió en situaciones donde los valores observados eran consistentes en cuanto a su confiabilidad y calidad.



Sin embargo se debe poner mucho empeño en la generación de información que permita trabajar en el modelo de manera de poder calibrar y validarlo para otros cultivos y otro tipo de suelos. Así se dejan las puertas abiertas para que se continúe con la evaluación de CropSyst u otros modelos de forma de poder contar con una herramienta sólida, consistente y de uso frecuente para técnicos y productores.

## **6. RESUMEN**

Los modelos de simulación están siendo ampliamente aplicados en agricultura para realizar predicciones acerca de las consecuencias agronómicas, ambientales y económicas de complejas interacciones entre manejo de cultivo, suelo y atmósfera. En nuestro país existen pocos antecedentes del uso de modelos de simulación, determinando que en la actualidad no se disponga de esta herramienta. CropSyst es un modelo de paso diario que permite el uso con rotaciones de cultivos y fue diseñado para servir como herramienta para estudiar el efecto del ambiente, del sistema de rotación y el manejo sobre la productividad de los cultivos que integran una rotación. La capacidad predictiva del modelo para las condiciones de suelo, clima, cultivo y manejo referentes al crecimiento, desarrollo y dinámica del agua en el sistema suelo-planta fueron evaluadas por medio de la comparación de resultados de las simulaciones frente a las medidas obtenidas en los experimentos de campo, el método lineal 1:1 y el RMSE (raíz del cuadrado medio del error). De forma de disponer de información consistente como fuente de comparación a lo simulado por el modelo el 6/12/07 en la EEMAC, Paysandú se sembraron 27 parcelas sobre suelos diferentes entre sí con un híbrido de maíz (MASS 484 MG) donde se midió a la siembra y a lo largo de todo el período de desarrollo del cultivo, en el suelo profundidad, textura, materia orgánica, contenido de nitrógeno y humedad gravimétrica, y en el cultivo población, fenología, índice de área foliar, biomasa y rendimiento. En la etapa de calibración se logró un ajuste muy adecuado por parte de CropSyst en relación a la simulación de la acumulación de biomasa y en especial la evolución del contenido de agua en el suelo durante el período de desarrollo del cultivo, presentando valores de RMSE de 16 y 7 % respectivamente. Sin embargo en la etapa de validación, donde se utilizaron suelos con características muy distintas a los utilizados en la calibración, CropSyst no logró simular lo sucedido en los sitios experimentales en relación a las variables del cultivo. Sin embargo presentó un ajuste aceptable de la dinámica del agua en las capas más superficiales. Si bien el modelo no logró un ajuste correcto en la última etapa del trabajo, esto no permite descartar su uso y potencialidad sino que por lo contrario este trabajo deja un horizonte amplio donde hay que profundizar en la evaluación, calibración y validación de CropSyst y otros modelos de forma de lograr de ellos una herramienta de trabajo.

Palabras clave: Modelos de simulación; Cropsyst; Predicción; Sistema suelo-planta-atmósfera; Calibración; Validación; Crecimiento; Desarrollo.

## **7. SUMMARY**

Simulation models are widely used in agriculture to make predictions about the agronomic, environmental and economic management of complex interactions between crop, soil and atmosphere. In our country there is little background about the use of these tools, so currently they are not available. CropSyst is a daily step model that can be used with crop rotations and was designed to serve as a tool to study the effect of the environment, the rotation system and management on the productivity of crops that make up a rotation. The predictive ability of the model under the conditions of soil, climate and crop management related to growth, development and dynamics of water in the soil-plant system were evaluated by comparing simulation results with measurements taken in field experiments through the 1:1 line and RMSE (root mean square of error) methods. In order to have consistent information as a source of comparison with the output of the simulation model, on 12/06/2007 in EEMAC-Paysandú were sown 27 plots with a maize hybrid (MASS 484 MG) over soils with different characteristics. Before planting soil depth, texture and organic matter were measured. After planting and throughout the period of crop development, were measured nitrogen content and gravimetric moisture, phenology, leaf area index, biomass and yield. In the calibration phase there was a very appropriate setting of CropSyst's simulation about biomass accumulation and especially in the evolution of water content in soil during crop development, with RMSE in order to 16 and 7% respectively. However at the validation state, where other soils with characteristics very different from those used in calibration, CropSyst failed to simulate what happened in the experimental sites in relation to crop variables. Despite, CropSyst presented an acceptable fit of the water dynamic in the above layers. While the model failed to fit in a last stage of labor, this does not mean that its use and potential must be discarded, on the contrary this paper leaves a broad horizon where further evaluation, calibration and validation must be made to have CropSyst and other models available as a tool.

Key words: Simulation models; Cropsyst; Prediction; Soil-plant-atmosphere system; Calibration; Validation; Growth; Development.

## **8. BIBLIOGRAFÍA**

1. ALLISON, J. C. S.; DAYNARD, T. B. 1979. Effect of change in time of flowering, induced by altering photoperiod or temperature, on attributes related to yield in maize. *Crop Science*. 19: 1-4.
2. ALTAMIRANO, A.; DA SILVA, H.; DURÁN, A.; ECHEVARRÍA, A.; PANARIO, D.; PUENTES, R. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: clasificación de suelos. Montevideo, MAP. DSF. t. 1, 96 p.
3. ANDRADE, F. H. 1992. Radiación y temperatura determinan los rendimientos máximos en maíz. INTA Balcarce. Boletín Técnico no. 106. 16 p.
4. \_\_\_\_\_.; UHART, S. A.; CIRILO, A. 1993. Temperature affects radiation use efficiency in maize. *Field Crops Research*. 32: 17-25.
5. \_\_\_\_\_.; GARDIOL, J. 1995. Sequía y producción de los cultivos de maíz, girasol y soja. INTA Balcarce. Boletín Técnico no. 132. 23 p.
6. \_\_\_\_\_.; CIRILO, A. G.; UHART, S. A.; OTEGUI, M. E. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Balcarce, INTA/UNMP. FCA/La Barrosa y Decalb. 292 p.
7. \_\_\_\_\_.; VEGA, C.; UHART, S.; CIRILO, A.; CANTARERO, M.; VALENTINUZ, O. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Science*. 39: 453-459.
8. \_\_\_\_\_.; ECHARTE, L.; RIZZALLI, R.; DELLA MAGGIORA, A.; CASANOVAS, M. 2002. Kernel number prediction in maize under nitrogen or water stress. *Crop Science*. 42: 1173-1179.
9. ANGUS, J. F.; CUNNINGHAM, R. N.; MONCUR, M. W.; MACKENZIE, D. H. 1981. Phasic development in field crops. Thermal response in the seedling phase. *Field Crops Research*. 3: 365-378.
10. ARGUISAIN, G. G. 1990. Productividad de maíz en Balcarce. Tesis Magister Scientiae. Balcarce, Buenos Aires, Argentina. Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ciencias Agrarias. 60 p.
11. BAROFFIO, J. C.; RAMOS, J. P. 2009. Calibración y validación del modelo CropSyst para un cultivar de soja para las condiciones de producción del litoral-oeste de Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 96 p.

12. BELLOCCHI, G.; SILVESTRI, N.; MAZZONCINI, M.; MENINI, S. 2002. Using the CropSyst Model in continuous rainfed maize (*Zea mais* L.) under alternative management options. *Italian Journal of Agronomy*. 6(1): 43-56.
13. BORRÁS, L.; OTEGUI, M. E. 2001. Maize kernel weight response to post-flowering source-silk ratio. *Crop Science*. 41: 1816-1823.
14. BOUYOUCOS, G. S. 1936. Directions for making mechanical analysis of soil by hydrometer method. *Soil Science*. 4: 225-228.
15. CALDER, D. M. 1964. Inflorescence induction and initiation in the Gramineae. *In*: Bernard, C. ed. *Grasses and grasslands*. London, MacMillan. pp. 59-87.
16. CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. 1998. Temperature. *In*: Campbell, G. S.; Norman, J. M. eds. *An introduction to environmental biophysics*. 2<sup>nd</sup>. ed. Madison, Springer. pp. 15-35.
17. CANTARERO, M. G.; CIRILO, A. G.; ANDRADE, F. H. 1999. Night temperature at silking affects kernel set in maize. *Crop Science*. 39: 703-710.
18. CAPITANO, R.; GENTINETTA, E.; MOTTO, M. 1983. Grain weight and its components in maize inbred lines. *Maydica*. 28: 365-379.
19. CÁRCOVA, J.; URIBELARREA, M.; BORRÁS, L.; OTEGUI, M. E.; WESTGATE, M. E. 2000. Synchronous pollination within and between ears improves kernel set in maize. *Crop Science*. 40: 1056-1061.
20. \_\_\_\_\_; OTEGUI, M. E. 2001. Pollination asynchrony and kernel abortion in maize. *Crop Science*. 41: 1809-1815.
21. \_\_\_\_\_; BORRÁS, L.; OTEGUI, M. E. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en maíz. Desarrollo del cultivo de maíz. *In*: Satorre, E. H.; Benech Arnold, R. L.; Slafer, G. A.; De La Fuente, E. B.; Miralles, D. J.; Otegui, M. E.; Savin, R. eds. *Producción de granos; bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 135-157.
22. CIRILO, A. G.; ANDRADE, F. H. 1994. Sowing date and maize productivity; kernel number determination. *Crop Science*. 34: 1044-1046.

23. CORWIN, D. L.; WAGGONER, B. L.; RHOADES, J. D. 1991. A functional model of solute transport that accounts for bypass. *Journal of Environmental Quality*. 20:647-658.
24. DAYNARD, T. B.; DUNCAN, W. G. 1969. The black layer and grain maturity in corn. *Crop Science*. 9: 473-476.
25. ELLIS, R. H.; SUMMERFIELD, R. J.; EDMEADES, G. O.; ROBERTS, E. H. 1992. Photoperiod, temperature, and the interval from sowing to tassel initiation in diverse cultivars in maize. *Crop Science*. 32: 1225-1232.
26. FERRER, F.; VILLAR, J.; STOCKLE, C. 2000. Evaluación del modelo de simulación CropSyst para maíz de regadío en el Valle del Ebro. *Investigación Agronómica, Producción Vegetal*. 15(3): 237-251.
27. FISHER, K. S.; PALMER, F. E. 1984. Tropical maize. In: Goldsworthy P. R.; Fisher, N. M. eds. *The physiology of tropical field crops*. Chichester, John Wiley and Sons. pp. 213-248.
28. FLERCHINGER, G. N. 1987. Simultaneous heat and water model of a snow-residue-soil system. PhD. Dissertation. s.l., United States. Washington State University. 138 p.
29. GARDNER, F.; PEARCE, R.; MITCHELL, R. 1985. *Physiology of crop plants*. Ames, Iowa, Iowa State University, USA. 327 p.
30. GIMÉNEZ, L. 2001. *Maíz*. Montevideo, Facultad de Agronomía. 76 p.
31. GODWIN, D. C.; JONES, A. C. 1991. Modeling plant and soil systems. Nitrogen dynamics in soil-plant systems. *American Society of Agronomy*. 31: 297-302.
32. GRANT, R.; JACKSON, B.; KINIRY, J.; ARKIN, G. 1989. Water deficit timing effects on yield components in maize. *Agronomy Journal*. 81: 61-65.
33. HALL, A.; LEMCOFF, J.; TRÁPANI, N. 1981. Water stress before and during flowering in maize and its effects on yield, its components, and their determinants. *Maydica*. 26: 19-38.
34. \_\_\_\_\_; VILELLA, F.; TRÁPANI, N.; CHIMENTI, C. 1982. The effects of water stress and genotype on the dynamics of pollen-shedding in maize. *Field Crops Research*. 5: 349-363.

35. HANKS, R. J. 1983. Yield and water use relationships; an overview. In: Taylor H. M.; Jordan, W. R.; Sinclair, T. R. eds. Limitations to efficient water use in crop production. Madison, ASA/CSSA/SSSA. pp. 393-411.
36. JONES, R. J.; ROESSLER, J. A.; OUATTAR, S. 1985. Thermal environment during endosperm cell division in maize; effects on Lumber of endosperm cells and starch granules. *Crop Science*. 25: 830-834.
37. KINIRY, J. R.; RITCHIE, J. T.; MUSSER, R. L.; FLINT, E. P.; IWIG, W. C. 1983. The photoperiodic sensitive interval in maize. *Agronomy Journal*. 75: 687-690.
38. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 1985. Shade-sensitive interval of kernel number in maize. *Agronomy Journal*. 77: 711-715.
39. \_\_\_\_\_. 1991. Maize phasic development. In: Hanks, J.; Ritchie, J. eds. Modelling plant and soil systems. Wisconsin, ASA/CSSA/SSSA. pp. 55-70.
40. LEJEUNE, P.; BERNIER, G. 1996. Effect of environment on the early steps of ear initiation in maize (*Zea mays* L.). *Plant, Cell and Environment*. 19:217-224.
41. MONZÓN, J.; SADRÁS, V.; ANDRADE, F. 2006. Fallow soil evaporation and water storage as affected by stubble in sub-humid (Argentina) and semi-arid (Australia) environments. *Field Crop Research*. 98: 83-90.
42. MUCHOW, R. C.; SINCLAIR, T. R. 1989. Water deficits effects on maize yields modeled under current and green house climates. *Crop Science*. 83: 1052-1059.
43. MURALI, V.; AYLMOORE, L. A. 1981. Model description and some simulations. Convective-dispersive-adsorptive flow model for solute transport in soils. *Australian Journal of Soil Research*. 19:32-39.
44. NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A. L.; Miller, R. H.; Keeny, D. R. eds. Methods of soil analysis. 2<sup>nd</sup>. ed. Madison, Wiscosin, USA, American Society of Agronomy. pt. 2, pp. 539-579.
45. OTEGUI, M. E. 1992. Incidencia de una sequía alrededor de antesis en el cultivo de maíz. Consumo de agua, producción de materia seca y determinación del rendimiento. Tesis MSc. Buenos Aires, Argentina. Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ciencias Agrarias. 93 p.

- 46.\_\_\_\_\_. 1995a. Prolificacy and grain yield components in modern argentinian maize hybrids. *Maydica*. 40: 371-376.
- 47.\_\_\_\_\_.; NICOLINI, M. G.; RUIZ, R. A.; DODDS, P. A. 1995b. Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agronomy Journal*. 87: 29-33.
- 48.\_\_\_\_\_. 1996a. Mise en place de l appareil reproducteur et determination du nombre de grains chez le maïs. Thèse de Docteur en Sciences, Spécialité Ecologie des Plantes. Paris, France. Université de Paris XI. 129 p.
- 49.\_\_\_\_\_.; SLAFER, G. 1996b. Principales aspectos de la cosecha, acondicionamiento y almacenamiento del maíz. AACREA. Cuaderno de Actualización Técnica Maíz. no. 9: 74-82.
- 50.\_\_\_\_\_.; MELON, S. 1997. Kernel set and flower synchrony within the ear of maize; sowing date effect. *Crop Science*. 37: 441-447.
- 51.\_\_\_\_\_.; ANDRADE, F. H. 2000. New relationships between light interception, ear growth and kernel set in maize. In: Westgate, M. E.; Boote, K. eds. *Physiology and modeling of kernel set in maize*. Baltimore, Maryland, USA, Crop Science Society of America/American Society of Agronomy. pp 89-102 (Special Publication no. 29).
52. REDDY, V. M.; DAYNARD, T. B. 1983. Endosperm characteristics associated with rate of grain filling and kernel size in corn. *Maydica*. 28: 339-355.
53. RITCHIE, J. T.; NESMITH, D. S. 1991. Temperature and crop development. In: Hanks, J.; Ritchie, J. T. eds. *Modeling plant and soil systems*. Madison, WI, ASA/CSSA/SSSA. pp. 5-29 (Agronomy Series no.31).
- 54.RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Ames. Iowa. Special Report no. 48. s.p.
55. ROSE, C.; CHICHESTER, F.; WILLIAMS, J. R.; RITCHIE, J. T. 1982. Application of an approximate analytic method of computing solute profiles with dispersion in soils. *Journal of Environmental Quality*. 11(1): 151-155.
56. SADRÁS, V.; FERREIRO, M.; GUTHEIM, F.; KANTOLIC, A. G. 2002a. Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperíodo. In: Andrade F. H.; Sadras, V. O. eds. *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. Balcarce, Buenos Aires, INTA. pp. 25-56.



57. \_\_\_\_\_. 2002b. Interaction between rainfall and nitrogen fertilization of wheat in environments prone to terminal drought; economic and environmental risk analysis. *Field Crop Research*. 77: 201-215.
58. SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal*. 70:1569-1578.
59. SHAFFER, M. J.; HALVERSON, A. D.; PIERCE, F. J. 1991. Nitrate leaching and economic analysis package (NLEAP); model description and application. *In*: Hatfield, J. L.; Follett, R. F. eds. *Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability*. Madison, WI, Soil Science Society of America. pp. 285-322.
60. SHAW, R. H. 1988. Climate requirement. *In*: Sprague, G. F.; Dudley, J. W. eds. *Corn and corn improvement*. 3<sup>rd</sup>. ed. Madison, WI, American Society of Agronomy. pp. 609-638 (Agronomy no. 18).
61. SINCLAIR, T. R.; TANNER, C. B.; BENNETT, J. M. 1984. Water use efficiency in crop production. *BioScience*. 34(1): 36-40.
62. \_\_\_\_\_.; BENNETT, J. M.; MUCHOW, R. C. 1990. Relative sensitivity of grain yield and biomass accumulation to drought in field-grown maize. *Crop Science*. 30: 690-693.
63. STEVENS, S. J.; STEVENS, E. J.; LEE, K. W.; FLOWERDAY, A. D.; GARDNER, C. O. 1986. Organogenesis of the staminate and pistillate inflorescences of pop and dent corns; related to leaf stages. *Crop Science*. 26: 712-718.
64. STOCKLE, C.; CAMPBELL, G. 1989. Simulation of crop response to water and nitrogen; an example using spring wheat. *Transactions of the ASAE*. 32 (1): 66-68.
65. \_\_\_\_\_.; NELSON, R. L. 1999. Cropping systems simulation model, user's manual; versión 3.0. (en línea). Pullman, WA, Washington State University. Biological Systems Engineering Department. 235 p. Consultado 24 ene. 2008. Disponible en <http://www.bsyse.wsu.edu/cropsyst/>
66. THOMPSON, L. M. 1986. Climatic change, weather variability and corn production. *Agronomy Journal*. 78: 649-653.

67. TOLLENAAR, M.; DAYNARD, T. B. 1978. Effect of defoliation on kernel development in maize. *Canadian Journal of Plant Science*. 58: 207-212.
68. TOTIS DE ZELJKOVICH, L.; ROVELLA, C. M. 1980. Necesidades de agua de un cultivo de maíz en la región de Pergamino. In: Congreso Nacional de Maíz (2º., 1980, Buenos Aires, Argentina). Trabajos presentados. Buenos Aires, AIANBA. pp. 211-219.
69. URIBARREA, M.; CÁRCOVA, J.; OTEGUI, M. E.; WESTGATE, M. E. 2002. Pollen production, pollination dynamics and kernel set in maize. *Crop Science*. 42: 1910-1919.
70. WAGNET, R.; HUDSON, J. 1989. *Leachm*. Ithaca, NY, Cornell University. Water Resources Institute. s.p.
71. WARRINGTON, I. J.; KANEMASU, E. T. 1983. Crop growth response to temperature and photoperiod; seedling emergence, tassel initiation, and anthesis. *Agronomy Journal*. 75: 749-754.
72. WESTGATE, M.; BOYER, J. 1986. Reproduction at low silk and pollen water potentials in maize. *Crop Science*. 26: 951-956.
73. WILSON, D. R.; MUCHOW, R. C.; MURGATRYD, C. J. 1995. Model analysis of temperature and solar radiation limitations to maize potential productivity in a cool climate. *Field Crops Research*. 43: 1-18.

## **9. ANEXOS**

Anexo No. 1. Principales características de los suelos de las parcelas experimentales

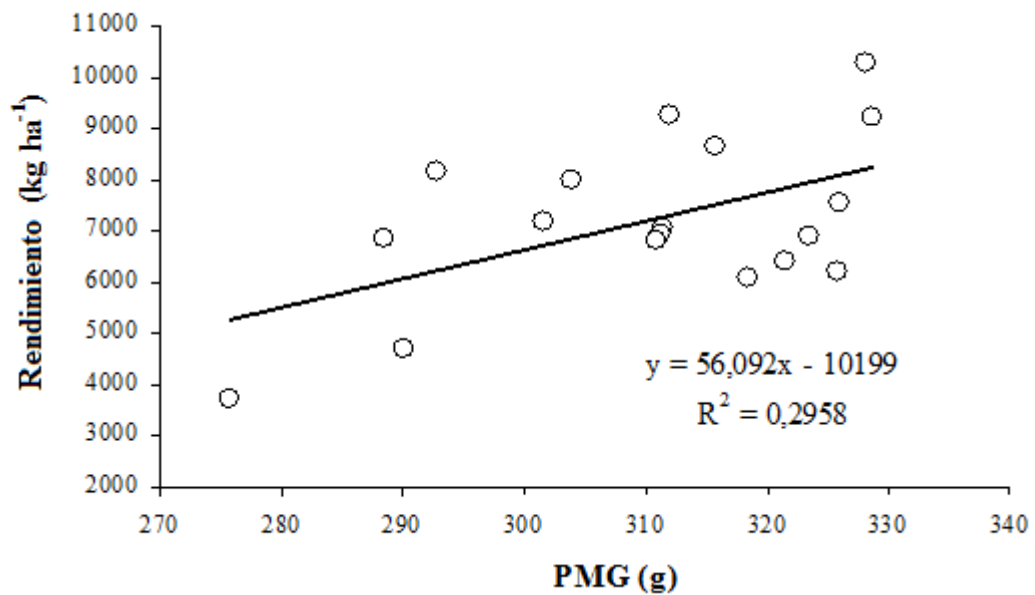
Parcela	Prof. (cm)	Textura (%)			MO %	Dap (Mg m <sup>-3</sup> )
		Ar.	Ac.	L.		
112	0-5	24,4	23,2	52,4	sd	1,22
112	5-10	23,4	17,4	59,2	sd	1,22
112	10-20	21,7	23,2	55,2	sd	1,25
112	20-30	18,5	38,5	43,0	sd	1,17
112	30-50	14,1	47,8	38,0	sd	1,13
112	50-70	16,3	43,2	40,5	sd	1,28
112	70-104	18,2	21,7	60,1	sd	1,14
113	0-5	23,3	22,1	54,6	sd	0,97
113	5-10	22,5	19,8	57,8	sd	1,16
113	10-20	21,8	44,2	34,0	sd	1,19
113	20-30	17,3	30,5	52,2	sd	1,30
113	30-50	14,1	47,8	38,0	sd	1,12
113	50-70	15,3	45,1	39,6	sd	1,23
113	70-100	18,2	21,7	60,1	sd	1,32
131	0-5	23,27	22,13	54,60	5,62	1,13
131	5-10	20,15	18,30	61,55	4,07	1,05
131	10-20	20,35	20,25	59,40	3,84	1,10
131	20-30	15,91	16,73	67,36	3,69	1,17
131	30-50	11,52	18,00	70,48	3,00	1,21
131	50-70	18,37	36,43	45,20	1,40	1,29
131	70-105	18,19	21,74	60,07	0,86	1,19
133	0-5	23,27	22,13	54,60	5,31	0,98
133	5-10	19,00	18,45	62,55	3,71	1,24
133	10-20	19,10	16,10	64,80	3,52	1,19
133	20-30	17,10	19,00	63,99	3,26	1,11
133	30-50	12,70	20,80	66,50	2,17	sd
133	50-70	11,77	38,00	50,23	1,52	1,10
133	70-108	13,77	35,80	50,43	0,98	1,10
132	0-5	10,5	18,3	71,3	5,43	1,10
132	5-10	12,3	18,5	69,2	5,16	0,95
132	10-20	13,2	20,1	66,7	3,95	1,13
132	20-30	11,1	23,2	65,7	3,62	1,09
132	30-50	7,1	19,6	73,4	2,50	1,08
132	50-70	8,4	36,7	54,9	1,81	1,04
132	70-104	11,6	37,6	50,8	1,44	1,20
212	0-5	28,2	18,0	53,8	4,52	1,28

<b>212</b>	5-10	28,5	15,0	43,5	3,33	1,39
<b>212</b>	10-20	26,9	16,3	56,8	3,12	1,22
<b>212</b>	20-30	16,7	41,4	41,9	2,15	1,17
<b>212</b>	30-50	18,2	42,4	39,4	1,61	1,16
<b>212</b>	50-70	15,7	41,0	43,3	1,02	1,28
<b>212</b>	70-102	19,5	30,9	49,7	0,22	sd
<b>213</b>	0-5	26	11,44	62,56	3,5	1,26
<b>213</b>	5-10	26	15	59	3,2	1,21
<b>213</b>	10-20	29,72	21	49,28	2,5	1,46
<b>213</b>	20-30	28	26,19	45,81	2,9	1,25
<b>213</b>	30-50	12,8	34,71	54,49	1,9	1,19
<b>213</b>	50-70	18,41	21	60,59	0,9	1,25
<b>213</b>	70-101	20	20,64	59,36	0,4	1,27
<b>241</b>	0-5	23,60	19,20	57,20	4,36	1,06
<b>241</b>	5-10	25,60	15,01	58,99	3,29	1,23
<b>241</b>	10-20	26,53	23,22	50,25	3,03	1,29
<b>241</b>	20-30	23,27	26,00	50,73	2,76	1,25
<b>241</b>	30-50	16,73	41,56	41,70	2,00	1,05
<b>241</b>	50-70	11,50	40,90	47,60	1,60	1,08
<b>241</b>	70-106	14,53	37,06	48,40	0,64	1,09
<b>321</b>	0-5	24,2	15,1	60,7	5,2	1,16
<b>321</b>	5-10	27,0	17,4	55,6	3,8	1,13
<b>321</b>	10-20	27,1	15,0	57,9	3,4	1,27
<b>321</b>	20-30	21,6	33,8	44,6	2,4	1,25
<b>321</b>	30-50	18,0	42,1	39,9	1,7	1,15
<b>321</b>	50-70	15,7	41,0	43,3	1,6	1,22
<b>321</b>	70-102	14,4	21,2	64,4	0,8	sd
<b>323</b>	0-5	24,50	11,26	69,24	5,22	0,95
<b>323</b>	5-10	25,00	16,00	59,00	3,36	1,50
<b>323</b>	10-20	26,00	16,10	57,86	2,83	1,33
<b>323</b>	20-30	26,00	14,90	59,10	3,41	1,16
<b>323</b>	30-50	17,30	43,15	39,55	2,00	0,54
<b>323</b>	50-70	17,24	37,51	45,25	2,72	0,65
<b>323</b>	70-89	20,00	29,00	51,00	sd	1,38
<b>341</b>	0-5	29,13	16,65	54,22	4,80	1,26
<b>341</b>	5-10	27,06	18,48	54,46	4,02	1,18
<b>341</b>	10-20	26,76	21,00	52,24	3,39	1,26
<b>341</b>	20-30	25,68	23,32	51,00	2,96	1,28
<b>341</b>	30-50	28,10	19,88	52,02	2,22	1,16
<b>341</b>	50-70	15,12	42,06	42,82	1,48	1,23
<b>341</b>	70-104	18,48	26,58	54,95	0,43	1,17
<b>342</b>	0-5	29,13	16,65	54,22	4,80	0,96

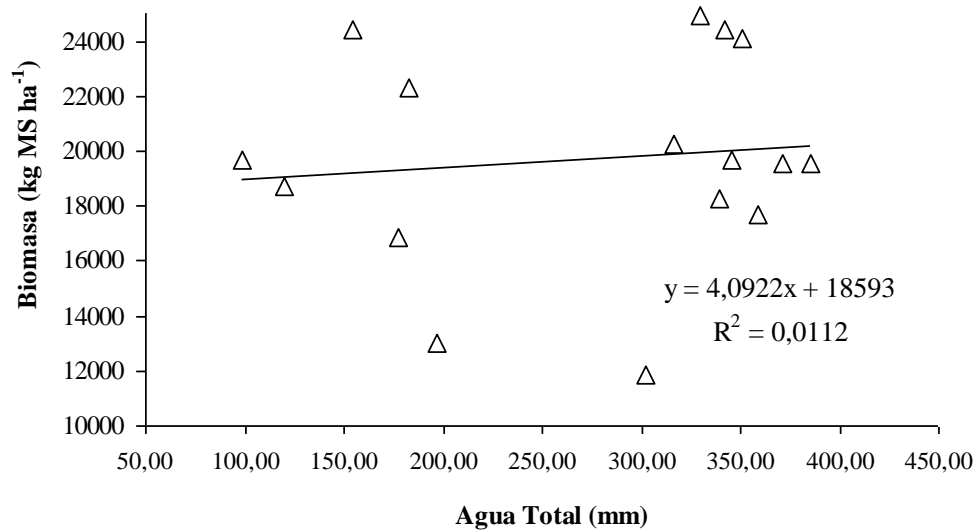
<b>342</b>	5-10	27,13	16,80	56,07	4,17	1,25
<b>342</b>	10-20	26,22	19,81	53,97	3,81	1,21
<b>342</b>	20-30	25,17	26,90	47,93	3,26	1,21
<b>342</b>	30-50	15,49	44,80	39,71	2,10	1,10
<b>342</b>	50-70	15,12	42,06	42,82	1,65	1,00
<b>342</b>	70-106	17,92	17,66	64,42	0,76	1,24
<b>10 a</b>	0-15	21	29,2	49,8	4,58	1,29
<b>10 a</b>	15-30	19	34,43	46,57	3,90	1,35
<b>10 a</b>	30-45	10,23	56,42	33,35	3,20	1,42
<b>10 a</b>	45-60	10,05	51,28	38,67	2,08	1,28
<b>10 m</b>	0-15	28	27	45	3,84	1,37
<b>10m</b>	15-30	18,4	40	41,6	2,35	1,24
<b>10 m</b>	30-45	16	48,05	39,95	1,55	1,33
<b>10m</b>	45-60	12,12	51	36,88	1,47	1,49
<b>10 b</b>	0-15	28	26	46	4,36	1,38
<b>10 b</b>	15-30	18	49,1	32,9	2,19	1,36
<b>10b</b>	30-45	14,1	51	34,9	2,03	1,35

Sd: sin dato.

## Anexo No. 2. Asociación entre el peso de granos y el rendimiento



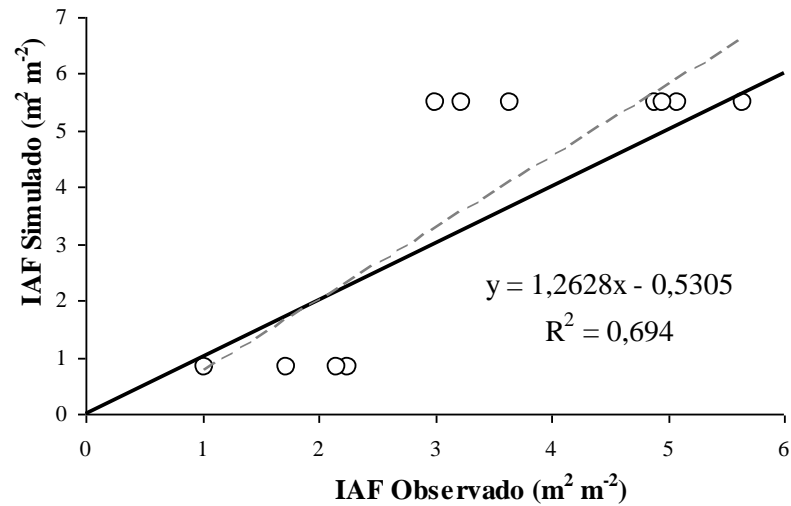
Anexo No. 3. Relación entre el agua total en el suelo a la siembra y la biomasa acumulada a cosecha, para la totalidad de los sitios de muestreo



Anexo No. 4. RMSE de IAF para el grupo de suelos utilizados en la calibración, con y sin considerar el grupo 4

Con G4							
Fecha	Total	n	CME	RCME	media Obs.	media Sim.	RCME (%)
8 Ene.	4,65	4	1,16	1,08	1,79	0,82	60,16
2 Feb.	11,55	3	3,85	1,96	3,73	4,55	52,55
18 Feb.	3,87	4	0,97	0,98	4,82	5,48	20,43
<b>Media</b>	<b>20,1</b>	<b>11,0</b>	<b>1,8</b>	<b>1,4</b>	<b>3,4</b>	<b>3,6</b>	<b>39,2</b>
Sin G4							
Fecha	Total	n	CME	RCME	media Obs.	media Sim.	RCME (%)
8 Ene.	4,60	3	1,53	1,24	2,05	0,83	60,53
2 Feb.	11,55	3	3,85	1,96	3,73	5,49	52,55
18 Feb.	0,55	3	0,18	0,43	5,21	5,49	8,21
<b>Media</b>	<b>16,7</b>	<b>9,0</b>	<b>1,9</b>	<b>1,4</b>	<b>3,7</b>	<b>3,9</b>	<b>37,2</b>

Anexo No. 5. Lineal 1:1 de IAF simulado y observado, para los grupos de suelos utilizados en la calibración



Anexo No. 6. RMSE de intercepción de la radiación para el grupo de suelos utilizados en la calibración, con y sin considerar el grupo 4

<b>Con G4</b>				
Fecha	Media Obs.	Media Sim.	RMSE	RMSE (%)
8 Ene.	6,2	3,1	2,7	43,7
2 Feb.	7,9	8,5	2,0	25,7
18 Feb.	8,6	8,4	1,3	15,3
<b>Media</b>	<b>7,6</b>	<b>6,6</b>	<b>2,1</b>	<b>27,7</b>
<b>Sin G4</b>				
Fecha	Media Obs.	Media Sim.	RMSE	RMSE (%)
8 Ene.	6,9	3,1	3,1	44,4
2 Feb.	7,9	10,3	2,0	25,7
18 Feb.	8,8	7,9	1,3	14,9
<b>Media</b>	<b>7,9</b>	<b>7,1</b>	<b>2,3</b>	<b>28,6</b>