

UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMIA

CALIBRACION Y VALIDACION DEL MODELO CROPSYST PARA UN  
CULTIVAR DE TRIGO PARA LAS CONDICIONES DE PRODUCCION DEL  
LITORAL-OESTE DE URUGUAY

por

Federico D'OTTONE DI LORENZO

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

MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2011

Tesis aprobada por:

Directores:

-----  
Ing. Agr. Sebastián Mazzilli

-----  
Ing. Agr. Oswaldo Ernst

-----  
Ing. Agr. Esteban Hoffman

Fecha: 25 de marzo de 2011

Autor:

-----  
Bach. Federico D'Ottone

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia que siempre me brindó su apoyo, en especial a mis padres Alvaro y Elizabeth.

Al Prof. Ing. Agr. Sebastián Mazzilli, quien con solvencia científica, claridad docente, dedicación y entusiasmo, hizo de esta instancia una experiencia que siempre valoraré en lo académico y lo personal.

A todos mis amigos, compañeros, docentes y funcionarios de la Facultad de Agronomía que fueron parte de este camino.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN .....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES .....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	2
2.1. <u>DESARROLLO Y FACTORES AMBIENTALES</u> .....	2
2.1.1 <u>Introducción</u> .....	2
2.1.2 <u>Temperatura</u> .....	3
2.1.3 <u>Vernalización</u> .....	3
2.1.4 <u>Fotoperiodo</u> .....	4
2.1.5 <u>Efecto combinado de la radiación y temperatura</u> .....	5
2.1.6 <u>Eficiencia en el uso de agua</u> .....	7
2.2 <u>CROPSYST Y TRIGO</u> .....	7
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	9
3.1. <u>CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO</u> .....	9
3.1.1 <u>Ensayo</u> .....	9
3.1.2 <u>Ubicación</u> .....	9
3.1.3 <u>Tratamientos</u> .....	9
3.1.3 <u>Instalación y manejo</u> .....	9
3.1.4 <u>Cultivar</u> .....	10
3.1.4 <u>Suelo</u> .....	10
3.2 <u>DETERMINACIONES</u> .....	10
3.2.1 <u>Textura y materia orgánica</u> .....	10
3.2.2 <u>Humedad y nitrógeno en suelo</u> .....	10
3.2.3 <u>Fenología, biomasa y nitrógeno en planta</u> .....	11
3.2.4 <u>Índice de área foliar</u> .....	11
3.3 <u>DATOS METEOROLÓGICOS</u> .....	12
3.4 <u>CALIBRACIÓN DEL MODELO CROPSYST</u> .....	13
3.4.1 <u>Programa Cropsyst</u> .....	13
3.5 <u>VALIDACIÓN DEL MODELO</u> .....	13
3.6 <u>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</u> .....	13
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSION</u> .....	15
4.1 <u>CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL PERIODO DEL ENSAYO</u> .....	15
4.2 <u>DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS</u> .....	18
4.3 <u>RESULTADOS DE LA CALIBRACION DE CROPSYST</u> .....	20
4.3.1 <u>Ajuste de fenología</u> .....	20

4.3.2 <u>Ajuste de parámetros fisiológicos</u> .....	21
4.3.3 <u>Resultados calibración biomasa e índice de área foliar</u> .....	21
4.3.4 <u>Ajuste de rendimiento</u> .....	27
4.5 <u>VALIDACIÓN</u> .....	29
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	32
6. <u>RESUMEN</u> .....	33
7. <u>SUMMARY</u> .....	34
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	35
9. <u>ANEXOS</u> .....	40

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Biomasa total, rendimiento en grano y componentes del rendimiento máximo, mínimo y coeficiente de variación. ....	18
2. Matriz de correlaciones entre los componentes del rendimiento y entre estos y la biomasa máxima producida .....	19
3. Parámetros fenológicos calibrados. Valores en Grados Días (GD) .....	20
4. Fenología observada y simulada. ....	20
5. Parámetros fisiológicos obtenidos que difieren de los precargados.....	21
6. Relación de la media observada con la raíz del cuadrado medio del error de los valores simulados (Rel RCME) para todas las parcelas en tres momentos de observación y del total de las observaciones para biomasa (KgMS/ha). ....	24
7. Relación de la media observada con la raíz del cuadrado medio del error de los valores simulados (Rel RCME) para todas las parcelas en tres momentos de observación y del total de las observaciones para Índice de área foliar (IAF).....	24
8. Relación de la media observada con la raíz del cuadrado medio del error de los valores simulados (Rel RCME) para todas las parcelas en tres momentos de observación y del total de las observaciones para radiación fotosintéticamente activa (MJ*m-2).....	25
9. Evolución de la biomasa observada y simulada en la validación. ....	29
10. Rendimiento observado y simulado en la validación (kg/ha) .....	31

Figura No.

1. Lineal 1:1 del área observada versus estimada por Montgomery. ....	12
2. Precipitación y temperatura para los años 2007 y 2008 en relación a la media histórica. ....	15
3. Precipitación y temperatura histórica, del año de calibración (2007) y eventos fenológicos del cultivo. ....	16
4. Precipitación y temperatura histórica, del año de validación (2008) y eventos fenológicos del cultivo. ....	17
5. Dinámica de la acumulación de biomasa para un sitio con pobre (a), aceptable (b) y muy buen (c) ajuste en la calibración. ....	22
6. Lineal 1:1 entre biomasa simulada y observada, para todas las parcelas para tres fechas de muestreo en el ciclo del cultivo. 24/09/2007, 13/11/2007, 04/12/2007. ....	23
7. Evolución de la radiación interceptada por el cultivo, en continuo la simulada por el modelo, en cuadrados cálculo de radiación interceptada a partir de IAF observado, para una parcela con buen (a), regular (b) y pobre (c) ajuste. ....	26
8. Lineal 1:1 entre rendimiento observado y simulado para todas las parcelas de calibración. ....	28
9. Dinámica de la acumulación de biomasa para las parcelas de validación. ....	30

## 1. INTRODUCCIÓN

Los modelos de simulación están siendo utilizados por científicos y asesores en el ámbito agrícola para realizar predicciones sobre las consecuencias agronómicas, ambientales y económicas de las complejas interacciones entre manejo de cultivo suelo y atmósfera. Estas interacciones no pueden realizarse sin una rigurosa abstracción y capacidad de cálculo. Es por ello que los modelos de simulación bien utilizados mejoran notablemente nuestra capacidad de aprovechar el conocimiento disponible.

En nuestro país, solo existen intentos aislados y discontinuados en el uso de esta herramienta, siendo la razón principal de esto la falta de parámetros genéticos necesarios para el funcionamiento de los modelos, así como también los escasos trabajos realizados en la calibración y validación de los modelos que están disponibles. Contar con una herramienta de simulación que permita explorar rápidamente situaciones de manejo como fecha de siembra, distribución, cultivar, entre otras, ayudaría al diseño de experimentos de campo dirigidos a los problemas más importantes, así como realizar análisis de riesgo de cada una de las medidas de manejo evaluadas.

En el caso particular del cultivo de trigo existe abundante información sobre los aspectos más relevantes del cultivo, como densidad y fecha de siembra, manejo de la fertilización, enfermedades y plagas. A su vez se ha puesto mucho énfasis en el conocimiento de los factores fisiológicos determinantes del rendimiento diferenciales de cada cultivar sembrado. Sin embargo, no han existido esfuerzos de largo plazo en el uso de modelos de simulación en el cultivo de trigo.

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 interface con el usuario amigable y es de libre distribución. Este modelo 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.

Los objetivos del presente trabajo son: i) determinar los parámetros requeridos por CropSyst para la simulación del cultivo de trigo; ii) calibrar y evaluar la capacidad del modelo de predecir crecimiento y rendimiento de grano.



## 2. REVISION BIBLIOGRAFICA

### 2.1 DESARROLLO Y FACTORES AMBIENTALES

#### 2.1.1 Introducción

El rendimiento potencial, definido como el rendimiento obtenido bajo condiciones óptimas de manejo, sin limitantes hídricas ni nutricionales, y en ausencia de plagas, enfermedades y malezas depende de factores ambientales como radiación, temperatura, fotoperiodo, concentración de CO<sub>2</sub>, además de los factores genéticos y sus interacciones (Magrín, 2004). Para comprender los aspectos fisiológicos y ecológicos del rendimiento en trigo es necesario estudiar la fisiología del desarrollo del cultivo y los efectos de determinados factores medioambientales en el crecimiento del cultivo y su rendimiento dependiendo del estadio donde ese factor actúa (Slafer et al., 2003).

El desarrollo del trigo puede ser descrito en diferentes estadios los cuales pueden ser definidos según los cambios en su morfología interna o externa, las que determinan un ciclo en el cual el cultivo presenta fases vegetativas, reproductivas y de llenado de grano. En la fase vegetativa las hojas son iniciadas, en la reproductiva prosigue el desarrollo de flores hasta que se determina el porcentaje de fertilidad, y por último la fase llenado de grano, este desarrolla las células del endosperma que crecen hasta determinar el peso final del grano. Estas fases están delimitadas por estos estadios: emergencia, doble arruga, iniciación de la espiguilla terminal, donde todas las espiguillas fueron iniciadas, antesis, madurez y cosecha (Slafer et al., 2003).

La duración de cada fase y el número de primordios iniciados queda determinada por las interacciones entre los factores medioambientales y genéticos. El número de granos es determinado antes de la antesis y su peso luego de la misma. El número de granos por unidad de área y su peso son los componentes principales del rendimiento. El rendimiento depende de cómo se comporte el cultivo en todo su ciclo pero se ha encontrado especial relevancia en el periodo entre iniciación de la espiguilla terminal y antesis. Es importante conocer como la variación de la duración de los estadios del cultivo influye en el rendimiento final (Slafer et al., 2003).

En todas las respuestas al ambiente existe considerable diferencia genética, además, la determinación del agente ambiental que actúa en las mismas es variable para los distintos genotipos. Esto se debe a variaciones en la sensibilidad a cada factor ambiental, a la interactividad de los efectos, y a que las respuestas primarias y sus interacciones varían en cada fase de desarrollo, lo que determina un elevado nivel de complejidad. Este nivel de complejidad es una característica negativa a la hora de

modelar pero es muy positiva por la enorme variabilidad genotípica disponible para el mejoramiento (Slafer y Rawson, 1994).

### 2.1.2 Temperatura

La temperatura es el principal factor ambiental que determina el estado de desarrollo del cultivo de trigo, posiblemente porque todos los procesos y todas las plantas son sensibles a cambios de la misma (Midmore et al., 1982). El desarrollo se acelera en la medida que aumenta la temperatura, teniendo una relación lineal lo que es comúnmente utilizado por los modelos, por tanto en términos de desarrollo, todos los cultivares de trigos responden a la temperatura en sus ciclos de vida aunque en diverso grado (Slafer y Rawson, 1994). La tasa de emergencia de las hojas también responde a la temperatura, siendo constante en acumulación térmica desde la emergencia hasta el estadio de hoja bandera (Kirby, 1995).

Porter y Gawith (1999) en su revisión de los efectos de la temperatura en el cultivo de trigo, determinaron que entre los trabajos estudiados no aparecieron diferencias en la cuantificación de estos efectos para todos los estadios estudiados. De dicha revisión concluyen que las temperaturas letales para el trigo se ubican en una mínima de  $-17.2 \pm 1.2^{\circ}\text{C}$  y una máxima en  $47.5^{\circ}\text{C}$ , aunque la selección para distintos climas puede hacer variar considerablemente estos límites. A pesar de las variaciones mencionadas anteriormente la temperatura óptima se encuentra entre los  $17\text{--}23^{\circ}\text{C}$  para todos los cultivares con una temperatura mínima de crecimiento de  $0^{\circ}\text{C}$  y una máxima de  $37^{\circ}\text{C}$ . Estas repuestas a la temperatura óptima están determinadas por los procesos que se desarrollan en la propia planta, como la actividad enzimática y la fotosíntesis.

Las principales variables ambientales que afectan el desarrollo del trigo cuando es expresado en unidades de tiempo térmico son las temperaturas de vernalización y el fotoperiodo (González et al., 2003).

### 2.1.3 Vernalización

Una de las determinantes claves en el ciclo de vida de una planta es el momento de inicio de la floración. Muchas plantas no florecen si no son expuestas a determinada cantidad de frío, proceso denominado vernalización. Este proceso evita que la floración se produzca en pleno invierno, donde no existen condiciones para la floración y llenado de grano (Amasino, 2005). La vernalización es una respuesta adaptativa de las plantas al clima frío, y es la capacidad de detectar las señales del ambiente como la temperatura y el fotoperiodo. Por tanto temperaturas frías no congelantes y su grado de acumulación dentro de los márgenes toleradas por la planta, permiten la aclimatación de ese genotipo,

controlada por genes de tolerancia al frío, y es determinante de la forma y la duración de la vernalización (Limin, 2009).

Se diferencian dos tipos de trigo en función a su respuesta a la vernalización, trigo primaveral e invernal. El de tipo primaveral, tiene poca o nula repuesta a la vernalización con baja resistencia al congelamiento. Los de tipo invernal tienen una alta repuesta a la vernalización y requieren de un periodo de tiempo frío para florecer, siendo muy resistentes en sus estadios iniciales al congelamiento ( $-20^{\circ}\text{C}$ ) (Flood y Halloran, 1986). Estos requerimientos pueden ser sustituidos por pocos días a temperaturas no vernalizantes entre  $21^{\circ}$  y  $16^{\circ}\text{C}$  (Evans, 1987).

Los trigos que responden a la vernalización florecen luego de completar un periodo con determinando requerimientos de frío, en ellos el estado de doble arruga no es alcanzado hasta que los requerimientos de frío estén completados. Esto prolonga la fase vegetativa generando un gran número de hojas en el tallo principal, sin embargo el filocrono no es alterado (Mossad et al., 1995)

La identificación de fechas optimas para la siembra debe adaptarse de manera de cumplir con los requerimientos de vernalización (Porter y Gawith, 1999), estos autores realizaron una síntesis de 11 estudios, encontrando que la temperatura óptima de vernalización está entre los  $3,8$  y  $6,0^{\circ}\text{C}$ , con un rango entre  $0^{\circ}$  y  $12^{\circ}\text{C}$ , siendo la temperatura base de  $-1,3^{\circ}\text{C}$  y una máxima de  $15,7^{\circ}\text{C}$ . Los cultivares primaverales requieren entre  $7^{\circ}$  y  $18^{\circ}\text{C}$  durante 5 a 15 días para la inducción floral, mientras que los tipos invernales requieren entre  $0^{\circ}$  y  $7^{\circ}\text{C}$  durante 30 a 60 días (Evans et al., citados por Acevedo et al., 2002).

#### 2.1.4 Fotoperiodo

Luego de que la vernalización es completada los cultivares sensibles al fotoperiodo requieren una cierta duración del día para florecer, sensibilidad que varía entre genotipos. La mayoría de los cultivares modernos son cuantitativos de día largo, creciendo más rápido a medida que aumenta la duración de día, pero no requieren una longitud del día específica para florecer, sino que puede expresarse en aproximación a días de floración por hora de alargamiento del día (Major y Kiniry, 1991).

Antes de esta inducción floral la planta se encuentra en una fase vegetativa, determinada en parte por su genotipo e insensible al fotoperiodo. Una vez que finaliza esta fase juvenil, deriva en una fase sensible al fotoperiodo, la cual es mínima cuando el fotoperiodo es el óptimo (Major y Kiniry, 1991). Cuanto más cortos son los días más larga es la fase inductiva, más largo el filocrono y mayor la hoja bandera (Mossad et al., 1995). Con días largos avanza la floración más rápidamente (Major y Kiniry, 1991).

El fotoperiodo es detectado por las hojas más viejas de la planta y no por los meristemos apicales (Barcelló et al., Bernier et al., citados por Acevedo et al., 2002). El desarrollo de la inflorescencia luego de la inducción ocurre con una velocidad que depende de la longitud del día en aquellos genotipos sensibles al fotoperiodo. A medida que el día se acorta, más larga es la fase desde doble arruga hasta a la espiguilla terminal, y el número de espiguillas por espiga. Los cambios en el largo del día luego de que aparece la espiguilla terminal no tienen efecto en la iniciación floral o la fecha de antesis (Stefany, 1993). Esta claramente determinado que el número final de hojas en el tallo principal es modificado por el fotoperíodo (Riddell, citado por Slafer y Rawson, 1994) y la vernalización (Gott, citado por Slafer et al., 1994) reflejándose en cambios en la duración de la etapa vegetativa.

La fase reproductiva tardía es vital en la determinación de flores fértiles en la antesis (Fischer y Fischer, citados por González et al., 2003). La misma coincide con un rápido crecimiento de tallos y espigas lo que resulta en una competencia por asimilados, lo que determina el grado de mortalidad de flores y por tanto el número final de primordios florales que serán fértiles en antesis (Kirby, citado por González et al., 2003). Un mayor número de flores generaría mayor peso de espiga. Basados en este modelo de generación de rendimiento se podría mejorar el rendimiento aumentando el peso de la espiga a través de una mayor duración del periodo de alargamiento del tallo siendo la sensibilidad al fotoperiodo una característica promisoría para alcanzar lo anterior (Slafer et al., 2003).

La sensibilidad al fotoperíodo de cada fase parecen ser independientes unas de las otras, y varía entre cultivares por lo que podrían ser manipuladas independientemente para mejorar el rendimiento (Slafer y Rawson, 1994). La adaptación del trigo a las diferentes latitudes ocurre a niveles más bajos de sensibilidad fotoperiódica, por lo que la floración no es retrasada significativamente si la duración del largo del día es más corta que el óptimo, lo que mejora la adaptación. La vernalización y el fotoperiodo constituyen el proceso básico de la adaptación del trigo a muchos ambientes (Santibañez, citado por Acevedo et al., 2002).

#### 2.1.5 Efecto combinado de la radiación y temperatura

En el trigo tanto la temperatura (T) como la radiación absorbida (aR) durante el crecimiento de la espiga afectan el número grano de la misma (Slafer, citado por Menéndez y Satorre, 2007). La cantidad de aR determina la cantidad de energía disponible y la tasa de crecimiento del cultivo, mientras que la temperatura gobierna la duración del periodo de crecimiento, lo que determina la cantidad total de aR absorbida (Menéndez y Satorre, 2007). Entonces las variaciones en el número de granos, son interpretadas desde el coeficiente fototermal, que es la relación entre la aR y la T media

sobre la T base del cultivo en el periodo de crecimiento de las espigas (Menéndez y Satorre, 2007).

Savin y Slafer (1991) demostraron que el coeficiente fototermal en el periodo de comprendido entre 20 días antes de antesis y 10 después de la misma puede ser utilizado como un buen estimador del periodo de crecimiento de la espiga, donde se determina el numero de granos en climas templados. El peso individual de cada grano depende de la tasa de llenado de grano, y la duración de este periodo, muchos autores señalan que la principal limitante en este periodo seria la fuerza de fosa (Borras et al., citados por Menéndez y Satorre, 2007), siendo la radiación un factor de efecto casi nulo (Slafer, citado por Menéndez y Satorre, 2007). La temperatura tiene aquí un rol importante, aumentando la tasa de llenado en la medida que esta aumenta, efecto que no compensa la reducción en el periodo de grano producido por ese aumento en condiciones de alta temperatura (Wardlaw et al., citados por Menéndez y Satorre, 2007). El peso de grano podría expresarse como función negativa de T durante el periodo de llenado de grano (Menéndez y Satorre, 2007).

#### 2.1.6 Eficiencia en el uso de agua

A partir de una serie de 178 años Musick et al. (1994), determinaron que la evapotranspiración mínima que requiere el trigo para producir grano en condiciones de ambiente seco (Texas, EE.UU) es de al menos 208 mm en trigos invernales, la cual sería menor en trigos primaverales por su ciclo vegetativo más corto. Estos autores encontraron una relación de 1,22 kg de grano por m<sup>3</sup> de agua transpirada. Respecto a la eficiencia del uso del agua (EUA) estos autores señalan que la misma varía entre cultivares y que como resultado del mejoramiento la misma ha aumentado.

Otro aspecto que resalta es la relación cuadrática entre la EUA y el rendimiento, lo que determina un aumento de la misma en rendimientos bajos y un retroceso en el aumento de la misma a medida que se van alcanzando los rendimientos máximos. Resultados similares fueron obtenidos por Zhang y Oweis (1998).

Abbate et al. (2004) encontraron para las condiciones de producción de Argentina, un aumento de la eficiencia en el uso del agua transpirada en la medida que las condiciones de estrés hídrico son más acentuadas. En su trabajo se incluyen referencias a trabajos anteriores habiendo similitudes en el aumento de la eficiencia del uso del entorno de 20%, siendo siempre mayor el porcentaje de reducción de uso del agua que la caída de rendimiento. Estos autores determinaron que la mejor relación entre la utilización de agua relativa y la producción de materia seca relativa es cuadrática.

## 2.2 CROPSYST Y TRIGO

Las ecuaciones generales del modelo se encuentran en el manual del modelo (Stöckle et al., 2009) y recientemente fueron resumidas a nivel local en dos trabajos de tesis de grado de la UDELAR de Baroffio y Ramos (2009), Berrutti (2009). Existen innumerables antecedentes bibliográficos que reportan calibraciones y validaciones de este modelo para el cultivo de trigo y a continuación se citan algunos de los antecedentes más relevantes.

Palac et al. (1996) calibraron y validaron el modelo CropSyst para dos cultivares de *Triticum turgidum* spp. *Durum* con manejos diferenciales de nitrógeno y agua en clima mediterráneo (Siria), en tres años teniendo en promedio de relación de la media con la raíz del cuadrado medio del error (Rel RCME) de 10% para variables como evaporación, contenido de nitrógeno del cultivo, IAF, biomasa aérea, rendimiento en grano. Para mejorar su calibración ajustaron algunos parámetros a valores distintos a los precargados en el modelo para mejorar el ajuste en biomasa, evapotranspiración y contenido en N del cultivo, aunque previo al ajuste ya los resultados eran aceptables. Los parámetros ajustados por estos autores fueron los referidos a fenología, índice de cosecha sin estrés, máxima profundidad de raíces, máxima área foliar, máximo y mínimo contenido de nitrógeno durante el crecimiento temprano y máximo contenido en planta en madurez.

Por otra parte Wang et al. (2008) calibraron y validaron el modelo para trigo primaveral en la planicie nororiental de China con datos de tres años de un ensayo que tenía tres tratamientos hídricos y de nitrógeno. El modelo fue validado para biomasa, rendimiento y evapotranspiración (ET). Estos autores calibraron el modelo variando parámetros dentro los rangos que el modelo propone. La validación fue realizada a partir de mediciones en parcelas que no fueron utilizados para la validación. La Rel RCME para biomasa fue del 13%, habiendo sido subestimada por el modelo, esta relación resulto igual para rendimiento, pero el modelo fue más eficiente para la ET del cultivo con una Rel RCME de 7%. Los autores concluyen que CropSyst es una herramienta válida para predecir las variables que estudiaron, pero consideran que deben realizarse más estudios, con mayor detalle, para mejorar el su capacidad de predicción en la zona de estudio.

En dos localidades del sur de Italia Garofalo et al. (2009) calibraron trigo duro (*Triticum durum* Desf.) en un sistema de rotación trigo/vicia (*Vicia faba* var. *minor* L.). Para la calibración del trigo señalan que el parámetro más sensible para la producción de biomasa fue la eficiencia en el uso de la transpiración la que fue ubicada en los  $6,7 \text{ kPa kg.m}^{-3}$ , a su vez hacen referencia a la amplia variación de este coeficiente entre varios trabajos, pero con una tendencia a elevar la eficiencia en la medida que las restricciones hídricas aumentan. En cuanto a la eficiencia en el uso de la radiación la misma no tuvo

variaciones a valores atípicos y la fijaron en un valor de  $3,5 \text{ kg.MJ}^{-1}$ . En la validación del trigo, en dos años distintos al de su calibración, la Rel RCME que obtuvieron en rendimiento se ubico en 21,4% considerándola los autores como muy buena, y para el contenido de agua del suelo los valores estuvieron en el entorno del 15% para los primeros 60 cm del perfil.

En otra región del Italia (norte), entre 1986 y 2002, Bechini et al. (2006), colectaron datos, con el objetivo de determinar los parámetros para trigo de invierno y a su vez explorar la posibilidad de parametrización a partir de información recolectada en la literatura. Los resultados resultaron positivos, generando estimaciones muy razonables en la producción de biomasa, absorción de nitrógeno, en varios lugares y años, pero con subestimaciones de la biomasa aérea. Este mismo autor, considerando los costos y las dificultades que conllevan la realización de experimento a largo plazo y escala en la obtención de parámetros de un cultivo, propone las siguientes alternativas: i) parametrizar los modelos a nivel de especies, subespecies y grupos de madurez de las subespecies; ii) recolectar información de experimentos previos con otros objetivos distintos a la modelización, para así aumentar la información disponible para parametrizar sin aumentar costos. En su evaluación solamente fueron cambiados los parámetros de las variables de mayor importancia como eficiencia de uso de la radiación. A su vez en este trabajo es destacado el hecho que el modelo CropSyst no se presenta como un programa modular, lo que evita ver como cada componente de la simulación afecta el resultado. Los errores en la calibración de distintos componentes podría llegar a compensarse, por lo tanto para mejorar su calibración separaron los componentes, dejando sin cambios el resto y así lograr mejores aproximaciones. Para ello realizaron corridas en Microsoft Excel para cada submodelo, donde se utilizo la función Solver para resolver el valor que se ajusta más a la realidad. De todas maneras las Rel RCME obtenidas para biomasa aérea en sus simulaciones estuvieron en promedio en un 30%.

Recientemente Jalota et al. (2010) calibraron maíz y trigo en secano en la región submontañosa de Punjab, India. Su calibración se baso en observaciones de profundidad de raíces, IAF, área foliar específica, y relación tallo/hoja así como datos fenológicos de dos años (2004-2005). Se realizaron algunos ajustes para mejorar la calibración, obteniéndose mejor ajuste con la ecuación de Penman-Monteith (CME 15%) para el cálculo de evapotranspiración. Los resultados obtenidos en la calibración del trigo tienen una relación con los observados, Rel RCME de 41,7% para biomasa y 17,1% para rendimiento, siendo en la validación los valores del 41,7% y 74,4%.

Solamente se presento un número reducido de trabajos en donde el modelo fue utilizado y calibrado y validado. Los resultados indican que el modelo tiene una buena capacidad de predicción, a pesar de que no se lograron ajustes totalmente adecuados en todos los casos. A su vez se reafirma la necesidad de contar con calibraciones locales para el uso de esta herramienta.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

##### 3.1.1 Ensayo

El ensayo consistió en la siembra de un cultivar de trigo (cv. BioInta 1001) durante dos zafras (2007 y 2008) en una chacra con importante variabilidad en las condiciones edáficas. Se controló, todo tipo de estrés biótico y abiótico de forma de obtener el rendimiento potencial para el sitio, en función de las condiciones edáficas e hídricas.

##### 3.1.2 Ubicación

Los experimentos fueron realizados en la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni, de la Facultad de Agronomía en el departamento de Paysandú - Uruguay, 32° 22' S, 58° 03' W. El suelo sobre el cual se desarrolló en un Brunosol Subeútrico Típico, de la formación Fray Bentos, correspondiente a la unidad San Manuel según la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay escala 1:1.000.000 (URUGUAY. MAP, 1976).

##### 3.1.3 Tratamientos

No existieron tratamientos como tales, sino que dentro del sitio de siembra se seleccionaron 12 puntos (unidades experimentales) variando su posición topográfica y profundidad de suelo.

##### 3.1.4 Instalación y manejo

La chacra elegida presenta una pendiente cercana al 3%, lo que determina variaciones del suelo según la posición topográfica. El sitio experimental tuvo como antecesor en el primer año a una pradera vieja y en el segundo soja de primera.

En ambos años los ensayos fueron sembrados en siembra directa con una sembradora Semeato SHM-11, a una distancia entre hileras de 0.19 m. Los cultivos fueron manejados en ambos años de forma que no se limitara el crecimiento,



manteniéndose los mismos libres de plagas y enfermedades con la fertilización manejada de acuerdo a la información de los niveles a los críticos conocidos para la zona.

El cultivo de calibración fue sembrado el 12/07/2007 y el de validación el 18/06/2008.

### 3.1.5 Cultivar

Se utilizó la variedad de trigo BioInta 1001, de ciclo corto-intermedio, de buena aptitud sanitaria, con buen potencial de rendimiento. Presenta un porte semirrecto, moderado macollaje, y rendimientos estables con alta respuesta a la fertilización (Castro et al., 2005, 2006, 2007), por su parte Hoffman et al. (2007) lo clasifican como de ciclo corto, de baja capacidad de macollaje y de alta sensibilidad a la competencia.

### 3.1.6 Suelo

La totalidad de los ensayos se ubican sobre la formación geológica Fray Bentos en la unidad de suelos San Manuel, dominando grupos de suelos CONEAT 11.3 caracterizados por Brunosoles Eútricos Luvicos y Solonez, en cuya transición pueden existir fases alcalinas en las zonas altas; encontrándose en las laderas Brunosoles Eútricos Típicos asociados a Planosoles Eútricos Melánicos en las convexiones.

Las propiedades hidráulicas del suelo requeridas por CropSyst fueron estimadas de la información de los muestreos realizados al comienzo del ensayo (textura, materia orgánica y densidad aparente). Para ello se utilizaron las ecuaciones desarrolladas por Saxton y Rawls (2006).

Las características de textura, % MO y densidad aparente de cada sitio se presentan en el anexo 1.

## 3.2 DETERMINACIONES

### 3.2.1 Textura y Materia Orgánica

Al inicio del experimento se tomaron muestras de suelo, a profundidades constantes (cada 15 cm) hasta el material madre para determinar la textura, % de materia orgánica (MO%) del suelo y densidad aparente (DA). La textura se determinó por el método de Bouyoucos (1936) y la materia orgánica por el método de Walkey y Black (1934).

### 3.2.2 Humedad y Nitrógeno en suelo

En cada año se tomaron un total de 5 muestras a lo largo del ciclo del cultivo, a las mismas profundidades que el muestreo inicial. Esta muestra se fracciono en dos, de las cuales una parte fue utilizada para el cálculo de humedad gravimétrica (pesando en fresco y luego secando a 110 grados) y la otra parte para el análisis de  $\text{N-NO}_3^-$  para lo cual se utilizo la técnica de electrodos de nitratos, con un equipo Orion modelo 93-07, con  $\text{CaSO}_4$  como floculante. Los resultados finales se expresan como partes por millón.

### 3.2.3 Fenología, Biomasa y Nitrógeno en planta

A emergencia se evaluó el número de plantas de cada parcela contando el número de plantas en 4 m. lineales. Semanalmente se registro la fenología del cultivo utilizando la escala de Zadocks (Zadocks et al., 1974). En tres de estos momentos además de la fenología se calculo la biomasa aérea a partir del corte de 0.7 m<sup>2</sup>, pesándose luego de ser secada a 60°C en estufa durante 2 días. Las mismas muestras que se utilizaron para la estimación de biomasa fueron posteriormente molidas y utilizadas para medir el % N con el método Kjeldahl.

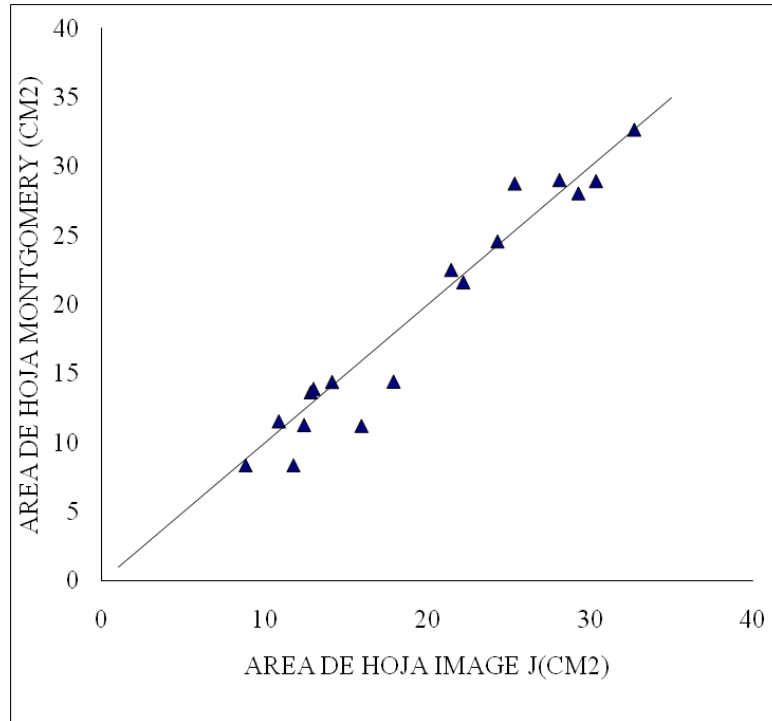
A madurez fisiológica se cosecharon 4.08 m<sup>2</sup> correspondientes al centro de cada punto de muestreo, lo cual permitió estimar rendimiento, índice de cosecha y peso de grano.

### 3.2.4 Índice de área foliar

En el primer año de ensayo se determino IAF. Para esto se extrajeron plantas en 3 momentos de 20 cm. de una hilera. De esta muestra se midió para cada hoja y espiga (cuando esta estaba presente) el largo y ancho lo cual permitió determinar el área foliar con la siguiente ecuación descrita por Montgomery en 1911:

$$L \cdot A^{0.75} \quad [1]$$

(L, largo de hoja y A, ancho de hoja) A su vez esta ecuación fue evaluada a través de la comparación de resultados obtenidos con este método y los resultados obtenidos al escanear y medir el área de 15 hojas con un software de análisis de imágenes “Image J” (NIH, E.E.U.U), determinándose una alta correlación entre las superficies de las hojas entre ambos métodos y la medición manual ( $R^2=0.94$   $p<0.0001$ ). La revisión del trabajo de Karimi et al. (2009) coinciden en señalar la fuerte correlación entre estas variables.



**Figura No. 1:** Lineal 1:1 del área observada versus estimada por Montgomery.

### 3.3 DATOS METEOROLÓGICOS

Los datos meteorológicos como temperatura, radiación, precipitaciones y humedad relativa fueron registrados por una estación meteorológica automática marca Delta-T ubicada en las cercanías del ensayo.

### 3.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO CROPSYST

#### 3.4.1 Programa CropSyst

Se utilizo la versión 4.09.01, año 2007 disponible gratuitamente en <http://www.bsyse.wsu.edu/cropsyst>.

Los parámetros de cultivos necesarios en CropSyst se obtuvieron a partir de: i) medidas directas de campo; ii) calculo indirecto a partir de dichas medidas; iii) valores citados en el manual de CropSyst u otros estudios similares, o iv) ajuste de los valores de los parámetros a partir de las corridas del modelo al punto en que el resultado de la predicción se asemeje lo más posible con los valores observados en el ensayo de campo.

### 3.5 VALIDACIÓN DEL MODELO

Se utilizaron los datos del año 2008 para la validación, corriendo el modelo sin cambiar los parámetros del cultivar calibrado para el set de datos del año 2007.

### 3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Fueron comparados los valores simulados y observados de manera determinar el ajuste en las curvas de acumulación de biomasa aérea, área foliar y dinámica de agua en suelo.

El éxito del modelo se evaluó, mediante la apreciación de los gráficos simulado vs. observado en relación a la línea 1:1 y con una evaluación más objetiva y cuantitativa a través del RMSE, definiéndose el RMSE de la siguiente manera.

$$RCME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_j)^2}{n}} \quad [2]$$

Dónde:

S: Corresponde con los valores obtenidos de la simulación.

O: Son los valores medidos en los sitios experimentales.

n: es el número de medidas contando todos los sitios evaluados.

La RCME es una operación estadística que determina que grado de error presentaron las simulaciones con respecto a las mediciones, logrando integrar el comportamiento de todas las mediciones en un solo valor, pero que no distingue aquellos muy por afuera del rango medio de los errores.

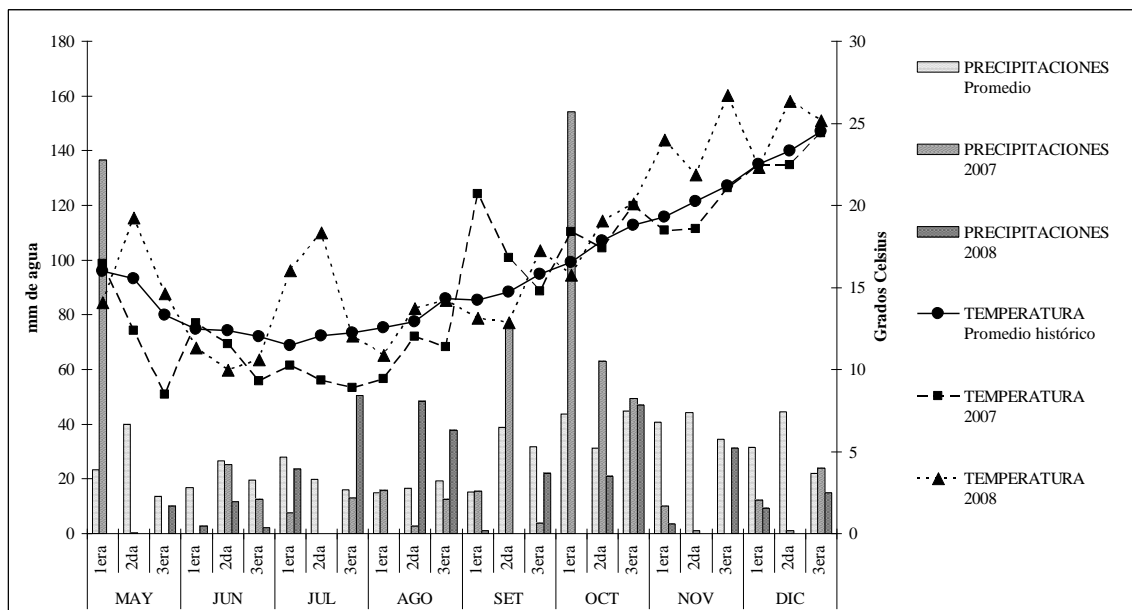
La Rel RCME integra la RCME con la media de los valores observados de manera de cuantificar la proporción de error con respecto a esta media de las predicciones del modelo lo permite rápidamente visualizar cualitativamente el comportamiento del modelo. La Rel RMSE se define como:

$$\frac{RCME}{MediaObservada} \times 100 = ReIRCME$$

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

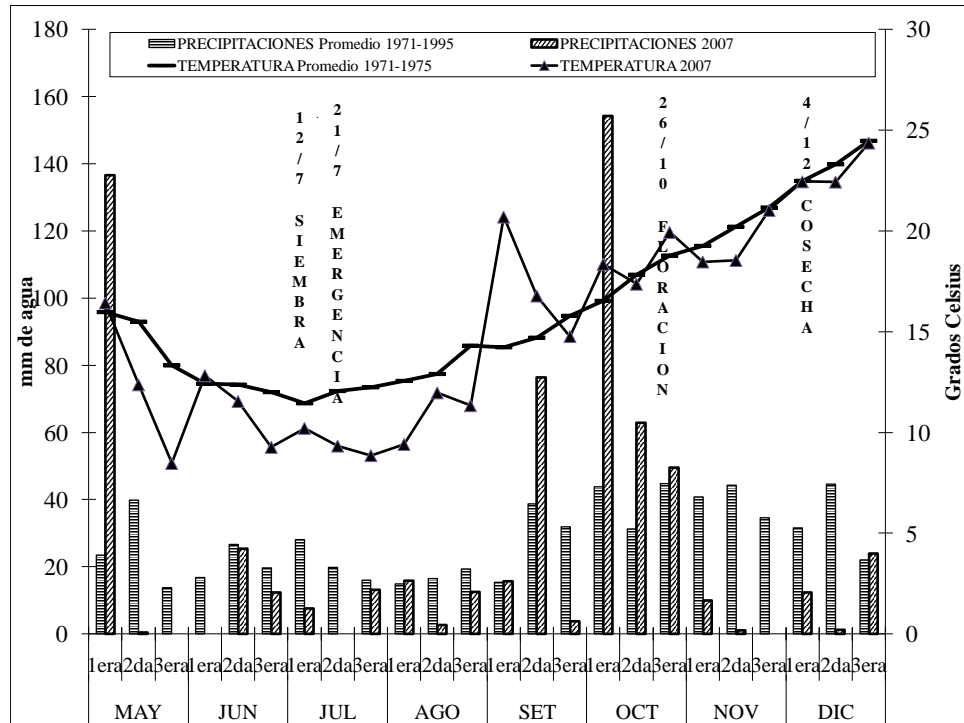
### 4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL PERIODO DEL ENSAYO

En la figura 1 se presenta la información climática para los dos años en los que se llevaron a cabo las evaluaciones en relación a la media histórica.



**Figura No. 2:** Precipitación y temperatura para los años 2007 y 2008 en relación a la media histórica.

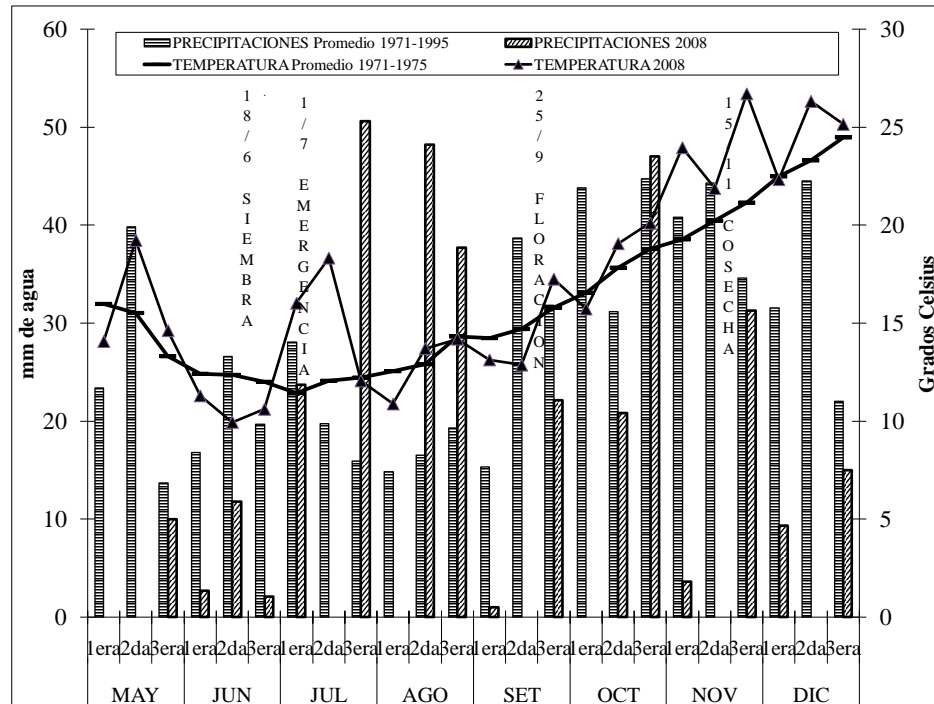
Se puede destacar el 2007 como un año frío con temperaturas claramente inferiores en el invierno, con eventos de precipitaciones abundantes al inicio de la primavera con registros inferiores a finales de la estación. El 2008 no presentó de lluvias muy alejadas de la media, siendo más cálido que la histórica en la primavera.



**Figura No. 3:** Precipitación y temperatura histórica, del año de calibración (2007) y eventos fenológicos del cultivo.

Respecto a las precipitaciones, el año 2007 presentó registros superiores al promedio en el periodo pre-siembra, lo que atrasó la siembra, la misma se efectuó con pocas lluvias, habiendo humedad en el perfil producto de las lluvias anteriores. Posteriormente, en octubre las precipitaciones se presentaron muy abundantes en pleno proceso de floración, lo cual provocó saturación de agua en el suelo, determinando períodos de excesos con una reducción del nivel acumulación de materia verde que derivó en pérdidas de rendimiento.

Desde el punto de vista de las temperaturas, el año de calibración se presentó frío, registrándose durante casi todo el periodo mayo-agosto temperaturas sensiblemente menores para la época, tendencia que continuó hasta la primavera pero con diferencias menores respecto a la media histórica. Estas condiciones térmicas podrían potencialmente haber propiciado mejores rendimientos por mayor producción de materia verde, pero condicionadas por una fecha de siembra tardía, además de los efectos de las precipitaciones mencionados anteriormente.



**Figura No. 4:** Precipitación y temperatura histórica, del año de validación (2008) y eventos fenológicos del cultivo.

En 2008, los registros de precipitaciones fueron menores al promedio histórico, salvo los meses de junio y julio. El déficit hídrico más importante fue registrado en noviembre lo que coincidió con el llenado de grano, lo que probablemente incidió negativamente en los rendimientos.

Al igual que en 2007 las temperaturas en el invierno fueron menores a la serie histórica, pero esto se revertiéndose sensiblemente en la primavera, tornándose mayores, lo que pudo haber reducido el periodo de llenado de grano afectando el rendimiento.



## 4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En esta sección se presentaran los resultados obtenidos para las variables de mayor relevancia durante la zafra 2007 y 2008 (Cuadro 1 y 2). Esto permitirá analizar los factores determinantes del rendimiento y su variabilidad y conocer la variabilidad de resultados obtenida con la selección de las unidades experimentales.

**Cuadro No. 1:** Biomasa total, rendimiento en grano y componentes del rendimiento máximo, mínimo y coeficiente de variación.

	Zafra	Máximo	Mínimo	Media	CV%
Rendimiento (Kg.ha <sup>-1</sup> )	2007	4703	3212	4117	10,48
	2008	6536	4425	5649	13,22
Biomasa máxima (Kg.ha <sup>-1</sup> )	2007	12982	8311	10681	13,90
	2008	21471	15294	18450	8,25
Espigas.m <sup>2</sup>	2007	710	394	592	16,51
	2008	579	403	491	8,34
Índice de cosecha	2007	0,47	0,36	0,39	7,40
	2008	0,34	0,24	0,31	7,73
Peso Granos (mg)	2007	36,67	32,50	34,80	2,85
	2008	34,00	29,00	32,00	4,53
Granos.m <sup>2</sup>	2007	13612	9403	11844	11,08
	2008	20639	11907	16144	12,45

La zafra 2008 presentó rendimientos superiores a la del 2007, a pesar del déficit de precipitaciones y las mayores temperaturas. Estas diferencias estuvieron asociadas a mayor producción de biomasa y número de granos por m<sup>2</sup>. Para 2007 el componente que presentó mayor variabilidad fue el número de espigas por m<sup>2</sup>, mientras que en 2008 el mismo no presento variación de importancia (45.4 vs. 8.34%). Posiblemente el exceso hídrico existente durante la 2007 fue el principal determinante de la disminución de los rendimientos.

El bajo índice de cosecha observado en 2008, 0,31 menor al 0,39 del anterior reduce la brecha en rendimiento entre ambos años, producto del estrés generado por déficit hídrico y las altas temperaturas en 2008 generaron un reducción en rendimiento en grano, en el cultivo sembrado en fecha con muy buena generación de rendimiento por las condiciones en la fases vegetativas.

La variabilidad intra-anual es consecuencia de diferencias en características (textura, % MO y profundidad) del suelo y se espera que el modelo utilizado logre copiar dicha variabilidad.

**Cuadro No. 2:** Matriz de correlaciones entre los componentes del rendimiento y entre estos y la biomasa máxima producida (coeficientes de correlación  $R^2$ , por debajo de la diagonal y las significancias de esas correlaciones p-valor, por encima de la diagonal).

		Rend. (kg.ha <sup>-1</sup> )		Biom. (kgs MS.ha-1)		Espigas.m <sup>2</sup>		IC		PMG		Granos.m <sup>2</sup>		IAF Flor.	
		2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008
Rendimiento (kg.ha <sup>-1</sup> )	2007			0,76		0,09		0,05		0,01		0,94		0,37	
	2008				0,42		0,04		0,35		0,07		0,87		sd
Biomasa (kgs MS.ha-1)	2007	<0,0001				0,04		0,43		0,04		0,78		0,36	
	2008		0,0003				0,06		0,05		0,02		0,26		sd
Espigas.m <sup>2</sup>	2007	0,2732		0,4534				4,2*10 <sup>-3</sup>		0,22		0,03		0,52	
	2008		0,3048		0,2006				1,1*10 <sup>-5</sup>		0,004		0,05		sd
Índice de cosecha	2007	0,4344		0,0075		0,4912				0,06		0,07		0,05	
	2008		0,0013		0,2504		0,9996				0,16		0,39		sd
Peso de mil granos	2007	0,786		0,4912		0,0792		0,3743				0,1		2,7*10 <sup>-4</sup>	
	2008		0,191		0,534		0,7463		0,0378				0,33		sd
Granos.m <sup>2</sup>	2007	<0,0001		<0,0001		0,5354		0,3252		0,2439				0,34	
	2008		<0,0001		0,0063		0,2809		0,0005		0,0018				sd
IAF Floración	2007	0,0159		0,0189		0,0023		0,4323		0,9539		0,0215			
	2008		sd		sd		sd		sd		sd		sd		

El componente de rendimiento que presentó mayor correlación con el rendimiento en grano tal como era esperable, fue el número de granos.m<sup>-2</sup>. No existieron otras asociaciones entre componentes de rendimiento relevantes. De todas maneras el objetivo inicial de la disposición de las parcelas, tendientes a buscar variabilidad en suelo, fue efectiva, ya que se logró variabilidad en la mayoría de las variables observadas.

Un detalle a destacar es la variación que existió en la relación entre biomasa total a cosecha y el rendimiento entre años. Mientras que en 2007 ésta relación fue buena ( $R^2=0.76$ ), en 2008 esta asociación fue menor, posiblemente consecuencia del estrés hídrico soportado por el cultivo en las últimas etapas del cultivo ( $R^2=0.42$ ). Este comportamiento diferencial entre años representa un desafío importante para el modelo ya que será obligado a simular correctamente estas situaciones de estrés.

Un punto en común entre ambos años es la falta de correlación de espigas.m<sup>-2</sup> con los rendimientos, ya que en ambos años por efectos hídricos de distinta índole como exceso y déficit reducen la concreción de rendimiento.

## 4.3 RESULTADOS DE LA CALIBRACION DE CROPSYST

### 4.3.1 Ajuste de fenología

Los valores precargados de fenología para un trigo primaveral en CropSyst no lograron ajuste con los datos reales. Para lograr una correcta modelación se midieron los requerimientos térmicos de cada fase fenológica del cultivo en forma de  $\text{grados.día}^{-1}$  obteniéndose los parámetros de este cultivar en particular. Respecto a la respuesta fotoperiódica se calibro según las características ya establecidas en la bibliografía para este material. Luego de este proceso, se obtuvo una excelente concordancia entre la fenología simulada y la real (Cuadro 4)

**Cuadro No. 3:** Parámetros fenológicos calibrados. Valores en Grados Días (GD)

<b>Parámetro</b>	<b>Valor precargado</b>	<b>Valor Calibrado</b>
GD Emergencia	100	100
GD Máxima profundidad de raíces	1040	1450
GD Fin del Crecimiento Vegetativo	850	1450
GD Comienzo de floración	900	1500
GD Comienzo de llenado	980	1600
GD Madurez fisiológica	1500	2000

**Cuadro No. 4:** Fenología observada y simulada.

<b>Estado Fenológico</b>	<b>Dps Observado*</b>	<b>Dps Simulado</b>
Emergencia	10	12
Embuche	90	No distingue (crecimiento activo)
Bandera	97	No distingue (crecimiento activo)
Inicio floración	107	108
Madurez	137	135

\* promedio

La gran concordancia entre los valores simulados y observados se explica por los datos de fenología del cultivar fueron obtenidos en el propio ensayo. Dado que la fenología de un cultivar de baja sensibilidad foto periódica es gobernada casi exclusivamente por la temperatura acumulada para una fecha de siembra dada, resalta la importancia de una correcta calibración en cuanto a la repuesta térmica del cultivo, aun

patrones distintos de acumulación que en la calibración, lo que permitirá el éxito en predecir la fenología en distintos años con distintas fechas de siembra.

#### 4.3.2 Ajuste de parámetros fisiológicos

Los parámetros fisiológicos resultaron ser los más difíciles de calibrar debido a que tienen efectos más complejos e interrelacionados que los fenológicos. Desde un comienzo la producción de biomasa simulada y por tanto de rendimiento se encontraba muy por debajo de la observada a campo, lo que determinó la necesidad de modificar de forma importante muchos parámetros de crecimiento que el modelo pre cargaba para el cultivo de trigo.

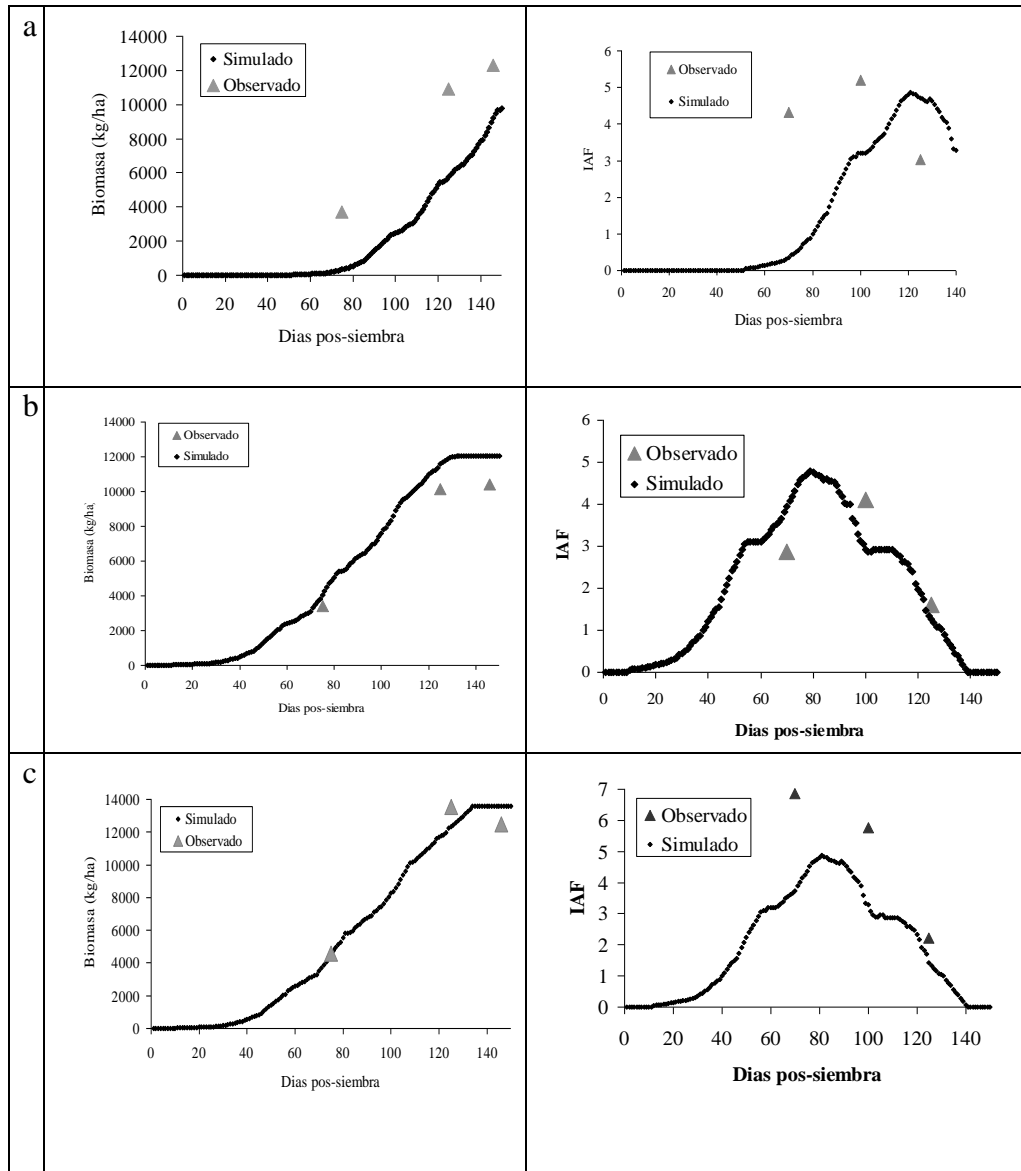
En el Cuadro 5 se presentan los parámetros fisiológicos precargados y los obtenidos luego del proceso de calibración.

**Cuadro No. 5:** Parámetros fisiológicos obtenidos que difieren de los precargados

<b>PARÁMETRO</b>	<b>Valor Precargado</b>	<b>Valor Calibrado</b>
Coeficiente ET con canopia máxima	1.05	1.00
Consumo máximo de agua (mm/día)	13	10
IAF inicial (m <sup>2</sup> / m <sup>2</sup> )	0.011	0.055
Máximo IAF esperado (m <sup>2</sup> / m <sup>2</sup> )	5	7
Área foliar específica (m <sup>2</sup> / kg)	24	23
Coeficiente de partición tallo/hoja	3.00	2.50
Relación de transpiración actual/potencial que limita el crecimiento de las raíces	0.95	0.65
Temperatura Base (°C)	3	0
Temperatura que detiene el crecimiento (°C)	25	22

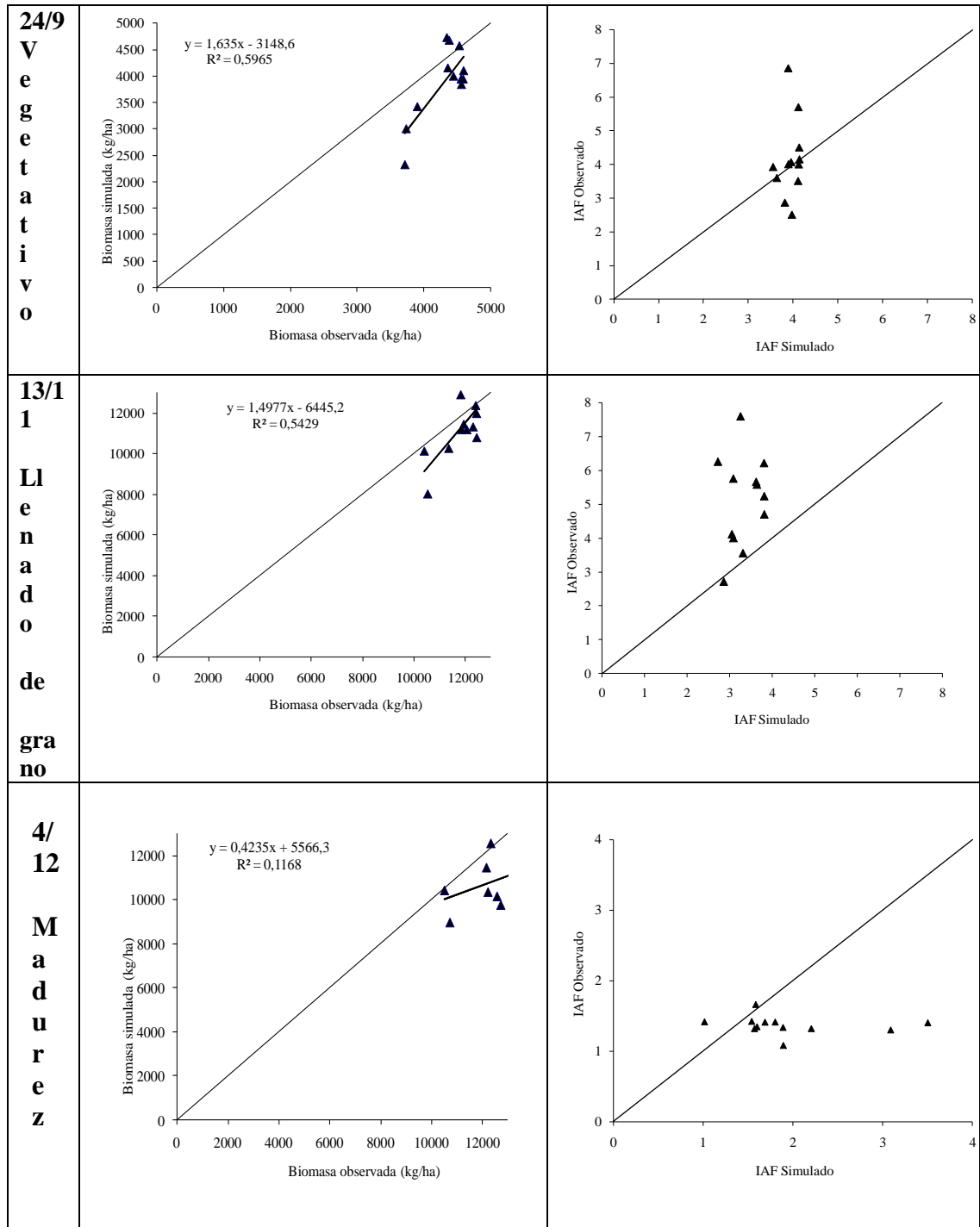
#### 4.3.3 Resultados calibración biomasa e índice de área foliar

A continuación se presentan 3 situaciones típicas encontradas durante el proceso de calibración.



**Figura No. 5:** Dinámica de la acumulación de biomasa para un sitio con pobre (a), aceptable (b) y muy buen (c) ajuste en la calibración.

De un total de 12 sitios utilizados durante el proceso de calibración, uno presentó un ajuste pobre, seis ajustes aceptables y cinco muy buenos ajustes.



**Figura No. 6.** Lineal 1:1 entre biomasa simulada y observada, para todas las parcelas para tres fechas de muestreo en el ciclo del cultivo. 24/09/2007, 13/11/2007, 04/12/2007.

**Cuadro No. 6:** Relación de la media observada con la raíz del cuadrado medio del error de los valores simulados (Rel RCME) para todas las parcelas en tres momentos de observación y del total de las observaciones para biomasa (KgMS/ha).

	N	RCME	Media observada	Media Simulada	Rel RCME (%)
24/09/2007 Z 3.7	12	663	3895	4341	17,0
13/11/2007	12	1171	11261	11929	10,4
04/12/2007 Cosecha	12	2106	10886	12691	19,3
Total	36	1443	8681	9654	16,6

En general los ajustes de biomasa total acumulada fueron muy buenos durante el periodo vegetativo, y no tan buenos a cosecha. Parte de esta diferencia puede estar explicada por demoras en la cosecha y por tanto es posible que se hayan perdido hojas que determinaron que en la totalidad de los sitios existiera una sobreestimación en los datos simulados que no pudo ser corregida modificando los parámetros del modelo, aunque probablemente el exceso hídrico observado haya tenido mayor impacto en la acumulación de biomasa que el que el modelo le atribuyo al evento.

A pesar de la reducción en el ajuste hacia el final del ciclo el valor general de ajuste 16.6 % de Rel RCME (%) es un valor acorde a los citados como muy aceptables por la bibliografía internacional (Garofalo, 2009). Este ajuste indicaría que el modelo es robusto y que su adaptación a las condiciones del experimento fue exitoso, pudiendo predecir la producción de biomasa elemento determinante del rendimiento potencial y de la capacidad productiva de determinado suelo en determinadas condiciones.

**Cuadro No. 7:** Relación de la media observada con la raíz del cuadrado medio del error de los valores simulados (Rel RCME) para todas las parcelas en tres momentos de observación y del total de las observaciones para Índice de área foliar (IAF).

	N	RCME	Media observada	Media Simulada	Rel RCME (%)
19/09/2007	12	1,14	4,14	3,95	28%
19/10/2007	12	1,82	5,12	3,65	36%
13/11/2007	12	1,48	1,95	1,78	76%
Total	36	1,51	3,73	3,13	48%

Respecto a la evolución del IAF las diferencias entre el IAF observado y simulado tiende a aumentar con el desarrollo del cultivo, siendo el resultado general para esta variable pobre. Un detalle no menor es la confianza que se le tiene al valor observado de IAF, ya que no se tenía totalmente ajustada la técnica desde un punto de vista estadístico y por tanto algunos desvíos de los datos pueden estar influidos por errores de la medición. El error en la predicción del IAF no tuvo correlación con el error en la predicción de la biomasa ( $R^2=0.0148$   $p=0,66$ ).

**Cuadro No. 8:** Relación de la media observada con la raíz del cuadrado medio del error de los valores simulados (Rel RCME) para todas las parcelas en tres momentos de observación y del total de las observaciones para Radiación fotosintéticamente activa ( $MJ \cdot m^{-2}$ )

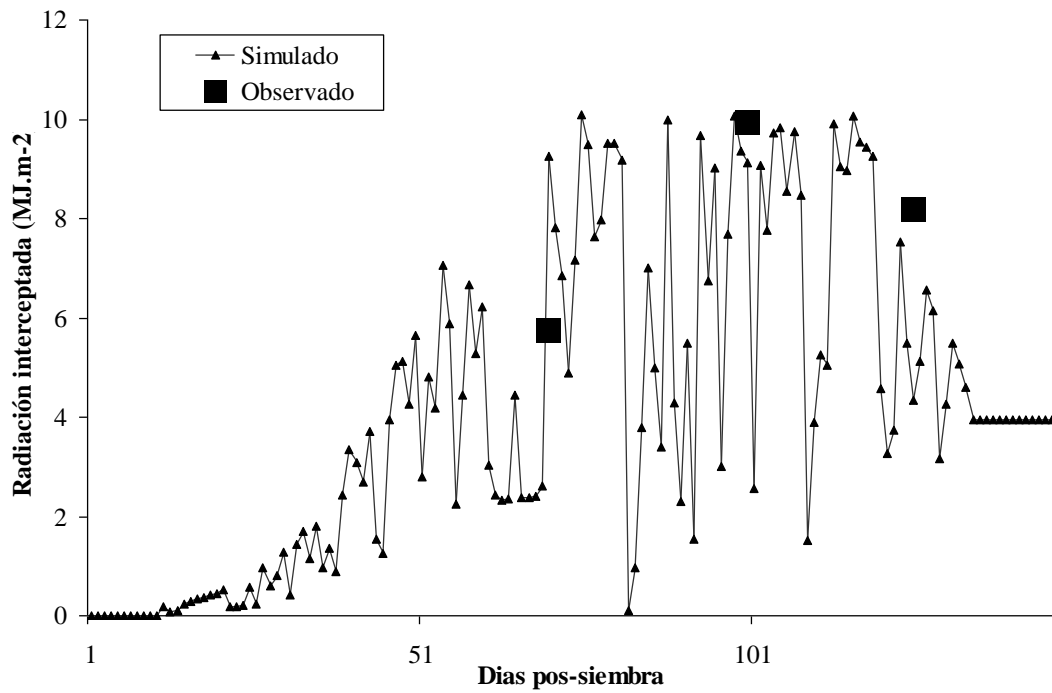
	N	RCME	Media observada	Media Simulada	Rel RCME (%)
19/09/2007	12	3,54	5,67	8,16	62%
19/10/2007	12	0,83	8,89	9,09	9%
13/11/2007	12	2,07	6,08	4,81	34%
Total	36	2,42	6,88	7,35	33%

La radiación fotosintéticamente activa (Rfa) que es interceptada (Rfaint) es una medida de mayor calidad para la estimar la producción de biomasa limitada por radiación que el IAF. La radiación entre IAF y (Rfaint) se define como:

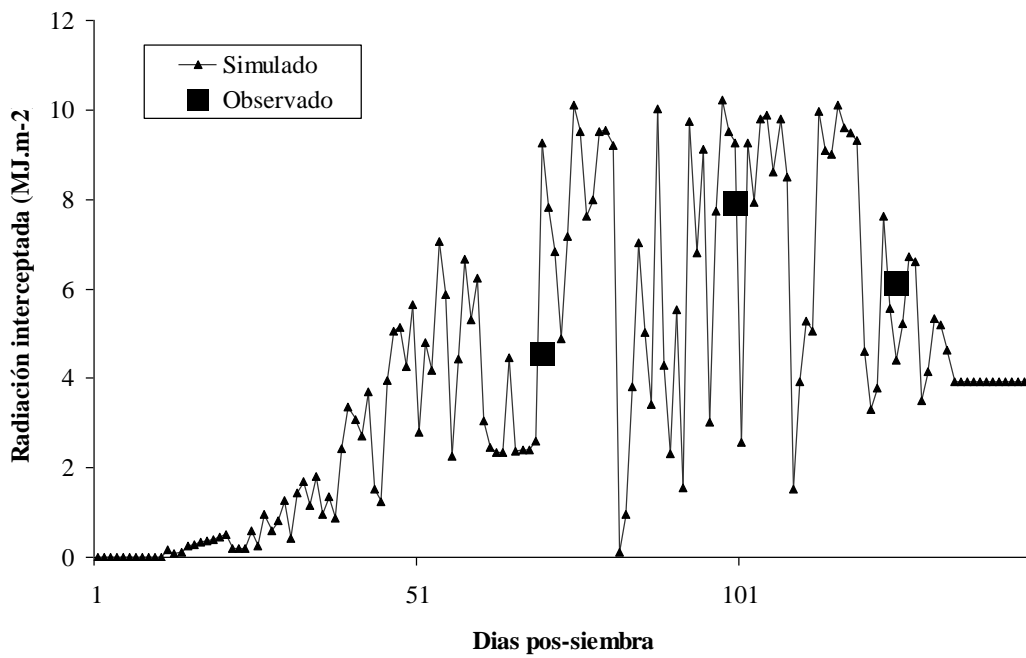
$$R_{Int.} = RFA * [1 - e^{(-Kc * IAF)}]$$

El valor relativo del IAF permite que para la general de las parcelas el ajuste en Rfaint sea mejor que para IAF, dado que no es una relación lineal lo que explica que a medida que el IAF el aumento en su capacidad de interceptar luz es menor por lo que IAFs distintos captan iguales cantidades de radiación explicando que las diferencias obtenidas en IAF observado y simulado no repercutan significativamente en la simulación de la biomasa.

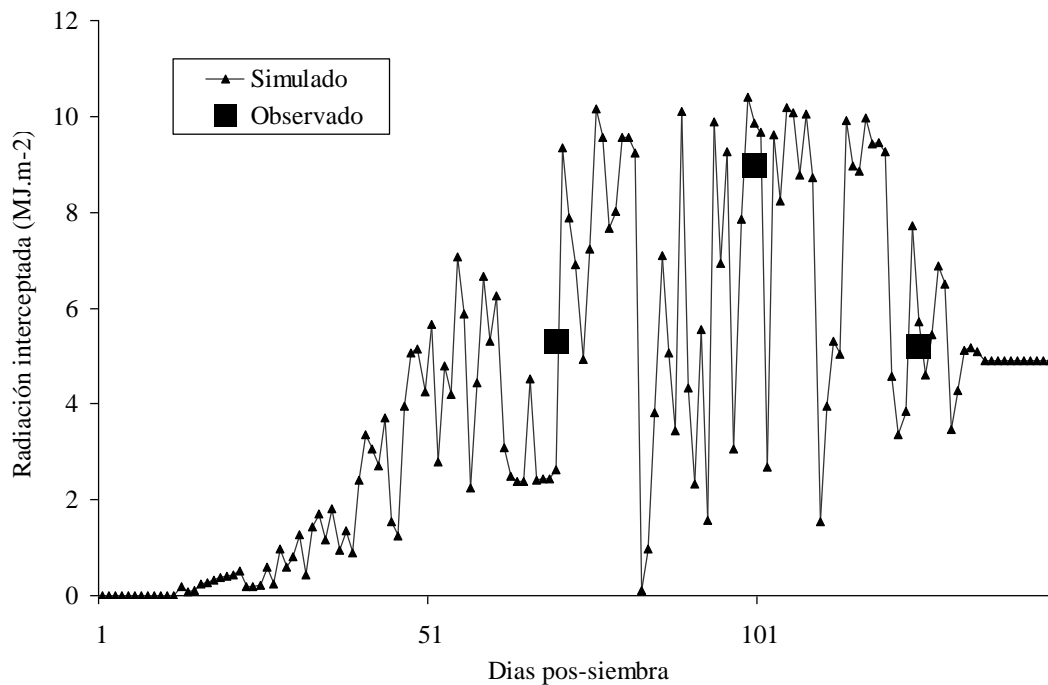




a



b

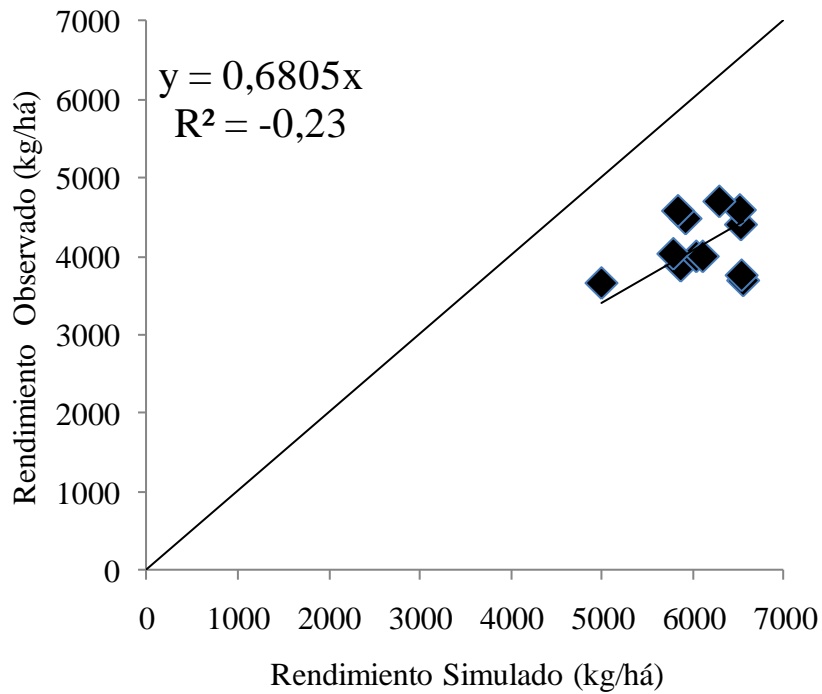


c

**Figura No. 7:** Evolución de la radiación interceptada por el cultivo, en continuo la simulada por el modelo, en cuadrados cálculo de radiación interceptada a partir de IAF observado, para una parcela con buen (a), regular (b) y pobre (c) ajuste.

#### 4.3.4 Ajuste del rendimiento

La Figura 5 presenta la relación entre el rendimiento en grano observado y simulado. No se logró un buen ajuste, aun cuando en este proceso de calibración se pueden modificar todos los parámetros del modelo. Posiblemente esta subestimación de rendimientos es consecuencia de la escasa capacidad que presenta el modelo de simular condiciones de exceso hídrico, como las que ocurrieron durante el periodo de llenado de grano. El modelo no presenta ecuaciones que permitan afectar el rendimiento si existen condiciones de anoxia en suelo, solo detiene el crecimiento durante el periodo que ocurre el problema y la bibliografía es clara en cuanto a que el efecto va más allá de solo detener el crecimiento (Evans, 1983).



**Figura No. 8:** Lineal 1:1 entre rendimiento observado y simulado para todas las parcelas de calibración.

Esta situación plantea un desafío importante para incluir en el modelo actual y es una clara limitación al uso potencial, ya que bajo las condiciones de producción local este tipo de situaciones es relativamente frecuente.

#### 4.4 VALIDACIÓN

Durante el proceso de calibración, se logro que el modelo copiara de forma aceptable las curvas de producción de biomasa, con excepción de sitios con escasa profundidad donde el modelo, como ya fue reportado en trabajos anteriores, subestimó la producción de biomasa.

El ajuste del IAF durante el periodo de calibración no fue del todo adecuado, pero el ajuste mejoro notoriamente cuando se observo el comportamiento de la radiación interceptada, ya que la misma determina la energía disponible para el cultivo. A su vez la medición del IAF en cada subparcela pudo haber sido errónea dado que el método utilizado impedía la obtención de una muestra mayor de plantas que permitiera estimar con mayor exactitud. Otro punto a resaltar es el cálculo de la senescencia foliar el cual no hay calibración, lo que podría estar generando mayor error.

La dificultad en simular correctamente el IAF no significó errores de la misma magnitud en cuanto a la biomasa producida, lo que relativiza en cierta medida el valor que le asigna el modelo al IAF para el cálculo de la producción de biomasa (relación no lineal). Por último, para rendimiento, quedó claro que el modelo no logró estimarlos adecuadamente en un escenario de exceso hídrico durante el llenado de grano, ya que no afecto lo suficiente el índice de cosecha. En el presente capitulo, se presentan los resultados obtenidos durante el proceso de validación, en donde los parámetros calibrados en la primera etapa son puestos a prueba en el año siguiente (2008).

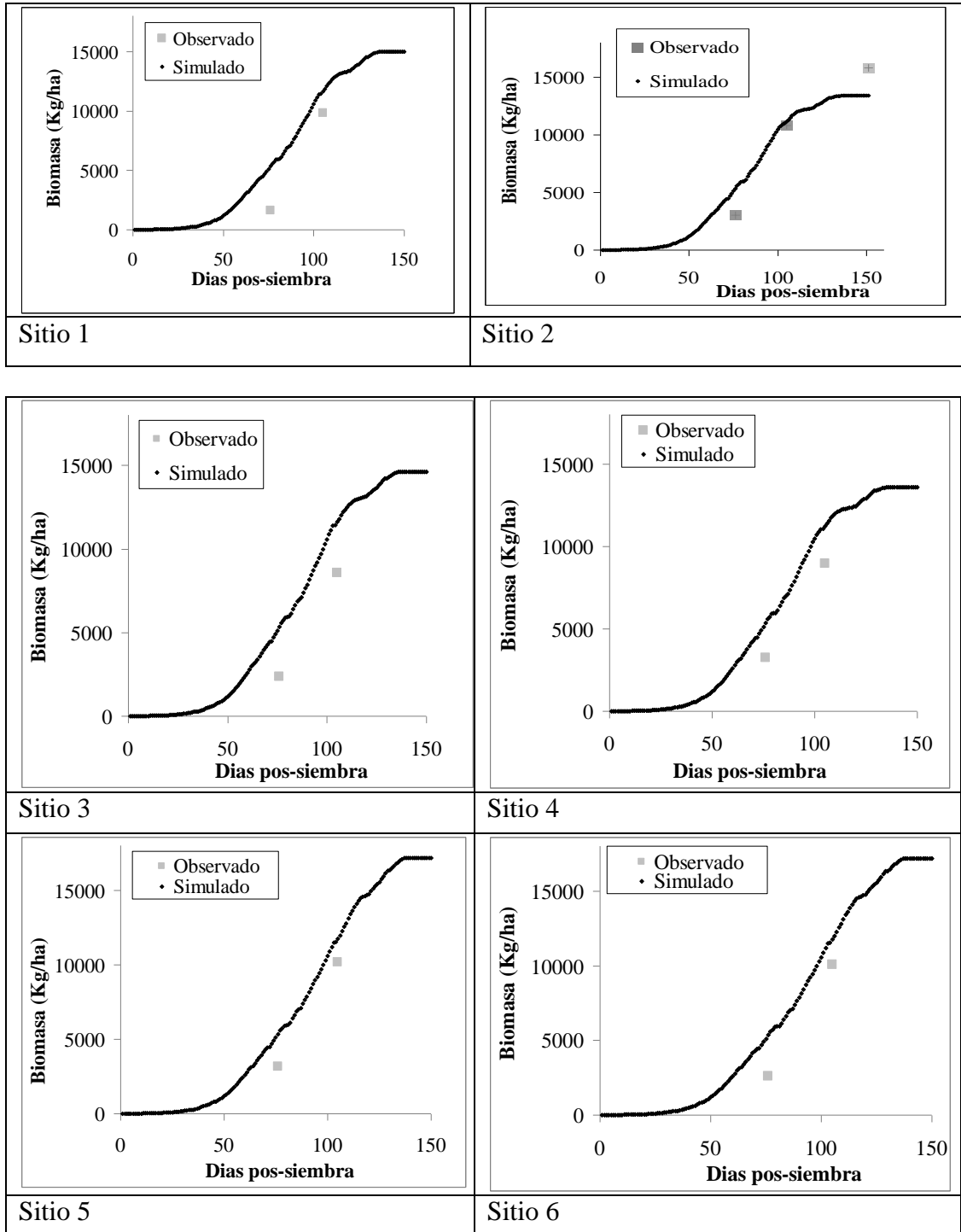
En el cuadro siguiente se presenta la biomasa acumulada y observada promedio para cada uno de los momentos evaluados.

**Cuadro No. 9:** Evolución de la biomasa observada y simulada en la validación.

	N	RCME	Media observada	Media simulada	REL RCME %
01/09/2008	7	2554	3017	5057	84,65
30/09/2008	7	2304	9709	11134	23,73
15/11/2008	7	2034	15571	15280	13,06
TOTAL	21	2307	9433	10490	24,46

El modelo presentó inconvenientes en la simulación del crecimiento inicial del cultivo, con una tendencia a sobreestimar la producción de biomasa, diferencias que se reducen en la medida que el cultivo crece, alcanzando un grado de precisión similar al publicado por otros autores en la validación en los estadios finales. Al igual que para la calibración existieron sitios con diferentes grados de ajuste en las curvas de crecimiento,

y los sitios de escasa profundidad siempre lograron bajos ajustes, por subestimación del crecimiento por parte del modelo.



**Figura No. 9:** Dinámica de la acumulación de biomasa para las parcelas de validación.

El adecuado ajuste de en la biomasa acumulada a cosecha y la no existencia de excesos de agua, donde el modelo podría ser más débil, sino deficiencias, las cuales están modeladas, permitieron lograr ajustes aceptables en los rendimientos.

Se destaca el buen comportamiento del modelo en la fase de validación para la biomasa acumulada, especialmente porque la condición climática de este año fue totalmente diferente al año en el cual se parametrizó.

A partir de una calibración donde no se han podido lograr un ajuste aceptable en todas las parcelas en rendimiento, lo que estaría ligado a que el rendimiento final no es determinante en la obtención de parámetros debido a que las ecuaciones generales del cultivo son mejoradas a partir de valores que representan aspectos fisiológicos de tipo cualitativo, permitiendo una vez obtenidos la adaptación a otras condiciones, objetivo de esta tesis.

**Cuadro No.10:** Rendimiento observado y simulado en la validación (kg/ha).

Posición	Observado	Simulado
5b	5208	5403
12a	6536	6577
12m	5672	5600
16a	4591	6369
16m	5067	5681
16b	5957	8230

$$Y=0,2765x+3760,2 \quad R^2=0,174 \quad p<0.4109$$

Este buen ajuste para biomasa, también se expreso en el resultado para rendimiento, ya que contrariamente a lo esperado los rendimientos en la validación presentaron menores diferencias entre lo observado y simulado que en la calibración, lo que indicaría una mejor adaptación del modelo al estrés hídrico por déficit que por exceso. La Rel RCME se presento en el 18% estando dentro de los parámetros aceptables en la bibliografía.

## 5. CONCLUSIONES

El modelo luego de ser calibrado ha logrado una correcta simulación de la producción de biomasa pero con problemas para los rendimientos en grano en años con eventos climáticos extremos en el llenado de grano como los del experimento. Es muy probable que de no presentarse un efecto de esta índole los resultados en rendimiento mejoren, pero es necesario para una mejor utilización en el ámbito productivo que el modelo mejore su capacidad predictiva cuando las condiciones de concreción del rendimiento son bajo condiciones de estrés.

Las dificultades planteadas a lo hora de estimar correctamente el IAF del cultivo podrían ser solucionadas si se implementara la misma técnica de medición del mismo que durante el desarrollo del modelo donde se mide IAF efectivo como la utilización de instrumentos de medición específicos.

Los resultados obtenidos en la validación en producción final de biomasa está ubicado dentro de los mejores niveles publicados en la bibliografía (el valor asignado a la producción de biomasa en la literatura de mayor relevancia que el rendimiento en grano) lo que permite afirmar que la adaptación se llevo a cabo con éxito.

Respecto al uso de esta herramienta en ámbito productivo podemos decir que con los resultados alcanzados rápidamente esta herramienta predictiva con valor económico aunque su mayor valor ya está en planificaciones a largo plazo como el planteo de rotación o la evaluación de distintos escenarios climáticos que puedan afectar el manejo de cultivos.

## 6. RESUMEN

Fue calibrado y validado el modelo de simulación de cultivos Cropsyst a un cultivar de trigo primaveral de nombre comercial “BioInta 1001” con éxito a las condiciones de una chacra en la estación M.A Cassinoni de la Facultad de Agronomía en Paysandú, Uruguay. Para ello fue instalado en 2007 un ensayo de calibración con 12 sitios de distintas características edáficas y en 2008 se realizó un ensayo de validación con 6 sitios de distintas características edáficas. La calibración de producción de biomasa estuvo presente un error de 17 % Rel RCME valor similar a lo reportado en bibliografía internacional, no lográndose una buena predicción de los rendimientos que resultaron afectados por condiciones de excesos hídricos. La validación logro muy buenos resultados en biomasa (Rel RCME 24%), y en rendimiento (Rel RCME 18%). Los resultados obtenidos en el experimento demuestran la robustez del modelo, muestran la necesidad de continuar con este tipo de trabajos y permiten visualizar el potencial de esta herramienta para la correcta toma de decisiones a nivel productivo.

Palabras clave: Modelos de simulación; Trigo; Cropsyst.



## 7. SUMMARY

A field experiment was carried on during the winter season of 2007 and 2008 for the calibration and validation of the CropSyst crop model system for a commercial spring wheat ‘BioInta 1001’. During 2007 the model was calibrated with field data in 12 experimental sites located at the Universidad de la República Station in Paysandú, Uruguay. The same location was used in 2008 for validation. Results show a good prediction capability for biomass but with problems for yield due environmental stresses during grain filling. The precision obtained for biomass in both years are among the values cited by the literature. This model can be used as analytical tools for farmers, especially in crop rotation design, but further efforts are needed to increase the accuracy in specific conditions.

Keywords: Cropsyst; Crop Model; Wheat.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. ABBATE, P. E.; ANDRADE, F. H.; CULOT, J. P. 1995. The effects of radiation and nitrogen on number of grains in wheat. *Journal of Agricultural Science*. 124 (3): 351-360.
2. \_\_\_\_\_.; DARDANELLI, J. L.; CANTARERO, M. G.; MATURANO, M.; MELCHIORI, R. J. M.; SUERO A. E. E. 2004. Climatic and water availability effects on water-use efficiency in wheat. *Crop Science*. 44:474-483.
3. ACEVEDO, E.; SILVA, P.; SILVA H. 2002. Wheat growth and physiology. (en línea). In: Curtis, B.C.; Rajaram, S.; Gómez Macpherson, H. eds. Bread wheat, improvement and production. Roma, Italia, FAO. Consultado ene. 2010. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/006/y4011e/y4011e06.htm>
4. ACRECHEA, M.; BRICEÑO-FÉLIX, G.; SÁNCHEZ, J.; SLAFER, G. 2009. Radiation interception and use efficiency as affected by breeding in Mediterranean wheat. *Field Crops Research*. 110 (2): 91-97.
5. AMASINO, R. M. 2005. Vernalization and flowering time. *Current Opinion in Biotechnology*. 16 (2): 154-158.
6. BECHINI, L.; BOCCHI, S.; MAGGIORE, T.; CONFALONIERI, R. 2006. Parameterization of a crop growth and development simulation model at sub-model components level. An example for winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Environmental Modelling and Software*. 21:1042-1054.
7. BOUYOUCOS, G.S. 1936. Directions for making mechanical analysis of soil by hydrometer method. *Soil Science*. 4: 225-228.
8. BUGBEE, B. G.; SALISBURY, F .B; 1988. Exploring the limits of crop productivity, photosynthetic efficiency of wheat in high irradiance environments. *Plant Physiology*. 88: 869-878.
9. CASTRO, M.; DÍAZ, M.; GERMÁN, S.; VÁZQUEZ, D.; IBAÑEZ, V. 2008. Resultados experimentales de evaluación de cultivares de trigo ciclo intermedio período 2005-2006-2007. Evaluación de Cultivares convenio INIA-INASE. URUGUAY. (en línea). Montevideo, INIA. 23 p. Consultado feb. 2009. Disponible en [http://www.inia.org.uy/convenio\\_inase\\_inia/resultados/trigoci07.htm](http://www.inia.org.uy/convenio_inase_inia/resultados/trigoci07.htm)

10. EVANS, L. T. 1978. The influence of irradiance before and after anthesis on grain yield and its components in microcrops of wheat grown in a constant daylength and temperature regime. *Field Crops Research*. 1:5-19.
11. \_\_\_\_\_. 1983. Trigo; fisiología de los cultivos. Buenos Aires, Argentina, Hemisferio Sur. cap. 4, pp. 95-119.
12. \_\_\_\_\_. 1987. Short day induction of inflorescence initiation in some winter wheat varieties. *Australian Journal of Plant Physiology*. 14 (3): 277-286
13. FLOOD, R. G.; HALLORAN, G .M. 1986. Genetics and physiology of vernalisation response in wheat. *Advances in Agronomy*. 39: 87-125.
14. GONZALEZ, F.G.; SLAFER, G.A.; MIRALLES, D.J. 2003. Grain and floret number in response to photoperiod during stem elongation in fully and slightly vernalized wheats. *Field Crops Research*. 81 (1): 17-27.
15. HOFFMAN, E.; FERNÁNDEZ, R.; CADENAZZI, M. 2007. Caracterización de cultivares de trigo. Paysandú, Facultad de Agronomía. 32 p.
16. JALOTAA, S.K.; SINGHB, S.; CHAHALA, G.B.S.; RAYC, S.S.; PANIGRAGHYC, S.; BHUPINDER-SINGHD, S.; SINGHA, K.B. 2010. Soil texture, climate and management effects on plant growth, grain yield and water use by rainfed maize-wheat cropping system; field and simulation study. *Agricultural Water Management*. 97 (1): 83-90.
17. KARIMI, S.; TAVALLALI, V.; RAHEMI, M.; ROSTAMI, A. A.; VAEZPOUR, M. 2009. Estimation of leaf growth on the Basis of measurements of leaf lengths and widths, choosing pistachio seedlings as model. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 3(2): 1070-1075.
18. KIRBY, E. J. M. 1995. Factors affecting rate of leaf emergence in barley and wheat. *Crop Science*. 35 (1): 11-19.
19. LIMIN, A.; COREY A.; HAYES, P.; FOWLER, D.B. 2007. Low-temperature acclimation of barley cultivars used as parents in mapping populations: response to photoperiod, vernalization and phenological development. *Planta*. 226 (1): 139-146.

20. MAGRÍN, G. O. 2004. Rendimientos potenciales de trigo en las distintas zonas trigueras. (en línea). In: A Todo Trigo (1º, 2004, Mar del Plata). Trabajos presentados. Mar del Plata, A Todo Trigo. p. 7. Consultado jul. 2008. Disponible en <http://www.acopiadores.com/publico/atodotrigo/Rendimientos%20potenciales%20de%20trigo%20en%20las%20distintas%20zonas%20trigueras.pdf>
21. MAJOR, D. J.; KINIRY, J. R. 1991. Predicting daylength effects on phenological processes. In: Hodges, T. ed. Predicting crop phenology. Boca Raton, FL, USA, CRC. pp. 15-28
22. MENENDEZ, F. J.; SATORRE, E. H. 2007. Evaluating wheat yield potential determination in the Argentine Pampas. *Agricultural Systems*. 95:1-10.
23. MIDMORE, D. J; CARTWRIGHT, P. M.; FISCHER; R. A. 1982. Wheat in tropical environments. I. Phasic development and spike size. *Field Crops Research*. 5: 185-200.
24. MOSSAD, M.; ORTIZ-FERRARA, G.; MAHALAKSHMI, V.; FISCHER, R. A. 1995. Phyllochron response to vernalization and photoperiod in spring wheat. *Crop Science*. 35: 168-171
25. MUSICK, J. T.; JONES, O. R.; STEWART, B.; DUSEK, D. A. 1994. Water-yield relationship for irrigated and dryland wheat in the US southern plains. *Agronomy Journal*. 86 (6): 980-986.
26. PALA, M.; STOCKLE, C. O.; HARRIS, H. C. 1996. Simulation of durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. durum) growth under different water and nitrogen regimes in a mediterranean environment using CropSyst. *Agricultural Systems*. 51 (2): 147-163.
27. PORTER, J. R.; GAWITH, M. 1999. Temperatures and the growth and development of wheat; a review. *European Journal of Agronomy*. 10 (1): 23-36.
28. PRASADA, P. V. V.; PISIPATIA, S. R.; RISTICB, Z.; BUKOVNIKA, U.; FRITZ, A. K. 2004. Impact of nighttime temperature on physiology and growth of spring wheat. *Crop Science*. 48:2372-2380.

29. SAVIN, R.; SLAFER, G. A. 1991. Shading effects on the field of an Argentinian wheat cultivar. *Journal of Agricultural Science*. 116:1-7.
30. SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society American Journal*. 70:1569-1578.
31. SLAFER, G. A.; RAWSON, H. M. 1994. Review, sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors; a re-examination of some assumptions made by physiologists and modelers. *Australian Journal of Plant Physiology*. 21:393-426.
32. \_\_\_\_\_; MIRALLES, D. J.; SAVIN, R.; WHITECHURCH, E. M.; GONZÁLEZ, F. G. 2003 Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en trigo. *In: Pascale A. J. ed. Producción de granos bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires, Argentina, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía pp. 101-131.
33. STEFANY, P. 1993. Vernalization requirement and response to day length in guiding development in wheat. *CIMMYT. Wheat Special Report no.22*. 317 p.
34. STOCKLE, C. O.; NELSON, R. 2003a. *Cropping Systems Simulation Model; user's manual*. Pullman, Washington, Washington State University. 235 p.
35. \_\_\_\_\_; DONATELLI, M.; NELSON, R. L. 2003b. CropSyst, a cropping system simulation model. *European Journal of Agronomy*. 18: 289-307.
36. URUGUAY. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA. 1976. *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000*. Montevideo. 96 p.
37. VAN HERWAARDEN, A. F.; FARQUHAR, G. D.; ANGUS J. F.; RICHARDS R. A.; HOWE, G. N. 1998. 'Haying-off', the negative grain yield response of dryland wheat to nitrogen fertilizer. I. Biomass, grain yield, and water use. *Australian Journal of Agricultural Research*. 49(7): 1067 – 1082.
38. WALKLEY, A.; BLACK, I. A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed

- modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37: 29-38.
39. WANG, Z.M.; ZHANG, B; LI, X.Y.; SONG, K.S.; LIU D.W.; ZHANG, S.Q. 2006. Using CropSyst to simulate spring wheat growth in black soil zone of northeast China. *Pedosphere*. 16 (3): 354-361.
  40. WOLLENWEBER, B.; PORTER, J. R.; SCHELLBER, G. J. 2003. Lack of interaction between extreme high-temperature events at vegetative and reproductive growth stages in wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 189: 142 – 150.
  41. ZADOKS, J. C.; CHANG, T. T.; KONZACK, C. F. 1974. A decimal code for the growth stage of cereals. *Weed Research*. 14:415-421.
  42. ZHANG, H.; OWEIS, T. 1999. Water–yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*. 38(3): 195-211.

## 9. ANEXOS

Anexo 1: Textura y densidad aparente de los suelos del ensayo.

Sitios	Profundidad (cm)	Textura (%)			Densidad aparente Mg/m <sup>3</sup>
		Arcilla	Limo	Arena	
3A	0-15	39	36	25	1,31
3A	15-30	48	37	15	1,15
3A	30-45	21	66	13	1,20
3A	45-60	23	65	12	1,20
3M	0-15	36	36	28	1,26
3M	15-30	50	31	19	1,27
3M	30-45	55	31	14	1,30
3M	45-60	28	59	13	1,30
3M	60-75	36	54	9	1,30
3B	0-15	29	42	29	1,40
3B	15-30	35	39	26	1,33
3B	30-45	53	28	19	1,30
3B	45-60	46	27	27	2,30
7A	0-15	23	52	25	1,24
7A	15-30	39	43	17	1,49
7A	30-45	42	38	20	1,14
7M	0-15	23	55	22	1,27
7M	15-30	24	67	10	1,28
7M	30-45	25	60	15	1,16
7B	0-15	27	40	33	1,25
7B	15-30	51	35	14	1,12
7B	30-45	40	38	22	1,20
10M	0-15	23	55	22	1,37
10M	15-30	24	67	10	1,24
10M	30-45	47	25	28	1,26
10M	45-60				1,49
10B	0-15	27	40	33	1,38
10B	15-30	51	35	14	1,36
10B	30-45	49	27	24	1,35
10B	45-60				1,15
11A	0-15	29	50	21	1,23
11A	15-30	34	47	19	1,34
11A	30-45	46	35	19	1,42
11A	45-60	55	32	14	1,54

11A	60-75	51	34	15	1,54
11A	75-90	46	40	14	
11M	0-15	27	45	28	1,33
11M	15-30	40	42	18	1,43
11M	30-45	50	29	20	1,42
11B	0-15	26	46	28	1,31
11B	15-30	49	33	18	1,34
11B	30-45				1,36
15A	0-15	29	50	21	1,31
15A	15-30	34	47	19	1,42
15A	30-45	56	33	11	1,34
15A	45-60	51	39	10	1,44
15A	60-75	41	51	8	2,44
15M	0-15	27	45	28	1,40
15M	15-30	40	42	18	1,28
15M	30-45	48	36	16	1,40
15M	45-60	51	39	12	1,38
15M	60-75	35	54	11	1,34
15M	75-90	23	60	17	1,34
15B	0-15	26	46	28	1,43
15B	15-30	49	33	18	1,53
15B	30-45	51	35	14	1,35
15B	45-60	42	43	15	1,37
15B	60-75	36	49	15	1,32
15B	75-90	30	52	18	1,31
Sitios Validación					
2 A	0-15	31	29	40	1,34268582
2 A	15-30	34	26	40	1,32691789
2 B	0-15	31	29	40	1,34247077
2 B	15-30	40	24	36	1,29893017
2 M	0-15	31	28	41	1,34346199
5 A	0-15	30	32	38	1,34519362
5 A	15-30	41	30	29	1,27903378
5 B	0-15	35	32	34	1,31332839
5 B	15-30	43	27	30	1,27546728
5 B	30-45	45	26	29	1,26563203
5 B	45-60	46	27	27	1,25953078
5 M	0-15	34	29	36	1,32049108
5 M	15-30	47	24	29	1,26165986
9 A	0-15	35	33	32	1,30687845
9 A	15-30	50	28	22	1,23834383



9 B	0-15	31	31	37	1,335747
9 B	15-30	37	30	33	1,30241561
9 B	30-45	49	27	24	1,24474585
9 M	0-15	37	38	25	1,29009652
9 M	15-30	41	29	30	1,28288722
9 M	30-45	47	25	28	1,25894177
12 A	0-15	26	42	32	1,35624766
12 A	15-30	32	39	29	1,3184762
12 A	30-45	46	35	19	1,24582803
12 A	45-60	55	32	14	1,20907354
12 A	60-75	51	34	15	1,2224021
12 A	75-90	46	40	14	1,23558259
12 M	0-15	37	34	29	1,29565215
12 M	15-30	51	26	23	1,23699701
12 M	30-45	50	29	20	1,23326457
16 A	0-15	27	64	10	1,30611241
16 A	15-30	31	39	30	1,32532716
16 A	30-45	38	33	30	1,29423821
16 A	45-60	43	32	25	1,26432788
16 A	60-75	48	32	20	1,24058723
16 M	0-15	26	39	34	1,35714316
16 M	15-30	31	36	33	1,32906747
16 M	30-45	52	27	22	1,23183513
16 M	45-60	54	28	18	1,2185452
16 M	60-75	52	30	18	1,22451258
16 M	75-90	35	28	37	1,31991506