

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RIO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMIA Y VETERINARIA

“Trabajo Final presentado para optar al Grado de Ingeniero
Agrónomo”

ANALISIS DE LA RELACION ENTRE EL BALANCE
HIDRICO Y LA PRODUCCION DE TRIGO (*Triticum aestivum*
L.) EN SECANO

Ricardo Javier PEDRAZA
DNI: 30.633.634

Director: Ing. Agr. Dr. Américo DEGIOANNI
Co-Director: Ing. Agr. Gabriel ESPOSITO

Río Cuarto – Córdoba
Septiembre de 2009

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RIO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMIA Y VETERINARIA

CERTIFICADO DE APROBACION

Título del Trabajo Final:

ANALISIS DE LA RELACION ENTRE EL BALANCE HIDRICO Y LA PRODUCCION
DE TRIGO (*Triticum aestivum L.*) EN SECANO

Autor: RICARDO JAVIER PEDRAZA

DNI: 30.633.634

Director: Ing. Agr. Dr. AMERICO DEGIOANNI

Co-Director: Ing. Agr. GABRIEL ESPOSITO

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

Fecha de Presentación: ____ / ____ / ____.

Aprobado por Secretaria Académica: ____ / ____ / ____.

DEDICATORIA

Dedicada muy especialmente a todos mis familiares y amigos por los momentos y alegrías vividas a lo largo de toda la carrera.

AGRADECIMIENTOS:

El autor de este Trabajo Final desea agradecer la desinteresada colaboración de las muchas personas que ayudaron a la realización del trabajo:

Al Ing. Agr. Horacio R. Videla Mensegue, por ceder gentilmente el modelo de simulación de Producción de Granos y por su generosa colaboración y tiempo dedicado.

Al Ing. Agr. Dr. Américo Degioanni e Ing. Agr. Gabriel Espósito, de la Universidad Nacional de Río Cuarto, quienes permitieron y colaboraron con el desarrollo experimental de esta investigación.

A la Universidad Nacional de Río Cuarto, específicamente a la Facultad de Agronomía y Veterinaria, por haberme permitido cursar mi estudio universitario.

Por último, a mi Familia, amigos y compañeros por su generosa colaboración en la realización de este trabajo final.

INDICE DE TEXTO

INTRODUCCION

Objetivo general.....	8
Objetivos específicos.....	8

MATERIALES Y METODOS

Área experimental.....	9
Instalación del ensayo.....	9
Variables medidas.....	11
Clima.....	11
Suelo.....	11
Cultivo.....	11
Procesamiento de la información.....	12

RESULTADOS Y DISCUSION

Características del sitio de estudio y variables medidas.....	14
Características del sitio de estudio.....	14
Evaluación de las variables medidas durante el ciclo del cultivo.....	16
Climáticas.....	16
Contenido hídrico del suelo.....	21
Cultivo.....	24
Procesamiento y análisis de la información.....	27
Relación entre la disminución del agua en la zona radical (Dr) y contenido hídrico acumulado en el perfil del suelo.....	27
Balance Hídrico con el Modelo de Producción de Granos.....	28
Calibración del modelo.....	28
Análisis de los resultados del modelo.....	31

CONSIDERACIONES FINALES 35

BIBLIOGRAFIA 36

ANEXO I

MODELO DE ESTIMACION DE LA PRODUCCION DEL CULTIVO EN BASE A LOS REQUERIMIENTOS HIDRICOS.....	45
Bases matemáticas del modelo.....	45
Funcionamiento del modelo.....	48
Evaluación de la Bondad de Ajuste del Modelo.....	49

ANEXO II

FOTOGRAFIAS DEL ESTADO DEL CULTIVO EN LAS DISTINTAS ETAPAS FENOLOGICAS.....	51
Siembra del cultivo (20/06/07).....	51
Z11 (30/07/07).....	51
Z22 (28/08/07).....	52
Z22 (11/09/07).....	53
Z32 (26/09/07).....	53
Z33 (10/10/07).....	54
Z39 (19/10/07).....	54
Z7 (07/11/09).....	55

ANEXO III

VALORES DE COEFICIENTE DE VARIACION (CV), DESVIO ESTANDAR (S) Y MEDIA (X) OBTENIDOS AL ANALIZAR LAS DISTINTAS MUESTRAS DEL CONTENIDO HIDRICO DEL SUELO.....	56
---	----

ANEXO IV

CALIBRACION DEL MODELO DE SIMULACION: ANALISIS DE REGRESION LINEAL DEL CONTENIDO HIDRICO EN LA ZONA RADICAL (SALIDAS DEL INFOSTAT).....	57
---	----

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Subregiones agroecológicas productivas de trigo en Argentina.....	2
Tabla N° 2: Valores de EUA para el cultivo de trigo bajo diferentes prácticas de manejo en distintas localidades de la Región Pampeana Argentina	5
Tabla N° 3: Datos analíticos del perfil “Hapludol típico”.....	14
Tabla N° 4: Densidad Aparente, Contenido de Humedad y Laminas de Agua (mm) a 0,03 MPa, 1,5 MPa y Agua Útil del perfil del suelo en estudio.....	15
Tabla N° 5: Fenología (Zadoks <i>et al.</i> , 1974) y altura aproximada del cultivo de trigo.....	24
Tabla N° 6: Estados principales descriptos en la escala de Zadoks <i>et al.</i> , 1974.	24
Tabla N° 7: Materia Seca (MS) aérea Total ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en Z33-34 y Z8 (Zadoks <i>et al.</i> , 1974) para las densidades de 150 y 450 $\text{pl}\cdot\text{m}^{-2}$	26
Tabla N° 8: Componentes del rendimiento y producción de granos.....	26
Tabla N° 9: Precipitación, precipitación efectiva, ETP, $\text{ETc}_{\text{actual}}$ y variación del almacenaje acumulados mensualmente arrojados por el modelo.....	33
Tabla N° 10: Rendimiento en granos estimado con y sin estrés hídrico y rendimiento observado para la densidad alta.....	34
Tabla N° 11: Rendimiento en granos estimado con y sin estrés hídrico y rendimiento observado para la densidad baja.....	34

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Subregiones agroecológicas de trigo en la República Argentina.....	2
Figura N° 2: Esquema del ensayo experimental.....	10
Figura N° 3: Perfil del Hapludol típico.....	14
Figura N° 4: Evolución de la Radiación Solar diaria media decádica (MJ.m ⁻² .día ⁻¹) en Río Cuarto durante el año estudio (2007), con respecto a la normal (Serie 1977-2006).....	16
Figura N° 5: Distribución decádica de las precipitaciones en Río Cuarto durante el período de estudio (2007), con respecto a los valores medios normales (Serie 1977-2006).....	17
Figura N° 6: Temperaturas máximas medias decádicas en Río Cuarto durante el año 2007, con respecto a los valores normales (Serie 1977-2006).....	17
Figura N° 7: Temperaturas mínimas medias decádicas en Río Cuarto durante el año 2007, con respecto a los valores normales (Serie 1977-2006).....	18
Figura N° 8: Valores medios decádicos de la temperatura en Río Cuarto durante el año de estudio (2007), con respecto a los valores normales (Serie 1977-2006).....	19
Figura N° 9: Distribución decádica de la evapotranspiración potencial para el período de estudio (2007).....	20
Figura N° 10: Distribución decádica del balance hídrico para el período de estudio.....	20
Figura N° 11: Perfiles hídricos en cinco momentos del ciclo: Emergencia (5 jul.), Dos hojas (7 ag.), Macollaje (3 sept.), Encañazón (28 sept.) y Grano Lechoso (8 nov.) en la densidad de 150 pl.m ⁻²	22

Figura N° 12: Perfiles hídricos en cinco momentos del ciclo: Emergencia (5 jul.), Dos hojas (7 ag.), Macollaje (3 sept.), Encañazón (28 sept.) y Grano Lechoso (8 nov.) en la densidad de 450 pl.m ⁻²	23
Figura N° 13: Relación entre la disminución del agua en la zona radical (Dr) y contenido hídrico (CH) acumulado en el perfil, para 2 densidades: 150 pl.m ⁻² (CH150) y 450 pl.m ⁻² (CH450).....	27
Figura N° 14: Contenido hidrico estimado (CH estimado) y medido (CH medido) y agua disponible durante el ciclo del cultivo (ADS).....	29
Figura N° 15: Análisis de regresión lineal del contenido hídrico en la zona radical (Densidad Alta).....	30
Figura N° 16: Análisis de regresión lineal del contenido hídrico en la zona radical (Densidad Baja).....	30
Figura N° 17: Evapotranspiración potencial del cultivo y evapotranspiración actual del cultivo durante el ciclo del mismo.....	31
Figura N° 18: Cantidad de agua disponible para el cultivo (ADC), agua fácilmente disponible (AFDC) y disminución del agua en la zona radical (Dr) durante el ciclo del cultivo.....	32

RESUMEN

“Análisis de la relación entre el balance hídrico y la producción de trigo (*Triticum aestivum* L.) en secoano”

La producción de trigo de secoano en buena parte de la provincia de Córdoba presenta una condición agroclimática marginal debido a que en la estación invernal el balance hidrológico resulta deficitario como consecuencia del escaso aporte por las lluvias, lo que se traduce en bajos rendimientos y poca seguridad de cosecha. En este trabajo se planteó como objetivo analizar el funcionamiento del sistema atmósfera-suelo-cultivo de trigo con especial énfasis en la relación entre el balance hídrico y la producción de grano. Se midieron variables climáticas [temperaturas máximas, medias y mínimas del aire ($^{\circ}\text{C}$), precipitaciones (mm), humedad relativa (%), radiación solar ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$) y velocidad del viento ($\text{m}\cdot\text{seg}^{-1}$)], variables del cultivo (fenología, producción de biomasa y rendimiento en grano) y del suelo (contenido hídrico volumétrico). Para integrar los datos medidos y evaluar el balance hídrico se utilizó un modelo de simulación. Se calibró dicho modelo a partir de los parámetros Kc y EUA y se evaluó la bondad de ajuste del mismo contrastando datos medidos de humedad del suelo y rendimiento en grano. El rendimiento sin limitaciones hídricas calculado por el modelo fue de $5834\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ mientras que los rendimientos medidos fueron de $3467\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para el tratamiento de densidad baja ($150\text{ pl}\cdot\text{m}^{-2}$) y de $3667\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para la densidad alta ($450\text{ pl}\cdot\text{m}^{-2}$). Estas diferencias estarían vinculadas con la ocurrencia de un balance hídrico deficitario que acumuló 212,9 mm al final del ciclo del cultivo. Los resultados de este estudio confirman que existe una importante brecha de rendimiento para el cultivo de trigo en secoano como consecuencia del déficit hídrico. Además, no se han observado diferencias importantes en cuanto a las densidades de siembras frente a la relación balance hídrico – rendimiento de granos.

Palabras claves: Trigo, Producción, Secano, Balance Hídrico, Modelos de simulación.

SUMMARY

"Analysis of the relationship between water balance and production of wheat (*Triticum aestivum* L.) in dry land"

Dry land wheat production in most of the province of Córdoba has a marginal agroclimatic condition because in winter the water balance is in deficit due to the contribution of low rainfalls, resulting in low yields and poor harvest security. The objective of this work was to analyze the performance of the system atmosphere-soil- wheat crop with special emphasis on the relationship between water balance and grain production. Climatic variables [maximum, medium and minimum air temperatures ($^{\circ}\text{C}$), rainfall (mm), relative humidity (%), solar radiation ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{days}^{-1}$) and wind speed ($\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$)], crop variables (phenology, biomass production and grain yield) and soil variables (volumetric water content) were measured. In order to integrate and evaluate the measured data, a water balance simulation model was used. The model was calibrated according to the parameters of **Kc** and the **EUA**, and its goodness of fit was assessed contrasting the soil moisture and grain yield measured data. The grain yield without limitations of water estimated by the model was $5834 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, while measured yields for the low density treatment ($150 \text{ pl}\cdot\text{m}^{-2}$) were $3467 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ and $3667 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ for the high density ($450 \text{ pl}\cdot\text{m}^{-2}$). These differences could be linked to the occurrence of a water balance deficit that accumulated 212.9 mm at the end of the crop cycle. The results of this study confirm that exist a significant gap for growing wheat in dry land as a result of water deficit. In addition, no major differences were observed in terms of densities compared to the relationship water balance - grain yield.

Key words: Wheat, Production, Dry land, Water balance, Simulation models.

ANÁLISIS DE LA RELACION ENTRE EL BALANCE HIDRICO Y LA PRODUCCION DE TRIGO (*Triticum aestivum L.*) EN SECANO

INTRODUCCION

El trigo (*Triticum aestivum L.*) es la planta más ampliamente cultivada del mundo. Comenzó a ser utilizada por el hombre en el 7.500 a.C. Las antiguas culturas de Babilonia, Egipto, Roma y Grecia, y más tarde las del norte y oeste de Europa, se basaron todas en el cultivo de trigo, la cebada, el centeno y la avena (Langer y Hill, 1987).

Desde el inicio de los primeros asentamientos humanos en lugares potencialmente fértiles, el cultivo de trigo cumplió un rol fundamental como fuente de proteínas e hidratos de carbono. En la actualidad, el trigo (junto con el arroz) es uno de los cereales de mayor importancia en el mundo como base de la alimentación humana. Asumiendo que la población en el mundo se duplicará en los próximos 30 años, pasando de 6 mil millones a 12 mil millones de habitantes en el planeta, la demanda mundial de trigo también se duplicará (Segunda Jornada de trigo de la Región Centro, 2007).

Esta especie se adapta a condiciones de clima templado a templado frío, sembrándose en otoño-invierno-primavera y su ciclo oscila entre 130 y 210 días, según variedad y época de siembra (Brugnoni, 1981).

El avance de la agricultura actual con siembra directa y fertilización sobre los sistemas de producción ganaderos y mixtos, implica pensar que el trigo debe ser considerado dentro de un esquema agrícola integral (Bainotti *et al.*, 2004).

El cultivo de trigo contribuye a la sustentabilidad de los sistemas de producción en siembra directa con su importante aporte de residuos de cosecha y su particular tipo de sistema radical (Marelli, 1983).

A nivel mundial, la producción de trigo en el año 2006 fue de 621.900.000 Tn (29,78 % de la producción mundial de granos), sembrándose un total de 218.200.000 has, con un rendimiento promedio de 28,5 qq.ha⁻¹. En el contexto del Mercosur, la producción total fue de 17.873.000 Tn (2,87 % de la producción mundial) (SAGPyA, 2006).

Actualmente, la producción agrícola argentina ha experimentado un notable incremento de la superficie cultivada. Según los datos del Censo Agropecuario 2002 (SAGPyA, 2002), la superficie cultivada con cereales y oleaginosas ha aumentado más de 55% lo que produjo un incremento de la producción de 30 a 61 millones de toneladas en los últimos catorce años.

La producción nacional de trigo para la campaña 2006/07 totalizó, aproximadamente, 14,6 millones de toneladas, lo que equivale a un incremento del 16% con respecto a la inmediata precedente. Este aumento se debió, principalmente, a la mayor área

sembrada (9%) y en menor medida, al incremento en el rinde final obtenido (4%), el cual fue similar al valor máximo logrado por este cereal en la campaña 2004/05. El área implantada para dicha campaña fue de 5,7 millones de has. La provincia de Buenos Aires fue la de mayor producción de trigo (62%) a nivel nacional, seguidas por Santa Fe (13,7%), Córdoba (11,3%), Entre Ríos (6,1%), Tucumán (2%), Santiago del Estero (1,4%), Salta (1,3%), Chaco (1%), La Pampa (0,8%) y resto del país (1,7%) (SAGPyA, 2007a).

Basándose en condiciones agroecológicas de requerimientos del cultivo homogéneas, la Región Triguera Argentina se ha subdividido en 9 subregiones productivas identificadas en la Tabla N°1 y Figura N°1.

Tabla N°1. Subregiones agroecológicas productivas de trigo en Argentina. (Fuente: Brugnoli, 1981).

Nombre de la Subregión	Superficie (has.)
Subregión I	11.887.300
Subregión II Norte	5.984.100
Subregión II Sur	12.047.400
Subregión III	7.667.800
Subregión IV	10.604.619
Subregión V Norte	6.750.900
Subregión V Sur	-
NOA	-
NEA	-

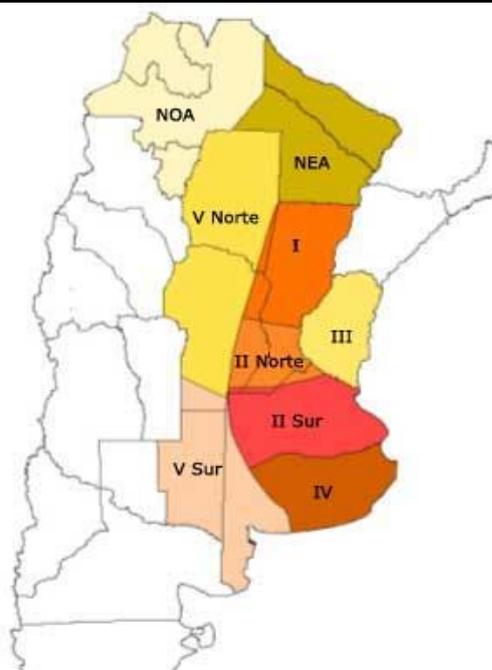


Figura N°1. Subregiones agroecológicas de trigo en la República Argentina (Fuente: www.sagpya.mecon.gov.ar)

A nivel de la provincia de Córdoba, en la campaña 2007/08 se produjeron 3.952.020 Tn, sembrándose un área total de 1.233.200 has con un rendimiento promedio de 3.228 kg.ha⁻¹ (SAGPyA, 2007b). A nivel departamental, Río Cuarto aportó para la campaña 2005/06 un 1,46 % de la superficie provincial sembrada con trigo, representando alrededor del 1,02 % de la producción provincial (SAGyA, 2007).

El área de influencia de la U.N.R.C., se encuentra dentro de la subregión V Norte (Tabla N° 1 y Figura N° 1. Brugnoli, 1981). En esta zona, el clima es poco favorable para el cultivo de trigo debido a que el período de mayores precipitaciones se extiende de octubre a marzo y las menores lluvias se ubican entre junio-septiembre, época en que el cultivo cumple la mayor parte de su ciclo (Magrin y Travasso, 1997). Según Pascale y Damario (1961), el cultivo de trigo de secano en buena parte de la provincia de Córdoba (oeste y sur) presenta una condición agroclimática marginal, caracterizada por bajos rendimientos medios y poca seguridad de cosecha

La aptitud de la provincia de Córdoba para el trigo de secano encuentra casos similares en otras áreas de producción marginal del mundo. La consigna en estas regiones es minimizar la oportunidad de ocurrencia de estrés hídrico recurriendo a prácticas culturales que incrementen el almacenaje de agua en el suelo a la siembra (Musick, 1994).

En la región triguera semiárida gran parte del ciclo del cultivo, incluyendo el período crítico de crecimiento de las espigas, depende principalmente del agua almacenada al momento de la siembra. En estas condiciones, las variedades y prácticas de manejo de cultivo que mejoren el aprovechamiento del agua almacenada en el perfil del suelo, mejorarán la producción de granos (Dardanelli *et al.*, 2001).

El cultivo de trigo en condiciones de secano presenta limitantes para el logro de rendimientos potenciales, aún teniendo en cuenta los avances en materia de mejoramiento genético y la incorporación de la siembra directa ocurridos en los últimos años. Si bien hoy existen herramientas que permiten hacer un manejo eficiente de factores, como la nutrición, malezas, plagas y enfermedades, aparecen otros aspectos ambientales más difíciles de controlar, como las lluvias, temperatura y radiación (Giubergia *et al.*, 2007). Por lo tanto, el agua disponible es uno de los factores claves a analizar para alcanzar mejores resultados en la producción de trigo de secano (Fraschina *et al.*, 2003 a).

Si bien el cultivo de trigo puede producir granos con una muy baja disponibilidad de agua, el mismo necesita elevadas tasas de transpiración para obtener buenos rendimientos (Evans, 1983).

Aunque durante la estación invernal la demanda atmosférica es reducida, el balance hidrológico resulta deficitario como consecuencia del escaso aporte de lluvias. Esta característica hidrológica en la provincia de Córdoba se va acentuando gradualmente en la

región desde el este (con inviernos más húmedos) hacia el oeste. La isoyeta de 800 mm expresa la disponibilidad anual de las lluvias en este sector marginal (Ovando *et al.*, 2000).

El consumo ó necesidad de agua real es el valor de la evapotranspiración del cultivo (ETc) acumulada a lo largo de su ciclo de crecimiento y desarrollo en las condiciones ambientales imperantes. Los valores que se obtengan van a depender de la demanda atmosférica y del área foliar desarrollada por el cultivo (Andriani, 1997).

Hay que distinguir dos componentes importantes en relación al agua que se mueve del suelo a la atmósfera: la evaporación y la transpiración. Desde el punto de vista del cultivo, estos dos componentes, que constituyen la evapotranspiración, no tienen la misma importancia. Las pérdidas de agua por evaporación desde la superficie del suelo no contribuyen al crecimiento del cultivo, pero producen una disminución en las reservas de agua del suelo. Las mayores pérdidas de agua por evaporación se producen en los primeros estadios de crecimiento del cultivo, cuando las plantas son pequeñas y gran parte de la superficie del suelo está expuesta a la radiación solar. Por otra parte, sí bien el agua transpirada es la parte del agua absorbida que no es retenida por la planta, es la que promueve el crecimiento de biomasa (Andrade *et al.*, 1996).

A lo largo del ciclo del cultivo la evapotranspiración modifica su composición, variando la proporción correspondiente a la transpiración y la evaporación. A medida que el cultivo crece, el aumento de su área foliar hace que sea mayor la proporción de agua evaporada desde el follaje respecto a la del suelo (Andrade *et al.*, 1996).

En condiciones de secano existen muy limitadas posibilidades de mejorar la disponibilidad de agua para el cultivo. Esta depende de la humedad almacenada en el suelo y de la lluvia caída antes y durante el período de crecimiento. Sustancialmente, cualquier estrategia de manejo debe apuntar a incrementar el agua disponible en el suelo, reduciendo todas las pérdidas posibles (escurrimiento, evaporación) y a mejorar la eficiencia de su uso (Loomis, 1983).

Al cociente entre la producción, en materia seca o rendimiento en grano, y la evapotranspiración del cultivo se lo denomina eficiencia en el uso del agua (**EUA**) (Della Maggiora *et al.*, 2000). En otros términos, la **EUA** representa el rendimiento de grano por unidad de agua usada por el cultivo. Los componentes de la **EUA** son: i) agua acumulada en el suelo; ii) agua transpirada por el cultivo y iii) conversión a biomasa y rendimiento (Micucci y Álvarez, 2003).

El trigo puede alcanzar elevadas **EUA**. En la Tabla N°2 se detallan valores de **EUA** del cultivo de trigo bajo diferentes prácticas de manejo en distintas localidades de la región Pampeana Argentina.

Tabla N°2. Valores de EUA para el cultivo de trigo bajo diferentes prácticas de manejo en distintas localidades de la Región Pampeana Argentina.

Zona y/o Provincia	Tipo de Suelo	Efecto observado	Práctica de manejo	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	EUA (kg.ha ⁻¹ /mm)	Referencia
EEA INTA Rafaela Santa Fe	Argiudol	Labranza	SD LM	3768 4228	10,6 11,7	Villar, 2000
Red AAPRESID- INPOFOS Región pampeana	Argiudoles y Hapludoles	Fertilización	Testigo NP	3347 4603	10,4 13,4	Ambrogio <i>et al.</i> , 2000
EEA INTA Rafaela Santa Fe	Argiudol	Fecha de siembra	1ª época 2ª época	3946 2550	10,9 8,3	Villar, 2001
EEA INTA Paraná Entre Ríos	Argiudol vértico	Fertilización	Sin N Con N	-	7,6 12,4	Caviglia y Sadras, 2001
Río Cuarto Córdoba. UNRC	Hapludol típico	Fertilización	Sin Fert. Con Fert	2952 4959	7,9 12,2	Pergolini <i>et al.</i> , 2001.
EEA INTA Marcos Juárez Córdoba	-	Evaluación de variedades	-	-	10-15	Fraschina <i>et al.</i> , 2000

LM: labranza mínima, SD: siembra directa.

Nota: EUA (kg.ha⁻¹ granos.mm⁻¹ Etc)

Totis de Zeljkovich *et al.* (1991), cita valores de **EUA** de 8,1 kg de granos.ha⁻¹.mm⁻¹ de **ETP**, para un cultivo de trigo en Pergamino (Citado por Micucci *et al.*, 2003). Villar (2000 y 2001) muestra valores de **EUA** de 36,4 kg MS.mm⁻¹ de **ETc** para cultivares de secano y ciclo largo en fechas de siembras tempranas y 38,6 kg MS.mm⁻¹ de **ETc** por el cultivo en secano y en siembra directa, siendo ambos ensayos sin limitaciones por nutrientes. Por otra parte, Caviglia y Sadras (2001) citan valores de **EUA** de 23 a 37 kg MS de biomasa.ha⁻¹.mm⁻¹ de **ETc** por el cultivo.

Como puede observarse precedentemente, la **EUA** de los cultivos es modificada por diversas prácticas de manejo tales como la rotación, sistema de labranza, riego, fertilización, cultivares, fecha de siembra, entre otras (Micucci *et al.*, 2003).

El balance hídrico de un suelo donde crece un cultivo resulta de las diferencias entre los ingresos y los egresos o pérdidas de agua al sistema. El agua que ingresa puede provenir de las precipitaciones, el riego, la napa freática y por escorrentía superficial, desde áreas mas elevadas. Los egresos se producen por la evaporación del agua desde la superficie del suelo, la transpiración del cultivo, la escorrentía superficial hacia áreas más bajas y el drenaje por debajo de la zona explorada por raíces. Si los ingresos superan a los egresos, toda o parte del

agua excedente puede acumularse en el perfil de suelo explorado por el cultivo, generando una variación de almacenaje positiva (Dardanelli *et al.*, 2003).

Las prácticas de manejo del suelo y del cultivo modifican el aprovechamiento de los recursos disponibles para el crecimiento de las plantas. El consumo de agua es uno de los más afectados por las decisiones culturales y también es el condicionante principal de los rendimientos. Para hacer un uso racional de este recurso es necesario el conocimiento de aspectos básicos que hacen a su aprovechamiento, entre otros la profundidad de exploración de las raíces, la eficiencia de uso del agua almacenada y, cómo éstos son afectados por las decisiones de manejo (Villar, 2000).

La densidad de siembra es una variable importante en la determinación de la capacidad de un cultivo para obtener recursos, pudiendo modificar la captura y utilización de radiación, agua y nutrientes. Una densidad de siembra adecuada debe ser aquella que maximice la utilización de los recursos y reduzca los efectos perjudiciales de factores bióticos y abióticos para aumentar el rendimiento y calidad de granos (Satorre y Kruk, 2004). Consecuentemente, la densidad de siembra y el espaciamiento entre hileras, tienen un efecto directo sobre los componentes de rendimiento y tendrán un impacto significativo en el rendimiento final del cultivo.

La densidad óptima de plantas varía considerablemente entre áreas de acuerdo a las condiciones de clima, suelo, fecha de siembra y variedades (Gate, 1995). Muchas investigaciones sobre los efectos de la densidad poblacional en los rendimientos del cultivo muestran incrementos hasta un valor óptimo, a moderadas densidades, y una marcada reducción en la producción solo a muy altas densidades. (Holliday, 1960; Donald, 1963).

La densidad de siembra y la disposición espacial influyen fuertemente el uso de los recursos del ambiente por el trigo y la importancia relativa de la competencia intra e interplanta por agua, luz y nutrientes durante el desarrollo del cultivo (Darwinkel, 1978; Tompkins *et al.*, 1991). Bajas densidades de siembra disminuyen la competencia interplanta especialmente durante el crecimiento vegetativo, pero incrementan la competencia intraplanta durante el llenado de granos porque la planta tiende a producir más espigas de macollos (Darwinkel, 1978; Marshall and Ohm, 1987).

Generalmente, bajas densidades de siembra incrementan el número de espigas producidas por cada planta y el peso de cada espiga, pero decrece el número de espigas por unidad de área, del mismo modo ocurre lo opuesto con altas densidades de siembra (Wilson and Swanson, 1962).

Puckridge y Donald (1967) estudiaron el efecto de la densidad sobre el rendimiento y sus componentes en el cultivo de trigo considerando un amplio rango de densidades (desde 1,4 a 1.078 pl.m²) y para condiciones de bajas precipitaciones (250 – 400 mm por año) en Australia Occidental. Para esas condiciones, el rendimiento por unidad de área fue mayor a

densidades intermedias. Algunos componentes del rendimiento (e.g. peso de los granos) en el amplio rango explorado no fueron afectados marcadamente por la densidad. En cambio, el número de granos por espiga o el número de espigas por planta, variaron en mayor medida y tuvieron un efecto compensador sobre el rendimiento. Al igual que en otras condiciones, el rendimiento de grano mostró una estrecha relación positiva con el número de granos producido a cada densidad y éste con el peso de espigas por unidad de área en antesis.

En condiciones de baja disponibilidad de recursos, las plantas creciendo a altas densidades (en condiciones de severa competencia), muestran una reducción progresiva de la tasa de crecimiento, la cual afecta la determinación del número de granos principalmente durante el período crítico (20 días antes y 10 días después de antesis). Sin embargo, la proporción de luz interceptada tempranamente por el canopeo resulta mayor que en bajas densidades y, en consecuencia, la tasa de crecimiento del cultivo en preantesis puede resultar mayor a altas densidades. Cuando el cultivo alcanza el 95 % de interceptación lumínica antes de iniciar el crecimiento de la espiga, el rendimiento del cultivo sería independiente del número de plantas establecidas. Por lo tanto, en un amplio rango de densidades, el peso de las espigas en antesis y el número de granos, serán lo suficientemente altos para maximizar el rendimiento por unidad de superficie (Puckridge y Donald, 1967).

Experiencias llevadas a cabo en Argentina corroboran, en líneas generales, estos resultados. Las mismas señalan la capacidad del cultivo de compensar reducciones en el número de plantas por unidad de área, principalmente, a través del aumento en el número de espigas por macollo. El número de macollos, a su vez, sería el resultado de la interacción de los recursos disponibles y de señales lumínicas (relación rojo/rojo lejano) (Lerner y Satorre, 1990).

En trigo cuando el crecimiento vegetativo se ve restringido por la falta de recursos, suele ser deseable el aumento de la densidad a fin de favorecer una mayor interceptación de la radiación por el canopeo (Pepper, 1998). Sin embargo, si el recurso limitante es el agua, principalmente en los momentos críticos de determinación del rendimiento, una mayor densidad puede producir rendimientos menores. Es decir, la mayor densidad permite compensar la pérdida de plasticidad fenotípica de esta especie durante su desarrollo temprano y sólo contribuye a mayores rendimientos si la restricción hídrica se reduce en etapas posteriores del ciclo. Sin embargo, en estas condiciones, la limitación hídrica suele ser el principal factor que regula la expresión del rendimiento y las pérdidas atribuibles al aumento de la densidad son pequeñas (Gallez *et al.*, 1986).

La multitud de procesos relacionados con el transporte de agua desde el suelo a la atmósfera a través del cultivo, hace que sea muy difícil caracterizarlos con el detalle y profundidad necesarios. Para poder comprender y analizar todos estos procesos se recurre cada vez más al uso de modelos de simulación. Se debe tener presente que la modelación es

una simplificación de la realidad, basada en los mecanismos físicos que aparecen en la naturaleza (Leenhardt *et al.*, 1995).

El cultivo de trigo, al igual que otros cultivos presenta fluctuaciones de los rendimientos entre años y entre sitios, dependiendo estas variaciones principalmente de la disponibilidad de agua y nutrientes. La cantidad de agua disponible para la planta es una de las variables fundamentales para la producción de materia seca o el rendimiento de los cultivos (Waggar *et al.*, 1992). En tal sentido, existe una estrecha relación entre el balance hídrico y el rendimiento por lo que su análisis permite conocer mejor el funcionamiento clima – suelo – cultivo a los efectos de optimizar el manejo tecnológico.

En este trabajo se propone estudiar la relación entre el balance hídrico y la producción del cultivo de trigo en secano, explorando posibles efectos de la densidad de siembra sobre dicha relación.

OBJETIVO GENERAL:

Analizar y evaluar el funcionamiento del sistema suelo – atmósfera – cultivo mediante la utilización de un modelo de simulación.

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Estimar el balance hídrico en el cultivo de trigo en secano para dos densidades de siembra.
- Cuantificar la producción de biomasa y el rendimiento del cultivo de trigo.

MATERIALES Y METODOS

Área experimental

El área experimental donde se desarrolló esta investigación se encuentra situada en el Departamento Río Cuarto, en el Campo de Docencia y Experimentación (Camdox) de la Universidad Nacional de Río Cuarto, ubicado sobre la Ruta Nac. 36, Km. 601, Las Higueras (Córdoba). Las coordenadas geográficas son: 33° 07' Latitud Sur, 64° 14' Longitud Oeste, a una altitud de 421 m.s.n.m.

El Camdox se encuentra dentro de la unidad ambiental Llanura subhúmeda bien drenada (Cantero *et al.*, 1998). Presenta un clima templado subhúmedo a semiárido, con un régimen de precipitación monzónico y un total normal anual de precipitación de 804,8 mm (Serie 1977-2006 ⁽¹⁾). Los suelos predominantes son Hapludoles típicos franco arenosos (Cantero *et al.*, 1998).

Instalación del ensayo

Previo a la siembra se realizó un barbecho químico utilizando 3 l.ha⁻¹ de Glifosato, 0,5 l.ha⁻¹ de 2,4-D y 7 g.ha⁻¹ de Metsulfuron metil, para que el cultivo no tenga durante sus primeros estadios la presencia de malezas.

El cultivo fue sembrado el 20 de junio del 2007, en condiciones de secano, a una distancia entre hileras de 0,175 m y con tres densidades de siembras contrastantes: 150 pl.m⁻², 300 pl.m⁻² y 450 pl.m⁻². La tecnología de siembra adoptada fue siembra directa y se utilizaron dosis de fertilizantes nitrogenados de 100 kg.ha⁻¹ de urea (46-0-0) y fosforados de 80 kg.ha⁻¹ PDA (18-46-0).

El sitio experimental donde se relevaron los datos es parte de un ensayo de densidades de siembras y variedades de trigo llevado adelante por la asignatura Cereales (Departamento de Producción Vegetal, F.A.V, U.N.R.C.). Dicho ensayo consta de tres bloques completos distribuidos al azar, donde en cada uno de ellos se combina tres variedades de trigo (Klein Capricornio, Nidera Baguette y Torcaza Relmó) con tres densidades de siembra (150, 300 y 450 pl.m⁻²). En este trabajo se realizó sólo el seguimiento de la variedad "Klein Capricornio" en dos densidades de siembras: 150 pl.m⁻² y 450 pl.m⁻² y en dos parcelas del ensayo experimental.

⁽¹⁾ Ing. Agr. Ph.D. Roberto A. Seiler, comunicación personal.

El ensayo se efectuó sobre un lote de 83 m de largo por 39,37 m de ancho, el cual contenía 225 hileras de plantas con un espaciamiento de 0,175 m entre las mismas, abarcando una superficie total de 3267,71 m². El lote se dividió en 3 bloques de 23 m de largo por 39,37 m de ancho cada uno (superficie de 905,51 m²), con un espaciamiento de 7 m entre ellos. Además, cada uno de estos bloques fue subdividido en 9 parcelas de 100,61 m² cada una, con las siguientes dimensiones: 23 m de largo por 4,37 m de ancho conteniendo 25 hileras de plantas (consideradas unidades experimentales- UE).

En la Figura N° 2 se detalla el diseño empleado en dicho ensayo experimental, esquematizando cada uno de los bloques y las tres densidades de siembra.

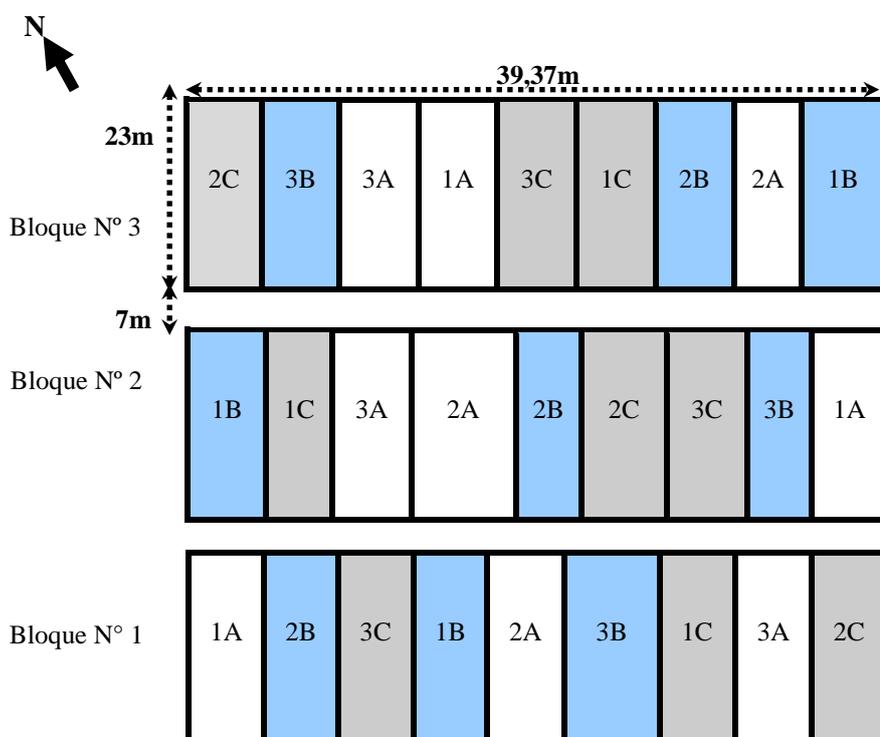


Figura N° 2. Esquema del ensayo experimental.

Nota: Densidad 150 pl.m⁻²(1), 300 pl.m⁻²(2) y 450 pl.m⁻²(3). Variedad Torcaza Relmó (A), Nidera Baguette (B) y Klein Capricornio (C).

Las principales características de la variedad de trigo “Klein Capricornio” son las siguientes: cultivar de ciclo largo, con porte vegetativo semierecto y una altura promedio de 0,95 m, resistente al vuelco, no presenta desgrane y de excelente calidad panadera (grupo de calidad 2). Otras características a tener en cuenta son: Poder Germinativo mínimo del 85 %, Pureza físico-botánica mínima del 99 % y peso de 1000 granos igual a 36 g.

Variables medidas

Las variables medidas y la metodología de medición de los componentes físicos (clima y suelo) y biológicos (cultivo) del sistema experimental se detallan a continuación:

Clima

Los datos diarios de las variables climáticas necesarias para el estudio [temperaturas máximas, medias y mínimas del aire ($^{\circ}\text{C}$), precipitaciones (mm), humedad relativa (%), radiación solar ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$) y velocidad del viento ($\text{m}\cdot\text{seg}^{-1}$)] fueron obtenidos de la Estación Agrometeorológica Adcon (Fuente: www.aseagro.com.ar) ubicada en cercanías del campo experimental, cuyas coordenadas geográficas son: $33^{\circ} 07'$ Latitud Sur, $64^{\circ} 14'$ Longitud Oeste, a una altitud de 421 m.s.n.m.

Suelo

Los datos morfológicos y analíticos del individuo suelo fueron descriptos por Bricchi (1996), siendo caracterizado de acuerdo a las Normas de Reconocimiento de Suelos de la República Argentina (Etchevehere, 1976). Durante el desarrollo del cultivo se midió la siguiente variable:

Contenido hídrico volumétrico del suelo: en dos parcelas (UE) del ensayo experimental (3C y 1C) (Figura N°2) se obtuvieron 4 muestras del contenido hídrico volumétrico del suelo para cada densidad de siembra, en cinco profundidades: 0 – 0,20 m; 0,20 – 0,40 m; 0,40 – 0,60 m; 0,60 – 0,80 m y 0,80 – 1 m. Las profundidades de medición de humedad están asociadas a la secuencia de horizontes del perfil de suelo. Las mediciones fueron tomadas aproximadamente cada 30 días. Las muestras de suelo obtenidas con barreno, fueron pesadas en húmedo (PH) y colocadas a estufa a 105°C hasta lograr peso constante obteniéndose el peso en seco (PS) y finalmente por cálculo el contenido hídrico expresado en volumen [cm^3 (agua). cm^{-3} (suelo)] y como lámina de agua (mm). Se determinó el Coeficiente de Variación (CV) y Desvió Estándar (S) (Análisis estadístico) de las muestras, en cada una de las mediciones del contenido hídrico, para obtener un valor representativo y tener en consideración la variabilidad de los datos obtenidos.

Cultivo

En las UE 3C (Klein Capricornio $-450 \text{ pl}\cdot\text{m}^2$) y 1C (Klein Capricornio $-150 \text{ pl}\cdot\text{m}^2$) de cada bloque (Figura N°2), se extrajeron las plantas para realizar las siguientes mediciones:

Fenología del cultivo: se siguió el código decimal de Zadoks (Zadoks *et al.*, 1974), identificando cada estadio fenológico mediante la observación de la morfología externa de la planta, registrándose las fechas de ocurrencia de cada estadio. Los estadios de desarrollo vegetativo y reproductivo del cultivo fueron observados periódicamente durante el ciclo (cada 15 días), siendo las mismas realizadas sobre diez plantas seleccionadas como representativas en cada UE.

Producción de biomasa: Se obtuvieron 4 muestras de 0,1 m² por parcela, secándolas en estufa a 80 °C hasta que las muestras se estabilizaron en un peso constante (Mills y Jones, 1996), en dos estadios fenológicos: Macollaje (**Z33-34**) y Grano pastoso (**Z8**) de acuerdo a la escala fenológica de Zadoks (Zadoks *et al.*, 1974). Las muestras se expresaron en términos de MS total (g.m⁻² ó kg.ha⁻¹). Las mediciones de peso se realizaron con una balanza analítica con una precisión de 0,1 g.

Rendimiento en grano: se determinó mediante la cosecha manual de espigas de tres muestras de 1 m² por UE y su posterior trilla mecánica.

Procesamiento de la información

Para el procesamiento y análisis de los resultados obtenidos se empleó un modelo de simulación de Producción de Granos. Dicho modelo utiliza varias ecuaciones desarrolladas por Allen *et al.*, 1998 (Anexo I). Videla Mensegue (2006) tomó estas ecuaciones y las adaptó a una experiencia para estimar dicha producción de granos. Este modelo trata de explicar el funcionamiento del sistema suelo – planta. Para ello se realizaron los siguientes pasos:

a. Parametrización: de la bibliografía se extrajeron los parámetros requeridos por el modelo como **Zr**, **Kc**, **θ_{cc}**, **EUA**, y se calcularon otros como escurrimiento superficial, **ETP**, **ETc**.

b. Calibración: a partir de los datos medidos en cada parcela para cada densidad de siembra se calibró el modelo hasta lograr el mejor ajuste posible con el rendimiento en granos y con el contenido volumétrico de agua en el perfil.

La capacidad predictiva o bondad de ajuste del modelo (para analizar los datos del contenido hídrico disponible en la zona radical) fue evaluada por medio de tres indicadores estadísticos: análisis de regresión lineal, donde se obtuvo el Coeficiente de Determinación (R²) (Infostat, 2004); la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) y el error medio absoluto (MAE) (Willmott, 1982).

El primero, mide la proporción de variabilidad total de la variable dependiente (Y) respecto a su media que es explicada por el modelo de regresión. Es usual expresar esta medida en porcentaje. El segundo, mide el promedio de magnitud de error; cuanto menor sea su valor, mayor será el ajuste del modelo. Por último, el MAE es un índice de tipo absoluto y simple, que resume la diferencia promedio entre los valores medidos y simulados en sus propias unidades.

También se realizó un análisis de sensibilidad a la variación en la **EUA** para evaluar la bondad de ajuste del modelo en la producción de granos.

c. Finalmente con el modelo calibrado, se presentan los resultados globales y parciales del balance hídrico analizando cada componente del mismo y su influencia sobre la producción.

RESULTADOS Y DISCUSION

Características del sitio de estudio y variables medidas

Características del sitio de estudio

El suelo donde se desarrolló la experiencia es un Hapludol típico cuya clase por aptitud de uso es **II**, sin limitaciones estructurales relevantes para el desarrollo de los cultivos. A nivel del Departamento Río Cuarto, el gran grupo Hapludol es representativo de aproximadamente 148 mil hectáreas, que equivale a un 8,09% del total de la superficie del departamento (Gorgas y Tassile, 2003).

En la Tabla N° 3 se presenta la descripción analítica del perfil y en la Figura N° 3 una foto del mismo.

Tabla 3. Datos analíticos del perfil Hapludol típico. Fuente: Bricchi (1996)

Horizonte	Profundidad Cm	Arena %	Limo %	Arcilla %	C.I.C meq/100 g	Materia orgánica %
Ap	0-18	46,3	37,3	16,4	19,3	3,4
Bw1	18-35	47,2	36,6	16,2	19,3	1,8
Bw2	35-57	48,8	37,8	15,5	14,8	1,2
Bw3	57-80	53,2	31,5	15,3	13,7	0,7
BC	80-105	50,3	36,2	13,5	14,6	0,6
C	105-163	53,9	34,2	11,9	11,9	0,5

En la Tabla N° 4 se presentan los valores de **DAP** (Densidad aparente; gr.cm^{-3}), contenidos de humedad (gravimétrica y volumétrica), y láminas de agua (mm) a 0,03 MPa, 1,5 MPa y agua útil obtenidos por Bricchi (1996), para el suelo del sitio experimental.

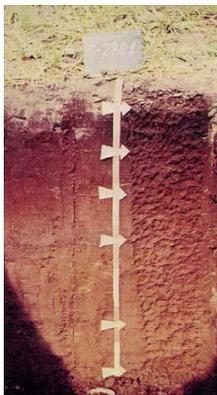


Figura N° 3. Perfil del Hapludol típico

Tabla N°4. Densidad Aparente (**DAP**), Contenido de Humedad y Láminas de Agua (mm) a 0,03 MPa, 1,5 MPa y Agua Útil del perfil del suelo en estudio.

Profundidad (cm)	Horizonte	DAP (g.cm ⁻³)	Humedad Gravimétrica (0,03 MPa g.g ⁻¹)	Humedad Volumétrica (0,03 MPa cm ³ .cm ⁻³)	Lámina de agua (0,03 MPa.mm)	Humedad Gravimétrica (1,5 MPa. g.g ⁻¹)	Humedad Volumétrica (1,5 MPa cm ³ .cm ⁻³)	Lámina de agua (1,5 MPa.mm)	Lámina Agua útil (mm)
0-10	A	1,140	0,20	0,228	22,8	0,09	0,097	9,7	13,1
10-20	A	1,440	0,22	0,317	31,7	0,10	0,137	13,7	18,0
20-30	Bw1	1,220	0,19	0,232	23,2	0,08	0,098	9,8	13,4
30-40	Bw1	1,230	0,19	0,234	23,4	0,07	0,086	8,6	14,8
40-50	Bw2	1,260	0,16	0,202	20,2	0,07	0,088	8,8	11,3
50-60	Bw2	1,245	0,14	0,170	17,0	0,07	0,088	8,8	8,2
60-70	Bw3	1,245	0,14	0,168	16,8	0,07	0,087	8,7	8,1
70-80	Bw3	1,245	0,14	0,168	16,8	0,07	0,087	8,7	8,1
80-100	BC	1,245	0,14	0,168	33,6	0,07	0,087	17,4	16,2
Total					205,4			94,2	111,2

(Fuente: datos obtenidos y descriptos por Bricchi (1996))

Nota: como las muestras fueron tomadas cada 10 cm de profundidad y no se tuvo en cuenta el espesor de los horizontes, en este cuadro no coinciden de manera exacta la profundidad con el nombre del horizonte (Ver profundidad de los horizontes en Tabla N° 3). Por ejemplo, el horizonte A tiene una profundidad de 0-18 cm, pero en este cuadro debido al tamaño de las muestras, se coloca de manera orientativa y por aproximación el nombre de A hasta los 20 cm de profundidad.

Evaluación de las variables medidas durante el ciclo del cultivo

Climáticas

La Figura N° 4 muestra la evolución de la Radiación Solar diaria media decádica registrada en el campo experimental de la U.N.R.C. (33° 07' Latitud Sur, 64° 14' Longitud Oeste, altitud de 421 m.s.n.m.). Se observa, que en la 1ª y 3ª década de julio, 1ª de agosto, 2ª de septiembre y 3ª de noviembre los valores en el año de estudio (2007) fueron inferiores a los normales, registrados en Estación Agrometeorológica de la U.N.R.C durante el período 1977-2006.

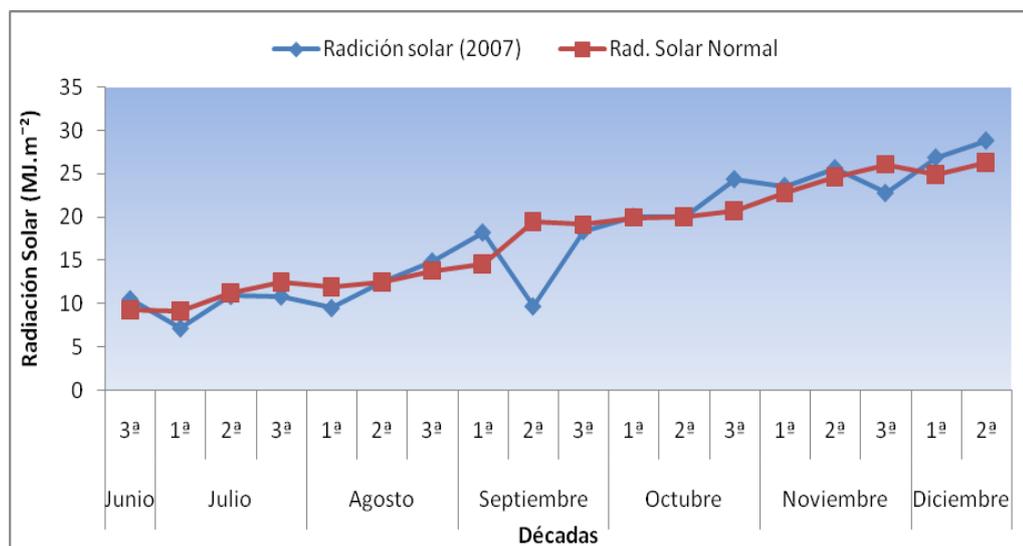


Figura N° 4. Evolución de la Radiación Solar diaria media decádica ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$) en Río Cuarto durante el año en estudio (2007), con respecto a la normal (Serie 1977-2006)

Durante el período de estudio, del 20 de junio de 2007 hasta el 20 de diciembre del mismo año, la precipitación fue de 303,4 mm. Considerando que la media histórica para ese mismo período en Río Cuarto es de 336 mm ⁽¹⁾, la precipitación observada fue un 9,71 % (32,6 mm) inferior al valor normal.

La Figura N° 5 muestra que en general durante el ciclo del cultivo, las precipitaciones fueron menores a los valores medios esperados, ocurriendo déficits marcados particularmente durante la 3ª década de junio, 3ª de julio, 1ª, 2ª y 3ª de agosto, 1ª de septiembre, 1ª y 2ª de octubre, 2ª y 3ª de noviembre y 1ª y 2ª de diciembre. Por el contrario, en la 1ª década de julio y 1ª de noviembre, las lluvias superaron aproximadamente en 25 mm las cuantías normales de precipitación, mientras que en la 2ª y 3ª década de septiembre y en la 3ª de octubre dicho incremento alcanzo los 34 mm, 3 mm y 16 mm respectivamente.

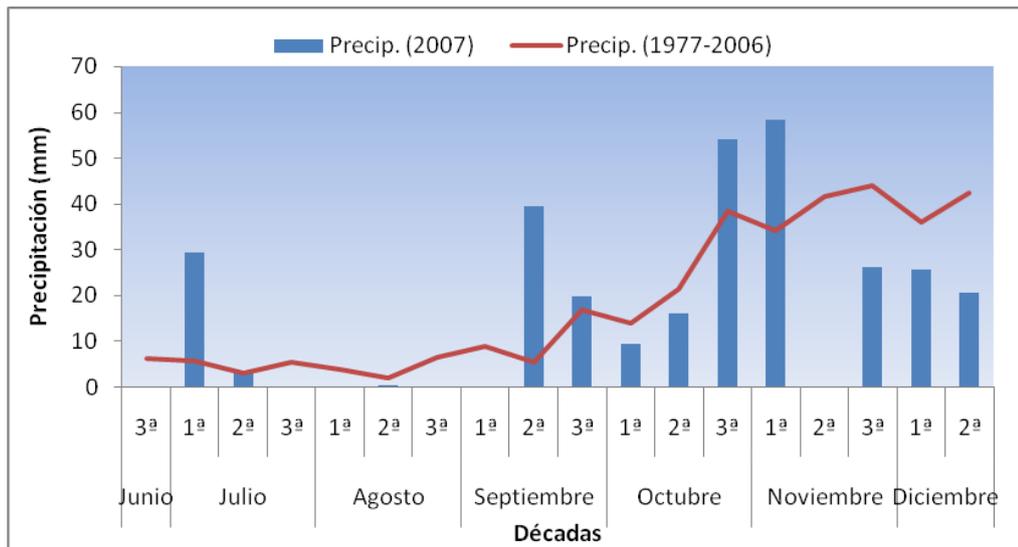


Figura N° 5. Distribución decádica de las precipitaciones en Río Cuarto durante el período de estudio (2007), con respecto a los valores normales (Serie 1977-2006).

Como se aprecia en la Figura N° 6, las temperaturas máximas medias decádicas para la campaña 2007/08, no fueron acentuadamente superiores a las medias normales, excepto en la 1ª década de septiembre, 3ª de octubre y 2ª de diciembre, en donde éstas presentaron un valor marcadamente superior a la media.

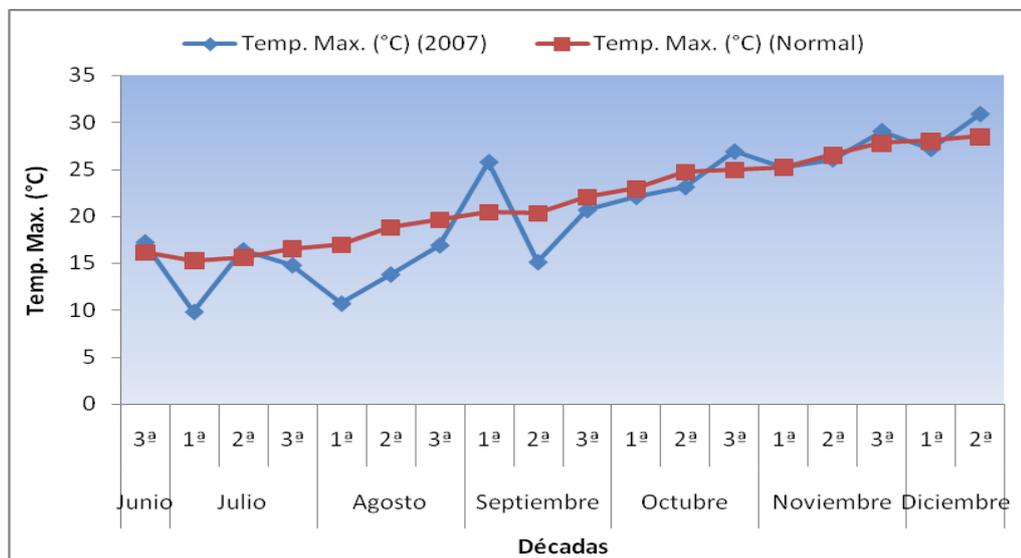


Figura N° 6. Temperaturas máximas medias decádicas en Río Cuarto durante el año 2007, con respecto a los valores normales (Serie 1977-2006).

Cuando se analizan las temperaturas mínimas medias decádicas, se observa en la Figura N° 7 que prevalecieron valores térmicos inferiores a la media, con excepción de

algunos períodos (1ª y 2ª década de septiembre, 3ª de octubre y 3ª de noviembre) en los cuales la temperatura mínima supero a los valores medios esperados.

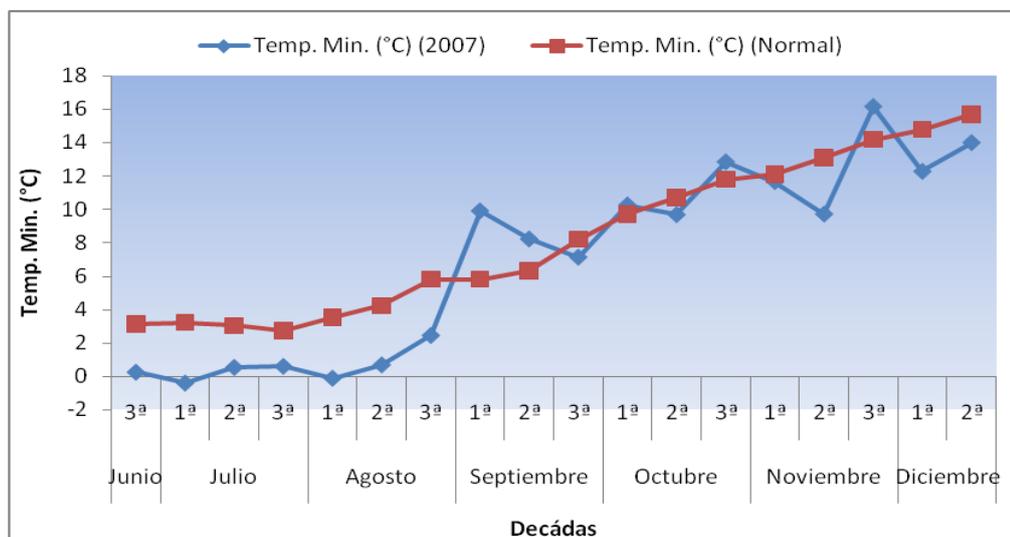


Figura N° 7. Temperaturas mínimas medias decádicas en Río Cuarto durante el año 2007, con respecto a los valores normales (Serie 1977-2006).

El daño que pueden producir las bajas temperaturas extremas en trigo depende del estado de desarrollo del cultivo en el momento en que ocurren. El cultivo de trigo en general tiene buena adaptación a las bajas temperaturas durante gran parte de su ciclo, pero hay circunstancias en que los cambios bruscos de temperatura pueden afectar tejidos en activo crecimiento.

El estado fisiológico de la planta también tiene incidencia sobre la magnitud del daño. Aquí juega un papel importante la previa exposición a bajas temperaturas antes de la ocurrencia de una helada y por supuesto, su duración o tiempo de exposición frente a la temperatura extrema.

También incide en la magnitud del daño la humedad relativa del ambiente y el contenido de agua en el suelo en el momento de ocurrencia de la helada, dos factores relacionados directamente con el estado hídrico de los tejidos y del cultivo.

Durante el año 2007 se produjeron aproximadamente 36 heladas meteorológicas (28 durante el ciclo del cultivo que fue de 184 días). La primera helada tuvo lugar el día 9 de Mayo y la última el 21 de Agosto, produciéndose un período de 261 días sin heladas. Seiler y Vinocur (2008), citan para Río Cuarto el 6 de Junio como fecha media de primera helada, 28 de Agosto fecha media de última helada, un período medio de 281 días sin heladas y un número medio de 11 heladas (1970-2007).

Otro punto a resaltar fue la nieve que precipitó el día 8 de julio del 2007 y que cubrió totalmente las parcelas de investigación, acumulándose sobre la superficie del suelo

aproximadamente unos 25 cm de la misma. De Fina y Ravelo (1973) estiman que una capa de 10 cm de nieve aporta una lámina de agua de 10 mm.

Al analizar la temperatura media del aire durante el ensayo (Figura N° 8) se observa una alternancia alrededor de los valores normales, registrándose en general valores térmicos inferiores a la media histórica, con excepción de algunos períodos (1ª década de septiembre y octubre, 3ª de octubre, 1ª de noviembre, 3ª de noviembre y 1ª de diciembre) en donde fueron superados dichos valores.

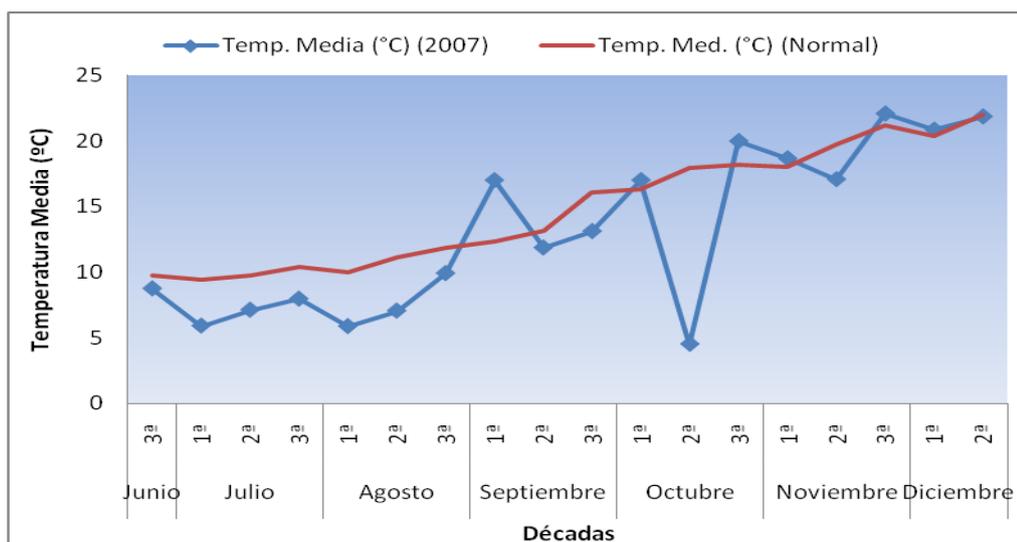


Figura N° 8. Valores medios decádicos de la temperatura en Río Cuarto durante el año de estudio (2007), con respecto a los valores normales (Serie 1977-2006).

La Evapotranspiración potencial calculada por el método de FAO-Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) para el ciclo del cultivo totalizó 834,75 mm. La media decádica fue de 46,37 mm con un máximo de 90,53 mm (2ª década de diciembre) y un mínimo de 15,04 mm (1ª década de julio) (Figura N° 9).

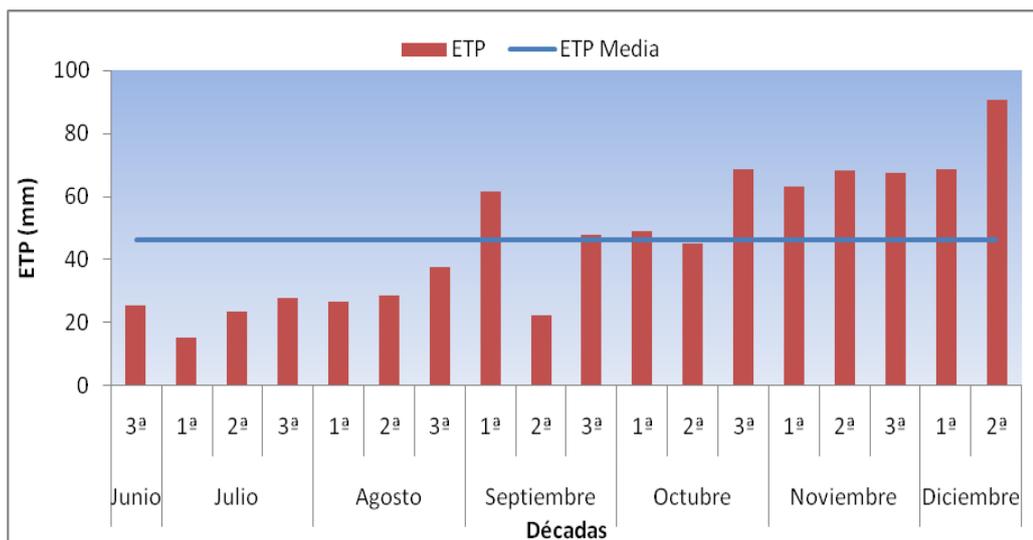


Figura N° 9. Distribución decádica de la Evapotranspiración potencial para el período de estudio (2007).

El balance hídrico decádico (Figura N° 10), calculado como la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial, determino un déficit de 553,34 mm al final del período de estudio. Dicho balance hídrico arroja dos décadas, de un total de dieciocho, con balance hídrico positivo, con un valor de 14,36 mm (1ª década de julio) y 17,38 mm (2ª década de septiembre). El déficit hídrico predominó durante la mayor parte del período de estudio.

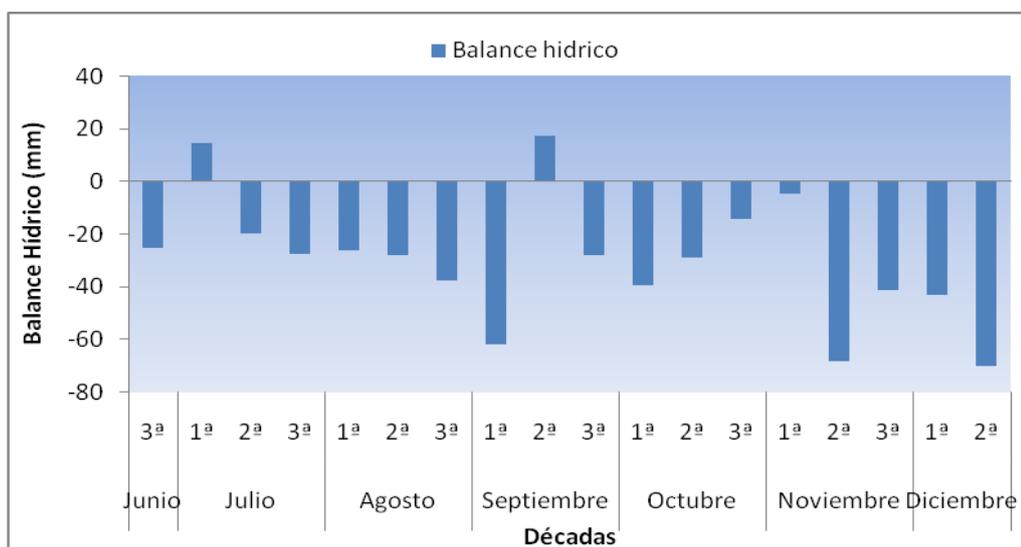


Figura N° 10. Distribución decádica del Balance Hídrico para el período de estudio.

Contenido hídrico del Suelo.

En cada una de las mediciones del contenido hídrico del suelo se determinó el Coeficiente de Variación (CV) y Desvío Estándar (S) de las muestras, a fin de considerar la variabilidad de los datos obtenidos. Estos parámetros estadísticos se calcularon con el propósito de obtener un valor representativo de los datos, debido a que todos los valores presentados, considerados y analizados en los gráficos del perfil hídrico en distintos momentos del ciclo e introducidos al modelo de simulación, son promedios de las distintas parcelas. En Anexo III se presentan los distintos valores de CV, S y Media obtenidos al analizar las distintas muestras del contenido hídrico del perfil del suelo.

Al evaluar el contenido hídrico del suelo, los perfiles hídricos medidos en forma gravimétrica y transformada a unidades volumétricas ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), durante cinco momentos del ciclo del cultivo, muestran una alta dinámica en el contenido hídrico en los primeros 0,40 m de suelo en las dos densidades contrastantes.

En la Figura N° 11 y N°12 se ilustra la evolución de la humedad volumétrica para los distintos tratamientos (densidad baja y alta) respectivamente. Dichos cambios se comparan con los valores de humedad volumétrica a 0,03 y 1,5 MPa.

Si bien, en la mayoría de los instantes mostrados en la Figura N° 11 el contenido hídrico del suelo en los primeros 0,20 m estuvo por encima de los $0,1 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, es preciso destacar que las curvas correspondientes a “Macollaje” y “Grano lechoso” del cultivo fueron las que mostraron el menor contenido hídrico.

También se puede observar que el cultivo en “Grano lechoso” absorbió una importante cantidad de agua, produciéndose un bajo contenido hídrico en todo el perfil, proceso que se acentuó por un déficit hídrico en dicho período.

El Agua Útil o disponible (AU) es la que se considera como agua utilizable o potencialmente extractable por las plantas en la zona de crecimiento radical y surge de la diferencia entre los contenidos hídricos a CC y PMP. Esta es la fracción del agua del suelo que puede perderse por evaporación o variar por el consumo de las plantas. El AU es un indicador de la capacidad de almacenaje de agua de cierto suelo, que para nuestro caso toma un valor de 111,2 mm.

En la Figura N° 11 se observa que en la mayoría de los instantes medidos el contenido hídrico se mantuvo próximo o levemente superior al 50% de AU del perfil, salvo para el caso de “Grano Lechoso” donde el contenido de agua fue menor, aproximándose al PMP.

Villar (2000), cita un valor de 50% de AU a la profundidad de extracción del cultivo como crítico, dado que contenidos inferiores limitaron la tasa de consumo, independientemente del sistema de producción.

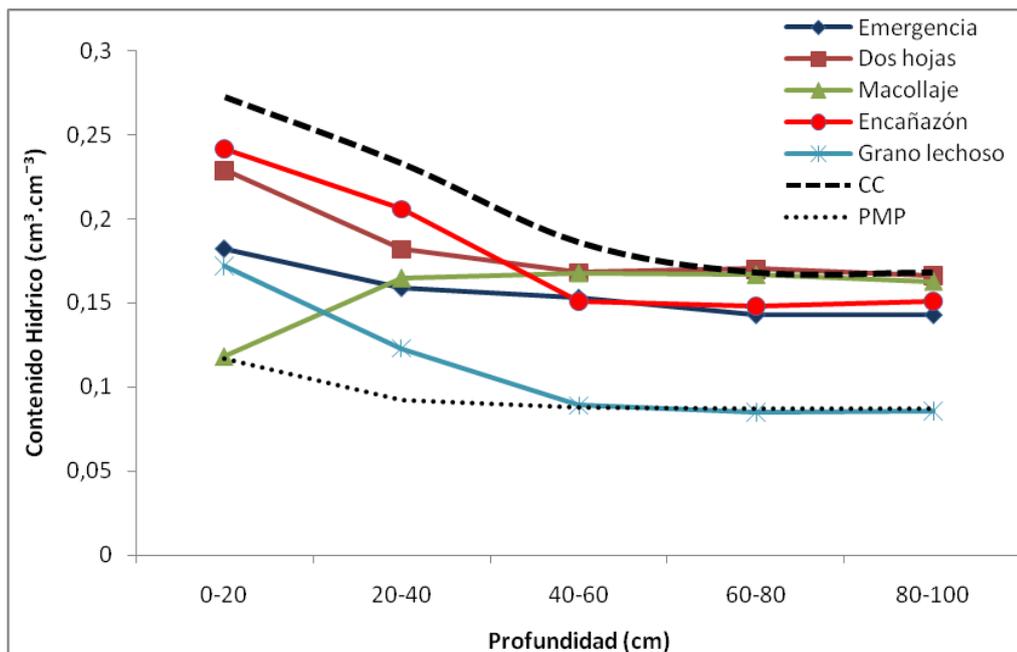


Figura N° 11. Perfiles hídricos durante cinco momentos del ciclo: Emergencia (5 jul.), Dos hojas (7 ag.), Macollaje (3 sept.), Encañazón (28 sept.) y Grano Lechoso (8 nov.) en la densidad de 150 pl.m⁻².

Al analizar la Figura N° 12, también se observa que en los estadios de “Macollaje” y “Grano lechoso” se produjeron los menores contenidos hídricos en los primeros 20 cm del perfil del suelo.

Es de destacar, en este perfil, un contenido hídrico aún menor en las etapas de “Dos hojas y Encañazón” que el observado en la Figura N° 11. Esto puede haber sido producido por un déficit hídrico, asociado a un mayor número de plantas por unidad de superficie y su mayor consumo de agua. Por lo tanto, las mayores diferencias entre las dos densidades se observan en la evaluación del contenido hídrico en estos dos estadios.

El **AU**, en este caso, también alcanzó un valor cercano al 50% del perfil, pero comparándola con la densidad baja, dicho valor fue levemente inferior. En “Grano Lechoso”, el contenido hídrico en el perfil fue cercano al **PMP**, como en el caso anterior.

Por debajo de los 0,40 m de profundidad, en las dos densidades de siembra, se observó una estabilización en el contenido hídrico, aproximándose al valor de 0,15 cm³.cm⁻³, salvo en la etapa de “Grano Lechoso”, donde el contenido hídrico fue menor comparándolo con los demás estadios.

Al comparar el contenido hídrico en “Dos hojas” y “Encañazón” en las dos densidades de siembra en estudio, a los 0,20 m de profundidad, se observó una disminución de este valor (contenido hídrico) en la densidad de 450 pl.m⁻², con respecto a la densidad más baja (150 pl.m⁻²). Para el caso de “Dos hojas” el contenido hídrico pasó de 0,29 cm³.cm⁻³ a 0,21 cm³.cm⁻³.

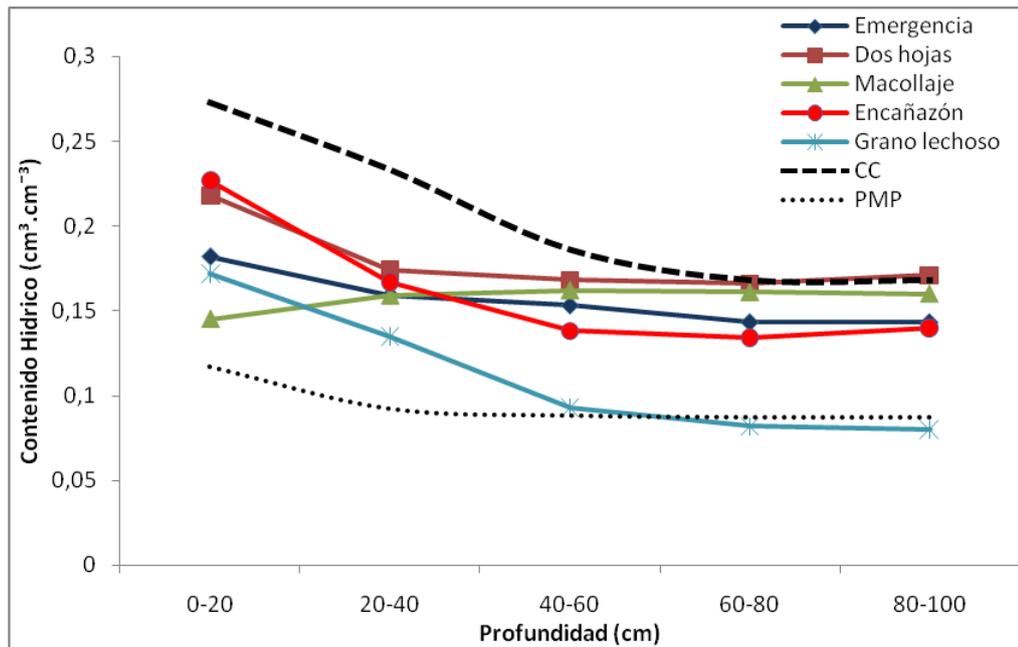


Figura N° 12. Perfiles hídricos durante cinco momentos del ciclo: Emergencia (5 jul.), Dos hojas (7 ag.), Macollaje (3 sept.), Encañazón (28 sept.) y Grano Lechoso (8 nov.) en la densidad de 450 pl.m⁻².

En “Macollaje” el contenido hídrico en todo el perfil estuvo cercano o levemente superior al 50% de AU, pero en los primeros 0,20 m de profundidad se observó un bajo contenido de agua en los dos ensayos de densidades diferentes. Este proceso, asociado a una baja exploración radical por el cultivo en esta etapa temprana, acarreó consecuencias negativas por la dificultad de la planta de tomar el agua.

Gardner *et. al.* (1985), cita que limitaciones hídricas en trigo en la etapa de llenado de grano aceleran la senescencia foliar y reducen la eficiencia de conversión de la radiación interceptada.

El déficit hídrico durante el llenado del grano reduce el crecimiento del cultivo en esta etapa y en consecuencia puede afectar el peso de cada grano. Esta etapa no parece ser la más crítica para la determinación del rendimiento de trigo. El rendimiento de trigo suele estar más frecuentemente limitado por la capacidad de almacenamiento de los destinos que por la fuente disponible para llenar los granos. Sin embargo, deficiencias hídricas durante el llenado del grano pueden llegar a inducir limitaciones de fuente que reduzcan el peso por grano debajo del potencial. En tal caso no sólo es de esperar una caída de rendimiento sino también una pérdida en la calidad comercial del grano (menor peso hectolítrico, mayor porcentaje de grano chuzo, menor rendimiento en harina, etc.) (Abbate, 2005).

Cultivo

En la Tabla N° 5 se presentan las fechas de ocurrencia de las distintas fases fenológicas según Zadoks *et al.* (1974) (Ver fotografías en Anexo II).

Tabla N° 5. Fenología (Zadoks *et al.*, 1974) y altura aproximada del cultivo de trigo.

Fecha	Fases (Z)	Altura (cm)
20-jun-07	0	0
30-jul-07 *	11	5
07-ago-07	12	6
28-ago-07	22	8
11-sep-07	22	15
26-sep-07	32	30
10-oct-07	33	37
19-oct-07	39	65
07-nov-07	7	-
22-nov-07	8	-
06-dic-07	9	-

*La germinación y emergencia se retrasaron debido a la nevada que se produjo el 8-jul-2007.

Tabla N° 6. Estados principales descritos en la escala de Zadoks *et al.*, 1974. (Fuente: Satorre *et al.*, 2003)

Etapa principal	Descripción	Etapa principal	Descripción
0	Germinación	5	Emergencia de inflorescencia
1	Crecimiento de plántula (*)	6	Antesis
2	Macollaje (**)	7	Desarrollo lechoso del grano
3	Elongación del tallo	8	Desarrollo pastoso del grano
4	Estado de bota	9	Madurez

(*) 11 a 19 refleja el número de hojas expandidas en el vástago principal.

(**) 21 a 29 refleja el número de macollos visibles en la planta.

En el estadio **Z11** (correspondiente a una hoja totalmente desarrollada) se observó un número de plantas emergidas superior a la densidad buscada. Esto se debió a que en el momento de la siembra (durante la calibración de la sembradora) se aumentó la densidad en un 20 % para contrarrestar una posible ineficiencia de la sembradora durante la siembra y deficiencias en la germinación. Un tema a destacar fue la desuniformidad de siembra

ocasionada en gran parte del lote por una mala distribución del rastrojo por parte de la cosechadora, ya que las fallas de siembra coincidían con los volúmenes de rastrojos mayores.

El desarrollo del cultivo fue también afectado por la presencia de nieve seguida de períodos largos con heladas y bajas temperaturas mínimas medias mensuales.

El daño que pueden producir las bajas temperaturas en trigo depende del estado de desarrollo del cultivo en el momento en que ocurren. Durante la “Emergencia” de la plántula y hasta el estado de “Dos hojas” desplegadas, las plantas de trigo son sensibles a las bajas temperaturas. Es común observar muerte de plantas pequeñas durante la implantación, pero a medida que comienza el “Macollaje” las plantas van adquiriendo mayor resistencia. En el estado de “Macollaje” la bibliografía menciona que un daño importante se produce con una exposición de 2 horas a -11 °C (Shroyer *et al.*, 1995).

Observaciones realizadas durante los últimos tres años indican que hay diferencias entre variedades en el comportamiento frente a heladas durante la “Implantación” y el “Macollaje” (Fraschina *et al.*, 2000 y 2002).

La fecha óptima de siembra para el cultivar “Klein Capricornio” (ciclo largo) en la subregión V Norte (Río Cuarto) ronda del 15 de Mayo al 25 de Junio, por lo tanto la fecha de siembra elegida en este ensayo experimental (20 junio) puede considerarse óptima.

Con respecto a las variedades de ciclo largo también se debe tener en cuenta que cuando atrasamos la fecha de siembra, estas variedades tienden a desplazar su “Espigazón”, ubicando la etapa de llenado de grano en un período con mayor probabilidad de ocurrencia de altas temperaturas. La consecuencia de esto es una tendencia al acortamiento de la duración de la etapa de llenado de los granos, reduciendo su peso individual con un menor rendimiento (Fraschina *et al.*, 2003b).

En el estadio **Z22** (correspondiendo al vástago principal y 2 macollos) el cultivo presentó un estado sanitario óptimo, no teniendo problemas de insectos y malezas. Sin embargo se notó la presencia, en la mayoría de las plantas, de aproximadamente un 15-20 % de hojas basales amarillas. Esto sería atribuible a las bajas temperaturas que imperaron en dicho momento, con lo cual es un aspecto a tener en cuenta en la biomasa total acumulada y la consecuencia de no llegar a alcanzar a tiempo el IAF crítico (antes del PCE, Período de Crecimiento de las Espigas) (Ver fotografías en Anexo II).

Jenner (1979) señala que la interceptación de la radiación es lo más importante en la producción de biomasa cuando los factores agua y nutrientes no son limitantes y que una deficiencia de nitrógeno (N) afecta la acumulación de materia seca del cultivo.

La producción de biomasa aérea total ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), en **Z33-34** (3 y 4 nudos) y **Z8** (grano pastoso) para las dos densidades de siembra se presentan en la Tabla N° 7.

Tabla N° 7. Materia Seca (MS) aérea Total (kg.ha⁻¹) en Z33-34 y Z8 (Zadoks et al., 1974) para las densidades de 150 y 450 pl.m⁻².

Densidad (pl.m ⁻²)	MS aérea Total (kg.ha ⁻¹)	
	Z33-34	Z8
150	572,3	1535,5
450	688,4	1651,1

Llegado el estadio **Z7** (estado lechoso del grano), el cultivo presentó una importante carencia de humedad edáfica (Ver Figura N° 11 y N° 12) produciéndose un importante atraso en el desarrollo y crecimiento del cultivo.

En la Tabla N° 8 se presentan los componentes del rendimiento y la producción de granos de las dos densidades de siembra evaluadas al momento de cosecha.

Tabla N° 8. Componentes del rendimiento y producción de granos.

	Densidad (pl.m ⁻²)	
	150	450
Peso 1000 granos	38,33	33,33
N° granos.m⁻²	8.962,65	11.141,15
Granos.Espiga⁻¹	25,91	24,66
Espiga.m⁻²	358	471,66
Rendimiento (kg.ha⁻¹)	3.467	3.665
Rendimiento (kg.m⁻²)	0,347	0,367
Peso.Espiga⁻¹(g)	1,00	0,80

Como se observa en la Tabla N° 8, en la densidad de siembra más baja el peso de los 1.000 granos es mayor pero disminuye el número de granos.m⁻². También se observa que el número de espigas.m⁻² disminuyó al igual que el rendimiento final por hectárea aunque el rendimiento por espiga fue mayor en este tratamiento.

Abbate *et al.* (1994), cita que el rendimiento es considerado como el producto del número de granos por unidad de superficie y el peso medio de los granos. En este sentido, Abbate *et al.* (1998), determinaron que el rendimiento está más relacionado con el número de granos por metro cuadrado ($r = 0,9$) que con el peso de los granos ($r = 0,11$) y encontró una tendencia a disminuir el peso de los granos con el aumento en el números de granos por m² producidos.

Procesamiento y análisis de la información

Relación entre la disminución del agua en la zona radical (**Dr**) y contenido hídrico acumulado en el perfil del suelo.

En la Figura N° 13 se muestra la relación entre la disminución del agua en la zona radical (**Dr**) y el contenido hídrico acumulado en el perfil del suelo, para las dos densidades en estudio, en 5 (cinco) momentos diferentes durante el ciclo del cultivo.

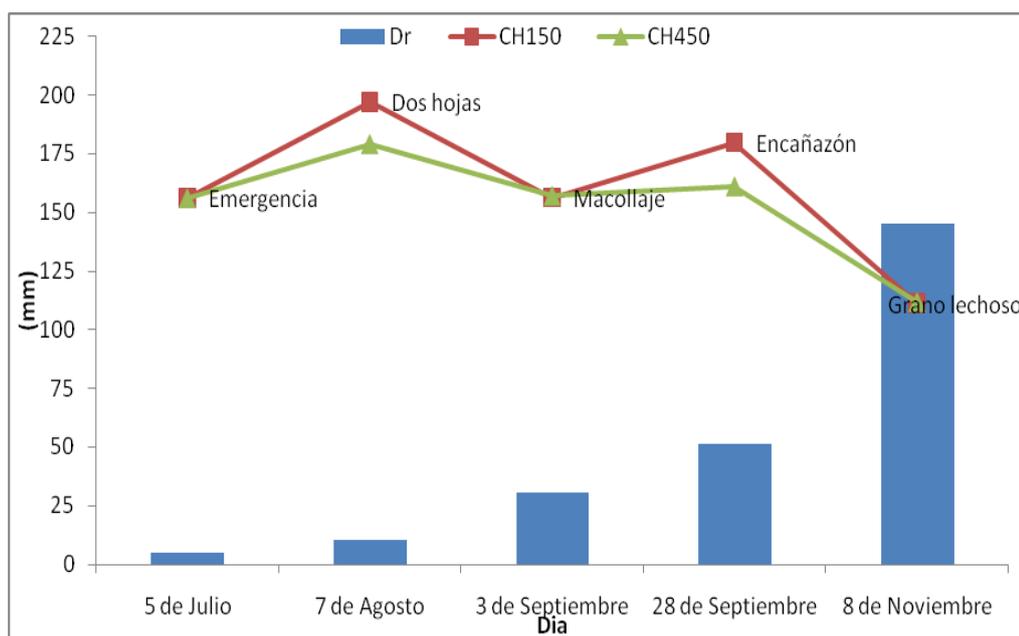


Figura N° 13. Relación entre la disminución del agua en la zona radical (**Dr**) y el contenido hídrico (**CH**) acumulado en el perfil, para 2 densidades: 150 pl.m⁻² (CH150) y 450 pl.m⁻² (CH450).

Los resultados indican que durante el ciclo del cultivo la **Dr** fue aumentando progresivamente, registrándose un valor de 145,5 mm el día 8 de noviembre (Grano lechoso) y alcanzando un máximo de 212,9 mm el 22 de diciembre (Madurez de cosecha), correspondiendo al último día del ciclo del cultivo.

También se puede observar que el Contenido Hídrico en la densidad baja (CH150) fue marcadamente superior, con respecto a la densidad alta (CH450), en solamente 2 (dos) de los 5 (cinco) momentos remarcados en la Figura N° 13. Estos 2 momentos pertenecen a **Z12** (Dos hojas) y **Z32** (Encañazón).

Es de destacar que a partir del mes de octubre el valor de **Dr** comienza a aumentar notoriamente, registrándose bajos valores de contenido hídrico acumulado en el perfil del suelo al finalizar el ciclo del cultivo. Por lo tanto, este déficit repercutirá negativamente en el

rendimiento final esperado, debido a que en las últimas etapas del ciclo, el cultivo consume mayor cantidad de agua que en sus etapas tempranas.

Con respecto a lo anterior, Abbate (1996) cita que el consumo de agua no es uniforme durante todo el ciclo. El mayor consumo de agua se produce durante el período de emergencia de la última hoja y comienzo de llenado de grano (4-5 mm.día⁻¹), en segundo lugar el mayor consumo de agua ocurre hacia el periodo de “Encañazón” (2-3 mm.día⁻¹). Siendo por último, la menor demanda en la etapa de “Macollaje” (1 mm.día⁻¹). Ha calculado que para obtener un rendimiento de 3.000 kg de grano son necesarios unos 450 mm de agua disponible durante el ciclo del cereal.

Balance Hídrico con el Modelo de producción de granos.

Calibración del modelo.

Para evaluar la capacidad predictiva del modelo es necesario realizar la calibración del mismo a partir de parámetros sensibles a su funcionamiento y contrastando algunas de las variables estimadas con las observadas. Los parámetros que se utilizaron para la calibración del modelo son el “Coeficiente **Kc** y la **EUA**”. Para evaluar la bondad de ajuste del modelo se realizó la comparación de dos variables estimadas y medidas: contenido hídrico en la zona radical y producción de granos.

Coeficiente del Cultivo (**Kc**).

Uno de los parámetros de mayor significancia en la calibración y en los resultados del modelo de simulación es el “Coeficiente de Cultivo” (**Kc**), que relaciona la **ETc** con la **ETP**. Este coeficiente trata de reflejar fundamentalmente aquellas características que diferencian el cultivo de la superficie de referencia (altura del cultivo, albedo de la superficie, el área de las hojas, el área expuesta de suelo desnudo) y, en una menor parte, de las condiciones climáticas (Santa Olalla Mañas, *et al.*, 2005).

En la evolución del coeficiente a lo largo del ciclo de crecimiento de un cultivo bajo “condiciones óptimas” se suelen distinguir 4 (cuatro) fases: inicial, desarrollo, media y final. Para el cultivo de trigo, Allen et al., (1998) cita valores de **Kc_{ini}**= 0,3, **Kc_{med}**= 1,15 y **Kc_{fin}**= 0,25-0,45. La definición de estas fases permite esquematizar una curva típica de la evolución del coeficiente, cuyos valores y la duración de las etapas se dan bajo condiciones óptimas.

Uno de los pasos en la construcción de la curva del **Kc** es identificar el valor de este coeficiente y corregirlo en función de varias características que pueden influir (frecuencia con la que el suelo se moja, climáticas y de manejo) (Santa Olalla Mañas *et al.*, 2005).

Por tales motivos, el valor y duración de las distintas fases de la evolución del **Kc** fueron calibradas para simular lo mejor posible la “situación real”.

Los valores de **Kc** con los cuales se calibró el modelo y se alcanzó el mejor ajuste fueron 0,15; 1,1 y 0,3 para **Kc_{ini}**, **Kc_{med}** y **Kc_{fin}** respectivamente.

Es de observar que los valores de **Kc_{med}** y **Kc_{fin}** que mejor ajustaron se encuentran dentro del rango de valores de referencia citado por Allen *et al.*, (1998). Mientras que para el caso del **Kc_{ini}**, este valor no se encuentra dentro de ese rango, sino que tuvo que ser ajustado debido a los problemas de emergencia que tuvo el cultivo en sus etapas tempranas. Como fue mencionado anteriormente, esos problemas de emergencia serían atribuibles a la nieve que precipitó durante esa fase temprana del cultivo produciendo un retraso en el crecimiento y desarrollo del mismo.

Con los valores seleccionados de **Kc** se procedió a calcular el Balance Hídrico y contrastar el contenido hídrico del suelo medido y estimado (Figura N° 14).

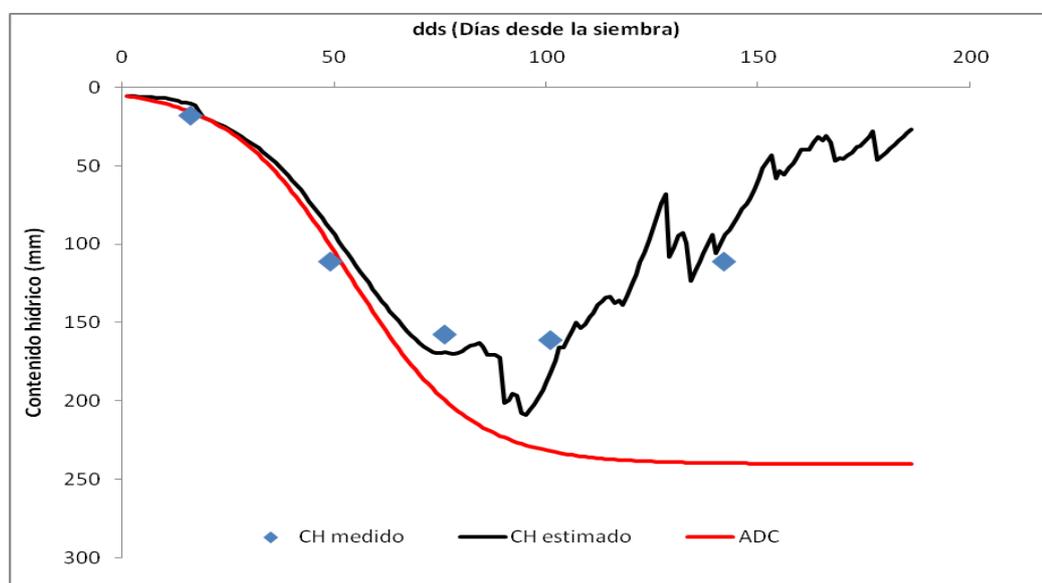


Figura N° 14. Contenido Hídrico estimado (CH estimado) y medido (CH medido) y agua disponible durante el ciclo del cultivo (ADS).

Para la situación de alta densidad, la cantidad de agua disponible estimada en la zona radical tiene un coeficiente de determinación (R^2) altamente significativo de 0,95 (Figura N° 15), obteniéndose un valor **p** de 0,004. En Anexo IV se presenta el análisis de regresión lineal del contenido hídrico en la zona radical para ambas densidades de siembra (Salidas del Infostat).

El valor de RMSE para densidad alta fue 16,03 mm y el de MAE de 15,19 mm. Este último valor, representa a un 13,6% de error respecto del promedio de los valores del contenido hídrico del suelo observados.

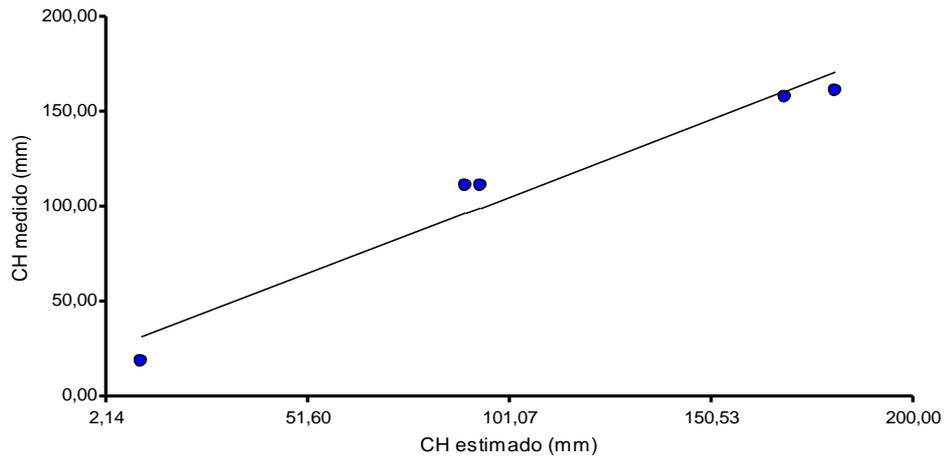


Figura N° 15. Análisis de regresión lineal del contenido hídrico en la zona radical (Densidad Alta).

Los resultados obtenidos durante la etapa de validación del modelo indicaron que los valores observados y simulados del contenido hídrico en la zona radical para la densidad baja ajustaron linealmente con una regresión del 77 % ($R^2 = 0,77$), también considerado significativo pero con menor ajuste que el caso anterior. En este caso el valor de p obtenido fue de 0,050 (Figura N° 16).

Para esta situación (Baja densidad), el RMSE alcanzo un valor de 34,67 mm y el MAE de 23,39 mm. Este último valor, representa a un 18,13% de error respecto del promedio de los valores del contenido hídrico del suelo observados.

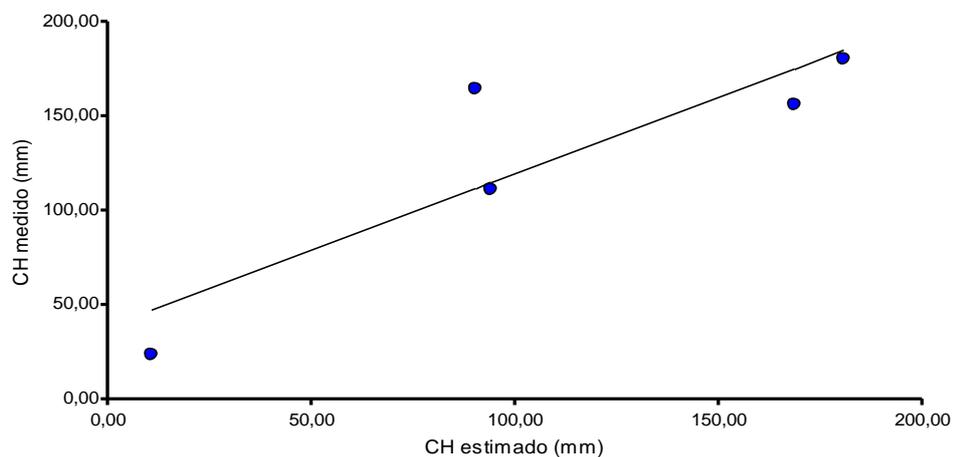


Figura N° 16. Análisis de regresión lineal del contenido hídrico en la zona radical (Densidad Baja).

El buen ajuste logrado en estas variables hace presuponer que la mayor parte de los componentes del balance hídrico son adecuados. No obstante se usó otro parámetro para analizar la bondad de ajuste del modelo en la producción de granos.

Eficiencia del Uso del Agua (EUA).

Al realizar un análisis de sensibilidad tomando como variable la **EUA**, para la calibración del modelo, se comprobó que una **EUA** de $12,2 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ de **ETc** es la que provee el mejor ajuste del modelo. Ese valor de **EUA** empleado para la estimación del rendimiento se encuentra dentro del rango de valores citados en la bibliografía (Ambrogio *et al.*, 2000; Caviglia y Sadras, 2001; Fraschina *et al.*, 2000; Pergolini *et al.*, 2001).

Con dicha **EUA** se obtuvo una diferencia de 4,12% entre la producción estimada (con estrés hídrico) ($3.515,89 \text{ kg.ha}^{-1}$) y la medida (3.667 kg.ha^{-1}) en el cultivo de trigo para el tratamiento de densidad alta. Para el caso de la densidad baja, con dicha **EUA** se obtuvo una diferencia del 1,41% entre la producción estimada (con estrés hídrico) ($3.515,89 \text{ kg.ha}^{-1}$) y la medida (3.467 kg.ha^{-1}).

Los resultados obtenidos en la calibración del modelo muestran que la capacidad predictiva del mismo fue satisfactoria para calcular el balance hídrico y estimar la producción en grano del cultivo de trigo en condiciones similares a la de esta experiencia.

Calibrado el modelo, se analizaron los componentes del Balance Hídrico Global.

Análisis de los resultados del modelo.

A partir de los datos arrojados por el modelo, previamente calibrado, se analizaron diferentes componentes del sistema clima-suelo-cultivo.

En primer lugar, dado que el modelo se basa en la relación transpiración - asimilación de carbono, se comienza analizando la evolución de la **ETc** (Evapotranspiración del cultivo sin estrés hídrico) y **ETc_{actual}** (Evapotranspiración del cultivo con estrés hídrico) estimada durante el ciclo del cultivo (Figura N° 17).

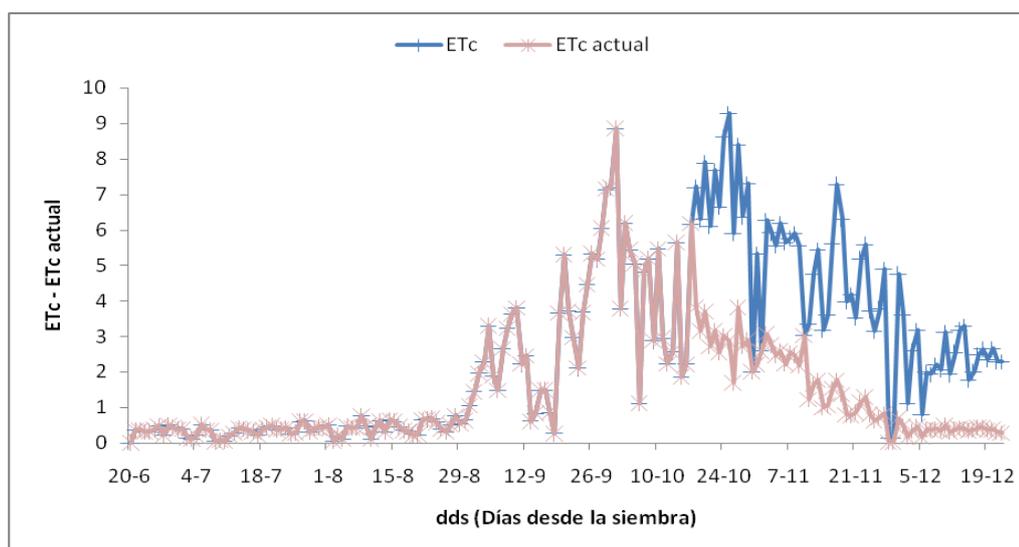


Figura N° 17. Evapotranspiración potencial del cultivo y evapotranspiración actual del cultivo durante el ciclo del mismo.

En ella se puede observar una disminución de la ETc_{actual} a partir del 17 de octubre (**Z4**, según Zadoks *et al.*, 1974) producto del estrés que se produjo a comienzo de esa etapa y que persistió hasta la madurez del cultivo.

Dicho estrés se puede corroborar con el bajo valor Ks (Coeficiente de estrés) que alcanzó durante ese período, promediando un valor de 0,3.

Esta diferencia entre la ETc y ETc_{actual} se puede observar en el cálculo de la cantidad de agua disponible para el cultivo (**ADC**), la cantidad de agua fácilmente disponible (**AFDC**) y la disminución de agua del suelo (**Dr**) durante el ciclo del cultivo (Figura N° 18).

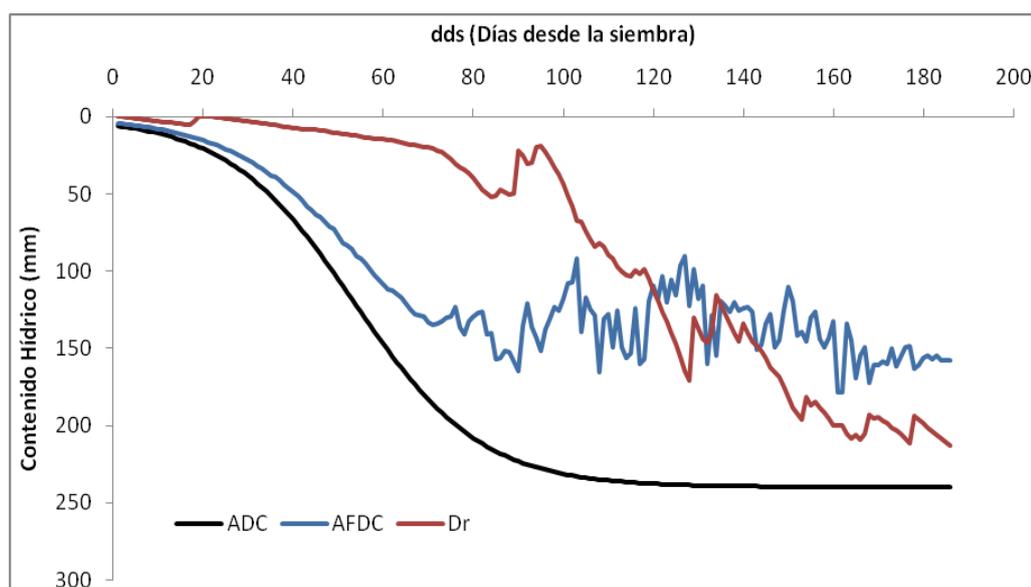


Figura N° 18. Cantidad de agua disponible para el cultivo (**ADC**), agua fácilmente disponible (**AFDC**) y disminución del agua en la zona radical (**Dr**) durante el ciclo del cultivo.

Los resultados provistos por el modelo muestran que el contenido de agua disponible (**ADC**) para la planta permaneció por encima del umbral de agua fácilmente disponible (**AFDC**) en todo el ciclo del cultivo. Es de observar que a partir del día 120, correspondiendo al 17 de octubre (**Z4**), el contenido hídrico del suelo (**Dr**) desciende por debajo de **AFDC**, teniendo un pico ascendente cerca del 27 de octubre (**Z5-Z6**) para disminuir otra vez a partir de esa fecha afectando la ETc_{actual} .

Andrade *et al.* (1996), citan que las limitaciones hídricas reducen la interceptación de la radiación solar por una menor expansión foliar ante la falta de la presión de turgencia en las hojas. En igual sentido, Abbate y Cantarero (2007) también describen que un estrés hídrico que reduzca el IAF durante el “período de expansión foliar” puede afectar el rendimiento al reducir la interceptación durante el PCE (Período de crecimiento de las espigas). El estrés hídrico durante el PCE puede reducir el PSE (Peso seco de las espigas), a

través de un menor crecimiento del cultivo, por pérdida del IAF debido a acartuchamiento y marchitamiento de hojas, y por disminución en la eficiencia de uso de la radiación.

A pesar que el número de granos (NG) es la variable que explica mejor el rendimiento en grano, el cambio en el peso de los mismos podría afectar el rendimiento final del cultivo. Durante la etapa de definición del peso del grano (entre floración y la madurez fisiológica) el ritmo de acumulación de biomasa guarda una estrecha relación con el peso final de los mismos (Miralles y Slafer, 2001).

En cuanto al Balance Hídrico Global, en la Tabla N° 9 se presentan los componentes acumulados mensuales simulados por el modelo.

Tabla N° 9. Precipitación, precipitación efectiva, ETP, ETc_{actual} y variación del almacenaje acumulados mensualmente.

	Precipitación (mm)	Precipitación efectiva (mm)	ETP (mm)	ETc_{actual} (mm)	Variación almacenaje (mm)
Junio	0	0	27,73	4,15	-3,9
Julio	32,8	30,30	69,29	10,39	-4,2
Agosto	0,6	0,6	96	15,54	-16,9
Septiembre	59,4	56,24	130,59	100,1	-42,4
Octubre	120,8	112,46	161,18	106,5	-54,1
Noviembre	43,4	43,4	199,79	43,73	-84,6
Diciembre	46,4	46,4	165,43	7,74	-6,7
Total	303,4	289,4	850,01	288,15	-212,9

Nota: los valores de Junio y Diciembre corresponden a la 3^{ra} y 1^{ra} década de cada mes respectivamente.

La precipitación efectiva durante el ciclo del cultivo fue del 95,38% de la precipitación total (303,4 mm). La evapotranspiración potencial calculada durante el ciclo del cultivo fue de 850 mm de los cuales el 33,9% fue evapotranspirada por el cultivo.

El Balance Hídrico del Suelo mostró un déficit de 212,9 mm en el agua almacenada al final del ciclo del cultivo.

En el cultivo del trigo, la estimación del rendimiento en granos (potencial) sin estrés hídrico, con el volumen de agua evapotranspirada (ETc) y empleando una eficiencia en el uso del agua (EUA) de $12,2 \text{ kg.granos.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1} ETc$ (Pergolini *et al.*, 2001) fue de 5.834 kg.ha^{-1} . Similares valores son mostrados por Magrín (2004), quien estimó rendimientos potenciales medios de aproximadamente 6.500 kg.ha^{-1} para este cultivo.

Cabe aclarar que dicha **EUA** tomada de la bibliografía, citada por Pergolini *et al.* (2001), fue empleada en los cálculos del rendimiento por ser un valor obtenido en condiciones experimentales similares a la de este ensayo experimental.

Por otra parte, el rendimiento en granos estimado con estrés hídrico (**ETC_{actual}**) fue de 3.515 kg.ha⁻¹, lo que resultaría un 39,75% (2319 kg.ha⁻¹) menor al rendimiento sin estrés hídrico.

En ensayos llevados a cabo en el campo experimental de la U.N.R.C., se han obtenido rendimientos de trigo de 3.314 kg.ha⁻¹ (Giraudó, 2005) y 3.007 kg.ha⁻¹ (Gariglio, 2006) bajo condiciones de riego y fertilización. En cambio, rendimientos de 415 kg.ha⁻¹ (Giraudó, 2005) y 390 kg.ha⁻¹ (Gariglio, 2006) fueron obtenidos en condiciones de secano y fertilización. En ambas experiencias las densidades de siembra empleadas fueron de 250 pl.m⁻².

En la Tabla N° 10 y N° 11 se presenta el rendimiento en granos estimado con estrés y sin estrés y el observado para las dos densidades de siembra. Se obtuvo una diferencia de sólo 200 kg.ha⁻¹ (5,45%) entre ambas densidades.

Tabla N° 10. Rendimiento en granos estimado con y sin estrés hídrico y rendimiento observado para la densidad alta.

	Producción estimada sin estrés hídrico	Producción estimada con estrés hídrico	Producción medida
Rendimiento (kg.ha⁻¹)	5.834	3.515	3.667

Tabla N° 11. Rendimiento en granos estimado con y sin estrés hídrico y rendimiento observado para la densidad baja.

	Producción estimada sin estrés hídrico	Producción estimada con estrés hídrico	Producción medida
Rendimiento (kg.ha⁻¹)	5.834	3.515	3.467

CONSIDERACIONES FINALES

- En el estudio de los sistemas agrícolas, es importante cuantificar la disponibilidad de los recursos productivos a fin de poder determinar cuál de ellos es el que limita la expresión del rendimiento potencial de los cultivos. En ambientes donde la agricultura de secano es la principal forma de producción, es relevante evaluar y comprender el funcionamiento de las variables ambientales y de manejo, especialmente el referido al balance de agua y su relación con la producción.
- El modelo de simulación utilizado, arrojó resultados aceptables en cuanto a la estimación del balance hídrico global y su relación con la producción de granos. No obstante deberían profundizarse las mediciones experimentales para ajustar con mayor precisión los parámetros **Kc** y la **EUA**.
- Los resultados de esta investigación permiten visualizar que existe una importante brecha entre el rendimiento potencial y el real en condiciones de déficit hídrico.
- Con respecto a las dos densidades de siembra estudiadas en este experimento (150 y 450 pl.m⁻²), no se observaron diferencias importantes en cuanto a la relación balance hídrico – rendimientos de granos del cultivo.

BIBLIOGRAFIA

- ABBATE, P.E.; ANDRADE, F.H. y J.P. CULOT. 1994. Determinación del rendimiento en trigo. Boletín técnico N° 133, EEA Balcarce.
- ABBATE, P.E. 1996. Ecofisiología del cultivo de trigo. Aspectos prácticos para el manejo del cultivo. INTA de Balcarce. Disponible en: www.aapresid.org.ar
- ABBATE, P.E.; ANDRADE, F.H.; LAZARO, L.; BARIFFI, J.H.; BERARDOCCO, H.J.; INZA, V.H. and F. MARTURANO. 1998. Grain yield increase in recent Argentine wheat cultivars. Crop Science, 1998; 38:1203-1209.
- ABBATE, P.E. 2005. Bases fisiológicas para el manejo del cultivo de trigo. Primera Jornada de trigo 2005 de la región centro. EEA INTA Balcarce. Buenos Aires. Argentina. Disponible en: www.bccba.com.ar/bcc/images/Trigo2005/Conf%206.pdf
Consultado: 12/02/09.
- ABBATE, P.E. y M.G. CANTARERO. 2007. Efecto del estrés hídrico en trigo. INTA EEA Balcarce, Buenos Aires. Agosto 2007. Facultad de Ciencias Agropecuarias, UNC. Disponible en: www.inta.gov.ar/balcarce/info/documentos/agric/cereales/trigo/sis/abbate4.htm
Consultado: 09/02/09.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D. and M. SMITH. 1998. **FAO56 Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. FAO, Rome, Italia.
- AMBROGIO, M.; LORENZATTI, S.; BIZET, H.; DON, H.; TANTUCCI, W.; GARCIA, F. y H. FONTANETTO. 2000. Trigo: Explorando deficiencias nutricionales en la región pampeana. Actas Jornada de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilidad 2000". INPOFOS Cono Sur, Argentina.
- ANDRADE, F.; CIRILO, A.; UHART, S. y M. OTEGUI. 1996. **Ecofisiología del cultivo de maíz**. 1° Ed. Editorial la Barrosa. Dekalb Press. CERBAS-EEA INTA Balcarce. FCA-UNMP. Cap. 3: 81-96.

- ANDRIANI, J.M. 1997. Uso del agua y riego. En: **El cultivo de soja en la Argentina**. Giorda, L. y Baigorri, H. ed. EEA Marcos Juárez - INTA.
- BAINOTTI, C.; FRASCHINA, J.; SALINES, J.; CUNIBERTI, M.; ALBERIONE, E.; RIVERI, L.; de GALICH, M.; FORMICA, M y A. GALICH. 2004. Evaluación de cultivares de trigo en la EEA Marcos Juárez durante el año 2003. En: Informe para Extensión 85, EEA Marcos Juárez, INTA, pp. 14-18.
- BORG, H. and D.W. GRIMES. 1986. Depth development of roots with time: An empirical description. Trans. ASAE 29: 194-197.
- BRICCHI, E.M. 1996. Relaciones entre la compactación, morfología y propiedades físicas de un Hapludol típico de Río Cuarto. Tesis M.Sc. Escuela de Graduados. UBA Buenos Aires: Argentina. 163 pp.
- BRUGNONI, L.F. 1981. El cultivo de trigo. Colección principales cultivos de la Argentina. INTA.
- CAVIGLIA, O.P. and V.O. SADRAS. 2001. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water and radiation use efficiency of wheat. Field Crops Res. 69:259-266.
- CANTERO, A.; CANTU, M.P.; CISNEROS, J.M.; CANTERO J, H.; DE PRADA, J.; DEGIOVANNI, S.; CHOLAKY, C.; VILLEGAS, M.; CABRERA, A. y C. ERIC. 1998. **Las tierras y aguas del Sur de Córdoba. Propuestas para un manejo sustentable**. UNRC. 119 pp.
- DARDANELLI, J.L.; COLLINO, D.; CANTARERO, M.G.; ABBATE, P.E. y M. DE LUCA. 2001. Efecto de la sequía sobre el consumo y la eficiencia en el uso del agua en variedades de trigo. En: Actas del V Congreso Nacional de Trigo y II Simposio Nacional de Cereales de siembra otoño invernal. Villa Carlos Paz, Córdoba - Septiembre de 2001.
- DARDANELLI, J.; COLLINO, D.; OTEGUI, M.E. y V.O. SADRAS. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de granos. En: Satorre EH, Benech Arnold R, Slafer GA eds **Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo**. FAUBA. Primera edición. Editorial Facultad de Agronomía. UBA. Buenos Aires. Argentina. Cap. 16: 375-442.

- DARWINKEL, A. 1978. Patterns of tillering and grain production of winter wheat at a wide range of plant densities. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 26: 383-398.
- DE FINA, A.L. y A.C. RAVELO. 1973. *Climatologías y Fenologías Agrícolas*. Eudeba 281 pp.
- DELLA MAGGIORA, A.I.; GARDIOL, J.M. y A.I. IRIGOYEN. 2000. Requerimientos hídricos. En: **Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja**. Andrade, F.E. y Sadras, V.O, editores. Editorial Médica Panamericana S.A.
- DIEZ, A. 2006. Propiedades hidráulicas de un Hapludol típico con tres sistemas de uso. Trabajo Final de Carrera para optar al grado de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina. 22 pp.
- DONALD, C.M. 1963. Competition among crop and pasture plants. *Advances in Agronomy*. 15: 1-118.
- DOORENBOS, J. y W.O. PRUITT. 1975. **Guidelines for predicting crop water requirements**. FAO. Irrigation and Drainage Paper 24, Roma, Italia.
- ETCHEVEHERE, P. 1976. **Normas de reconocimientos de suelos**. 2^{da} Ed. Actualizada. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Departamento de suelos. Buenos Aires. Argentina. 211 p.
- EVANS, L.T. 1983. *Fisiología de los cultivos*. Editorial Hemisferio Sur S. A. 402 p.
- FRASCHINA, J; BAINOTTI, C. y J. SALINES. 2003a. El cultivo de trigo y la siembra directa en la región Central Norte. Actualización 2003. En: www.elsitioagricola.com
Consultado: 23/08/08
- FRASCHINA, J; BAINOTTI, C. y J. SALINES. 2003b. Siembras tempranas e implantación de trigo en siembra directa. Grupo Mejoramiento de Trigo. Área Mejoramiento Genético Vegetal. EEA INTA Marcos Juárez. Mayo 2003. En: www.inta.gov.ar/mjuarez/info/documentos/Trigo/tardia03.htm consultado: 08/02/09

- FRASCHINA, J.; BAINOTTI, C.; SALINES, J. y B. FORMICA. 2000. Evaluación de variedades de trigo en siembra directa. Hoja Informativa N° 336 Jornada de Actualización en Trigo. EEA INTA Marcos Juárez.
- FRASCHINA, J.; BAINOTTI, C.; SALINES, J. y B. FORMICA. 2002. Daño por frío en trigo. Trigo Actualización 2002. Información para extensión N° 71. EEA INTA Marcos Juárez.
- GALLEZ, L.M.; MOCKEL, F.E.; CANTAMUTTO, M.A.; GULLACE, G.D. y A.R. VALLATI. 1986. Densidad de siembra y separación entre hileras: Su influencia sobre el rendimiento de trigo en la Región Pampeana semiárida. En: Asoc. de Ings. Agrs. del Norte de la Prov. de Buenos Aires (eds), Actas I Congreso Nacional de Trigo, Pergamino, Argentina. Vol 3:167-177.
- GARDNER, F.; BRENT, R. y R. MITCHELL. 1985. Physiology of crop plants. Iowa State University Press. Ames, IA. USA. First edition 327 p.
- GARIGLIO, G.L. 2006. Respuesta a la fertilización en el cultivar de trigo "Buck arriero" de ciclo largo bajo riego y seco. Trabajo final para optar al grado de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina. 19 pp.
- GATE, P. 1995. Ecophysiology of wheat. Lavoisier Tec and Doc, Paris
- GIRAUDO, J.A. 2005. Respuesta de un cultivar de trigo de ciclo largo al riego y a la fertilización. Trabajo final para optar al grado de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina. 20 pp.
- GIUBERGIA, J.; SALINAS, A.; MARTELLOTTI, E.; LINGUA, S. y E. LOVERA. 2007. Evaluación del efecto de dos estrategias de riego en trigo. En: Trigo 2007, Boletín de divulgación técnica N° 1. INTA - EEA Manfredi (ed), Córdoba, Argentina. Pp. 35-40.
- GORGAS, J.A. y J.L. TASSILE. 2003. **Los suelos. Recursos naturales de la provincia de Córdoba.** Agencia Córdoba Ambiente. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Córdoba, Argentina.

- HATFIELD, J.L.; SAUER, T.J. and J.H. PRUEGER. 2001 Managing soils to achieve greater water use efficiency. A Review. *Agronomy Journal* 93:271-280.
- HOLLIDAY, R. 1960. Plant population and crop yield. Part I (Resumen). *Field Crop Abstracts*. 15: 159-167.
- INFOSTAT. 2004. InfoStat, versión 2004. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba.
- JENNER, C. 1979. Grain filling in wheat plants shaded for brief periods after anthesis. *Australian Journal of Plant physiology*, 6: 629-641.
- LANGER, R.H. y G.D. HILL, 1987. **Plantas de interés Agrícola**. Editorial Acribia. Cap. I, 1-10.
- LEENHARDT, D.; VOLTZ, M. y S. RAMBAL. 1995. A survey of several agroclimatic soil water balance models with reference to their spatial application. *European Journal of Agronomy*, 4(1):1-14.
- LERNER, S.E y E.H. SATORRE. 1990. Aplicación de un diseño experimental sistemático al estudio de la respuesta a la densidad de cultivares de trigo. En: *Asoc. Ings. Agrs. del Norte de la provincia de Buenos Aires (eds), Actas II Congreso Nacional de Trigo*, Pergamino, Argentina. Vol. 1:44-50
- LOOMIS, R.S. 1983. Crop manipulations for efficient use of water. En: R.M. Taylor, W.R. Jordan, T.R. Sinclair (eds.). *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. ASA, CSSA, SSSA, Madison, Wisconsin. Pp. 345-374.
- MAGRIN, G. 2004. Rendimientos potenciales de trigo en las distintas zonas trigueras. Disponible en: <http://www.acopiadores.com/publico/atodotrigo/Rendimientos%20potenciales%20de%20trigo%20en%20las%20distintas%20zonas%20trigueras.pdf> Consultado: 12/12/08.

- MAGRIN, G. y M.I. TRAVASSO. 1997. Potencial de producción del cultivo de trigo en la Región Pampeana Argentina. Reunión de Planificación Estratégica de Trigo. Mar del Plata. Disponible en www.aapresid.org.ar
- MARELLI, H. 1983. Evaluación de la erosión hídrica en suelo saturado. Actas del X Congreso Argentino y VIII Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata.
- MARSHALL, G.C. and H.W. OHM. 1987. Yield response of 16 winter wheat cultivars to row spacing and seeding rate. *Agronomy Journal*, 79:1027-1030
- MICUCCI, F. y C. ÁLVAREZ. 2003. El agua en los cultivos extensivos III: Impacto de las prácticas de manejo sobre la eficiencia de uso del agua. *Archivo agronómico* N° 8. *Informaciones Agronómicas* N° 20. INPOFOS Cono Sur, Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- MICUCCI, F.; TABIADA, M. y R. GIL. 2003. El agua en los cultivos extensivos II: Consumo y eficiencia de uso del agua de los cultivos. *Archivo agronómico* N° 7. *Informaciones Agronómicas* N° 17. INPOFOS Cono Sur, Argentina.
- MILLS, H.A. y J.B. JONES. 1996. **Plant analysis Handbook II**. MicroMacro Publishing, Georgia, USA.
- MIRALLES D. Y G. SLAFER. 2001. Desarrollo, crecimiento y determinación de los componentes del rendimiento. Trigo: Cuaderno de actualización técnica N° 63. CREA. Pág. 10-17. Marzo del 2001.
- MUSICK, J.T. 1994. Water-yield relationships for irrigated and dry land wheat in the U.S. Southern Plains. *Agronomy Journal*, 86 (6): 980-986.
- OVANDO, G.; DE LA CASA, A. y A. RODRÍGUEZ. 2000. Variabilidad temporal de la precipitación media anual en la provincia de Córdoba, Argentina, evaluada por medios geostadísticos. Actas de la VIII Reunión Argentina de Agrometeorología. 6 al 9 de Septiembre de 2000, Facultad de Ciencias Agrarias, UN Cuyo, Mendoza.
- PASCALE, A.J. y E.A. DAMARIO. 1961. **Agroclimatología del cultivo de trigo en la República Argentina**. Revista de la Facultad de Agronomía y Veterinaria, Buenos Aires, 15 (1), 3-119.

- PEPPER, 1998. **Soybeans (Chapter 3)**. En *Agronomy Handbook*, Illinois. 1997-1998. University of Illinois at Urbana-Champaign. College of Agricultural, Consumer and Environmental Sciences Department of Crop Sciences. Cooperative Extension Service. Circular 1344. Pp. 26-35.
- PERGOLINI, S.; CASTILLO, C. y G. ESPÓSITO. 2001. Efecto de la Fertilización sobre el Consumo y la Eficiencia de Uso del Agua del Cultivo de Trigo. Facultad de Agronomía y Veterinaria de la UNRC. En: [http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/fbb6f7765d31ad3403256eb3005846ba/\\$FILE/Fertilizaci%C3%B3n-Consumo%20y%20EUA-Trigo.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/fbb6f7765d31ad3403256eb3005846ba/$FILE/Fertilizaci%C3%B3n-Consumo%20y%20EUA-Trigo.pdf) Consultado 12/08/2008.
- PUCKRIDGE, D.W. y C.M. DONALD. 1967. Competition among wheat plants sown at a wide range of densities. *Aust. Agronomy Journal*, 18:193-211.
- SAGPyA. 2002. Resultados definitivos del Censo Nacional Agropecuario 2002. Parte II. En: www.sagpya.gov.ar Consultado: 15/12/2007.
- SAGPyA. 2006. Agricultura – Cultivos - Granos – Trigo – Producción 2006. En: www.sagpya.mecon.gov.ar Consultado: 04/06/2008.
- SAGPyA. 2007a. Agricultura - Estimaciones agrícolas - Informe por cultivos - Cereales - Trigo - Cierre última campaña. En: www.sagpya.mecon.gov.ar Consultado: 06/06/2008.
- SAGPyA. 2007b. Estimaciones agrícola - Base de datos – Estimaciones agrícolas – Cereales – Córdoba, Trigo, campaña 2007/08. En: www.sagpya.mecon.gov.ar Consultado: 23/11/2008.
- SAGyA 2007. Información estadística y técnica. Campaña 2005/06. Secretaria de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Córdoba. En: www.cba.gov.ar/vercanal.jsp?idCanal=2067 Consultado 10/09/2007
- SANTA OLALLA MAÑAS, F.M. de; LÓPEZ FUSTER, P. y A. CALERA BELMONTE. 2005. **Agua y agronomía**. 1^{ra} Edición. Universidad de Castilla – La Mancha. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. España. Pág. 163-238.

- SATORRE, E. H., R. L. BENECH ARNOLD, G. A. SLAFER, E. B. DE LA FUENTE, D. J. MIRALLES, M. E. OTEGUI y R. SAVIN. 2003. **Producción de granos: bases funcionales para su manejo**. Primera edición. Editorial Facultad de Agronomía de Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina
- SATORRE, E.H. y B. KRUK. 2004. **Densidad y arreglo espacial del cultivo**. En: Producción de Granos. Facultad de agronomía. Universidad de Buenos Aires. Pág. 279 – 310.
- Segunda Jornada de Trigo de la Región Centro. 2007. En: <http://www.trigo2007.com.ar/contexto.php> Consultado: 20/07/2008.
- SEILER, R.A. y M. VINO CUR, 2008. Cambio climático y variabilidad climática: Un estudio regional de la variabilidad de las heladas en la provincia de Córdoba. XII Reunión Argentina de Agrometeorología, 8 al 10 de Octubre de 2008, San Salvador de Jujuy, Argentina. Actas de la Reunión, 69-70. ISBN – X
- SHROYER, P.J.; MIKESELL, E.M. y M.G. PAULSEN. 1995. Freeze Injury to Kansas Wheat. Agr. Exp. Station and Coop. Extension Service. KSU, Manhattan.
- TANNER, C.B. and T.R. SINCLAIR. 1983. Efficient water use in crop production: research or research? En Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R.(eds) Limitations to efficient water use in crop production. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin. Pp. 1-27.
- TOMPKINS, D.K.; HULTGREEN, G.E.; WRIGHT, A.T. y D.B. FOWLER. 1991. Seed rate and row spacing of no-till winter wheat. Agronomy Journal, 83:684–689
- TOTIS DE ZELJKOVICH, L.; ZELJKOVICH, V.; COCA, M.G.; BLOTTA, L.A.; FUNSTON, L. y A. RIVOLTELLA. 1991. Balance de agua del doble cultivo trigo-soja y su relación con la productividad en la región de Pergamino. Informe técnico N°257. EEA INTA Pergamino.
- USDA, SCS, 1972. **National Engineering Handbook, Hydrology, Section 4**. United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service (Chapters 4–10).

- VIDELA MENEGUE, H.R. 2006. Producción de soja en suelos con capa freática somera en el depto. Roque Sáenz Peña (Córdoba). Trabajo final para optar al grado de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto. Río Cuarto. Argentina. 73 pp.
- VILLAR, J. 2000. **Dinámica del consumo de agua por el trigo según el sistema de labranza**. En: Información técnica de trigo. Campaña 2000. Publ. Misc. N°92. INTA EEA Rafaela (ed). 5 pp.
- VILLAR, J. 2001. **Dinámica del consumo de agua de trigo en siembra directa**. En INTA EEA INTA Rafaela (ed). Anuario 2001. pp. 136-138.
- WAGGER, M.; VERPRASKAS, M. and H. DENTON. 1992. Corn grain yield and nitrogen utilization in relation to subsoiling and nitrogen rate on Paleudults. *Agronomy Journal*, 84:888-892.
- WILSON, J.A. and A.F. SWANSON. 1962. Effect of plant spacing on the development of winter wheat. *Agronomy Journal*, 54:327-328.
- WILLMOTT, C. J. 1982. Some comments on the evaluation model performance. *Bulletin American Meteorological Society*. 63 (11): 1309-1313.
- ZADOKS, J.C.; CHANG, T.T. and C.F. KONZAK. 1974. A decimal code for the growth stage of cereal. *Weed Research*, 14: 415-421.

ANEXO I

MODELO DE ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DEL CULTIVO EN BASE A LOS REQUERIMIENTOS HÍDRICOS.

Base matemática del modelo de simulación.

El modelo de simulación de producción de granos estima el rendimiento del cultivo sobre la base de la relación existente entre la transpiración y la asimilación de carbono cimentado en el cálculo de balance hídrico. En este sentido, los componentes del balance hídrico considerados son: lluvia, escurrimiento superficial saliente, percolación, cambios en el contenido de humedad del suelo y evapotranspiración.

La evapotranspiración potencial (**ETP**) es calculada por el método de FAO – Penman – Monteith (Allen *et al.*, 1998). Ésta realiza una estimación de la **ETP** diaria con la siguiente ecuación:

$$ETP = \frac{0,408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \lambda (1 + 0,34 u_2)} \quad (1)$$

Dónde **R_n** es la radiación neta en la superficie del cultivo (MJ.m⁻².día), **G** es la densidad de flujo de calor del suelo (MJ.m⁻².día), **T** es la temperatura media diaria del aire (°C), **u₂** es la velocidad del viento (m.s⁻¹), **e_s** es la presión de vapor a saturación (kPa), **e_a** es la presión de vapor actual (kPa), **e_s - e_a** es el déficit de presión de vapor a saturación (kPa), **Δ** es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa.°C), y **γ** es la constante psicrométrica (kPa.°C).

La evapotranspiración del cultivo (**ETc**) es estimada siguiendo el modelo propuesto por Doorenbos y Pruitt (1975). El modelo relaciona la **ETP** con la **ETc** a través del coeficiente del cultivo (**Kc**), mediante la siguiente ecuación:

$$ETc = ETP \times Kc \quad (2)$$

Estimada la **ETc**, el modelo corrobora que el agua retenida en el suelo sea suficiente para abastecer el requerimiento del cultivo. Para ello, se realiza un balance hídrico diario, expresado en términos de disminución de agua del suelo al final de cada día, que toma la forma:

$$Dr_i = Dr_{i-1} - (P - Esc) + ETc_i + DP_i \quad (3)$$

Dónde **Dr** es la disminución de agua de la zona radical (mm), **P** es la precipitación (mm), **Esc** es el escurrimiento superficial (mm) estimado según la Curva Número (USDA, SCS, 1972), y **DP** es la pérdida de agua de la zona radical por percolación profunda (mm) e **i** hace referencia al día.

El método asume que el agua puede ser almacenada en la zona radical hasta alcanzar capacidad de campo. En caso de superarse ese límite, se acepta que la cantidad total de agua por encima de capacidad de campo se pierde en el mismo día por percolación profunda y por evapotranspiración.

En la ausencia de algún evento lluvioso, el contenido hídrico disminuirá constantemente hasta alcanzar un mínimo valor, el punto de marchitez permanente.

Al iniciarse el balance hídrico, la disminución de agua inicial (**Dr_{i-1}**) es estimada por:

$$Dr_{i-1} = 1000 \times (\theta_{cc} - \theta_{i-1}) Z_r \quad (4)$$

Dónde **θ_{cc}** es el contenido hídrico a capacidad de campo, **θ_{i-1}** es el promedio del contenido hídrico del suelo en la zona radical y **Z_r** es la profundidad de las raíces (m).

Al producirse una lluvia en donde el contenido hídrico del suelo supere capacidad de campo, la percolación profunda se calcula mediante:

$$DP_i = (P_i - Esc_i) - ET_{c,i} - Dr_{i-1} \geq 0 \quad (5)$$

Generalmente, el contenido hídrico del suelo es menor que capacidad de campo por lo que **Dr_i** > 0, el suelo no drenará y **DP_i** será cero.

Cuando el agua del suelo es extraída por evapotranspiración, la depresión se incrementa y el estrés puede ser inducido por **Dr** hasta hacerse igual a un valor umbral.

El estrés hídrico es cuantificado mediante un coeficiente (**K_s**) que toma la forma:

$$K_s = \frac{ADC - Dr}{ADC - AFDC} = \frac{ADC - Dr}{(1 - p) \times ADC} \quad (6)$$

Dónde **ADC** es la cantidad de agua disponible en el suelo para el cultivo (mm), **AFDC** es la cantidad de agua fácilmente disponible para el cultivo, y **p** es una fracción de **ADC** que el cultivo puede extraer de la zona radical sin sufrir estrés hídrico.

Para las condiciones con limitación de agua del suelo, el **K_s** es menor a 1 y donde no hay estrés hídrico, el **K_s** es igual 1.

El **ADC** en la zona de la raíz es la diferencia entre el volumen de agua a capacidad de campo (θ_{cc}) y el punto de marchitez (θ_{PMP}) afectado por la profundidad de enraizamiento (**Zr**).

$$ADC = 1000 \times (\theta_{cc} - \theta_{PMP}) Z_r \quad (7)$$

La **AFDC** se fundamenta en que si el contenido hídrico del suelo se encuentra por debajo de un valor umbral, el agua no se transporta lo suficientemente rápido hacia las raíces para responder a la demanda transpiratoria y el cultivo empieza a experimentar estrés.

Es decir, después que la **Dr** excede la **AFDC**, la **Dr** es lo suficientemente alta como para limitar la evapotranspiración a valores menores que los potenciales y la **ETc** decrece en proporción a la cantidad de agua remanente en la zona radical.

El factor **p** difiere de un cultivo a otro y se encuentra tabulado para un gran número de cultivos. Normalmente varía entre 0,3 para las plantas de raíces poco profundas en condiciones ambientales de altas tasas de **ETc** (> 8 mm/día) a 0,7 para las plantas de enraizamiento profundo en condiciones ambientales de bajas tasas de **ETc** (< 3 mm/día). Un valor de 0,50 para **p** es utilizado comúnmente para una gran variedad de cultivos.

Una aproximación numérica para **p** ponderado por la **ETc** se presenta en la Ecuación 8:

$$p_{ajustado} = p_{tabulado} + 0,04 \times (5 - ETP) \quad (8)$$

Por otra parte, dado que un cierto potencial matriz del suelo, en presencia de diferentes tipos de suelo, se corresponde con distintos contenidos hídricos, el valor **p** también es una función del tipo de suelo.

La profundidad del sistema radical es cuantificada por el modelo de crecimiento de raíz propuesto por Borg y Grimes (1986), que se expresa como:

$$D^* = \frac{1}{[1 + 44,2 \exp(-8,5 t^*)]} \quad (9)$$

dónde **D*** es la profundidad relativa de la raíz (fracción de la profundidad máxima de enraizamiento) y **t*** es el tiempo relativo (fracción del tiempo fisiológico máximo de crecimiento de las raíces). El crecimiento del sistema radical es dependiente de las condiciones hídricas del suelo.

Los efectos del estrés hídrico son acusados multiplicando el **Kc** por el **Ks** en la Ecuación dando como resultado la **ETc_{actual}**:

$$ETc_{\text{actual}} = (K_s \times K_c) \times ETP \quad (10)$$

Una vez establecida la ETc_{actual} , la producción de biomasa aérea es estimada diariamente por el producto de la ETc_{actual} y la eficiencia de uso de agua (EUA), siendo el rendimiento en grano $-R$ ($kg \cdot ha^{-1}$)- igual a la sumatoria de la producción de biomasa durante el período de crecimiento del cultivo multiplicada por el índice de cosecha (IC).

$$R = IC \times \sum ETc_{\text{actual}} \times EUA \quad (11)$$

La eficiencia de uso del agua (EUA) representa el rendimiento de grano por unidad de agua usada por el cultivo. Se utilizará para su obtención, lo sugerido por Tanner y Sinclair (1983) (Citado en: Hatfield et al., 2001):

$$EUA = Y / ETc \quad (12)$$

Donde: **EUA**: Eficiencia de uso del agua ($kg \cdot m^{-3}$)

Y: Rendimiento de grano del cultivo ($kg \cdot m^{-2}$)

ETc: Evapotranspiración del cultivo (mm)

Funcionamiento del modelo.

El modelo opera en forma diaria sobre una base matemática de origen empírico integrando variables climáticas, de cultivo y suelo. Los datos de entrada necesarios para iniciar el modelo son:

- Del clima: precipitación, temperatura máxima y mínima, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento para el cálculo de la **ETP**.

- Del cultivo: el coeficiente de cultivo (**Kc**) el cual se compone de tres valores, un coeficiente de cultivo inicial (**Kc_{ini}**), uno medio (**Kc_{med}**) y uno final (**Kc_{fin}**) que ocupan un 25, 55 y 20% del ciclo ontogénico, respectivamente. Para trigo, Allen *et al.* (1998) han recomendado los siguientes valores de **Kc**: 0,3; 1,15 y 0,25-0,45 para **Kc_{ini}**, **Kc_{med}** y **Kc_{fin}** respectivamente. Además, se debe ingresar el valor de la máxima profundidad de raíz, **EUA** y **p** (capacidad de extracción de agua por el cultivo).

Para esta situación, los valores de la máxima profundidad de raíz y del factor **p** fueron de 2 m y 0,55 respectivamente (Santa Olalla Mañas, *et al.*, 2005).

- Del suelo: contenido hídrico inicial, conductividad hidráulica saturada, contenido hídrico a capacidad de campo y punto de marchitez y densidad aparente. El valor de conductividad hidráulica saturada (**Ks**) empleado para este ensayo experimental fue de 3,51 (Diez, 2006).

Para la estimación del volumen escurrido (escurrimiento), uno de los métodos más utilizados en una determinada condición de suelo-cultivo es el propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS-EEUU) denominado Método de la Curva Numero o CN (USDA, 1972). Para este caso, se trabajó con un valor CN de 67 que corresponde al Grupo Hidrológico A, condición de cobertura de cultivo anual en hileras rectas y una condición de infiltración buena, sin limitaciones severas.

Operativamente y diariamente, el modelo calcula en primer lugar la **ETP** la cual es afectada por el coeficiente de cultivo (**Kc**) para estimar la **ETc**. A continuación, comprueba la capacidad del cultivo para evapotranspirar el volumen de agua calculado anteriormente. Para ello cuantifica la cantidad de agua disponible en el suelo en la zona explorada por las raíces (Ecuación 3). Si el contenido hídrico se mantiene por encima de un valor umbral (**AFDC**) la **ETc** no se ve afectada. De lo contrario la **ETc** se corrige (Ecuación 10) por medio del **Ks** calculado en la Ecuación 6 dando como resultado la **ETc_{actual}**. Luego, se estima la producción de biomasa y, al final del ciclo de crecimiento, el rendimiento en grano según la Ecuación 11.

Las salidas del modelo son:

- Del Clima: **ETP**.
- Del cultivo: **ETc** y **ETc_{actual}**, producción de biomasa , rendimiento potencial y real, y profundidad de enraizado.
- Del suelo: precipitación efectiva, drenaje, escurrimiento, contenido hídrico diario y volumen de agua disponible para el cultivo.

Evaluación de la Bondad de Ajuste del Modelo.

Los modelos de crecimiento de cultivo son representaciones simplificadas de la realidad basados en la simulación de procesos elementales. La comparación entre los resultados del modelo y los observados a campo es una actividad importante para probar la precisión y establecer un punto de referencia para futuras mejoras en el modelo.

Al analizar el ajuste de un modelo se podría proceder a la inspección gráfica de sus resultados, comparados con los observados, o calcular los errores que comete el modelo.

La mayor o menor bondad de ajuste dependerá de que las desviaciones de los valores observados con respecto a los que se obtienen mediante el modelo sean pequeñas o grandes.

Si esas desviaciones son pequeñas la bondad será alta. Por el contrario, si las desviaciones son grandes la bondad será pequeña.

Existen varios indicadores para medir la bondad de ajuste del modelo (coeficiente de determinación, la desviación media cuadrática, la variancia residual, el coeficiente de correlación lineal, el error estándar de ajuste, etc.), pero en este caso se emplearon el análisis del coeficiente de determinación (R^2), la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) y el error medio absoluto (MAE) (Willmott, 1982), para analizar los datos del contenido hídrico disponible en la zona radical.

La raíz cuadrada del cuadrado medio del error se define como la raíz cuadrada de la media cuadrática de las desviaciones de los valores observados (y) respecto a los valores estimados (x) (Willmott, 1982). Esta raíz de media cuadrática quedaría como:

$$RMSE = [1/n \times \sum_{i=1}^n (x - y)^2]^{0,5} \quad (13)$$

El error medio cuadrático nos da la medida de las diferencias en promedio entre los valores pronosticados y los observados. Otro estadístico que nos describe una información similar es el error absoluto medio (MAE) definido como (Willmott, 1982):

$$MAE = 1/n \times \sum_{i=1}^n |x - y| \quad (14)$$

Debe tenerse presente que MAE es menos sensible a los extremos que el RMSE, otro índice de uso frecuente, y además, es de interpretación más intuitiva.

Al mismo tiempo se calibraron varios parámetros que influyen en el modelo de simulación. Estas variables fueron: **Kc** y **Zr**.

También se realizó un análisis de sensibilidad de la variable **EUA** para determinar el rendimiento estimado por el modelo y ajustarlo lo más próximo posible a los resultados obtenidos a campo (rendimientos medidos).

ANEXO II

FOTOGRAFÍAS DEL ESTADO DEL CULTIVO EN LAS DISTINTAS ETAPAS FENOLOGICAS



Fotografía N° 1



Fotografía N° 2

Fotografía N° 1 y N° 2. Siembra del cultivo (Fecha: 20/06/2007)



Fotografía N° 3



Fotografía N° 4



Fotografía N° 5

Fotografía N° 3, N° 4 y N° 5. Estado del cultivo en Z11 (Fecha: 30/07/2007)



Fotografía N° 6



Fotografía N°7



Fotografía N° 8



Fotografía N° 9

Fotografía N° 6, N° 7, N° 8 y N° 9. Estado del cultivo en Z22 (Fecha: 28/08/2007)



Fotografía N°10



Fotografía N°11.

Fotografía N°10 y N° 11. Estado del cultivo en Z22 (Fecha: 11/09/2007)



Fotografía N° 12



Fotografía N° 13

Fotografía N° 12 y N° 13. Estado del cultivo en Z32 (Fecha: 26/09/2007)



Fotografía N° 14



Fotografía N° 15

Fotografía N° 14 y N° 15. Estado del cultivo en Z33 (Fecha: 10/10/2007)



Fotografía N° 16



Fotografía N° 17



Fotografía N° 18



Fotografía N° 19

Fotografía N° 16, N° 17, N° 18 y N° 19. Estado del cultivo en Z39 (Fecha: 19/10/2007)



Fotografía N° 20



Fotografía N° 21



Fotografía N° 22

Fotografía N° 20, N° 21 y N° 22. Estado del cultivo en Z7. (Fecha: 7/11/2007)

ANEXO III

VALORES DE COEFICIENTE DE VARIACION (CV), DESVIO ESTADAR (S) Y MEDIA (X) OBTENIDOS AL ANALIZAR LAS DISTINTAS MUESTRAS DEL CONTENIDO HIDRICO DEL SUELO

Profundidad (cm)	Estadio Densidad (pl.m ²)	Emergencia			Dos hojas			Macollaje		
		X	S	CV (%)	X	S	CV (%)	X	S	CV (%)
0-20	150	0,183	0,017	10,7	0,229	0,011	21,6	0,118	0,022	5,5
	450	0,183	0,017	10,7	0,218	0,043	5,1	0,146	0,013	11,7
20-40	150	0,160	0,013	12,3	0,183	0,003	60,9	0,166	0,005	35,2
	450	0,160	0,013	12,3	0,174	0,012	14,7	0,160	0,014	11,4
40-60	150	0,154	0,013	12,3	0,168	0,005	33,0	0,169	0,014	15,6
	450	0,154	0,013	12,3	0,169	0,003	51,2	0,162	0,013	12,1
60-80	150	0,144	0,010	14,4	0,171	0,018	9,4	0,167	0,004	41,9
	450	0,144	0,010	14,4	0,167	0,005	33,4	0,161	0,003	59,8
80-100	150	0,144	0,012	12,4	0,166	0,009	17,9	0,164	0,004	43,1
	450	0,144	0,012	12,4	0,172	0,007	23,5	0,160	0,003	55,2

Profundidad (cm)	Estadio Densidad (pl.m ²)	Encañazón			Grano lechoso		
		X	S	CV (%)	X	S	CV (%)
0-20	150	0,243	0,014	17,1	0,173	0,031	5,6
	450	0,228	0,017	13,4	0,172	0,016	10,7
20-40	150	0,207	0,018	11,7	0,123	0,029	4,2
	450	0,167	0,005	30,9	0,135	0,022	6,2
40-60	150	0,151	0,007	22,6	0,090	0,005	18,3
	450	0,139	0,013	10,4	0,093	0,009	10,0
60-80	150	0,148	0,004	42,4	0,085	0,007	12,2
	450	0,135	0,009	15,9	0,083	0,006	13,2
80-100	150	0,151	0,006	25,2	0,087	0,005	18,8
	450	0,140	0,014	9,8	0,081	0,004	22,4

Nota: CV (coeficiente de variación), X (media), S (desvió estándar).

n = 4 en cada una de las mediciones.

ANEXO IV

CALIBRACION DEL MODELO DE SIMULACION: ANALISIS DE REGRESION LINEAL DEL CONTENIDO HIDRICO EN LA ZONA RADICAL (SALIDAS DEL INFOSTAT)

1. Densidad Alta:

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj
CH medido	5	0,95	0,94

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	EE	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows
const	22,59	13,04	- 18,89	64,08	1,73	0,1815	
CH estimado	0,82	0,10	0,49	1,15	7,85	0,0043	47,48

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	12682,34	1	12682,34	61,63	0,0043
CH estimado	12682,34	1	12682,34	61,63	0,0043
Error	617,31	3	205,77		
Total	13299,65	4			

2. Densidad Baja:

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj
CH medido	5	0,77	0,69

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	EE	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows
const	39,25	31,74	-61,77	140,26	1,24	0,3043	
CH estimado	0,80	0,25	-3,1E-03	1,61	3,17	0,0505	8,79

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	12261,09	1	12261,09	10,05	0,0505
CH estimado	12261,09	1	12261,09	10,05	0,0505
Error	3659,98	3	1219,99		
Total	15921,07	4			