

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO

FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

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

Efecto del contenido hídrico del suelo sobre el rendimiento de un cultivo
de maíz

Nombre del Alumno: Emiliano PERETTI

DNI: 30.090.360

Director: Ing. Agr. M.Sc. Marta Graciela VINO CUR

Río Cuarto – Córdoba

Agosto de 2007

ÍNDICE DE TEXTO

INTRODUCCIÓN

Origen, evolución y características del maíz	1
Producción	1
Sustentabilidad y ecofisiología	3
Modelos de simulación de cultivos	6
Hipótesis y objetivo	7

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del clima de la región	8
Análisis de los valores térmicos y precipitaciones correspondientes a la campaña 2005/06	9
Caracterización del suelo del ensayo	11
Ensayos de campo	14
Modelo de cultivo	19
Cálculo del balance de agua en el modelo de cultivo	21
Variabilidad climática – variación en el contenido hídrico del suelo	22

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Simulación del balance de agua del suelo realizada por el modelo	24
Influencia de variaciones en el contenido hídrico del suelo sobre el rendimiento y sus componentes	26

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1. Principales países productores de maíz	2
Tabla N° 2. Evolución del rendimiento y producción mundial de maíz. 1996/97 – 2005/06	2
Tabla N° 3. Área sembrada y toneladas producidas de maíz a nivel nacional	3
Tabla N° 4. Área sembrada con maíz a nivel nacional. Campaña 2005/06	4
Tabla N° 5. Propiedades físicas del suelo	12
Tabla N° 6. Propiedades químicas del suelo	13
Tabla N° 7. Valoración de la fertilidad y pH de las distintas muestras de suelo	14
Tabla N° 8. Fenología del cultivo de maíz	16
Tabla N° 9. Fechas y láminas de riego	19
Tabla N° 10. Comportamiento del modelo para cada uno de los horizontes en los ensayos sin riego de ambas fechas de siembra	24
Tabla N° 11. Comportamiento del modelo para cada uno de los horizontes en los ensayos con riego de ambas fechas de siembra	25
Tabla N° 12. Comportamiento del modelo para los primeros 100 cm del perfil del suelo en los ensayos con y sin riego de ambas fechas de siembra	26
Tabla N° 13. Resultados de la simulación para una serie de 23 campañas con 3 tratamientos	27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. Valores medios normales de precipitación y temperatura para el período 1974 – 1993	9
Figura N° 2. Desvío de las precipitaciones durante la campaña 2005/06 con respecto a los valores normales (Serie 1974/93)	9
Figura N° 3. Desvío de las temperaturas máximas durante la campaña 2005/06 con respecto a los valores normales (Serie 1974/93)	10
Figura N° 4. Desvío de las temperaturas mínimas durante la campaña 2005/06 con respecto a los valores normales (Serie 1974/93)	10
Figura N° 5. Desvíos de las temperaturas medias durante la campaña 2005/06 con respecto a los valores normales (Serie 1974/93)	11
Figura N° 6. Esquema de la parcela en la que se realizó el ensayo	15
Figura N° 7. Equipo de riego del Campo Experimental de la UNRC	18
Figura N° 8. Variación de SWDF 2 a lo largo del período crítico de T2 y T3 durante la campaña 1974/75	30
Figura N° 9. Variación de SWDF 2 a lo largo del período crítico de T2 y T3 durante la campaña 1990/91	31

RESUMEN

“Efecto del contenido hídrico del suelo sobre el rendimiento de un cultivo de maíz”

En este trabajo se determinó el efecto sobre el rendimiento del maíz, de distintos niveles de contenido hídrico del suelo durante el período crítico del cultivo, utilizando el modelo CERES V3.5. Este modelo simula el crecimiento y desarrollo, el balance de carbono y de nitrógeno del cultivo y el balance de agua y nitrógeno del suelo. Para la calibración y validación del mismo, se realizaron ensayos en el Campo Experimental de la UNRC durante la campaña 2005/06, con un híbrido Nidera AX 884, sembrado en dos fechas (septiembre 22 y noviembre 2) y en condiciones de riego y de secano. El comportamiento del modelo fue evaluado mediante el Error Medio Absoluto (EMA), la Raíz del Cuadrado Medio del Error (RCME) y la diferencia entre los valores de las variables observadas y simuladas (Dif). Utilizando el modelo ajustado, se simularon los comportamientos del cultivo ante diferentes déficit hídricos empleando una serie de datos meteorológicos diarios de 25 años (1974-1998) para Río Cuarto. Mediante la opción SEASONAL del modelo, se realizaron tres simulaciones: con riego (T1), en secano (T2) y en secano menos el 20% de la precipitación registrada durante el período crítico (T3). Los resultados se analizaron estadísticamente mediante la prueba *t* de Student, la cual estimó que para el rendimiento y sus componentes, las medias fueron significativamente diferentes sólo al comparar T1 vs. T2. Diferencias observadas entre tratamientos en la fecha de R6 pueden atribuirse a un estrés hídrico severo en momentos iniciales del período de llenado de granos. La disminución en el rendimiento y sus componentes en el cultivo de secano, podría deberse a menores eficiencias de interceptación y de uso de la radiación en esta situación. La disminución del 20 % en la precipitación ocurrida durante el período crítico, no provocó variaciones notables en el coeficiente de estrés hídrico, por lo que las diferencias en el rendimiento entre T2 y T3 no fueron significativas.

Palabras claves: maíz, rendimiento, período crítico, déficit hídrico, modelos de simulación de cultivos.

SUMMARY

“Effect of the soil water content on the yield of a maize crop”

In this work, the effect of different levels of soil water content during the critical period of the maize crop on its yield was determined using the CERES V3.5 crop simulation model. This model simulates crop growth and development, crop carbon and nitrogen balance and soil water and nitrogen balance on a daily basis. Data from experimental trials carried out in the Experimental Field of the Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina during the 2005/06 cropping season were used to calibrate and validate the model. Nidera AX 884 maize hybrid was sown on two dates (September 22 and November 2) under rainfed and irrigated conditions. The behavior of the model was evaluated by calculating the Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE) and the difference between the observed and simulated values of the variables (Dif). Using the adjusted model, daily meteorological data of 25 years (1974-1998) for Río Cuarto and the SEASONAL option of the model, the effect of different water stresses on the maize crop was simulated. Three treatments were simulated: Irrigated (T1), Rainfed (T2) and Rainfed with a diminution of 20% in the observed rainfall during the critical period of the crop (T3). Results were statistically analyzed by the *t* of Student Test which determined that mean values of the yield and its components were significantly different only for T1 vs. T2. Differences observed among treatments in the date of R6 can be attributed to a severe water stress that happened at the beginning of the grain filling stage. Decreases in the yield and in its components in T2 might be related to reductions in radiation use efficiency and radiation interception in this situation. As the diminution of 20 % in the observed rainfall during the critical period of the crop did not cause notable variations in the water stress coefficients, yield differences between T2 and T3 were not significant.

Key words: maize, yield, critical period, water stress, crop simulation models.

EFFECTO DEL CONTENIDO HÍDRICO DEL SUELO SOBRE EL RENDIMIENTO DE UN CULTIVO DE MAÍZ

INTRODUCCIÓN

Origen, evolución y características del maíz

El maíz (*Zea mays* L.) es una especie perteneciente a la familia de las gramíneas y su origen se pierde en la antigüedad. Tanto excavaciones arqueológicas y prospecciones geológicas, como la medición de la radiactividad de restos de espigas encontradas en cavernas, indican que el maíz podría haberse originado hace unos 7.000 años. El lugar de dicho origen fue probablemente México, América Central o el sudoeste de los Estados Unidos de América (Goodman, 1988). La mutación, la selección natural y la selección masal hecha por los aborígenes americanos, transformaron gradualmente al maíz salvaje en una planta domesticada de valor.

Los individuos de esta especie no se encuentran en estado silvestre debido a que son incapaces de sobrevivir en esas condiciones por no poseer mecanismos adecuados para la dispersión de sus semillas, las que al germinar, por permanecer unidas al marlo –que es un producto de la domesticación- producen plantas que compiten severamente entre sí, lo que les impide producir nuevas semillas.

El mejoramiento del maíz en Argentina evolucionó desde la simple selección masal, usada por los indios y los primeros colonos, hasta la aplicación de los principios de la genética y la utilización de la heterosis. El empleo de la heterosis o vigor híbrido, permitió el incremento de los rindes, la mejora de otros caracteres agronómicos, la producción y el uso de grandes volúmenes de semilla híbrida (Andrade *et al.*, 1996).

Producción

A nivel *mundial*, el maíz es el tercer cultivo en importancia después del trigo y del arroz en cuanto a volumen de producción. En la campaña 2006/07 se sembraron 148,5 millones de ha, produciéndose en total 702,2 millones de toneladas (t) de maíz, lo que representa un 1,9 % más que lo producido en la campaña anterior. En la Tabla N° 1 se puede apreciar cuáles son los principales países productores de maíz a nivel mundial, y en la Tabla N° 2 la evolución del rendimiento y de la producción mundial de este cereal en los últimos 10 años.

Tabla N° 1: Principales países productores de maíz

País	Producción	
	Millones de t	%
Estados Unidos	267,6	38,1
China	145,0	20,7
UE - 27	55,2	7,9
Brasil	50,0	7,1
Argentina	22,5	3,2
México	22,0	3,1
India	15,0	2,1
Canadá	9,0	1,3
Nigeria	7,8	1,1
Indonesia	6,7	1,0
Otros	101,4	14,4
Total Mundial	702,2	100,0

Fuente: USDA. Grain World Market & Trade. Agosto 2007.

Tabla N° 2: Evolución del rendimiento y producción mundial de maíz. 1996/97 – 2006/07.

Año	Producción (millones de t)	Rendimiento (t ha ⁻¹)
1996/97	593,0	4,2
1997/98	574,2	4,2
1998/99	605,8	4,3
1999/2000	607,6	4,4
2000/01	590,7	4,3
2001/02	600,0	4,4
2002/03	603,4	4,4
2003/04	627,2	4,4
2004/05	714,8	4,9
2005/06	696,2	4,8
2006/07	702,2	4,7

Fuente: USDA. Grain World Market & Trade. Agosto 2007.

En el contexto *MERCOSUR*, la producción maicera de los dos principales países productores (Argentina y Brasil) durante la campaña 2006/07 fue de 72.500.000 t, lo cual representa el 10,3 % de la producción mundial. De los países mencionados, Brasil es el mayor productor, con 50 millones de t (69 %), mientras que Argentina ocupa el segundo lugar (USDA, 2007).

El maíz es un cultivo que tiene gran importancia a nivel *nacional*. Su producción ha ido en aumento desde la campaña 1993/94, en la que se registró un total que apenas

sobrepasó las 10 millones de t, hasta la campaña 2006/07 en la cual se produjeron 22,5 millones de t (Tabla N° 3). De la misma manera, los rendimientos también han sido cada vez mayores, ya que en la campaña 1993/94 los rindes promedios fueron de 4,2 t ha⁻¹ y en la campaña 2006/07 se obtuvieron aproximadamente 8,04 t ha⁻¹. Las cifras oficiales (SAGPyA, 2007) al 18/04/07 indican que la superficie sembrada con destino a la producción de grano y forraje sobrepasó los 3,5 millones de ha (11,6 % más que la campaña anterior) (Tabla N° 3), con mayores incrementos registrados en La Pampa y norte de Buenos Aires, y menores superficies sembradas en Santa Fe y Córdoba.

Tabla N° 3: Área sembrada y toneladas producidas de maíz a nivel nacional.

	2005/06	2006/07	Variación (%)
Millones de ha	3,2	3,57	11,6
Millones de t	15,8	22,5	42,4

Fuente: SAGPyA 2007

A nivel *provincial* (tal como lo refleja la Tabla N° 4), en la campaña 2005/06 Córdoba se ubicó en el primer lugar entre las provincias con mayor producción maicera de la Argentina, con un 32,5 % del total, seguida por Buenos Aires, con el 25,8 %.

Sustentabilidad y ecofisiología

La presencia del maíz en las rotaciones es de importancia para la sustentabilidad de las producciones agrícolas, debido a que le otorga mayor estabilidad al sistema y mejora el balance físico de los suelos, entre otros beneficios. Trabajos realizados por Sarlangue (2002) en la Estación Experimental Agropecuaria de Balcarce (EEA Balcarce) demostraron que la disminución en el contenido de materia orgánica del suelo es mayor en las rotaciones con predominio de cultivos de verano, particularmente de soja. De aquí se desprende la vital importancia de mantener el maíz dentro de las rotaciones en planteos de agricultura continua o muy prolongada ya que no sólo permite atenuar dicha caída y mantener altos los niveles de estabilidad estructural, sino que tanto el grano como el rastrojo tienen como alternativa su uso en la ganadería (INTA, 2005).

Tabla N° 4: Área sembrada con maíz a nivel nacional. Campaña 2005/06

	Área sembrada	
	Ha	%
Región Pampeana	2.767.775	86,8
Córdoba	1.038.180	32,5
Buenos Aires	822.300	25,8
Santa Fe	372.045	11,7
La Pampa	338.500	10,6
Entre Ríos	196.750	6,2
Región Extra Pampeana	422.665	13,2
Chaco	135.100	4,2
Santiago del Estero	76.750	2,4
San Luis	57.000	1,8
Salta	43.000	1,4
Misiones	31.105	0,98
Tucumán	28.270	0,89
Formosa	25.000	0,78
Corrientes	12.240	0,38
Catamarca	9.000	0,28
Jujuy	5.200	0,17
Total país	3.190.440	100

Fuente: Dirección de Coordinación de Delegaciones. SAGPyA 2006.

En los sistemas productivos característicos de la región sur de Córdoba, mayoritariamente de secano, la variabilidad climática es la principal causa de la fluctuación interanual de los rendimientos, generalmente por deficiencias de agua durante períodos críticos de los cultivos. Las siembras de principio de primavera se ven frecuentemente afectadas por la escasez de precipitaciones que perjudican el adecuado establecimiento del cultivo. Además, el maíz manifiesta una sensibilidad diferencial a la sequía según la etapa del ciclo considerada. Si la sequía ocurre alrededor de la floración, se producen mermas importantes en el rendimiento en grano (Robelin, 1987; Shaw, 1988). La floración es el período más crítico para la determinación del rendimiento de maíz. Alrededor de esta etapa fenológica se fija el número de granos por unidad de superficie; por ello el rendimiento en grano se torna altamente dependiente de la disponibilidad hídrica en un período que se extiende desde 15 días antes hasta 21 días después de la floración (Claasen y Shaw, 1970).

En cultivos de crecimiento determinado como el maíz, el rendimiento final suele relacionarse fuertemente con el IAF (índice de área foliar) en floración (Sobrado, 1990). Cuanto mayor es la radiación solar incidente diaria durante el ciclo del cultivo, mayor es el crecimiento y, por lo tanto, el rendimiento (Muchow *et al.*, 1990). El rendimiento en grano

correlaciona positivamente con la radiación incidente media diaria y con la amplitud térmica, y negativamente con la temperatura media (Andrade, 1992). Los rendimientos máximos de maíz corresponden a zonas con elevado nivel de radiación, temperaturas medias bajas y altas amplitudes térmicas. Durante el período crítico antes señalado, la tasa de crecimiento por planta es indicativa de la condición fisiológica de las mismas y por lo tanto, de su capacidad para fijar granos (Andrade *et al.*, 1999). La tasa de crecimiento por planta depende de numerosos factores, como la densidad de siembra, la temperatura, los niveles de radiación, la disponibilidad de agua y nutrientes y el genotipo (Andrade *et al.*, 2002; Otegui y Andrade, 2000). Sin deficiencias hídricas y/o nutricionales, el número de granos fijado por planta se relaciona con la tasa de crecimiento por planta en el período próximo a la floración.

El estrés hídrico durante la floración del maíz reduce las eficiencias de interceptación de la radiación (por aceleración de la senescencia de las hojas), de conversión de la radiación interceptada y de partición de materia seca a espigas. Como consecuencia, aumenta el aborto de estructuras reproductivas y disminuye la producción final de grano. La magnitud de las pérdidas depende de la oportunidad, intensidad y duración del estrés y se manifiesta a través de la disminución de la cantidad de espigas por planta y de un menor número de granos en la espiga (Hall *et al.*, 1981). La etapa pre “silking”¹ del período crítico determina el número de espigas fértiles por planta (i.e. aquellas que expondrán sus estigmas y podrán dar granos cosechables), mientras que en la etapa post “silking” se define el número final de granos (Otegui y Bonhomme, 1998).

Si la sequía en floración es muy severa y el cultivar utilizado es sensible al déficit hídrico, se puede llegar a la esterilidad de plantas. El rendimiento en grano se ve proporcionalmente más afectado que la producción de materia seca aérea total, disminuyendo sensiblemente el índice de cosecha (Sinclair *et al.*, 1990).

En maíz, el rendimiento está más asociado al número final de granos logrados que al peso de los mismos, como lo demuestran los altos coeficientes de correlación que se encuentran entre el número de granos y el rendimiento (Otegui, 1995; Otegui y Andrade, 2000). De los aspectos determinantes del número de granos, sin embargo, la generación de estructuras capaces de dar origen a un grano no sería un factor determinante del número final que alcanza la madurez. Diversos autores (Otegui, 1997; Otegui y Andrade, 2000; Otegui y Bonhomme, 1998) han señalado que para lograr aumentos de rendimiento es más importante aumentar la supervivencia de dichas estructuras que el número potencial de granos. Consecuentemente, el análisis de los factores determinantes del aborto de estructuras potencialmente aptas para generar un grano cosechable cobra gran significado en esta especie.

¹ Silking es sinónimo de floración femenina (R1). Consiste en la emergencia de los estigmas por fuera de la envoltura de la chalas de la espiga.

El fenómeno de protandria (anticipación de la antesis respecto de la aparición de estigmas), provoca la falta de polen cuando aparecen los estigmas correspondientes a las espiguillas ubicadas en la punta de la espiga, lo que se transforma en la causa más importante de la reducción en el número de granos por planta. El aumento en la protandria es un síntoma del déficit hídrico y no la causa directa del menor número de granos por planta (Westgate y Boyer, 1986).

Cuando el estrés se produce en etapas vegetativas o en el llenado de granos, el efecto sobre el rendimiento es sensiblemente menor, aunque el peso del grano puede disminuir frente a sequías que tengan lugar durante el período de llenado de los mismos (Fischer y Palmer, 1984).

Estudios recientes señalan que la disponibilidad de asimilados por espiguilla fértil no es el único factor que controla el establecimiento de granos cuando el agua y los nutrientes no son limitantes (Cárcova *et al.*, 2000). El aborto de ovarios fertilizados tardíamente es una importante fuente de reducción del número de granos en maíz. Un retraso de algunos días en la polinización de los primeros estigmas que emergen permite que los ovarios correspondientes a los estigmas del tercio superior de la espiga alcancen su potencial para fijar granos. El número de granos puede aumentar significativamente (8 a 31 %) cuando se sincroniza la polinización de estigmas, tanto entre espigas como dentro de una misma espiga. Estos estudios sugieren que la dinámica de emisión de estigmas, que finalmente afecta la dinámica de polinización (Uribelarrea *et al.*, 2002) y fecundación, podría explicar, al menos parcialmente las diferencias observadas en el número final de granos entre genotipos que crecen sin limitaciones bajo condiciones ambientales similares (i.e. con riego y fertilización). Nuevas investigaciones han intentado definir con exactitud el intervalo que debe mediar entre la polinización de los estigmas de aparición temprana y los de aparición tardía para desencadenar los procesos de dominancia entre granos de una espiga conducentes al aborto (Cárcova y Otegui, 2001).

En un estudio realizado por Calviño *et al.* (2003) en las localidades de Tandil y Marcos Juárez, se demostró que la disponibilidad hídrica en las etapas cercanas a la floración del maíz es la variable que más afecta el rendimiento en grano, cuando se la compara con las variables profundidad de suelo y prácticas de manejo.

Modelos de simulación de cultivos

Los modelos de simulación del crecimiento, desarrollo y rendimiento de cultivos son herramientas válidas para evaluar riesgos y respuestas de cultivos en determinadas combinaciones de suelo-clima (e.g. Mearns *et al.*, 1992, 1996, 1997; Vinocur *et al.*, 2000 a b). Cuando los modelos han sido calibrados y validados para una región, se convierten en poderosas herramientas para reemplazar muchos de los ensayos experimentales de prueba y

error y para reducir costos en la experimentación agropecuaria. De esta forma proveen información a los agricultores, extensionistas y a los que determinan las políticas productivas, asistiéndolos en la toma de decisiones para alcanzar las metas propuestas y disminuir el riesgo productivo (Ritchie, 1991).

Basándose en la importancia del cultivo de maíz para la economía regional, el mantenimiento de los sistemas agrícolas, el uso sustentable de los recursos y la aptitud demostrada por los modelos de simulación en la evaluación de los efectos de la variabilidad climática, se plantean la siguiente hipótesis y objetivo de este trabajo:

HIPÓTESIS

El déficit hídrico, principalmente en la etapa cercana a floración, afecta adversamente el rendimiento en grano del maíz.

OBJETIVO

Determinar el efecto sobre el rendimiento de maíz, producido por distintos niveles de contenido hídrico del suelo durante el período crítico, mediante la utilización de un modelo de simulación del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del clima de la región

El estudio fue realizado en la ciudad de Río Cuarto, situada en la latitud 33° 07' S, longitud 64° 14' W, y a 421 m de altitud s.n.m., comprendida en un área subhúmeda seca. Las condiciones térmicas caracterizan una zona de clima templado (Fabricius y Rotondo, 1993), que presenta una temperatura media normal anual de 16,5 °C; una temperatura media normal del mes más cálido (enero) de 23 °C, y una temperatura media normal del mes más frío (julio) de 9,1 °C, determinando una amplitud térmica media anual de 13,9 °C (Serie 1974-1993). El período libre de heladas² en promedio es de 255,7 días, siendo la fecha media de primeras heladas el 25 de mayo \pm 14,3 días, y la fecha extrema de primeras heladas el 29 de abril. Asimismo los registros indican como fecha media de últimas heladas el 12 de septiembre, con una desviación típica de \pm 20,3 días, y fecha extrema de últimas heladas, el 04 de noviembre (Seiler *et al.*, 1995).

El promedio normal anual de precipitaciones es 801,1 mm, siendo diciembre el mes más lluvioso, con un valor medio de 130,8 mm y junio el de menores precipitaciones, con 13,4 mm (Serie 1974-1993). Las lluvias se concentran en mayor cantidad y frecuencia durante el período más cálido del año, determinando un régimen de precipitaciones de tipo monzónico (Figura N° 1) (Seiler *et al.*, 1995).

La mayor velocidad media del viento se registra a fines de agosto y durante el mes de septiembre y octubre, prevaleciendo las direcciones N y NE (Fabricius y Rotondo, 1993).

² Temperaturas iguales o menores a 0°C registradas en abrigo meteorológico

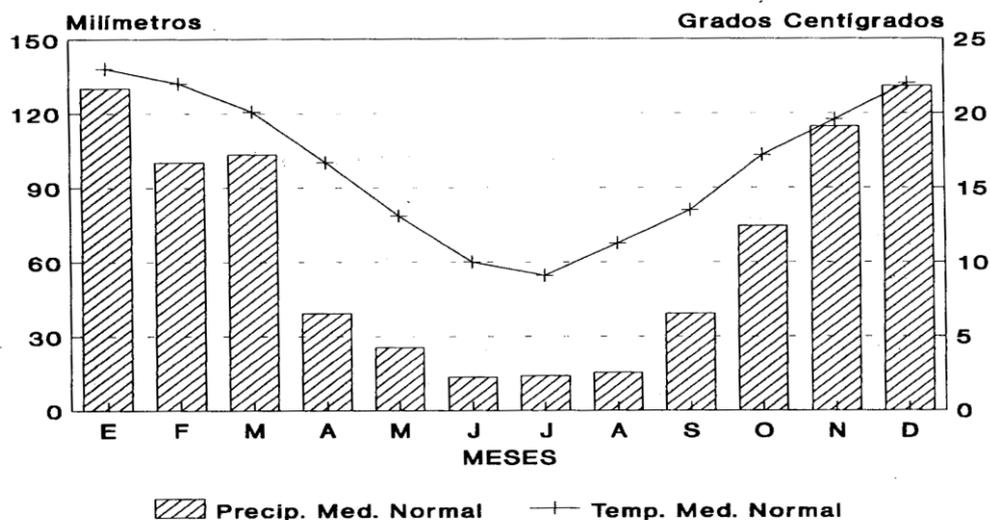


Figura N° 1: Valores medios normales de precipitación y temperatura para el período 1974 – 1993 (luego de Seiler *et al.*, 1995)

Análisis de los valores térmicos y precipitaciones correspondientes a la campaña 2005/06

La Figura N° 2 muestra que en la 3ª década de octubre y la 2ª de enero de la campaña 2005/06, las lluvias superaron aproximadamente en 25 mm a las cuantías normales de precipitación, mientras que en la 1ª década de febrero dicho incremento fue de 50 mm. Por otro lado, a lo largo de la 3ª década de diciembre y la 2ª de febrero llovieron en promedio alrededor de 50 y 40 mm menos que los valores normales, respectivamente.

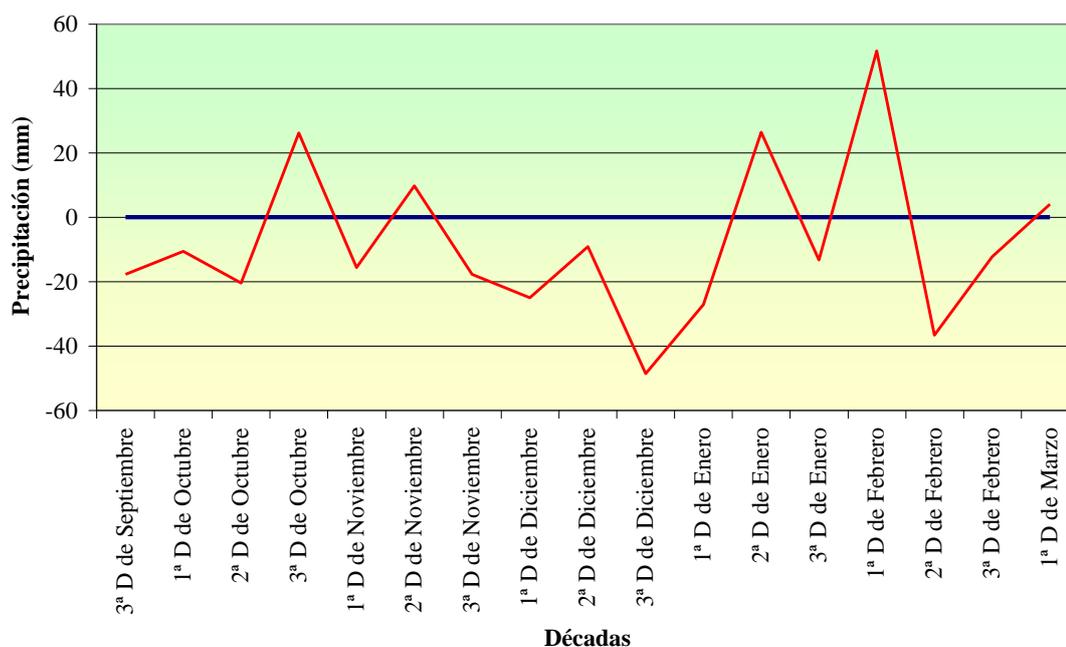


Figura N° 2: Desvíos de las precipitaciones durante la campaña 2005/06 con respecto a los valores normales

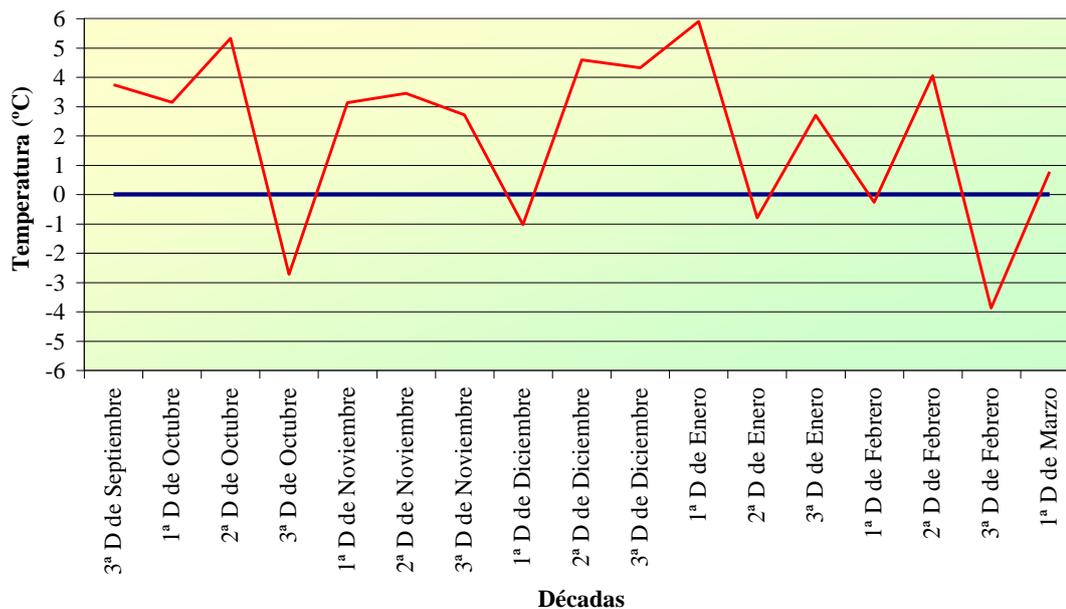


Figura N° 3: Desvíos de las temperaturas máximas durante la campaña 2005/06 con respecto a los valores normales

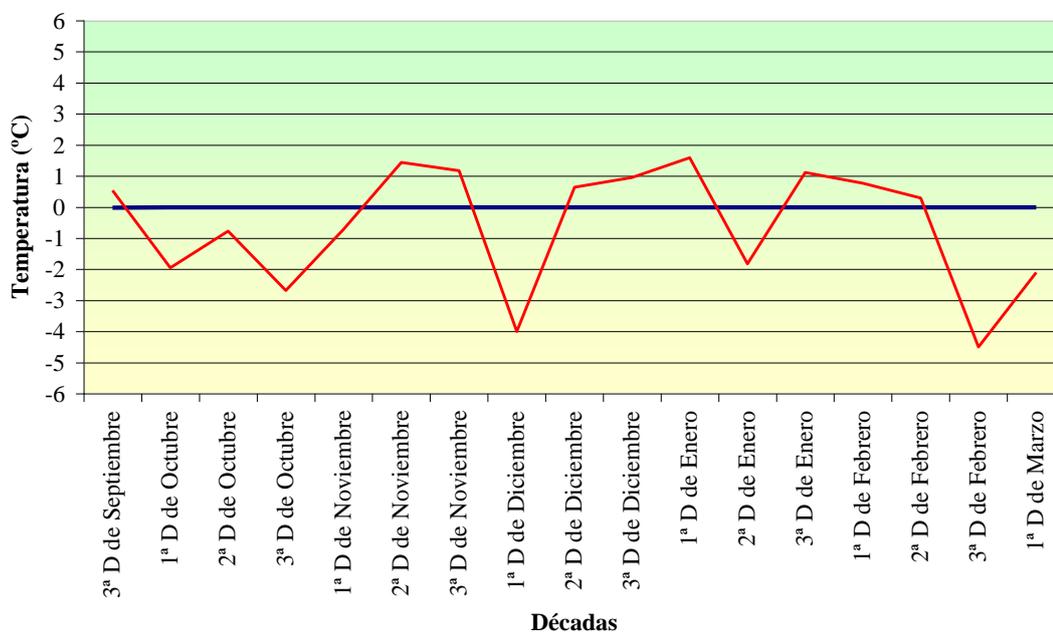


Figura N° 4: Desvíos de las temperaturas mínimas durante la campaña 2005/06 con respecto a los valores normales

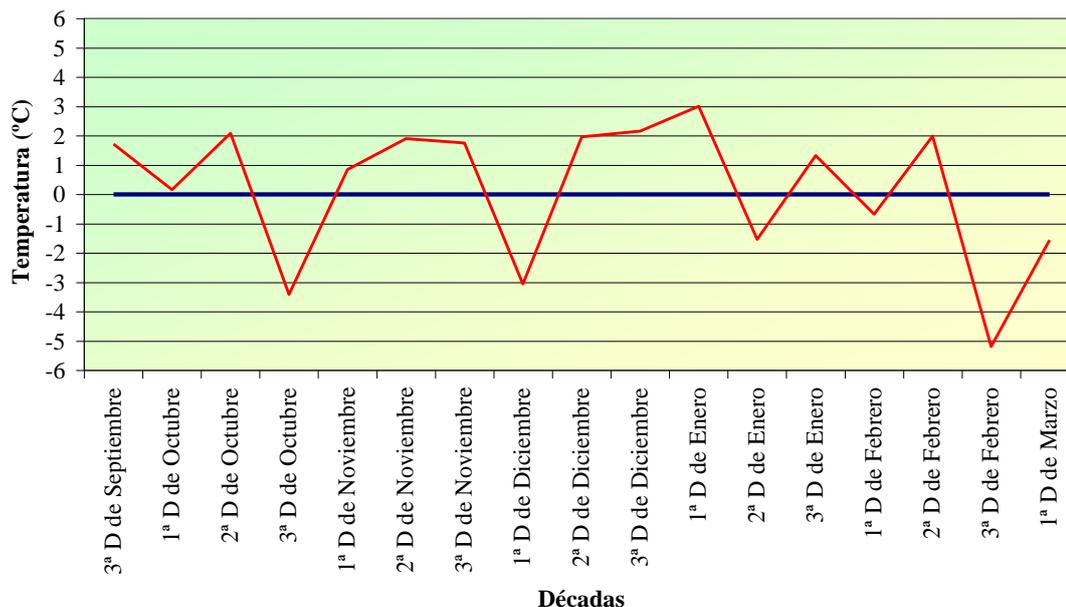


Figura N° 5: Desvíos de las temperaturas medias durante la campaña 2005/06 con respecto a los valores normales

Como puede observarse en la Figura N° 3, las temperaturas máximas fueron acentuadamente superiores a la media normal durante gran parte de la campaña 2005/06, excepto en la 3ª década de octubre y de febrero, en donde éstas presentaron un valor marcadamente inferior a la media.

Con respecto a las temperaturas mínimas, como muestra la Figura N° 4, durante la campaña 2005/06 prevalecieron temperaturas inferiores a la media, con excepción de algunos períodos (2ª y primera parte de la 3ª década de noviembre, 3ª década de diciembre y 1ª de enero, 1ª década de febrero) en los cuales la temperatura superó levemente los valores medios.

La temperatura media (Figura N° 5) durante la campaña 2005/06 mostró alternancia alrededor de la media, registrando en general valores por encima de la normal desde noviembre hasta mediados de enero.

Caracterización del suelo del ensayo

El área de estudio pertenece a la unidad catastral N° 22, comprendiendo el sector circundante a la ciudad de Río Cuarto. El relieve es normal, ondulado a muy suavemente ondulado, con pendientes medias y largas con distinto grado de complejidad y gradientes entre 1 y 3 % (Cantero *et al.*, 1986). El suelo en el que se llevó a cabo el ensayo es un Hapludol típico, con textura franco arenosa (46% de limo, 42 % de arena y 12 % de arcilla), 2% de materia orgánica y un pH de 6,5. El funcionalismo de estos suelos no manifiesta impedimentos estructurales para el desarrollo radicular ni problemas de aireación y

temperatura; son algo excesivamente drenados, y su capacidad de retención hídrica es media a baja³.

En las Tablas N° 5 y 6 se presentan las características físicas y químicas del suelo en el cual se realizó el ensayo, y en la Tabla N° 7 se detalla una valoración de la tabla predecesora.

Tabla N° 5: Propiedades físicas del suelo

Horizonte	Profundidad (cm)	PEA (gr/cm³)	Lámina de agua en PMP (mm)	Lámina de agua a CC (mm)
Ap	0-5	1,23	8,49	20,72
Ad	5-20	1,32	10,86	21,72
Bw1	20-36	1,36	10,38	22,19
Bw2	36-60	1,26	9,09	19,61
BC	60-81	1,26	8,09	17,89
C	81-99	1,26	7,93	18,52
Ck	99-120	1,26	7,93	18,52
K	120-150	1,26	7,93	18,52

PEA: peso específico aparente, CC: capacidad de campo, PMP: punto de marchitez permanente

Fuente: (Puiatti, *et al.*, 2006).

³ Ing. Agr. Eugenio R. Hampp, comunicación personal

Tabla N° 6: Propiedades químicas del suelo (Fecha de extracción de muestras: 15/09/2005)

RESULTADOS						
Profundidad (cm)	0-6	6-21	21-36	36-60	60-81	81-100
Identificación	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Reacción de pH (en agua)	6,70	6,10	6,00	6,10	6,30	7,20
Materia Orgánica (%)	2,48	3,01	2,02	1,09	0,89	0,98
Materia Orgánica Joven (%)	0,244	0,260	-	-	-	-
N-NO ₃ (ppm)	24,00	32,20	18,00	9,40	9,60	9,00
Fósforo Extractable (ppm)	35,86	22,82	18,74	22,00	14,67	7,33
S-SO ₄ (ppm)	21,18	18,45	14,45	15,55	18,57	21,41
Calcio (meq/100 g)	5,88	5,17	4,81	4,79	5,15	5,76
Magnesio (meq/100 g)	4,06	4,00	3,95	3,73	3,89	4,16
Potasio (meq/100 g)	1,116	1,093	1,232	1,204	1,104	1,140
Sodio (meq/100 g)	0,1497	0,0499	0,0499	0,0499	0,0998	0,1497
Cap. de Int. Catiónico (meq/100 g)	11,35	12,91	17,04	10,17	10,24	-
Suma de Bases (meq/100 g)	11,25	10,31	10,04	9,77	10,24	11,20
Saturación con Bases (%)	99,00	79,80	58,92	95,41	100,00	-

Para la realización de los cálculos se ha tomado como valor general de densidad aparente 1,3 g/cm³.

Los métodos utilizados en la determinación de aspectos químicos del suelo fueron:

N: - Extracción: Sulfato de Calcio

- Método Analítico: Reducción del Cadmio

P: - Extracción: Extractante Bray P1

- Método Analítico: Reducción del Ácido Ascórbico

K: - Extracción: Extractante Mehlich 2 SIW

- Método Analítico: Fluorid Acid

S: - Extracción: Fosfato de Calcio

- Método Analítico: Turbidez del Sulfato de Bario

Na: - Extracción: Extracto de saturación
- Método Analítico: Ión específico

Ca/Mg: - Extractante: Mehlich 2 SIW
- Método Analítico: Método Colorimétrico Calmagite

Materia Orgánica: - Método Analítico: Reducción del Dicromato de K
- Método granulorimétrico:

-Materia Orgánica Total: Malla de 2 mm

-Materia Orgánica Joven: Malla entre 0,1 y 2 mm

Tabla N° 7: Valoración de la fertilidad y pH de las distintas muestras de suelo

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Nitrógeno	MBFA	MBFA	BFA	MFA	MFA	MFA
Fósforo	BP	MP	MP	MP	MP	PP
Azufre	MP	MP	PP	PP	MP	MP
Ph	NEUTRO	ÁCIDO	ÁCIDO	ÁCIDO	ÁCIDO	DA
Mat. Org.	MBFP	MBFP	BFP	BFP	BFP	BFP

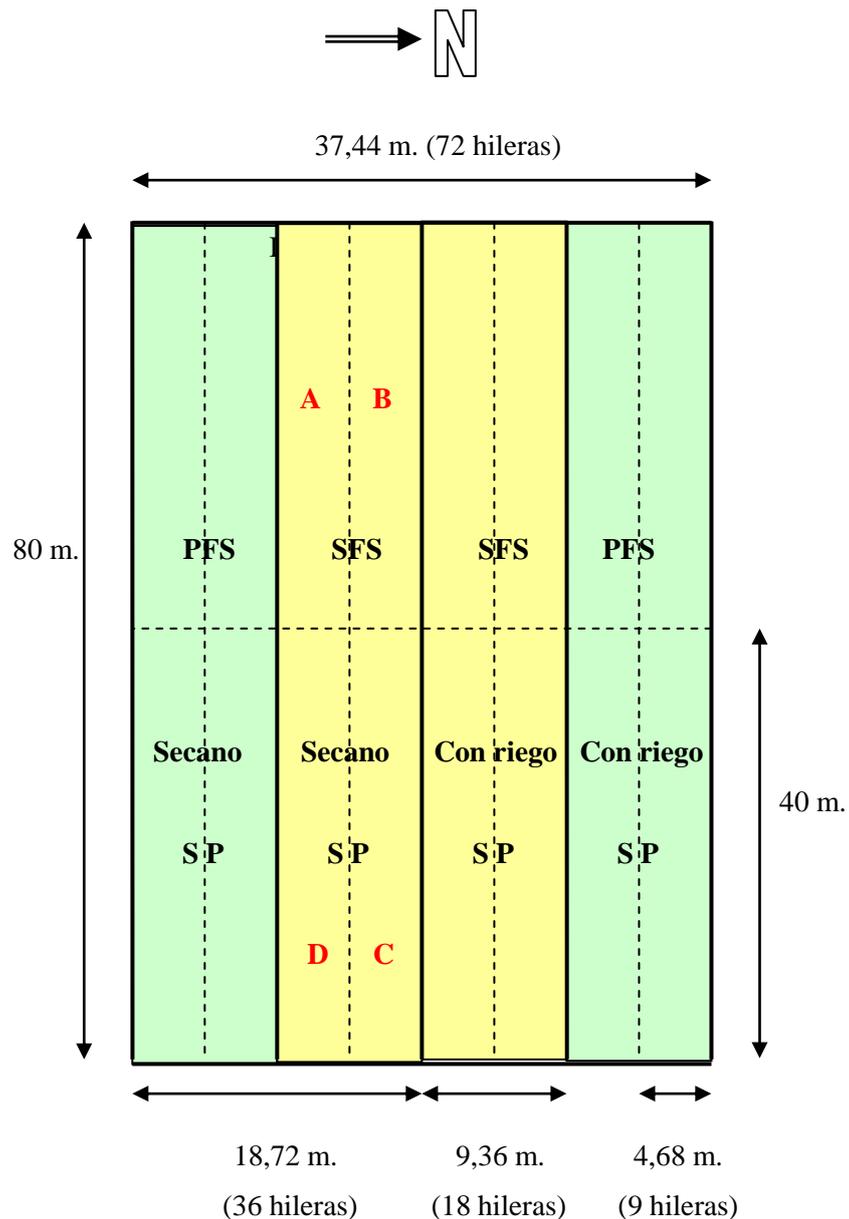
MBFA: Muy buena fertilidad actual; BFA: Buena fertilidad actual; MFA: Mediana fertilidad actual; BP: Bien provisto; MP: Medianamente provisto; PP: Poco provisto; DA: Débilmente alcalino; MBFP: Muy buena fertilidad potencial; BFP: Buena fertilidad potencial.

Ensayos de campo

Para poder utilizar un modelo de simulación de cultivos como herramienta de decisión para una región en particular, es necesario ajustar el mismo para las condiciones edafoclimáticas de esa región. El ajuste se logra con una calibración y una posterior validación del modelo. Para ello es necesario tener un conjunto mínimo de datos de ensayos experimentales realizados siguiendo lineamientos específicos, los que serán comparados con las salidas del modelo.

Para la calibración y validación del modelo se utilizaron datos de ensayos experimentales realizados en el Campo Experimental de la Universidad Nacional de Río Cuarto durante la campaña agrícola 2005/06. Se utilizó un híbrido simple de maíz de última generación (Nidera AX 884), en dos épocas de siembra, bajo condiciones de riego y de secano en cada fecha de siembra. La primera siembra fue realizada el 22 de septiembre, mientras que la segunda se llevó a cabo el 2 de noviembre, sometiendo de esta manera al cultivo a distintas condiciones ambientales. En ambas fechas las densidades de siembra

fueron las recomendadas para la zona en estudio (80.000 semillas/ha), lográndose una implantación de 70.000 plantas ha⁻¹. El ensayo se realizó en una parcela de 80 m de largo por 37,44 m de ancho que contenía 72 hileras de plantas sembradas a 0,52 m. La parcela abarcaba cuatro sub-parcelas de 80 m de largo por 9,36 m de ancho cada una (748,8 m² y 18 hileras). A su vez, cada sub-parcela fue dividida en cuatro unidades experimentales (UE) de igual superficie, es decir de 187,2 m² (40m x 4,68 m), y a estas UE se las designó con las letras A, B, C y D (Figura N° 6).



PFS: Primera fecha de siembra; SFS: Segunda fecha de siembra; SP: Sub-parcela;
A, B, C y D: UE

Figura N° 6: Esquema de la parcela en la que se realizó el ensayo.

Los nutrientes disponibles en el suelo limitan la producción de maíz, por lo cual es necesario conocer los requerimientos del cultivo y la oferta del suelo para determinar las necesidades de fertilización. Considerando el nitrógeno y el fósforo como los dos macronutrientes más limitantes para la producción maicera, y en función de los análisis químicos correspondientes a ambas fechas de siembra (Tabla N° 6), se fertilizó a la siembra con 100 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico y se complementó con una segunda fertilización nitrogenada al voleo de 200 kg ha⁻¹ de urea granulada cuando el cultivo se encontraba en V6.

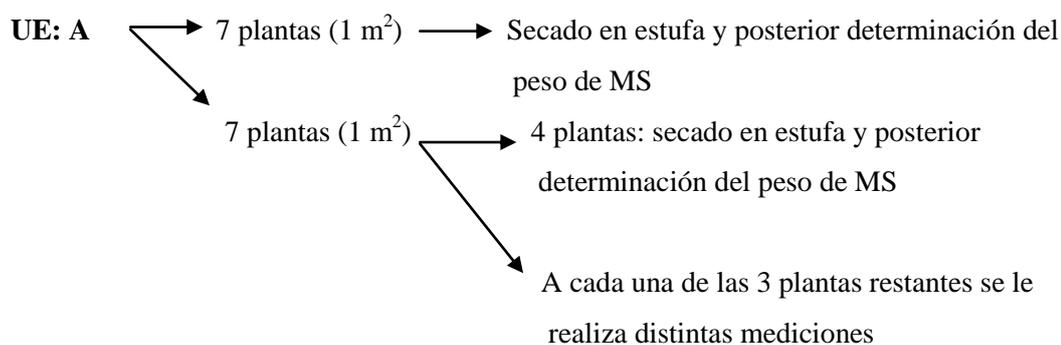
Las observaciones fenológicas siguieron los estadios de desarrollo determinados por Ritchie y Hanway (1997). Los estadios de desarrollo vegetativo del cultivo fueron observados semanalmente durante el ciclo, mientras que los estadios reproductivos, al ser más importantes en la asignación de materia seca, debieron ser observados con mayor frecuencia, aproximadamente cada 2 o 3 días. Las observaciones se realizaron sobre 10 plantas seleccionadas en cada una de las cuatro UE al inicio del cultivo (Tabla N° 8).

Tabla N° 8: Fenología del cultivo de maíz.

Fases	1ra. Fecha de siembra		2da. Fecha de siembra	
	Riego	Secano	Riego	Secano
Ve	02/10/05	02/10/05	10/11/05	10/11/05
V6	11/11/05	11/11/05	01/12/05	05/12/05
R1	22/12/05	20/12/05	09/01/06	13/01/06
R4	18/01/06	19/01/06	09/02/06	13/02/06
R6	12/02/06	12/02/06	07/03/06	09/03/06

Ve: emergencia del cultivo, V6: seis hojas desplegadas, R1: emergencia de estigmas, R4: grano pastoso, R6: madurez fisiológica.

La producción de materia seca fue determinada en 4 momentos del desarrollo del cultivo: V6, R1, R4 y R6, tomándose dos muestras de 1 m² (7 plantas) en cada UE (A, B, C y D). El procedimiento fue el siguiente:



De la misma manera se procedió en las UE B, C y D.

Como se detalla a continuación, las muestras para rendimiento final fueron extraídas cuando el cultivo se encontraba en R6 [50% de las plantas con capa negra (capa de abscisión en la base de cada grano), madurez fisiológica] y fueron procesadas siguiendo la metodología propuesta por Ogoshi *et al.*, (1999).

A cada una de las 3 plantas representativas de la muestra de 1 m² se le determinó:

- En V6: el área de láminas fotosintéticamente activas (LF), y los pesos secos de las LF, láminas no fotosintéticas (LNF) y vainas. Además, con la suma de los pesos secos de las 3 plantas enteras, se obtuvo el valor de la materia seca total (MST).
- En R1: el área de las LF, y los pesos secos de las LF, LNF, tallos (T), chalas (CH) y marlo (M) (diferenciándolos en caso que exista una 2da espiga en la planta) y MST.
- En R4 y R6: el área de las LF, y los pesos secos de las LF, LNF, T, CH y M (diferenciándolos en caso que exista una 2da espiga en la planta) y MST. Para el caso de la primera espiga se determinó su peso, el número de hileras, número de granos/hilera, granos/espiga y peso del M.
- En R6: Además, de cada UE se extrajeron todas las espigas que se encontraban en una superficie de 10 m². A estas espigas se las contabilizó, y se las separó en M y granos. Con el peso de los granos encontrados en 10 m², se estimó el rendimiento en grano (Kg/ha).

En todos los casos el área foliar se determinó usando un medidor electrónico LICOR (LI-3000A Portable Area Meter). Además, con el promedio del peso de dos muestras de 100 granos tomadas al azar se determinó el PS medio de los 100 granos. En caso de presentar la planta una segunda espiga, a ésta se le midió únicamente el PS de CH, M y granos.

Las muestras del material cosechado fueron secadas en estufas a 70° C hasta lograr peso constante para determinar el peso de la materia seca total y el de cada uno de los componentes mencionados.

Por otra parte, se realizó un seguimiento de la evolución del contenido de agua en el suelo mediante determinaciones semanales de humedad por el método gravimétrico. Las mismas se realizaron en dos lugares de cada sub-parcela (e.g. UE A y C), tomándose muestras en cada horizonte del perfil del suelo hasta 1 m de profundidad. Las muestras de suelo se pesaron en húmedo y luego se colocaron en estufa a 105 °C hasta lograr peso constante.

En las subparcelas regadas se utilizó un equipo de riego por aspersión de avance lateral, compuesto por dos torres de 43,8 metros cada una, con un voladizo de 10 metros (Figura N° 7).



Figura N° 7: Equipo de riego del Campo Experimental de la UNRC.

Se suministró agua de buena calidad, clasificada por el U.S. Salinity Laboratory como categoría C2-S1, de acuerdo al análisis realizado por el Departamento de Geología de la UNRC (1996). El agua fue provista por una electrobomba sumergible (caudal: 65000 l h^{-1}) y conducida por una tubería enterrada hasta los hidrantes, la cual se conecta al equipo por medio de una tubería flexible.

El riego fue aplicado cada vez que el contenido hídrico del suelo llegaba al 60% del correspondiente a capacidad de campo, realizándose un seguimiento del agua edáfica mediante el método gravimétrico, a través de muestras tomadas en cada horizonte del perfil del suelo hasta 1 metro de profundidad.

En la Tabla N° 9 se presentan las fechas en que tuvieron lugar los riegos, y las láminas aplicadas.

Tabla N° 9: Fechas y láminas de riego

1ra. Fecha de siembra		2da. Fecha de siembra	
Fecha del riego	Lámina aplicada (mm)	Fecha del riego	Lámina aplicada (mm)
21/09/05	10	16/11/05	20
28/9/05	25	30/11/05	30
18/10/05	30	04/12/05	5
8/11/05	10	15/12/05	30
16/11/05	20	03/01/06	30
30/11/05	30	05/01/06	30
15/12/05	30	11/01/06	30
03/01/06	30	16/01/06	30
05/01/06	30	25/01/06	30
11/01/06	30	01/02/06	30
17/01/06	30	07/02/06	30
		15/02/06	30
		22/02/06	30

Modelo de cultivo

En este trabajo se utilizó el modelo de cultivos CERES V3.5 desarrollado para trigo, maíz, arroz, cebada, sorgo y mijo. CERES V3.5 es un modelo orientado a procesos que simula el desarrollo del cultivo, el balance de agua y de nitrógeno del suelo y el balance de carbono y de nitrógeno del cultivo. Una descripción detallada de la estructura del modelo, procesos, interacciones con los elementos climáticos, etc., es presentada por Jones y Kiniry (1986), Kiniry (1991) y Ritchie *et al.*, (1998). El modelo utiliza un código Fortran común para todas las especies mencionadas mientras que la información sobre características específicas de cada una de ellas se encuentra en archivos de especies, ecotipos y cultivares. Las variables climáticas de entrada requeridas por el modelo son la radiación solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), temperaturas máximas y mínimas del aire ($^{\circ}\text{C}$) y precipitación (mm). Otros datos de entrada necesarios son las características del suelo y del cultivar como así también el manejo aplicado (e.g., densidad de siembra, espacio entre plantas en la hilera y distancia entre hileras, dosis y momento de aplicación de riego y fertilizantes, etc.). Los datos diarios de las variables climáticas necesarias para el estudio [temperaturas máximas y mínimas del aire ($^{\circ}\text{C}$), precipitaciones (mm) y radiación solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)] fueron tomados de la Estación

Agrometeorológica de la UNRC ubicada en el mismo campo experimental y en la vecindad de la parcela experimental.

El modelo CERES V3.5 requiere para su funcionamiento de información organizada en archivos de entrada específicos:

- Archivos de datos climáticos (UNRC7501.WTH): Contiene los datos diarios que deben estar disponibles durante la estación de crecimiento, comenzando el día de la siembra y terminando con la madurez del cultivo.
- Archivo de datos del suelo SOIL.SOL (IBMZ950015): Contiene datos sobre las propiedades del perfil del suelo, obtenidos en el lugar específico del experimento. Éstos son: tasa de drenaje (fracción día⁻¹), curva número de escurrimiento, profundidad de cada horizonte, contenido de agua en PMP, CC y saturación (cm³/cm³), DAP (g/cm³), etc.
- Archivos del experimento:
 - UNRC7501.MZX: Documenta las características del experimento que va a ser simulado, por ej: densidad de siembra, fecha de emergencia, aplicación de agua de riego, fertilización, etc.
 - UNRC7501.MZA: Contiene datos de observaciones a campo. Estos datos son: fecha de floración, fecha de madurez fisiológica, componentes del rendimiento, IAF máximo, etc.
 - UNRC7501.MZT: Almacena información de IAF, agua extraíble (mm), peso seco de tallos (kg ha⁻¹), peso seco de granos (Kg ha⁻¹), peso seco de las hojas (Kg ha⁻¹), peso de toda la parte aérea de la planta (Kg ha⁻¹) e índice de cosecha observada durante el ciclo del cultivo.
- Archivos de datos del genotipo (MZCER980.SPE; MZCER980.ECO y MZCER980.CUL): Proveen coeficientes genéticos que explican cómo responde el ciclo del cultivo al ambiente. Incluye coeficientes fenológicos y otros. Describen el crecimiento del grano, los días fototérmicos que transcurren entre emergencia y floración, entre R1 y MF, la duración del período de llenado de granos en condiciones de crecimiento estándar, etc.

El comportamiento del modelo fue evaluado calculando el Error Medio Absoluto (EMA), la Raíz del Cuadrado Medio del Error (RCME) (Willmott, 1982) y la diferencia entre los valores de las variables observadas y simuladas (Dif).

$$EMA = N^{-1} \sum_{i=1}^N |\hat{Y}_i - Y_i|$$

$$RCME = [N^{-1} \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - Y_i)^2]^{0.5}$$

Donde \hat{Y}_i es el valor estimado en el i^{th} ensayo y Y_i es el valor observado en el i^{th} ensayo; $i = 1, \dots, N$.

$Dif = \sum [(Cont. Humedad simulado - Cont. Humedad observado) / Cont. Humedad observado] / \text{número de observaciones realizadas.}$

Cálculo del balance de agua en el modelo de cultivo

Según Ritchie (1998) el balance de agua del suelo incluye la infiltración del agua de lluvia o riego, su distribución en el suelo, la escorrentía, el drenaje hacia la zona de las raíces y la incorporación por las mismas, la percolación del agua fuera del alcance del sistema radical y la evapotranspiración.

El cálculo del balance de agua del suelo requiere determinar variables de entrada para establecer la cantidad de agua que puede retener el suelo por capilaridad, la que drenará por gravedad y la que estará disponible para la absorción radical. Los procedimientos de cálculo requieren conocer los contenidos de agua del suelo (fracción volumétrica) para el límite inferior de disponibilidad de agua para las plantas (PMP), para el límite donde las fuerzas de capilaridad son mayores que las fuerzas de gravedad (CC) y para saturación del suelo. Debido a que los suelos no son homogéneos en todo su perfil, los contenidos de agua son requeridos para todos los horizontes a los que se desee aplicar el balance.

El *escurrimiento* es calculado a partir del método de la curva número del Servicio de Conservación del Suelo del USDA. En el procedimiento se considera la precipitación total de una o más tormentas ocurridas a lo largo de un día, sin tener en cuenta la variable tiempo, ya que se ignora la intensidad de la precipitación.

La *infiltración* se asume como la diferencia entre la precipitación y el escurrimiento, y se considera que la infiltración es posible debido a la presencia de macroporos, ya que no hay otro aspecto físico que limite la infiltración en la superficie del suelo.

Con respecto al *drenaje*, en la redistribución del agua durante la infiltración, ésta se mueve hacia abajo desde el estrato superior del suelo hacia los estratos más profundos aproximándose a una forma de cascada. El drenaje desde un horizonte tiene lugar sólo cuando el contenido hídrico de ese horizonte se encuentra entre saturación y CC.

El modelo calcula la *Evapotranspiración Potencial* por medio de las fórmulas de Priestley-Taylor o Penman de acuerdo a la disponibilidad de datos meteorológicos. El

cálculo de la tasa actual de evaporación del suelo asume dos etapas de dicho proceso: durante la primera etapa, la evaporación está limitada por la energía disponible en la superficie del suelo, y esta etapa continúa hasta que un límite superior (expresado en mm) dependiente del suelo es alcanzado. Luego de alcanzado este límite se ingresa en la etapa 2, en la cual la evaporación disminuye proporcionalmente al tiempo transcurrido durante esta etapa.

En la *absorción de agua por las raíces*, la resistencia del suelo, la resistencia de las raíces, o la demanda atmosférica dominan la tasa del flujo de agua dentro de las raíces. Esta tasa es calculada asumiendo que el agua se mueve hacia una única raíz y que las raíces están uniformemente distribuidas dentro de un estrato.

Cuando el suelo está húmedo y las raíces tienen abundante cantidad de agua a su disposición, el suministro potencial de agua por el sistema radical excede la tasa potencial de transpiración. A medida que el suelo se seca, su conductividad hidráulica disminuye, y también lo hace la absorción potencial de agua por las raíces. Cuando ésta disminuye hasta un valor inferior al de la tasa potencial de transpiración, la tasa actual de transpiración se reduce debido al cierre parcial de estomas hasta alcanzar la tasa de absorción por las raíces. Cuando esto ocurre, se asume que la tasa potencial de producción de biomasa se reduce en la misma proporción que la transpiración. Las tasas de transpiración potencial y de producción de biomasa son reducidas multiplicando sus tasas potenciales por un factor de déficit hídrico (SWDF1).

Un segundo factor de déficit hídrico (SWDF2) es calculado para explicar los efectos del déficit hídrico en otros procesos fisiológicos de las plantas que son más sensibles que los controlados por la apertura y cierre de estomas (transpiración y producción de biomasa), como la expansión y contracción de las hojas, el crecimiento del tallo, el macollaje, etc.

Variabilidad climática – variación en el contenido hídrico en el suelo

El modelo calibrado y validado con los datos experimentales fue utilizado para analizar el efecto de déficit hídricos generados durante el período crítico del cultivo [desde 15 días antes de la aparición de los estigmas (R1) hasta los 21 días posteriores a esa fecha] sobre el rendimiento y sus componentes. Utilizando una serie de datos meteorológicos diarios de 25 años (1974-1998) para Río Cuarto, se realizaron tres series de simulaciones diferentes empleando la opción SEASONAL del modelo:

- Tratamiento 1 (T1): Con riego – Sin déficit hídrico a lo largo de todo el ciclo del cultivo. El riego es aplicado en forma automática cuando el contenido hídrico en los primeros 30 cm del perfil del suelo alcanza el 50% de CC. La cantidad de agua aplicada es la necesaria para que el suelo alcance CC.
- Tratamiento 2 (T2): Sin riego – Secano

- Tratamiento 3 (T3): Sin riego y con una disminución del 20% en las lluvias observadas durante el período crítico.

Para todas las campañas de la serie se asume la utilización del mismo híbrido de maíz NIDERA 884, sembrado el 10 de septiembre con una densidad de 90.000 semillas ha⁻¹, una distancia entre hileras de 52 cm y sin restricción de nitrógeno a lo largo del ciclo del cultivo. En las tres situaciones se consideró que el contenido hídrico del suelo a la siembra es del 70 % de CC, y que la cantidad de plantas logradas es igual a la de semillas sembradas. Aplicados estos tratamientos, el análisis de los resultados incluyó la media y la desviación estándar (DS) de los rendimientos del cultivo y sus componentes en los distintos casos evaluados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La calibración del modelo se llevó a cabo a partir de la información obtenida del ensayo con riego de la segunda fecha de siembra, ya que el mismo no presentó estrés hídrico a lo largo del ciclo del cultivo. Primero se ajustaron las variables fenológicas del cultivo, seguidas por el balance de agua del suelo, y luego se procedió a la evaluación de las variables fenométricas (rendimiento y sus componentes, biomasa, etc.) siguiendo la metodología propuesta por Boote (1999).

Por otra parte, la validación se realizó con el ensayo con riego de la primera fecha de siembra, y con los ensayos sin riego de ambas fechas de siembra.

Simulación del balance de agua del suelo realizada por el modelo

El ajuste del balance de agua del suelo, realizado para las dos fechas de siembra y para las parcelas regadas y en secano, produjo los resultados que se muestran en las Tablas N° 10, 11 y 12. Éstos se analizaron mediante la utilización de los valores observados y simulados, obteniéndose así la Dif (%), el EMA y la RCME para cada horizonte del perfil del suelo (cm^3/cm^3) (Tablas N° 10 y 11), y para todo el perfil (0-100 cm) (lámina de agua, en mm) (Tabla N° 12).

Los valores observados se obtuvieron del archivo UNRC7501.MZT, y los valores simulados del archivo de salida WATER.OUT.

Tabla N° 10: Comportamiento del modelo para cada uno de los horizontes en los ensayos sin riego de ambas fechas de siembra

H	P (cm)	PFS S/R			SFS S/R		
		EMA	RCME	Dif.	EMA	RCME	Dif.
1	0-5	0,046	0,057	- 1,9	0,07	0,084	-22,6
2	5-20	0,041	0,046	6,2	0,031	0,035	0,9
3	20-36	0,026	0,033	12	0,033	0,044	15,5
4	36-60	0,016	0,02	16,5	0,02	0,027	7,9
5	60-81	0,022	0,027	26,4	0,012	0,016	-4,9
6	81-100	0,015	0,021	14,1	0,012	0,014	-4,1

H= Horizonte; P= Profundidad; PFS S/R= 1ra Fecha de siembra sin riego; SFS S/R= 2da Fecha de siembra sin riego

Tabla N° 11: Comportamiento del modelo para cada uno de los horizontes en los ensayos con riego de ambas fechas de siembra

H	P (cm)	PFS C/R			SFS C/R		
		EMA	RCME	Dif.	EMA	RCME	Dif.
1	0-5	0,066	0,091	-15,7	0,045	0,053	-19,2
2	5-20	0,031	0,043	8,1	0,023	0,028	3,6
3	20-36	0,041	0,049	-0,5	0,043	0,051	17,3
4	36-60	0,014	0,02	4	0,047	0,051	16,2
5	60-81	0,028	0,036	-14,1	0,038	0,047	15
6	81-100	0,026	0,034	-10,9	0,048	0,058	14,9

H= Horizonte; P= Profundidad; PFS C/R= 1ra Fecha de siembra con riego; SFS C/R= 2da Fecha de siembra con riego

Las Tablas N° 10 y 11 muestran que en las dos fechas de siembra (FS), y tanto en los tratamientos en secano (S) como regados (R), para el 1er horizonte (H), el modelo subestima el contenido hídrico del suelo, siendo mayor esta diferencia en la SFS (- 22,6 %). Con respecto al 2do H, para las dos FS y tanto en R como en S el modelo sobreestima el contenido de agua, siendo la diferencia de mayor magnitud en la PFS (6,2 % y 8,1 %). En el 3er H, se aprecia en la PFS R una subestimación mínima, es decir el modelo prácticamente simula de manera exacta el contenido hídrico real del suelo. Continuando con el análisis del 3er H, en los tres escenarios restantes se observa una sobreestimación, que se acentúa en la SFS (15,5 % y 17,3 %). En el 4to H, hay una sobreestimación en los 4 tratamientos, siendo ésta mayor en la PFS S y en la SFS R (16,5 % y 16,2 % respectivamente). En cuanto al 5to y 6to H, el modelo sobreestima en la PFS S y en la SFS R, y subestima en las dos situaciones restantes, observándose los mayores valores tanto de sobre como de subestimación, en el 5to H y en la PFS (26,4 % y - 14,1 %).

Excepto en la SFS R, para las tres situaciones restantes (PFS S, SFS S y PFS R) en el 1er H los valores de RCME equivalen a los mayores porcentajes de error (43%, 45,3% y 42,6%, respectivamente) respecto del promedio de los valores de contenido hídrico observados. En los restantes horizontes (del 2do al 6to), dicho porcentaje de error es sensiblemente menor (entre el 12% y el 27%), indicando un mejor ajuste del balance de agua. En la SFS R, el mayor porcentaje de error se observa en el 6to H (36,9%), existiendo un mejor ajuste en todos los demás horizontes, en los cuales dicho porcentaje de error oscila entre el 11% y el 29%.

Tabla N° 12: Comportamiento del modelo para los primeros 100 cm del perfil del suelo en los ensayos con y sin riego de ambas fechas de siembra

Ensayos	PESW (0-100cm)		
	EMA	RCME	Dif.
PFS S/R	7,3	8,3	24,5
SFS S/R	11,6	15	-0,4
PFS C/R	13,1	20,2	8
SFS C/R	32,6	38,6	33,3

PESW= Agua del suelo potencialmente extraíble; PFS S/R= 1ra Fecha de siembra sin riego; SFS S/R= 2da Fecha de siembra sin riego; PFS C/R= 1ra fecha de siembra con riego; SFS C/R= 2da Fecha de siembra con riego

En la Tabla N° 12 se muestra que para la PFS S y SFS R el modelo sobreestima el contenido hídrico del suelo en un 24,5% y 33,3%, respectivamente. Por su parte, en la SFS S y PFS R el modelo se ajusta notablemente mejor, siendo las diferencias del - 0,4 % y 8 %.

Analizando las cuatro situaciones simuladas, podemos decir que la RCME equivale a valores de entre el 29 % y el 48% de error respecto del promedio de valores de contenido de agua observados, correspondiéndose el valor más bajo a la PFS S, y el más alto a la SFS R.

Influencia de variaciones en el contenido hídrico del suelo sobre el rendimiento y sus componentes

Una vez calibrado y validado el modelo, utilizando la opción SEASONAL del mismo se simularon los 3 tratamientos (T1, T2 y T3), explicados con mayor detalle en Materiales y Métodos.

El objetivo de esta simulación fue determinar la influencia del contenido hídrico del suelo, principalmente durante el período crítico, sobre el rendimiento en grano y sus componentes. Utilizando una serie de 25 años (1974 – 1998) de datos meteorológicos para Río Cuarto, se realizaron en cada tratamiento las corridas para cada campaña, simulándose variables como fecha de R1, de R6, rendimiento, etc.

La corrida N° 19 (año 1992) fue descartada debido a la ocurrencia de una helada (- 1,5 °C) el día 4 de Noviembre, cuando el ápice estaba arriba de la superficie del suelo, causando la muerte de las plantas. Con los datos de las 23 campañas restantes se calculó el promedio y el desvío Standard para cada variable, los que se presentan en la Tabla N° 13.

Tabla N° 13: Resultados de la simulación para una serie de 23 campañas con 3 tratamientos

Variables	Con Riego (T1)	Secano (T2)	Secano - 20 % (T3)
Fecha de R1	16/12 ± 5 días	16/12 ± 5 días	16/12 ± 5 días
Fecha de R6	16/2 ± 7 días	06/02 ± 16 días	02/02 ± 20 días
MS aérea en madurez (kg ha ⁻¹)	29953,9 ± 1712	20900,8 ± 8119	19472,4 ± 8552
N° de granos espiga ⁻¹	439 ± 33	340 ± 115	316 ± 126
N° de granos/m ²	3955 ± 296	3055 ± 1055	2839 ± 1146
Peso medio del grano (mg grano ⁻¹)	384,2 ± 24	281,2 ± 132	251,9 ± 143
Rendimiento en grano (kg ha ⁻¹)	15173,8 ± 1325	9233,9 ± 5358	8215,8 ± 5586
mm evapotranspirados	686 ± 27	510,4 ± 136	478,1 ± 149
Agua extraíble en MF (mm)	68,6 ± 35	28,4 ± 41	24,5 ± 40
IC*	0,51	0,44	0,42

Los datos se expresan como promedio ± D.S. (desvío estándar)

* IC = Índice de cosecha promedio de las 23 campañas

Analizando las variables relacionadas con el desarrollo del cultivo, se observa que no hubo diferencias entre tratamientos en la fecha de R1, pero sí en la fecha de R6. Esto puede atribuirse a un importante estrés hídrico (ocurrido en T2 y T3) que tuvo lugar en algunas campañas en momentos iniciales del período de llenado de granos. Algunos autores (Andrade *et al.*, 1996) indican que, si la provisión de fotoasimilados durante el período de llenado de granos es baja (esto puede ocurrir por baja radiación, baja intercepción de radiación, déficit hídrico, etc.) se reduce la duración del período de llenado. Si el suministro de asimilados a la espiga disminuye por debajo de un determinado valor umbral, se produce el cese del crecimiento del grano formándose, posteriormente, una capa negra en la base del mismo. En este momento se alcanza la madurez fisiológica (Andrade *et al.*, 1996). En base a estos antecedentes, es posible suponer que en el presente trabajo, el estrés hídrico provocó una disminución por debajo del umbral en la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) y en la provisión de fotoasimilados a la espiga, determinando un importante acortamiento en la duración del período de llenado, y alcanzando el cultivo la madurez fisiológica muy prematuramente. En T2 se observaron 3 campañas con estas características y en T3, 4

campañas, las cuales influyeron marcadamente en el promedio, y explican en gran parte las diferencias observadas en la fecha de R6 de estos tratamientos con respecto a T1.

Con respecto a las variaciones en el rendimiento y sus componentes, al comparar T1 vs. T2 se observa que la falta de riego provocó una disminución del 39% en el rendimiento, del 23% en el N° de granos/m² y de un 27 % en el peso medio de los granos. En cambio, cuando se realiza la misma comparación entre T2 y T3, se advierte que en este último la disminución en el rendimiento fue del 11% mientras que el N° de granos/m² y el peso de granos disminuyeron un 7 % y 10 %, respectivamente.

Del análisis de la producción total de MS aérea se observa que ésta disminuye un 30 % y un 7 % al comparar T1 vs. T2, y T2 vs. T3, respectivamente. Esto confirma la información hallada en la literatura, que indica que ante un estrés hídrico alrededor de floración el rendimiento en grano se afecta proporcionalmente más que la producción de MS, disminuyendo el índice de cosecha (Sinclair *et al.*, 1990).

Resulta interesante advertir que la variación en los datos que se presentan en la Tabla N° 12 aumenta con la restricción hídrica, lo que se evidencia en los valores de los desvíos obtenidos. Esto es particularmente importante para la variable rendimiento ya que indica que a medida que disminuye el agua disponible para el cultivo aumenta la variabilidad en los rindes, y por lo tanto el riesgo económico, al incrementarse la probabilidad de obtener rendimientos más bajos.

Con el objetivo de determinar si las diferencias entre los tratamientos son estadísticamente significativas, se aplicó la prueba *t* de Student. Esta prueba estimó que, para todas las variables, las medias son significativamente diferentes al comparar T1 vs. T2 ($p < 0,05$), mientras que ninguna lo era al comparar T2 vs. T3.

Para explicar estos resultados, es necesario considerar un modelo general propuesto por Satorre *et al.* (2003):

- Biomasa = Rinc x Ef.int x EUR
- Rendimiento = Biomasa x IC (o eficiencia de partición)

Donde:

Rinc = Radiación incidente en el cultivo

Ef.int = Eficiencia de intercepción de la radiación por el cultivo

EUR = Eficiencia en el uso de la radiación (o eficiencia de conversión)

IC = Índice de cosecha

De ello se deduce que el efecto del déficit hídrico sobre la producción de los cultivos opera en gran parte a través de la disminución de la expansión foliar o de la aceleración de la senescencia de las hojas y, por lo tanto, se reduce la eficiencia con que el cultivo intercepta la radiación incidente. La eficiencia de conversión de la radiación interceptada en biomasa vegetal también disminuye en condiciones de estrés hídrico, como resultado de caídas en el ritmo fotosintético. En consecuencia, la TCC es afectada (Andrade *et al.*, 1996).

Considerando la información que surge del presente trabajo, la disminución significativa observada en el rendimiento y sus componentes en el cultivo de secano en comparación con el desarrollado bajo riego, puede atribuirse a menores Ef.int y EUR en la situación de secano. Esto provocó una reducción en la TCC y, en consecuencia, en la producción de biomasa, a lo cual se sumó una disminución en la partición. Todas estas alteraciones en su conjunto pueden explicar el menor rendimiento del cultivo observado en T2 en relación a T1.

Por otra parte, algunos autores indican que el maíz manifiesta una sensibilidad diferencial al estrés hídrico según la etapa del ciclo considerada. Si éste ocurre alrededor de la floración, se producen mermas importantes en el rendimiento en grano (Robelin, 1987; Shaw, 1988). Ello se debe a que el desarrollo inicial del grano es altamente dependiente del suministro de asimilados a la espiga durante esa etapa (Schusler y Westgate, 1991). Por lo tanto, cuanto mayor sea la TCC en posfloración, menor será el porcentaje de aborto y, en consecuencia, se incrementará el número final de granos producidos (Cirilo y Andrade, 1994). Es de destacar que la fuente de variación más importante en el número de granos por planta está constituida por el aborto de flores fecundadas (Satorre *et al.*, 2003).

Considerando estos antecedentes, no es posible descartar la posibilidad de que la diferencia observada en el rendimiento entre T1 y T2 también pueda deberse a una menor disponibilidad de agua durante el período crítico en algunas de las campañas analizadas.

Para comparar los resultados obtenidos en los tratamientos T2 y T3, es necesario considerar que el modelo trabaja con dos coeficientes de estrés hídrico (SWDF1 y SWDF2) ya descriptos, cuyos valores oscilan entre 0 y 1 correspondiendo al mínimo y máximo estrés respectivamente. La ausencia de diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento entre los tratamientos mencionados puede atribuirse a que la disminución en un 20 % de la precipitación ocurrida durante el período crítico, no provocó variaciones notables en los coeficientes de estrés en la mayor parte de los años analizados. La relación existente entre rendimiento y el coeficiente de estrés hídrico SWDF2 se evidencia claramente si se analizan los datos obtenidos en las campañas 1974/75 y 1990/91. En las Figuras N° 8 y 9 se presenta la variación del coeficiente SWDF2 durante el período crítico en ambas campañas para T2 y

T3, y se analiza su efecto sobre el rendimiento simulado en ambas campañas y ambos tratamientos.

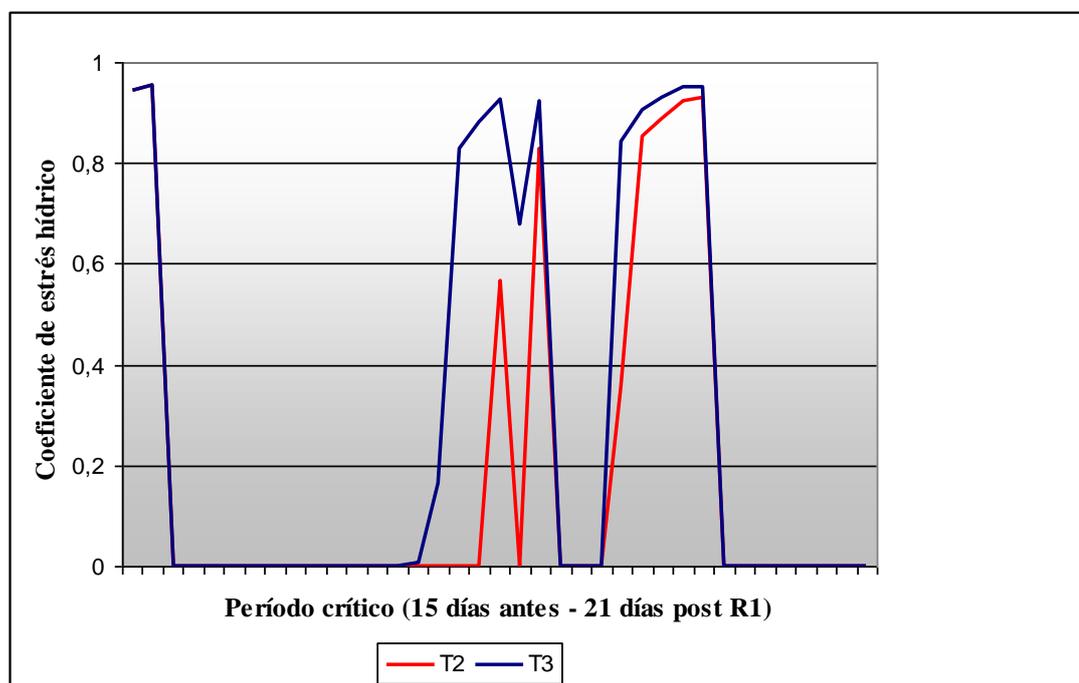


Figura N° 8: Variación de SWDF 2 a lo largo del período crítico de T2 y T3 durante la campaña 1974/75

En la Figura N° 8 correspondiente a la campaña N° 1 (1974-1975), se observan mayores niveles de estrés hídrico en T3 en parte del período crítico (principalmente después de la aparición de los estigmas), resultando en una diferencia en el rendimiento entre ambos tratamientos de 2991 kg determinada principalmente por una disminución del 61,7% en el número de granos por m².

CONCLUSIONES

La actividad agrícola está influenciada en gran medida por la variabilidad climática, siendo ésta la principal causa de la fluctuación interanual de los rendimientos, ya que condiciona los procesos de crecimiento y desarrollo incidiendo finalmente en la producción de los cultivos. Es por esto que se considera importante identificar aquellos componentes del clima que, por sus valores medios y su variabilidad, producen mayor impacto en la producción.

Las simulaciones realizadas utilizando los datos meteorológicos observados correspondientes a la serie 1974 – 1998 para Río Cuarto, demostraron que un 20 % de disminución en las precipitaciones durante el período crítico del maíz no provocaron variaciones notables en los coeficientes de estrés hídrico, determinando la ausencia de reducciones estadísticamente significativas en el rendimiento en grano para el híbrido considerado. Es posible suponer que si estas disminuciones en las precipitaciones hubieran sido superiores, las diferencias en los rendimientos simulados habrían sido estadísticamente relevantes como lo sustenta la extensa bibliografía consultada.

Por último, el trabajo permitió corroborar que el modelo CERES V3.5 ajustado y validado es una herramienta útil para simular el comportamiento del cultivo de maíz en condiciones reales, visualizándose la bondad del mismo para simular situaciones de cultivo históricas o a futuro.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDRADE, F. H. 1992. Radiación y temperatura determinan los rendimientos máximos de maíz. Boletín técnico 106. Estación Experimental Agropecuaria Balcarce (INTA). Balcarce, Buenos Aires, Argentina.
- ANDRADE, F. H.; A. CIRILO; S. UHART y M. E. OTEGUI. 1996. **Ecofisiología del Cultivo de Maíz** 1ra ed. La Barrosa, Balcarce, Buenos Aires.
- ANDRADE, F. H.; C. VEGA; S. UHART; A. CIRILO; M. CANTARERO and O. VALENTINUZ. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Sci.* 39:453-459.
- ANDRADE, F. H.; L. ECHARTE; R. RIZZALLI; A. DELLA MAGGIORA and M. CASANOVAS. 2002. Kernel number prediction in maize under nitrogen or water stress. *Crop Sci.* 42:1173-1179.
- ANDRADE, F. H. y V. O. SADRAS. 2002. **Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja** 2da ed. Balcarce, Buenos Aires.
- BOOTE, K. J., 1999. Concepts for Calibrating Crop Growth Models. En G. Hoogenboom, P.W. Wilkens, and G.Y. Tsuji (eds.). 1999. DSSAT v3, volume 4. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii. Vol. 4.6, cap. 3: 185-192.
- CALVIÑO, P.A., F.H. ANDRADE and V. O. SADRAS. 2003. Maize yield as affected by water availability, soil depth, and crop management. *Agronomy Journal*, 95:275-281.
- CANTERO, G. A., E. BRICCHI, V.H. BECERRA, J.M. CISNEROS y H.A. GIL. 1986. Zonificación y descripción de las tierras del departamento Río Cuarto. UNRC-FAV. 80 págs. 1 carta 1:2.500.000.
- CÁRCOVA, J.; M. URIBELARREA; L. BORRÁS; M.E. OTEGUI and M.E. WESTGATE. 2000. Synchronous pollination within and between ears improves kernel set in maize. *Crop Sci.* 40:1056-1061.
- CÁRCOVA, J. and M. E. OTEGUI. 2001. Pollination asynchrony and kernel abortion in maize. *Crop Science* 41: 1809-1815.
- CIRILO, A. G. and F. H. ANDRADE. 1994. Sowing date and maize productivity: II. Kernel number determination. *Crop Science*, 34:1044-1046.
- CLAASEN, M.M. and R.H. SHAW. 1970. Water deficits effects on corn. II. Grain components. *Agronomy Journal*, 62: 652-655.
- FABRICIUS, R y V. ROTONDO. 1993. Características climáticas del área fruti-hortícola de Río Cuarto, en Diagnóstico y evolución del área frutihortícola de Río Cuarto. Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto. Págs. 23-26.
- FISCHER, K.S. and F.E. PALMER. 1984. Tropical maize. En: P.R. Goldsworthy y N.M. Fischer (eds.). *The physiology of tropical field crops*. Wiley. Págs. 213-248.

- GOODMAN, M. M. 1988. The history and evolution of maize CRC. Critical Review. Plant Science, 7:197-220.
- HALL, A. J., J. H. LEMCOFF and N. TRÁPANI. 1981. Water stress before and during flowering in maize and its effects on yield, its components, and their determinants. Maydica, 26: 19-38.
- INTA 2005 Documentos – Cereales - Maíz. En: www.inta.gov.ar/balcarce/info/documentos/agric/cereales/maíz/sis/maiz.htm. Consultado: 25/5/2005
- JONES, C.A. and J.R. KINIRY.1986. CERES-Maize: A simulation model for maize growth and development. College Station, Texas A&M Press.
- KINIRY, J.R. 1991. Maize phasic development. In Hanks, J and J.T. Ritchie (eds) Modeling plant and soil systems. ASA Agronomy Monographs n°31, Madison, WI, USA.
- MEARNS, L.O., C. ROSENZWEIG, and R. GOLDBERG. 1992. The effect of changes in interannual climatic variability on CERES-Wheat yields: sensitivity and 2xCO₂ studies. J. Agricul. Forest Meteorol. 62: 159 -189.
- MEARNS, L.O., C. ROSENZWEIG, and R. GOLDBERG. 1996. The effect of changes in daily and inter- annual climatic variability on CERES-Wheat: a sensitivity study. Clim. Change 32: 257-292
- MEARNS, L.O., C. ROSENZWEIG, and R. GOLDBERG. 1997. Mean and variance change in climate scenarios: methods, agricultural applications, and measures of uncertainty. Clim.Change 35:367-396.
- MUCHOW, R. C., T. R. SINCLAIR and J. M. BENNETT. 1990. Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations. Agronomy Journal, 82: 338-343.
- OGOSHI, R.M., B.G. CAGAUAN, and G.Y. TSUJI. 1999. Field and Laboratory Methods for the collection of the minimum data set. En G. Hoogenboom et al., (eds.) **DSSAT version 3**, Volume 4-8, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- OTEGUI, M.E. 1995. Prolificacy and grain yield components in modern argentinian maize hybrids. Maydica 40:371-376.
- OTEGUI, M.E. 1997. Kernel set and flower synchrony within the ear of maize. II- Plant population effects. Crop Sci. 37:448-455.
- OTEGUI, M.E. and R. BONHOMME. 1998. Grain yield components in maize. Ear growth and kernel set. Field crops Res. 56:247-256.
- OTEGUI, M.E. and F. H. ANDRADE. 2000. New relationships between light interception, ear growth and kernel set in maize (Chapter 6). En: M.E. Westgate, and K. Boote (eds), Physiology and Modeling of Kernel Set in Maize, Crop Sci. Soc. of America y Amer. Soc. of Agronomy Special Publication N° 29. Baltimore, Maryland, EEUU, 2000. pp 89-102.

- PUIATTI, J.M.P., A.R. RIVETTI y J.H. SCHMALZ. 2006. Riego complementario en maíz (*Zea mays* L.) en la región de Río Cuarto empleando el pronóstico climático extendido de 72 hs. III Jornadas de actualización en riego y fertirriego. 10 y 11 de Agosto de 2006- Mendoza, Argentina.
- RITCHIE, J.T. 1991. Specification of the ideal model for predicting crop yields.p.97-122. In R.C. Muchow and J.A. Bellamy (eds.) Climatic risk in crop production: Models and management for the semi-arid tropics and subtropics. Proc. Intl. Symposium, St. Lucia, Brisbane, Queensland, Australia. July 2-6, 1990. C.A.B. International, Wallingford, U.K.
- RITCHIE, J.T. 1998. Soil water balance and plant water stress. p. 41-53. *In* G.Y. Tsuji et al., (eds.) Understanding options for agricultural production, Systems approaches for sustainable agricultural development Volume 7, Kluwer Academic Publishers, Great Britain.
- RITCHIE, J.T., U. SINGH, D.C. GODWIN, and W.T. BOWEN. 1998. Cereal growth, development and yield.p.79-98. *In* G.Y. Tsuji et al., (eds.) Understanding options for agricultural production, Systems approaches for sustainable agricultural development Volume 7, Kluwer Academic Publishers, Great Britain.
- RITCHIE, S.W., and J.J. HANWAY 1997. How a corn plant develops. **Special Report N° 48**, Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, Ames, Iowa.
- ROBELIN, M. 1987. Desequilibrio hídrico, metabolismo, crecimiento y desarrollo. Le maïs et l'eau. En: AGPM-ITCF (eds.). Colloque, Alimentation Hydrique du Maïs, Tome 1. Agen, 8-9 Decembre, France.
- SAGPYA 2006 Estimaciones agrícolas – Cereales – Maíz. En: www.sagpya.mecon.gov.ar/new/0-0/agricultura/otros/estimaciones/maíz/maíz.php. Consultado: 15/12/2006.
- SAGPYA 2007 Estimaciones agrícolas – Cereales – Maíz. En: www.sagpya.mecon.gov.ar/estimacionesagricolas.php. Consultado: 08/05/2007.
- SARLANGUE, H., 2002. La importancia del maíz en la rotación de los cultivos. Revista **Visión Rural**, año X, Nro. 46.
- 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**. 1ra ed. FAUBA, Buenos Aires.
- SCHUSLER, J.R. and M.E. WESTGATE.1991. Maize kernel set at low water potential: I. Sensitivity to reduced assimilates during early kernel growth. *Crop Science*, 31: 1189-1195.
- SEILER, R. A., R.A. FABRICIUS, V.H. ROTONDO, M.G. VINOCUR y J.C. BONACCI. 1995. Agroclimatología de Río Cuarto – 1974/93 – Vol. I. Cátedra de

Agrometeorología, Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto.

- SHAW, R. H. 1988. Climate requirement. En: G.F. Sprague y J.W. Dudley (eds.). *Corn and Corn Improvement* (3° ed.). Series Agronomy N° 18, págs. 609-638. American Society of Agronomy Inc. Publishers. Madison. Wisconsin, USA.
- SINCLAIR, T.R., M. BENNETT and R.C. MUCHOW. 1990. Relative sensitivity of grain yield and biomass accumulation to drought in field-grown maize. *Crop Science*, 30:690-693.
- SOBRADO, M. A. 1990. Drought responses of tropical corn. 1. Leaf area and yield components in the field. *Maydica*, 35:221-226.
- URIBELARREA, M.; J. CÁRCOVA; M.E. OTEGUI and M.E. WESTGATE. 2002. Pollen production, pollination dynamics and kernel set in maize. *Crop Sci.* 42:1910-1919.
- USDA 2007. United States Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service (FAS). En: www.fas.usda.gov/psdonline/psdReport.aspx. Consultado: 22/08/2007.
- VINOCUR, M.G., R.A. SEILER and L.O. MEARNNS, 2000a. Forecasting the impact of climate variability on peanut crop production in Argentina. p.189-195. **In Proc. International Forum on climate prediction, agriculture and development.** April 26-28, Palisades, NY. IRI Publication IRI-CW/00/1
- VINOCUR, M.G., R. A. SEILER, and L.O. MEARNNS 2000b. Predicting maize yield responses to climate variability in Córdoba, Argentina. **International Scientific Meeting on Detection and Modelling of Recent Climate Change and its Effects on a Regional Scale:** 137. Tarragona, España.
- WESTGATE, M.E. and J.S. BOYER. 1986. Reproduction at low silk and pollen water potentials in maize. **Crop Science**, 26:951-956.
- WILLMOTT, C.J. 1982. Some comments on evaluation of model performance. **Bull.Am.Meteorol.Soc.** 63:1309-1313.