

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

"Trabajo Final Presentado para Optar al Grado de Ingeniero Agrónomo"

**RESPUESTA DEL CULTIVO DE MAIZ (*Zea mays* L.) A DIFERENTES MODELOS
DE RIEGO COMPLEMENTARIO.**

Alumno: HECTOR JAVIER SCHMALZ

DNI: 26487965

Directora: Ing. Agr. M. Sc. ANA ROSA RIVETTI

Río Cuarto - Córdoba - Argentina
Agosto 2007

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Título Del Trabajo Final:

**RESPUESTA DEL CULTIVO DE MAIZ (ZEA MAYS L.) A DIFERENTES MODELOS DE
RIEGO COMPLEMENTARIO.**

Autor: HECTOR JAVIER SCHMALZ

Director: Ing. Agr. M. Sc. ANA ROSA RIVETTI

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

Fecha de Presentación: ____/____/____.

Aprobado por Secretaría Académica: ____/____/____.

Secretario Académico

DEDICATORIA

A Juana, Daniel, Marita, Miguel, Leonardo y Valentín

AGRADECIMIENTOS

A mis padres que me ayudaron a hacer este sueño realidad

A la Facultad de Agronomía y Veterinaria por los conocimientos brindados

A la directora por su importante apoyo

A mis compañeros y amigos

ÍNDICE GENERAL

	Página
Certificado de Aprobación	I
Dedicatoria y Agradecimientos.....	II
Índice.....	III
Resumen.....	V
Summary.....	VI
Introducción.....	1
Objetivos.....	4
Materiales y Métodos.....	5
Resultados y Discusiones.....	12
Conclusiones.....	17
Bibliografía.....	18
Anexos.....	21

INDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Unidades Ambientales del Departamento de Río Cuarto	5
Figura 2. Precipitación (valores medios normales, serie 1974-1993 y valores del ciclo del cultivo 2005-2006).....	6
Figura 3. Evapotranspiración potencial para Río Cuarto	6
Figura 4. Equipo de riego en la parcela de trabajo.....	10
Figura 5. Relación entre el rendimiento en grano y la ETc.....	15
Figura 6. Relación uso de agua – rendimiento	16

INDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Análisis químico del suelo del ensayo.....	7
Cuadro 2. Parámetros físicos del suelo	7
Cuadro 3. Láminas de agua aplicadas semanalmente (R, mm), precipitación efectiva y evapotranspiración del cultivo (ETc, mm).....	12
Cuadro 4. Rendimiento ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y sus componentes (Nº de granos por m^2 y peso de mil granos)	13
Cuadro 5. Análisis estadístico de la producción (Rendimiento promedio, coeficiente de variación (CV) y diferencia mínima significativa (DMS)	14
Cuadro 6. Eficiencia del uso de agua	15

ANEXOS

	Página
Cuadro 1: Rangos prefijados de incrementos de precipitación (Doorenbos y Pruitt, 1977)....	21
Cuadro 2. Datos climáticos de la Estación Meteorológica de la FAV.	21

RESUMEN

En este trabajo se verificaron las ventajas de una adecuada programación de riego complementario, para alcanzar mayor rendimiento de grano del cultivo de maíz bajo riego, asegurar una producción constante y lograr un manejo racional del recurso hídrico. La experiencia se desarrolló en el Campo Experimental de la Universidad Nacional de Río Cuarto durante el ciclo 2005/06, contándose con la información climática de la Estación Meteorológica instalada en el lugar. Se utilizó un diseño estadístico en parcelas totalmente al azar con seis repeticiones, los tratamientos fueron: **T₀**, sin riego; **T₁**, partiendo desde capacidad de campo, se regó durante todo el ciclo, aplicando la lámina necesaria para llevar la humedad del suelo a capacidad de campo cuando se consumían 25 mm; **T₂**, partiendo desde capacidad de campo, se regó durante todo el ciclo una lámina de 25 mm cada vez que se alcanzaba el umbral de riego correspondiente. En **T₃**, el riego se realizó considerando tres fases en el ciclo del cultivo: en la fase 1 y 3 se contempló un umbral de riego con un coeficiente de estrés K_s de 0.80, mientras que en la etapa 2, no hubo estrés ($K_s = 1$). En cada riego se aplicó una lámina de 25 mm cada vez que se alcanzaba el umbral establecido para cada fase. Las láminas aplicadas a los tratamientos bajo riego fueron de 200 mm, 100 mm y 75 mm respectivamente. La precipitación ocurrida en el ciclo fue de 400 mm. Los resultados de esta experiencia establecen una respuesta significativa al riego complementario, con una producción de grano promedio de los tratamientos bajo riego de $16.633 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, contra $9.024 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, para el tratamiento sin riego. Comportamiento similar presentaron los componentes del rendimiento. La eficiencia de uso de agua, promedio, para los tratamientos regados fue de $2,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. El factor de respuesta de rendimiento obtenido fue de 1,5.

SUMMARY

This study reports the advantages of a suitable complementary irrigation schedule to obtain greater grain yield of irrigated corn, to guarantee constant yield production and to attain a rational water resource management. The experience was carried out during the 2005/6 cropping season on the experimental field of the National University of Rio Cuarto and using the meteorological information provided by the weather station installed on the same field. A randomized complete design with fourth treatments and six repetitions was used. The treatments were: T_0 with no irrigation; T_1 with irrigation provided when 25 mm of soil water content at field capacity were consumed; T_2 with irrigation of 25 mm provided during the whole cycle whenever the irrigation threshold previously set was reached. In T_3 , irrigation was provided based on three different phases of crop growing cycle: in phases 1 and 3, the irrigation threshold was a stress coefficient K_s of 0.80 while in phase 2, the irrigation threshold was with no stress ($K_s = 1$). Twenty five mm of water were applied each time the threshold established for each phase was reached. In the irrigation treatments, the water applied was 200mm, 100mm, and 75 mm, respectively. Rainfall within the cycle was 400mm. Experimental results showed a significant yield increase for the three irrigated treatments with an average yield of these treatments of 16,633 kg.ha⁻¹. The rainfed treatment yielded 9,024 kg.ha⁻¹. Yield components showed a similar behaviour. Water use efficiency for the irrigated treatments was 2.8 kg.m⁻³. The yield response factor was 1.5.

RESPUESTA DEL CULTIVO DE MAÍZ (*Zea mays* L.) A DIFERENTES MODELOS DE RIEGO COMPLEMENTARIO

INTRODUCCIÓN

El grano de maíz es el insumo clave de una creciente variedad de industrias, desde su uso como alimento humano y forraje de las producciones de carne o leche, hasta su procesamiento industrial en plantas de alta complejidad mecánica, química o biológica, cuyo producto final es una bebida, un alimento o un biocombustible.

La Argentina inició a mediados de la década del 90 un fuerte crecimiento de la producción (pasando de 7,7 millones a 19,5 millones de toneladas) y de las exportaciones (variando entre el 12 y el 16% del volumen mundial), ocupando el quinto lugar como productor mundial y segundo como exportador (SAGPyA, 2005). Entre los elementos que fundamentaron la competitividad figuran los bajos costos, los rendimientos crecientes y la calidad del cereal exportado (Muñoz, 2004). Es conocido el efecto positivo que tienen sobre la productividad y sustentabilidad de los sistemas, técnicas como la siembra directa, la rotación y la fertilización balanceada de cultivos. Otro elemento interesante de analizar es el riego, que constituye una tecnología que permite no solo aumentar la producción, sino también disminuir la acentuada variabilidad interanual de los rendimientos (Martellotto *et al.*, 2006).

Actualmente se ha verificado un continuo desplazamiento del cultivo de maíz por la soja, ubicándose la Argentina, en la actualidad, en el sexto lugar como país productor y en el tercer puesto como exportador. En la campaña 2004/05, con una superficie sembrada de 3.430.000 hectáreas, la producción alcanzó 19,5 millones de toneladas, record para este cultivo, mientras que en la campaña 2005/06 la producción disminuyó en 29,3%. Córdoba es la principal productora con 7.061.800 toneladas (campaña 2004/05), sufriendo una disminución del 26% en la campaña 2005/06 (SAGPyA, 2007).

En un sistema de producción agrícola intervienen varios factores del suelo, de la atmósfera y de la planta, que interactúan entre si en forma directa e indirecta sobre el cultivo. Sin embargo, el agua fue identificada desde hace tiempo como el factor que más incide en la producción de alimentos en todo el mundo. En este sentido se manifiesta la necesidad de usar inteligentemente el riego, que toma importancia cuando las lluvias son insuficientes, para compensar las pérdidas de agua por evapotranspiración. La necesidad de riego puede determinarse mediante el cálculo del balance diario del agua en el suelo, planificando las láminas a aplicar y sus frecuencias (Allen *et al.*, 1998).

Çakir (2004) definió sus tratamientos de riego en cuatro estadios del ciclo del cultivo: vegetativo, floración masculina, formación de espiga y grano lechoso con distintas combinaciones, concluyendo que las etapas más sensibles al déficit de agua son floración

masculina y formación de espiga. Los rendimientos promedio, obtenidos por este autor, fueron de 12.440 kg.ha⁻¹ cuando regó en las cuatro etapas definidas y de 3.140 kg.ha⁻¹ en el tratamiento sin riego.

Panda *et al.*, (2004) diferencia los tratamientos con distintos umbrales de riego (10, 30, 45, 60 y 70% del agotamiento del agua útil) obteniendo mejor comportamiento del cultivo de maíz cuando se regó al consumirse el 45% del agua útil.

Regionalmente se ha demostrado la importancia del riego en diferentes cultivos, entre ellos el de maíz, con aumentos en el rendimiento de aproximadamente 50% con respecto al de secano (Puiatti *et al.*, 1985; Rivetti *et al.*, 2001).

Rivetti (2004) dividió el ciclo del cultivo en 3 etapas (pre-crítico, crítico, post-crítico) con diferentes programas de riego, sin obtener diferencias significativas de rendimiento entre ellas, arrojando valores promedios entre 14.700 y 16.100 kg.ha⁻¹ para el híbrido Nidera AX 884.

En Manfredi, en el ciclo agrícola 2003/04, se obtuvieron rendimientos entre 12.700 y 14.300 kg.ha⁻¹ de maíz Nidera AX 882 con riego y fertilizante, mientras que en condiciones de secano el rendimiento fue de 7.900 kg.ha⁻¹ (Piatti, 2005).

En cultivos de maíz con estrés en pre-antesis el rendimiento fue un 22% (promedio de tres años, 1995, 96 y 97) menor al de las parcelas totalmente regadas, independientemente de las dosis de nitrógeno agregadas (Moser *et al.*, 2005).

Según Kirda *et al* (2005), el rendimiento en grano de maíz bajo riego durante todo el ciclo fue significativamente más alto (10 a 23%) al de los tratamientos con déficit de agua, los cuales comparativamente recibieron 50% menos agua de riego que el tratamiento anterior. La lámina de agua de riego aplicada fue de 421 mm.

Por otro lado, Farre y Faci (2006) en un ensayo de maíz con déficit de riego conducido en Zaragoza, España, encontraron importantes variaciones en el rendimiento, desde 10.800 a 1.000 kg.ha⁻¹, cuando realizaron 27 riegos de 20 mm y 4 mm respectivamente. La evapotranspiración del cultivo fue de 578 mm en las parcelas más regadas y de 234 mm en las parcelas con déficit de riego.

El maíz parece ser relativamente tolerante al déficit de agua durante el período vegetativo y el de maduración. La mayor disminución de los rendimientos de grano la ocasiona el déficit de agua durante el período de floración, incluyendo la formación de la inflorescencia, la formación del estigma y la polinización (15 días antes a 15 días después de la emergencia de los estigmas). Esto se debe a que en los primeros 15 días se define la cantidad de flores que serán fértiles mientras que en los segundos 15 días se define cuántas de estas flores fértiles serán granos. La pérdida de granos por espiga debido al aborto de estructuras reproductivas en situaciones sin estrés hídrico puede representar en maíz entre un

32% y un 38%, mientras que en situaciones de deficiencia de agua puede representar entre un 38% y un 82% (Uhart y Andrade, 1995)

Pandey *et al.*, (2000) encontraron que cuando no regaban en 4 o más fases (vegetativas y reproductivas) del ciclo del cultivo, se reducía el número de granos entre 20 y 50% comparados con el tratamiento control regado en todo el ciclo, como así también disminuía el peso del grano cuando provocaban déficit de agua en el cultivo, durante el crecimiento reproductivo y en algunas fases del crecimiento vegetativo.

Además la disminución de rendimiento es menos pronunciada cuando en el período vegetativo precedente, la planta ha sufrido déficit de agua. Un estrés en el período de formación de la cosecha puede traducirse en una reducción del rendimiento debido a la disminución del tamaño del grano, y en el período de maduración tiene poco efecto sobre el rendimiento de grano (Doorenbos y Kassam, 1979).

En la evaluación regional del riego con equipos presurizados (Puiatti *et al.*, 2002), se observó que los establecimientos relevados realizaban una programación deficiente del riego, encontrándose que la mayoría de los mismos no hacían uso de programas de riego basados en las necesidades hídricas de los cultivos y solo tenían en cuenta la operatividad de los equipos. En esta evaluación quedó de manifiesto la muy baja eficiencia de almacenaje del agua en el suelo, no obteniéndose diferencias significativas de producción en relación con los cultivos de secano.

El maíz es un cultivo eficiente en el uso del agua, ya que para obtener una producción máxima requiere en su ciclo entre 400 y 700 mm, dependiendo del clima (Doorenbos y Pruitt, 1977).

Los valores encontrados de eficiencia del uso de agua (EUA) por diferentes autores varían entre 0,5 kg.m⁻³ a 2,7 kg.m⁻³ (Pandey *et al.*, 2000; Kang *et al.*, 2000). Farré y Faci (2006) obtuvieron EUA entre 1,88 y 0,05 kg.m⁻³ en el ensayo mencionado anteriormente en España. En Río Cuarto se obtuvieron valores de EUA en cultivo de maíz bajo riego de 2,8 kg.m⁻³ y en secano de 2,9 kg.m⁻³ (Rivetti, 2004).

El propósito de este trabajo fue verificar las ventajas de una adecuada programación de riego complementario, que permita alcanzar una mayor producción de granos del cultivo de maíz bajo riego en la región de Río Cuarto, para asegurar una producción constante y lograr un manejo racional del recurso hídrico en un marco agrícola sustentable.

OBJETIVOS

- ❖ Evaluar los efectos de las diferentes programaciones de riego sobre el rendimiento en grano y sus componentes en el cultivo de maíz.
- ❖ Determinar para cada tratamiento la eficiencia del uso de agua.
- ❖ Establecer la relación uso de agua – rendimiento.

MATERIALES Y METODOS

La experiencia se desarrolló en el Campo Experimental de la Universidad Nacional de Río Cuarto, situado sobre la Ruta Nacional 36, km 601, Río Cuarto. Su ubicación geográfica es 33° 07' LS, 64° 14' LO y a 421 m snm.

El Departamento de Río Cuarto está conformado por cuatro grandes Unidades Ambientales, ubicándose Río Cuarto en la Llanura Subhúmeda bien drenada, con suelos, en su mayoría, Hapludoles típicos, sin problemas de drenaje interno o externo, caracterizándose por un relieve plano, pendientes menores al 2%, y bien desarrollados, sobre materiales loésicos, franco-arenosos (Figura 1) (Cantero *et al.*, 1998).

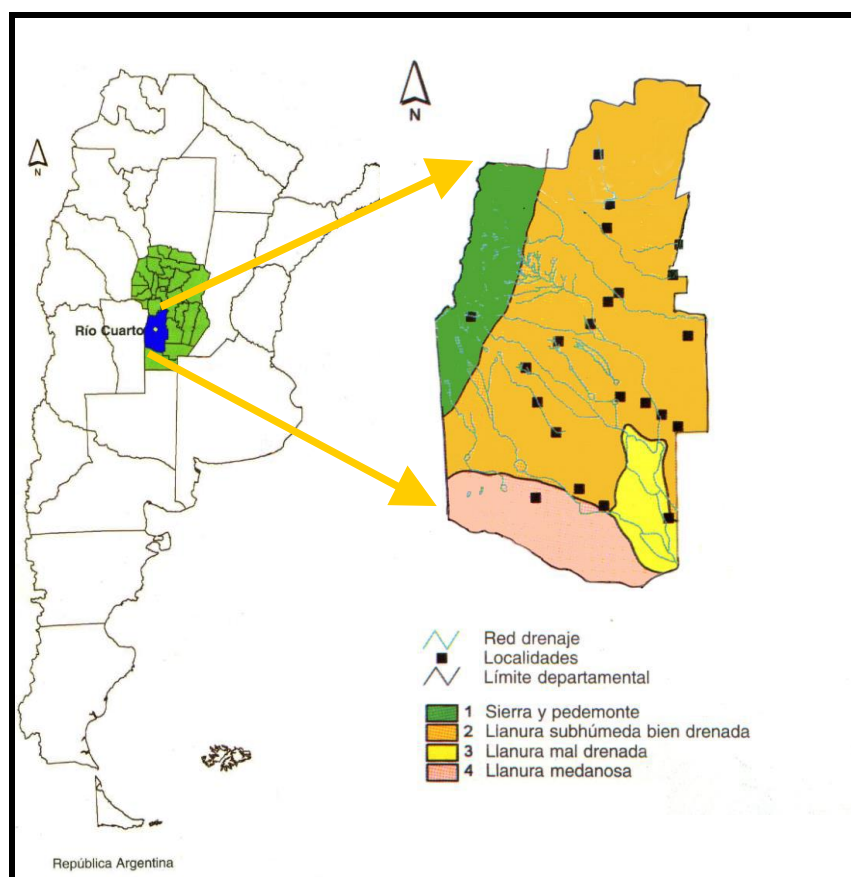


Figura 1: Unidades Ambientales del Departamento de Río Cuarto (Cantero *et al.* 1998)

El clima es templado-subhúmedo, con una media anual de lluvias entre 801,2 mm, (serie 1974-1993) concentrándose entre los meses de octubre a abril (Figura 2) (Seiler *et al.*, 1995).

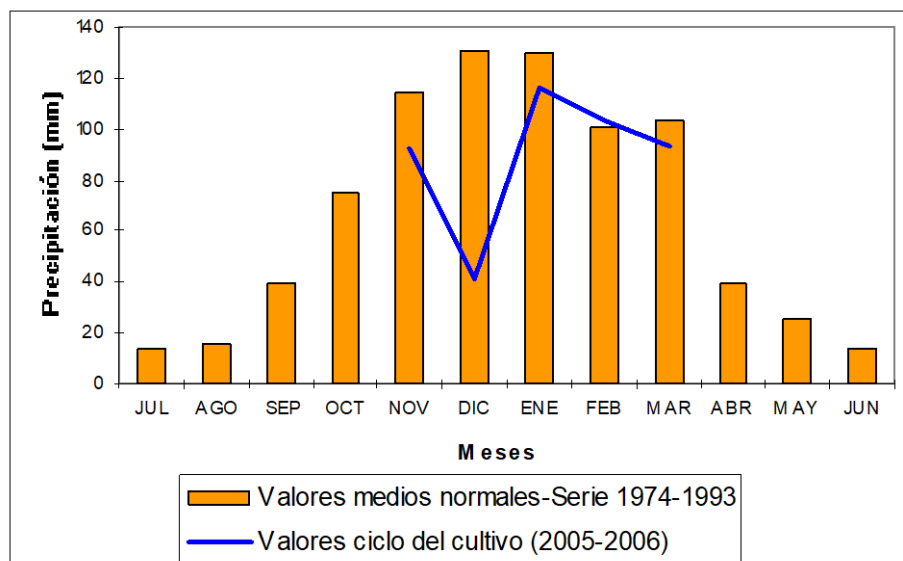


Figura 2: Precipitación (valores medios normales, serie 1974-1993 y valores del ciclo del cultivo 2005-2006)

El régimen térmico es templado-mesotermal, caracterizado por una temperatura media anual de 16,5°C, con máxima media para el mes más calido (enero) de 29°C y una mínima media de 3°C para el mes mas frío (julio). El período medio libre de heladas es de 255,7 días, la fecha media de la primera helada es el 25 de mayo ($\pm 14,3$ días) y de la última el 12 de septiembre con una desviación de $\pm 20,3$ días. La velocidad del viento, factor importante en la evapotranspiración de los cultivos, oscila entre 3,8 m.seg⁻¹ y 5,5 m.seg⁻¹ (Seiler *et al.*, 1995). La evapotranspiración potencial para el período 1974-1993, es la representada en la Figura 3, observándose que la mayor evapotranspiración coincide con el período crítico (diciembre-enero) del cultivo de maíz.

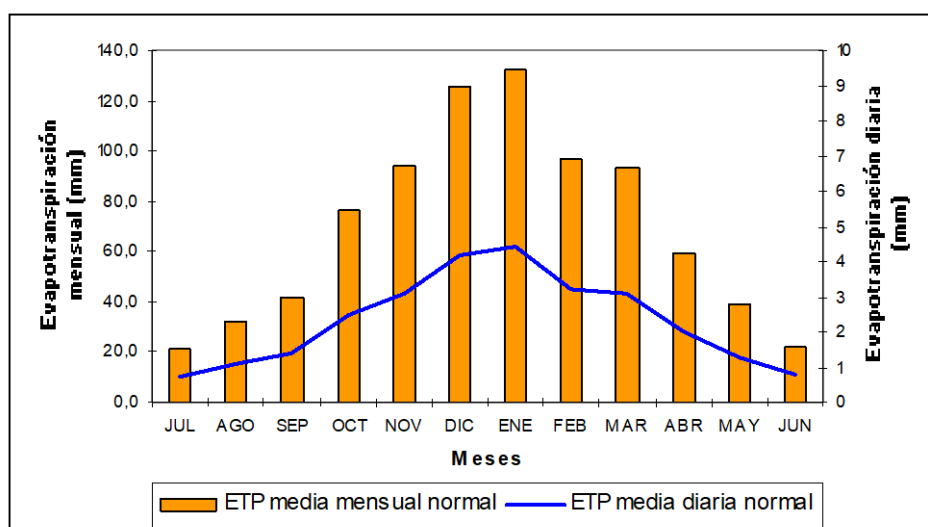


Figura 3: Evapotranspiración potencial para Río Cuarto (Seiler *et al.* 1995)

Se realizó, antes de la siembra, un análisis físico-químico de suelo a los fines de establecer los requerimientos de fertilización, determinando fósforo (P) en los primeros 20 cm y nitrógeno (N) hasta los 60 cm de profundidad (Cuadro 1). Además se determinaron los parámetros edáficos relacionados con el agua del suelo, capacidad de campo (Wc), punto de marchitez permanente (Wm) y densidad aparente (Da) en cada horizonte del perfil del suelo (Cuadro 2).

Cuadro 1: Análisis químico del suelo del ensayo.

Profundidad Horizontes (mm)	P (ppm)	N-NO ₃ (ppm)	NO ₃ (ppm)
0 - 50	34,00	14,1	62,46
51 - 200	29,00	13,7	60,69
201 - 360		14	62,02
361 - 600		9,3	41,2

Método de Kurtz y Bray I Reducción por Cadmio

Cuadro 2: Parámetros físicos del suelo

Profundidad Horizontes (mm)	Densidad Aparente (g.cm ⁻³)	Humedad gravimétrica (g.g ⁻¹)		Lámina de agua	
		Capacidad de campo (Wc)	Punto de marchitez (Wm)	Wc (mm)	Wm (mm)
0 - 50	1,23	20,72	8,49	12,74	5,22
51 - 200	1,32	21,72	10,86	43	21,51
201 - 360	1,36	22,19	10,38	48,29	22,59
361 - 600	1,26	19,61	9,09	59,31	27,5
601 - 810	1,26	17,89	8,09	47,34	21,4
811 - 990	1,26	18,52	7,93	42,01	17,99
				252,69	116,21

AU = 136.48

La siembra del cultivo se realizó el 3 de noviembre de 2005, con una densidad de 95.000 planta.ha⁻¹, y un distanciamiento entre hileras de 0,52 m, utilizando un híbrido simple de NIDERA (AX 882).

El diseño experimental empleado fue de parcelas totalmente al azar con cuatro tratamientos y seis repeticiones, correspondiendo al siguiente modelo:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde

Y_{ij} : representa observaciones debida a la i-ésima repetición (i= 1,2,3,4,5,6) del j-ésimo tratamiento (j= 1,2,3,4)

μ : efecto común para todo el experimento, media general

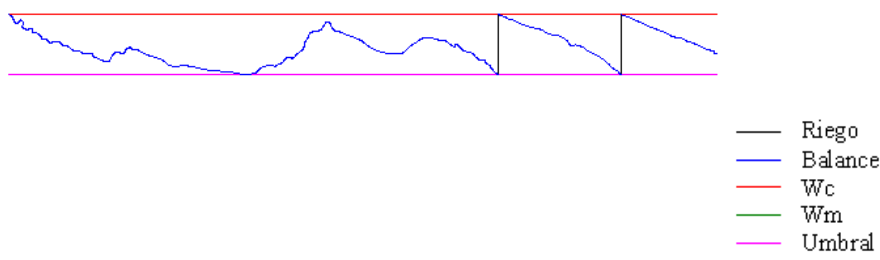
τ_j : efecto del tratamiento j-ésimo

ε_{ij} : error aleatorio presente en la i-ésima repetición del j-ésimo tratamiento.

Las parcelas experimentales tuvieron una dimensión de 13 m de ancho por 20 m de largo aplicándose los siguientes tratamientos:

T₀: sin riego;

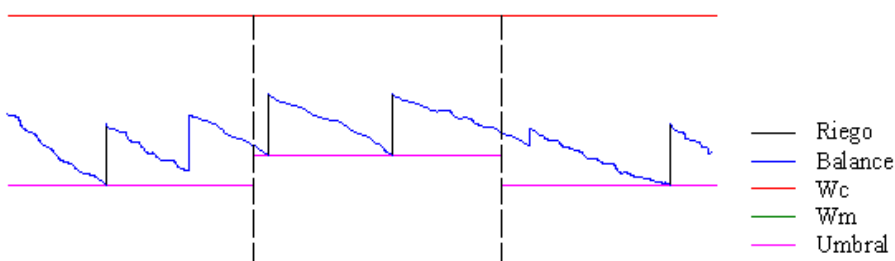
T₁: partiendo desde capacidad de campo, se regó durante todo el ciclo, aplicando la lámina necesaria para llevar la humedad del suelo a capacidad de campo cuando se consumían 25 mm, siempre y cuando el pronóstico extendido de 72 horas brindado por el Servicio Meteorológico Nacional no indique lluvias. En caso de no ocurrencia se aplicó la lámina indicada.



T₂: partiendo desde capacidad de campo, se regó durante todo el ciclo una lámina de 25 mm cada vez que se alcanzó el umbral de riego correspondiente, salvo que el pronóstico prevea precipitaciones.



T₃: el riego se realizó considerando tres fases: 1: desde siembra hasta 12 hojas, 2: desde 12 hojas hasta principio de grano lechoso y 3: desde grano lechoso hasta madurez fisiológica (Nicosia y Martín (h), 1998; Farré *et al.*, 2000 y Rivetti, 2004). En la fase 1 y 3 se contempló un umbral de riego considerando un coeficiente de estrés (K_s) de 0.80. En la fase 2, sin estrés ($K_s = 1$). En cada riego se aplicó una lámina de 25 mm cada vez que se alcanzó el umbral establecido para cada fase.



El umbral de riego considerado fue cuando se produjo el agotamiento del agua realmente disponible, que es una proporción (p) del agua totalmente disponible, de acuerdo a la metodología brindada por FAO (Allen *et al.*, 1998), que para maíz es:

$$p = 0,55 + 0,04 (5 - ET_c)$$

Donde:

ET_c = evapotranspiración del cultivo (mm)

La determinación del momento de riego se realizó mediante un balance del agua en el suelo, regando cuando el mismo determinaba el nivel de agotamiento permisible, aportándose la cantidad de agua que se determina en los distintos tratamientos.

El balance semanal expresado en términos de agotamiento del agua en el suelo al final de cada semana es:

$$Dri = Dri-1 - Pi - Ri + ETci + Ppi$$

Donde:

Dri: Agotamiento al final de la semana i (mm)

Dri-1: Agotamiento al final de la semana i-1 (mm)

Pi: Precipitación efectiva de la semana i (mm)

Ri: Riego de la semana i (mm)

ETci: Evapotranspiración del cultivo en la semana i (mm)

Ppi: Percolación profunda en la semana i (mm)

El Dri-1 en el inicio del balance se consideró como el agotamiento producido debido a la humedad inicial del día de la siembra. La lámina inicial, hasta 1 metro de profundidad del suelo fue de 244 mm, siendo la lámina a W_c de 252,69 mm, por lo tanto el balance se comenzó con 8,69 mm.

La precipitación efectiva (Pi) se estimó por el método que sigue el “Bureau of Reclamations” de los EE.UU. (Doorenbos y Pruitt, 1977), que permite obtenerla de acuerdo a rangos prefijados de incremento de la precipitación (Cuadro 1, Anexos).

El riego (Ri) se realizó con un equipo de avance lateral de 87,6 m de longitud de trabajo, la distribución del agua es por medio de tuberías de bajada y emisión mediante difusores con reguladores de presión (Figura 4). El agua, de muy buena calidad para riego, se obtuvo de una perforación ubicada en el mismo Campo Experimental.



Figura 4: Equipo de riego en la parcela de trabajo

La E_{Tc} se obtuvo mediante la ecuación citada por Allen *et al.*, (1998):

$$E_{Tc} = E_{To} \times K_c \times K_s$$

Donde:

E_{Tc} : Evapotranspiración del cultivo (mm/semana)

E_{To} : Evapotranspiración de referencia (mm/semana)

K_c : Coeficiente de cultivo

K_s : Coeficiente de estrés

Para la determinación de la E_{To} se utilizó la Ecuación de Penman- Monteith (Allen *et al.*, 1998). La información climática necesaria (precipitación, temperatura, humedad relativa, viento, presión atmosférica y radiación solar) se obtuvo de la Estación Agrometeorológica de la Universidad Nacional de Río Cuarto ubicada en el campo experimental donde se realizó el ensayo (Cuadro 2 Anexos).

El coeficiente de cultivo (K_c) es variable según las características del cultivo, fecha de siembra, condiciones climáticas, y en la primera fase de crecimiento, varía con la frecuencia de lluvias y/o riegos. Se utilizó el K_c que se obtuvo en la campaña 2001/02, en el mismo campo experimental de este ensayo (Cuadro 2 Anexos) (Rivetti *et al.*, 2001).

El coeficiente de estrés (K_s) depende del grado de disponibilidad de agua en el suelo, toma valor 1 cuando el suelo está en capacidad de campo o próximo a ella y valores menores a 1 cuando el agua del suelo se va agotando.

La percolación profunda (P_{pi}) se consideró cuando la lámina de agua del suelo superaba la lámina de capacidad de campo.

La cuantificación del rendimiento de grano se realizó en madurez fisiológica. Para ello se cosechó manualmente una superficie de 10 m², en cada tratamiento y repetición. La

trilla se realizó con una trilladora estacionaria. El peso de los granos fue ajustado a humedad de comercialización (14%).

En la cosecha se determinó el número de espigas por planta, el número de hileras por espiga y el número de granos por hilera. Los dos últimos valores se cuantificaron evaluando 5 espigas al azar de las recogidas para producción de grano. El peso de los 1000 granos, se obtuvo a partir de una muestra de 500 granos contados manualmente. Todas estas determinaciones se realizaron para cada tratamiento y repetición.

La eficiencia de uso del agua (EUA) representa el rendimiento de grano por unidad de agua usada por el cultivo. Se utilizó, para su obtención, lo sugerido por Tanner y Sinclair (1983) (Citado en: Hatfield *et al.*, 2001), quienes resumieron las distintas formas que pueden ser usadas para caracterizarla de la siguiente manera:

$$EUA = \frac{Y}{ETc}$$

Donde:

EUA: Eficiencia de uso del agua (kg.m^{-3})

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

ETc: Evapotranspiración del cultivo (m)

La evaluación estadística de los datos se realizó por medio de análisis de varianza y prueba de Tukey para comparación de medias, empleando el Programa Estadístico S.A.S. (SAS System, 1996).

La relación uso de agua-rendimiento se evaluó por medio de un análisis de regresión, usando los datos de evapotranspiración y rendimiento de grano obtenidos del ensayo. El valor del Factor de Respuesta al rendimiento (ky) fue determinado usando el modelo de Stewart (Stewart *et al.*, 1977):

$$\left(1 - \frac{Ya}{Ym}\right) = ky \left(1 - \frac{ETa}{ETm}\right)$$

Donde:

Ya: Rendimiento actual cosechado (kg.ha^{-1})

Ym: Rendimiento máximo cosechado (obtenido desde el tratamiento 1, regado en todo el ciclo) (kg.ha^{-1})

Ky: Factor de respuesta de rendimiento

ETa: Evapotranspiración actual (mm) (ETc de cada tratamiento)

ETm: Evapotranspiración máxima (mm) (ETc máxima).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los riegos que se realizaron en los diferentes tratamientos fueron: en T1, 8 riegos totalizando una lámina de 200 mm, en T2, 4 riegos con una lámina total de 100 mm y en T3, 3 riegos, 75 mm en total.

Las precipitaciones del ciclo del cultivo fueron de 400 mm mientras que la evapotranspiración del cultivo fue de 468 mm para el tratamiento sin riego y de 623 mm para los tratamientos sin déficit hídrico. En T3 (con estrés) se observó una evapotranspiración en el ciclo del cultivo de de 535 mm.

En el Cuadro 3 se indican los diferentes riegos semanales aplicados y la evapotranspiración del cultivo para igual período, en cada uno de los tratamientos.

Cuadro 3: Láminas de agua aplicadas semanalmente (R, mm), precipitación efectiva y evapotranspiración del cultivo (ETc, mm).

Semanas del Ciclo	Precip. Efec. (mm)	T0		T1		T2		T3	
		ETc	R	ETc	R	ETc	R	ETc	R
1	0	7,61		11,463		11,463		9,171	
2	43,6	16,68		16,68		16,68		13,34	
3	14	17,58		14,361		14,361		11,49	
4	8	23,67		23,667		23,667		18,93	
5	24	13,29		13,259		13,259		10,61	
6	4	26,78		26,414	25	26,414		21,13	
7	32,8	33,42		33,516	25	33,516	25	26,81	25
8	0	39,89		39,984		39,984		31,99	
9	4	36,18		49,703	25	49,703	25	49,7	
10	16	25,83		56,171	25	56,171		56,17	
11	48,8	19,24		37,576	25	37,576	25	37,58	25
12	2	27,36		38,115	25	38,115		38,12	
13	25,5	28,73		47,355	25	47,355	25	37,88	25
14	67	19,43		30,261		30,261		24,21	
15	3	33,38		34,717	25	34,717		27,77	
16	0	22,25		42,911		42,911		34,33	
17	14	11,63		25,136		25,136		20,11	
18	39,2	17,27		20,167		20,167		16,13	
19	8	21,93		26,208		26,208		20,97	
20	11	14,85		21,272		21,272		17,02	
21	35	11,27		14,591		14,591		11,67	
TOTALES	399,9	468,27	0	623,53	200	623,53	100	535,1	75

Los datos de rendimientos y sus componentes obtenidos en el ensayo se presentan en el Cuadro 4.

Cuadro 4: Rendimiento ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y sus componentes (N° de granos por m^2 y peso de mil granos)

T	R	N° hil/esp	N° gran/hil	N° gran/esp	Peso mil granos	N° granos. m^{-2}	Rend ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)
0	1	14	24	340	347	3059	10490
	2	14	21	304	322	2735	8051
	3	14	27	369	337	3317	9344
	4	14	25	343	345	3087	10434
	5	15	21	315	323	2837	8042
	6	14	22	292	313	2632	7782
	Prom	14	23	327	331	2944	9024
1	1	15	44	666	394	5992	17960
	2	16	41	643	381	5788	18433
	3	16	42	679	382	6109	17871
	4	16	43	690	363	6211	16619
	5	16	41	659	347	5934	18125
	6	15	40	600	341	5404	16008
	Prom	16	42	656	368	5906	17502
2	1	16	40	630	340	5672	16275
	2	16	40	629	346	5658	16502
	3	16	41	667	349	6007	15972
	4	16	40	635	325	5716	14627
	5	16	37	597	379	5371	14879
	6	16	39	610	357	5490	16539
	Prom	16	40	628	349	5652	15799
3	1	15	39	604	357	5433	17243
	2	15	40	611	376	5499	17381
	3	15	42	642	348	5780	17036
	4	16	40	624	350	5616	15732
	5	15	41	628	374	5655	16934
	6	16	40	654	339	5889	15259
	Prom	16	40	627	357	5645	16597

Nota: T: Tratamiento; R: Repetición y Prom: Promedio.

El rendimiento promedio del testigo, sin riego, fue de $9.024 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, un 46% menor que el promedio de los diferentes tratamientos bajo riego. Los valores correspondientes a los tratamientos bajo riego variaron entre $15.799 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ y $17.502 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

El análisis estadístico correspondiente se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5: Análisis estadístico de la producción (Rendimiento promedio, coeficiente de variación (CV) y diferencia mínima significativa (DMS)

	TRATAMIENTOS			
	SIN RIEGO	CON RIEGO		
	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃
Producción de granos	9024 a C.V.= 12.72	17502 b C.V.= 5.49	15799 b C.V.= 5.32	16597 b C.V.= 1.39
	C.V.= 8.86		D.M.S. = 2121	
Nº de granos por m ²	2944 a C.V.= 8.1	5906 b C.V.= 4.8	5652 b C.V.= 2.9	5645 b C.V.= 5.89
	C.V.= 4.69		D.M.S. = 381.58	
Peso promedio mil granos (g)	331.3 a C.V.=3.5	368.1 b C.V.= 5.7	349.3 ab C.V.=3.0	357.3 ab C.V.=3.7
	C.V.= 4.90		D.M.S. = 27.84	
Valores con la misma letra no presentan diferencia significativa al 0,05 según test de Tukey				

El análisis estadístico correspondiente a la producción de grano mostró respuesta al riego, ya que hubo diferencia estadística significativa entre el tratamiento sin riego y los tratamientos regados, no registrándose diferencias entre estos últimos.

El número de granos por m² está en función del número de granos por espiga (número de hileras por espiga multiplicado por el número de granos por hilera) y del número de espigas por m². El análisis estadístico presentó el mismo comportamiento que el rendimiento de grano.

El peso medio de los 1000 granos depende de la duración del período efectivo de llenado desde fecundación hasta la formación de la capa de abscisión en la base del grano (capa negra) y de la tasa de llenado. El tratamiento regado durante todo el ciclo fue el único que marcó diferencia significativa en relación al sin riego.

Rendimientos similares a los precedentes fueron obtenidos en Manfredi y en Río Cuarto por Piatti (2005) y Rivetti (2004), respectivamente.

Diferentes autores, al provocar déficit de agua en alguna etapa del ciclo del cultivo, encontraron que los rendimientos variaban significativamente, lo cual no coincide con el presente trabajo, ya que no se encontró diferencia estadística significativa entre los tratamientos regados. Pero, los mismos autores observan diferencia entre los tratamientos con déficit hídrico y el tratamiento sin riego, coincidente con este ensayo (Çakir, 2004; Panda *et al.* 2004; Moser *et al.*, 2005; Kirda, *et al* 2005).

Con respecto a la Eficiencia del Uso de Agua (EUA) los resultados obtenidos para cada tratamiento se presentan en el Cuadro 6, observándose que la EUA fue menor en el tratamiento sin riego a diferencia de lo expuesto por otros estudios que indican aumento de la

EUA cuando disminuye la evapotranspiración del cultivo (Kang *et al.*, 2000; Karam *et al.*, 2003).

Entre los tratamiento con riego, el T3, con menor ETc, no tiene diferencia estadística significativa con el T1, mientras que el T2 con igual ETc que el T1, sí manifiesta diferencia estadística significativa.

Cuadro 6: Eficiencia del uso de agua

Tratamiento	EUA ($\text{gm.m}^{-2}.\text{mm}^{-1}$)
T0	1.9 c
T1	2.8 a
T2	2.5 b
T3	3.1 a

Valores con la misma letra no presenta diferencia significativa

Alfa = 0,05 según Test de Tukey.

DMS = 0.3 Error = 0.03

Al analizar la relación entre rendimiento de grano y evapotranspiración del cultivo puede observarse que ésta ajustó a un modelo polinómico de segundo grado, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,90, de donde surge que la variación en la ETc explica el 90% de la variación en el rendimiento (Figura 5). Esta ecuación es valida para las condiciones ambientales y edáficas de esta campaña y para el híbrido utilizado.

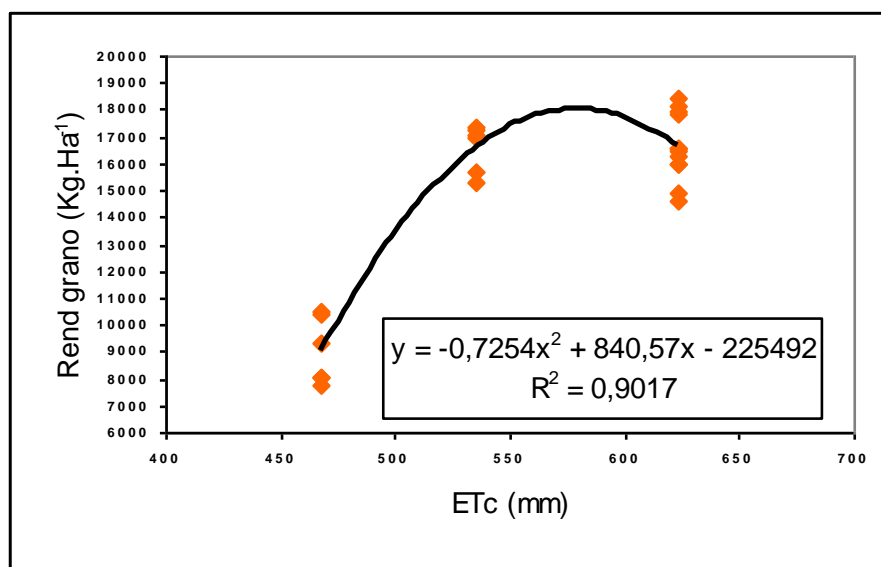


Figura: 5. Relación entre el rendimiento en grano y la ETc

Se analizó la relación uso del agua – rendimiento, obteniendo por medio de un análisis de regresión el Factor de respuesta de rendimiento (k_y), que relaciona el decrecimiento relativo de rendimiento con el déficit relativo de evapotranspiración (Figura 6). La pendiente de la recta de regresión representa el k_y , cuyo valor es de 1,5, para un R^2 de 0,63.

Cabe aclarar que la línea de tendencia fue forzada a pasar por el punto (0,0), fundamentándose en que bajo un déficit nulo de evapotranspiración, la pérdida de rendimiento también es nula.

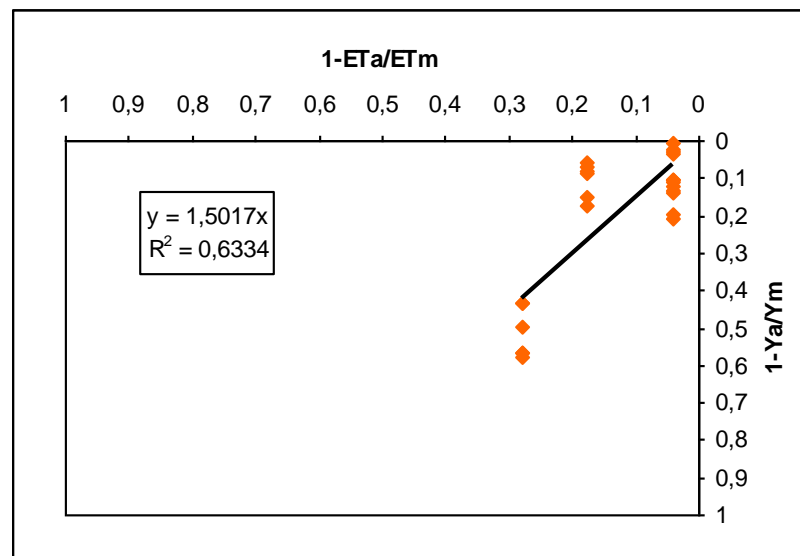


Figura 6: Relación uso de agua – rendimiento

El valor estandarizado de k_y para maíz es de 1,25 (Doorenbos y Kassan, 1979). Sin embargo, Çakir (2004) señaló que el valor de k_y variaba de acuerdo al lugar donde se realizaba el cultivo, e incluso en una misma localidad variaba de año en año. Obtuvo valores de k_y de 1,36 para un año con severa sequía y de 0,81 cuando la precipitación total estacional excedió los 200 mm. En este ensayo k_y alcanzó un valor mayor al estandarizado, lo cual significa una mayor incidencia del déficit de evapotranspiración relativa en la producción. Es por ello que Doorenbos y Kassan (1979) incluyen al maíz en el grupo de $k_y > 1$ debido a que es un cultivo que sufre por el efecto de la sequía.

CONCLUSIONES

- ❖ El rendimiento en grano y sus componentes en el cultivo de maíz muestra respuesta al riego.
- ❖ La eficiencia del uso del agua fue mayor cuando el cultivo sufrió estrés hídrico en los períodos pre y postcrítico.
- ❖ El valor de k_y obtenido, mayor a 1, confirma que el maíz es un cultivo susceptible al déficit hídrico.

BIBLIOGRAFIA

ALLEN, R.G. PEREIRA L.S., RAES D., y M. SMITH 1998 **Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements**. FAO. Irrigation and drainage. Paper 56. Roma. 300 pp.

ÇAKIR, R. 2004 Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. **Field Crops Research** 89(1): 1-16

CANTERO A., CANTU M.P., CISNEROS J.M., CANTERO J.J., BLARASIN M., DEGIOANNI A., GONZALEZ J., BECERRA V., GIL 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.

DOORENBOS, J. y A.H. KASSAM 1979 Yield response to water. **FAO irrigation and drainage**. Paper n° 33. Pag. 101-104.

DOORENBOS, J. y W.O. PRUITT 1977 **Las necesidades de agua de los cultivos**. Serie Riego y Drenaje. FAO N° 24. Roma. 195 pp.

FARRÉ, I. y J.M. FACI 2006 Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment. **Agricultural Water Management** 83:135-143.

FARRÉ, I.; VAN OJEM, M.; LEFFELAAR, P.A. y J.M. FACI 2000 Analyses of maize growth for different irrigation strategies in northeastern Spain. **European Journal of Agronomy** 12:225-238.

HATFIELD, J.L., SAUER, T.J. y J.H. PRUEGER 2001 Managing soils to achieve greater water use efficiency. A Review. **Agronomy Journal** 93:271-280.

KANG, S., SHI, W. y J. ZHANG 2000 An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation. **Field Crops Research** 67: 207-214.

KARAM, F., BREIDY, J., STEPHAN, C. y J. ROUPHAEL 2003. Evapotranspiration, yield and water use efficiency of drip irrigated corn in the Bekae Valley of Lebanon. **Agricultural Water Management**. 63:125-137.

KIRDA, C.; TOPCU, S.; KAMAN, H.; ULGER, A.C.; YAZICI, A.; CETIN, M. y M.R. DERICI 2005. Grain yield response and N-fertilizer recovery of maize under deficit irrigation. **Field Crops Research** 93:132-141.

MARTELLOTTO, E.; SALINAS, A.; SALAS, P.; GIUBERGIA, J.P.; LINGUA, S.; PIATTI, F. y E. LOVERA 2006 Resultados en maíz con riego suplementario en siembra directa continua en la EEA-INTA Manfredi. Campaña 2003-04. En: www.elsitioagricola.com/maiz. Consultado: 23/09/06.

MOSER, S.B.; FIEL, B.; JAMPATONG, S. y P. STAMP 2005 Effects of pre-anthesis drought, nitrogen fertilizer rate, and variety on grain yield, yield components, and harvest index of tropical maize. **Agricultural Water Management** 81(1-2):41-58.

MUÑOZ, R. 2004 Las Exportaciones Argentinas de Maíz. **IDIA XXI**, N° 6:181-183.

NICOSIA, M.G. y G.O. MARTIN (h) 1998 Producción de maíz (Parte III). Algunos aspectos relevantes. **Cát. Forrajes y cereales. Fac. de Agronomía y Zootecnia. UNT: Tucumán**. En: www.produccion.com.ar/1998/98oct_09.htm. Consultado: 02/02/06.

PANDA, R.K., BEHERA, S.K. y P.S. KASHYAP 2004 Effective management of irrigation water for maize under stressed conditions. **Agricultural Water Management** 66: 181-203.

PANDEY, R.K., MARANVILLE, J.W. y A. ADMOU 2000 Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment. I. Grain yield and yield components. **Agricultural Water Management**. 46:1-13.

PIATTI, F.D. 2005 Red interna de evaluación de híbridos comerciales de maíz. Resultados campaña 2003/2004. Ediciones: INTA – EEA Manfredi. Area de Mejoramiento Vegetal. Sección maíz-soja-trigo. En: www.inta.gov.ar/manfredi/info/documentos/docprodveg/maiz/maiz0304.pdf. Consultado: 08/01/07.

PUIATTI J.M., CRESPI R.J., RIVETTI A.R., CANTERO A. y E. BONADEO 1985 Respuesta del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) al riego y a la fertilización en la zona de Río Cuarto. **XII Congreso Nacional del Agua**. Tomo II (b): 15-32. Mendoza. Argentina.

PUIATTI J.M., CRESPI R.J. y A.R. RIVETTI 2002 Riego con equipos presurizados. **Rev. FCA UNCuyo**. Tomo XXXIV. N° 2: 27-33.

RAVELO, A.C. y R. A. SEILER 1978/79 Agroclima de la Provincia de Córdoba. Expectativa de precipitación en el curso del año. **RIA. INTA. Serie B. Clima y Suelo**. Buenos Aires.

RIVETTI, A., PUIATTI J.M.P., MORÁBITO J.A. y A.N. GARELLO 2001 Riego complementario del maíz en la zona semiárida Argentina en el marco de una agricultura sustentable. **Seminario Nacional "Manejo sustentable del recurso hídrico en zonas áridas"**. Mendoza. Argentina. Pag. 107.

RIVETTI, A.R. 2004 **Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto – Córdoba – Argentina**. Tesis: Magíster Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. 92 pags.

SAGPyA 2005 Estimaciones Agrícolas – Cereales - Maíz. En www.sagpya.mecon.gov.ar/agricultura/estimaciones/infomaiz.php. Consultado: 20/01/06.

SAGPyA 2007 Estimaciones Agrícolas – Cereales - Maíz. En www.sagpya.mecon.gov.ar/new/0-0/agricultura/otros/estimaciones/pdfmensual/diciembre_06.pdf. Consultado: 05/01/07.

SAS System For Windows Release 6.12 1989-1996 SAS Intitute Inc.USA

SEILER R.A., FABRICIUS R.A., ROTONDO V.H. y M.G. VINOCUR 1995 **Agroclimatología de Río Cuarto - 1974 / 1993**. Vol I. FAV. UNRC. Río Cuarto. Córdoba. Argentina. 68pp.

STEWART, J.I., CUENCA, R.H., PRUIT, W.O., HAGAN, R.M. y J. TOSSO 1977 Determination and utilization of water production functions for principal California crops. **W-67. California Contribution Project. University of California.**

UHART, S. A. y ANDRADE, F. H. 1995. Nitrogen deficiency in maize (*Zea mays* L.). II. Carbon-nitrogen interaction on kernel number and grain yield. **Crop Science**. 35:1384-1389.

ANEXOS

Cuadro 1: Rangos prefijados de incrementos de precipitación (Doorenbos y Pruitt, 1977)

Rango de lluvia caída (mm)	Agua aprovechada (%)
0 – 15	100
15 – 25	90
25 – 50	85
50 – 75	75
75 - 100	50
100 - 125	30
125 - 150	10
> 150	0

Cuadro 2. Datos climáticos de la Estación Meteorológica de la FAV.

Semanas	T° max (°C)	T° min (°C)	T° med (°C)	P (mm)	RS (MJ.m ⁻² dia ⁻¹)	HR max (%)	HR min (%)	V (m.seg ⁻¹)	P atm (kPa)	Kc
1	26,26	8,44	17,67	0	26,78	93	31	3,63	96,9	0,46
2	29,03	13,85	20,64	49	27,32	90	46	1,53	96,43	0,46
3	28,91	14,94	21,34	14	25,86	95	59	2,9	96,06	0,46
4	31,94	15,3	23,82	8	29,22	84	38	3,19	95,78	0,46
5	25,71	14,39	18,63	26	19,68	99	64	2,81	96,29	0,47
6	28	10,23	19,31	0	31,14	89	38	3,1	96,48	0,57
7	32,73	17,32	24,26	35	27,81	96	44	2,79	96,04	0,7
8	31,65	16,03	23,47	0	30,42	93	49	3,17	96,39	0,84
9	33,97	18,15	25,4	4	28,43	94	41	3,19	96,23	0,97
10	34,83	18,84	26,01	16	29,14	92	46	2,87	96,1	1,08
11	30,35	17,15	23,45	65	19,92	97	66	3,17	96,25	1,1
12	27,89	14,48	20,83	2	25,73	99	62	2,87	96,62	1,1
13	32,95	17,9	25,08	30	27,06	97	54	2,33	96,18	1,1
14	29,21	18,58	22,87	78	19,38	100	78	2,07	96,1	1,1
15	27,86	14,58	20,48	3	24,93	100	69	1,92	96,69	1,09
16	32,49	16,15	24,19	0	28,47	98	54	2,24	96,35	1,02
17	26,92	12,86	19,25	14	23,12	100	67	2,69	96,24	0,94
18	25,11	12,43	17,49	41	18,49	100	69	2,13	96,48	0,86
19	30,03	13,73	21,13	8	24,28	98	56	2,4	96,16	0,78
20	27,89	11,89	19,26	11	22,43	99	59	2,49	96,35	0,71
21	27,03	12,68	19,4	41	19,25	97	57	2,48	96,68	0,63

Referencias:

T° max: Temperatura máxima del aire

T° min: Temperatura mínima del aire

T° med: Temperatura media del aire

P: Precipitaciones

RS: Radiación solar

HR max: Humedad relativa máxima

HR min: Humedad relativa mínima

V: viento

P atm: Presión atmosférica

Kc: Coeficiente de cultivo