

Producción de maíz con estrés hídrico provocado en diferentes etapas de desarrollo

Giménez, Luis¹

Departamento de Producción Vegetal. Facultad de Agronomía. Universidad de la República. Estación Experimental Mario A. Cassinoni (EEMAC). Ruta 3, km 363, 60000. Paysandú, Uruguay. Correo electrónico: kapoexe@fagro.edu.uy

Recibido: 10/11/11 Aceptado: 30/5/12

Resumen

El maíz es un cultivo de elevado potencial en producción de grano y es altamente sensible a las deficiencias ambientales. La disponibilidad hídrica es la principal limitante del ambiente que presenta Uruguay para el desarrollo de maíz, debido a la baja capacidad de almacenamiento de agua de los suelos, las elevadas demandas atmosféricas y la irregularidad de las precipitaciones (PP). El trabajo consistió en determinar los rendimientos de maíz en situaciones de bienestar hídrico (T1) y cuantificar las disminuciones de rendimiento generadas por la ocurrencia de estrés hídrico durante: el periodo crítico (PC) (T2), el llenado de grano (T3), la etapa vegetativa y el PC (T4); además se evaluó un testigo en secano (T5). El estrés hídrico en distintas etapas se generó a través de simuladores de sequía y el bienestar hídrico por medio de riego suplementario. Los resultados mostraron que el rendimiento sin deficiencias hídricas se ubicó entre 13,5 y 15,3 t ha⁻¹ aproximadamente. Las deficiencias de agua durante el PC provocaron pérdidas de rendimiento aproximadas al 50% del potencial. El estrés hídrico en el llenado de grano generó disminuciones del rendimiento cercanas a 30% y las deficiencias acumuladas en la etapa vegetativa y el PC provocaron un descenso del rendimiento de 56%.

Palabras clave: maíz, estrés hídrico, riego suplementario

Summary

Production of Corn with Water Stress at Different Stages of Development

Corn is a crop of high potential for grain production and it is also highly sensitive to environmental deficiencies. Water availability is the main environmental limiting factor that Uruguay presents to corn development, due to low water storage capacity of the soil, high atmospheric demands and irregular rainfall. The work consisted in determining the yields of corn in situations of water wellness (T1), and quantify the decreases generated by the occurrence of water stress during: the critical period (CP) (T2), grain filling (T3), and vegetative stage and CP (T4); it was also evaluated a witness in rainfed (T5). Water stress was generated at various stages through drought simulators and water wellness by supplementary irrigation. The results showed that the yield without water deficiencies was between 13,5 and 15,3 t ha⁻¹ approximately. Water deficiencies during CP caused losses of approximately 50% of the potential yield. Water stress at grain filling caused generated yield reductions close to 30%, and the deficiencies accumulated in the vegetative stage and CP caused a decline of 56%.

Key words: corn, water stress, supplementary irrigation

Introducción

El maíz es una gramínea de tipo fotosintético C4 con elevados potenciales de producción de biomasa y rendimiento. A su vez posee altas exigencias en el ambiente de producción y en la tecnología aplicada (Andrade, *et al.*, 1996).

El rendimiento promedio obtenido de maíz en condiciones de secano presenta una brecha muy amplia en relación al logrado con riego suplementario (Sawchik y Formoso, 2000; Cardellino y Baetghen, 2000).

Este comportamiento se explica porque la principal limitante ambiental del Uruguay para la producción de cul-

tivos de verano es la disponibilidad hídrica (Sawchik y Cereña, 2005), debido a la escasa capacidad de almacenamiento de agua de los suelos (Molfino y Califra, 2001), a las demandas atmosféricas elevadas del verano (Baethgen y Terra, 2010) y a la irregularidad de las precipitaciones, que generalmente, no cubren las necesidades de los cultivos.

El riego es la tecnología que permite levantar la limitante ambiental de mayor importancia para la producción de maíz, sin embargo es utilizado escasamente por diferentes motivos, entre los que se destacan las inversiones y los costos operativos para desarrollar cultivos con riego.

Diferentes trabajos han evaluado la respuesta al riego en maíz utilizando como criterio de manejo del agua cubrir la evapotranspiración del cultivo (ETc) durante la totalidad del ciclo (Cardellino y Baethgen, 2000; Sawchik y Formoso, 2000). Esta estrategia permite que el cultivo transpire en su máximo potencial y logre los mayores rendimientos posibles.

Sin embargo el enfoque de aplicar riego satisfaciendo el total de las necesidades del cultivo es cada vez más cuestionado a nivel mundial, debido al volumen de agua requerido, a los efectos negativos que pueden tener los excesos hídricos sobre el medio ambiente (Feres y Soriano, 2007) y a los costos elevados que implica este manejo del agua.

Existen estrategias alternativas que mejoran la eficiencia de uso del agua, como el riego deficitario controlado (Feres y Soriano, 2007). Este utiliza como criterio la disminución de los volúmenes de agua aplicados y considera la importancia diferencial de las etapas fenológicas en la concreción del rendimiento. En esta estrategia se priorizan las aplicaciones de agua en los PC (English *et al.*, 1990).

En maíz las deficiencias hídricas causan efectos diferenciales en el rendimiento de acuerdo a la intensidad y etapa del ciclo en que se produzcan (Claassen y Shaw, 1970).

Los efectos del estrés hídrico en la etapa vegetativa de maíz fueron evaluados por Cakir (2004) durante tres años. Obtuvo reducciones en la biomasa de 28 a 32%, pero no constató mayores diferencias en el rendimiento con el testigo regado durante todo el ciclo.

Durante el desarrollo reproductivo el estrés hídrico reduce el número de granos debido a caídas en las tasas de fotosíntesis y en el flujo de asimilados a los órganos en desarrollo (Schussler y Westgate, 1995).

Se destaca la sensibilidad del maíz a limitantes en la disponibilidad hídrica en el entorno de la floración (Otegui *et al.*, 1995), ya que durante esa etapa se fija el número de granos por superficie, que es el componente principal del rendimiento. Asimismo, las deficiencias hídricas en la flora-

ción incrementan la asincronía entre la liberación de polen y la emergencia de los estigmas, esto provoca fallas en la polinización (Hall *et al.*, 1982). Para lograr un número de granos por superficie elevado se requieren altas tasas de crecimiento del cultivo durante el entorno de la floración (Andrade *et al.*, 2000) y para ello, entre otros factores, es determinante el estado hídrico del cultivo en dicha etapa. Las deficiencias hídricas en la fase de llenado de grano tienen menor influencia sobre el rendimiento debido a que no afectan el número de granos por superficie, sino que influyen principalmente sobre el peso de grano.

NeSmith y Ritchie (1992), trabajando con deficiencias hídricas durante el llenado de grano, obtuvieron reducciones en la biomasa producida de 23 a 36% y del rendimiento de 21 a 40% en relación al testigo sin deficiencias. Estos autores concluyen que la importancia del estrés hídrico sobre el rendimiento en esta etapa depende de cuán temprano ocurra el mismo. En el caso de que las deficiencias ocurran en las primeras etapas del llenado de grano (fase lag) los efectos depresivos son mayores, ya que se afecta el número de granos fijados.

Para una correcta evaluación de posibles estrategias de manejo del agua de riego en maíz se deben conocer los efectos que provocan las deficiencias hídricas sobre el rendimiento en las distintas etapas de desarrollo del cultivo. Cabe indicar que el tema no ha sido estudiado en las condiciones agro-climáticas del país.

El objetivo del trabajo fue determinar el rendimiento de maíz en situaciones de bienestar hídrico y cuantificar las disminuciones que se generan por la ocurrencia de estrés hídrico en las principales etapas de desarrollo.

Materiales y métodos

El trabajo se desarrolló en el campo experimental de riego de la Estación Experimental Dr. M.A. Cassinoni de la Facultad de Agronomía, ubicado en el Departamento de Paysandú a 32° 22' S y 58° 03' W, durante los años agrícolas 2009/10 y 2010/11.

El suelo del campo experimental se caracterizó como un Brunosol sub-éutrico típico (Fine, thermic, superactive, mixed, Pachic Argiudoll), perteneciente a la formación Fray Bentos y a la unidad San Manuel en la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (escala 1:1000.000) (Altamirano *et al.*, 1976).

El análisis químico realizado en 2009 indicó que poseía 1,91% de C orgánico, 8 ppm de N-NO₃ y 10 ppm de P Bray 1. En 2010 el análisis mostró un resultado de 6 ppm de N-NO₃ y 20 ppm de P Bray 1.

Los ensayos fueron fertilizados en 2009 con 300 k ha⁻¹ de N aplicados en el estadio V6, usando como fuente urea (46-0-0), la fertilización fosfatada se realizó con 120 k ha⁻¹ de P₂O₅ y la fuente fue superfosfato triple de calcio (0-46-46-0) aplicado previo al laboreo. En 2010 se fertilizó solo con N en la misma dosis, momento y fuente que el año anterior.

El laboreo realizado en ambos ensayos fue de tipo convencional y se realizó con rastra excéntrica y rastra de dientes.

Los parámetros hídricos y físicos del suelo se muestran en el Cuadro 1.

Las siembras fueron realizadas con una sembradora experimental (Wintersteiger PLOTMAN, Gesellschaft m.b.n. & CO, Austria), el 22 y el 27 de octubre de 2009 y de 2010, respectivamente.

El material genético utilizado fue el híbrido DK 692 de ciclo intermedio.

Las parcelas estuvieron compuestas por cinco surcos de 5 m de longitud y una distancia entre hileras de 0,7 m. La población objetivo fue de 100.000 plantas ha⁻¹ y se logró en forma ajustada. El control de malezas se realizó con el herbicida Atrazina a dosis de 2 Lha⁻¹ pc, la aplicación se hizo antes de la siembra y fue incorporada con el laboreo.

Los tratamientos (Ts) evaluados fueron:

T1= Sin deficiencias hídricas

T2= Deficiencias hídricas en el PC, definido como 15 días antes del inicio de la floración femenina a 15 días después de la misma. En 2009-10 el PC se ubicó entre el 23/12 y 22/01 y en 2010-11 entre el 18/12 y 17/01.

T3= Deficiencias hídricas en el llenado de grano, definido como la etapa entre la finalización del PC y la madurez fisiológica. En 2009-10 la ubicación fue entre 23/01 y 27/02 y en 2010-11 entre 18/01 y 25/02.

T4= Deficiencias hídricas durante la fase vegetativa y durante el PC, esta etapa se ubicó desde la emergencia del cultivo, la cual ocurrió 7 y 10 días posteriores a la siembra (en 2009 y 2010 respectivamente) y la finalización del PC.

T5= Secano, sin riego y sin intercepción de PP.

En el primer año del estudio el T4 se perdió debido a las características climáticas que impidieron interceptar las PP durante la etapa vegetativa.

Los T1, T2, T3 y T4 de los ensayos fueron generados mediante dos tipos de intervenciones en la disponibilidad hídrica: a) riego suplementario y b) colocación de simuladores de sequía durante los eventos de PP con el objetivo de impedir el ingreso de agua de lluvia en los Ts definidos con deficiencias hídricas.

Los simuladores de sequía fueron construidos con estructuras de hierro y cubiertos de lona impermeable. Las dimensiones fueron de: 3,5 m x 5 m x 2,5 m de altura máxima, con techos a dos aguas, dos paredes laterales, una frontal y una trasera. Las parcelas estuvieron limitadas por una ronda de tierra de 0,2 m de altura con el objetivo de impedir el ingreso de aguas de escurrimiento. Se construyeron desagües para evacuar el agua de lluvia proveniente de los techos.

El riego se realizó por un sistema de goteo, con cintas con goteros cada 0,2 m y con un caudal por gotero de 1,49 L h⁻¹. El riego se aplicó en los Ts con deficiencias hídricas y de acuerdo a la variación del agua disponible (AD), la cual fue estimada a través de un balance hídrico de suelos de paso diario. Las variaciones del contenido de agua en el suelo fueron calculadas mediante la expresión: $\Delta S = PP + R - ET_c$, siendo: ΔS = variación de AD (mm), R= riego (mm). La ET_c (mm), fue calculada diariamente de la siguiente manera $ET_c = ET_o \times K_c$, siendo ET_o la evapotranspiración del cultivo de referencia (mm), la cual fue estimada utilizando la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) y K_c = coeficiente de cultivo se utilizaron los propuestos por FAO (Allen *et al.*, 1998), en ausencia de información nacional. Los parámetros climáticos para estimar la ET_o fueron medidos a través de una estación meteorológica automática Vantage Pro 2TM, modelo 6510 (Davis Instruments, Hayward, CA), ubicada en la EEMAC.

Cuadro 1. Parámetros hídricos y físicos del suelo.

Horizonte	Profundidad (cm)	CC (1) (mm)	PMP (2) (mm)	DA (3) (g cm ⁻³)	CAAD (4) (mm)
A	0-20	54	28	1,25	26
B	20-70	235	150	1,34	85
A-B	0-70	289	178		111

1) Capacidad de campo, 2) Punto de marchitez permanente, 3) Densidad aparente, 4) Capacidad de almacenamiento de agua disponible.

Cuadro 2. Número de riegos, riego aplicado en mm, precipitación en mm, número de eventos interceptados y precipitación interceptada en mm, por tratamiento. Temporadas 2009-10 y 2010-11.

Temporadas	Número de riegos		Riego aplicado (mm)		Precipitaciones (mm)		Número de eventos interceptados		Precipitaciones interceptadas (mm)	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Tratamiento										
T1	6	16	165	473	1549	442	0	0	0	0
T2	1	9	33	264	1378	433	5	2	171	9
T3	4	13	110	363	1104	365	7	1	445	77
T4		5		143		412		3		29
T5	0	0	0	0	1549	0	0	0	0	0

Se determinó el inicio del riego durante el PC cuando el contenido hídrico del suelo descendió por debajo de 60% AD, y en las etapas no críticas por debajo de 40% AD, a la profundidad radicular estimada. La finalización del riego se realizó cuando el AD llegó a 90%. En los Ts con deficiencias hídricas el AD se dejó descender hasta 20% y luego se regó hasta el 40% AD en etapas no críticas y hasta el 60% AD en PC.

En el Cuadro 2 se muestran las PP totales durante los ciclos, el riego agregado y el número de eventos y PP interceptadas por los simuladores, para cada tratamiento y en cada año de estudio.

Se determinó el contenido hídrico del suelo mediante un equipo de sonda de neutrones CPN modelo 503DR HI-DROPROBE.

Previamente a la utilización de la sonda en los ensayos, se construyó una curva de calibración para el suelo del campo experimental. Para ello se midió el contenido de humedad del suelo a través del método gravimétrico y se realizaron las lecturas en las mismas profundidades con la sonda de neutrones, obteniendo una curva de calibración del equipo ajustada con $r^2=0,95$.

Las mediciones de humedad se realizaron cada 0,1 m y los tubos de acceso poseían 1 m de longitud. En 2009-10 las fechas en las que se realizaron las mediciones de agua fueron: 31/12, 8/1, 14/1, 17/1, 20/1, 24/1, 30/1, 8/2 y 17/2. En 2010-11 fueron realizadas en las siguientes fechas: 25/10, 10/11, 15/11, 19/11, 24/11, 29/11, 3/12, 9/12, 13/12, 21/12, 27/12, 30/12, 8/1, 12/1, 21/1, 28/1 y 22/2.

Se efectuaron cuatro muestreos de biomasa de la parte aérea coincidiendo aproximadamente con los estadios de: inicios 29/12/09 y 20/12/10 (muestreo 1); mediados 9/1/10 y 4/1/11 (muestreo 2) y final del PC 26/1/10 y 21/1/11 (muestreo 3) y cosecha 2/3/10 y 28/2/11 (muestreo 4). En cada

muestreo se cortó 1 m lineal de plantas a 3 cm del suelo, las que fueron pesadas frescas en laboratorio y una submuestra se secó en estufa a temperaturas de 40 a 60 °C hasta obtener peso constante.

Las cosechas de los ensayos fueron realizadas el 2/3/10 y el 28/2/11. El rendimiento en grano fue estimado a partir de la cosecha de 3 m lineales de plantas del surco central.

En la superficie de cosecha se determinó el número de plantas m^{-1} , el número de espigas por planta, el número de granos por espiga con esa información se calculó el número de granos m^{-2} y se midió el peso promedio de grano.

El diseño experimental fue bloques completamente aleatorizados, ajustándose el modelo $Y_{ij} = \mu + t_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$ donde: μ es la media general, t es el efecto de los tratamientos, β es el efecto de los bloques, ε es el error experimental, siendo i : tratamientos 1, 2, 3, 4 y 5 j = bloques 1, 2 y 3. Las variables estudiadas fueron: rendimiento, número de granos por m^2 , peso promedio de granos y biomasa de la parte aérea.

Se realizaron contrastes ortogonales para comparar el comportamiento de los tratamientos evaluados, se utilizó en todos los casos un nivel de significación del 5%. Los análisis fueron realizados mediante el paquete estadístico SAS v.9.2.

Resultados y discusión

Las condiciones climáticas en los dos años estudiados fueron contrastantes, el año 2009-10 (año «Niño») estuvo caracterizado por precipitaciones abundantes durante el ciclo del cultivo (Figura 1) y un número importante de días nublados (32), como consecuencia la radiación solar incidente acumulada fue baja (Figura 2). En cambio, en

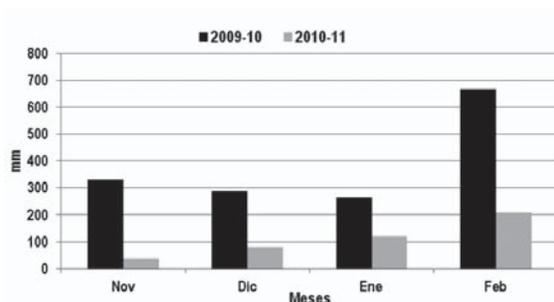


Figura 1. Precipitaciones mensuales en mm. Temporadas 2009-10 y 2010-11.

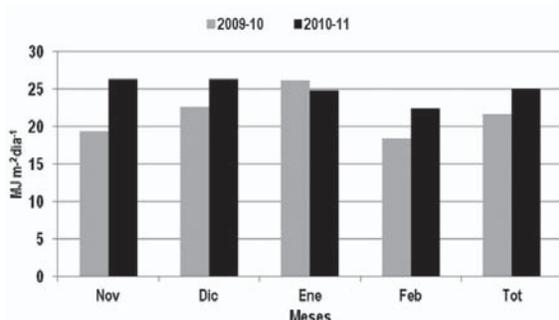


Figura 2. Radiación solar incidente diaria promedio ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$).

2010-11 (año «Niña») las precipitaciones entre noviembre y enero (fines) fueron significativamente inferiores al promedio y a su vez la radiación solar diaria entre noviembre y febrero fue elevada, en este caso 13% superior al mismo periodo del año anterior.

Evolución del agua en el suelo

En la Figura 3 se muestra la evolución del contenido hídrico del suelo, en algunas fechas seleccionadas, para los diferentes Ts evaluados en los años estudiados.

Se constató en los T1 una menor dispersión entre las medidas efectuadas del contenido hídrico de suelo en comparación con los restantes Ts evaluados (Figura 3).

En los Ts con estrés hídrico generado el contenido más bajo de agua en el suelo se midió durante las etapas en que fueron inducidas las deficiencias.

En los T5 se visualizó en el año 2009-10 una menor dispersión entre las medidas del contenido hídrico del suelo en la mayoría de las profundidades analizadas en comparación con el mismo tratamiento en 2010-11. El comportamiento se debió a que el exceso de precipitaciones ocurrido en 2009-10 provocó un contenido elevado de agua en el suelo durante la mayor parte del ciclo. En cambio en

2010-11, las precipitaciones fueron escasas y variables entre las diferentes etapas de desarrollo.

Consumo estimado de agua

Se muestra en el Cuadro 3 el consumo estimado de agua durante el ciclo y las etapas de desarrollo, en los diferentes Ts evaluados.

Se observa en los T1 que en el año 2009-10 el consumo de agua fue menor en 25% aproximadamente que en el año 2010-11, este comportamiento se debió a las menores ETc que ocurren en los años «Niño» dado el elevado número de días nublados y con PP. En los T1 el mayor consumo de agua ocurre durante el PC, no obstante fue la etapa de menor duración (30 días). En siembras de octubre el PC se ubica durante los meses de diciembre y enero, en los que ocurren las mayores ETc, esto justifica el elevado consumo de agua en la etapa.

El llenado de grano fue la etapa que continuó en consumo de agua al PC, debido a que se ubicó temporalmente entre fines de enero y febrero, con valores de radiación solar y temperaturas menores que en el PC, no obstante la duración fue mayor (39 - 41 días).

La etapa que presentó menor consumo de agua fue la vegetativa, dado que las ETc fueron más bajas que en las etapas anteriormente analizadas y la duración fue similar a la de llenado de grano (42 - 43 días).

En los Ts 2, 3 y 4 con estrés hídrico generado, las relaciones de consumo de agua entre las etapas variaron de acuerdo al tratamiento.

En los T5 se observó gran variación en el consumo de agua entre años, esto se justifica por las diferentes disponibilidades hídricas que presentó el tratamiento en los años estudiados.

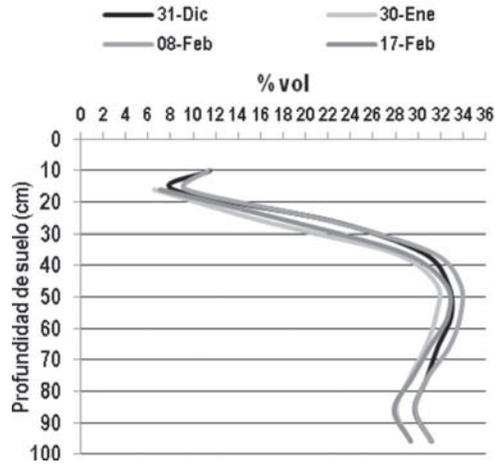
Producción de biomasa

En las Figuras 4 y 5, se muestra la evolución de la deposición de la materia seca (MS) aérea para los Ts evaluados en los años 2009-10 y 2010-11, respectivamente.

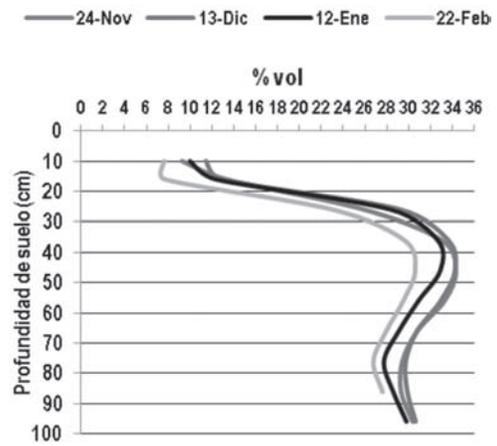
Las características climáticas de 2009-10 redujeron la radiación solar incidente y provocaron que el T1 presentara limitaciones para expresar el potencial de producción de biomasa. Por el contrario, 2010-11 presentó una elevada radiación incidente, la cual generó condiciones para que el T1 mostrara una elevada deposición de biomasa.

Andrade *et al.* (1996) señalan que el crecimiento de maíz en ausencia de otras limitaciones es directamente proporcional a la radiación solar incidente. Por lo tanto, en condiciones de riego y en situaciones de mayor radiación (años

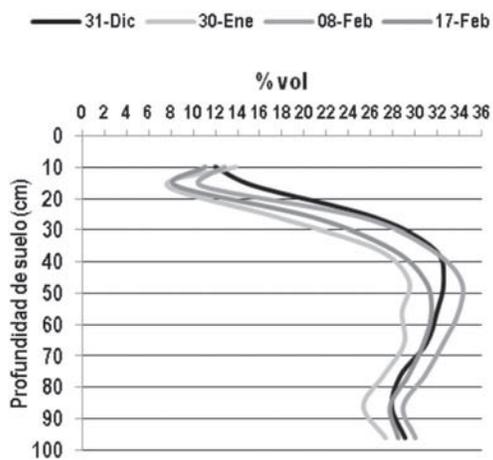
Evolución agua en suelo (% vol) T1 2009



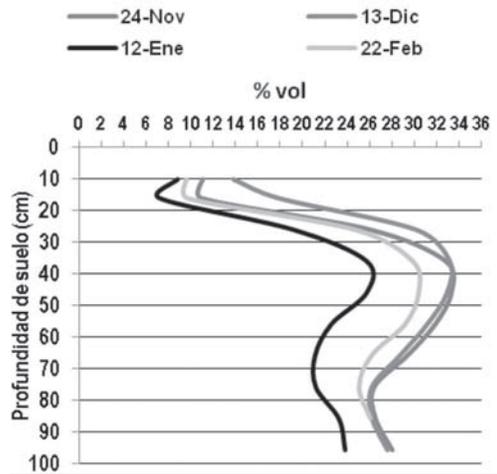
Evolución agua en suelo (% vol) T1 2010



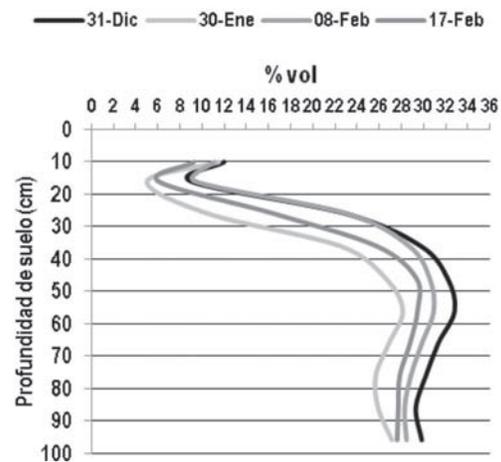
Evolución agua en suelo (% vol) T2 2009



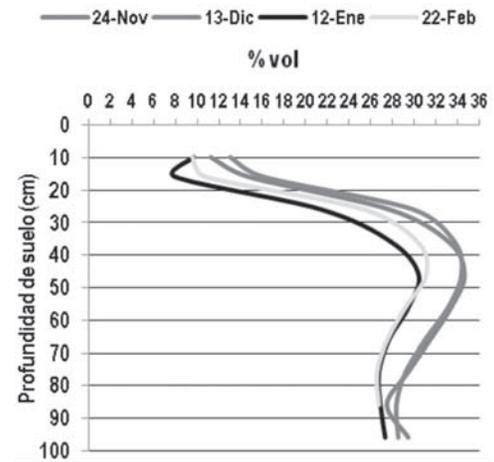
Evolución agua en suelo (% vol) T2 2010



Evolución agua en suelo (% vol) T3 2009



Evolución agua en suelo (% vol) T3 2010



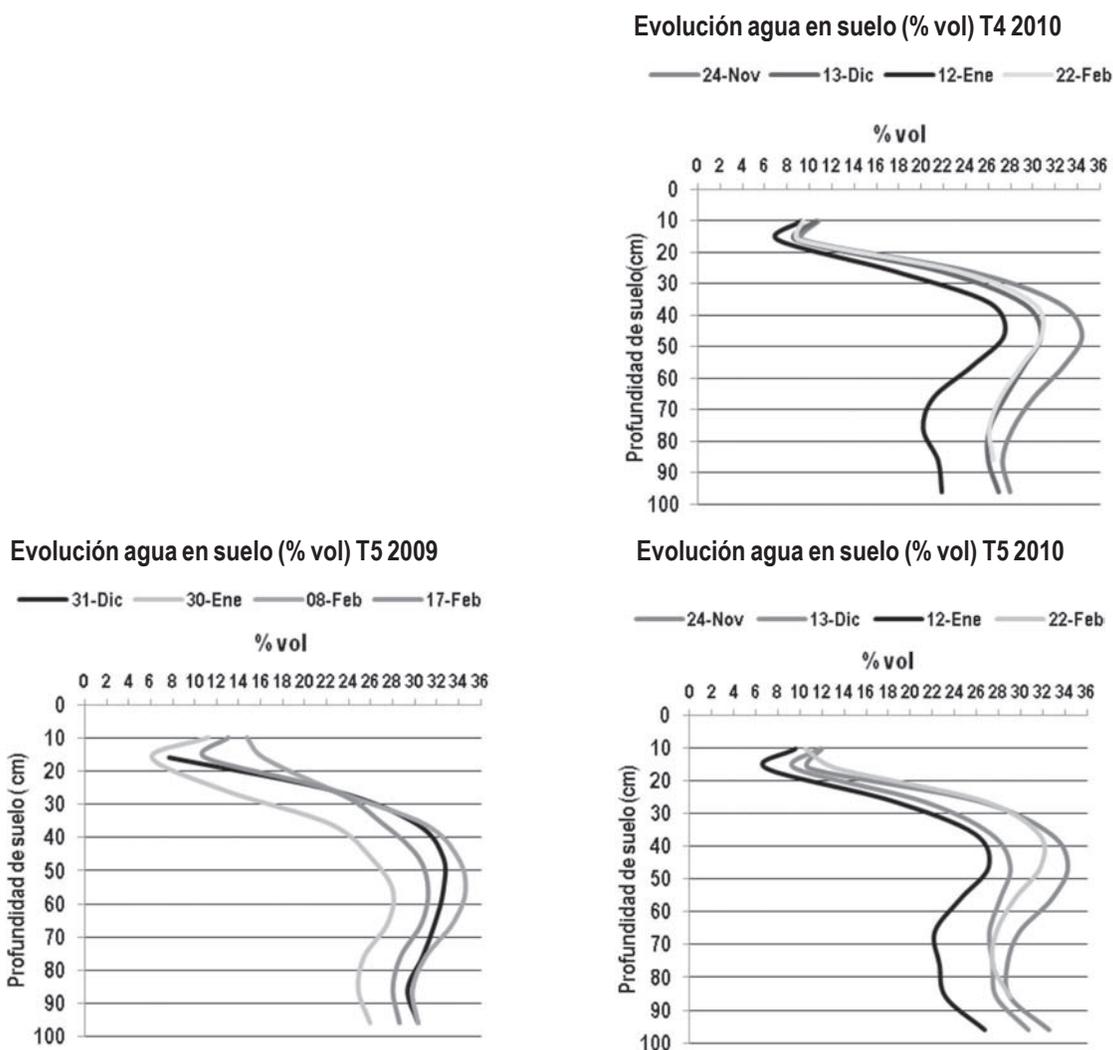


Figura 3. Evolución del agua en el suelo (% vol).

Cuadro 3. Estimación del consumo de agua en mm en las etapas de desarrollo y en el ciclo total por tratamiento.

Temporadas	Etapa vegetativa		Periodo crítico		Llenado de grano		Ciclo	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Tratamientos								
T1	133	164	185	225	148	216	466	605
T2	134	162	100	56	136	208	370	426
T3	134	161	177	225	83	147	394	533
T4		69		55		209		333
T5	126	72	162	53	124	151	412	276

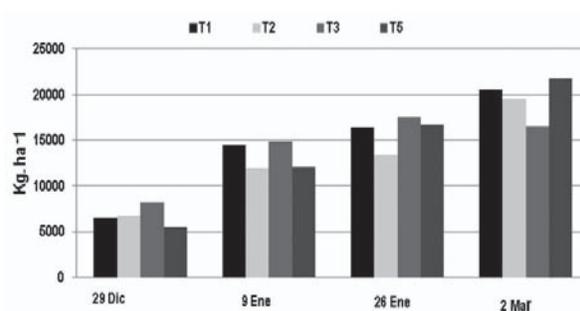


Figura 4. Evolución de la MS (kg ha^{-1}) por tratamiento. Temporada 2009-10.

«Niña»), la fijación de biomasa es superior que en aquellos años en que la radiación incidente es menor (años «Niño»).

En 2009-10 no se encontraron diferencias en la deposición de MS entre el T1 y los Ts con deficiencias hídricas (T2, T3 y T4) en los muestreos realizados.

En cambio, en 2010-11 se detectaron diferencias estadísticas en la biomasa producida entre el T1 y el T2 en los muestreos 3 y 4 y las mismas fueron de 23 y 31% respectivamente, a favor del T1. Además, el T3 presentó una reducción de 20% de la biomasa en relación al T1 en el muestreo 4 aunque no se hallaron diferencias estadísticamente significativas.

El T4 fue el tratamiento en el que se generaron las mayores deficiencias hídricas y en el cual se hallaron las diferencias superiores en deposición de biomasa con el T1. Las mismas fueron detectadas en el muestreo 4 y alcanzaron a 42% a favor del T1.

El T5 mostró respuestas diferentes en los años estudiados, en concordancia con el distinto régimen de las precipitaciones. En 2009-10 no se detectaron diferencias en la biomasa entre el T5 y el T1. Por el contrario en 2010-11 el T5 presentó una menor deposición de biomasa de 48% en relación al T1 (muestreo 4), obteniéndose diferencias significativas.

En 2010 las restricciones hídricas generadas en los T2, T3 y T4, impidieron capitalizar en producción de biomasa las condiciones de elevada radiación solar incidente. Esto es coincidente con lo mencionado por Hsiao y Bradford (1983) y Sinclair *et al.* (1984), en el sentido de que las deficiencias hídricas provocan una menor disponibilidad de agua para transpirar. Esto afecta el intercambio gaseoso a nivel estomático entre el cultivo y la atmósfera. Por tanto existe una menor deposición de CO_2 a través del proceso de fotosíntesis y como consecuencia en los Ts con deficiencias hídricas ocurre una menor fijación de biomasa.

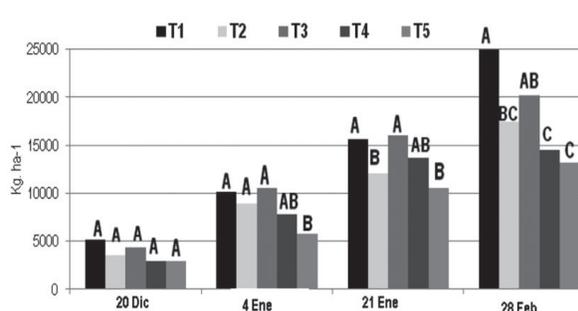


Figura 5. Evolución de la MS (kg ha^{-1}) por tratamiento. Temporada 2010-11.

Asimismo, la tasa de crecimiento del cultivo se ve afectada negativamente ante las deficiencias hídricas con disminución en la eficiencia de intercepción de la radiación solar y de conversión de la misma en biomasa (Muchow, 1989).

Andrade *et al.* (1996) señalan que en situaciones de no deficiencia entre la emergencia y la floración del maíz se deposita el 40% de la MS total y desde esta etapa a madurez fisiológica el cultivo fija el 60% restante. La literatura es coincidente en señalar que la repercusión en el rendimiento es menor cuando las deficiencias hídricas ocurren durante las etapas vegetativas en comparación a cuando suceden en las etapas reproductivas.

Rendimiento en grano y componentes

En la Figura 6, se muestran los rendimientos en grano logrados en los diferentes Ts en los dos años de estudio, los mismos indican que fueron significativamente ($P < 0,5$) afectados por las deficiencias hídricas.

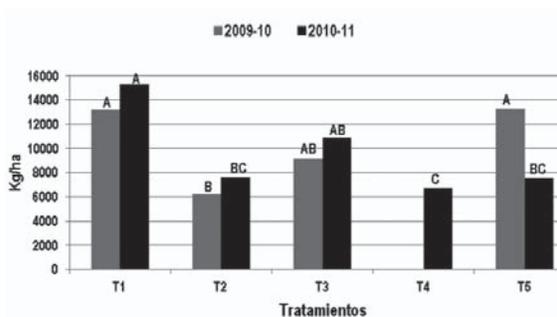


Figura 6. Rendimiento en grano por tratamiento. Temporadas 2009-10 y 2010-11.

Hall *et al.* (1982) destacan que las pérdidas en rendimiento de maíz por deficiencias hídricas dependen de la intensidad, de la duración y del momento del estrés.

Los rendimientos obtenidos en los T1, T2 y T3 en el año 2009-10 fueron inferiores a los logrados en 2010-11, en

cambio el rendimiento en el T5 fue superior en 2009-10, indicando la importancia del aporte hídrico por parte de las PP durante esta temporada.

Se encontraron diferencias significativas en rendimiento entre el T1 y el T2 en ambos años. En el T2 se logró 47 y 50% del rendimiento obtenido en el T1 en 2009-10 y 2010-11, respectivamente. El entorno de la floración es la etapa más crítica para la determinación del rendimiento, en la misma se fija el número de granos por superficie, que es el componente que explica principalmente los cambios en el rendimiento. Es por ese motivo que el rendimiento se torna dependiente del estado fisiológico durante esta etapa y el mismo es altamente sensible a la disponibilidad hídrica. Durante el PC la tasa de crecimiento es indicativa de la condición fisiológica del cultivo y por lo tanto de su capacidad para fijar granos (Andrade *et al.*, 1999).

Cakir (2004) registró pérdidas en rendimiento de maíz de 40% por deficiencias de agua en el PC en relación al testigo sin deficiencias. Las deficiencias hídricas en esta etapa afectan la eficiencia de conversión de la radiación interceptada en biomasa, disminuyen la intercepción de la misma por acelerar la senescencia y reducen la partición de la materia seca a las espigas (Andrade *et al.*, 1996).

Los rendimientos en el T3 fueron 69 y 71% de los obtenidos en el T1 en 2009-10 y 2010-11 respectivamente, sin registrarse diferencias significativas. Las deficiencias hídricas producidas en etapas posteriores a la floración presentan menores efectos sobre el rendimiento que en la etapa anterior (Ouattar *et al.*, 1987). Las deficiencias de agua en esta etapa reducen la tasa fotosintética y aceleran la senescencia foliar afectando fundamentalmente el peso del grano.

Cuando las deficiencias ocurren en las primeras etapas del llenado los efectos sobre el rendimiento son mayores

que en las etapas posteriores, debido a que el embrión recién formado es susceptible de aborto en situaciones de estrés, afectando el número final de granos.

El T4 en 2010 mostró el 44% del rendimiento que el T1 encontrándose diferencias significativas ($P < 0,5$). Cuando el estrés hídrico se produce solo en las etapas vegetativas el efecto sobre los rendimientos es bajo, ya que no se afectan directamente los componentes del rendimiento (Cakir, 2004). En cambio si las deficiencias hídricas además de ocurrir en las etapas vegetativas continúan durante el PC, como en el caso del T4, las disminuciones del rendimiento son mayores ya que se afecta el crecimiento vegetativo y el número de granos.

El T5 en el año 2009-10 presentó rendimientos similares al T1. En cambio en 2010-11 mostró 49% del rendimiento del T1, detectándose diferencias significativas. El rendimiento de los Ts en secano es dependiente de las condiciones de PP y de radiación que ocurran principalmente durante el PC. En los años estudiados las condiciones climáticas fueron opuestas durante esta etapa, esto justifica los rendimientos diferentes logrados entre años en los T5.

En el Cuadro 4 se presentan los resultados obtenidos en los componentes del rendimiento: número de granos m^{-2} y peso de 1000 granos.

En el año 2009-10 se detectaron diferencias ($P < 0,5$) en el número de granos m^{-2} entre el T1 y el T2. En el T2 se obtuvo el 52% de los granos logrados en el T1. En 2010-11 el comportamiento fue similar, en el T2 se logró el 48% de los granos obtenidos en el T1.

La incidencia de deficiencias hídricas en el PC provoca las mayores mermas en el número de granos. A su vez la disminución del rendimiento en este tratamiento fue de similar magnitud que la ocurrida en el número de granos.

Cuadro 4. Componentes numéricos del rendimiento en grano.

Año	Nº de granos m^{-2} (*)		Peso de 1000 granos (*)	
	2009	2010	2009	2010
Tratamiento				
T1	4477 A	5493 A	292 A	278 A
T2	2343 B	2644 B	286 A	284 A
T3	4321 A	4835 A	223 B	228 B
T4		2991 B		271 A
T5	4465 A	2949 B	278 A	255 AB

(*) Valores con letras iguales en el mismo año indican diferencias no significativas.

En ambos años el número de granos obtenidos en el T3 no presentó diferencias con el T1. El comportamiento se justifica ya que las deficiencias durante la etapa de llenado de grano no afectan el principal componente del rendimiento.

En 2010 se detectaron diferencias ($P < 0,5$) entre el T4 con el T1 y entre el T4 con el T3. En el T4 con deficiencias en la etapa vegetativa y el PC, es lógico que el número de granos se vea afectado negativamente en comparación con los Ts sin deficiencias en el PC, según los argumentos explicitados anteriormente.

El T4 no presentó diferencias con el T2, pero sí una tendencia a producir un número de granos mayor. El comportamiento se puede explicar debido a que en el T2 al inicio del PC se presenta una mayor deposición de biomasa que en el T4, como consecuencia se provoca una mayor competencia por agua, luz y nutrientes en el T2, la que afectará negativamente la fijación de granos en este tratamiento. El T4 mostró plantas con menor deposición de MS (Figura 4), por haber presentado deficiencias hídricas desde la etapa vegetativa.

En el T5 el número de granos mostró similar comportamiento que el rendimiento. En el año 2009-10 no hubo diferencias con el T1 y en 2010-11 se presentaron diferencias significativas entre ambos Ts. Las PP ocurridas en los años en los que se desarrolló el estudio afectaron el número de granos m^{-2} de los T5 debido a que las mismas determinaron condiciones diferentes para la fijación de granos.

En relación al peso promedio de granos, en el Cuadro 4 se muestra que el T3 fue el tratamiento que presentó menores pesos de grano. Se detectaron diferencias significativas con T1 y T2 en los dos años de estudio y con el T4 en 2010-11.

Las diferencias en el peso promedio de grano entre el T3 y los restantes Ts evaluados se explican principalmente por las modificaciones en la tasa de crecimiento del grano en la etapa de llenado provocadas por las deficiencias hídricas generadas en el T3.

Conclusiones

El rendimiento potencial de maíz sin estrés hídrico fue de 13.200 y 15.300 $kg ha^{-1}$ para los dos años estudiados, los que presentaron características climáticas contrastantes.

Las pérdidas de rendimiento en grano por estrés hídrico durante el PC fueron de 47 y 50% del rendimiento potencial. En el caso de la ocurrencia de deficiencias hídricas durante la etapa de llenado de grano la disminución del rendimiento varió entre 29 y 31%.

Cuando las deficiencias se generaron durante la etapa vegetativa y continuaron durante el PC, los rendimientos de maíz disminuyeron 56%.

Agradecimientos

El autor desea agradecer al INIA por financiar el proyecto FPTA 261 y hacer posible la ejecución de los ensayos, al becario de investigación Sr. Richard Arévalo por el enorme trabajo de campo y de laboratorio desarrollado, y al estudiante de la Facultad de Agronomía Bach. Gerónimo Giménez por el apoyo realizado en el campo y en el laboratorio.

Bibliografía

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Crop Evapotranspiration : Guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO. 300p. (Irrigations and Drainage ; 56).
- Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echeverría A, Panario, D, Puentes R. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay : Clasiificación de suelos. Vol. 1. Montevideo : MAP. 96p.
- Andrade FH, Aguirrezábal LAN, Rizzalli RH. 2000. Crecimiento y rendimiento comparados. En: Andrade FH, Sadras VO. [Eds.]. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires : Editorial Médica Panamericana. pp. 61 - 96.
- Andrade FH, Vega C, Uhart S, Cirilo A, Cantarero M, Valentinuz O. 1999. Kernel number determination in maize. *Crops Sciences*, 39: 453 - 459.
- Andrade FH, Cirilo A, Uhart S, Otegui ME. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Balcarce : La Barrosa, INTA Balcarce, FCA UNMP, Dekalbpress. 292p.
- Baethgen WE, Terra R. 2010. El riego en un clima cambiante. En: 1^{er} Seminario internacional potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas. Montevideo : Boscana. pp. 7 - 18.
- Cakir R. 2004. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*, 89: 1 - 16.
- Cardellino G, Baethgen WE. 2000. Análisis de viabilidad de sistemas de riego para maíz : Estudio de casos y evaluación de estrategias. En: Tecnología de producción de cultivos y pasturas. Montevideo : INIA. (Actividades de Difusión ; 227). pp. 47 - 55.
- Claassen MM, Shaw RH. 1970. Water deficit effects on grain : II Grain components. *Agronomy Journal*, 62: 652 - 655.
- English MJ, Musick JT, Murty VVN. 1990. Deficit irrigation. En: Management of farm irrigation systems. St. Joseph : American Society of Agricultural Engineers. pp. 631 - 663.
- Fereres E, Soriano MA. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2): 147 - 159.
- Hall AJ, Vilella F, Trapani N, Chimenti CA. 1982. The effects of water stress and genotype on the dynamics of pollen-shedding and silking in maize. *Field Crops Research*, 5: 349 - 363.
- Hsiao TC, Bradford KJ. 1983. Physiological consequences of cellular water deficits. En: Taylor HM, Jordan WR, Sinclair TR. [Eds.]. Limitations to efficient water use in crops production. Madison : ACA, CSSA, SSSA. pp. 227 - 265.
- Molfino J, Califra A. 2001. Agua disponible en las tierras del Uruguay : Segunda aproximación. Montevideo: MGAP. 12p.
- Muchow RC. 1989. Comparative productivity of maize, sorghum and pearl millet in a semi-arid tropical environment : II. Effect of water deficits. *Field Crops Research*, 20: 207 - 219.

- NeSmith DS, Ritchie JT.** 1992. Maize (*Zea mays* L.) response to a severe soil water-deficit during grain-filling. *Field Crops Research*, 29: 23 - 35.
- Otegui ME, Andrade FH, Suero EE.** 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Research*, 40: 87 - 94.
- Quattar S, Jones RJ, Crookston RK.** 1987. Effect of water deficit during grain filling on the pattern of maize kernel growth and development. *Crop Science*, 27: 726 - 730.
- Sawchik J, Cerreta S.** 2005. Consumo de agua por sojas de distinto grupo de madurez en diferentes ambientes de producción. En: Jornada Técnica de cultivos: Trabajos presentados. Montevideo: INIA. (Actividades de Difusión; 417). pp. 41 - 45.
- Sawchik J, Formoso F.** 2000. Inserción del riego en rotaciones de cultivos y pasturas. En: Tecnología de producción de cultivos y pasturas. Montevideo : INIA. (Actividades de Difusión ; 227). pp.13 - 25.
- Schussler JR, Westgate ME.** 1995. Assimilate flux set at low water potential in maize. *Crops Science*, 35: 1075 - 1080.
- Sinclair TR, Tanner CB, Bennett JM.** 1984. Water-use efficiency in crop production. *BioScience*, 34(1): 36 - 40.