

# 3. Efectos de la disponibilidad hídrica en diferentes etapas de desarrollo de maíz y soja

L. Giménez

Luis Giménez: Departamento de Producción Vegetal, EEMAC, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Uruguay. Contacto: [kapoexe@fagro.edu.uy](mailto:kapoexe@fagro.edu.uy)

## 3.1. Introducción

El sector agrícola del país en los últimos años ha presentado cambios sin precedentes, entre las transformaciones producidas se destaca un incremento significativo en la superficie de siembra de cultivos estivales.

A partir del año 2001, ocurre un aumento constante del área sembrada de soja, el cual es acompañado por aumentos de menor impacto en las superficies de maíz y sorgo, transformando la tendencia histórica de una agricultura con superficie más o menos estables, y principalmente invernada, en una actividad agrícola con áreas de siembra crecientes y con predominio de los cultivos de verano.

En la región se ha identificado como principal limitante ambiental en cultivos de verano a la disponibilidad hídrica (Andrade et al. 1996), (Sawchik y Ceretta, 2005).

En la agricultura de secano del país las deficiencias hídricas estivales son provocadas por factores que no admiten mayores transformaciones a través del manejo como son: la capacidad de almacenamiento de agua disponible (AD) de los suelos y principalmente un régimen de precipitaciones (PP) que, en general, en verano es deficitario en relación a las necesidades hídricas de los cultivos y además posee una elevada variabilidad en ocurrencia, intensidad y volumen.

Las deficiencias hídricas estivales provocan disminuciones en el rendimiento potencial de maíz y soja realizados en secano. Las pérdidas en rendimiento son altamente variables y dependen del comportamiento de las PP las que determi-

nan principalmente la disponibilidad de agua para los cultivos.

En estimaciones recientes, se indica que en la región agrícola del Litoral Sur las deficiencias de agua promedio en relación a las necesidades hídricas se sitúan en el entorno de 37% para maíz y 35% en soja (Giménez y García, 2009), siendo dichos cultivos los que presentan mayor diferencia entre la evapotranspiración real y de cultivo.

A nivel nacional, son escasos los antecedentes de trabajos científicos que hayan cuantificado las pérdidas en rendimiento debido a deficiencias hídricas y aún menores son las citas encontradas sobre el efecto de las deficiencias de agua en las diferentes etapas de desarrollo de los cultivos (Hofstadter, 1983).

La cuantificación de los efectos que provocan las deficiencias hídricas, en las diferentes etapas de desarrollo de los cultivos, presenta un problema metodológico debido a las características climáticas del país. En condiciones de PP variables resulta escasamente probable poder ejecutar tratamientos de deficiencias hídricas en las distintas etapas de desarrollo de los cultivos, determinados *a priori*, excepto en años con sequías extremas.

El conocimiento ajustado de las pérdidas en grano que ocurren a causa de las deficiencias hídricas en las diferentes etapas de desarrollo de maíz y soja, permitirá cuantificar el efecto del riego suplementario en estos cultivos y diseñar estrategias eficientes en el manejo del agua de riego.

El objetivo principal del trabajo fue cuantificar la respuesta en rendimiento con disponibilidades hídricas diferentes en las principales etapas de desarrollo de maíz y soja.

### 3.2. Materiales y métodos

Por los motivos ya señalados, la metodología experimental pretendió cambiar las condiciones hídricas variables que imponen las PP a través de la utilización de simuladores de sequía, parcelarios y móviles. Los mismos fueron contruidos en estructuras de hierro con cubiertas de lonas impermeables. Las dimensiones de los simuladores se adecuaron al tamaño de las parcelas, en maíz fueron de 3.5m x 5m x 2.5m y en soja de 2m x 5m x 1.5m.

Los artefactos de simulación fueron colocados, sobre las parcelas de cultivo en las que se definió controlar el agua, antes de cada evento de PP y retirados inmediatamente después de los mismos. Se intentó no provocar transformaciones significativas en las condiciones de radiación solar y temperaturas a las que estuvieron expuestos los cultivos en el campo.

Asimismo, se dispuso de un sistema de riego localizado, para agregar agua en el volumen y en la etapa de desarrollo definida, cada hilera de cultivo dispuso de una cinta de riego por goteo, con goteros cada 20cm, excepto en los tratamientos de secano.

El contenido hídrico del suelo fue monitoreado en forma periódica, las mediciones se realizaron con sonda de neutrones, desarrollando medidas cada 10cm de profundidad hasta 1m del perfil de suelo.

Se utilizaron pronósticos meteorológicos de corto plazo, para definir la colocación de los simuladores de sequía.

Se realizó un balance hídrico (BH) de suelo diario, de acuerdo a la siguiente fórmula:  $BH=R+PP-ETC$ , siendo  $R=mm$  agregados de agua de riego,  $PP=mm$  totales y  $ETC=mm$  de evapotranspiración de cultivo.

La información climática fue provista a partir de una estación meteorológica automática Vantage Pro 2TM, modelo 6510 (Davis Instruments, Hayward, CA), ubicada en la EEMAC.

Importa aclarar que la metodología descripta permitió realizar un control parcial de la disponibilidad hídrica en las diferentes etapas de desarrollo de los cultivos. Las particulares condiciones climáticas de la primavera-verano 2009-10 en las que predominaron los excesos de PP y los eventos climáticos extremos, particularmente vientos fuertes, afectaron la aplicación de la metodología experimental.

### 3.3. Resultados

Los resultados que se presentan a continuación son de carácter primario debido a que fueron obtenidos durante el primer año de ejecución del proyecto de investigación FPTA N° 261 en la temporada 2009-2010.

#### Maíz

En maíz se evaluaron 4 tratamientos (T) de disponibilidad hídrica durante las diferentes etapas de desarrollo del cultivo. Se distinguieron en el ciclo las etapas críticas para la determinación del rendimiento (PC) y las no críticas (PNC). Asimismo se trabajó con umbrales de AD en suelo diferenciados de acuerdo a la etapa de desarrollo, los T evaluados fueron los siguientes:

T1 = Bienestar hídrico. Contenido de agua en suelo durante el PC superior a 60% AD y en PNC superior a 40% AD.

T2 = Deficiencias hídricas en el PC. Contenidos de agua en suelo durante el PC inferior a 60% AD y durante PNC superior a 40% AD.

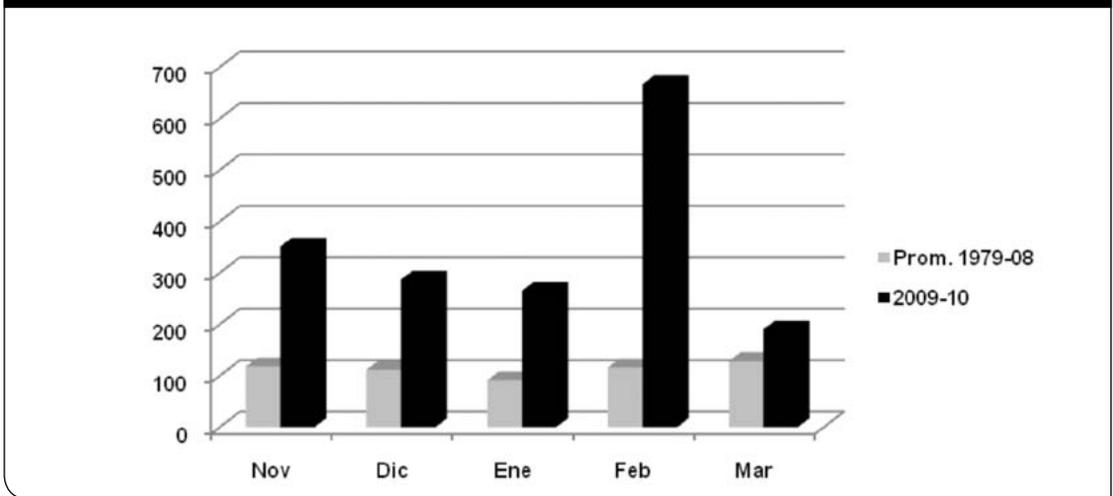
T3 = Deficiencias hídricas en PNC. Contenido de agua en suelo durante el PC superior a 60% AD y en PNC inferior a 40% AD.

T4 = Secano.

La duración del ciclo (emergencia-madurez) fue de 111 días y se ubicó entre el 11 de noviembre y 2 de marzo.

En la Figura 1, se muestran las PP mensuales entre noviembre y marzo del año de estudio y las PP promedio, durante esos meses, en los últimos 30 años, en Paysandú. Se observa que las PP del año de estudio fueron excepcionalmente superiores a las promedio. Las características de año 'Niño' provocaron excesos hídricos durante los meses en los que se desarrolló el cultivo.

**Figura 1:** Precipitaciones promedio Paysandú 1979-2008 y 2009-10



Las PP totales fueron de 1.549mm, importa resaltar la ocurrencia de 40 eventos de lluvias en el ciclo, el 36% de los días presentaron PP con la consiguiente disminución de la radiación solar incidente y de las temperaturas.

Las condiciones climáticas extremas afectaron el rendimiento potencial del maíz, básicamente por la falta de luz y la disminución de las temperaturas, factores de elevada significación en las tasas fotosintéticas de una especie de tipo metabólico  $C_4$ .

Las condiciones descritas determinaron que a través de la metodología propuesta no se logró controlar la disponibilidad hídrica durante el PNC anterior al PC o sea durante la etapa vegetativa del cultivo.

En cambio, fue posible controlar parcialmente, la disponibilidad de agua durante el PC ubicado en el entorno de la floración del maíz, definido entre los 15 días anteriores y 15 días posteriores del inicio de la floración femenina. Además, se controló la disponibilidad hídrica durante el PNC posterior al PC o sea durante la mayor parte de la etapa de llenado de grano.

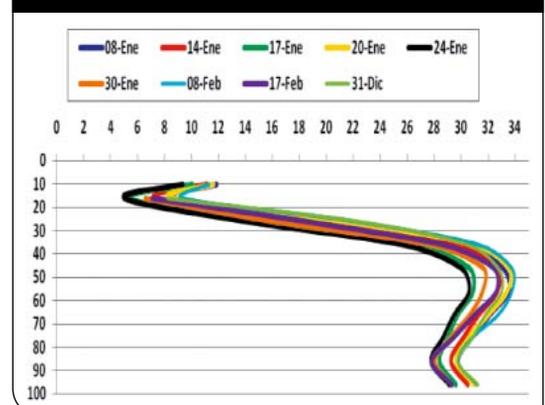
En la Figura 2 se muestra el contenido de agua en suelo en el T1, se observa una baja dispersión entre las mediciones realizadas en comparación con los restantes T evaluados y un contenido de agua en suelo elevado. Estos resultados indican que se logró cumplir el objetivo del T1 de acuerdo a la definición establecida de bienestar hídrico.

En la Figura 3, se presentan las mediciones de agua en el T2 con deficiencias hídricas durante el PC. Se constató mayor dispersión entre las diferentes mediciones de agua y un menor contenido hídrico durante el PC, en relación a los resultados del T1.

Se muestran en la Figura 4 los resultados de las mediciones de agua para el T3, en el que se provocaron deficiencias hídricas durante el PNC posterior al PC. Se visualiza un contenido hídrico mayor en las mediciones de agua realizadas durante el PC y una disminución notoria del agua en suelo en las mediciones posteriores al PC, los resultados se ajustan a la definición del T3.

En la Figura 5, se aprecia la evolución del agua en el T4, en el que no hubo intervenciones en

**Figura 2:** Contenido de agua en suelo (% vol) en t1 medido cada 10cm de suelo.



relación al contenido de agua, por ser el T en secano. Se constata una gran dispersión entre las medidas, no obstante las elevadas PP ocurridas durante el ciclo, la distribución de las mismas

presentó igualmente etapas con altos y bajos contenidos de agua en suelo.

### Producción de materia seca

De acuerdo a las PP del año de estudio y los inconvenientes climáticos ocurridos, la metodología propuesta durante la etapa vegetativa no permitió controlar adecuadamente las PP y los diferentes T presentaron contenidos de agua en suelos elevados y similares.

En la Figura 6, se presentan los resultados de la evolución de deposición de materia seca en los diferentes T evaluados. Los tres primeros muestreos realizados de MS, coinciden aproximadamente con la ubicación del PC que ocurrió entre el 23 de diciembre y el 23 de enero.

Los T evaluados incrementaron la deposición de MS entre el primer y tercer muestreo, sin embargo se aprecian diferencias notorias en el crecimiento.

Mientras en el T2 con aplicación de simulador de sequía durante el PC, se presentó un incremento de MS entre los muestreos indicados de 6739 Kg/ha, en los T sin simulador los incrementos en MS fueron de 9886 Kg/ha para el T1, 10650 Kg/ha en el T3 y 11218 Kg/ha en el T4.

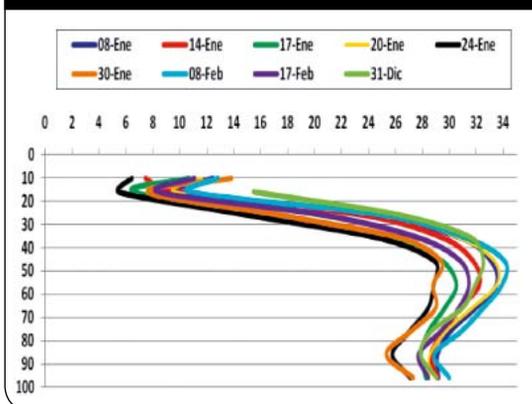
En el Cuadro 1, se muestran las tasas de crecimiento de cultivo (TCC) promedio y las tasas de crecimiento de planta individual (TCP) promedio obtenidas durante el PC, en los T evaluados.

Se observa que los valores de TCC y TCP logrados en T1 y T3, son elevados, sin embargo son menores que las TC logradas en trabajos anteriores en maíz en la localidad (Roselli y Texeira, 1998), el comportamiento mencionado es consecuencia de las condiciones limitantes de luz del año de estudio.

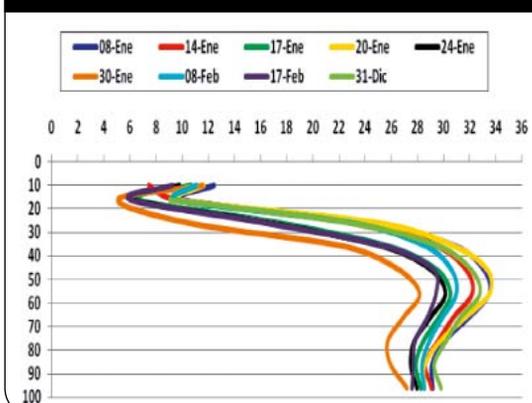
En el caso del T2 la TCC y la TCP son bajas a causa de las deficiencias provocadas durante el PC. En relación a la TCP es también baja, no obstante superior al umbral para fijar grano en la especie que de acuerdo a Andrade et al. 2000, se ubica en valores del orden de 1 a 1.4 grs/pl/día con variaciones de acuerdo al material genético.

En el T4 tanto las TCC y TCP promedio, son similares a las de los T sin deficiencias hídricas durante el PC, debido a que las PP del año determinaron la existencia de disponibilidades hídricas suficientes para el T de secano.

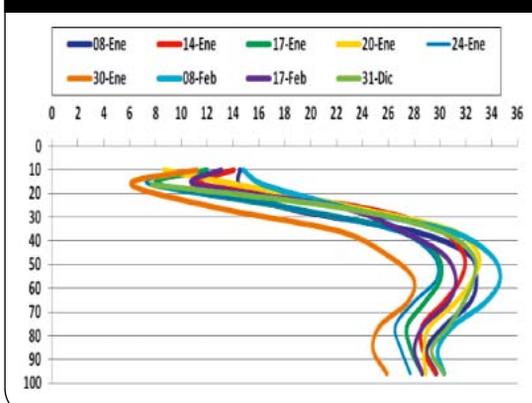
**Figura 3:** Contenido de agua en suelo (% vol) en T2 medido cada 10cm de suelo.



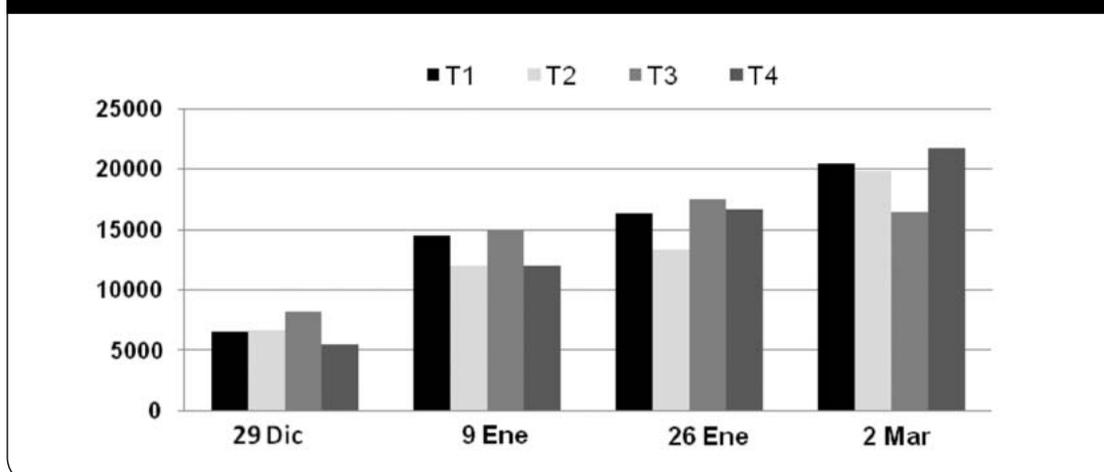
**Figura 4:** Contenido de agua en suelo (% vol) en T3 medido cada 10cm de suelo.



**Figura 5:** Contenido de agua en suelo (% vol) en T4 medido cada 10cm de suelo.



**Figura 6:** Evolución de la materia seca aérea (Kg/ha) en maíz



**Cuadro 1.** Tasas de crecimiento de cultivo y de planta en maíz

	TCC (Kg/ha/día)	TCP (grs./pl./día)
T1	353	3.3
T2	241	2.2
T3	380	3.3
T4	401	3.5

**Cuadro 2.** Componentes del rendimiento en maíz

	Nº granos m <sup>2</sup>	Peso 1000 granos (g)
T1	4477	292
T2	2343	286
T3	4231	223
T4	4465	278

Entre el 24 de enero y 28 de febrero se ubicó aproximadamente la mayor parte de la etapa de llenado de grano, durante esta etapa los simuladores de sequía se ubicaron sobre el T3 provocando deficiencias hídricas en este T, en cambio los T1 y T2 no presentaron restricciones hídricas en dicha etapa.

En la Figura 6, se observa que en el muestreo del 2 de marzo los T1 y T2 continuaron depositando MS, mientras que el T3 no sólo detuvo la deposición de MS, sino que disminuyó la MS aérea depositada, en relación al muestreo anterior. Este comportamiento, se debe a que en las etapas avanzadas del cultivo, las deficiencias hídricas provocan la muerte de hojas en maíz, por esa razón la MS disminuyó en el T3 entre los muestreos indicados.

### Componentes del rendimiento

En el Cuadro 2, se muestran los resultados del ensayo en relación a los componentes principales del rendimiento en maíz, en los diferentes T

evaluados. Se constató que los T1 y T3 presentaron un Nº de granos/m<sup>2</sup> elevado y muy superior a los valores obtenidos en el T2. De acuerdo a los resultados mostrados anteriormente, el T2 presentó una menor TCC durante el PC la cual fue determinante del Nº de granos fijados por superficie.

Las deficiencias hídricas provocadas durante el PC disminuyeron el 48% el Nº de granos fijados, en relación al T1 sin deficiencias hídricas.

En relación al peso promedio de grano, en el T3 que fue sometido a deficiencias hídricas en la etapa de llenado de grano se obtuvo el menor peso de grano con diferencias notorias con el T1. El peso de grano en maíz es un componente del rendimiento residual y en general no determinante del mismo.

Las deficiencias hídricas en la etapa de llenado de grano, provocadas en el T3 disminuyeron en 24% el peso de grano promedio en relación al obtenido en T1.

## Rendimiento en grano

En la Figura 7, se muestran los rendimientos logrados en los T evaluados en maíz. Se aprecian diferencias estadísticas significativas entre el T2 con el T1 que no presentó deficiencias de agua durante el ciclo.

En el caso del T3 con deficiencias provocadas sólo durante el llenado de grano, mostró un comportamiento intermedio en rendimiento, no detectándose diferencias significativas con los restantes T evaluados, pero sí una tendencia fuerte a obtener rendimientos superiores a T2 e inferiores a T1 y T4.

Se constató que los T que presentaron disponibilidades hídricas elevadas durante el PC permitieron obtener altas TCC promedio durante ese periodo, las cuales fueron determinantes para lograr un elevado N° de granos por superficie. Los mayores rendimientos en grano dependen de obtener un alto N° de granos/m<sup>2</sup>, (Andrade et al. 1996).

El T2 que como se indicara presentó bajas TCC durante el PC y como consecuencia un escaso N° de granos/m<sup>2</sup>, mostró los menores rendimientos, no obstante, la mejores condiciones hídricas de este T durante la etapa de llenado de grano. Los resultados confirman la reducida capacidad para compensar un bajo N° de granos con el mayor peso de los mismos que presenta la especie.

La disminución del rendimiento en grano provocada por deficiencias hídricas durante el PC fue de 6.387 Kg/ha, o sea las pérdidas fueron del 48% del rendimiento potencial obtenido en el T1.

Las pérdidas en rendimiento por deficiencias de agua durante el llenado de grano fueron de 4.048 Kg./ha e implicaron una disminución del 31% en relación al rendimiento logrado en el T1.

El T4 debido a las condiciones hídricas del año mostró altas TCC durante el PC, las cuales permitieron obtener un N° de granos por superficie elevado. Durante la etapa de llenado de grano la disponibilidad hídrica se mantuvo y como consecuencia los rendimientos fueron elevados, no presentando diferencias significativas con el T1.

## Soja

En soja de acuerdo a las condiciones climáticas del año ya comentadas fue posible evaluar 3 tratamientos de disponibilidad hídrica, denominados de la siguiente forma:

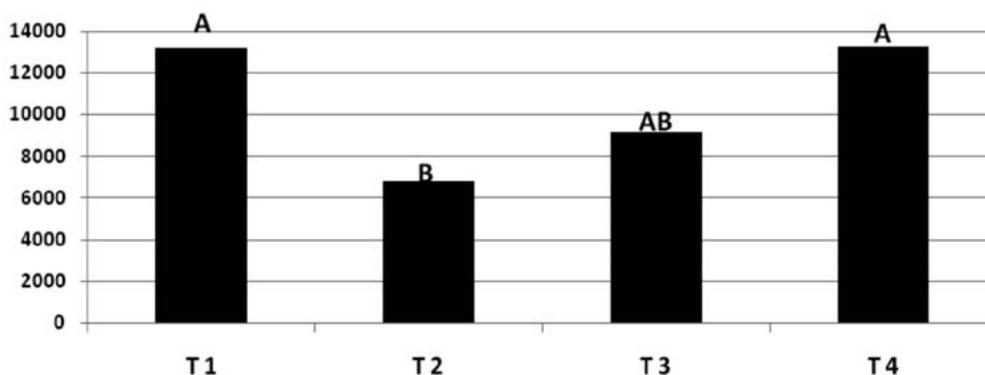
T1 = Bienestar hídrico. Contenido de agua en suelo durante el PC superior a 60% AD y durante el PNC posterior al PC, superior a 40% AD.

T2 = Deficiencias hídricas en el PC. Contenidos de agua en suelo durante el PC inferior a 60% AD y durante PNC posterior al PC, superior a 40% AD.

T3 = Secano

Las condiciones climáticas del año de estudio provocaron que durante la etapa vegetativa y las primeras etapas reproductivas R1 y R2 (Ferh y Caviness, 1977), el contenido hídrico del suelo en los T evaluados fue similar y sin deficiencias hídricas.

Figura 7: Rendimiento (Kg/ha) en grano de maíz



\* Letras distintas indican diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ )

La duración del ciclo (emergencia-cosecha) fue de 114 días, y se ubicó temporalmente entre el 14 de diciembre y el 7 de abril.

Las PP totales fueron de 1.331mm con 28 eventos de lluvia, aproximadamente el 25% del ciclo del cultivo presentó PP con consecuencias similares sobre la radiación solar y las temperaturas a las comentadas para maíz.

En la Figura 8, se presentan los resultados de los muestreos de agua en suelo realizados durante el período más crítico (Kantolic et al. 2003) de determinación del rendimiento en soja entre los

estadios R4 y R6, ubicado temporalmente entre el 10 de febrero y 10 de marzo.

Se observa en el T1 una baja dispersión entre las medidas realizadas y el contenido de agua en suelo, es el más elevado de los T evaluados.

En el T2 se visualiza también una baja dispersión entre las mediciones de agua y en este caso es el T que presentó menor disponibilidad hídrica durante el PC.

El T3 muestra la mayor dispersión entre medidas y el comportamiento se debe obviamente a la falta de control en la disponibilidad hídrica por ser el tratamiento de secano.

En la Figura 9, se muestra la evolución de la MS en los tres muestreos realizados durante el PC. En el muestreo del 27 de enero, los T evaluados muestran una deposición de MS similar, como se indicara las disponibilidades hídricas durante la etapa vegetativa fueron elevadas en los 3 T evaluados.

Cabe indicar que entre el 19 y 22 de febrero hubo PP acumuladas del orden de 225mm que en el T2 se lograron contener mayormente a través de los simuladores de sequía.

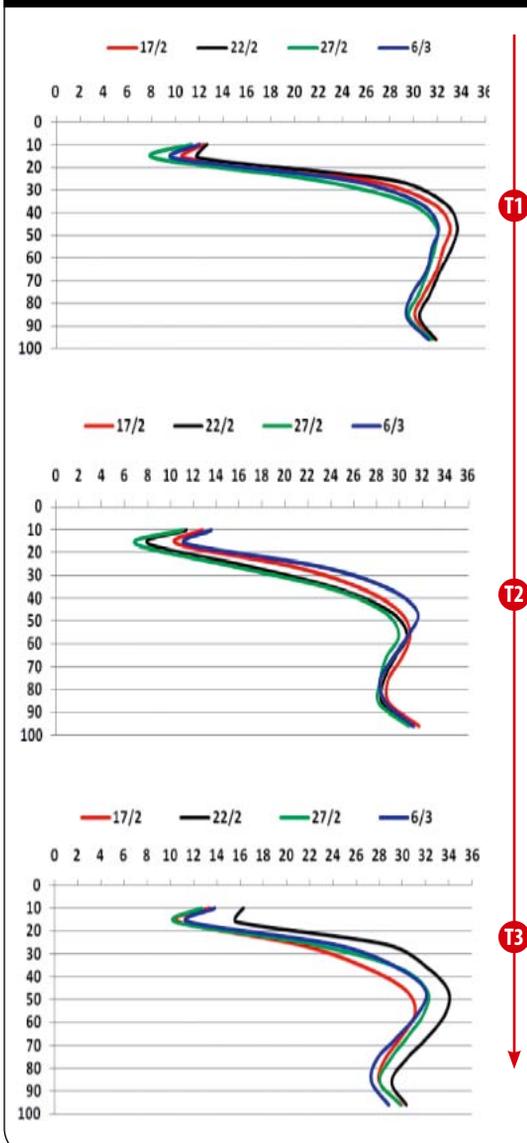
En el segundo muestreo de MS del 24 de febrero, se presentaron diferencias entre T1 y T2 del orden de 2665 Kg/ha a favor del T1, las cuales implican en el T2 una deposición de MS 32% menor a causa de las deficiencias hídricas provocadas durante el PC. Este efecto de menor crecimiento de soja se debe a la diferencia entre la disponibilidad hídrica y las necesidades de agua del cultivo.

En el tercer muestreo de MS que se realizó a fines del PC, la diferencia en MS entre T1 y T2 se amplió a 3.650 Kg/ha, en definitiva 47% menos de deposición de MS entre los T con y sin deficiencias hídricas durante el PC.

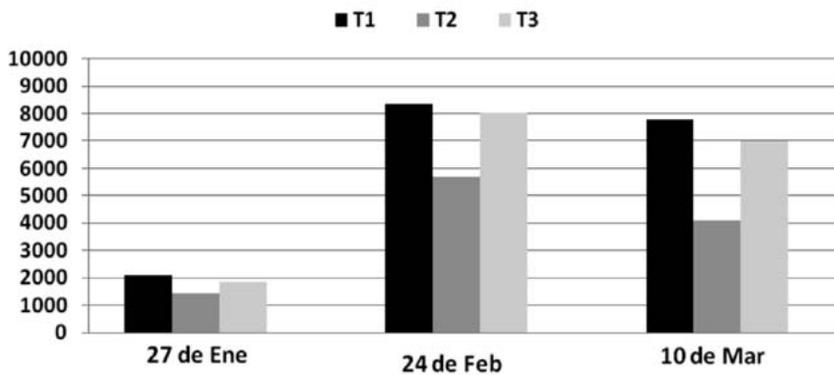
En el caso del T3 debido a las condiciones hídricas del año la producción de MS fue similar a la del T1 en los muestreos analizados.

En la Figura 10 se muestra la materia seca aérea depositada durante las etapas R2 y R6 de soja, se destaca el crecimiento durante este periodo de 5.700 Kg/ha en el T1 y 2.200 Kg/ha en el T2.

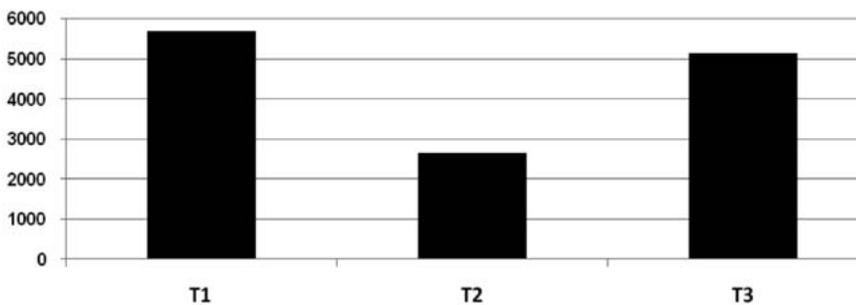
**Figura 8:** Contenido de agua en suelo (% vol.) en mediciones cada 10 cm de profundidad en t1,t2 y t3.



**Figura 9:** Evolución de la MS (Kg/ha) en soja



**Figura 10:** Materia seca (Kg/ha) aérea depositada durante el pc en soja



### Componentes del rendimiento

En el Cuadro 3, se muestran los resultados obtenidos en los principales componentes del rendimiento de soja.

**Cuadro 3.** Componentes del rendimiento en soja

	Nº granos m <sup>-2</sup>	Peso 1000 granos (g)
T1	2474	198
T2	1195	197
T3	2592	190

En el N° de granos/m<sup>2</sup> se presentan diferencias entre T1 y T2, se observa una clara respuesta del cultivo a la disponibilidad hídrica durante el pc. El T1 permitió altas TCC que habilitaron a fijar un N° de granos/m<sup>2</sup> claramente superior al T2.

El T3 debido a las condiciones hídricas del año no presentó deficiencias de agua durante el pc

concretando un alto N° de granos/m<sup>2</sup>, no se detectaron diferencias entre T1 y T3.

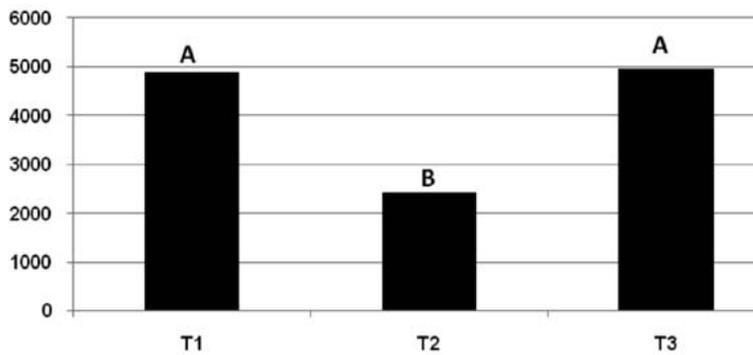
En relación al peso promedio de los granos, no hubo diferencias entre los T evaluados. Las deficiencias hídricas provocadas entre R4 y R6 en el T2, afectaron solo el N° de granos/m<sup>2</sup>.

### Rendimiento en grano

En la Figura 11, se muestran los rendimientos obtenidos en los diferentes T evaluados en el ensayo. Se observa claramente las diferencias significativas entre T1 y T2 por causa de las deficiencias hídricas provocadas durante el pc de determinación del rendimiento. El bajo N° de granos por superficie del T2 es responsable de la disminución del rendimiento en grano. Las escasas TCC durante el pc afectaron en forma negativa la fijación de granos.

Las deficiencias de agua provocadas durante el pc en el T2 significaron diferencias en el rendimiento de 2.449 Kg/ha con el T1, esto repre-

**Figura 11:** Rendimiento en grano de soja



\* Letras distintas indican diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ )

senta una disminución de 50% del rendimiento potencial de soja.

### 3.4. Consideraciones finales

Los resultados principales de los experimentos de maíz y soja se explican a través de un enfoque eco-fisiológico de la producción de granos. Las TCC durante el PC establecen las condiciones para fijar el N° granos/m<sup>2</sup> que es el componente principal del rendimiento en grano. Para lograr altas TCC durante el PC que permitan por consiguiente la sobrevivencia de un N° de granos/superficie elevado, es necesario disponer de altos contenidos hídricos de suelo durante el PC.

Los resultados primarios obtenidos indican que las deficiencias hídricas solo durante el PC provocaron pérdidas de rendimiento en maíz

de 6.387 Kg./ha y en soja de 2.449 Kg/ha, esto implicó el 48 y 50% del rendimiento potencial respectivamente, en un año agrícola afectado significativamente por la falta de luz.

En maíz las deficiencias hídricas durante la etapa de llenado de grano significaron altas pérdidas de rendimiento del orden de 4.048 Kg/ha, esto implicó una disminución de aproximadamente el 30% del rendimiento potencial.

**Agradecimientos:** El autor desea agradecer al INIA por financiar el proyecto FPTA 261, a los tesistas Juan Pablo Grasso, Joaquín Grasso y Agustín Montero, al becario de investigación Richard Arévalo y también a Matías y a Gerónimo Giménez, sin cuyo esfuerzo en los ensayos de campo hubiera sido imposible obtener los resultados logrados.