



**INSTITUTO
NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN
AGROPECUARIA
URUGUAY**



RIEGO SUPLEMENTARIO EN CULTIVOS Y PASTURAS

Julio, 2014

**SERIE
FPTA-INIA**

55

RIEGO SUPLEMENTARIO EN CULTIVOS Y PASTURAS

Proyecto FPTA-261 Respuesta física y económica al riego suplementario en cultivos y pasturas y desarrollo de la tecnología de riego por superficie en siembra directa

Responsable del Proyecto: Luis Giménez

Institución Participante: Facultad de Agronomía

Equipo técnico de trabajo: Mario García Petillo, Pablo Boggiano, Laura Piedrabuena

Título: RIEGO SUPLEMENTARIO EN CULTIVOS Y PASTURAS

Responsable del Proyecto: Luis Giménez

Institución Ejecutora: Facultad de Agronomía

Equipo técnico de trabajo: Mario García Petillo
Pablo Boggiano
Laura Piedrabuena

Serie: FPTA N° 55

© 2014, INIA

Editado por la Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA

Andes 1365, Piso 12. Montevideo - Uruguay
<http://www.inia.uy>

Quedan reservados todos los derechos de la presente edición. Esta publicación no se podrá reproducir total o parcialmente sin expreso consentimiento del INIA.

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria

Integración de la Junta Directiva

Ing. Agr., MSc., PhD. Álvaro Roel - Presidente

D.M.T. V., PhD. José Luis Repetto - Vicepresidente



D.M.V. Álvaro Bentancur

D.M.V., MSc. Pablo Zerbino



Ing. Agr. Joaquín Mangado

Ing. Agr. Pablo Gorriti



FONDO DE PROMOCIÓN DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA

El Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria (FPTA) fue instituido por el artículo 18º de la ley 16.065 (ley de creación del INIA), con el destino de financiar proyectos especiales de investigación tecnológica relativos al sector agropecuario del Uruguay, no previstos en los planes del Instituto.

El FPTA se integra con la afectación preceptiva del 10% de los recursos del INIA provenientes del financiamiento básico (adicional del 40/00 del Impuesto a la Enajenación de Bienes Agropecuarios y contrapartida del Estado), con aportes voluntarios que efectúen los productores u otras instituciones, y con los fondos provenientes de financiamiento externo con tal fin.

EL FPTA es un instrumento para financiar la ejecución de proyectos de investigación en forma conjunta entre INIA y otras organizaciones nacionales o internacionales, y una herramienta para coordinar las políticas tecnológicas nacionales para el agro.

Los proyectos a ser financiados por el FPTA pueden surgir de propuestas presentadas por:

- a) los productores agropecuarios, beneficiarios finales de la investigación, o por sus instituciones.
- b) por instituciones nacionales o internacionales ejecutoras de la investigación, de acuerdo a temas definidos por sí o en acuerdo con INIA.
- c) por consultoras privadas, organizaciones no gubernamentales o cualquier otro organismo con capacidad para ejecutar la investigación propuesta.

En todos los casos, la Junta Directiva del INIA decide la aplicación de recursos del FPTA para financiar proyectos, de acuerdo a su potencial contribución al desarrollo del sector agropecuario nacional y del acervo científico y tecnológico relativo a la investigación agropecuaria.

El INIA a través de su Junta Directiva y de sus técnicos especializados en las diferentes áreas de investigación, asesora y facilita la presentación de proyectos a los potenciales interesados. Las políticas y procedimientos para la presentación de proyectos son fijados periódicamente y hechos públicos a través de una amplia gama de medios de comunicación.

El FPTA es un instrumento para profundizar las vinculaciones tecnológicas con instituciones públicas y privadas, a los efectos de llevar a cabo proyectos conjuntos. De esta manera, se busca potenciar el uso de capacidades técnicas y de infraestructura instalada, lo que resulta en un mejor aprovechamiento de los recursos nacionales para resolver problemas tecnológicos del sector agropecuario.

El Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria contribuye de esta manera a la consolidación de un sistema integrado de investigación agropecuaria para el Uruguay.

A través del Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria (FPTA), INIA ha financiado numerosos proyectos de investigación agropecuaria a distintas instituciones nacionales e internacionales. Muchos de estos proyectos han producido resultados que se integran a las recomendaciones tecnológicas que realiza la institución por sus medios habituales.

En esta serie de publicaciones, se han seleccionado los proyectos cuyos resultados se considera contribuyen al desarrollo del sector agropecuario nacional. Su relevancia, el potencial impacto de sus conclusiones y recomendaciones, y su aporte al conocimiento científico y tecnológico nacional e internacional, hacen necesaria la amplia difusión de estos resultados, objetivo al cual se pretende contribuir con esta publicación.

CONTENIDO

Página

Respuesta al riego suplementario en cultivos de verano y evaluación de pérdidas de rendimiento por deficiencias hídricas	9
Evaluación de la respuesta al riego suplementario de gramíneas perennes durante el período estival	29
Generación de tecnología para el diseño de riego por melgas, adaptada a las condiciones del Uruguay. Primer aporte	45
Evaluación económica del riego suplementario en cultivos y pasturas	59

Giménez L.¹, Canosa G.², Prieto, C.², Grasso J.P.², Montero, A.², Rameau M.², Rosa A.², Arévalo R.³

¹Departamento de Producción Vegetal
Facultad de Agronomía.

² Tesista.

³ Becario.

Respuesta al riego suplementario en cultivos de verano y evaluación de pérdidas de rendimiento por deficiencias hídricas

Proyecto FPTA 261

Período de Ejecución: May. 2009-Set. 2012

INTRODUCCIÓN

La agricultura nacional se modificó significativamente en los últimos años, la superficie sembrada se multiplicó por cuatro aproximadamente entre 2000 y 2012 (MGAP-DIEA, 2013). Asimismo, la actividad agrícola que era mayoritariamente invernal y dominada por trigo y cebada, se transformó en principalmente estival con un predominio marcado del cultivo de soja. Con las transformaciones producidas se modificaron las limitantes ambientales más importantes y los principales problemas del manejo agrícola. Los cultivos de verano realizados en secano, poseen como principal limitante la disponibilidad hídrica en primavera y verano, y como consecuencia ésta es la determinante fundamental del rendimiento. Cuando la disponibilidad de agua no es adecuada a los requerimientos en las diferentes etapas de desarrollo, los cultivos disminuyen su potencial productivo.

La disponibilidad hídrica de los cultivos de verano está determinada por tres factores relacionados a la oferta y a la demanda de agua, a saber:

a) El inicio de la estación de crecimiento de los cultivos de verano está limitado por las temperaturas, esto provoca que las siembras se deban comenzar en los meses de setiembre en maíz y de octubre en soja y sorgo, y por lo tanto las etapas de mayor importancia en la determinación del rendimiento se ubican en los meses de mayor demanda atmosférica (diciembre, enero y febrero).

b) La capacidad de almacenamiento de agua disponible en la mayoría de los suelos es relativamente baja en relación al consumo de los cultivos, la misma puede cubrir aproximadamente entre el 20 y 30 % del consumo, esta limitante de los suelos genera una gran dependencia de las recargas hídricas.

c) Las recargas de agua en los suelos del país proviene casi exclusivamente de las precipitaciones (PP) y el régimen de éstas posee como característica principal la elevada variabilidad, tanto en volumen como en intensidad, y en general no cubren las demandas atmosféricas en las etapas críticas de determinación del rendimiento.

Cuando la disponibilidad de agua es limitante y se encuentra por debajo de los umbrales requeridos, la transpiración de los cultivos se reduce y la disminución depende directamente de características del cultivo como la capacidad para absorber agua, el sistema radicular, el ajuste osmótico y de factores del suelo como el contenido de agua disponible (AD) y la conductividad hidráulica. Las reducciones en la transpiración provocan descensos en la fijación de CO₂ y como consecuencia en la producción de biomasa e índice de cosecha (Fereris y Soriano, 2007).

En cultivos de verano realizados en secano existe alta dependencia de las recargas hídricas para satisfacer las demandas (Sawchik, 2012). La disponibilidad de agua es la responsable principal de la falta de estabilidad productiva y de

la brecha entre los rendimientos potenciales y los obtenidos a nivel comercial. El rendimiento potencial se encuentra determinado por factores no modificables del ambiente como la radiación solar, las temperaturas y los suelos, así como por factores de manejo modificables como: fecha de siembra, densidad de plantas, distancia entre hileras, fertilización y el control de malezas, plagas y enfermedades. La información nacional sobre rendimientos potenciales en cultivos de verano, excepto en arroz, es escasa, ya que mayoritariamente la investigación se ha realizado en secano, el conocimiento de los mismos posee valor como punto de referencia para saber las brechas de rendimiento entre diferentes manejos del agua. Asimismo, conocer la respuesta productiva de los cultivos a diferentes disponibilidades hídricas en las distintas etapas de desarrollo, es un aspecto relevante para definir las mejores estrategias de riego suplementario. Este trabajo tuvo por objetivo principal cuantificar las disminuciones del rendimiento en maíz, soja y sorgo, producidas por deficiencias hídricas en diferentes 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 Paysandú a 32° 22' S y 58° 03' O, durante las temporadas 2009-10, 2010-11 y 2011-12.

El suelo es un Brunosol sub-éutrico típico, perteneciente a la formación Fray Bentos y a la unidad San Manuel, Altamirano *et al.* (1976). El análisis químico realizado el primer año experimental indicó: 3,3 % de MO y 10 ppm de P.

En el primer año el suelo se fertilizó con 120 kg ha⁻¹ de P-PO₄, utilizando como fuente súper fosfato triple de calcio (0-46-46-0), se aplicó previo al laboreo y se incorporó con el mismo. En 2010 y 2011 los análisis indicaron 20 y 15 ppm de P en suelo respectivamente, por lo que no fue necesario fertilizar. La fertilización nitrogenada en maíz y sorgo se realizó a razón de 300 kg ha⁻¹ de N en cada año de estudio, se fraccionó la dosis en dos partes iguales a V6 y V12, la fuente utilizada fue urea. El laboreo fue de tipo convencional y se realizó con rastra de discos excéntrica y rastra de dientes. Los parámetros hidrológicos principales del suelo se muestran en el Cuadro 1.

En las Figuras 1 y 2 se presentan las precipitaciones (PP) y la radiación solar, respectivamente, para cada temporada evaluada y para el promedio entre los años 2002 y 2012.

Se realizaron tres ensayos por año correspondiendo uno a cada cultivo en estudio: maíz, soja y sorgo. Los tratamientos evaluados en cada ensayo fueron cinco y estuvieron compuestos por diferentes disponibilidades de agua en las distintas etapas de desarrollo de los cultivos.

En maíz y sorgo los tratamientos fueron los siguientes:

- T1= Sin deficiencias hídricas
- T2= Deficiencias hídricas en el periodo crítico (PC)
- T3= Deficiencias hídricas en el llenado de grano
- T4= Deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y en el PC
- T5= Secano

Cuadro 1. Profundidad de los horizontes (A, B y total) y parámetros hídricos y físicos del suelo del campo experimental de la EEMAC.

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	205	125	1,34	80
A-B	0-70	259	153		106

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

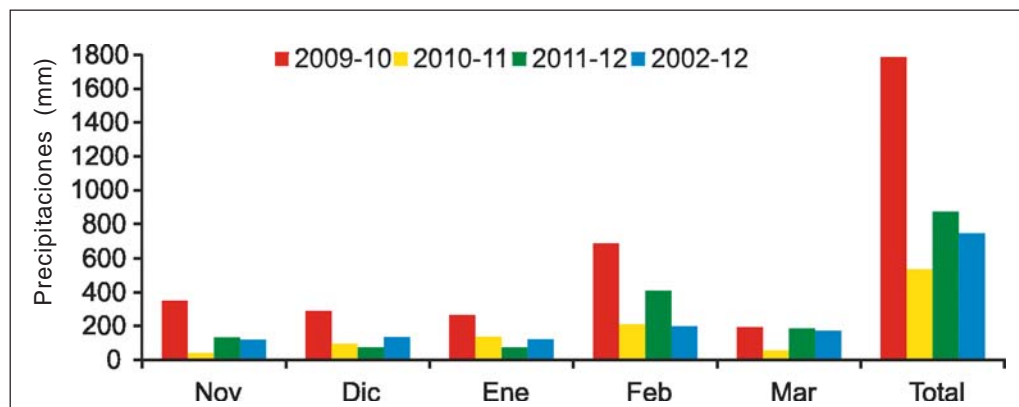


Figura 1. Precipitaciones (mm) mensuales y totales entre los meses de noviembre y marzo, para las temporadas 2009-10, 2010-11 y 2011-12 y el promedio entre 2002 y 2012.

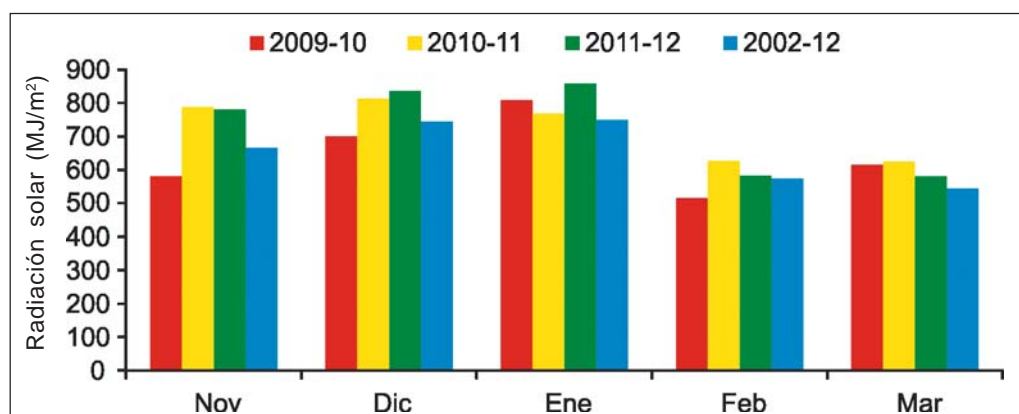


Figura 2. Radiación solar acumulada mensual (MJ/m²) entre los meses de noviembre y marzo para las temporadas 2009-10, 2010-11 y 2011-12 y el promedio entre 2002 y 2012.

En soja los tratamientos fueron:

- T1= Sin deficiencias hídricas
- T2= Deficiencias hídricas en el PC (R4-R6, Fehr y Caviness, 1977)
- T3= Deficiencias hídricas en etapa vegetativa y floración (R1- R2, Fehr y Caviness, 1977)
- T4= Deficiencias hídricas en etapa vegetativa y PC
- T5= Secano

Los T1, T2, T3 y T4 de los experimentos fueron provocados por medio de dos tipos de intervenciones en la disponibilidad hídrica de los cultivos: a) riego suplementario y b) colocación de simuladores de sequía durante los eventos de PP con el objetivo de interceptar el ingreso de agua a las parcelas en los tratamientos con deficiencias hídricas.

El riego se realizó por un sistema de goteo, con cintas con goteros cada 0,2 m

y un caudal de 1,49 l h⁻¹. Se aplicó el agua de riego de acuerdo a la variación del porcentaje de AD del suelo, el cual fue estimado a través de un balance hídrico de suelos simplificado de paso diario. Las variaciones del contenido de agua en el suelo fueron calculadas mediante la expresión: $\Delta S = PP + R - ETc$

siendo: ΔS = variación de AD (mm), R= riego (mm) y ETc= evapotranspiración de cultivo (mm), calculada como $ETc = ETo \times Kc$, siendo ETo la evapotranspiración del cultivo de referencia (mm), la cual se estimó a través de la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) y para los Kc = coeficiente de cultivo, se utilizaron los propuestos por FAO (Allen *et al.*, 1998). Los parámetros climáticos para estimar la ETo fueron medidos a través de una estación meteorológica automática, ubicada en la EEMAC, aproximadamente a 2000 m del sitio experimental.

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

Los simuladores de sequía utilizados fueron construidos en hierro con cubiertas de lona impermeable, las dimensiones de los mismos para soja y sorgo fueron de 2 m de ancho, 5 m de largo y 1,5 m de altura máxima y para maíz el ancho fue de 3,5 m, la longitud de 5 m y la altura máxima de 2,5 m. Los simuladores se colocaron inmediatamente antes de cada evento de PP y fueron retirados inmediatamente después del mismo, intentando no modificar sustancialmente



Figura 3.



Figura 4.

las condiciones de radiación solar y temperaturas. Las parcelas estuvieron limitadas externamente por una ronda de 0,2 m de altura construida en tierra, para impedir la entrada de agua de escurrimiento. En cada parcela se construyó un desagüe para evacuar el agua de lluvia proveniente de los techos de los simuladores.

En las Figuras 3, 4 y 5 se muestran los simuladores de sequía utilizados en las parcelas con deficiencias hídricas planificadas.

El consumo de agua de los tratamientos fue estimado a través de la medición del contenido hídrico del suelo mediante un equipo de sonda de neutrones CPN modelo 503DR HIDROPROBE. Las mediciones de agua se realizaron semanalmente cada 0,1 m, en tubos de acceso de aluminio de 1 m de longitud y 2 pulgadas de diámetro.

En cada tratamiento se midió el rendimiento en grano y los componentes principales del rendimiento. Asimismo, se estimaron los consumos de agua de los cultivos en las distintas estrategias de disponibilidad hídrica.

Los datos fueron analizados estadísticamente a través del programa InfoStat Profesional versión 2013, se realizó para cada variable un análisis de varianza y la comparación entre medias a través del estadístico Tuckey al 5 %.

Manejo de los cultivos

Maíz

Las siembras fueron realizadas con sembradora experimental en las fechas del 22, 27 y 29 de octubre de 2009, 2010 y 2011, respectivamente. El híbrido utilizado fue DK 692 de ciclo intermedio. Las parcelas de los ensayos estuvieron compuestas por 5 surcos, de 5 m de longitud sembrados a una distancia entre hileras de 0,7 m. La población lograda fue de 100.000 plantas ha⁻¹. El control químico de malezas se realizó con Atrazina a una dosis de 1,5 l ha⁻¹ de producto comercial, la aplicación se realizó previamente a la siembra y se incorporó con el laboreo. Se efectuó en cada temporada una aplicación de insecticida Clorpirifos a dosis de

fue realizada el 16 de marzo de 2011 y 2012, respectivamente. En la superficie de cosecha se determinó: el número de panojas, el número de granos por panoja y con esta información se calculó el número de granos metro cuadrado y se midió el peso promedio de grano.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Maíz

Rendimiento en grano

En la Figura 6, se muestra el rendimiento en grano obtenido en los diferentes tratamientos evaluados en las tres temporadas de estudio. Se observa que en el T1 sin deficiencias hídricas, el rendimiento varió entre 13 y 15 t ha⁻¹ aproximadamente. Los menores rendimientos en el T1 se obtuvieron en la temporada 1, como consecuencia de las características climáticas extremas en dicha temporada que presentaron PP muy superiores a los promedios del país (Figura 1) que provocaron una baja radiación solar incidente durante la mayor parte del ciclo, dado el número elevado de días nublados. Estas características climáticas impidieron una mayor fijación de CO₂ y como consecuencia se afectó en forma negativa la producción de biomasa y rendimiento en grano. En las temporadas 2 y 3, no se presentaron factores de clima extremos y los rendimientos obtenidos fueron del entorno de las 15 t ha⁻¹. El rendimiento logrado en el T1 en los tres años evaluados, concuerda con resultados experimentales anteriores obtenidos en el país (Roselli y Teixeira, 1998; Giménez, 2000; Giménez *et al.* 2002; Puppo *et al.* citados por Baccino, 2002).

A partir del análisis de los resultados no se aprecian en la última década, cambios significativos en el rendimiento de maíz desarrollado con agua no limitante, debido a que los mismos coinciden con los reportados anteriormente. Las variaciones entre años que ocurren en el rendimiento de maíz con riego, se deben principalmente a los cambios producidos entre años, en otros factores climáticos como la radiación solar y el régimen térmico.

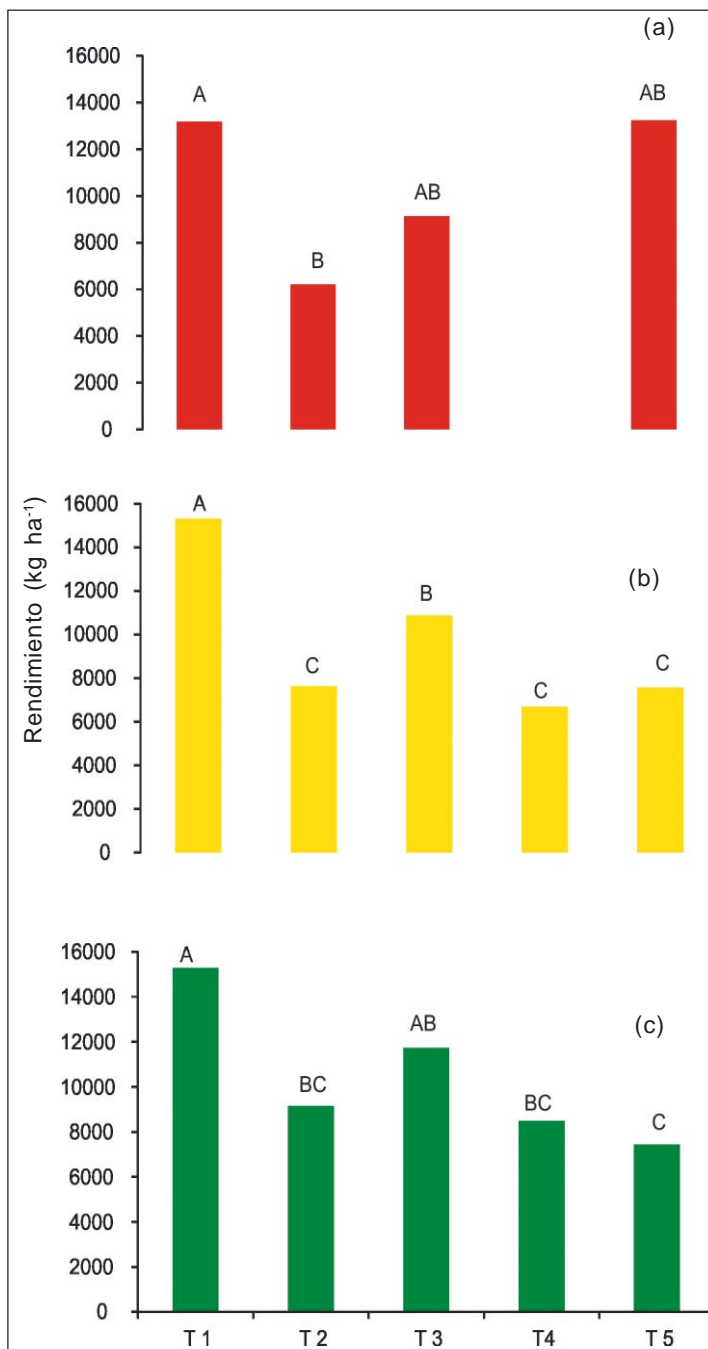


Figura 6. Rendimiento en grano (kg ha⁻¹) de maíz para los tratamientos evaluados en las temporadas 2009-10 (a), 2010-11 (b) y 2011-12 (c).

La información obtenida confirmó que los rendimientos en grano en maíz con riego durante todo el ciclo son elevados. Las variaciones entre años dependen de las características climáticas de cada año, principalmente del comportamiento de las PP, radiación solar y temperaturas. En los años «Niño» con excesos de

PP, los rendimientos potenciales disminuyen y se ubican en el valor inferior del rango mencionado. En cambio, en los años «Niña» con PP por debajo del promedio y elevada radiación solar sin deficiencias hídricas, se obtienen los mayores rendimientos.

En relación al efecto de las deficiencias hídricas en las distintas etapas de desarrollo del maíz, se constató que las mayores disminuciones del rendimiento se produjeron en el T2 y en el T4, o sea cuando las deficiencias hídricas fueron provocadas en el PC y cuando se acumularon en la etapa vegetativa y el PC, respectivamente. Se confirmó el valor que posee la disponibilidad hídrica en el PC de maíz (Andrade, 1996). Asimismo, se cuantificó que la disminución del rendimiento del T2 en relación al T1 varió entre 6,1 y 7,7 t ha⁻¹ aproximadamente, esto implicó mermas de los rendimientos de 40 a 53 % por deficiencias de agua en el PC. En el caso de las deficiencias hídricas acumuladas en la etapa vegetativa y el PC evaluadas en el T4, se obtuvieron pérdidas de rendimiento que variaron entre 6,8 y 8,6 t ha⁻¹, implicando disminuciones de 44 a 56 %, en relación al T1. De los resultados se deduce que las deficiencias hídricas en las etapas vegetativas, agregaron escasas pérdidas del rendimiento (4 a 6 %) en relación a las ocurridas sólo durante el PC.

Las deficiencias hídricas provocadas en la etapa de llenado de grano y evaluadas en el T3, mostraron menores efectos sobre los rendimientos que las provocadas en el PC, no obstante las pérdidas en grano con deficiencias durante el llenado de grano variaron entre 3,5 y 4,5 t ha⁻¹ aproximadamente, implicando pérdidas porcentuales de 23 a 31 % en relación al T1.

El T5 presentó disminuciones de rendimiento en relación al T1 que variaron entre 0 y 8 t ha⁻¹ aproximadamente, en los tres temporadas evaluadas, implicando pérdidas de grano que variaron entre 0 y 52 %. Esta gran variabilidad en los rendimientos obtenidos en el tratamiento en seco, se justificó por el comportamiento de las PP que provocó contenidos hídricos del suelo diametralmente diferentes en las distintas etapas de desarrollo del maíz.

Componentes del rendimiento

Número de granos por metro cuadrado y peso promedio de grano

En la Figuras 7 y 8, se muestran los resultados obtenidos en el número de granos por superficie y el peso promedio de grano, respectivamente. Los tratamientos que lograron los mayores rendimientos presentaron el número de granos por superficie más elevado. El T1 y el T3 en las tres temporadas obtuvieron los rendimientos más altos y el mayor número de granos m⁻². Estos resultados, se explicaron debido a que en ambos tratamientos, durante el entorno de la floración (PC de determinación del rendimiento en maíz), no se presentaron deficiencias hídricas y en ésta etapa es en la que se determina el número de granos, por ese motivo en el T1 y en el T3 se obtuvo un alto número de granos. Los efectos de las deficiencias de agua en el PC, se basan en que la disponibilidad hídrica afecta la tasa de crecimiento del cultivo en esa etapa y la misma es determinante del estado fisiológico del cultivo y éste de la fijación del número de granos. Si no se logra un buen estado fisiológico del cultivo durante el PC, el número de granos fijados disminuye en relación al potencial y con ello el rendimiento es afectado negativamente.

En la temporada 3 se logró el mayor número de granos m⁻² logrando 6.100 y 5.700 granos m⁻² para el T1 y el T3, respectivamente. En la temporada 2 los mismos tratamientos presentaron 4.900 y 4.800 granos m⁻² y en la temporada 1 el número de granos fue de 4.500 y 4.200 para T1 y para el T3, respectivamente. El bajo número de granos relativo de la temporada 1 se debió a las condiciones climáticas anteriormente detalladas, las que afectaron la tasa de crecimiento del cultivo y el número de granos. En la temporada 3 la elevada luminosidad y radiación solar posibilitaron altas tasas de crecimiento del cultivo durante el PC. En la temporada 2 las condiciones climáticas durante el PC no fueron extremas, por lo tanto se presentó un comportamiento intermedio en el número de granos.

En el T2 hubo una disminución del número de granos en relación al T1 que varió entre 2.100 y 2.800 granos m⁻², esta

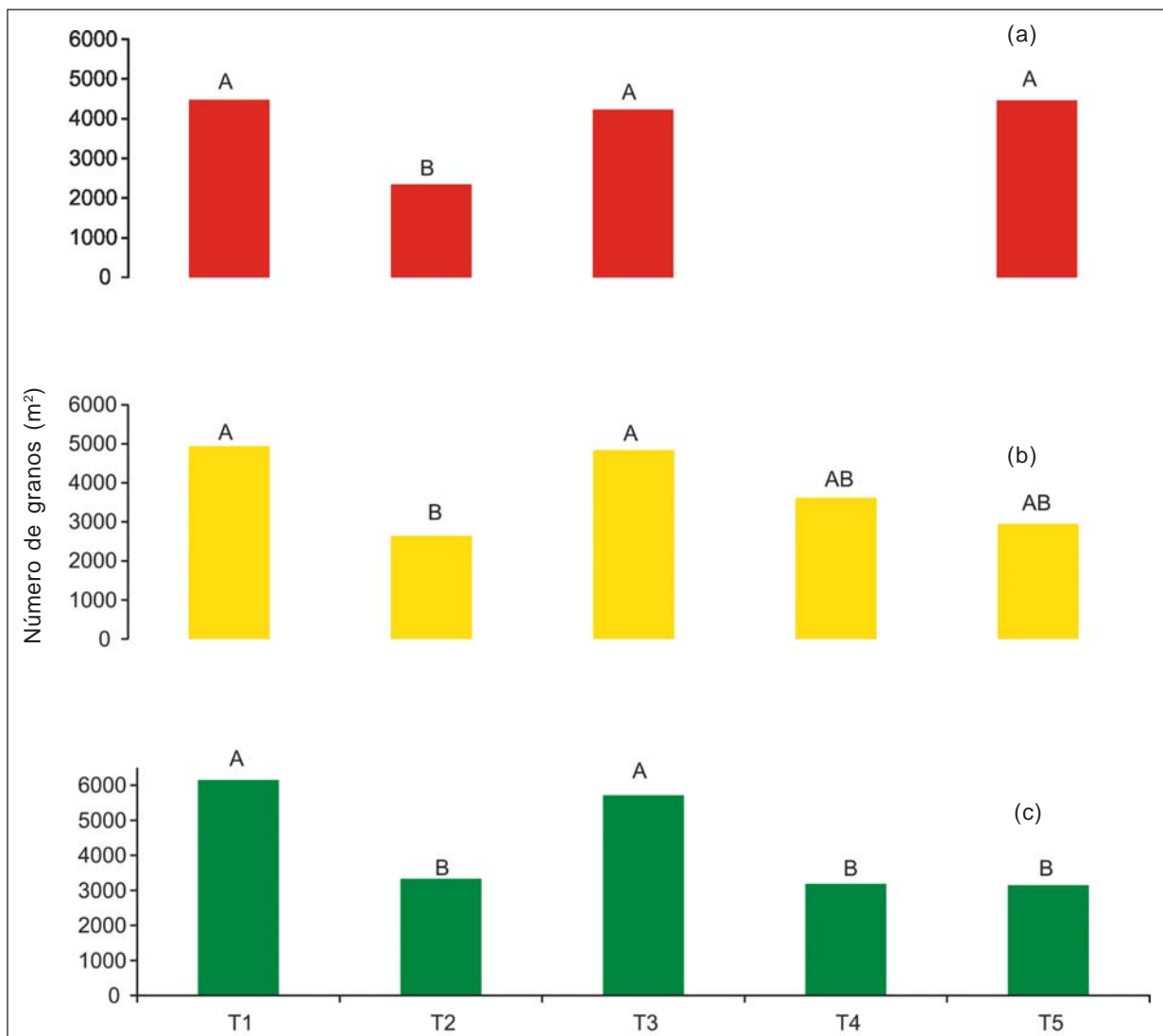


Figura 7. Número de granos por metro cuadrado de maíz en los tratamientos evaluados para las temporadas 2009-10 (a), 2010-11 (b) y 2011-12 (c).

reducción implicó entre 46 y 48 % de los granos. Se puede observar que las pérdidas de rendimiento del T2 fueron similares porcentualmente a la disminución del número de granos en relación al T1.

El T4 presentó un bajo número de granos por superficie, las pérdidas en granos variaron entre 2.000 y 3.000 granos m^{-2} aproximadamente, similares a las ocurridas en el T2, significando disminuciones de 40 a 48 % en relación al T1. En el tratamiento con deficiencias hídricas acumuladas en las etapas vegetativas y el PC, se determinó una baja fijación de granos por superficie que afectó significativamente el rendimiento.

El T5 presentó un comportamiento diferente en el número de granos por superficie, entre temporadas, en concordancia con el régimen de PP variable entre años. En la temporada 1 con elevadas PP el número de granos m^{-2} fue de 4.500 similar al obtenido en el T1. En cambio, en las temporadas 2 y 3 el número de granos m^{-2} varió aproximadamente entre 3.000 y 3.200. La tasa de crecimiento del cultivo durante el PC, en el caso del T5 varió directamente con la ocurrencia de PP, las cuales justifican la variabilidad obtenida, tanto en el número de granos por superficie como en el rendimiento.

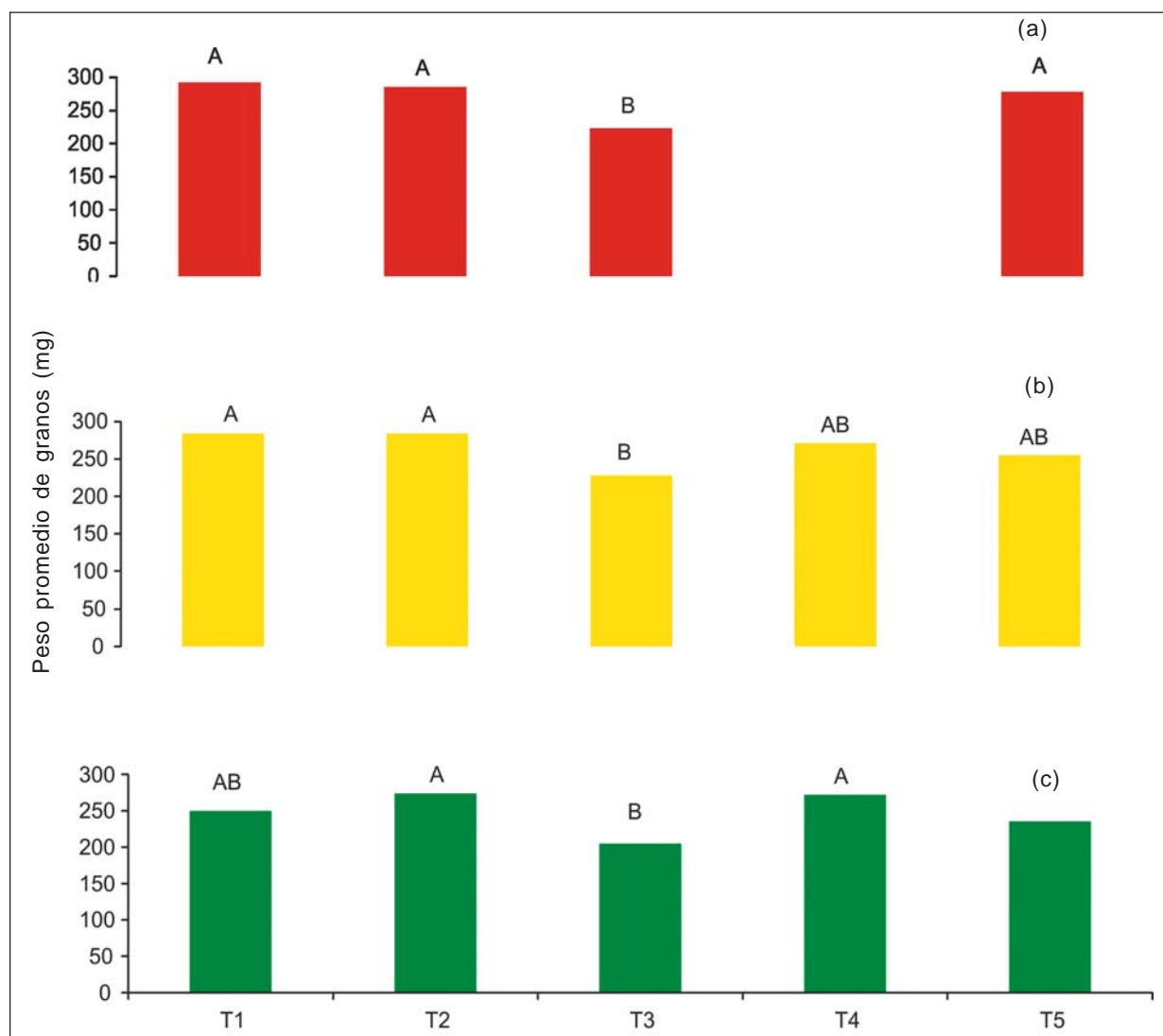


Figura 8. Peso promedio de granos (mg) en los tratamientos evaluados en las temporadas 2009-10 (a), 2010-11 (b) y 2011-12 (c).

En la etapa de llenado de granos se define el peso promedio del grano, que es un componente residual del rendimiento. Las deficiencias hídricas, en esta etapa, provocan disminuciones en la tasa de crecimiento del cultivo y como consecuencia el peso promedio del grano es afectado negativamente. El T3 en las tres temporadas del estudio presentó el menor peso de grano en los tratamientos evaluados. En cambio, en los T2 y T4 el peso de grano fue elevado dado que el número de granos fue bajo y la disponibilidad hídrica alta durante el llenado de grano, esto posibilitó un mayor crecimiento del cultivo en esta etapa.

De acuerdo a los resultados, se puede inferir que el rendimiento en maíz no se relaciona con el peso del grano, los T2 y los T4 presentaron un elevado peso de grano y un rendimiento bajo. Esto ocurre porque el componente principal del rendimiento es el número de granos m^{-2} . El T1 mostró pesos de granos elevados, excepto en la temporada 3, en que el número de granos fue muy alto y el peso de granos fue inferior incluso al obtenido en los T2 y T4, sin embargo el rendimiento logrado en el T1 fue el más elevado. La residualidad que presentó el peso promedio de grano fue notoria, en la medida que el número de granos fue elevado el peso

de grano fue bajo, debido a la escasez de fotoasimilados en la planta durante la etapa de llenado. En el T5 el peso promedio del grano fue variable de acuerdo a la ocurrencia de PP en la etapa de llenado de grano y al número de granos fijados.

Consumo de agua

En el Cuadro 5 se muestra el consumo total de agua para los diferentes tratamientos evaluados en las tres temporadas de estudio. Se destacó en el T1 la variabilidad en el consumo de agua. En la temporada 1, el consumo fue aproximadamente 140 mm menos que en las temporadas 2 y 3, esto se debió a que en el primer año experimental presentó mayores PP, un número elevado de días nublados, menor radiación solar incidente y como consecuencia una disminución en la demanda atmosférica y por consiguiente el consumo de agua total del cultivo fue menor.

En las temporadas 2 y 3 el consumo de agua del T1 fue similar y en el entorno de 600 mm, la demanda atmosférica fue más elevada que en la temporada 1 debido a la mayor radiación solar incidente, justificando de esa forma los consumos de agua mayores.

La etapa de desarrollo del ciclo en que el consumo de agua fue más elevado se ubicó en el entorno de la floración (PC), la misma posee una duración de 30 días aproximadamente y el consumo de agua fue de 38 a 40 % del total. Este alto consumo durante el PC, se debió a que el mismo ocurrió temporalmente durante los meses de mayor demanda atmosférica (diciembre y enero). Por lo tanto, el PC es una etapa cualitativamente impor-

tante en relación al AD para el cultivo y cuantitativamente significativa, en relación al consumo en el ciclo del maíz. El llenado de grano es la etapa que continúa al PC en consumo de agua, no obstante se ubicó temporalmente en meses con menor demanda atmosférica (febrero-marzo), pero la longitud de la etapa es la mayor en el ciclo y esto justifica el consumo.

Como se observa en el Cuadro 5, los tratamientos con deficiencias hídricas (T2, T3 y T4) presentaron menores consumos de agua y provocaron las disminuciones en el rendimiento analizadas anteriormente. El T5 presentó mayores consumos de agua en el año con PP más elevadas (temporada 1) y los consumos disminuyeron en las temporadas 2 y 3.

Soja

Rendimiento en grano

En la Figura 9 se muestran los resultados obtenidos en rendimiento de soja en los tratamientos evaluados, en las tres temporadas de estudio. El rendimiento en grano del T1 sin deficiencias hídricas, varió entre 4,9 y 7,3 t ha⁻¹ aproximadamente. Los rendimientos menores se obtuvieron en la temporada 1, al igual que en maíz debido a los excesos de PP y al elevado número de días nublados y a las consecuencias sobre la radiación solar incidente explicitadas anteriormente. Los rendimientos superiores se lograron en la temporada 2, en la que las PP durante el ciclo fueron las más bajas de las tres temporadas evaluadas.

La diferencia en el rendimiento de soja entre los T1 de la mejor y peor temporada

Cuadro 5. Consumo estimado de agua (mm) en maíz para los diferentes tratamientos, etapas de desarrollo y temporadas, evaluadas.

Etapa	Vegetativa			Entorno de floración			Llenado de grano			Ciclo			
	Año	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010	2011
Trat.													
T1	134	159	177	185	225	243	141	215	183	460	599	603	
T2	134	159	177	73	86	106	112	206	149	319	451	432	
T3	134	159	177	185	225	243	91	128	128	410	512	548	
T4	0	91	113	0	75	124	0	209	161	0	375	398	
T5	128	77	115	177	78	87	121	165	147	426	320	349	

fue de 33 % y en maíz esa misma diferencia alcanzó a 14 %. La soja es una especie de tipo fotosintético C3 y el maíz es C4, por lo tanto era esperable que los efectos negativos, ante la disminución de la radiación solar en la temporada 1 fueran mayores en el maíz que en la soja. La explicación encontrada fue que en soja en la temporada 1 además de los excesos hídricos por la ocurrencia de elevadas PP, se presentaron efectos negativos sobre el rendimiento debido a la fecha de siembra, la que se atrasó con respecto a la planificada debido a las continuas PP y fue sembrada a inicios del mes de diciembre. Por lo que en esa situación, se adicionaron a los efectos de las PP excesivas las consecuencias de una fecha de siembra tardía. Esto produjo menores temperaturas y radiación solar durante el PC, afectando significativamente el potencial de rendimiento en la temporada 1.

Además, se constataron diferencias en rendimiento en el T1 entre las temporadas 2 (7,3 t ha⁻¹) y 3 (6,2 t ha⁻¹), implicando diferencias de un 15 %. El número de PP y el volumen acumulado de las mismas durante el PC de la temporada 3, fue superior a la 2. El mes de febrero de la temporada 3 en la que se ubicó mayoritariamente el PC presentó PP superiores a 300 mm. Si bien el T5 fue favorecido por las PP, los tratamientos sin deficiencias hídricas en el PC, presentaron consecuencias negativas sobre la productividad.

El rendimiento de soja sin deficiencias hídricas fue de 5 a 7 t ha⁻¹ aproximadamente. La información científica en referencia a la respuesta de soja a condiciones hídricas ajustadas a los requerimientos del cultivo a la fecha es prácticamente inexistente.

Los mayores rendimientos en las tres temporadas evaluadas se lograron en las situaciones con elevada radiación solar y bajas PP durante el PC, habituales en los años «Niña» y los menores rendimientos se obtuvieron en condiciones de excesos de PP que ocurren principalmente en los años «Niño» y con siembras tardías de diciembre.

Las pérdidas de rendimiento por deficiencias hídricas durante el PC (T2) fueron de 2,5 a 3,2 t ha⁻¹ de grano aproximadamente, implicando reducciones de 44 a 50 % en relación al T1. Se destacó la susceptibilidad a las deficiencias hídricas de soja en el PC (R4 y R6) con disminuciones del rendimiento similares a las evaluadas en maíz.

En el caso del T3 en que las deficiencias se acumularon en la etapa vegetativa y la floración, las pérdidas de rendimiento en los años estudiados variaron entre 0,9 y 1,7 t ha⁻¹, implicando disminuciones entre 15 y 23 % del rendimiento logrado en el T1. Se constató que las deficiencias de agua en la etapa vegetativa no fueron de significación, la floración es una etapa de mayor susceptibilidad que la etapa vegetativa, sin embargo no es la etapa de mayor importancia en la determinación del rendimiento en grano de soja.

Las pérdidas de rendimiento del T4 variaron entre 2,4 y 2,5 t ha⁻¹ aproximadamente, implicando disminuciones de 32 a 40 % en relación al T1. Se comprobó que las disminuciones en el T2 fueron superiores a las producidas en el T4 con deficiencias en la etapa vegetativa y el PC. Este tipo de respuesta, se explicó por una menor competencia entre plantas durante el PC en el T4 en relación al T2, debido a un tamaño de plantas menor del T4 debido a que en este tratamiento las deficiencias hídricas comenzaron en la etapa vegetativa y continuaron durante el PC.

En el T5 las diferencias en rendimiento con el T1 variaron de 0 a 2,8 t ha⁻¹ aproximadamente, en los tres años de estudio, implicando pérdidas de rendimiento de 0 a 38 %. Es importante aclarar que en las tres temporadas durante los meses de febrero se presentaron PP importantes, y en este mes se ubicó mayoritariamente el PC, esta situación de buena disponibilidad hídrica en esta etapa justificó que las disminuciones en el rendimiento del T5 no fueran de significación, incluso en la temporada 1, como en los demás cultivos, se obtuvieron rendimientos similares al T1.

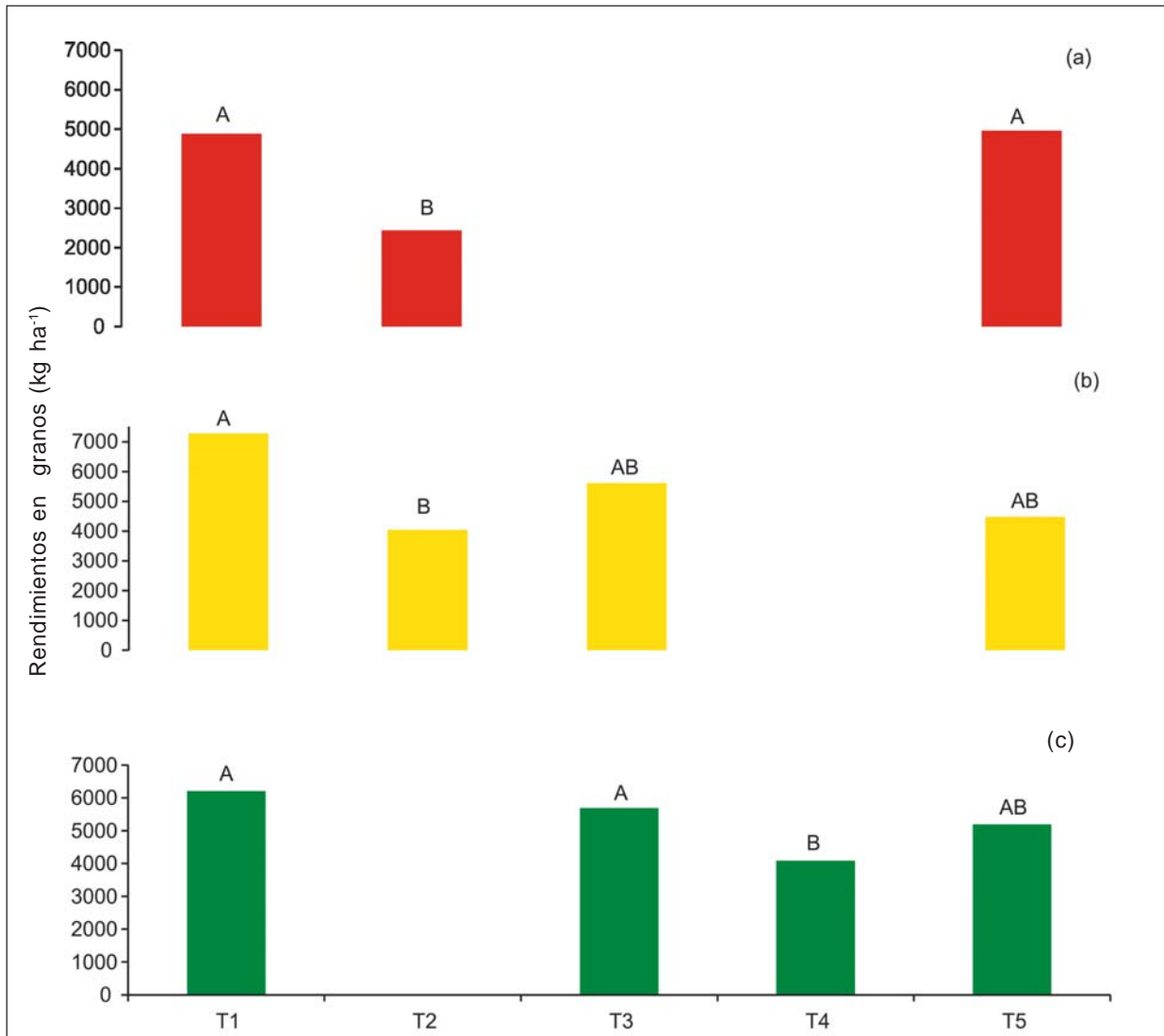


Figura 9. Rendimientos (kg ha⁻¹) en grano de soja en los tratamientos evaluados de las temporadas 2009-10 (a), 2010-11 (b) y 2011-12 (c).

Componentes del rendimiento

Número de granos por metro cuadrado y peso promedio de grano

En las Figuras 10 y 11 se muestran el número de granos por metro cuadrado y el peso promedio de grano respectivamente, en los diferentes tratamientos y años de estudio.

En la temporada 2 en el T1 se obtuvo el mayor número de granos m⁻² de las tres temporadas de evaluación. Asimismo, en este tratamiento el peso promedio de grano obtenido fue el menor, fue notoria la compensación que se presentó entre los dos componentes principales del rendimiento en el T1, a mayor número de

granos menor peso promedio de los mismos. Se constató en soja al igual que en maíz, la importancia decisiva del número de granos por superficie sobre el rendimiento y la jerarquía que posee la disponibilidad hídrica durante el PC en la definición de este componente.

En los T2 (temporadas 1 y 2) y en el T4 (temporada 3) con deficiencias hídricas durante el PC, fueron significativos los efectos negativos en la fijación del número de granos. En cambio, en los T3 (temporadas 2 y 3) con deficiencias acumuladas en la etapa vegetativa y en la floración, el número de granos por superficie fue elevado, no obstante se presentó una tendencia a presentar un menor nú-

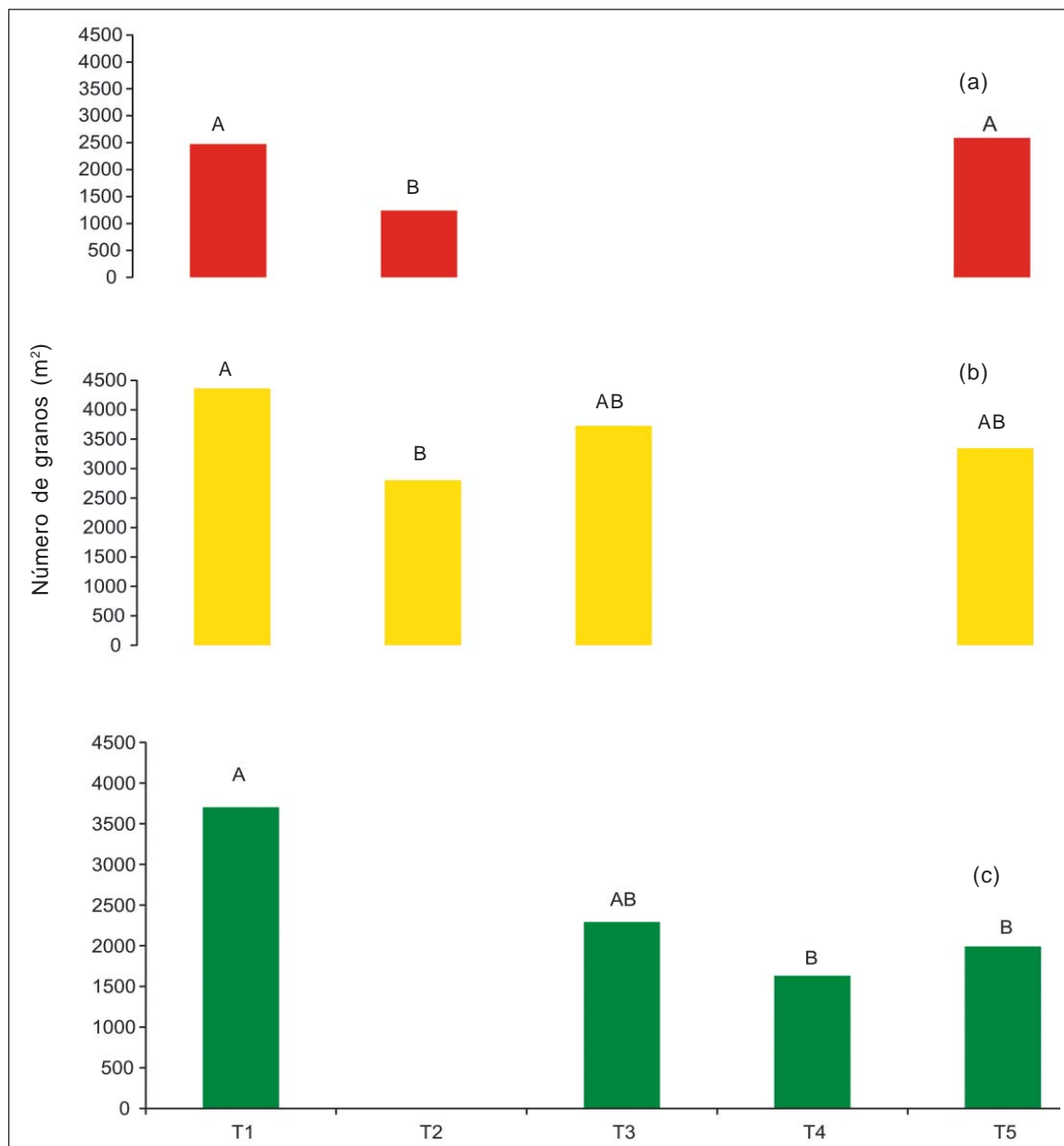


Figura 10. Número de granos (m^2) de soja en los tratamientos evaluados en las temporadas 2009-10 (a), 2010-11 (b) y 2011-12 (c).

mero de granos que los obtenidos en los T1, debido a que en los T3 fueron afectados con deficiencias hídricas en la etapa de floración. El número de granos en soja se determina definitivamente entre las etapas R4-R6, no obstante las deficiencias hídricas en floración provocan cierta afectación del número de granos.

En los T5 en las tres temporadas evaluadas el número de granos por superficie y el peso promedio de los mismos fue variable entre años y dependiente de la distribución y ocurrencia de PP.

Consumo de agua

En el Cuadro 6 se muestra el consumo de agua en soja en los diferentes tratamientos evaluados. El consumo en el T1 sin deficiencias hídricas, presentó variaciones entre años que oscilaron entre 80 y 100 mm, aproximadamente. En la temporada 1 con mayores PP el consumo total de agua fue menor que en las temporadas 2 y 3, debido a los argumentos detallados en maíz. Se debe considerar que el consumo total de agua en soja, varía significativamente con el GM utili-

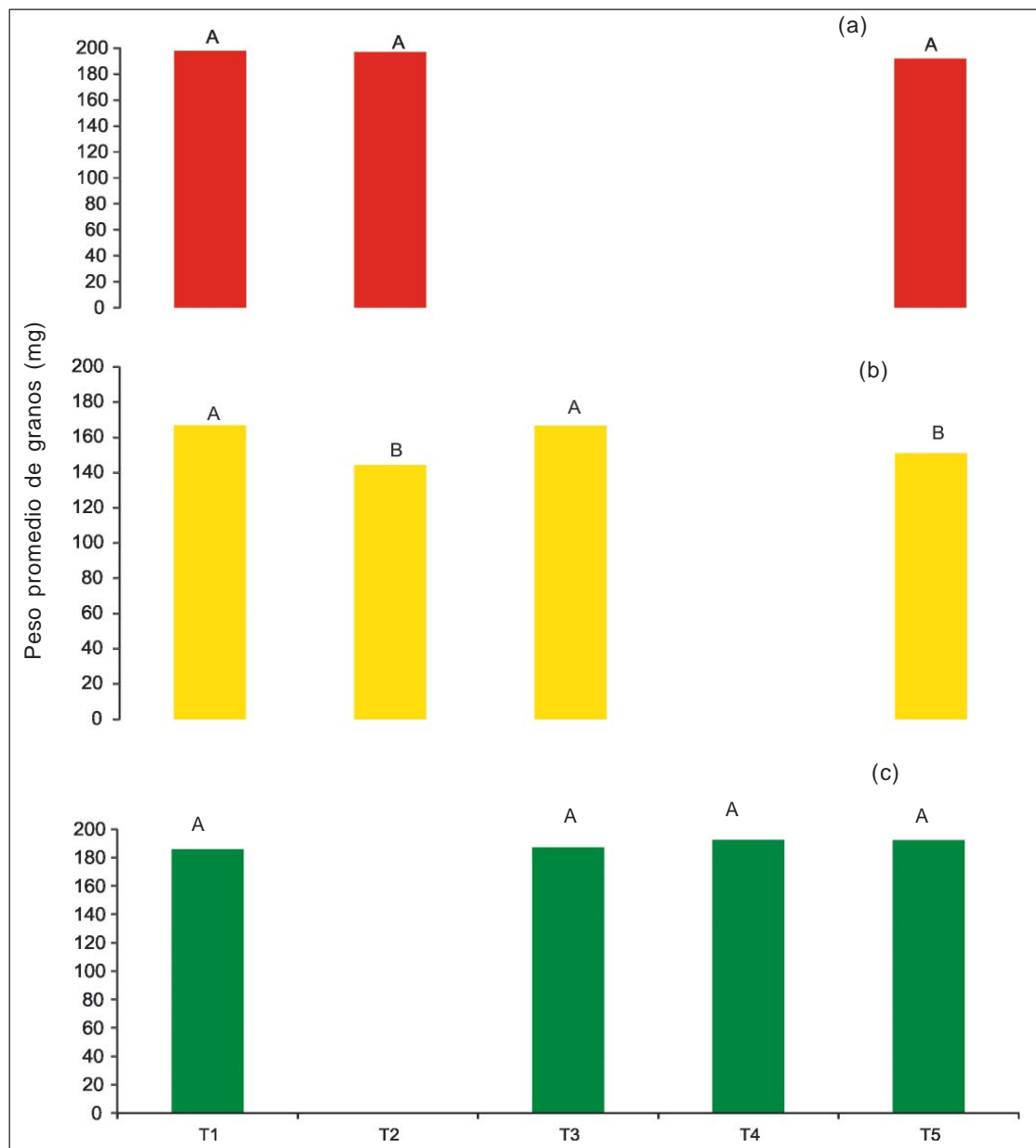


Figura 11. Peso promedio de grano (mg) de soja para los tratamientos evaluados en las temporadas 2009-10 (a), 2010-11 (b) y 2011-12 (c).

zado, en el caso de este estudio la variedad fue del GM V corto con una duración de ciclo entre emergencia y madurez de 120 días aproximadamente. El T1 presentó consumos de agua que variaron entre 423 y 524 mm. El PC mostró una duración de 28 a 32 días y un consumo de agua en ese período que varió entre 30 y 38 % del consumo total en el ciclo. En comparación con maíz, el consumo en el PC de soja fue menor, y esto se basó en que la ubicación temporal del mismo fue principalmente durante el mes de febrero, dadas las fechas de

siembra y la variedad utilizada, y en este mes las demandas atmosféricas son menores a las que ocurren en los meses de diciembre y enero.

Al igual que en maíz, los tratamientos con deficiencias hídricas (T2, T3 y T4) presentaron menor consumo de agua que el T1 y este produjo disminuciones en el rendimiento y en los componentes analizadas anteriormente. Al igual que en maíz el T5 presentó mayores consumos de agua en la temporada 1 con PP más elevadas que en las temporadas 2 y 3.

Cuadro 6. Consumo estimado de agua (mm) en soja para los diferentes tratamientos, etapas de desarrollo y temporadas evaluadas.

Etapa	Vegetativa (VE-R1)		Floración (R1 +R2)			Inicio Fructificación (R3)			Período crítico (R4-R6)			Madurez (R7-R8)			Ciclo (VE-R8)	
	Año	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010	2011
T1	68	71	82	117	43	92	81	149	150	165	64	94	79	429	504	524
T2	68	71	82	117	43	92	81	96	109	104	52	72	67	364	441	451
T3	0	67	57	60	0	79	53	0	150	153	0	94	79	0	439	402
T4	0	66	57	72	0	69	42	0	109	84	0	67	67	0	360	322
T5	68	67	41	51	43	65	25	134	105	99	59	67	68	398	354	284

Sorgo

Rendimiento en grano

En la Figura 12 se observan los rendimientos en grano de sorgo en los tratamientos evaluados. Los rendimientos del T1 fueron de 10,5 y 13,4 t ha⁻¹ para las temporadas 2 y 3, respectivamente. Las variaciones del rendimiento, entre años se explicaron por aspectos analizados anteriormente, que afectaron el ambiente de producción, independientemente de la disponibilidad hídrica. La temporada 3 se caracterizó por la presencia de escasas PP durante el PC y elevados valores de radiación solar y temperaturas. En cambio, en la temporada 2 ocurrieron PP abundantes del orden de 260 mm durante el PC, asimismo hubo un mayor número de días nublados y una disminución de la radiación solar incidente en esta etapa. El sorgo es una especie C4 con alta respuesta a la radiación solar. Por lo tanto, las condiciones climáticas de la temporada 3 generaron un ambiente de producción adecuado a los requerimientos del cultivo y con ello mayor fijación de biomasa y mejores condiciones ambientales para la transformación de la misma en grano.

El T2 disminuyó el rendimiento en relación al T1 entre 3,1 y 4,5 t ha⁻¹ y en los T4 las pérdidas de rendimiento fueron de 3,6 a 7,3 t ha⁻¹. El T4 presentó diferencias de rendimiento con el T2 en la temporada 3. Este comportamiento, se explicó debido a que la producción de biomasa durante la etapa vegetativa es de importancia decisiva en sorgo, debido a que la especie posee mecanismos morfo-fisiológicos que permiten tolerar las deficiencias hídricas mejor que el maíz en la etapa reproductiva. Las disminuciones provocadas en el rendimiento son menores en sorgo que en otros cultivos en la medida que la etapa vegetativa no presente deficiencias hídricas importantes y la fijación de biomasa no se vea afectada en forma significativa.

El rendimiento obtenido en el T5 varió entre 7,1 y 8,3 t ha⁻¹ y las disminuciones en relación al T1 fueron de 32 y 38 % para los dos años estudiados. Las pérdidas de rendimiento fueron de menor significación y variación que en maíz, ratificando la conocida tolerancia a las deficiencias hídricas del cultivo de sorgo. Por otra

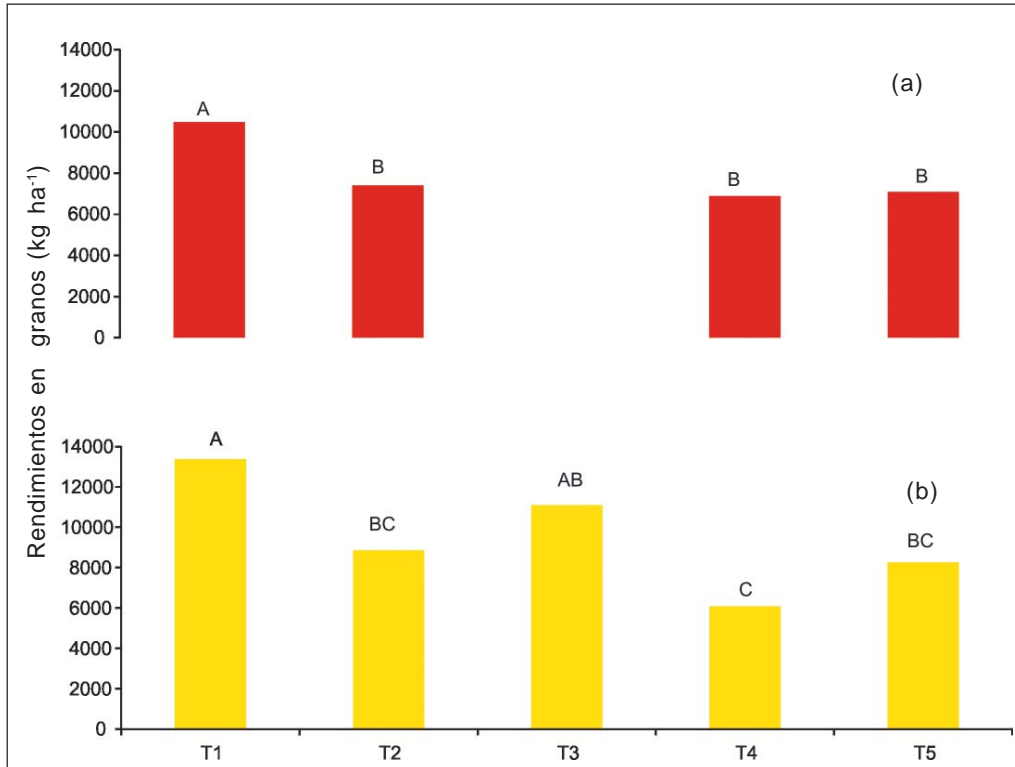


Figura 12. Rendimiento en grano de sorgo (kg ha^{-1}) en los tratamientos evaluados en las temporadas 2010-11 (a) y 2011-12 (b).

parte, se constató un elevado potencial de producción de grano en el T1 sin deficiencias hídricas.

La bibliografía nacional en referencia a la respuesta del sorgo a condiciones hídricas ajustadas a los requerimientos del cultivo es escasa se registran escasos ensayos con riego en este cultivo (Faccio *et al.*, 2002).

De acuerdo a la información obtenida se puede indicar que el rendimiento sin deficiencias hídricas de sorgo granífero se ubicó entre 11 y 13 t ha^{-1} aproximadamente y los mayores rendimientos se lograron en la temporada que presentó valores de radiación solar elevados principalmente en el entorno de la floración.

Si bien la cuantificación de las pérdidas de rendimiento en grano por causa de deficiencias hídricas en sorgo requiere mayor información, se puede deducir que los mecanismos morfo-fisiológicos de tolerancia a las deficiencias hídricas que posee la especie, provocan que las disminuciones del rendimiento por esta causa sean menores que en maíz y soja. Asimismo, se destacó la importancia que posee la disponibilidad hídrica en la

etapa vegetativa en la productividad del sorgo, a diferencia de lo que ocurrió en los cultivos de soja y maíz que es una etapa de menor significación en la determinación del rendimiento.

Componentes del rendimiento

Número de granos por metro cuadrado y peso promedio de grano

En las Figuras 13 y 14 se muestran los resultados obtenidos de los componentes principales del rendimiento en sorgo. Se confirma en sorgo las afirmaciones realizadas en maíz y soja sobre el número de granos m^{-2} . Este es el componente numérico principal del rendimiento y el peso de grano es también en sorgo un componente residual.

Los T1 con mayor rendimiento en grano fueron los tratamientos que presentaron el mayor número de granos por superficie. No se detectaron diferencias significativas para el peso de grano, entre tratamientos. Asimismo, el T4 con deficiencias hídricas en la etapa vegetativa y el PC, la temporada 2 presentó un bajo número de granos y peso de grano, por

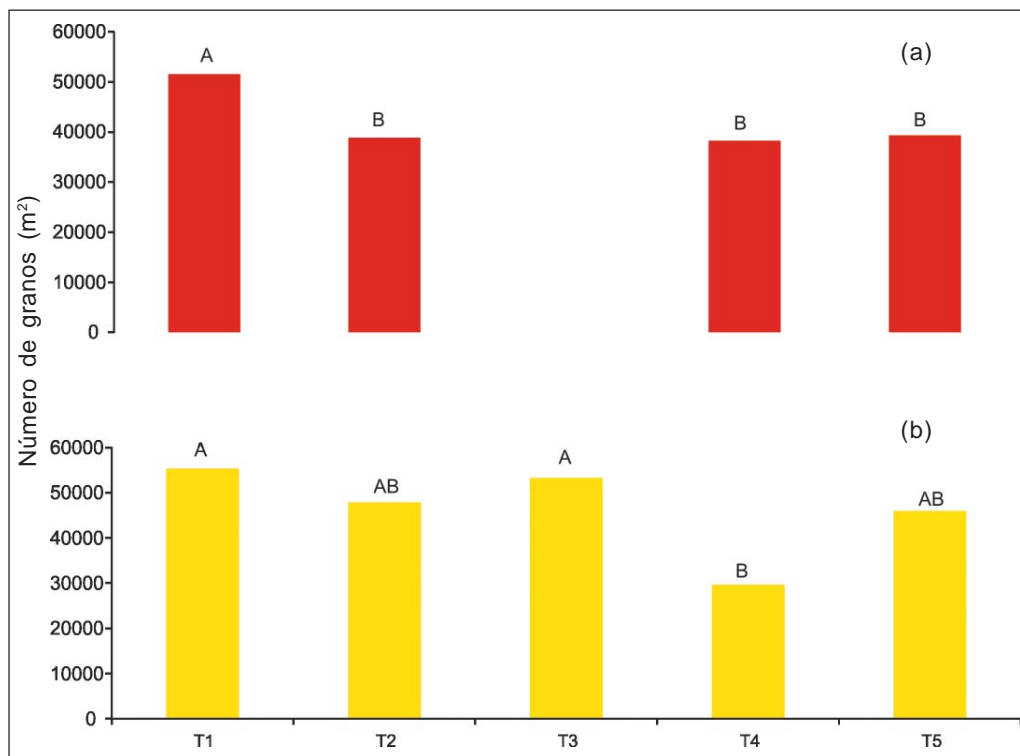


Figura 13. Número de granos por metro cuadrado de sorgo para los tratamientos evaluados en las temporadas 2010-1 (a) y 2011-12 (b).

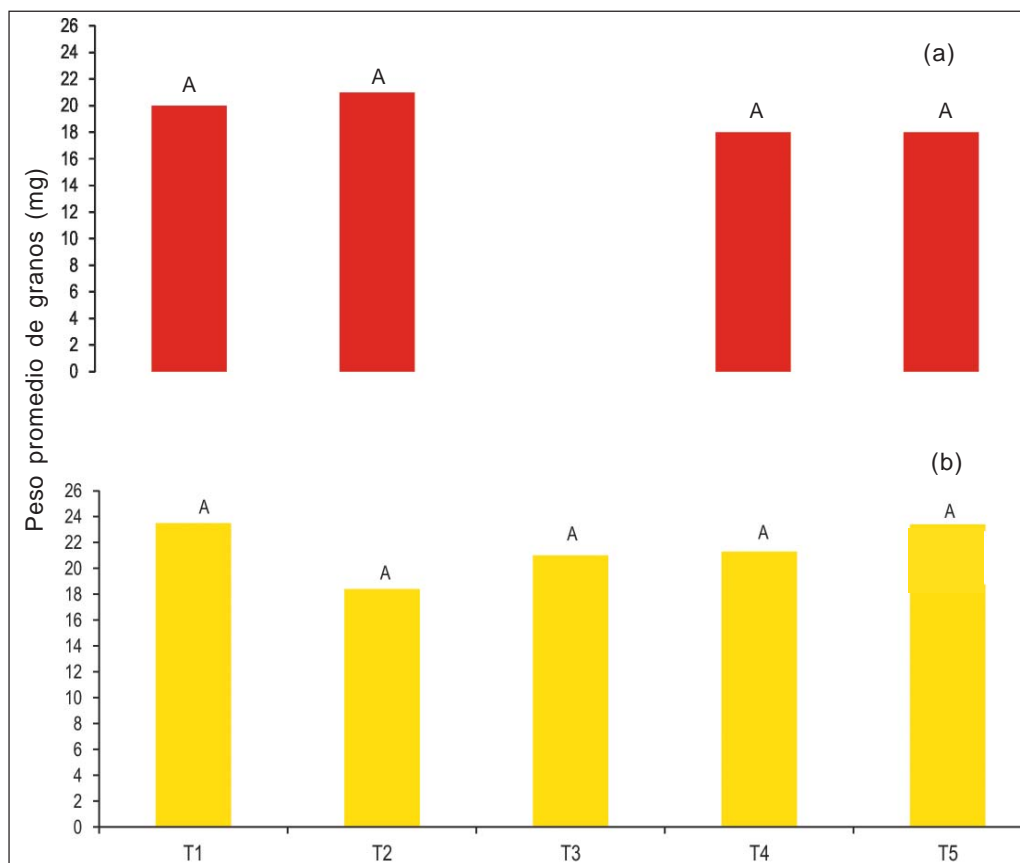


Figura 14. Peso promedio de grano (mg) de sorgo para los tratamientos evaluados en las temporadas 2010-11 (a) y 2011-12 (b).

Cuadro 7. Consumo estimado de agua (mm) en sorgo en los diferentes tratamientos, etapas de desarrollo y temporadas evaluadas.

Etapa	Vegetativa		Entorno de Floración		Llenado de grano		Ciclo		
	Año	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011
T1		111	125	141	209	157	146	409	480
T2		111	125	85	86	157	100	353	311
T3		111	125	141	209	118	86	370	420
T4		80	77	99	70	157	100	336	247
T5		80	87	99	74	117	146	296	307

haber presentado deficiencias hídricas acumuladas en la etapa vegetativa y reproductiva. En la temporada 3 el número de granos fue bajo y el peso de grano fue levemente superior al año anterior, no obstante no hubo diferencias en peso promedio con los restantes tratamientos evaluados como se indicara anteriormente.

Consumo de agua

En el Cuadro 7 se muestra el consumo de agua total y por etapas de desarrollo de sorgo en los diferentes tratamientos. El sorgo fue el cultivo, entre los estudiados, que presentó menor consumo total de agua en el T1, el mismo varió entre 410 y 480 mm en las temporadas evaluadas. Cabe indicar que en estos años, no se presentaron condiciones climáticas extremas como las que ocurrieron en maíz y soja en la temporada 1 de evaluación. A su vez, el sorgo fue el cultivo que presentó menor duración de ciclo (96 a 109 días).

En el T1 durante el PC ubicado en el entorno de la floración se estimó un consumo de agua que varió entre 140 y 210 mm y que significó entre 35 y 44 % del consumo total. En la temporada 3, el consumo fue elevado durante el PC, en este año el PC fue la etapa de desarrollo de mayor consumo. En cambio en la temporada 2, el llenado de grano superó en consumo de agua al PC. Se verificó que las condiciones de demanda atmosférica fueron determinantes en definir la etapa de mayor consumo de agua en sorgo.

En maíz en los tres años de evaluación, el PC resultó la etapa de mayor consumo incluso con condiciones de gran variabilidad en las demandas atmosféricas entre temporadas. Esta diferencia

entre sorgo y maíz, se debió principalmente a la ubicación temporal de los PC. En maíz el PC se ubicó entre fines de diciembre y enero. En el caso de sorgo, esta etapa se ubicó entre fines de enero y febrero, generalmente esta ubicación temporal del PC en sorgo posee menor demanda atmosférica que la de maíz lo cual justifica el menor consumo.

El consumo total de agua en los tratamientos con deficiencias hídricas inducidas en diferentes etapas de desarrollo (T2, T3 y T4) fue inferior al ocurrido en el T1, provocando las disminuciones en el rendimiento analizadas anteriormente. En el caso del T5 el consumo fue similar en ambos años y de aproximadamente 300 mm, variando las etapas en las que se produjeron las deficiencias hídricas de acuerdo al régimen de PP.

CONCLUSIONES

Los rendimientos obtenidos en soja, maíz y sorgo, sin deficiencias hídricas fueron elevados en las tres temporadas evaluadas, se verificó la importancia decisiva que posee la disponibilidad hídrica en la determinación del rendimiento de los cultivos de verano, en las condiciones agro-climáticas del país. Sólo es posible superar esta limitante con la aplicación de riego suplementario debido a que las causas de las deficiencias hídricas son la baja capacidad de almacenamiento de agua de los suelos, el régimen variable de las PP y las elevadas demandas atmosféricas del verano. Y estos aspectos no son modificables en forma significativa por otras medidas de manejo.

La disminución del rendimiento en maíz, sorgo y soja, por deficiencias hídricas en distintas etapas de desarrollo fue

variable de acuerdo al cultivo y a la etapa del ciclo. Las deficiencias de agua inducidas en el PC fueron las que provocaron las mayores disminuciones de rendimiento en los tres cultivos. Sin embargo, en maíz y soja las pérdidas de rendimiento fueron cercanas a la mitad de la producción potencial de grano. En cambio, en sorgo las pérdidas fueron menores debido a la tolerancia que presenta la especie a condiciones de estrés hídrico.

Las deficiencias hídricas acumuladas en las etapas vegetativas y PC mostraron diferentes respuestas de acuerdo al cultivo. En maíz provocaron disminuciones del rendimiento levemente superiores a las que ocurrieron cuando las deficiencias fueron sólo en el PC. En soja las disminuciones del rendimiento con deficiencias acumuladas fueron inferiores a las ocurridas en el PC. En sorgo, las deficiencias hídricas acumuladas produjeron disminuciones del rendimiento similares a las ocurridas en maíz.

Los consumos de agua estimados en los cultivos sin deficiencias hídricas en todo el ciclo fueron mayores en maíz que en soja y sorgo. Se destacó en maíz el PC como la etapa de mayor consumo de agua debido a que la ubicación del mismo ocurre en los meses de mayor demanda atmosférica.

Los resultados obtenidos en relación a la disminución del rendimiento por deficiencias hídricas en las etapas de desarrollo de los cultivos de verano, permiten generar expectativas en estrategias eficientes del manejo del agua diferentes al riego suplementario durante todo el ciclo.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M.** 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO. Irrigations and Drainage. Paper 56. Roma. 300 p.
- ALTAMIRANO, A.; DA SILVA, H.; DURÁN, A.; ECHEVERRÍA, A.; PANARIO, D.; PUENTES, R.** 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, Tomo I: Clasificación de suelos. MAP. Dirección de Suelos y Fertilizantes. Montevideo.
- ANDRADE, F.H.; CIRILO, A.; UHART, S.; OTEGUI, M.** 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Balcarce, Buenos Aires, La Barrosa. pp.82-239.
- BACCINO, G.; FORMOSO, F.** 2002. Inserción del riego por gravedad en los sistemas agropecuarios. Instituto Plan Agropecuario. MGAP Programa de Servicios Agropecuarios, INIA, IPA, PRENADER.
- FASSIO, A.; COZZOLINO, D.; IBAÑEZ, W.; FERNÁNDEZ, E.** 2002. Sorgo: destino forrajero. INIA «La Estanzuela». Serie Técnica N° 127.
- FERH, W.R.; CAVINESS, C.E.** 1977. Stages of soybean development. Iowa State University. Cooperative Extension Service. Special Report no. 80. pp. 929-931.
- FERERES, E.; SORIANO, M.A.** 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2): 147-159.
- GIMÉNEZ, L.** 2000. Efecto del riego sobre el rendimiento y calidad de algodón y maíz. In: Seminario investigación aplicada (2000, INIA Las Brujas). sp.
- GIMÉNEZ, A.; SAWCHIK, J.; ROMERO, R.; FORMOSO, F.** 2002. Sistema de Rotación INIA «La Estanzuela». GRASS. En: Baccino G. y F. Formoso. Inserción del riego por gravedad en los sistemas de producción agropecuaria. Instituto Plan Agropecuario. MGAP Programa de Servicios Agropecuarios, INIA, IPA, PRENADER.
- MGAP. DIEA** .2013. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Económicas Agropecuarias. Series Históricas. Agricultura. Cereales y Oleaginosos. (en línea). Montevideo. Consultado 20 de noviembre de 2013. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxpp001.aspx>.
- ROSELLI, S.; TEXEIRA, J.** 1998. Efecto del manejo del agua de riego sobre las características productivas de maíz para grano. Tesis Ing. Agr. Montevideo. Uruguay. Facultad de Agronomía. 86 p.
- SAWCHIK, J.** 2012. Necesidad de riego en Cultivos y Pasturas. In: Seminario internacional (2°, 2012, Salto Uruguay). Riego en cultivos y pasturas. Montevideo Uruguay. 120 p.

Boggiano, P.¹, Zanoniani, R.¹, Cadenazzi, M.², Giménez, L.³, Formoso, D.⁴, Aguirre, S.⁵, Irazabal, N.⁵, Otegui, I.⁵, Arce, M.⁵, Fernández, P.⁵, Riccetto, S.⁵

¹Departamento de Producción Animal y Pasturas.

²Departamento de Biometría Estadística y Cálculo.

³Departamento de Producción Vegetal.

⁴Programa Nacional de Pasturas y Forrajes.

⁵Tesista de grado

Evaluación de la respuesta al riego suplementario de gramíneas perennes durante el período estival

INTRODUCCIÓN

En Uruguay los sistemas de producción animal son desarrollados principalmente bajo alimentación pastoril, variando la cantidad y la calidad del forraje ofrecido cada año y entre años, como consecuencia de situaciones climáticas.

El clima del Uruguay se caracteriza por una alta variabilidad, con períodos de déficit hídrico a veces muy importantes durante los meses de verano debido a las altas evapotranspiraciones.

En promedio la capacidad de almacenaje de agua de los suelos oscila entre 60-180 mm (Molfino y Califra, 2001), que representa en el mejor de los casos el 50 % de las necesidades de algunas forrajeras para producir y persistir (Sawchik *et al.*, 2010). Conjuntamente el régimen de precipitaciones, deficitario en verano en relación a las necesidades hídricas de los cultivos (Giménez, 2010), determinan que no se satisfagan la demanda de cultivos y pasturas, lo cual afecta directamente su producción y persistencia.

Según Beathgen y Terra (2010), el cambio climático ya es una realidad y está instalado en la región, producto de las altas emisiones de carbono a nivel mundial. Este cambio climático se refiere a la variabilidad climática existente en períodos largos de tiempo, determinando que las precipitaciones medias a lo largo de los años tengan una tendencia ascendente, así como también la intensidad de las mismas y la evaporación, lo que provoca un aumento en los índices de escorrentía. También, destacaron la gran variabilidad climática intra-anual, que pro-

voca períodos de abundancia alternados con períodos de gran escasez de precipitaciones.

Surge de lo anterior la necesidad de profundizar en el conocimiento del uso de riego como otra herramienta que permita estabilizar la oferta de forraje en los sistemas de producción.

Formoso y Sawchik (2000), comprobaron en general respuestas productivas significativas pero de baja magnitud a la aplicación de riego suplementario en especies forrajeras de origen templado en situaciones con déficit hídricos no extremos. Trabajos nacionales muestran que la inclusión de especies C4 en mezclas resulta en aumentos de la producción estival y total, con reducciones significativas de enmalezamiento. (Santiñaque y Carambula, 1981). Otros trabajos nacionales muestran elevados rendimientos de materia seca en gramíneas tropicales y sub-tropicales evaluadas con riego, siendo netamente superiores a los obtenidos por especies de origen templado, (Mas 2007, Giorello *et al.*, 2010). Los rendimientos de estas especies pueden cuadruplicarse mediante riego, frente a los rendimientos en secano (Mas, 2007).

El uso del agua para riego de pasturas debe considerarse como un recurso escaso y siendo una tecnología de alto costo, por lo cual deberían regarse especies que presenten una alta eficiencia en el uso del agua para la producción de forraje, de forma de reducir el área a regar sin sobredimensionar los equipos y los costos.

El presente trabajo tiene como objetivo general evaluar el efecto de dos mane-

jos de agua (M1, M2) y un testigo (M3) sobre la producción de tres gramíneas C4, perennes estivales: *Paspalum dilatatum* subsp. *dilatatum*, *Paspalum notatum* var. *saurae* cv. Pensacola, *Pennisetum purpureum* cv. Mott, y una gramínea perenne invernal C3: *Festuca arundinacea* cv. Tacuabé.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en la Estación Experimental Dr. Mario A Cassinoni de la Facultad de Agronomía, Universidad de la República, en el departamento de Paysandú, Uruguay, a 32°23'20.23" de latitud sur y 58°02'37.98" de longitud oeste.

El área experimental se ubicó en una ladera alta sobre un suelo Brunosol Eutrípico Típico de la Unidad San Manuel según la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (1:1.000.000) (Altamirano *et al.*, 1976), desarrollado sobre la formación geológica Fray Bentos (Bossi, 1969).

El trabajo se llevó a cabo durante dos períodos, el primer año entre el 08 de diciembre del año 2010 y el 20 de abril del año 2011 completando 133 días de evaluación y el segundo año entre el 28 de noviembre de 2011 y el 11 de abril de 2012, totalizando 151 días de evaluación.

Siembra y fertilización

Las parcelas de *Pennisetum purpureum* se plantaron a mano en octubre de 2009, en surcos con 0,7 metros de entre-surco y dentro de estos una distancia entre planta de 0,5 metros, resultando una densidad de 2,8 plantas m².

En octubre de 2009 se sembraron a chorrillo en la línea con una distancia entre líneas de 0,14 metros *Paspalum dilatatum* y *Paspalum notatum*, a una densidad de siembra de 12 kg por hectárea de semilla comercial. Luego debieron ser resembradas en febrero de 2010 debido a fallas de implantación, lográndose instalarlas con éxito.

La siembra de *Festuca arundinacea* cv. Tacuabé se realizó en agosto de 2010, a chorrillo en la línea con una distancia entre líneas de 0,14 metros, a una profundidad de 2 centímetros y a

razón de 12 kilos por hectárea de semilla comercial.

La fertilización se realizó con 300 kg/ha de P₂O₅ a la siembra y en cada año se realizaron cinco fertilizaciones de 50 kg/ha⁻¹ de N bajo la forma de urea, cada 30 días luego de los cortes.

Método de riego

El método de riego utilizado fue el de aspersión fija con tres aspersores por parcela mayor, la cual contenía las cuatro subparcelas correspondientes a las especies en estudio.

Los aspersores utilizados regaban un caudal de 70 l/h⁻¹. El riego se realizó por la noche para evitar los efectos de deriva que habitualmente se producen por el viento durante el día.

Diseño experimental y tratamientos

El diseño experimental utilizado fue el de parcelas divididas en bloques con tres repeticiones. El factor mayor es el manejo del agua, con tres niveles: M1, M2 y M3, y el factor menor la especie: *Paspalum dilatatum* subsp. *dilatatum*, *Paspalum notatum* var. *Saurae* cv. Pensacola, *Pennisetum purpureum* cv. Mott y *Festuca arundinacea* cv. Tacuabé. Los tratamientos corresponden a la combinación de niveles de riego por especie, dando un total de 12 tratamientos distribuidos en 36 parcelas. El nivel de significación aceptado para los test de diferencias de medias fue del 10 %.

Los manejos del agua fueron: M1: riego que cubre el 100 % de la ETo, M2: riego que cubre el 50 % de la ETo y M3: secano; siendo ETo la evapotranspiración del cultivo de referencia (mm), la cual fue estimada utilizando la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998).

Para determinar la producción de materia seca se realizaron 4 cortes espaciados cada 30 días.

Los cortes se realizaron con tijeras de mano, cortando dos cuadros por parcela que fueron embolsados juntos conformando una única muestra. El tamaño de

cuadro y las alturas remanentes fueron ajustados según la especie forrajera.

Para las especies *Paspalum notatum* var. Saurae cv. Pensacola, *Paspalum dilatatum* subsp. *dilatatum* y *Festuca arundinacea* cv. Tacuabé se utilizaron cuadros de 0,2 m x 0,5 m y se dejó un remanente de 5 cm. Para la especie *Pennisetum purpureum* cv. Mott se utilizó un cuadro de 1,2 m x 0,5 m y se dejó una altura remanente de 0,4 m.

Luego de cada corte las parcelas se emparejaron dejando un remanente de 5 cm para las primeras tres especies y de 0,4 m en *Pennisetum purpureum*.

El material colectado en cada corte fue separado en el laboratorio en las fracciones lámina, vainas y tallos florales y malezas. La cantidad de material muerto presente en el material cortado fue insignificante. Luego de separadas las fracciones fueron secadas en estufa de circulación forzada de aire, a una temperatura de 60 °C hasta peso constante. Con los pesos de las muestras secas, se calculó la materia seca por hectárea de cada fracción.

Al momento del último corte (4 de abril del 2011) se realizó la determinación de la densidad, peso y partición de la MS de macollos.

Para determinar la densidad de macollos se contó el número de macollos en dos cuadros de 0,2*0,25 m por parcela en *Festuca* y *Paspalum*. Dado el mayor

tamaño de las plantas *Pennisetum purpureum* se utilizaron dos cuadros de 1,20*0,60 m.

El peso de los macollos fue determinado cortando a ras del suelo 20 macollos por parcela que se secaron a 60 °C en estufa de circulación forzada de aire hasta peso constante.

Condiciones generales del período de evaluación

Las condiciones ambientales en el primer año de evaluación mostraron un período de menor precipitación con 231,2 mm registrados y un período de mayor precipitación con 266,6 mm de registro pluviométrico, totalizando 497,8 mm en todo el período de evaluación. Del total de la lluvia registrada en el primer período 73,3 mm se dieron el 26 de enero pesando más sobre el crecimiento posterior al corte del 31 de ese mes. La Figura 1 muestra la distribución de las precipitaciones y los momentos de riego para los distintos manejos de riego. Las flechas indican momentos en que coincidió el riego en M1 y M2 y la línea azul separa los dos períodos.

En el segundo ciclo de evaluación nuevamente se dio un período de menor lluvia desde el 28 de noviembre al 30 de enero con 137 mm, seguido de un período lluvioso desde el 31 de enero al 16 de abril con 774 mm, sumando un total de

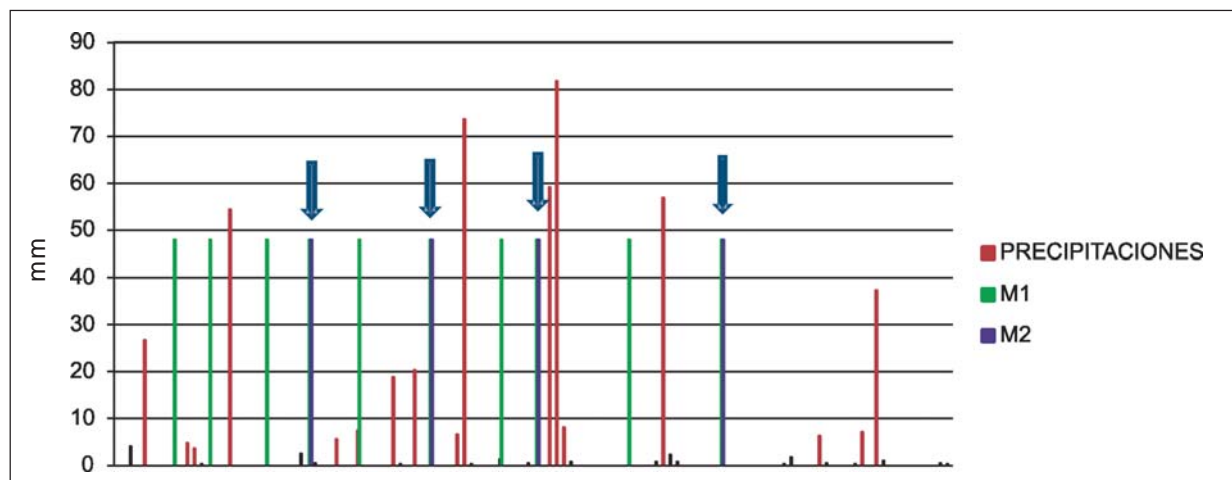


Figura 1. Régimen de precipitaciones, momento y niveles de agua agregada en los manejos de riego suplementar (mm). Las flechas indican momentos en que coincidió el riego en M1 y M2. Período 2010-2011.

911 mm en todo el periodo estudiado de 151 días. En la Figura 2 se muestran las precipitaciones ocurridas, los momentos y la cantidad de agua (expresada en mm) en que se realizó el riego suplementario.

Los dos años evaluados presentaron en común la existencia de períodos menos lluviosos en la primera mitad de inicio de la evaluación seguidos por períodos más llovedores. Se aprecia que el primer año presento 400 mm menos de lluvia que se concentran en la segunda mitad de la evaluación. En ese sentido la cantidad de lluvia que afectaría los resultados del período menos lluvioso es similar en ambos años, no así para el período más lluvioso, que no requirieron riegos en ninguno de los dos años.

En la Figura 3 se observan las temperaturas promedio, mínimas y máximas para los dos años de evaluación. Se puede ver como las temperaturas fueron mayores en los meses de diciembre-enero y menores en febrero-marzo, de manera similar a la serie histórica.

En dicha figura, las temperaturas medias fueron similares a la media histórica, con diferencias de aproximadamente 1,5 °C entre los períodos experimentales, siendo mayor únicamente en no-

viembre en el período 2011-2012, en tanto las temperaturas medias de diciembre y marzo fueron superiores en el período 2010. Las temperaturas máximas fueron mayores de enero a abril en 2010-2011 y en diciembre 2011-2012 presentando valores cercanos a la media histórica desde febrero. Las temperaturas mínimas del primer período de evaluación fueron mayores en diciembre y a partir de enero entre 3 °C y 6 °C menores que la media histórica y que el segundo período evaluado.

Las temperaturas medias variaron entre 25,2 °C y 17,4 °C en los períodos de estudio, ubicándose por debajo de los óptimos para las especies C4 y por encima de los requeridos por especies C3. Según Cooper y Taiton (1968), el crecimiento máximo en especies tropicales y subtropicales se da con temperaturas de entre 30 °C y 35 °C, mientras que con temperaturas menores a 10 °C casi no se registra crecimiento; mientras que en especies templadas las temperaturas óptimas de crecimiento oscilan entre 20 °C y 25 °C y a pesar de que el crecimiento disminuye con temperaturas por debajo de los 10 °C, con temperaturas de 5 °C todavía se registran crecimientos.

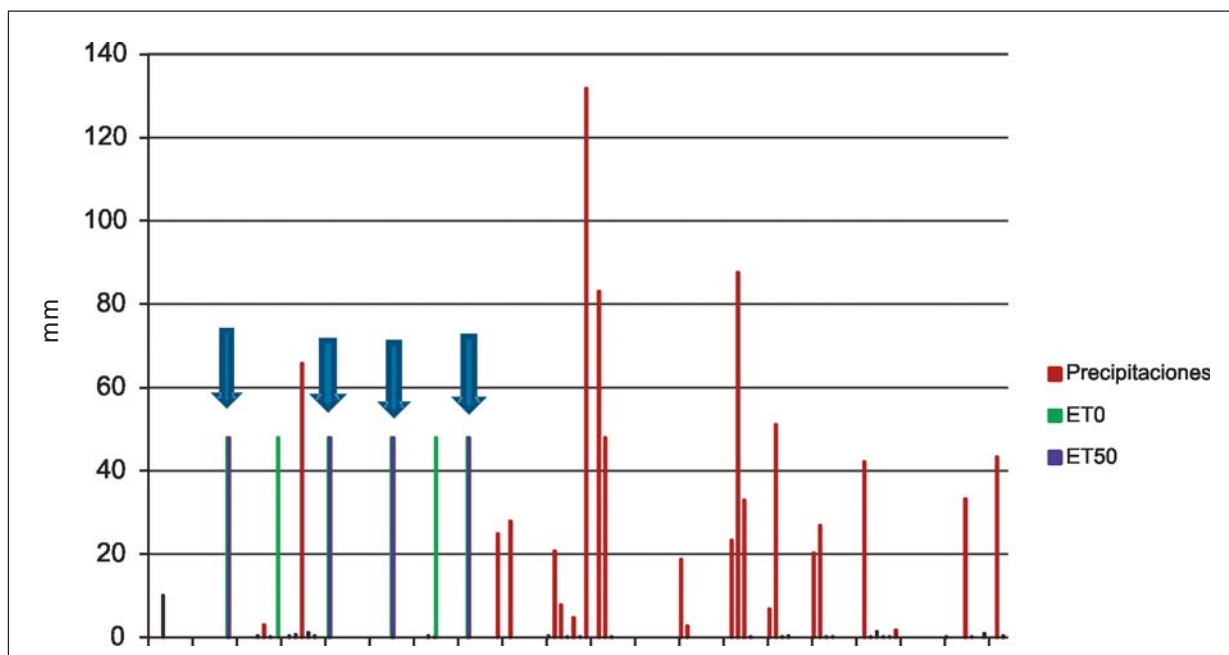
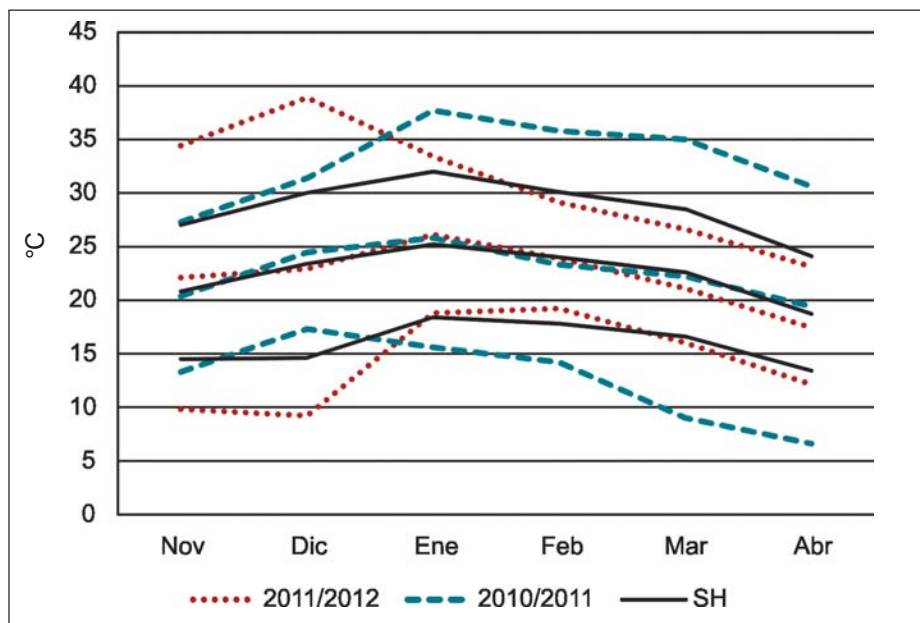


Figura 2. Régimen de precipitaciones, momento y niveles de agua agregada en los manejos de riego suplementario (mm). Las flechas indican momentos en que coincidió el riego en M1 y M2. Período 2011-2012.

Figura 3. Temperaturas máximas, medias y mínimas promedios mensuales de los períodos de evaluación (2010-2011), (2011-2012) y serie histórica (1980-2009).



RESULTADOS

Período 2010 - 2011

Producción de Materia Seca

La producción total mostró efectos significativos de las especies ($P=0,0001$) y del nivel de riego ($P=0,08$), sin efecto de la interacción nivel de riego por especie. La producción de lámina, mostró diferencias significativas en cuanto a la especie ($P=0,0001$), a nivel de riego ($P=0,07$) y sin efecto de la interacción nivel de riego por especie. En tallos, no se encontró efecto del nivel de riego, ni de la interacción especie por nivel de riego, si hubo efecto significativo de la especie ($P=0,025$). Estos resultados coinciden con Bergottin I. *et al.* (2006) quien tampoco encontró efectos significativos en la interacción al comparar dos gramíneas tropicales bajo riego.

Se puede ver en el cuadro 1 la superioridad de la especie tropical frente a las subtropicales, y de estas frente a la templada. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Alvim *et al.* (1986) evaluando la producción de gramíneas tropicales, subtropicales y templadas. En el cual la especie que obtuvo mayor producción de materia seca fue el *Pennisetum purpureum*, superando las $32 \text{ t ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$.

Datos nacionales reportados por Bemhaja (2000) trabajando con *Pennisetum purpureum* Schum var. INIA Lambaré en Tacuarembó, muestran producciones promedio de tres años consecutivos de hasta 45 toneladas por hectárea en secano con agregado de 100 kg de nitrógeno y 100 kg de fósforo.

También Lopes y Fonseca (2009), encontraron respuestas crecientes en producción de materia seca para *Pennisetum purpureum* al aumento de la lámi-

Cuadro 1. Producción total y por fracción en materia seca según especies.

Especie	MS lámina (kg/ha)	MS tallo (kg/ha)	MS Total (kg/ha)
<i>P. purpureum</i>	26344 A	-	26344 A
<i>P. dilatatum</i>	5200 B	4.318 A	9518 B
<i>P. notatum</i>	5668 B	3.434 B	9102 B
<i>F. arundinacea</i>	1283 C	-	1283 C

na de agua, alcanzando las mayores producciones con una lámina de 120 % de la evapotranspiración con producciones de 29049 kg/ha⁻¹ de MS.

En producción total y fracción lámina se mantiene la superioridad de *P. purpureum* seguido por las especies del género *Paspalum* y por último *Festuca*.

En cuanto al tallo, la especie con mayor producción es *Paspalum dilatatum*, difiriendo significativamente de *Paspalum notatum*. Estos datos toman especial relevancia a la hora de evaluar la respuesta en producción de materia seca de cada especie, lo ideal será encontrar aquellos materiales que produzcan grandes cantidades de materia seca de calidad. Una especie que utilice agua para producir tallo bajará la eficiencia de los sistemas de producción debido a la menor calidad de esta fracción frente a las hojas.

Tanto *Pennisetum purpureum* y *Festuca arundinacea* no registraron crecimiento de tallo. El caso de P.p. es una gramínea tropical de floración tardía, escapando al período de evaluación, y por tanto, no se registran producciones de tallo. La floración en *Festuca* se da en primavera, por lo cual tampoco se registra producción de tallo.

En relación al efecto del manejo de agua, en el Cuadro 2 se puede observar que los tratamientos que recibieron el máximo nivel de riego fueron superiores a aquellos de secano (P=0,10), y que los

tratamientos con riego intermedio mostraron un comportamiento también intermedio.

Se puede observar que el máximo nivel de riego fue superior al secano, y el mínimo nivel de riego mostró un comportamiento intermedio. Esto es importante desde el punto de vista de producción animal, ya que la fracción lámina de la planta posee mayor calidad, y diferencias de 3000 kg/ha⁻¹ MS de lámina entre el mayor nivel de riego y el secano, podrían significar diferencias en desempeño animal de 200 kg/ha⁻¹ de peso vivo (Almeida, 1997). Parecería lógico buscar aquellas especies que produzcan la mayor cantidad de materia seca de calidad.

Según Formoso (2010), *Festucas* irrigadas aumentaron su producción de materia seca en secano con 1.000 kg ha⁻¹ a 3.000 kg ha⁻¹ bajo riego.

El análisis de las respuestas según período más o menos lluvioso permitió detectar significancia de la interacción manejo de agua por período (P=0,0005). En el Cuadro 3 se observa que el mayor rendimiento se logra con el mayor nivel de agua en el período seco y el menor con secano. El resto de los tratamientos mostró un comportamiento intermedio.

En el Cuadro 4 se presenta el efecto en la interacción especie por período (P=0,012), donde se destaca la mayor producción de *Pennisetum purpureum* sobre el resto de las especies, seguido por *Paspalum notatum* y *Paspalum dilatatum*, y con menor rendimiento *Festuca arundinacea*. Es decir, independientemente del período evaluado, el orden de las especies se mantiene.

Para la producción de láminas (kg/ha⁻¹) se observaron tendencias similares tanto en la período manejo de agua como con las especies.

El nivel de enmalezamiento definido como producción de materia seca de malezas presentó efectos significativos para especie (P=0,0001), así como en la interacción nivel de riego por especie (P=0,006). El efecto nivel de riego presentó tendencia (P=0,06). En el Cuadro 5 se observa la producción de materia seca de malezas según especie y nivel de riego.

Cuadro 2. Respuesta promedio al manejo de agua en producción de materia seca de láminas (MSL) y materia seca total (MST).

Manejos	MSL (kg/ha)	MST (kg/ha)
M1	11084 A	13274 A
M2	9704 AB	11423 AB
M3	8083 B	9989 B

Cuadro 3. Producción de materia seca de total (kg ha⁻¹) promedio por manejo de agua según período.

Manejo	- Lluvia	+ Lluvia
M1	7196 A	6063 AB
M2	5638 AB	5784 AB
M3	4404 B	5586 AB

Cuadro 4. Producción de materia seca total (kg/ha⁻¹) promedio por especie según período.

Especie	- Lluvia	+ Lluvia
<i>P. purpureum</i>	12.478 A	13.866 A
<i>P. notatum</i>	4.741 B	4.362 B
<i>P. dilatatum</i>	5.074 B	4.444 B
<i>F. arundinacea</i>	691 C	573 C

Cuadro 5. Producción de materia seca (kg/ha⁻¹) de malezas según especie y manejo del agua.

Especie	M1	M2	M3
<i>P. purpureum</i>	0 C	0 C	0 C
<i>P. notatum</i>	0 C	0 C	23 C
<i>P. dilatatum</i>	549 BC	423 BC	90 C
<i>F. arundinacea</i>	5418 A	5455 A	2376 B

Festuca es la especie que presentó mayor invasión de malezas con riego independientemente del nivel, mostrando diferencias significativas ($P < 0,05$) con el tratamiento de secano y con el resto de las especies. Este mayor enmalezamiento se lo atribuye principalmente a la fecha de siembra de agosto que determinó que al inicio del período de evaluación las plantas presentarían un pobre desarrollo, dejando espacios libres en las parcelas, aprovechados por las malezas en su mayoría gramíneas C4 como, *Cynodon dactylon*, *Eragrostis lugens*, *Setaria geniculata* y *Sporobolus indicus*. Por otro lado, los tratamientos bajo riego se vieron más enmalezados que secanos, dado por mejores condiciones para el crecimiento de malezas estivales, espacio, disponibilidad de agua y fertilización nitrogenada. Formoso (2010), en experimentos realizados con riego de *Festuca arundinacea*, encontró que el 16 % de los tratamientos bajo riego produjeron menos forraje que los tratamientos en secano durante las estaciones posteriores a la irrigación, debido principalmente a una mayor infestación de malezas gramíneas estivales que comprometerían la persistencia de la pastura. Por otro lado, Lowe y Bowdler (1984), evaluando distintas especies, encontraron que, aunque la Festuca fue la gramínea templada que alcanzó mayor rendimiento, su persistencia se vio comprometida por competencia con malezas,

con leguminosas, enfermedades y deficiencias de fertilidad.

El enmalezamiento en los tratamientos con riego de *Paspalum dilatatum* no difieren significativamente con Festuca en secano. Por su parte *Pennisetum purpureum* debido a su mayor porte, que mantiene sombreados la entrelínea y *Paspalum notatum* dado su hábito de crecimiento estolonífero-rizomatoso, con capacidad de colonizar totalmente la superficie del suelo, no se enmalezaron.

Características estructurales

Otra característica afectada por los tratamientos fue la estructura de la pastura definida por la densidad de macollos y el peso de los mismos.

El número de macollos m⁻² tuvo efecto significativo de los manejos del agua ($P=0,04$), de la especie ($P=0,0001$), y de la interacción manejo de agua por especie ($P=0,04$) (Cuadro 6).

Se observa que la mayor densidad de macollos m⁻² la registraron las especies del género *Paspalum*, sin diferencias entre ellos. La Festuca mostró un comportamiento intermedio para los tratamientos de riego, mientras que el tratamiento de secano presentó el menor número de macollos m⁻², sin diferencias con *Pennisetum purpureum*. La densidad de macollos m⁻² encontrada para Festuca muestra diferencias con la encontrada por

Cuadro 6. Densidad de macollos (macollos m⁻²) según especie y manejo del agua.

Especie	M1	M2	M3
<i>P. purpureum</i>	233 C	232 C	173 C
<i>P. notatum</i>	2760 A	2813 A	2253 A
<i>P. dilatatum</i>	2720 A	2813 A	2613 A
<i>F. arundinacea</i>	1473 B	1166 B	380 C

Machado *et al.* (2002) que registraron valores de entre 2100 y 2500 macollos m⁻² y De Souza y Presno (2013) con densidades de 2942 a 3952 macollos m⁻². La baja densidad obtenida es atribuible a la fecha de siembra tardía que reduce el macollaje, además de someter a las plantas con bajo desarrollo radicular a probables deficiencias hídricas de noviembre y diciembre que comprometerían la sobrevivencia de los macollos.

Hirata y Pakiding (2001) estudiando la dinámica de macollos en *Paspalum notatum* también encontraron poblaciones superiores a las aquí obtenidas reportando valores entre 3819 a 4875 macollos m⁻². Hunt (1979) estudiando los efectos de pisoteo y la altura de defoliación en *Paspalum dilatatum*, observó variaciones de entre 2795 a 3309 macollos m⁻² durante el período estival.

Densidades similares reporta Almeida (1997) estudiando *P. purpureum* cv. Mott con poblaciones de 196 a 273 macollos m⁻² variando con la oferta de forraje.

Gonçalves *et al.* (2010, 2011), registraron que el número de macollos aumenta, conforme aumenta la lámina de agua aplicada. Sostienen además, que las mayores productividades se obtienen con el mayor N^o de macollos, logrado con la mayor cantidad de agua aplicada. Botrel *et al.* (1991), Vitor *et al.* (2009) también observaron que el número de macollos aumenta al aumentar la lámina de agua.

Cuadro 7. Peso promedio (g) de macollos según especie.

Especie	Peso de macollos (g)
<i>P. purpureum</i>	5,25 A
<i>P. dilatatum</i>	0,35 B
<i>P. notatum</i>	0,32 B
<i>F. arundinacea</i>	0,21 B

El peso de los macollos mostró efecto muy significativo únicamente de la especie (P=0,0001). No se encontró efecto del manejo de agua ni de la interacción manejo de agua por especie.

En el Cuadro 7 se aprecia que fue significativa la diferencia en peso de los macollos sólo para la especie *Pennisetum purpureum*, el resto de las especies no mostró diferencias. Estos resultados son coherentes con la morfología de las plantas, donde el pasto elefante es una especie de mayor porte, y por lo tanto, de macollos más pesados. Datos similares fueron publicados por Setelich (1999), estudiando la respuesta del cultivar Mott al agregado de nitrógeno. Indicó que con el agregado de 205 kg ha⁻¹ de N el peso de macollo en marzo fue de 6,53 g, variando los pesos en esta fecha entre 4,92 g y 9,21 g según las dosis de N utilizadas.

Cornaglia *et al.* (2010) trabajando con 3 cultivares de *Paspalum dilatatum* encontró una variabilidad en el peso de macollo de entre 0,1 g y 0,3 g, dependiendo la misma fundamentalmente de la variedad. Menciona que la variedad de mayor porte fue la que obtuvo mayores pesos de macollos independientemente de las condiciones hídricas. Hirata y Pakiding (2002) encontraron en *Paspalum notatum* un rango de pesos de macollos algo inferiores, variando entre 0,07 g y 2,57 g por macollo.

En *Festuca arundinacea* los pesos de macollos también tienen un amplio rango de variación, Faber (2012) reporta pesos que variaron entre 0,09 g hasta 0,265 g por macollo.

La variación que se observa tanto en número como en peso de macollos es propia de las especies forrajeras con gran capacidad de adaptación diferentes ambientes.

Período 2011 - 2012**Producción de Materia Seca**

El análisis de la producción (kg ha⁻¹) de materia seca de lámina (MSL), materia seca de tallo (MS tallo) y materia seca total (MST) mostro efectos significativos para el factor especie (P=0,003) y a manejos de agua la MSL (P<0,1). Los resultados obtenidos muestran similar tendencia que en el período 2010-2011, siendo *Pennisetum purpureum* la especie de mayor producción en el total del período, duplicando la producción de las especies de *Paspalum* que presentaron producciones intermedias sin diferencias significativas entre estas. La menor producción fue de *F.arundinacea*, que acarrea en este período las limitantes de la fecha de siembra tardía.

Según Fernandes y Rossiello, citados por Mota *et al.* (2010) la mayor producción de las gramíneas C4 se da por su mayor capacidad fotosintética, mayor eficiencia en el uso del agua y su alta respuesta a la fertilización nitrogenada, determinando altas tasas de crecimiento. Sumado a esto, el alto grado de enmalezamiento estival con especies de gramíneas C4 explican la baja produc-

ción de *Festuca* presentada en este trabajo.

Para la producción de láminas se mantiene el orden como se aprecia en el Cuadro 8, *P.purpureum* presentó la mayor producción de lámina, difiriendo significativamente de las demás especies; *P.notatum* y *P.dilatatum* presentaron un comportamiento intermedio, mientras que *F.arundinacea* presentó una producción significativamente menor.

En producción de tallo *P.notatum* y *P.dilatatum* presentaron producciones significativamente mayores que *P.purpureum* y *F.arundinacea*, las cuales no difirieron significativamente. Esto es esperable debido al ciclo de floración de estas especies, que incrementan la floración hacia mediados y finales de verano, mientras que *Festuca* se mantiene en estado vegetativo.

En el Cuadro 9 se presentan las producciones por especie y manejos de agua, donde se aprecia similar comportamiento que en el primer año de evaluación. El manejo de agua M1 presenta producciones medias superiores (P<0,10) a secano (M3), mientras los rendimientos de M2 son intermedios.

Cuadro 8. Producción de materia seca en kg ha⁻¹ de MSL, MS tallo y MST según especie.

Especie	MSL	MS tallo	MST
<i>P.purpureum</i>	9711 A	589 B	10300 A
<i>P.dilatatum</i>	2488 B	1879 A	4367 B
<i>P.notatum</i>	3291 B	1728 A	5025 B
<i>F.arundinacea</i>	1417 C	552 B	1970 C

Letras diferentes dentro de la columna representan diferencias significativas (P<0,05).

Cuadro 9. Producción de materia seca de láminas (kg ha⁻¹) por especie y por manejo de agua.

Manejo	<i>Pennisetum purpureum</i>	<i>Paspalum notatum</i>	<i>Paspalum dilatatum</i>	<i>Festuca arundinacea</i>	Media
M1	12945	5342	4313	2496	6274 A
M2	11167	6088	3380	2185	5705 AB
M3	5137	4761	5426	185	3877 B
Media	9749 a	5397 b	4373 bc	1622 c	

Letras mayúsculas indican diferencias significativas (P<0,05), Letras minúsculas indican diferencias significativas (P<0,10).

Al estudiar las producciones entre períodos diferentes de lluvias, se detectan efectos significativos para especie, tanto para producción de lámina (MSL) ($P < 0,001$), producción de tallo (MS tallo) ($P = 0,005$) y en producción total (MST) ($P < 0,001$).

En el Cuadro 10 se observa que la mayor producción de MST la presenta *P.purpureum* en el periodo lluvioso, seguido por las especies de *Paspalum* en periodo lluvioso sin diferenciarse de los rendimientos de *P. purpureum* en el período de menor lluvia. Si bien *F. arundinacea* presenta el menor rendimiento no difiere de los obtenidos por las especies de *Paspalum* en el período de menos lluvia. Las especies *P.notatum* y *P. dilatatum* tienen un peso de materia seca intermedio entre *F. arundinacea* y *P. purpureum*.

En relación a la producción de láminas se aprecia que independiente del período *P. purpureum* es la especie que más produce, registrando el mayor rendimiento en el periodo de más lluvia, mientras que *F. arundinacea* presenta la menor producción y *P. notatum* y *P. dilatatum* presentan producciones intermedias.

La producción de tallo es mayor en el período de más lluvia y particularmente para las especies de *Paspalum*, debido

que en este período ya está avanzada la floración de estas especies (Cuadro 11).

El grado de enmalezamiento medido a través de la producción de malezas, fue muy significativo a nivel de especie ($P < 0,001$). Las malezas que aparecieron con más frecuencia fueron: *Conyza bonariensis*, *Cynodon dactylon*, *Cyperus eragrostis*, *Setaria geniculata*, *Sida rhombifolia* y *Sporobolus indicus*, todas de ciclo de producción estival.

Los resultados del Cuadro 10 ilustran la baja participación de *F. arundinacea* a la materia seca total, a la cual contribuye con un 55 %. El alto grado y tipo de enmalezamiento que presentó esta especie, con respecto a las especies tropicales y subtropicales, explican las bajas tasas de crecimiento y producción total. Se trata de una especie de baja capacidad competitiva frente a especies estivales en condiciones de alta temperatura y disponibilidad hídrica. Contrariamente, *P.purpureum* presenta los menores valores de enmalezamiento dado su porte alto y el sombreado que genera, impidiendo el desarrollo de malezas. Según Pizarro (2002) *P. dilatatum* sería una especie buena competidora dada su capacidad alelopática así como *P. notatum* es una especie que resiste la invasión de malezas dada la estructura densa y ce-

Cuadro 10. Producción (kg ha⁻¹) de MSL, MS tallo y MST por período promedio por especie.

Período	Especie	MST	MSL	MS tallo
- Lluvia	<i>P. purpureum</i>	2764 BC	2764 B	0
	<i>P. dilatatum</i>	1128 D	919 DE	209 CD
	<i>P. notatum</i>	1771 CD	1052 DE	718 BC
	<i>F. arundinacea</i>	689 D	629 E	124 CD
+ Lluvia	<i>P. purpureum</i>	7537 A	6947 A	589 BCD
	<i>P. dilatatum</i>	3239 B	1570 CD	1669 A
	<i>P. notatum</i>	3255 B	2239 BC	1010 AB
	<i>F. arundinacea</i>	1281 D	788 DE	511 BCD

Cuadro 11. Enmalezamiento expresado en kg ha⁻¹ de MS de malezas según especie.

Especie	kg/ha de MS de malezas	% del total acumulado
<i>F. arundinacea</i>	1578 A	45
<i>P. dilatatum</i>	406 B	8,5
<i>P. notatum</i>	222 B	4,2
<i>P. purpureum</i>	47 B	0,45

rada de la pastura (Burson y Watson, 1995).

Características estructurales

Se presenta el análisis de las características estructurales densidad de macollos y peso de los mismos.

En el Cuadro 12 se presenta la densidad de macollos.m⁻², el cual fue significativo para la interacción manejo de agua por especie (P=0,007).

La mayor densidad de macollos la presentó *P. notatum*, en todos los niveles de agua, seguido de *P. dilatatum*, y las de menor población fueron para *F. arundinacea* y *P. purpureum*. Para el caso de *P. notatum* no hay diferencias significativas entre los manejos de agua, logrando la mayor población en el manejo de agua M2, mientras que en *P. dilatatum* la densidad fue decreciente con el nivel de agua, sin presentar diferencias significativas.

En el caso de *F. arundinacea* no son diferentes estadísticamente la población en los manejo de agua M1 y M2, siendo significativamente mayores que en el tratamiento M3, lo que muestra una respuesta positiva del riego sobre la densidad de macollos.

Las menores densidades fueron determinadas en *P. purpureum* que no presentó comportamiento diferencial estadísticamente entre los distintos manejos del agua.

Comparando los resultados con los del año anterior se puede observar en el Cuadro 13 la disminución que hubo en la

población de macollas entre el primer y segundo año evaluado.

Comparando con los resultados del primer año, se registra una disminución poblacional para todas las especies en el segundo año. La especie mayormente afectada fue *F. arundinacea* para el nivel de riego M2, y la menos afectada *P. purpureum* nivel de riego M1. Se observa que de los doce tratamientos, cinco perdieron más del 50 % de la población de un año para otro.

Esta disminución en la población de macollos es probablemente el factor de mayor peso que explica la disminución en la producción total de materia seca del segundo año.

Si bien los factores que afectan el macollaje son diversos, se cree que probablemente los factores de mayor repercusión hayan sido las bajas temperaturas ocurridas en el invierno del 2011 que pudo determinar la muerte de los mismos y al estrés hídrico que puede afectar negativamente la tasa de macollaje y acelerar la muerte de hojas y macollos.

Por otro lado el peso de las macollas no fue afectado por el manejo del agua, detectándose diferencias significativas (P<0,001) entre las especies.

La especie que presentó mayor peso promedio de macollos fue *P.purpureum* difiriendo estadísticamente del resto de las especies. Esto se debe a que es una especie de mayor porte con mayores tamaños de hoja, posee menor número de macollos pero de mayor peso. Para el caso de *F.arundinacea*, si bien el peso promedio de macollos es considerable-

Cuadro 12. Población de macollos.m² según especie y manejo de agua.

	<i>P. purpureum</i>	<i>P. notatum</i>	<i>P. dilatatum</i>	<i>F. arundinacea</i>
M1	58 D	1397 AB	743 C	677 C
M2	72 D	1597 A	990 BC	903 BC
M3	87 D	1440 AB	1020 BC	130 D

Cuadro 13. Disminución de la población de macollos entre el primer y segundo año, expresado en porcentaje.

	<i>P. purpureum</i>	<i>P. notatum</i>	<i>P. dilatatum</i>	<i>F. arundinacea</i>
M1	25	51	27	46
M2	31	57	35	77
M3	50	64	39	34

Cuadro 14. Peso promedio por macollo (g) según especie.

Especie	Peso por macolla(g)
<i>P.purpureum</i>	16 A
<i>P.dilatatum</i>	0,533 B
<i>P.notaum</i>	0,403 B
<i>F.arundinacea</i>	0,001 B

mente inferior al de *P.dilatatum* y *P.notaum*, no difiere estadísticamente con éstas debido a la amplia variabilidad de los datos.

Comparando los datos obtenidos durante el período evaluado con la bibliografía revisada, se observa una baja densidad de macollos para todas las especies evaluadas. Esto afirma que hubo algún factor perjudicial para las especies durante el invierno (bajas temperaturas y/o heladas), que provocaron una reducción en la densidad de macollas. Esto sumado al déficit hídrico ocurrido en el período de menor lluvia, provocó los bajos rendimientos obtenidos en el período evaluado, no pudiendo concretar las producciones esperadas.

Los datos obtenidos en el primer año de evaluación muestran menor peso por macollo asociado a mayores densidades, lo cual está de acuerdo con Grant *et al.* (1981), que establece que existe una relación inversa entre la densidad y el tamaño de macollos.

Igualmente, a pesar de haber obtenido mayores pesos de macollos debido a una menor densidad, esta no pudo compensar la producción y lograr rendimientos próximos al primer año.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en los dos años de estudios permiten concluir sobre el mayor potencial de producción de forraje de láminas foliares que presentó la especie tropical (Cuadro 15).

La producción promedio de *P. purpureum* representa una tasa diaria de crecimiento de 120 kg ha⁻¹ de materia seca de láminas por encima de una remanente de 0,40 m, lo cual representaría la dieta diaria de 12 novillos con ganancias de 1kg/animal/día⁻¹ (Almeida, 1997).

El efecto del riego muestra una superioridad ($P < 0,10$) de los rendimientos de los tratamientos regados frente a secano y muestra diferencias entre los manejos de agua. Las diferencias entre M1 y secano, representan un incremento diario de 13,4 kg/ha⁻¹ de materia seca de láminas foliares, en la producción de forraje estival.

Las respuestas obtenidas concuerdan con reportes de la bibliografía donde las gramíneas tropicales rinden más que las subtropicales y la producción de *Paspalum dilatatum* y *Paspalum notatum* incrementan sus rendimientos por riego sobre el rendimiento de secano en menos del 60 % (Mas, 2007; Mansfield *et al.*, 1990).

Por otro, lado Festuca presenta una alta respuesta al riego coincidiendo con lo reportado por Formoso (2000).

En resumen podemos decir que el nivel de producción de las especies se asoció a los diferentes metabolismos fotosintéticos y al origen de las mismas, siendo mayor en la especie tropical, in-

Cuadro 15. Producción promedio (kg/ha⁻¹) de materia seca de láminas según especie y manejos de agua.

Manejos	Especies				Media
	<i>Pennisetum purpureum</i>	<i>Paspalum notatum</i>	<i>Paspalum dilatatum</i>	<i>Festuca arundinacea</i>	
M1	20248	4646	4157	2854	7976 A
M2	19083	4743	3568	1675	7267 B
M3	15636	4052	3808	353	5962C
Media	18322 a	4480 b	3844 b	1627 c	7068

termedio en las subtropicales y menor en la templada.

Por lo que el uso de especies forrajeras tropicales permitiría aprovechar el potencial ambiental de verano para la producción de forraje de calidad, tanto en seco como bajo riego, siendo necesario aumentar la base de información hacia otras especies disponibles en el mercado.

El uso del riego permitió incrementar la producción de forraje, siendo su efecto significativo en los períodos de menor pluviosidad. Con máximo nivel de riego se maximizaron las producciones de materia seca en todo el período y para todas las especies evaluadas

La producción de la fracción lámina fue modificada por los manejos de agua.

Los manejos de agua no afectaron la población de macollas de las especies C4, ni el peso de las macollas en ninguna especie.

La reducción en la población de macollas no pudo ser compensada por el aumento de peso de las mismas, determinando la reducción en la producción del segundo año.

En los tratamientos de riego asociados a niveles altos de fertilización nitrogenada, se promovió el aumento de las malezas de ciclo estival.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M.** 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO. 300p. (Irrigations and Drainage; 56).
- ALMEIDA, E. X.** 1997. Oferta de forragem de capim elefante anão (*Pennisetum purpureum* Scum. Cv. Mott), dinamica da pastagem e sua relação com o rendimento animal no alto vale do itajai, Santa Catarina. Tesis de Posgrado. Porto Alegre, Brasil. Universidad Federal do Rio Grande do Sul. Facultad de Agronomia. 112 p.
- ALTAMIRANO, A.; DA SILVA, H.; ECHEVERRÍA, A.; PANARIO, D.; PUENTES, R.** 1976. Clasificación de suelos del Uruguay. Montevideo, MAP. DSF. t.1, 96 p.
- ALVIM, M.J.; DE ANDRADE, M.; NOVELLY, P.E.** 1986. Produção de gramíneas tropicais e temperadas, irrigadas na época seca. Revista Brasileira de Zootecnia. 15 (5): 384-392.
- BAETHGEN, W.E.; TERRA, R.** 2010. El riego en un clima cambiante. In: Primer Seminario Internacional, Paysandú, Uruguay. Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas. INIA, Montevideo, Uruguay. 208 p.
- BEMHAJA, M.** 2000. Pasto elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) INIA Lambaré. Montevideo, INIA. 14 p. (Boletín de Divulgación no. 72).
- BERGOTTINI, J.G.; DE ALENCAR, C.A.; RIBEIRO, E.G.; CÓSER, A.C.; MARTINS, C.E.; FERNANDES, A.M.** 2006. Influência da irrigação sobre a disponibilidade, a composição química, a digestibilidade e o consumo dos capins mombaça e napier. Revista Brasileira de Zootecnia. 35 (6): 2381-2387.
- BOSSI, J.** 1969. Geología del Uruguay. Montevideo, Universidad de la República, Departamento de publicaciones. 464 p.
- BOTREL, M.A.; ALVIM, M.J.; XAVIER, D.F.** Efeito da irrigação sobre algumas características agronômicas de cultivares de capim-elefante. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.26, n.10, p.1731-1736, 1991.
- BURSON, B. L.; WATSON, V. H.** 1995. Bahiagrass, Dallisgrass, and other Paspalum species. In: Burson, B. L.; Watson, V. H. eds. Forages; an introduction to grassland agriculture. 5th. ed. Ames, Iowa, Iowa State University. v.1, pp. 431-462
- CASTAÑO, J.P.; GIMÉNEZ, A.; CERONI, M.; FUREST, J.; AUNCHAYNA, R.** 2011. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. INIA. Serie Técnica N° 193. Montevideo.
- COOPER, J. P.; TAITON, N. M.** 1986. Light and temperature requirements for the growth of tropical and temperature grasses. Herbage Abstracts. 38(3):167-176.
- CORNAGLIA, P.S.; COUSO, L.L.; FERNANDEZ, R.J.; GATTI, M.L.; SCHRAUF, G.E.** 2010. Are more productive varieties of Paspalum dilatatum less tolerant to draught? Grass and Forage Science. 65: 296-303.

- MANSFIELD, C.W.; MISLEVY, P.; HAMMOND, L.C.** 1990. Yield and nutritive value of forages grown under irrigated and nonirrigated conditions. *Tropical Grasslands*. 24: 55-60.
- MOLFINO, J. H.; CALIFRA, A.** 2001. Agua disponible de las tierras del Uruguay; segunda aproximación. Montevideo, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. División Suelos y Aguas. Dirección General de Recursos Naturales Renovables Uruguay. 13 p.
- MOTA, V. J.; DOS REIS, S. T.; JUNQUEIRA DE SALES, E. C.; ROCHA JÚNIOR, V. R.; GONÇALVES DE OLIVEIRA, F.; WALKER, S. F.; MARTINS, C. E.; CÔSER, A. C.** 2010. Lâminas de irrigação e doses de nitrogênio em pastagem de capim-elefante no período seco do ano no norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 39(6):1191-1199.
- _____.; **ROCHA JUNIOR, V. R.; REIS, S. T.; SALES, E. C. J.; OLIVEIRA, F. G.; GOMES, V. M.; MARTINS, C. E.; COSER, A. C.** 2011. Laminas de irrigação e doses de nitrogênio em pastagem de capim-elefante no período chuvoso no norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal (Salvador)*. 12(4): 908-922.
- SANTIÑAQUE, F.; CARAMBULA, M.** 1981. Productividad y comportamiento de distintas mezclas forrajeras. *Investigaciones agronómicas*. 2. Centro de Investigaciones Agrícolas «Alberto Boerger», Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Montevideo. UY. 1981. 16-21.
- SAWCHIK, J.; MAS, C.; PÉREZ GOMAR, E.; BERMUDEZ, R.; PRAVIA, V.; GIORELLO, D.; AYALA, W.** 2010. Riego suplementario en pasturas: antecedentes de investigación nacional. In. *Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas*. 1er Seminario internacional. Paysandú, Uruguay.
- SETELICH, E.A.** 1999. Resposta à adubação nitrogenada de capim elefante anão (*Pennisetum purpureum* Schum. cv. Mott), sob pastejo no alto do Itajai, Santa Catarina. Tese Doutorado em Zootecnia. Porto Alegre, Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 104 p.
- PIZZARO, E.** 2002. Potencial forrajero del genero *Paspalum*. *Pasturas Tropicales*. 22 (1): 38-46.
- VITOR, C.M.T.; FONSECA, D.M.; COSER, A.C.** 2009. Produção de matéria seca e valor nutritivo de pastagem de capim-elefante sob irrigação e adubação nitrogenada. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v.38, n.3, p.435-442.

**García Petillo, M.¹, García, C.²,
Bonino, C.³, Arrieta, I.³, Delgado,
D.³, Camio, G.³**

¹Facultad de Agronomía.

²INIA Las Brujas

³CRS. Facultad de Agronomía.

Generación de tecnología para el diseño de riego por melgas, adaptada a las condiciones del Uruguay Primer aporte

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se viene incrementando el área de riego de cultivos y pasturas en nuestro país. Este incremento se explica principalmente por el aumento exponencial del número de pivotes centrales que se han importado e instalado.

Esta tecnología tiene ventajas muy claras respecto a otros métodos de riego, fundamentalmente en cuanto a la automatización y facilidad operativa.

Por el contrario, tiene la desventaja de sus altos costos de inversión y altos costos operativos.

Estos costos hacen que su rentabilidad sea muy clara en sistemas agrícolas, en un escenario de precios de los productos tan altos como el actual. Sin embargo, esos márgenes podrían ser menores o desaparecer en escenarios de precios menores, o en sistemas de producción agrícola ganaderos o agrícola lecheros.

El riego por superficie es el método que se aplica en la mayor parte del área regada del mundo. Sus ventajas son los bajos costos de inversión y bajos costos operativos.

En el Uruguay estos métodos se practican desde siempre en el cultivo del arroz (riego por inundación) y en el cultivo de la caña de azúcar (riego por surcos).

La investigación desarrollada por la Cátedra de Hidrología de la Facultad de

Agronomía, logró generar tecnología de riego por surcos adaptada a las condiciones edáficas, topográficas, climáticas y de sistemas de producción del Uruguay (Durán y García Petillo, 2007; García Petillo, 2011).

Sin embargo, la imposición de la siembra directa como tecnología generalizada en los cultivos de verano, hacen que el riego por surcos se haya quedado sin campo de aplicación.

La alternativa de riego por superficie para los cultivos de verano en siembra directa y los cultivos forrajeros es el riego por melgas.

Para este método, la adaptación de la tecnología utilizada universalmente a las condiciones locales del Uruguay es muchísimo más dificultosa que en el caso del riego por surcos.

Esto se debe a las altas pendientes (mayores al 2 %) de casi todos los campos agrícolas, las bajas a muy bajas velocidades de infiltración dadas por la textura muy pesada de nuestros suelos, y principalmente la poca profundidad del horizonte A, que impide que se realicen los grandes movimientos de tierra de cortes y rellenos, que es la práctica habitual en todas las principales zonas de riego del mundo.

El objetivo de este primer trabajo en el tema fue comenzar a generar conocimientos para el diseño de riego por melgas en las condiciones del Uruguay.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el año 2011 se instaló un ensayo en el Centro Regional Sur de la Facultad de Agronomía, en el departamento de Canelones.

Se construyeron melgas en el sentido de la máxima pendiente, de unos 65 m de largo desde el canal de aducción hasta el bajo donde desaguaban. Las melgas estaban separadas entre sí por bordos.

Los tratamientos ensayados fueron diferentes anchos de melga: 6, 9 y 12 m de ancho en melgas regadas, y un testigo también de 12 m en secano. Los tratamientos se instalaron en un diseño de bloques con parcelas al azar, con tres repeticiones, totalizando 12 melgas. (Figura 1).

Se midió la pendiente longitudinal (promedio y por tramos) y transversal de las melgas.

Se hizo una caracterización del suelo en calicata, que se clasificó como Brunosol eutrítico típico, de la unidad Tala-Rodríguez, y se hizo su caracterización hidrológica (Cuadro 1).

Se realizó además la curva de velocidad de infiltración (V_i) y de infiltración acumulada (I_{cum}). Dada la alta variabilidad que normalmente se detecta en este parámetro, esta determinación se repitió en las dos temporadas en el mismo cuadro y utilizando la misma metodología del doble anillo infiltrómetro.

En la temporada 2011/12 se aplicaron cuatro riegos y en la temporada 2012/13 siete.



Figura 1. Vista general de dos melgas. A la izquierda melga regada y a la derecha melga en secano. La separación entre ambas es un doble bordo con un surco central.

Cuadro 1. Parámetros hidrológicos del suelo del ensayo. Densidad aparente (D_{ap}), contenido de agua a capacidad de campo (CC), a punto de marchitez permanente (PMP) y capacidad de almacenaje de agua disponible (AD) por horizonte y en todo el perfil.

Horiz	Prof (cm)	D.Ap. ($g\ cm^{-3}$)	CC ($mm10cm^{-1}$)	PMP ($mm10cm^{-1}$)	AD ($mm10cm^{-1}$)	AD Hz (mm)	AD total (mm)
Ap	00–20	1,35	55,4	37,0	18,5	36,9	77,3
Bt1	20–40	1,66	58,4	38,3	20,2	40,3	

En cada riego se hicieron las siguientes determinaciones: caudal de entrada, caudal de salida, curva de avance y de recesión, tiempo de oportunidad, tiempo de riego, contenido de agua en el suelo, uniformidad del riego, lámina bruta, lámina neta, eficiencia de aplicación.

Tres melgas (una de cada ancho) se estaquearon cada 10 m y en cada riego se registró el tiempo que demoraba el frente de mojado en llegar a cada estaca, construyendo así la curva de avance. Una vez cortado el riego, se registró el tiempo en que el agua desaparecía de cada estaca, construyendo así la curva de recesión.

En todos los riegos aplicados se midió el caudal de entrada con un aforador de flujo crítico (WSC) frente a cada compuerta y el caudal de salida con un aforador similar pero de menor tamaño, al pie de la melga, desde que comienza el escurrimiento hasta que finaliza. (Figuras 2 y 3).

En los primeros riegos se utilizó un caudal tentativo estimado a partir del nomograma de Criddle *et al.* (1956) corregido por el factor de pendiente. En riegos posteriores, y en base a los resultados que se iban obteniendo en las sucesivas mediciones se fue ajustando ese caudal siguiendo los criterios de Walker y Skogerboer (1987) y de Hoffman *et al.* (2007), siempre teniendo

en consideración que no superara el caudal máximo no erosivo ni fuera inferior al caudal mínimo, calculados por las siguientes ecuaciones, respectivamente:

$$Qu_{m\acute{a}x} = 0,353 * s^{-0,75}$$

$$Qu_{m\acute{i}n} = \frac{0,00595 * L * s^{0,5}}{n}$$

Siendo $Qu_{m\acute{a}x}$ y $Qu_{m\acute{i}n}$ el caudal unitario máximo y mínimo respectivamente, en $L \text{ s}^{-1}$ por m de ancho de melga, s es la pendiente en m m^{-1} , L es la longitud de la melga en m y n es el coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional).

La conducción y aducción del agua de riego se hizo con una tubería Polypipe con compuertas regulables (ver Figura 1).

Se realizó un seguimiento sistemático del contenido de agua del suelo. Al inicio del proyecto esta determinación se hacía gravimétricamente, lo que no sólo es laborioso, sino que además es lento, ya que recién se obtiene la medida 48 a 72 horas después del muestreo. Para solucionar esto, se instalaron tubos de sonda, seis tubos por melga en los tratamientos regados y tres tubos en el seco. Los tubos se instalaron dos cerca de la cabecera, dos en la mitad de la longitud y dos cerca del pie de las melgas. De los dos tubos en cada posición, uno se instaló aproximadamente a un metro del



Figura 2. Cabecera de la melga, con detalle de la tubería con compuertas y aforador WSC midiendo el caudal de entrada.



Figura 3. Pie de la melga, con aforador midiendo el caudal escurrido a la salida. Se observa un volumen de agua acumulada sobre el bordo izquierdo de la melga, producto de la falta de nivelación transversal.

bordo derecho y el otro a la misma distancia del bordo izquierdo.

En cada riego se midió el contenido de agua del suelo en todo el perfil inmediatamente antes del riego y 24 horas después del mismo.

RESULTADOS OBTENIDOS

Construcción de las melgas con bordos

Si consideramos que la melga es una faja de terreno rectangular, ubicada en el sentido de la máxima pendiente y limitada en sus dos lados por bordos de tierra, hay importantes detalles constructivos de la misma que pueden por sí mismo determinar el éxito o el fracaso de la operativa de riego, y que a continuación trataremos de sistematizar en base a la experiencia obtenida en estos años.

La forma **más fácil** de construir los bordos es utilizando un alomador de discos o de rejas, volcando tierra de un lado y de otro. Este método supone dejar dos surcos, de donde se obtuvo el préstamo de tierra, a ambos lados de los bordos (Figura 4a). La compactación se hace con los neumáticos del tractor.

Dado que estos surcos están en el sentido de la máxima pendiente, una parte muy importante del agua de riego aducida a la melga se canaliza por estos

surcos y se pierde al pie, generando una baja eficiencia de aplicación y una baja uniformidad del riego. Adicionalmente, y aún más importante que lo anterior, se pueden generar graves problemas de erosión.

La forma de disminuir estos problemas es tapar con tierra estos surcos, p.ej.: cada 2 m, utilizando pala y azada. Esta operativa es muy demandante de mano de obra, y las mejoras logradas son marginales.

Por todo lo anterior, **no se recomienda** esta forma de construir los bordos.

La **mejor** forma de construir los bordos es utilizando una hoja de nivelación, un land-plane o una motoniveladora. En este caso se traslada una delgada capa de suelo de todo el ancho de la melga para construir los bordos, no quedando en este caso ningún surco (Figura 4b). La compactación se hace con un rodillo compactador.

El volumen de suelo que es necesario desplazar para construir 1 m lineal de bordo, se puede calcular asumiendo el mismo con una sección triangular, de 0,40 m de base y 0,30 m de altura.

$$\text{Vol} = (0,40 * 0,30) / 2 * 1 = 0,06 \text{ m}^3$$

Como el bordo debe quedar muy bien compactado, se deberá utilizar el doble del volumen final, es decir 0,12 m³.

La zona de préstamos para construir ese tramo de bordo tiene 1 m de largo por

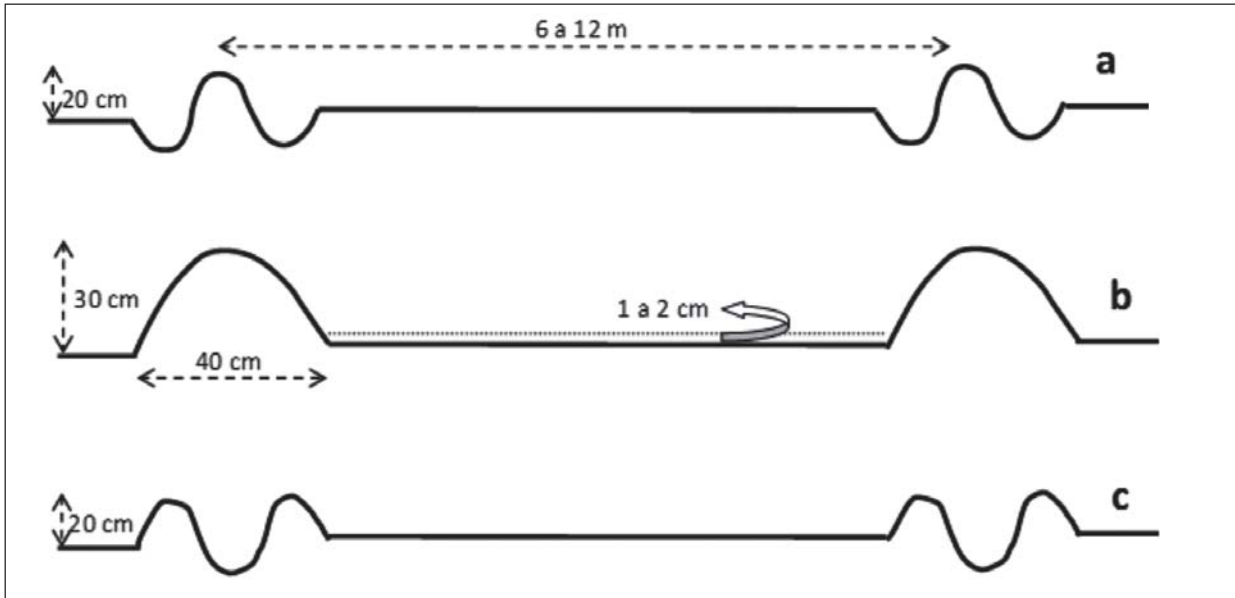


Figura 4. Diferentes formas de construir los bordos. a Con alomador de discos o rejas b Con hoja de nivelación, land-plane o motoniveladora c Con surcador de un cuerpo.

6 (3 a cada lado) a 12 m (6 a cada lado) de ancho, o sea 6 a 12 m².

Por lo tanto la altura de suelo a trasladar es de:

$$0,12 \text{ m}^3/6 \text{ m}^2 = 0,02 \text{ m} \text{ ó } 0,12 \text{ m}^3/12 \text{ m}^2 = 0,01 \text{ m}.$$

En resumen, se deberán remover de 1 a 2 cm de suelo, dependiendo del ancho de melga elegido.

Este sistema tiene la ventaja, por no tener surcos, de facilitar la operativa y mejorar sustancialmente la eficiencia y la uniformidad del riego. Además, como los bordos son más grandes y están mejor compactados, tienen una vida útil mayor, siendo necesario solamente algunos retoques periódicos.

Tiene la limitación que es necesario disponer de la maquinaria ya señalada, que es grande y especializada. En general, los productores arroceros disponen de la misma, pero no la tienen productores de otros rubros (agricultores, lecheros, ganaderos intensivos).

Para esta situación, recomendamos la construcción de los bordos utilizando un surcador de un cuerpo. De esta manera quedan dos bordos, con el surco generado por el préstamo de tierra entre ambos bordos (ver Figura 1, Figura 4c). Así, el agua de riego aplicada a la melga no llega al surco, evitándose la situación

descrita en la Figura 4a. Sin embargo, **es condición imprescindible** para el éxito del sistema que los bordos estén muy bien compactados, pues si no el agua infiltraría lateralmente e igual se canalizaría por el surco central. Para lograr esta buena compactación, se deberá trabajar con un contenido de humedad del suelo adecuado. Además, luego de cada pasada del surcador se deberá hacer una pasada de cada lado compactando los bordos con los neumáticos del tractor.

Pendiente longitudinal y transversal de las melgas

Las melgas se deben construir en el sentido de la máxima pendiente. Pero esta afirmación, es una simplificación de la realidad.

La máxima pendiente del terreno en cualquier punto, se da en una dirección perpendicular a la tangente de la curva de nivel en dicho punto. De esa forma la pendiente transversal es mínima. Como a lo largo de una curva de nivel las tangentes a la misma cambian de dirección, también cambia la dirección de la máxima pendiente en cada punto.

La Figura 5a muestra cómo quedarían armadas las melgas si se pretendiera que cada una de ellas quedara en la

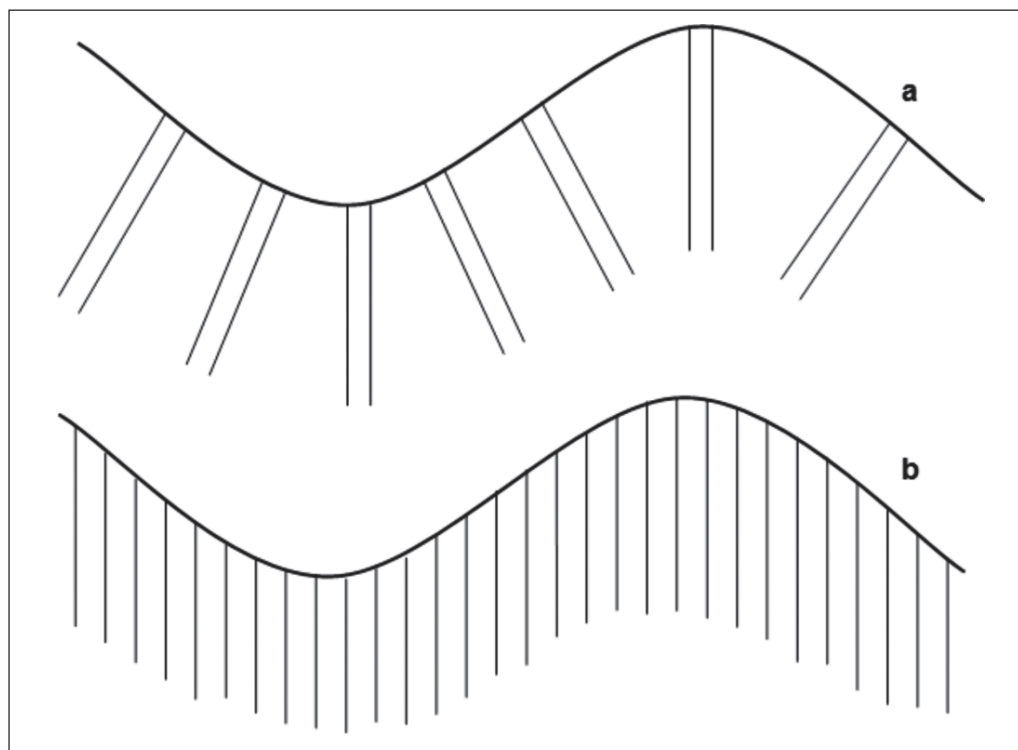


Figura 5. Dirección de las melgas. a. Cada una en el sentido de la máxima pendiente. b. Agrupadas aproximadamente en la máxima pendiente.

máxima pendiente. Este esquema, como se comprende, dificultaría enormemente el manejo del cultivo y dejaría grandes áreas entre dos melgas sucesivas sin utilizar.

Es por ello que lo que se hace son grupos de melgas contiguas, tal como se muestra en la Figura 5b. En este caso, entonces, es posible que una sola de dichas melgas esté realmente en el sentido de la máxima pendiente, y el resto de ellas estén aproximadamente en dicho sentido.

Esto es muy importante, porque cuánto más alejada esté cada melga de esa dirección, mayor será su pendiente transversal.

En el ensayo del CRS la pendiente longitudinal de las melgas varió entre 1,9 y 2,5 %. Estos valores son perfectamente aceptables para realizar un riego por superficie adecuado.

Sin embargo la pendiente transversal, que en una situación ideal debería ser de 0 %, por lo antes señalado fue en promedio del 0,7 %. Esto significa que existe un desnivel entre ambos bordos de cada melga de entre 4 cm en las melgas de 6 m de ancho y 8 cm en las de 12 m, ocasionando acumulación de agua con-

tra uno de los bordos, como se observa en la Figura 3. Esta situación se esquematiza en la Figura 6a.

Este desnivel transversal se traduce en un enorme incremento de la mano de obra para manejar el riego, que se hace muy dificultoso, así como una significativa reducción en la uniformidad del mismo.

En base a la experiencia acumulada y sistematizada en estos años de experimentación, entendemos que para instalar este método de riego se deberá previamente hacer una nivelación transversal de las melgas. Para ello, suponiendo p.ej. una melga de 12 m de ancho con 8 cm de desnivel, se deberá excavar en la parte más alta, utilizando el suelo removido para rellenar la parte más baja. En este ejemplo, se excavarían 4 cm contra el bordo superior y se rellenarían 4 cm contra el bordo inferior. Parte de este movimiento de tierra se utilizará para la construcción de los bordos, como ya fue descrito. La Figura 3b muestra como deberían quedar las melgas después de este trabajo.

Esta nivelación transversal permitiría que las melgas tuvieran mayor ancho (12 a 20 m) permitiendo igual un buen manejo del riego.

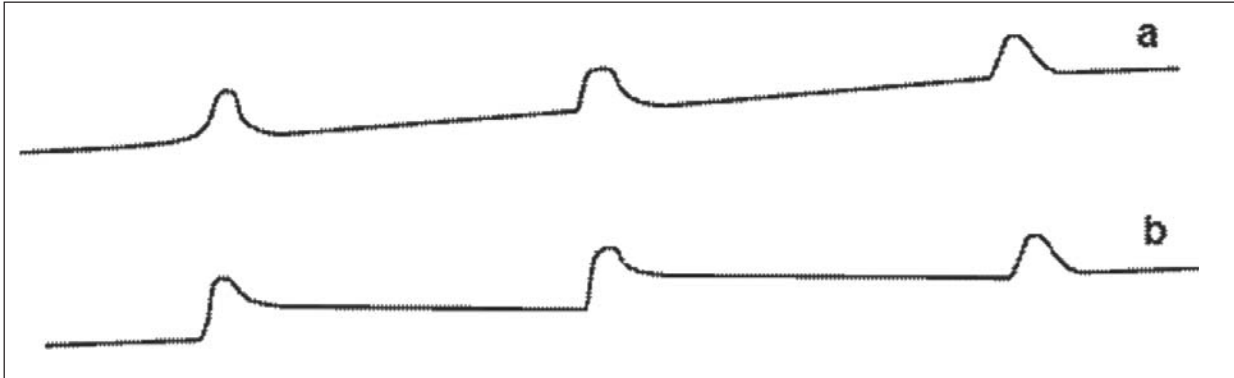


Figura 6. Pendiente transversal de las melgas. a. Manteniendo la pendiente original del terreno b. Niveladas transversalmente.

Las herramientas a utilizar para hacerlo son *land-plane*, hoja de nivelación o motoniveladora.

Curvas de velocidad de infiltración (V_i) y de infiltración acumulada (I_{cum})

En el primer año se obtuvo la primera curva de infiltración acumulada (CRS-1) que respondió a la siguiente ecuación:

$$\text{CRS-1} \quad I_{cum} = 11,948 * t^{0,4767}$$

Siendo I_{cum} la infiltración acumulada en mm y t el tiempo transcurrido, en horas.

En el año 2012 se repitió la misma prueba, en el mismo cuadro y utilizando la misma metodología, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$\text{CRS-2} \quad I_{cum} = 97,236 * t^{0,776}$$

Esta última ecuación es totalmente diferente que la anterior, mostrando una velocidad de infiltración anormalmente alta. Sin duda la misma no se debe a las propiedades intrínsecas del suelo, sino a alguna circunstancia particular que generó un intenso flujo preferencial, pero que no fue verificada, como por ejemplo rajaduras en profundidad, galerías de lombrices o cuevas de otros animales, cavidades dejadas por raíces muertas, etc.

Finalmente, y a modo de comparación, se presenta la curva del National Resources Conservation Service (NRCS) de Estados Unidos, correspondiente a la

familia de infiltración 0.1 (0,1 pulgada h^{-1} , equivalente a 2,5 $mm h^{-1}$) correspondiente a una textura arcillo-limosa a arcillosa (Walker *et al.*, 2006).

$$\text{NRCS 0,1} \quad I_{cum} = 9,281 * t^{0,661}$$

Estas tres ecuaciones se presentan gráficamente en la Figura 7.

Dada la alta variabilidad de este parámetro, verificada tanto en este ensayo como repetidamente en diferentes trabajos de campo, y que es una información **imprescindible** si se pretende diseñar el riego por superficie utilizando modelos matemáticos, podemos hacer las siguientes recomendaciones:

- La prueba se deberá repetir en al menos dos sitios (mejor tres), representativos de los cuadros a regar, y separados entre sí de 20 a 50 m
- Si dos, o las tres curvas obtenidas son similares entre sí, se promediarán sus valores y se construirá una única curva.
- Si todas las curvas son muy diferentes entre sí, se compararán con las curvas del NRCS para un suelo similar. Si concuerda con alguna de las curvas obtenidas, se utilizará esta curva.
- Si ninguna de las curvas de infiltración acumulada obtenida fuera similar a la correspondiente el NRCS, no se utilizarán las curvas obtenidas a campo sino que se usará la del NRCS.

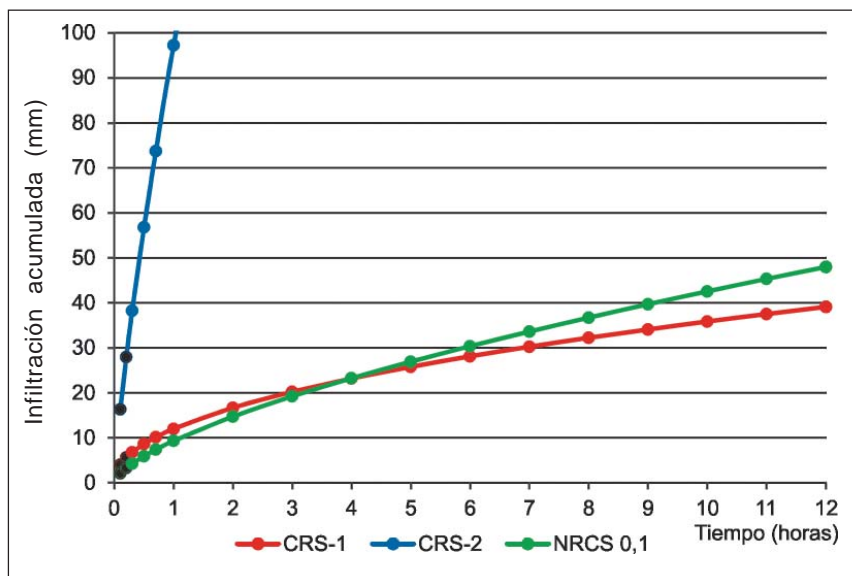


Figura 7. Curvas de infiltración acumulada obtenidas en el CRS en 2010 (CRS-1) y en 2012 (CRS-2) y la curva del NRCS de la familia 0,1 (NRCS 0,1).

Es decir, en un parámetro tan sujeto a variaciones espaciales y temporales, si no se tienen seguridades sobre el parámetro obtenido a campo, es preferible utilizar las curvas teóricas disponibles en la literatura.

Se debe considerar que la solución dada por lo modelos de simulación es totalmente dependiente de este valor, y si el mismo es irracional (como en el caso de la curva CRS-2), también el resultado del modelo será irracional.

Contenido de agua en el suelo

En la Figura 8, y solo a modo de ejemplo, se muestra la evolución de la humedad del suelo en la temporada 2012/13, en una melga regada y una de secano.

Si bien fue un año muy lluvioso, en la melga de secano se ve que a principios de febrero de 2005 se habían agotado unos 60 mm de agua. Luego de esa fecha llovió y la humedad se repuso hasta un punto satisfactorio.

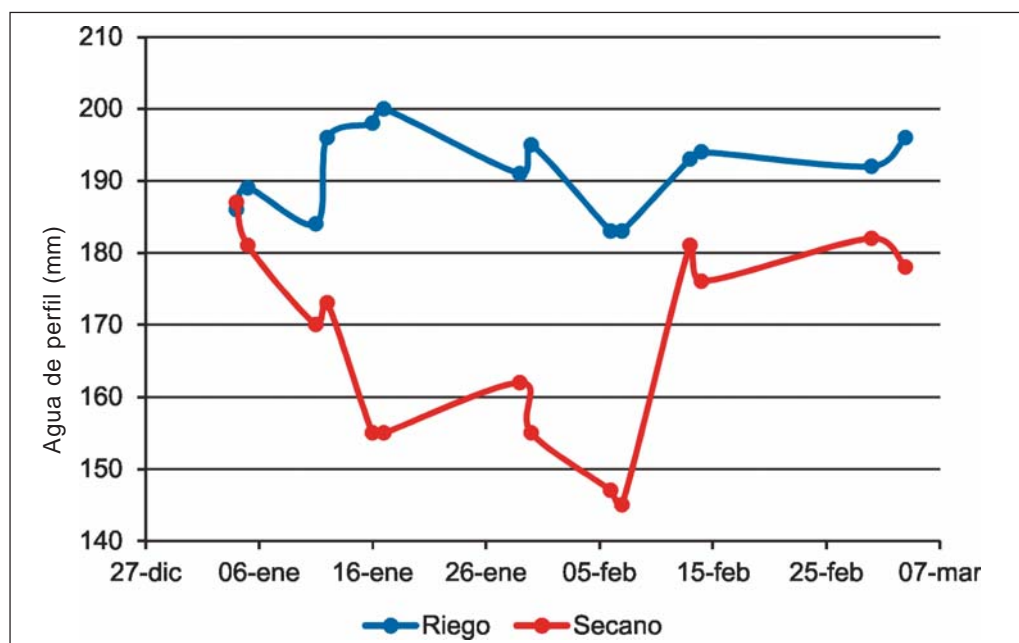


Figura 8. Contenido de agua en el perfil de 0 a 60 cm, en una melga regada y en una de secano.

Mientras tanto, la melga regada siempre mantuvo un contenido muy adecuado de agua en su perfil, y nunca se llegaron a agotar más de 20 mm.

Curvas de avance y de recesión

Cada riego aplicado representó una diferente combinación de ancho de melga y de caudal aplicado. Para hacer los resultados más fácilmente comparables, todos se presentarán como caudales unitarios, es decir litros por segundo por metro de ancho de la melga.

En la Figura 9 se presentan las curvas de avance para diferentes riegos (el pri-

mero, segundo, tercero y cuarto de la temporada) y para diferentes anchos de melga (6 y 9 m), pero en todos los casos para el mismo caudal unitario de $2\text{ls}^{-1}\text{m}^{-1}$.

Se observa que todas las curvas son muy similares entre sí, variando el tiempo en que el agua llega al pie de la melga entre 23 y 30 minutos. Esto fue así independientemente del estado de desarrollo que tuviera la pradera en cada fecha determinada.

En la Figura 10 se presentan las curvas de avance para diferentes caudales unitarios (0,4 – 0,5 – 0,8 – 1,0 – 1,2 – 1,3 – 1,5 y $2,0\text{ls}^{-1}\text{m}^{-1}$) logrados en los diferentes riegos con diferentes combinaciones de caudal total y ancho de melga.

Figura 9. Curvas de avance para un caudal unitario de $2,0\text{ls}^{-1}\text{m}^{-1}$.

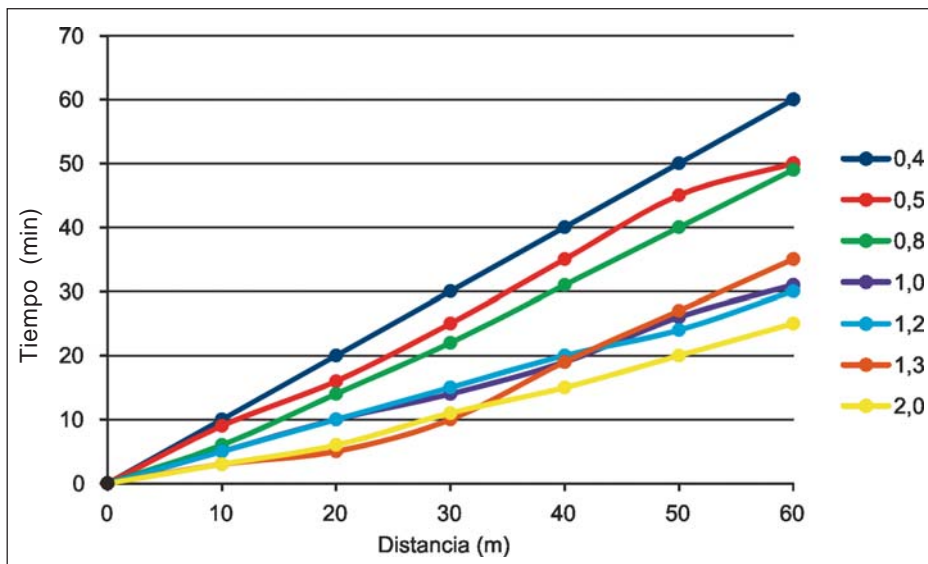
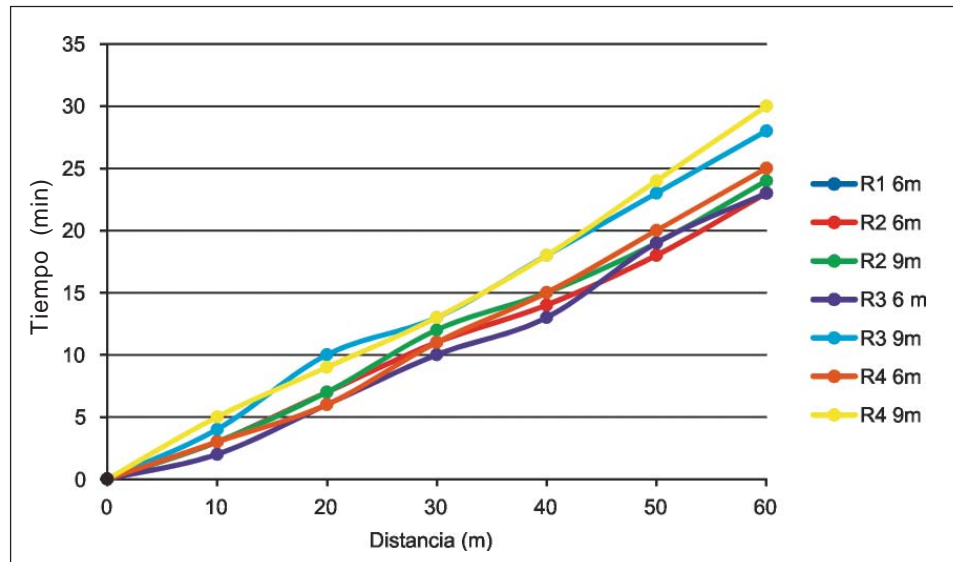


Figura 10. Curvas de avance para diferentes caudales unitarios.

En este caso sí se dieron diferencias claras en el tiempo de avance, el que varió entre 25 y 60 minutos. Estos tiempos quedaron además perfectamente ordenados de acuerdo al caudal, cuanto mayor el caudal, menor el tiempo de avance.

De las Figuras 9 y 10 se desprende que la principal variable que determina la velocidad de avance es el caudal.

La Figura 11 muestra las curvas de recesión que corresponden a los mismos caudales que la Figura anterior.

De la misma se desprenden algunas observaciones importantes.

En primer lugar, los tiempos de recesión son bastante mayores que los tiempos de avance mostrados en la Figura 10. En efecto, si calculamos el tiempo que demora desde que la recesión comienza en la cabecera hasta que llega al pie de la melga, este varía entre un mínimo de 58 minutos para el caudal de 2,0 $\text{ls}^{-1}\text{m}^{-1}$ hasta un máximo de 135 minutos para el caudal de 0,8 $\text{ls}^{-1}\text{m}^{-1}$.

En segundo lugar, los tiempos de recesión no están directamente determinados por los caudales. Como se observa en la Figura 8, son casi iguales las curvas de los caudales de 0,4 y 1,2 $\text{ls}^{-1}\text{m}^{-1}$. De la misma forma, también son casi iguales entre sí las de 0,5 y 1,3 $\text{ls}^{-1}\text{m}^{-1}$.

Tiempo de oportunidad

El tiempo de oportunidad o tiempo de contacto es el tiempo en que hay agua libre en superficie, posibilitando la infiltración. O sea que es el verdadero tiempo de riego. Ocurre desde que llega el agua a un punto (tiempo de avance) hasta que ésta se retira (tiempo de recesión).

La Figura 12 muestra los tiempos de oportunidad para los caudales graficados en las dos figuras anteriores.

Se observa que, en general, el tiempo de oportunidad es mayor al final de la melga que en la cabecera. Esto se debe a lo que ya fue analizado en el apartado anterior, que los tiempos de recesión son mayores a los tiempos de avance.

Esta característica, que se repite sistemáticamente en casi todos los caudales evaluados, es antagónica con la que se menciona normalmente en la literatura. Esto es, que el tiempo de oportunidad, y por lo tanto la lámina infiltrada, es mayor en la cabecera.

Es muy posible que este comportamiento diferente se deba a que en este caso particular, pero también en la mayoría de las situaciones productivas del Uruguay, las pendientes longitudinales de las melgas son mucho mayores (aproximadamente 2,5 %) que en las

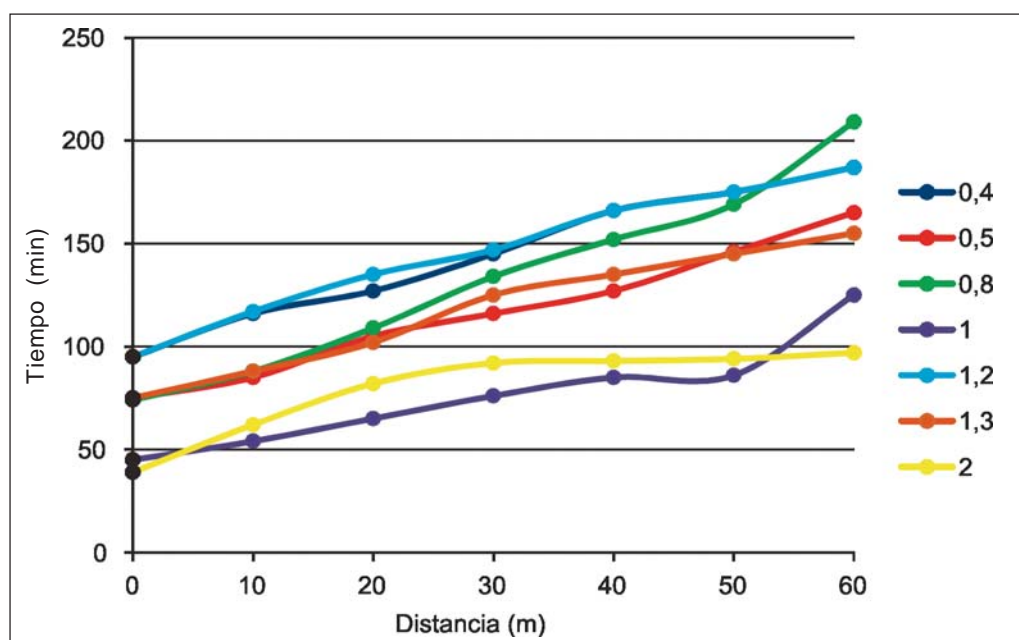
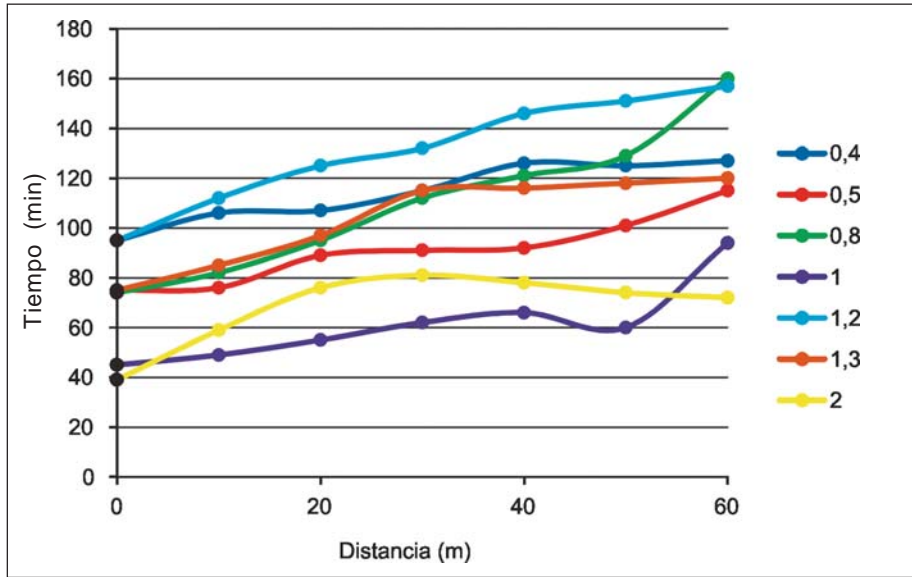


Figura 11. Curvas de recesión para diferentes caudales unitarios

Figura 12. Tiempo de oportunidad para los diferentes caudales unitarios.



principales zonas de riego por superficie en el mundo, cuyas pendientes raramente superan el 0,5%.

También como medida de la uniformidad, se calculó el Coeficiente de Variación (CV), en porcentaje, con la siguiente ecuación:

Uniformidad del riego

Se calculó el Coeficiente de Uniformidad (CU) de Christiansen, en porcentaje, con la siguiente ecuación:

$$CU = \left(1 - \frac{\sum |x_i - X|}{n \cdot X}\right) \cdot 100 \quad (1)$$

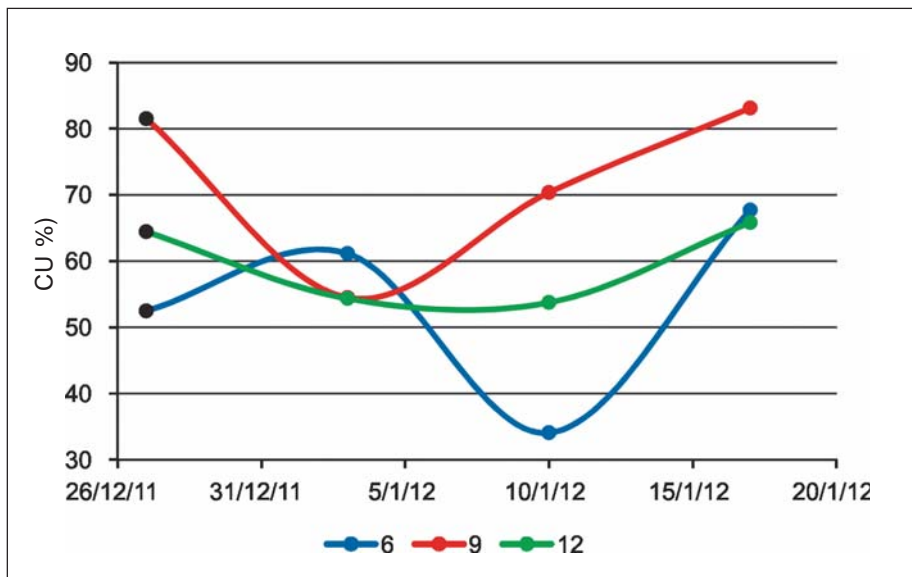
Siendo x_i el contenido de agua en cada punto, X el contenido promedio de todos los puntos y n el número de puntos muestreado (seis en este caso).

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (2)$$

Siendo σ la desviación típica y \bar{x} la media.

En la temporada 2011/12 se realizaron cuatro riegos, y en cada uno de ellos se calculó el Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (ecuación 1). En la Figura 13 se presenta la evolución del CU en los cuatro riegos y en melgas de los tres anchos evaluados.

Figura 13. Coeficiente de Uniformidad de Christiansen en los cuatro riegos y en melgas de 6, 9 y 12 m de ancho.



En contra de lo que podía esperarse, no hay una relación marcada entre el menor ancho de melga y la mayor uniformidad. De hecho, en el 1^{er.} y el 3^{er.} riego las melgas de 6 m son las menos uniformemente regadas. Por el contrario, en tres de los cuatro riegos la melga más uniforme es la de 9 m.

El promedio de todas las medidas el CU en toda la temporada y en todas las melgas fue 62 %, el cual es comparable al que se obtiene con algunos equipos comerciales de riego a presión.

En la temporada 2012/13 se realizaron siete riegos. A continuación se presentan medidas de la uniformidad de la humedad en el suelo (en este caso Coeficiente de Variación – ecuación 2) tomadas a lo largo de toda la temporada antes y después de cada riego, en melgas de 6, 9 y 12 m de ancho, y en una melga de secano (Figura 14).

El primer aspecto a resaltar es que en casi todas las fechas la distribución del agua en el suelo era menos uniforme (mayor CV) en la melga sin riego que en cualquiera de las tres regadas.

Esto en principio no era esperable, ya que en las melgas de secano la única fuente de agua fue la lluvia, que se puede considerar como uniforme en toda la superficie.

Por el contrario, las melgas de riego que se mojan de una forma que por la

propia naturaleza de este método de riego no es muy uniforme, presentan CV extremadamente bajos (entre 2 y 8 %). El CV promedio de todas las fechas y en las tres melgas fue del 4,8 %, el cual se considera muy bajo, o lo que es lo mismo, la distribución del agua fue muy uniforme.

Finalmente, y si comparamos los CV de las tres melgas regadas entre sí, vemos que la que presenta mayor uniformidad del contenido de agua es la de 12 m (CV entre 2 y 4 %), mientras que lo contrario ocurre con la de 6 m (CV entre 4 y 8 %). Esto también es muy difícil de explicar, ya que las melgas se hacen de menor ancho justamente para aumentar la uniformidad del riego.

En la Figura 14 se observa que para cada riego, hay dos fechas de medición: una antes y una después del riego. Como se aprecia, tampoco hay un claro efecto del riego ni en aumentar ni en disminuir la uniformidad de la distribución del agua en el suelo.

Eficiencia del riego

Se calculó la Eficiencia de Aplicación (Ea) en porcentaje, con la siguiente ecuación:

$$Ea = \left(\frac{LN}{LB}\right) * 100 \quad (3)$$

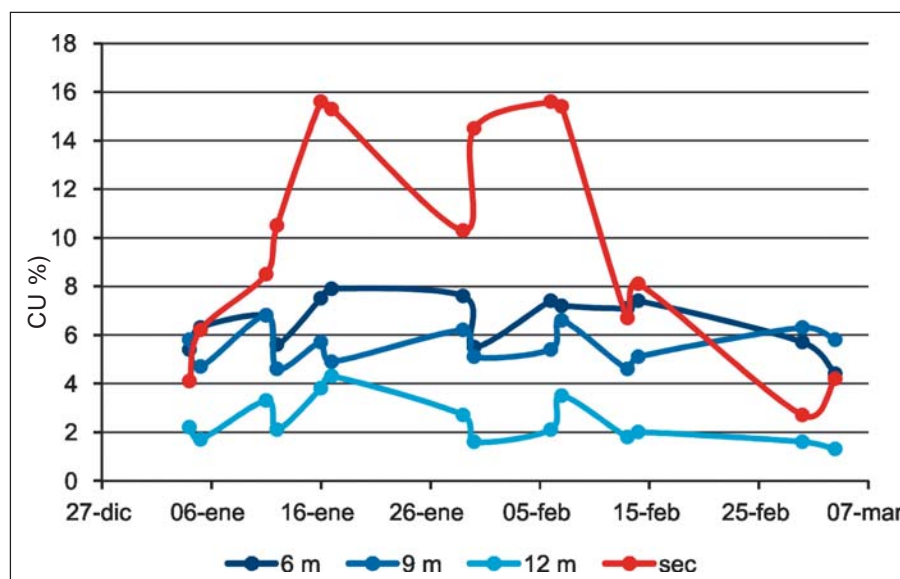


Figura 14. Coeficiente de variación del contenido de humedad del suelo a lo largo de la temporada, en tres melgas regadas y una de secano.

La Lámina Bruta (LB) aplicada se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$LB = \frac{Qr * Tr}{L * A} \tag{4}$$

Siendo LB la Lámina Bruta en mm, Q_r el caudal de riego en L hora⁻¹, T_r el tiempo de riego en horas y L y A el largo y ancho de la melga respectivamente, en m.

También se calculó la Lámina Neta (LN) efectivamente aplicada, con la siguiente ecuación.

$$LN = Xd - Xa \tag{5}$$

Siendo LN la Lámina Neta en mm, X_a el contenido promedio de agua en mm de todos los puntos antes del riego, y X_d lo mismo pero después del riego.

A modo de ejercicio globalizador, analicemos algunas alternativas, basados en toda la información de campo antes reseñada.

Utilizando la ecuación (3) calcularemos la Eficiencia de Aplicación (E_a). Para ello, debemos estimar previamente la LN y la LB.

Si nos planteamos como objetivo, y de acuerdo a las características del suelo, aplicar un LN de 40 mm, entonces, a partir de la curva de infiltración acumulada hallada (ecuación CRS-1), el tiempo de oportunidad en cada punto debe ser al menos de 12,6 horas.

Utilizaremos la información de tiempo de avance y de recesión correspondiente al caudal de 0,4 ls⁻¹m⁻¹ presentada en las Figuras 7 y 8.

Este manejo teórico del riego se resume en la Figura 15.

Se comienza a regar en el minuto 0 con un caudal de 0,4 ls⁻¹m⁻¹, a los 60 minutos el agua llega al pie de la melga y comienza a escurrir, a los 756 minutos se corta el riego, y a los 788 llega la recesión al pie de la melga. Por lo tanto, los tiempos de oportunidad varían entre 756 minutos en la cabecera (lo que implica que infiltre la lámina objetivo de 40 mm) hasta 788 minutos al pie (lo que implica una infiltración de 40,8 mm).

El caudal aplicado en litros por minuto es de 0,4 ls⁻¹m⁻¹ * 60 seg = 24 lmin⁻¹m⁻¹

El volumen de agua total aplicado será 24 lmin⁻¹m⁻¹ * 756 min = 18144 l.

Este volumen se aplicó en una faja de 60 m de largo * 1 m de ancho.

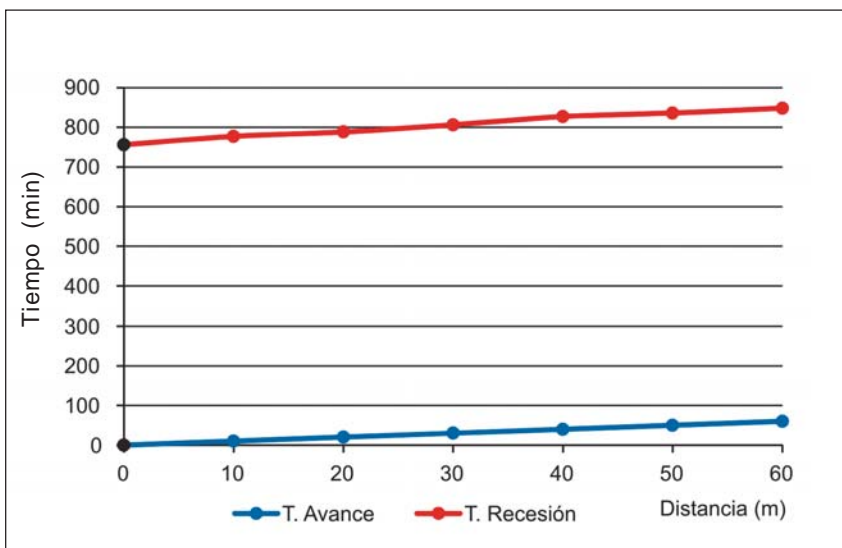


Figura 15. Tiempos de avance, de recesión y de oportunidad para dar una LN no inferior a 40 mm, utilizando un caudal de 0,4 ls⁻¹m⁻¹. Todos los cálculos están basados en la información de campo acá presentada.

Por lo tanto la LB = $18144 \text{ l} / 60 \text{ m}^2 = 302 \text{ mm}$

Y la Ea es $40 / 302 * 100 = 13\%$

Una Eficiencia de Aplicación del 13% es extremadamente baja (implica que de cada 100 l de agua aplicada, sólo 13 quedan disponibles para el cultivo).

Esto se debe por un lado a que la velocidad de infiltración (V_i) del suelo es extremadamente baja (situación muy común en el Uruguay) por lo que para infiltrar una cierta lámina se deberá regar durante muchas horas. Por otro lado, debido a que los suelos son tan desparejos en su microtopografía, para que el agua avance se deberán utilizar caudales relativamente altos.

Esta combinación de caudales altos y tiempos de riego prolongados se traducen indefectiblemente en pérdidas de agua muy importantes por escurrimiento al pie de la melga.

La forma de mitigar esto es utilizando caudales mucho más bajos. Y para que estos pequeños caudales avancen en forma pareja en todo el ancho de la melga, se vuelve imprescindible la nivelación transversal de la melga.

CONCLUSIONES

Estos años de investigación nos permiten postular que para poder regar con este método, en forma cómoda y eficiente en el uso del agua y de la mano de obra, se deberán dejar las melgas niveladas con 0% de pendiente transversal.

De la experiencia acumulada surge con claridad que, a pesar de la mayor inversión inicial en sistematización, y de la necesidad de uso de cierta maquinaria especializada (land-plane, hoja de nivelación, motoniveladora, rodillos compactadores), ésta se pagará rápidamente con el aumento de la eficiencia en el uso del agua y la mano de obra, y fundamentalmente en la facilidad de operación del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- CRIDDLE, W.D.; CLAUDE, S.; PAIR, C.H.** 1956. Methods for evaluating irrigation systems. Soil Conservation Service, US Department of Agriculture.
- DURÁN, P.; GARCÍA PETILLO, M.** 2007. Desarrollo de tecnologías apropiadas para riego por surcos en terrazas paralelas y tierras con pendiente. Revista Ingeniería del Agua. Vol. 14(3), 187-198.
- GARCÍA PETILLO, M.** 2011. Análisis crítico del riego por gravedad en las condiciones del Uruguay. Revista Agrociencia Uruguay Vol. XV, 2:76-82.
- GARCÍA PETILLO, M.; GARCÍA, C.; BOURDIN, A.; BURGOS, M.; FRANCO-FRAGUA, M.; CORCOLL, M.; MALVASIO, M.; SALDANHA, S.; BONINO, C.; ARRIETA, I.; DELGADO, D.; CAMIO, G.** 2012. Parámetros de diseño de riego por superficie ajustados para situaciones de alta y baja pendiente. Informe final FPTA.
- HOFFMAN, G.J.; EVANS, R.G.; JENSEN, M.E.; MARTIN, D.L.; ELLIOTT, R.L.** 2007. Design and operation of farm irrigation systems. 2nd. Edition. ASABE. 863p.
- WALKER, W.R.; SKOGERBOE, G.V.** 1987. Surface irrigation. Theory and practice. Prentice-Hall. 386p.
- WALKER, W.R., PRESTWICH, C.; SPOFFORD, T.** 2006. Development of the revised USDA-NRCS intake families for surface irrigation. Agricultural Water Management, 85(1), 157-164.

Evaluación económica del riego suplementario en cultivos y pasturas

INTRODUCCIÓN

El riego puede visualizarse como una herramienta útil en la búsqueda de mejores niveles de rentabilidad y estabilidad de los ingresos de los sistemas agrícola-ganaderos, mediante la reducción en la variabilidad de los márgenes netos y el aumento de su media (Cardellino y Baethgen, 2000). Esto puede deberse, tanto por aumentos en los rendimientos, y su estabilidad interanual, como por mejoras en la calidad del producto, lo cual reduce la brecha productiva y posibilita el acceso a mejores precios y mercados. Sin embargo, no siempre resulta posible su implementación, ya sea por factores económicos, de gestión o por razones físicas derivadas de la respuesta de la especie a la presente tecnología.

Es así que, la tecnología de riego puede ser analizada simultáneamente como una inversión, un seguro y/o como parte de un paquete tecnológico. En el primer caso, si el riego se considera como una inversión de mediano y largo plazo, su valoración se considera como un factor más en la ecuación financiera de la empresa y su rentabilidad. Para ello, se toma en cuenta su flujo de fondos futuros actualizado, de forma de estimar el tiempo de amortización de su inversión inicial y evaluar su rentabilidad futura, tanto si su inversión es realizada con fondos propios como de terceros. A su vez, se compara dicha rentabilidad estimada con el costo de oportunidad o tasa de retorno requerida si dicha inversión la realizara en otro activo o bien de capital.

Sin embargo, lo usual es que al momento de plantearse realizar una inver-

sión, no se tenga conocimiento cierto de todas las variables involucradas. Entre ellas se encuentran los costos futuros del capital, las materias primas, los precios de venta de los productos, etc. Es así que siempre nos encontramos en un contexto de incertidumbre. Existen algunas formas de reducir la incertidumbre, en la actividad agropecuaria es posible encontrar al riego como una de ellas.

«Seleccionar productos con baja variabilidad, el uso de planes formales de seguro, contratos a futuro y la selección de procesos productivos estables (con riego) son métodos que permiten reducir la incertidumbre o resultados desfavorables; considerar la flexibilidad y liquidez como mecanismos para prepararse ante cambios e incertidumbre» (Heady, 1952).

El riego como seguro reduce la incertidumbre, acortando la variabilidad de los resultados económicos. A través de su implementación se intenta mitigar el riesgo de déficit hídrico, frente a la incertidumbre acerca de la disponibilidad de agua, en ocasión de la aleatoriedad en la distribución de las lluvias a lo largo del año. Es así que podemos comparar la posibilidad de regar con la opción de contratar un seguro. Finalmente, si el riego se considera como parte de un paquete tecnológico, este potencia los otros factores productivos al eliminar la restricción del recurso agua.

De todas formas, el resultado económico dependerá de un análisis preciso de las soluciones técnicas apropiadas a cada situación de producción, en relación a las inversiones en fuentes de agua, distribución y equipos de bombeo, fuentes energéticas y métodos de aplicación de agua (Giménez y Mosco, 1996).

En el marco de la ejecución del proyecto: «Respuesta física y económica al riego suplementario en cultivos y pasturas y desarrollo de la tecnología de riego por superficie en siembra directa», financiado por los FPTA de INIA, una de las áreas de trabajo refiere a la generación de conocimiento desde el enfoque económico. Esta área intenta efectuar aportes a la producción nacional, mediante la generación de información económica que contribuya a la toma de decisiones, con el fin de aumentar la adopción de tecnologías de riego suplementario en cultivos y pasturas en sistemas agrícolas y agrícolas-forrajeros.

Dicho proyecto tiene como objetivo general aumentar significativamente la productividad y estabilidad de los rendimientos de los cultivos de verano y pasturas a través de la adopción de riego suplementario en sistemas agrícolas y agrícolas-forrajeros del Litoral y de las nuevas zonas de expansión agrícola.

El trabajo se desarrolla a lo largo de 5 capítulos: el primero consiste en la introducción a la temática, objetivos y el marco de construcción del presente documento. Como segundo punto se plantea el diseño metodológico, dónde se detalla las técnicas que se utilizaron a lo largo del trabajo, así como las diversas fuentes de información. Posteriormente, se profundiza en los resultados de la investigación y las conclusiones, para finalizar con la bibliografía consultada.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada en esta área, es netamente con enfoque cuantitativo, básicamente utilizando planillas de cálculo, construidas en base a fuentes de información primaria a partir de los datos obtenidos a lo largo del proyecto a nivel experimental, y fuentes secundarias. En cuanto a las segundas se utilizó los Anuarios y Encuestas Agrícolas del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP), mediante las cuales fue posible generar un marco de la situación nacional para el análisis de la información arrojada por el proyecto. En el caso de los costos de los equipos de riego se trabajó con información de expertos calificados.

Esta publicación resume parte de los trabajos que se realizaron a lo largo del proyecto, a partir de los resultados obtenidos para cada tratamiento aplicados a diferentes cultivos y pasturas durante tres años, 2009 a 2011. Asimismo se incluyeron datos de cobertura nacional de los últimos 12 años; estos últimos se integran en ésta área con el fin de otorgar un marco de referencia nacional a los rendimientos obtenidos a nivel experimental.

Entre las principales variables a considerar se analizan los rendimientos para cada cultivo, a lo largo de los tres años, según los diversos tratamientos. A su vez, se identifican series con precios de mercado de los tres cultivos de referencia (maíz, sorgo, y soja), así como costos de algunos sistemas de riego, particularmente los más utilizados para estos cultivos como son: el riego por superficie y con pivote.

En función de los datos físicos obtenidos en los ensayos de respuesta al riego suplementario y deficitario tanto en cultivos como en pasturas se evaluaron diferentes tecnologías de riego, comparando la opción con y sin riego. A su vez, considerando precios y costos comerciales se analizaron los resultados económicos de la aplicación de diferentes estrategias de riego suplementario y deficitario a los cultivos y especies forrajeras en estudio.

RESULTADOS

Evaluación de rendimientos

Para evaluar los rendimientos de los cultivos y especies forrajeras, se efectuó una comparación en dos niveles, el primero resulta de anteponer los tratamientos para cada especie forrajera, donde dado el alto cumulo de lluvias sufrido durante el primer año los tratamientos en seco, y de riego en ciertos momentos específicos, particularmente en soja y sorgo, tuvieron importantes inconvenientes para la cuantificación de los resultados.

Sin embargo, a pesar de este inconveniente, es posible observar diferencias entre tratamientos para cada cultivo, donde el tratamiento de riego en todo el ciclo (T1) es el que en todos los casos obtiene

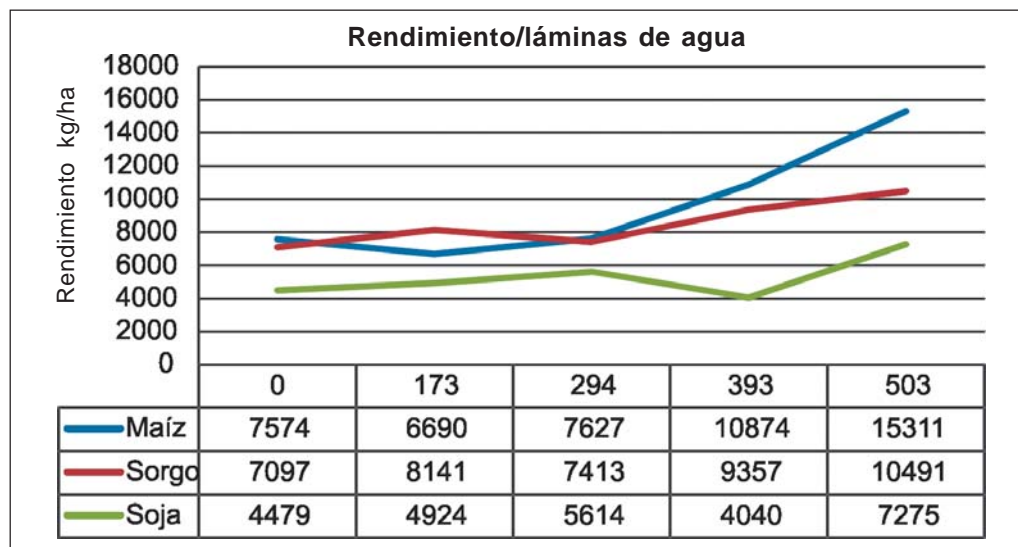


Figura 1. Rendimientos de maíz, sorgo y soja para los 5 tratamientos en función del agua aplicada, expresados en kg/ha. Zafra 2010/11.

mejores rendimientos. Sin embargo si comparamos entre cultivos, la soja es la que presenta diferencias más reducidas entre tratamientos año a año y a su vez una menor respuesta al riego, (Figura 1).

El segundo nivel de comparación resulta de analizar los rendimientos de cada cultivo con los resultados obtenidos a nivel nacional. En este último caso, en los tres cultivos, para todos los tratamientos se aprecia importantes diferencias con el promedio nacional, donde los primeros arrojan guarismos que triplican,

o cuadruplican la media nacional en las tres zafras¹, tal y como puede apreciarse en los siguientes gráficos, (Figuras 2 a 4).

Respecto a las forrajeras, se aprecia importantes diferencias entre las especies involucradas en el experimento, durante los dos años de ejecución del proyecto. En el caso de Pennisetum purpureum (Pp) es la que presenta una mayor producción y por tanto un mejor diferencial en el rendimiento bajo regadío, alcanzando alrededor de 8 ton/ha más que el seco, durante el primer año. Mien-

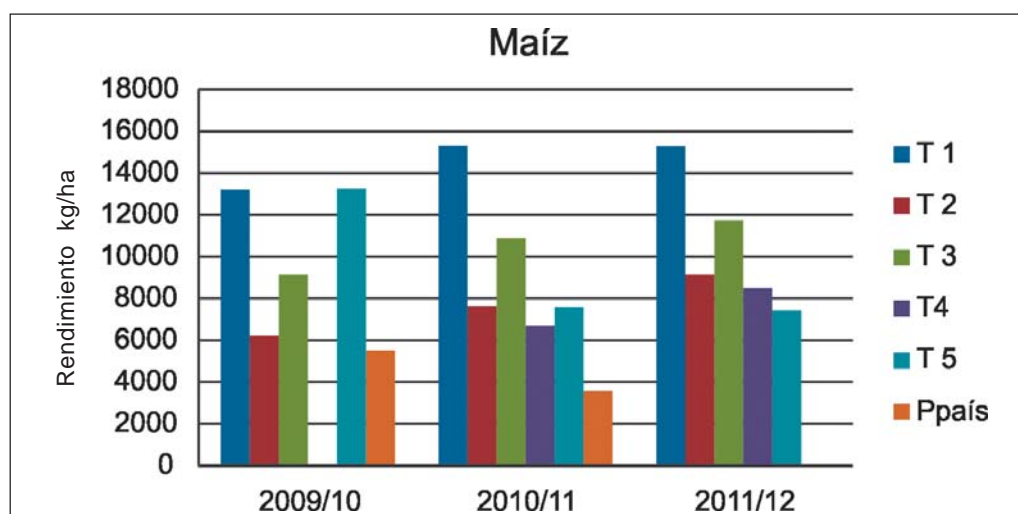


Figura 2. Rendimiento de maíz para los 5 tratamientos y promedio nacional para las zafras 2009/10, 2010/11 y 2011/12, expresados en kg/ha.

¹ Lamentablemente no se cuenta con información oficial sobre los promedios nacionales de la última zafra 2011/12.

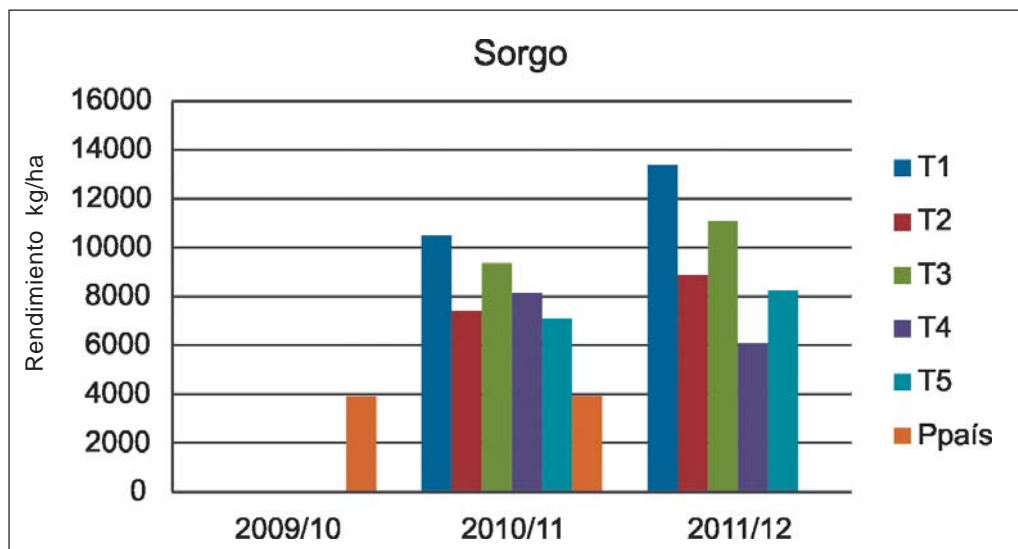


Figura 3. Rendimiento de sorgo para los 5 tratamientos y promedio nacional para las zafras 2009/10, 2010/11 y 2011/12, expresados en kg/ha.

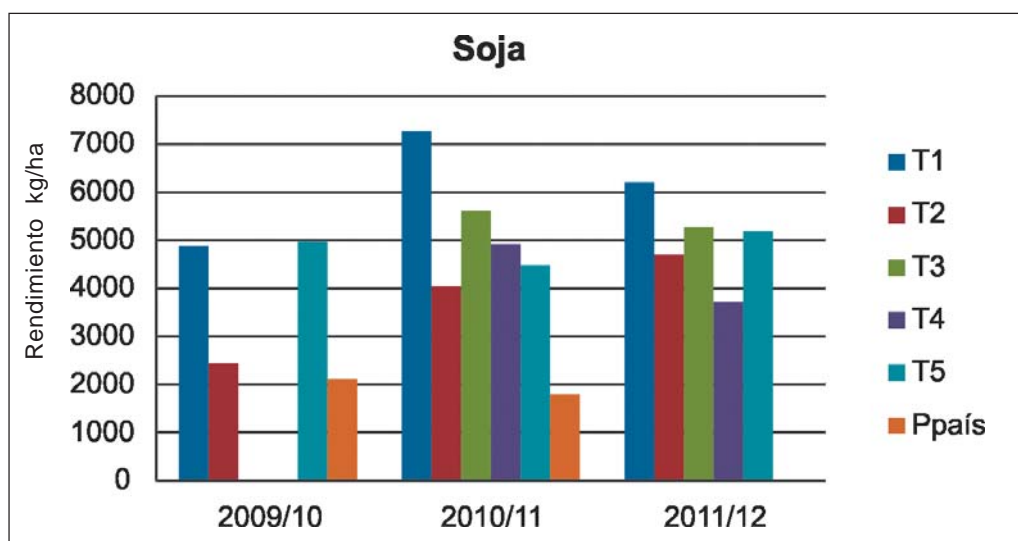


Figura 4. Rendimiento de soja para los 5 tratamientos y promedio nacional para las zafras 2009/10, 2010/11 y 2011/12, expresados en kg/ha.

tras que las especies *Paspalum dilatatum* (Pd) y *Paspalum notatum* (Pn) muestran rendimientos ampliamente menores, siendo la *Festuca arundinacea* (Fa) la que presenta una menor respuesta al riego.

Los rendimientos obtenidos con Pp en secano representan más de 3 veces los máximos obtenidos en las especies Pn, Pd y más de 5 en *Festuca*. Estas diferencias entre especies con diversos tratamientos de irrigación amerita la reflexión sobre la incorporación de la tecnología de riego en los sistemas de producción ganaderos, ya que los rendi-

mientos en algunas especies con riego presentan valores por encima de los habituales en secano, lo cual impacta directamente en la rentabilidad del negocio ganadero. Sin embargo, debe considerarse la diversidad en las respuestas de cada especie a la tecnología implementada y los tratamientos efectuados a la hora de incorporar esta tecnología.

El siguiente cuadro muestra los rendimientos de materia seca de las especies evaluadas, con dos tratamientos de riego al 100 y 50 por ciento de la ETo y el secano, (Cuadro 1).

Cuadro 1. Producción de materia seca de lámina + tallo de: Pp, Pn, Pd, Fa para el año 1 (zafra 2010/2011) y 2 (zafra 2011/2012), expresados en kg/ha.

Nivel de agua	Pp	Pn	Pd	Fa	Media
Año 1: Ciclo 2010 – 2011					
100 % Eto	29979	9652	11091	2374	13274
50 % Eto	27000	9253	8288	1149	11423
Secano	22054	8402	9176	328	9990
Comparativo 100 %/secano	7925	1250	1915	2046	3284
Media	26344	9103	9518	1284	
Año 2: Ciclo 2011 – 2012					
100 % Eto	10518	4968	4058	3333	5818
50 % Eto	11167	5881	4024	2200	5719
Secano	9217	4229	5019	377	4710
Comparativo 100 %/secano	1301	739	-961	2956	1108
Media	10300	5026	4367	1970	

Costos y márgenes

En cuanto a los costos se comparan dos sistemas de riego, riego por aspersión mediante la tecnología de pivote central y riego por superficie bajo la modalidad de surcos. Ambos diseños de equipos utilizados para efectuar el análisis comparativo considera una superficie a regar de 100 ha. con una jornada de riego de 20 horas diarias.

El pivote central es fijo con toma sobre canal, y presenta las siguientes características: radio estructural de 564 m, lamina de aplicación de 6,5 mm, caudal de 324 m³/hora, presión 3,5 bar y potencia 30 Hp. Mientras que el riego por superficie se efectúa mediante surcos con tubería colapsable con compuertas, las cuales son fijas en todas las cabeceras. Los surcos son de 120 m de largo con una separación entre surcos de 1.30 m.

En el primer caso, se plantean algunas variantes asociadas al uso de diferentes fuentes de energía (motor eléctrico o gas oil), así como la distancia de la toma de agua (0 o 846mts), mientras que para el riego por superficie se plantean tres tipos de energías: gravedad, motor eléctrico o gas oil. El Cuadro 2 presenta información de costos asociados a la inversión inicial² (equipos y bombas),

costos operativos básicamente energía y mano de obra para cada sistema, costos de los cultivos y tierra, todos expresados en dólares por hectárea.

Comparando las inversiones iniciales para cada sistema, se aprecia una importante diferencia de costos entre ambos sistemas, siendo el pivote el que requiere mayor inversión por hectárea, aunque permite lograr la automatización del riego, lo cual resulta una ventaja muy importante a tener en cuenta. Por su parte, en cuanto a los costos operativos los equipos que utilizan gas oil para el bombeo del agua, son los que tendrán mayores costos por mm aplicado de agua, siendo el sistema de riego por gravedad el de menor costo, ya que no genera costos por concepto de consumo de energía (Cuadro 2).

Posteriormente se efectuaron cálculos de márgenes para todos los tratamientos, considerando los precios de mercado de cada cultivo y sus respectivos rendimientos para la zafra 2010/2011, así como las láminas aplicadas en cada tratamiento durante dicha zafra. Esta zafra se consideró como base para la comparación, ya que se contaba con todos los datos necesarios para el cálculo, y a su vez en el caso de la zafra anterior las lluvias fueron 5 veces supe-

²No se incluyen costos asociados a la fuente de agua.

Cuadro 2. Inversión inicial y costos operativos de riego con pivote y por superficie expresados en U\$/ha. Zafra 2010-11.

Inversión Inicial (U\$/ha)*	
Sistema	Costo
PIVOTE (0) Electrobomba	1420
PIVOTE (0) Motobomba	1530
PIVOTE (846) Electrobomba	1720
PIVOTE (846) Motobomba	1820
SUPERFICIE (gravedad)	355
SUPERFICIE EB	625
SUPERFICIE MB	515
Costos Operativos (U\$/mm aplicado)**	
Sistema	Costo
PIVOTE Electrobomba	0.23
PIVOTE Motobomba	1.37
SUPERFICIE (gravedad)	0
SUPERFICIE Electrobomba	0.06
SUPERFICIE Motobomba	0.34
Otros Costos (U\$/ha)	
Cultivos	Costo
Maíz	737
Sorgo	669
Soja	497
Tierra	306

* La inversión inicial incluye equipo y bomba. No incluye fuente de agua.

**Los costos operativos incluyen los conceptos de energía y mano de obra.

riores al promedio, por tanto fue un año Niño muy atípico.

En la presente zafra se aplicaron láminas brutas de 500 mm de agua en maíz, 400 mm en sorgo y 450 mm en soja para el tratamiento de riego en todo el ciclo, las cuales se utilizaron como dato para el cálculo de los costos operativos para el riego por aspersión. Asimismo, dado que el riego por superficie implica una aplicación de agua superior, se consideró una eficiencia del 50 %, con lo cual se consideraron las siguientes láminas, para todo el ciclo según cada cultivo:

Maíz: Lámina Neta 375 mm. Lámina Bruta 750 mm.

Sorgo: Lámina Neta 300 mm. Lámina Bruta 600 mm.

Soja: Lámina Neta 325 mm. Lámina Bruta 650 mm.

Si comparamos los márgenes entre la opción con y sin riego, tomando como tratamientos el primero como la opción con riego y como «sin» los valores promedio nacionales, en virtud de que los valores obtenidos por el tratamiento en secano (T5) superan ampliamente la media nacional de los últimos años, siendo no acorde con la realidad de los tres cultivos. Los márgenes con riego superan al tratamiento sin riego, en los tres cultivos, solo en el caso del uso de pivote en sorgo el secano supera al riego dado el peso de la inversión inicial. Sin embargo, esta diferencia a favor del riego presenta una mayor amplitud para el caso del maíz, donde para la opción de regar por pivote, el margen supera en 1350 dólares por hectárea al tratamiento sin riego utilizando electrobomba y la mitad con motobomba. Mientras que en el caso

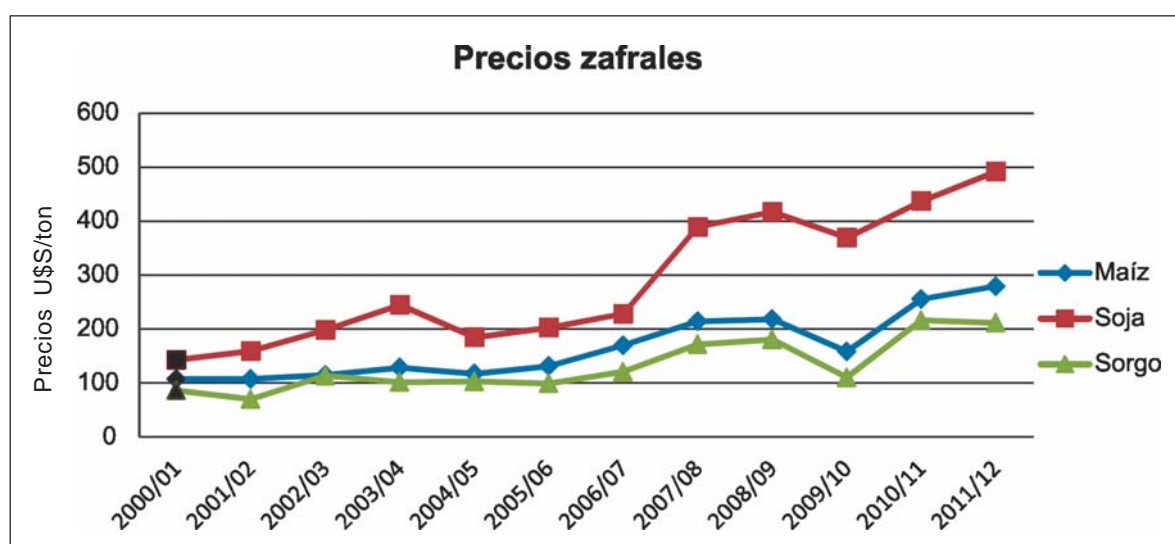
Cuadro 3. Márgenes de los tres cultivos según tratamiento y tipo de riego, expresado en U\$/ha. Zafra 2010/11.

Cultivo	Sin Riego	Con Riego				Gravedad
		Pivote		Superficie		
		Electrobomba	Motobomba	Electrobomba	Motobomba	
Maíz						
T 1	-	1225	542	2040	1939	2355
Ppaís ³	-	132	-	-	-	-
Sorgo						
T 1	-	-303	-875	508	448	815
Ppaís	-	126	-	-	-	-
Soja						
T 1	-	1075	468	1887	1814	2196
Ppaís	284	-	-	-	-	-

del sorgo ambos tratamientos arrojan pérdida, siendo el secano el de menor impacto, con una pérdida que apenas supera los 100 dólares por hectárea y en soja el margen presenta importantes diferencias a favor del riego, donde la electrobomba duplica el margen frente a la motobomba, (Cuadro 3).

Tanto los márgenes en maíz como en soja presentan diferentes causas, en el primero tiene una importante incidencia la respuesta del cultivo al riego, superándola ampliamente frente a los otros dos cultivos y así mismo en secano. Mientras

que en el caso de la soja el precio de mercado marca la pauta, con un incremento constante en los últimos 12 años (Figura 5), por tanto la respuesta del cultivo a la tecnología de riego y su precio de mercado históricamente son variables fundamentales para la toma de decisiones. En el caso del sorgo, se juntan ambas fundamentaciones, tanto los bajos rendimientos como los menores precios inciden en la generación de márgenes no atractivos para inversión de la tecnología de riego en este cultivo.

**Figura 5.** Precios zafrales de maíz, soja y sorgo desde 2000/01 hasta 2011/12, expresados en U\$/ton.

³Refiere al promedio a nivel país.

Analizando los márgenes desde el punto de vista de las tecnologías de riego, las diferencias son importantes derivando en que para los pivotes los márgenes son bastante menores frente a la tecnología de riego por superficie, donde ésta última duplica o triplica, dependiendo de la energía y el cultivo, los márgenes de la aspersión. Siendo la opción de mayor margen, la adopción de la tecnología de surcos por gravedad, en vistas de que no existen costos derivados del uso de energía. Asimismo un factor diferencial a tener presente es este último, la energía, ya que las opciones a base de gasoil son las que presentan márgenes menores, en virtud del incremento de su precio durante los últimos años, a pesar de que las electrobombas implican una inversión inicial mayor.

CONCLUSIONES

Por tanto, efectuando un análisis comparativo entre tratamientos, se desprende que aquellos que plantean riego con déficit hídrico en algunas etapas del crecimiento de los cultivos, obtienen márgenes bastante menores al riego durante todo el ciclo, incluso algunos tratamientos presentan márgenes menores al secano.

Finalmente, el efecto de los rendimientos sobre los márgenes juega un papel muy relevante a la hora de evaluar la inversión en riego, y por ende la estrategia a seguir en esta tecnología es fundamental, siendo muy importante no solamente la elección del equipo a incorporar sino también la rutina de riego, considerando las particularidades del cultivo a regar, su respuesta al riego suplementario y la evolución de su precio de mercado en los últimos años.

BIBLIOGRAFÍA

- CARDELLINO, G.; BAETHGEN, W.** 2000. «Análisis de la viabilidad de sistemas de riego para maíz: estudio de casos y evaluación de estrategias». INIA La Estanzuela. Montevideo, Uruguay.
- FAVA, M.; FRACALANZA, P.; NUNES, A.** 2007. «Impacts of a liberalization in the USA market for frozen concentrated orange juice: why Florida's producers are so afraid?». *Rer.* Vol. 45, N° 04. Río de Janeiro, Brasil.
- GIMÉNEZ, L.; MOSCO, M.** 1996. «Riego en maíz: una alternativa a evaluar». *Revista Cangüé* N° 8. EEMAC, Universidad de la República. Paysandú, Uruguay.
- HEADY, E.O.** 1952. «Economics of agricultural production and resource use». Ed. Prentice hall, Englewood cliffs.
- MGAP-DIEA.** 2000-2011. «Anuarios Estadísticos Agropecuarios». Montevideo, Uruguay.
- MGAP-DIEA.** 2000-2011. «Encuestas Agrícolas». Montevideo, Uruguay.
- PASCALÉ, R.** 1999. «Decisiones financieras». 3ª edición. Buenos Aires, Argentina.
- PIEDRABUENA, L.; PIVEL, J.; SCARSI, C.** 2008. «El riego agrario en Uruguay: una aproximación económica a su desarrollo (1985-2005)». Monografía. Facultad de Ciencias Económicas y Administración, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay.
- RITSON, C.** 1977. «Agricultural economics: principles and policy». Ed. Westview Press, Boulder. Colorado, Estados Unidos.