

Respuesta del maíz y la soja a distintos niveles de riego suplementario en
un Vertisol de Entre Ríos

*Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires,
Área Producción Vegetal*

Héctor Rodríguez
Ingeniero Agrónomo
Universidad de Concepción del Uruguay - 2006

Lugar de trabajo:
Agencia de Extensión Rural INTA San salvador. Instituto Nacional de Tecnología
Agropecuaria. (EEA INTA Concepción del Uruguay)



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires



COMITÉ CONSEJERO

Consejero Principal de tesis

Juan José De Battista

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de La Plata)

Diplôme d'Etudes Approfondies en Production Végétale option: Systèmes de culture.

Institut National Agronomique Paris-Grignon. France.

Consejero

Julio Dardanelli

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Buenos Aires)

Magister Scientiae en Producción Vegetal (Universidad Nacional de Mar del Plata)

Consejero

José Andriani

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Buenos Aires)

Magister Scientiae en Producción Vegetal (Universidad Nacional de Mar del Plata)

JURADO DE TESIS

JURADO

Helena Rimski-Korsakov

Ingeniera Agrónoma (Universidad Nacional de Buenos Aires)

Doctora en Ciencias Agropecuarias (Universidad Nacional de Buenos Aires)

JURADO

Claudia Rosa Cecilia Vega

Ingeniera Agrónoma (Universidad Nacional de Tucumán)

Doctora, *Magister Scientiae* (Universidad de Mar del Plata)

JURADO

Marcelo Daniel Nosetto

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Buenos Aires)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad Nacional de Buenos Aires)

Fecha de defensa de la tesis: 17 de noviembre de 2017

DEDICATORIA

Dedicado a mi esposa Daiana y a mis dos hijos Melany y Luciano que me brindan su amor, quienes me apoyaron y acompañaron durante el transcurso de la Maestría aguardando mi llegada en cada jornada.

Dedicado a mis padres por su apoyo incondicional y su sacrificio y esfuerzo que me brindaron la posibilidad de estudiar esta profesión y me enseñaron los valores para conducirse en la vida.

AGRADECIMIENTOS

A Julio Dardanelli por sus aportes metodológicos y guía en el manejo del ensayo.

A Jose Andriani por sus aportes en las correcciones y los viajes para realizar las mediciones.

A Juanjo y Norma mis dos grandes maestros que me transmitieron sus conocimientos, el compromiso y la pasión por esta actividad y por sobre todas las cosas les agradezco por su amistad.

A un grupo de amigos que me ayudaron a procesar las muestras en cada jornada. Sin los cuales no hubiera podido realizar todas las mediciones A Marcelo, Mauro, Belén, Miriam, Gabriela.

Por ultimo, al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, “El INTA” por darme la posibilidad de capacitarme y financiar este proceso.

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución

Hector Rodriguez

DNI: 28073218

INDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
DECLARACIÓN.....	v
INDICE GENERAL.....	vi
INDICE DE TABLAS	ix
INDICE DE FIGURAS.....	xiv
ABREVIATURAS.....	xx
RESUMEN.....	xxi
ABSTRACT.....	xxii
<i>CAPITULO I: Introducción</i>	<i>1</i>
Sistema productivo	1
Características del suelo y su impacto sobre la disponibilidad de agua	2
Efecto del Estrés Hídrico sobre los cultivos	5
Hipótesis	8
Estructura de la tesis	9
<i>CAPITULO II. Materiales y Métodos</i>	<i>10</i>
1. Caracterización	10
<i>Ubicación y características del sitio experimental.....</i>	<i>10</i>
<i>Propiedades del suelo.....</i>	<i>11</i>
<i>Condiciones meteorológicas.....</i>	<i>12</i>
2. Tratamientos y diseño experimental.....	12
3. Manejo del cultivo	13
4. Mediciones.....	14
<i>Fenología.....</i>	<i>14</i>
5. Análisis estadístico	14
6. Condiciones del sitio de experimento.....	14
<i>Constantes Hídricas</i>	<i>14</i>
<i>Nivel de fertilidad del sitio experimental.....</i>	<i>16</i>
<i>Condiciones climáticas de las campañas durante el experimento</i>	<i>16</i>
<i>Desarrollo de los cultivos</i>	<i>21</i>
<i>Lámina de agua aplicada</i>	<i>22</i>
<i>CAPITULO III. Economía del Carbono. Impacto de la disponibilidad de agua</i>	<i>24</i>

Materiales y métodos.....	26
3.1 Determinaciones.....	26
<i>Biomasa aérea</i>	26
<i>Índice de área foliar</i>	26
<i>Intercepción de Radiación solar</i>	27
3.2 Variables calculadas.....	28
<i>Eficiencia del uso de la radiación</i>	28
<i>Rendimiento y componentes</i>	28
<i>Análisis estadístico</i>	29
Resultados.....	30
<i>Evolución del Índice de área foliar</i>	30
<i>Intercepción de radiación</i>	33
<i>Biomasa aérea acumulada</i>	37
<i>Eficiencia de uso de la radiación en maíz</i>	40
<i>Eficiencia de uso de la radiación en soja</i>	42
<i>Rendimiento y componentes</i>	43
<i>Asociación entre los componentes de rendimiento</i>	47
Discusión.....	49
<i>Producción de Biomasa</i>	50
<i>Eficiencia en el uso de radiación</i>	51
<i>Rendimiento y componentes del rendimiento</i>	54
<i>CAPITULO IV: Economía del agua. Disponibilidad de agua y su utilización</i>	57
Materiales y métodos.....	58
<i>Exploración radical</i>	58
<i>Agua en el suelo</i>	59
<i>Consumo de agua</i>	59
<i>Eficiencia del uso del agua</i>	60
<i>Agua útil</i>	61
<i>Umbral crítico de agua útil</i>	61
<i>Temperatura de la canopia</i>	62
<i>Índice de estrés</i>	62
<i>Análisis estadístico</i>	63
Resultados.....	64
<i>Perfil de raíces. Crecimiento del sistema radical</i>	64
<i>Evolución del agua útil</i>	68
<i>Características de extracción de agua del perfil</i>	70

<i>Consumo de agua</i>	71
<i>Evapotranspiración diaria</i>	75
<i>Eficiencia de uso del agua en maíz</i>	77
<i>Eficiencia de uso del agua en maíz corregida por DPV</i>	79
<i>Eficiencia del uso del agua en soja</i>	80
<i>Eficiencia de uso del agua en soja corregida por DPV</i>	82
<i>Limitación al crecimiento ante la disponibilidad de agua</i>	83
<i>Índice de estrés hídrico por temperatura de canopia</i>	88
<i>Discusión</i>	90
<i>Dinámica de agotamiento del agua. Limitación al crecimiento</i>	91
<i>Consumo de agua</i>	93
CAPITULO V. Conclusiones Generales	99
Hallazgos relevantes o implicancias de la tesis	106
Futuras Implicancias.....	107
CAPITULO VI: BIBLIOGRAFIA	108

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1. Balance hídrico climático calculado para el 50% de probabilidad de ocurrencia. Determinado para el periodo 1980-2011 con los registros de precipitación y ETp Penman obtenidos de la de la EEA INTA C. del Uruguay.	4
Tabla 2. 1. Constantes hídricas por horizonte expresadas como contenido de humedad gravimétrica. Determinaciones a campo y laboratorio.	15
Tabla 2. 2. Nivel inicial de nutrientes en el suelo del sitio de ensayo. Resultados del análisis de suelo.....	16
Tabla 2. 3. Distribución mensual de las precipitaciones durante las campañas 2010 y 2011 en Concepción del Uruguay, Entre Ríos.	19
Tabla 2. 4 . Suma térmica °Cd desde emergencia a diferentes estados fenológicos en maíz y soja.....	21
Tabla 2. 5. Láminas de riego aplicadas (mm) y proporción la ETp-pp cubierta, en cada tratamiento de riego durante las dos campañas.....	22
Tabla 2. 6. Distribución de las láminas de riego (mm) aplicadas en cada tratamiento desde la emergencia del cultivo de maíz en 2010 y 2011 agrupadas en periodos de 10 días.	23
Tabla 3. 1. Evolución del índice de área foliar en 2010 y 2011 en maíz y soja en distintos momentos expresado en tiempo térmico °Cd.	31
Tabla 3. 2. Evolución de la intercepción de radiación fotosintética activa en 2010 y 2011 en maíz y soja en distintos momentos expresado en tiempo térmico °Cd.	35
Tabla 3. 3. Análisis de varianza de la evolución de la biomasa aérea en 2010 y 2011 en maíz y soja en distintos momentos expresado en tiempo térmico °Cd.	38

Tabla 3. 4. Efecto del año y los tratamientos de riego en la Eficiencia de Uso de la Radiación (EUR) $g\ Mj^{-1}$, en el cultivo de maíz para los años 2010 y 2011 en distintos periodos del ciclo del cultivo: *E-R6* Emergencia-Madurez fisiológica. *E-R1* Emergencia -aparición de estigmas. *R1-R6* Aparición de estigmas-madurez fisiológica. *R1-R3* Aparición de estigmas-inicio de llenado de granos. *R3-R6* Inicio de llenado de granos- Madurez fisiológica. 40

Tabla 3. 5. Eficiencia de Uso de la Radiación (EUR; $g\ Mj^{-1}$), en el cultivo de maíz en distintos periodos del ciclo del cultivo: *E-R6* Emergencia-Madurez fisiológica. *E-R1* Emergencia -aparición de estigmas. *R1-R6* Aparición de estigmas-madurez fisiológica. *R1-R3* Aparición de estigmas-inicio de llenado de granos. 42

Tabla 3. 6. Efecto del año y los tratamientos de riego en la Eficiencia de Uso de la Radiación (EUR) $g\ Mj^{-1}$, en el cultivo de soja para los años 2010 y 2011 en distintos periodos del ciclo del cultivo: *E-R7* Emergencia-Madurez fisiológica. *E-R3* Emergencia –formación de vainas. *R3-R7* Formación de vainas-madurez fisiológica. *R3-R5* Formación de vainas-inicio de llenado de granos. *R5-R7* Inicio de llenado de granos- Madurez fisiológica. 43

Tabla 3. 7. Componentes de rendimiento de maíz. Medias de tratamientos de riego para 2010 y 2011. Número de granos m^{-2} (Nº Gr), peso de mil granos (PMG), Rendimiento m^{-2} (Rdt), número de espigas m^{-2} (Nº ESP), índice de cosecha (IC), índice de área foliar máximo (IAF max) y índice de área foliar final (IAF final). 45

Tabla 3. 8. Componentes de rendimiento de soja. Medias de tratamientos de riego para 2010 y 2011. Número de granos m^{-2} (Granos), peso de mil granos (PMG), Rendimiento m^{-2} (Rdt), número de vainas m^{-2} (Vainas), índice de cosecha (IC), índice de área foliar máximo (IAF max) y índice de área foliar final (IAF final). 46

- Tabla 4. 1. Análisis de varianza de la evolución de la consumo de agua acumulado en 2010 y 2011 en maíz y soja en distintos momentos expresado en tiempo térmico °Cd.....73
- Tabla 4. 2. Efecto del año y los tratamientos de riego en la eficiencia de uso del agua (EUA) g mm^{-1} , en el cultivo de maíz para los años 2010 y 2011 en distintos periodos del ciclo del cultivo: *E-R6* Emergencia-Madurez fisiológica. *E-R1* Emergencia-aparición de estigmas. *R1-R6* Aparición de estigmas-madurez fisiológica. *R1-R3* Aparición de estigmas-inicio de llenado de granos.78
- Tabla 4. 3. Eficiencia de uso del agua (EUA) g mm^{-1} , en el cultivo de maíz en distintos periodos del ciclo del cultivo: *E-R6* Emergencia-Madurez fisiológica. *E-R1* Emergencia -aparición de estigmas. *R1-R6* Aparición de estigmas-madurez fisiológica. *R1-R3* Aparición de estigmas-inicio de llenado de granos.79
- Tabla 4. 4. Efecto del año y los tratamientos de riego en la Eficiencia de uso del agua (EUA) g Kpa mm^{-1} , en el cultivo de maíz para los años 2010 y 2011 en distintos periodos del ciclo del cultivo: *E-R6* Emergencia-Madurez fisiológica. *E-R1* Emergencia -aparición de estigmas. *R1-R6* Aparición de estigmas-madurez fisiológica. *R1-R3* Aparición de estigmas-inicio de llenado de granos.80
- Tabla 4. 5. Eficiencia de uso del agua corregida por déficit de presión de vapor (EUAdpv) g Kpa mm^{-1} , en el cultivo de maíz en distintos periodos del ciclo del cultivo: *E-R6* Emergencia-Madurez fisiológica. *E-R1* Emergencia - aparición de estigmas. *R1-R6* Aparición de estigmas-madurez fisiológica. *R1-R3* Aparición de estigmas-inicio de llenado de granos.80
- Tabla 4. 6. Efecto del año y los tratamientos de riego en la Eficiencia de uso del agua (EUA) g mm^{-1} , en el cultivo de soja para los años 2010 y 2011 en distintos periodos del ciclo del cultivo: *E-R7* Emergencia-Madurez fisiológica. *E-R3*

Emergencia – formación de vainas. <i>R3-R7</i> Formación de vainas-madurez fisiológica. <i>R3-R5</i> Formación de vainas-inicio de llenado de granos.....	81
Tabla 4. 7. Eficiencia de uso del agua (EUA) g mm^{-1} , en el cultivo de soja en distintos periodos del ciclo del cultivo: <i>E-R7</i> Emergencia-Madurez fisiológica. <i>E-R3</i> Emergencia –formación de vainas. <i>R3-R7</i> Formación de vainas-madurez fisiológica. <i>R3-R5</i> Formación de vainas-inicio de llenado de granos.....	82
Tabla 4. 8. Efecto del año y los tratamientos de riego en la Eficiencia de uso del agua (EUA) g mm^{-1} , en el cultivo de soja para los años 2010 y 2011 en distintos periodos del ciclo del cultivo: <i>E-R7</i> Emergencia-Madurez fisiológica. <i>E-R3</i> Emergencia – formación de vainas. <i>R3-R7</i> Formación de vainas-madurez fisiológica. <i>R3-R5</i> Formación de vainas-inicio de llenado de granos.....	83
Tabla 4. 9. Eficiencia de uso del agua (EUA) g mm^{-1} , en el cultivo de maíz en distintos periodos del ciclo del cultivo: <i>E-R7</i> Emergencia-Madurez fisiológica. <i>E-R3</i> Emergencia – formación de vainas. <i>R3-R7</i> Formación de vainas-madurez fisiológica. <i>R3-R5</i> Formación de vainas-inicio de llenado de granos.....	83
Tabla 4. 10. Relación entre la acumulación de biomasa aérea del cultivo de maíz en los tratamientos secano, TR1, TR2 y TR3 y el contenido de agua útil en secano en los estratos de 30-100 cm (AU 30-100 cm) y 0-200 cm de profundidad (AU 0-200 cm) en cada momento de muestreo para los años 2010 y 2011.....	85
Tabla 4. 11. Reducción de la acumulación de materia seca y la proporción de agua útil de 30-100 cm y 0-200 cm de profundidad en soja presentada en secano en cada momento de muestreo para los años 2010 y 2011.	86
Tabla 4. 12. Contribución de los diferentes aportes de agua a la evapotranspiración y al balance hídrico del suelo en maíz y soja.....	87

Tabla 4. 13. Evaluación del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) en maíz y soja según los distintos tratamientos de riego en diferentes momentos. Datos del año 2011.....	88
--	----

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1: Ubicación de los departamentos que forman parte de la región centro este de la provincia de Entre Ríos	1
Figura 1. 2: Probabilidad acumulada en función del rendimiento logrado en los departamentos con predominancia de suelos vertisol (cuadrado) y departamentos con suelos molisol (rombo). a) maíz y b) soja. Elaborado en base a datos de SIBER durante la serie de años 1999-2012.....	4
Figura 1. 3: Probabilidad acumulada de ocurrencia de déficit hídrico entre septiembre y marzo en el centro este de Entre Ríos. Período 1980-2011. Balance hídrico climático = Precipitación – ETp Penman.....	5
Figura 2. 1: Constantes hídricas expresadas en contenido de humedad gravimétrica en los diferentes horizontes en determinaciones a campo y laboratorio.....	16
Figura 2. 2: Condiciones meteorológicas durante las campañas 2010 y 2011 comparadas con el promedio de 1968-2012. a) Temperatura media b) PAR Radiación fotosintéticamente activa incidente c) ETp Evapotranspiración potencial Penman-Monteith para los años 2010 y 2011 y Penman para el promedio histórico. d) DPV Déficit de presión de vapor diurno.....	18
Figura 2. 3: Evolución de las precipitaciones y el balance hídrico climático desde emergencia a madurez fisiológica de los cultivos de maíz y soja. Precipitación acumulada en mm (línea roja) y precipitación efectiva acumulada (línea azul) para el año 2010 a) y 2011 b). Déficit hídrico acumulado entre ETp y precipitación (gris) y ETp y precipitación efectiva (negro) para el año 2010 c) y 2011 d). Balance hídrico decádico con precipitación efectiva para el año para el año 2010 e) y 2011 f).....	20

- Figura 3. 1: Evolución de Índice de área foliar en función del tiempo térmico desde emergencia hasta 15 días antes de madurez fisiológica para el año 2010 (izquierda) y 2011(derecha). Línea llena (soja) y línea punteada (maíz), para los tratamientos secano (rombo azul), TR1 (cuadrado violeta), TR2 (triangulo rojo) y TR3 (círculo verde). Los asteriscos (*) indican diferencias significativas ($<p 0,05$) entre los tratamientos..... 32
- Figura 3. 2: Evolución de la conformación del Índice de área foliar en número de hojas m^{-2} y área foliar promedio por hoja funcional en función del tiempo térmico desde emergencia a 15 días antes de madurez fisiológica para el año 2010 (izquierda) y 2011(derecha). Línea llena (soja) y línea punteada (maíz), para los tratamientos secano (rombo azul), TR1 (cuadrado violeta), TR2 (triangulo rojo) y TR3 (circulo verde)..... 34
- Figura 3. 3: Evolución de la Intercepción de radiación en función del tiempo térmico desde emergencia para el año 2010 (izquierda) y 2011(derecha). Línea llena (soja) y línea punteada (maíz), para los tratamientos secano (rombo azul), TR1 (cuadrado violeta), TR2 (triangulo rojo) y TR3 (circulo verde). Los asteriscos (*) indican diferencias significativas ($<p 0,05$) entre los tratamientos..... 36
- Figura 3. 4: Evolución de la biomasa aérea acumulada en los tratamientos de riego para maíz y soja en tiempo térmico. Símbolos llenos (soja) símbolos vacíos (maíz); secano (rombo azul), TR1 (cuadrado violeta), TR2 (triangulo rojo) y TR3 (circulo verde)..... 39
- Figura 3. 5: Relación entre rendimiento y número de granos. Soja (rombo azul), Maíz (cuadrado rojo) en el año 2010 (izquierda) y 2011(derecha). En soja el ($Rendimiento = 93,9 + 0,12 *N^{\circ} granos m^{-2}$) en 2010 y ($117,4 + 0,14 *N^{\circ} granos$

m^{-2}) en 2011. En maíz el ($Rendimiento = -293,9 + 0,45 * N^{\circ} \text{ granos } m^{-2}$) en 2010 y ($-855,1 + 0,51 * N^{\circ} \text{ granos } m^{-2}$) en 2011.44

Figura 3. 6: Relación entre número de granos y peso de granos para Soja (rombo azul), Maíz (cuadrado rojo) en el año 2010 (izquierda) y 2011(derecha). En soja el ($Peso \text{ de mil granos} = 203,2 - 0,02 * N^{\circ} \text{ granos } m^{-2}$) en 2010 y ($221,5 - 0,01 * N^{\circ} \text{ granos } m^{-2}$) en 2011. En maíz el ($Peso \text{ de mil granos} = 166,6 + 0,048 * N^{\circ} \text{ granos } m^{-2}$) en 2010 y ($35,1 + 0,06 * N^{\circ} \text{ granos } m^{-2}$) en 2011.47

Figura 3. 7: Relación entre el número de granos m^{-2} y la tasa de crecimiento por planta $g \text{ pl } d^{-1}$ (TCP) y la tasa de crecimiento del cultivo m^{-2} (TCC) de maíz durante el periodo crítico, 15d antes de R1 y 15 d después. $N^{\circ} \text{ granos} = 175 + 683 * TCP$ en 2010 y $1996 + 470 * TCP$ en 2011. $N^{\circ} \text{ granos} = 175 + 97 * TCC$ en 2010 y $1996 + 67 * TCC$ en 2011. 2010 en verde y 2011 en rojo.48

Figura 3. 8: Relación entre el número de granos m^{-2} y la tasa de crecimiento del cultivo de soja durante el periodo crítico R3-R6 en los dos años de ensayo 2010 y 2011. $N^{\circ} \text{ granos} = -658 + 182 * TCC$. 2010 en verde y 2011 en rojo.48

Figura 4. 1 Mapa de distribución de raíces del cultivo de soja y maíz en la condición de secano y riego en el año 2010 y 2011, hasta los 2 m de profundidad. Datos tomados en una superficie de 70 cm que incluyeron 2 líneas de cultivo consecutivas. Escala de grises indica grado de abundancia de raíces.65

Figura 4. 2: Perfil de raíces del cultivo de soja y maíz y porcentaje de colonización y profundización dividido en estratos de 10cm en la condición de secano y riego en el año 2010. secano (barra roja) y riego (barra azul). Datos tomados en un ancho de 70 cm incluyendo 2 líneas de cultivo consecutivas.66

Figura 4. 3: Perfil de raíces del cultivo de soja y maíz en el año 2011. Porcentaje de colonización y profundización dividido en estratos de 10cm en la condición de

- secano y riego. seco (barra roja) y riego (barra azul). Datos tomados en un ancho 70 cm que incluyendo 2 líneas de cultivo consecutivas.....67
- Figura 4. 4: Evolución del agua útil en los tratamientos de riego para maíz en tiempo térmico, en los años 2010 y 2011. Agua útil de 0-100 cm de profundidad y contenido de agua útil de 0-200 cm de profundidad para los tratamientos seco (rombo azul), TR1 (cuadrado violeta), TR2 (triángulo rojo) y TR3 (círculo verde).69
- Figura 4. 5: Evolución del agua útil en los tratamientos de riego para soja en tiempo térmico para los años 2010 y 2011. Agua útil de 0-100 cm de profundidad y agua útil de 0-200 cm de profundidad para los tratamientos seco (rombo azul), TR1 (cuadrado violeta), TR2 (triángulo rojo) y TR3 (círculo verde). 70
- Figura 4. 6: Agotamiento del agua útil del perfil del suelo para 0-200 cm de profundidad en maíz (línea punteada) y soja (línea llena) en los años 2010 y 2011. Tratamientos seco (azul), TR3 (verde). El agua útil inicial de cada año se indica en línea punteada negra. 71
- Figura 4. 7: Relación entre evapotranspiración y lámina de riego aportada en maíz y soja en los dos años de ensayo. Cuadrados (soja), círculos (maíz) 2010 en verde y 2011 en rojo. 72
- Figura 4. 8: Evolución del consumo de agua en los tratamientos de riego en maíz y soja en función del tiempo térmico desde emergencia para el año 2010 (izquierda) y 2011(derecha). Línea llena (soja) y línea punteada (maíz), para los tratamientos seco (rombo azul), TR1 (cuadrado violeta), TR2 (triángulo rojo) y TR3 (círculo verde). Los asteriscos (*) indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos. 75

- Figura 4. 9: Evolución de la evapotranspiración diaria en mm en los tratamientos de riego para maíz y soja en función del tiempo térmico desde emergencia a madurez fisiológica. a (maíz 2010), b (soja 2010), c (maíz 2011) y d (soja 2011). Línea negra indican ETp Penman –Monteith. Línea llena (soja) y línea punteada (maíz), para los tratamientos secano (rombo azul), TR1 (cuadrado violeta), TR2 (triángulo rojo) y TR3 (circulo verde). 76
- Figura 4. 10: Evolución del Kc calculado con ETp Penman- Monteith y Evaporación Tanque A en los tratamientos de riego para maíz y soja a lo largo del cultivo expresado en tiempo térmico °Cd. a (2010) y b (2011). 77
- Figura 4. 11: Evolución del Kc medio calculado con ETp Penman- Monteith durante los dos años de ensayo para maíz y soja en tiempo térmico. Línea verde (soja) y línea roja (maíz). 77
- Figura 4. 12: Umbral crítico de agua en el suelo para el cultivo de maíz. Relación entre crecimiento relativo y la proporción de agua útil del perfil del suelo de 30 -100 cm de profundidad para los años 2010 y 2011. símbolos vacíos valores del año 2010 que no fueron incluidos en el ajuste. 85
- Figura 4. 13: Umbral crítico de agua en el suelo para el cultivo de soja. Relación entre crecimiento relativo del cultivo de soja y la proporción de agua útil del perfil del suelo para el estrato 30 -100 cm de profundidad para el año 2010 y 2011. símbolos vacíos valores del año 2010 que no fueron incluidos en el ajuste. 86
- Figura 4. 14: Relación entre Tasa de Crecimiento del Cultivo (TCC) por unidad de tiempo térmico en ($\text{g m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{Cd}$) y el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) en de maíz cultivado bajo diferentes tratamientos de riego para el año 2011. círculos (muestreo 935°Cd). rombos (muestreo 1137°Cd). $TCC = 2,23 - 2,70 * CWSI$ ($p < 0,0001$). 89

Figura 4. 15: Relación entre Tasa de Crecimiento del Cultivo (TCC) por unidad de tiempo térmico en ($\text{g m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{Cd}$) y el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) en de soja cultivado bajo diferentes tratamientos de riego para el año 2011. círculos (muestreo 935°Cd). rombos (muestreo 1137°Cd). $TCC = 1,16 - 0,91 * CWSI$ ($p < 0,0001$). 90

Figura 5. 1: Esquema de principales resultados hallados en este estudio por efecto del riego sobre de la disponibilidad de agua y su impacto en el crecimiento y partición de la biomasa. Respuestas generales esperadas (línea negra) y respuestas particulares o específicas en maíz (línea roja) y en soja (línea verde) y las interrelación entre la economía de carbono (Capítulo III) y economía del agua (Capítulo IV). 99

Figura 5. 2: Relación entre eficiencia del uso del Agua (EUA) y Eficiencia del uso de la Radicación (EUR) desde emergencia a madurez fisiológica. A) maíz ; b) soja. Tratamientos secano (rombo), TR1 (cuadrado), TR2 (triángulo) y TR3 (círculo); Símbolos llenos (2010) y símbolos abiertos (2011). 106

ABREVIATURAS

AU: Agua útil

CC: Capacidad de Campo

PMP: Punto de Marchitez Permanente

L sup: Límite superior de contenido de agua útil

L inf: Límite inferior de contenido de agua útil

ETp: Evapotranspiración potencial de referencia

ETc: Evapotranspiración del cultivo

pp: Precipitación

CN: Curva número

DPV: Déficit de presión de vapor

Kc: Coeficiente de cultivo

CWSI: Índice de Estrés Hídrico del Cultivo

EUA: Eficiencia del Uso del Agua

EUA_{dpv}: Eficiencia del uso del agua corregida por déficit de presión de vapor

EUR: Eficiencia de Uso de la Radiación

IAF: Índice de área foliar

PAR: Radiación fotosintéticamente activa

IC: Índice de cosecha

TCC: Tasa de crecimiento del cultivo

TCP: Tasa de crecimiento por planta

PC: Período crítico

UE: Unidad experimental

TR1: Tratamiento de riego 25% ETp-pp

TR2: Tratamiento de riego 50% ETp-pp

TR3: Tratamiento de riego sin restricción hídrica

Resumen

En Entre Ríos, la agricultura avanzó hacia zonas con suelos vertisoles en los que los cultivos con frecuencia presentan estrés hídrico que ocasiona pérdidas de rendimiento. Los objetivos del trabajo fueron determinar el consumo de agua, las eficiencias del uso de agua (EUA) y de la radiación solar (EUR), el crecimiento y generación del rendimiento, el umbral de agua útil y caracterizar el efecto del riego sobre la extracción de agua en maíz y soja ante diferentes láminas de riego. Se condujeron ensayos con cuatro niveles de riego: para cubrir el déficit hídrico en 0%, 25%, 50% y sin restricción hídrica (Secano, TR1, TR2 y TR3). La evapotranspiración lograda en secano no superó los 339 mm y 357 mm en maíz en soja, mientras que en TR3 alcanzó los 565 mm y 617 mm respectivamente. La disponibilidad hídrica afectó más a EUR que a EUA. La EUA aumentó en maíz pero no en soja. La EUR varió en los rangos de 2,07 g.Mj⁻¹ a 3,29 g.Mj⁻¹ en maíz y de 1,03 g.Mj⁻¹ a 1,49 g.Mj⁻¹ en soja. En TR3, la EUA fue de 4,56 g.mm⁻¹ en maíz y 2,37 g.mm⁻¹ en soja. La reducción en la EUR y la EUA se produjo en la etapa reproductiva. En maíz se asoció a la duración del área foliar, mientras que en soja al menor crecimiento. El riego generó altos rendimientos (1552 g.m⁻² y 743 g.m⁻² en maíz y soja) al superar el umbral de agua útil, de 0,50 en soja y 0,40 en maíz. El riego aumentó la abundancia de raíces, sin afectar la profundización. Este trabajo contribuye a explicar cómo el riego suplementario permite alcanzar altos rendimientos en un vertisol de Entre Ríos aún cuando la oferta hídrica de las precipitaciones pareciera ser suficiente.

Palabras Clave: Eficiencia del uso del agua, eficiencia del uso de radiación, raíces, umbral agua útil, rendimiento, maíz, soja.

Abstract

In Entre Rios province, agriculture expanded to areas with vertisols soils where crops often have water stress and yield losses. The objectives of this study were i) to assess water consumption, water and radiation use efficiencies (WUE, RUE), growth and yield generation of maize and soybean crops grown at different irrigation levels, ii) to define the threshold of usable water and iii) to characterize the effect of irrigation on water extraction. Experiments consisted in four irrigation levels: to cover the water deficit in 0%, 25%, 50% and without water restriction (rainfed, TR1, TR2 and TR3). In rainfed crops, evapotranspiration did not exceed 339 mm in maize and 357 mm in soybean, while it reached 565 mm and 617 mm in TR3, respectively. Water availability modified RUE more than WUE; WUE increased in maize but it did change in soybean. RUE ranged between 2,07 g.Mj⁻¹ - 3,29 g.Mj⁻¹ in maize and between 1,03 g.Mj⁻¹ - 1,49 g.Mj⁻¹ in soybean. In TR3 WUE was 4,56 g.mm⁻¹ in maize and 2,37 g.mm⁻¹ in soybean. The efficiencies reduction occurred in the reproductive stage. In maize, they were associated to low leaf area duration, while in soybean with less growth. Irrigation induced high yields (1552 g.m⁻² and 743 g.m⁻² for maize and soybean, respectively) when it exceeded the available water threshold of 0.50 in soybean and 0.40 in maize. Irrigation increased roots abundance but did not affect roots depth. This work contributes to explain how supplemental irrigation can increase maize and soybean yields in vertisol soils of Entre Rios province even when water supply by rainfalls seems to be enough.

Key words: water use efficiency, radiation use efficiency, roots, threshold water value, grain yield, maize, soybean.

CAPITULO I: Introducción

Sistema productivo

En la provincia de Entre Ríos, los sistemas productivos se han modificado profundamente ante el avance de la agricultura a partir del 2000. La superficie agrícola sembrada por oleaginosas y cereales se ha duplicado pasando de 1.16 millón de has en 1999/00 a 2.01 millones en 2010/11 (SIBER, 2012). Este incremento en el área sembrada fue acompañado de la intensificación en la secuencia de cultivos, resultando la superficie realmente ocupada de 1,71 millón de has en la campaña 2010/11. Al mismo tiempo, en los departamentos Uruguay, Villaguay, San Salvador y Colón que conforman la región centro-este de la provincia (Figura 1.1), con una extensión territorial de 1.646.400 has, el área agrícola se cuadruplicó, pasando de 132.200 has en 1999/00 a 477.500 has sembradas en la campaña 2010/11 (SIBER, 2012).

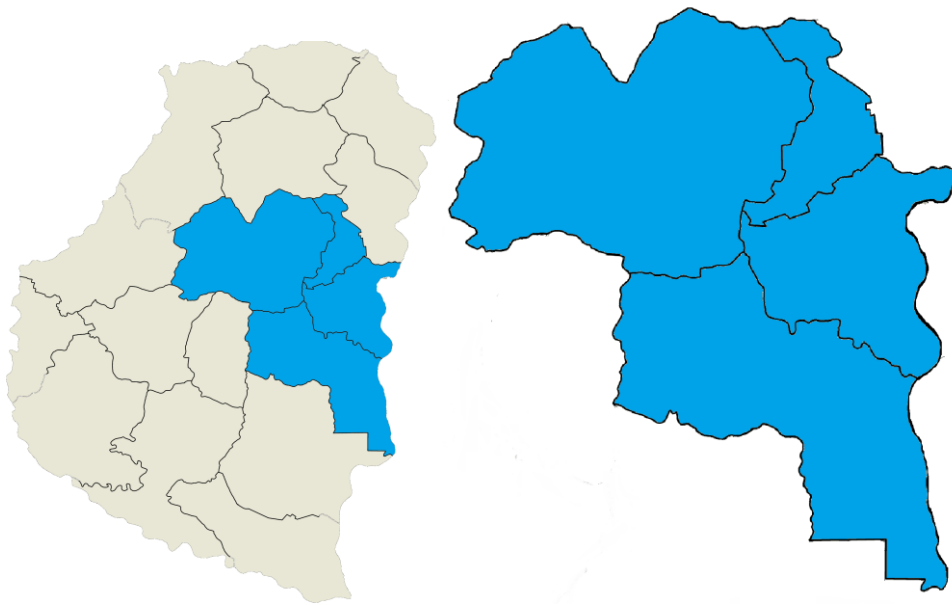


Figura 1. 1: Ubicación de los departamentos que forman parte de la región centro este de la provincia de Entre Ríos

La expansión de la agricultura en Entre Ríos se produjo hacia estas zonas de menor aptitud agrícola, desplazando a la ganadería (Engler *et al.*, 2007), al igual que al sistema productivo predominante (ganadero-agrícola-arrocero). En la región centro-este, la productividad de los cultivos es limitada debido a la ocurrencia de períodos de estrés hídrico que experimentan los cultivos por efecto del déficit hídrico del balance climático y las características de los suelos con limitaciones que restringen la elección de cultivos (Tasi y Bedendo, 2001). Sin embargo, en esta zona la producción de arroz es posible gracias a la disponibilidad de altos volúmenes de agua de riego con caudales medios de $360 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ proveniente de pozos profundos (Engler *et al.*, 2007), sumado a las características de los suelos vertisoles que permiten esta práctica.

Características del suelo y su impacto sobre la disponibilidad de agua

Los suelos vertisoles y molisoles vérticos, ocupan el 70% de la superficie de la región centro-este. Se encuentran localizados en peniplanicies onduladas a suavemente onduladas. Presentan alta erodabilidad según el paisaje donde se encuentran debido a la baja velocidad de infiltración (Beney *et al.*, 1976).

La textura del horizonte superficial de las series de suelo predominantes en la región es franco arcillo limosa con un contenido medio de 33% de arcilla. Los horizontes subsuperficiales B y C presentan una textura arcillo-limosa con 44 % arcilla (Plan mapa de suelos 1999; 2000; 2002; 2003). La fracción arcilla está compuesta por una mezcla de illita y montmorillonita. Este último tipo de arcilla le confiere al suelo la propiedad de expandirse y contraerse al variar el contenido de humedad edáfica, generando así, grietas a bajos contenidos de agua mientras que altos tenores de humedad provocan la expansión de las partículas disminuyendo el espacio poroso, afectando la tasa de infiltración y el movimiento de aire y agua.

El alto porcentaje de arcilla que presentan los vertisoles afecta drásticamente la tasa de infiltración ante cambios en el contenido de humedad del suelo. Las tasas de infiltración de este tipo de suelos, en seco, cuando están agrietados, son altas y se hacen muy bajas cuando se hinchan con tasas iniciales y finales de 96 y 2 mm h⁻¹, respectivamente (Unger, 1982; Kinderknecht *et al.*, 2004). Estos procesos reducen la precipitación efectiva debido a la limitada capacidad de captar o incorporar agua en el perfil del suelo, además de generar erosión.

Por otra parte, la velocidad de crecimiento de raíces se ve afectada por el tipo de suelo. En suelos sin limitaciones, de textura franca, éstas crecen con mayor velocidad que en los suelos de texturas más finas (Dardanelli *et al.*, 2003b). En el caso de los vertisoles, la expansión y contracción afectan el normal crecimiento de raíces. Cuando los horizontes argílicos se desecan, inducen a las raíces a crecer por las grietas y tienden a distribuirse de manera desuniforme (Dardanelli *et al.*, 2003a). El crecimiento agrupado de las raíces por las grietas genera señales que reducen la tasa crecimiento del sistema radical (Passioura, 2002). La distribución agrupada no permite ocupar completamente la capa de suelo (Dardanelli *et al.*, 2004), disminuyendo la disponibilidad de agua para la planta.

Las características del enraizamiento y la escasa capacidad de ceder agua de los vertisoles permiten suponer que los cultivos sufren estrés hídrico ante la ocurrencia de cortos períodos sin lluvias y con relativamente altos contenidos de agua útil. Un indicio de esta limitación se obtiene al comparar los rendimientos medios de soja y maíz obtenidos en los departamentos de la provincia donde predominan los vertisoles con aquellos con predominancia de molisoles en el período 2000-2011. En estos últimos los rendimientos son normalmente un 15-20% superiores, pero en años de marcado déficit hídrico esta diferencia es mayor, llegando a un 30-40% (SIBER, 2012) (Figura 1.2).

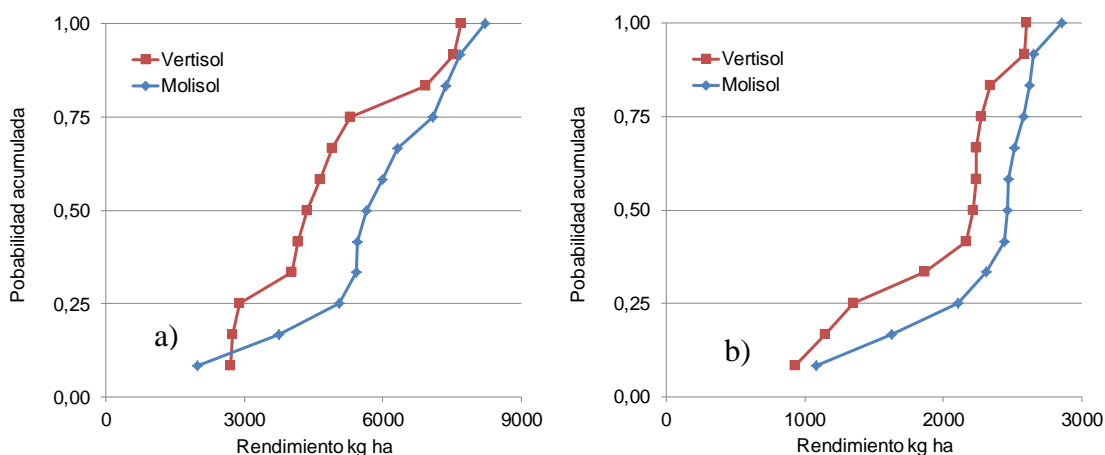


Figura 1. 2: Probabilidad acumulada en función del rendimiento logrado en los departamentos con predominancia de suelos vertisol (cuadrado) y departamentos con suelos molisol (rombo). a) maíz y b) soja. Elaborado en base a datos de SIBER durante la serie de años 1999-2012.

El balance hídrico climático es una forma de estimar la disponibilidad de agua para los cultivos. Si bien no es un cálculo preciso, ya que no contempla el escurrimiento ni el contenido de agua útil en el perfil del suelo, permite visualizar la ocurrencia de periodos de déficit hídrico durante el ciclo de crecimiento de los cultivos. Para el centro-este de Entre Ríos, el balance hídrico climático de septiembre a marzo (Tabla 1.1) muestra 230,1 mm de déficit con una probabilidad del 50 %, siendo diciembre y enero los meses de mayor déficit.

Tabla 1. 1. Balance hídrico climático calculado para el 50% de probabilidad de ocurrencia. Determinado para el periodo 1980-2011 con los registros de precipitación y ETp Penman obtenidos de la de la EEA INTA C. del Uruguay.

Meses	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Milímetros	-16,3	-20,4	-35,7	-58,6	-85,0	-35,3	-10,3

Considerando el balance hídrico climático de esta serie de años, la zona centro-este presenta una probabilidad de ocurrencia de algún déficit hídrico en la época estival durante el período de crecimiento de los cultivos en el 70% de los años, lo que provoca

mermas en los rendimientos e incluso pérdidas totales en los cultivos de maíz, soja y girasol en los años de marcado déficit (Figura 1.3).

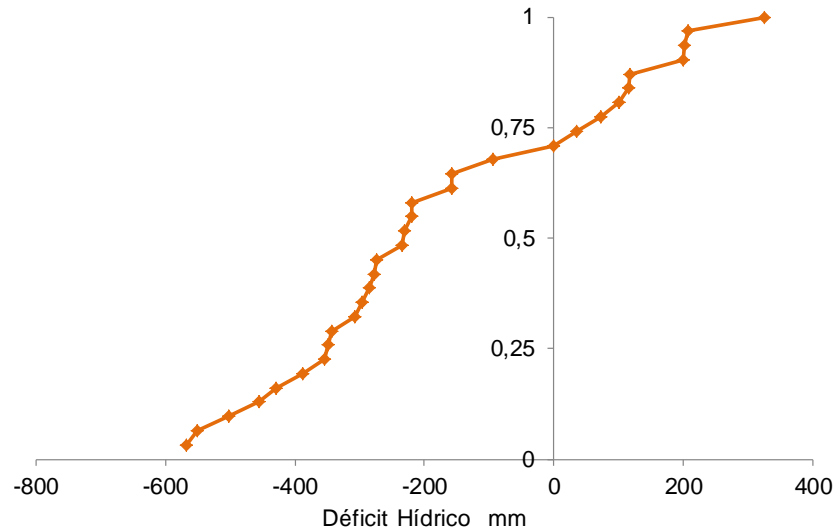


Figura 1. 3: Probabilidad acumulada de ocurrencia de déficit hídrico entre septiembre y marzo en el centro este de Entre Ríos. Período 1980-2011. Balance hídrico climático = Precipitación – ETp Penman.

Efecto del Estrés Hídrico sobre los cultivos

La principal limitante en la generación de rendimiento de los cultivos es la deficiencia de agua que ocasiona estrés hídrico; manifestándose síntomas de estrés cuando la evapotranspiración del cultivo es limitada por la oferta hídrica que no cubre la demanda (Dardanelli *et al.*, 2004). El consumo de agua por parte de los cultivos es afectado por numerosas variables de manejo, nutricionales y climáticas. Dentro de estas últimas, el déficit de presión de vapor interviene en el funcionamiento de los estomas controlando indirectamente la salida de vapor de agua y el ingreso de dióxido de carbono utilizado en la fotosíntesis, no solo afectando el consumo de agua sino también la eficiencia de uso del agua y radiación.

El estrés hídrico afecta el crecimiento y la producción, provocando disminución de la tasa de crecimiento, consecuencia de una menor tasa de expansión de las hojas y/o una

mayor senescencia foliar determinando una menor intercepción de la radiación solar (Dardanelli *et al.*, 2003b).

Durante el periodo crítico del cultivo, la tasa de crecimiento por planta es indicativa de la condición fisiológica de la misma y determina el número de granos fijados (Vega *et al.*, 2001a; Cárcova *et al.*, 2003; Egli, 2005). Si bien los cultivos tienen un período crítico donde se produce la mayor reducción del rendimiento, también la ocurrencia y duración de otros períodos de estrés en estados fenológicos previos o posteriores al crítico pueden afectar o incrementar la magnitud de las pérdidas (Payero *et al.*, 2006).

Las características del enraizamiento del maíz y la alta sensibilidad a déficit hídrico en el corto período crítico brindan una alta probabilidad de respuesta al riego suplementario. Por otro lado, la soja presenta mayor plasticidad al presentar un período crítico más extendido que abarca de los estadios de R4, plena formación de vainas hasta inicio de R6, máximo tamaño de semilla (Andriani *et al.*, 1991; Jiang y Egli, 1993), posibilitando la compensación del aborto de estructuras reproductivas por la fijación de nuevos frutos o mayor peso de granos (Andrade y Sadras, 2000).

Estos dos cultivos son trascendentes en la región uno por ser vital en la cadena avícola de la región y su aporte de materia orgánica al sistema y el otro por el impulsor de la economía ocupando más del 60% de la superficie agrícola.

Los rendimientos alcanzados en la región centro este de Entre Ríos, bajo condiciones de secano son en promedio 1996 kg ha⁻¹ en soja y 4950 kg ha⁻¹ en maíz (Figura 1.2). En suelos vertisoles de la zona bajo riego, se han registrado rendimientos de 4874 kg ha⁻¹ en soja (Rodríguez *et al.*, 2006) y 13500 kg ha⁻¹ en maíz (Pozzolo *et al.*, 1999). Por otra parte Aramburu Merlos *et al.* (2015) determinaron mediante simulación la brecha de rendimiento, entre el alcanzado en secano de 2300 -2700 kg ha⁻¹ en soja y 5100 -

6100 kg ha⁻¹ en maíz, y el rendimiento potencial sin restricción hídrica de 6500 kg ha⁻¹ en soja y 13500 kg ha⁻¹ en maíz, para suelos argiúdoles y vertisoles de Entre Ríos, similares a los de la zona de estudio.

La producción de granos en los suelos vertisoles de Entre Ríos manifiesta una gran variación interanual debido a la variable oferta hídrica y a las condiciones restrictivas para el movimiento del agua y la colonización por las raíces. La implementación de riego suplementario permitiría incrementar y estabilizar la producción pero se desconoce la respuesta al riego suplementario de maíz y soja en estos suelos.

El objetivo general de la tesis es profundizar el conocimiento de las relaciones hídricas suelo-planta en los vertisoles para contribuir a un uso eficiente de los recursos suelo y agua.

Los objetivos son:

- Determinar la respuesta del crecimiento, rendimiento y sus componentes en los cultivos de maíz y soja ante la aplicación de diferentes láminas de riego en un vertisol.
- Determinar el efecto de la disponibilidad de agua sobre la eficiencia de uso de la radiación solar.
- Determinar el consumo de agua de maíz y soja y caracterizar el efecto del riego sobre la extracción de agua del suelo por el maíz y la soja.
- Determinar el efecto del riego sobre la eficiencia de uso de agua, ante diferentes ofertas hídricas.
- Determinar el umbral de agua útil a partir del cual se restringe el crecimiento.

Hipótesis

- El crecimiento y rendimiento de maíz y soja en suelos vertisoles de Entre Ríos están limitados por la disponibilidad hídrica. La utilización de riego atenúa la restricción hídrica impuesta por la matriz del suelo y modifica la eficiencia de captura y utilización de la radiación, permitiendo incrementar la productividad.
- La utilización de riego incrementa la productividad de los cultivos de maíz y soja por aumento del consumo y la eficiencia de utilización del agua.
- El aporte de riego suplementario en un suelo vertisol afecta la dinámica de agotamiento del agua del suelo de manera diferente en maíz y soja.

Estructura de la tesis

El cuerpo de la presente tesis ha sido desarrollado en los siguientes capítulos: Capítulo 2: Materiales, métodos y caracterización de las condiciones ambientales, Capítulos 3 y 4 que corresponden a los resultados. En Capítulo 3 se abordará el efecto del aporte de riego sobre la economía del carbono y su impacto sobre la disponibilidad de agua. En el Capítulo 4, se presentará el efecto del aporte de riego sobre la economía del agua, disponibilidad de agua y su utilización. En el Capítulo 5 se presentaran las conclusiones generales.

CAPITULO II. Materiales y Métodos

1. Caracterización

Ubicación y características del sitio experimental

El ensayo se llevó a cabo sobre un suelo vertisol, Peluderte árgico serie Clara, ubicado en la Estación Experimental del INTA Concepción del Uruguay (32° 30' 15" S 58° 20' 39" W). El paisaje es suavemente ondulado, con pendientes de 1-2 %. La serie Clara se encuentra en crestas redondeadas y lomas altas. El clima es templado cálido con una temperatura media anual de 18°C y un promedio anual de precipitaciones de 1147,3 mm, donde la estación más lluviosa es el otoño.

Descripción del perfil de suelo de serie Clara (Hein y Purnell, 1974)

A₁₁: 0-15 cm, arcilloso, negro en húmedo.

A₁₂: 15-30 cm arcilloso, negro en húmedo.

B₂₁: 30-50 cm arcilloso, negro en húmedo, algunos slickensides (caras de fricción).

B₂₂: 50-70 cm arcilloso, pardo grisáceo en húmedo, muchos slickensides, escasas concreciones de calcio.

BC_{ca}: 70-100 cm arcilloso, pardo grisáceo en húmedo, concreciones de calcio, muchos slickensides.

C₁: 100-125 cm arcillo-limoso, mezcla de pardo y gris oscuro en húmedo, concreciones de calcio, slickensides, pH 8,4.

C₂: 125-200 cm arcillo-limoso, pardo en húmedo, concreciones de calcio, escasos slickensides.

Propiedades del suelo

Estado nutricional del suelo: se determinó mediante el muestreo del horizonte superficial (0-15 cm) y análisis de: fósforo disponible, pH, materia orgánica, y nitrógeno total. Para determinar N- NO₃ se extrajeron muestras hasta los 60 cm de profundidad (Tabla 2.2). Los métodos de laboratorio utilizados fueron:

- Fósforo disponible: Bray y Kurtz N°1 (Marbán y Ratto, 2005).
- Materia Orgánica: Walkley y Black, que determina carbono orgánico oxidable (Marbán y Ratto, 2005).
- Nitrógeno total por el método Kjeldahl (Marbán y Ratto, 2005).
- Nitratos: por destilación por arrastre de vapor de Bremner (Marbán y Ratto, 2005).
- pH: con potenciómetro con una relación 1:2,5 suelo: agua. (Marbán y Ratto, 2005).

La densidad aparente del suelo se determinó con el método de cilindro, con 3 repeticiones de cada horizonte hasta los 2 metros.

Las constantes hídricas se determinaron en el laboratorio de suelos de la EEA Paraná sobre muestras disturbadas y tamizadas. Se midió la retención de agua equivalente a capacidad de campo y punto de marchitez permanente de cada horizonte a tensiones de 0,33 y 15 atmósferas, respectivamente. El límite superior o capacidad de campo para cada horizonte también se determinó a campo en el sitio de ensayo en una superficie de 6m² que se inundó y mantuvo tapado con una cubierta plástica para evitar pérdidas por evaporación, hasta la estabilización del movimiento del agua por drenaje. El límite inferior, similar al punto de marchitez permanente, se estimó mediante la integración de valores de laboratorio de punto de marchitez permanente (- 15 atmósferas) y el menor

contenido de humedad promedio registrado en el ensayo. Las muestras de suelo de las determinaciones a campo, se secaron en estufa a 105°C durante 48 hs.

Condiciones meteorológicas

Los registros diarios de temperatura, heliofanía, humedad relativa, y velocidad de viento, utilizados para la estimación de la evapotranspiración potencial, así como las precipitaciones diarias, se tomaron del observatorio meteorológico de EEA INTA Concepción del Uruguay ubicado a 300 m del ensayo.

2. Tratamientos y diseño experimental

El diseño experimental utilizado fue de parcelas divididas en un arreglo en bloques para facilitar la implementación de los tratamientos de riego. El experimento constó con 3 bloques, donde la parcela principal fue el nivel de riego y la subparcela fue el cultivo: maíz y soja. Cada unidad experimental (subparcela) estuvo constituida por 12 líneas de cultivo a 0,525 m x 8 m de longitud.

El aporte de riego en cada tratamiento se realizó para cubrir la diferencia entre la evapotranspiración potencial (ETp) Penman-Monteith y la precipitación registrada en los últimos 10 días.

El sistema de riego utilizado fue riego por goteo y se realizó con cintas ubicadas al costado de cada surco. El momento y lámina de riego se decidió en base al seguimiento de evapotranspiración de potencial calculada con la fórmula de Penman-Monteith, a través del cálculo propuesto por Abatte (2004). El volumen aplicado de agua se controló a la salida de la fuente con un caudalímetro.

Se establecieron los siguientes tratamientos de riego:

- Secano

- TR1: Aporte del 25 % de la diferencia entre ETp y la precipitación.
- TR2: Aporte del 50 % de la diferencia entre ETp y la precipitación.
- TR3 sin restricción hídrica.

3. Manejo del cultivo

Los ensayos se llevaron a cabo durante las campañas 2010/11 y 2011/12. Las fechas de siembra fueron 19 de octubre y 3 de noviembre para maíz y soja en el 2010 respectivamente. La diferencia entre las fechas de siembra se debió a la necesidad de resembrar la soja, por daños causados por palomas. En 2011 la fecha de siembra fue el 27 de octubre para ambos cultivos. La densidad de siembra utilizada fue de 7 y 40 plantas m⁻² para maíz y soja, respectivamente, en surcos a 52,5 cm.

Los materiales utilizados fueron el híbrido simple de maíz DK 670 MGRR2, de ciclo semiprecoz y madurez relativa 117. El genotipo tiene espiga cilíndrica con 16 hileras, 42 granos por hilera y peso de mil granos promedio de 370 g. La variedad de soja utilizada fue TJ 2148, grupo de madurez 4,8, hábito de crecimiento indeterminado, 49 días a floración, 140 días a madurez fisiológica.

La fertilización se ajustó con el análisis de suelo para cubrir los requerimientos de fósforo y nitrógeno para altos rendimientos. Previo a la siembra se aplicó en las unidades experimentales destinadas al maíz 160 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico y 160 kg ha⁻¹ de superfosfato triple en las de soja. La aplicación de nitrógeno en maíz se realizó en forma de urea a razón de 200 kg ha⁻¹ en el estado fenológico de V4 y 200 kg ha⁻¹ en V7. En soja se realizó la aplicación de fertilizante foliar en el estado fenológico de R3.

Se realizaron controles de malezas, plagas y enfermedades para mantener el ensayo libre de adversidades.

4. Mediciones

Fenología

Se registraron los estados fenológicos desde emergencia a madurez fisiológica mediante observaciones semanales de cada parcela, en soja, con escala de Fehr y Caviness (1977) y en maíz con la escala de Ritchie y Hanway (1982). Se cuantificó la duración de los estadios fenológicos en tiempo térmico ($^{\circ}\text{C d}^{-1}$) utilizando una temperatura base de 8°C para maíz (Cárcova *et al.*, 2003), y soja. El tiempo térmico de los cultivos fue referido a partir de la emergencia de los mismos.

5. Análisis estadístico

En las variables que presentan evolución en el tiempo se realizó un análisis de medidas repetidas en el tiempo por medio de modelos lineales mixtos usando el software R project (R Core Team. 2013), para corregir la falta de homocedasticidad en algunos tratamientos (Di Rienzo, 2011).

El efecto de los tratamientos en las regresiones de eficiencias de uso del agua y radiación se evaluaron por medio de la utilización del análisis de regresiones con variables Dummy del paquete InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2016).

Se realizó el análisis de los años en conjunto y se calcularon los efectos principales de los tratamientos de riego y de cultivo y sus interacciones. Se abrió el análisis por año cuando se encontró efecto año en la variable de interés.

Las medias de los tratamientos se compararon mediante el test de comparación múltiple de medias de LSD Fisher ($p < 0,05$).

6. Condiciones del sitio de experimento

Constantes Hídricas

La capacidad de almacenaje de agua se evaluó por medio de mediciones a campo y laboratorio (Tabla 2.1) dado que los valores registrados a campo fueron inferiores a los

reportados por laboratorio. Esto se debió a que la determinación en laboratorio en olla de presión a -0,33 bar y -15 bar en suelos con altos contenidos de arcilla sobreestima el contenido de agua en ambos límites (Ratliff *et al.*, 1983; Oszust, 2010). Por tal motivo las constantes hídricas del sitio de ensayo fueron determinadas por medio de la integración de mediciones obtenidas a campo y en laboratorio (Figura 2.1).

Tabla 2. 1. Constantes hídricas por horizonte expresadas como contenido de humedad gravimétrica. Determinaciones a campo y laboratorio.

<i>Horizonte</i>	<i>Espesor</i> Cm	<i>Dap</i> [#] g cm ⁻³	<i>CC lab</i> [#] kg kg ⁻¹	<i>PMP lab</i> [#] kg kg ⁻¹	<i>L sup</i> [#] kg kg ⁻¹	<i>L inf</i> [#] kg kg ⁻¹	<i>AU</i> [#] mm
A11	0-15	1,16	0,366	0,228	0,332	0,216	20,09
A12	15-30	1,21	0,389	0,253	0,368	0,268	18,16
B21	30-50	1,19	0,493	0,322	0,385	0,262	29,28
B22	50-70	1,20	0,499	0,325	0,382	0,256	30,23
BC _{ca}	70-100	1,31	0,464	0,297	0,366	0,239	50,00
C1	100-125	1,37	0,456	0,294	0,343	0,218	42,76
C2	125-200	1,27	0,464	0,290	0,361	0,236	119,33

[#] *Dap* densidad aparente de cada horizonte *CC lab* y *PMP lab* corresponden a determinación en la laboratorio de capacidad de campo y punto de marchitez permanente a -33 bar y -15 bar. *Lsup* y *Linf* indican el límite superior y límite inferior determinaciones a campo. AU contenido de lámina de agua útil en cada horizonte.

Por lo tanto para determinar el límite superior de los horizontes, se tomaron los resultados de la medición de capacidad de campo en el sitio de ensayo, hasta los 125 cm, debido a que por debajo de esta profundidad no se logró el avance del frente de humedecimiento. Por debajo de los 125 cm se utilizaron los valores de laboratorio.

Para la determinación del límite inferior se tomaron los resultados obtenidos del menor contenido de humedad promedio registrado para cada profundidad en el tratamiento seco, en los 2 años de ensayo y corroborados con un ensayo de girasol ubicado a 30 m del mismo, tomando como referencia los valores de laboratorio en el perfil del suelo (Dardanelli, comunicación personal). De 0-20 cm se ajustó el contenido de humedad por las pérdidas por evaporación por debajo del límite inferior y por debajo de 150

cm por la menor extracción de agua por parte de los cultivos, debido a la insuficiente exploración por parte de las raíces (Dardanelli *et al.*, 2004).

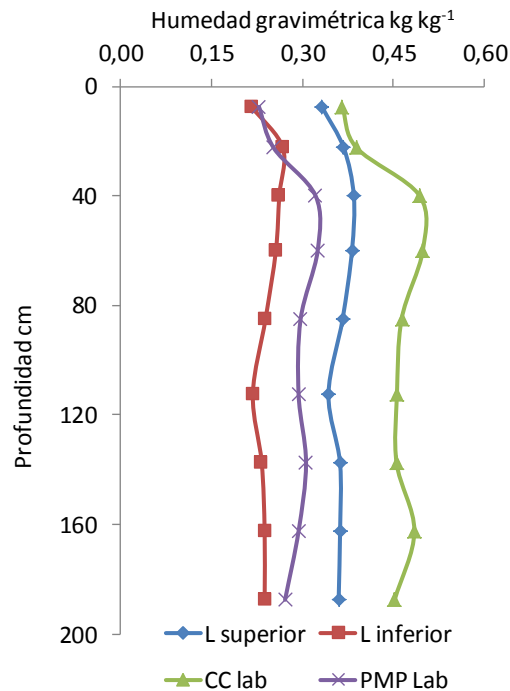


Figura 2. 1: Constantes hídricas expresadas en contenido de humedad gravimétrica en los diferentes horizontes en determinaciones a campo y laboratorio.

Nivel de fertilidad del sitio experimental

Tabla 2. 2. Nivel inicial de nutrientes en el suelo del sitio de ensayo. Resultados del análisis de suelo.

Horizonte	Espesor		%N [#] total	P [#] mg kg ⁻¹	pH [#]	N-NO ₃ [#] mg kg ⁻¹	N-NH ₄ [#] mg kg ⁻¹
	Cm	%MO [#]					
A11	0-15	4,45	0,235	6,7	5,68	9,97	5,48
A12	15-30	3,17	0,158	1,1	5,84	4,18	4,43

[#]%MO porcentaje de materia orgánica %N total porcentaje de nitrógeno total P fósforo disponible pH potencial hidrógeno del suelo N-NO₃ nitrógeno de nitratos N-NH₄ nitrógeno de amonio.

Condiciones climáticas de las campañas durante el experimento

Las temperaturas medias registradas durante los dos años de experimentos en el transcurso de los meses de octubre a marzo solo variaron en un 0,6% por encima y 12 % por debajo del promedio histórico de 25,03°C en el año 2010 y 2011, respectivamente.

Los días con temperaturas máximas superiores a 31°C fueron similares entre campañas

(56 y 57 para 2010 y 2011 respectivamente), pero el 2011 presentó 21 días con temperaturas superiores a 35°C mientras que 2010 solo 12 días (Figura 2.2a).

La radiación fotosintéticamente activa fue levemente superior al promedio histórico de 10,6 M J m⁻² día⁻¹. En ambos años la radiación recibida fue superior al promedio histórico en 6 % y 4 % para los años 2010 y 2011, respectivamente (Figura 2.2b).

La evapotranspiración diaria histórica (1968 a 2012) durante el periodo de octubre a marzo determinada por método Penman es de 4,74 mm día⁻¹. La evapotranspiración de referencia utilizada en las dos campañas fue Penman Monteith con una evapotranspiración media diaria de 4,9 mm día⁻¹ para ambas campañas, con máximos de 7,7 y 8,9 mm día⁻¹ para las campañas 2010 y 2011 respectivamente (Figura 2.2c). La evapotranspiración acumulada en el periodo de emergencia a madurez fisiológica durante el primer año fue de 731 mm y 713 mm en el cultivo de maíz y soja, respectivamente, 637 mm y 724 mm en el segundo año.

Las precipitaciones registradas durante ambos años difirieron con respecto al promedio histórico. Considerando el periodo del 1 de octubre al 30 de marzo, las precipitaciones registradas en el 2010 resultaron en 60 % de la precipitación promedio a diferencia del segundo año donde la lluvia fue un 4% superior al promedio (Tabla 2.3). En ambos años las precipitaciones se concentraron hacia el final del ciclo de los cultivos (Figura 2.3). Las precipitaciones registradas desde emergencia a madurez fisiológica de maíz y de soja fueron de 344-389 mm y 379-628 mm para los años 2010 y 2011, respectivamente.

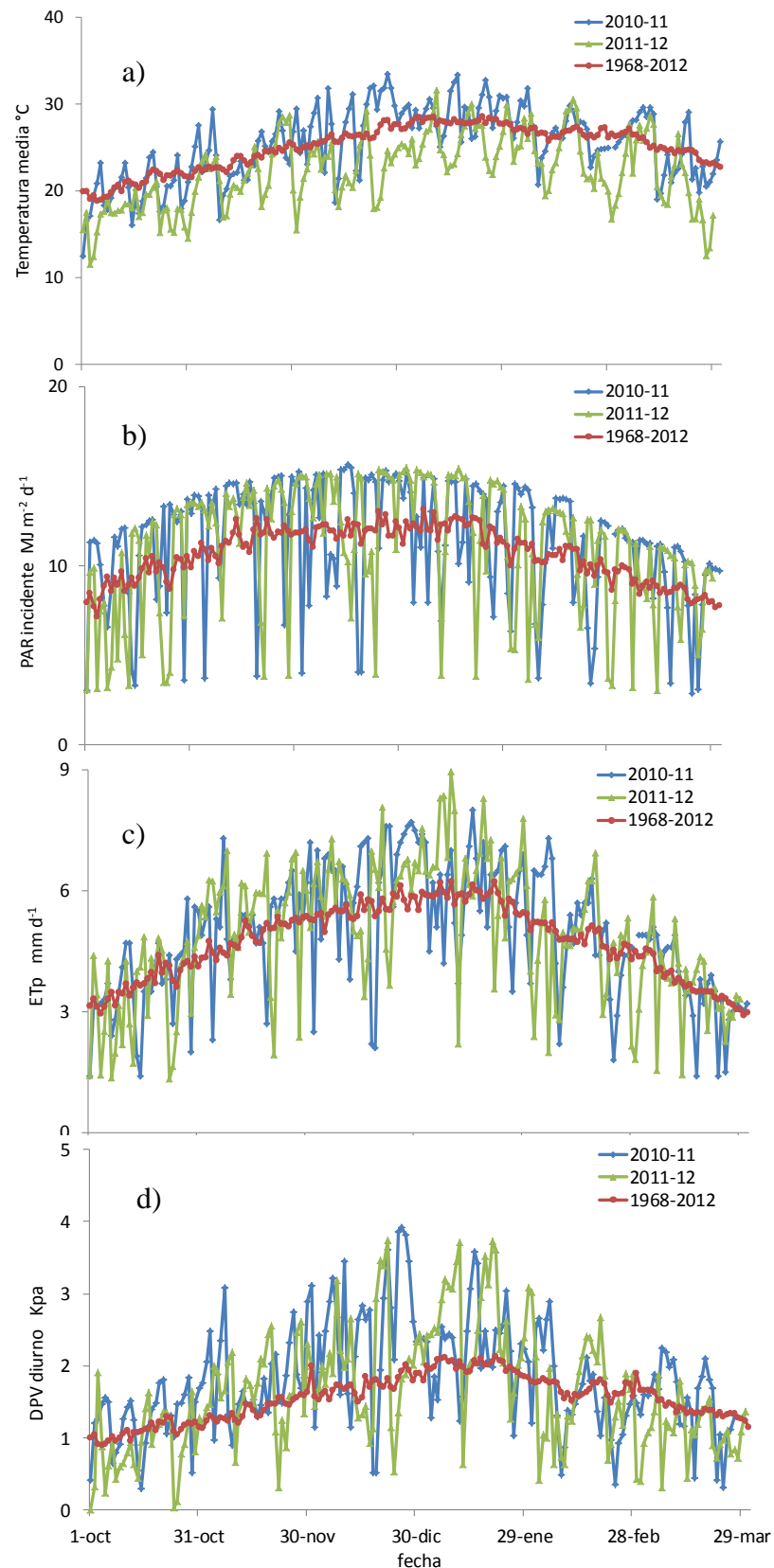


Figura 2. 2: Condiciones meteorológicas durante las campañas 2010 y 2011 comparadas con el promedio de 1968-2012. a) Temperatura media b) *PAR* Radiación fotosintéticamente activa incidente c) *ETp* Evapotranspiración potencial Penman-Monteith para los años 2010 y 2011 y Penman para el promedio histórico. d) *DPV* Déficit de presión de vapor diario.

En el mes de diciembre de ambos años se manifestó un marcado déficit de 159 mm en 2010 y 144 mm en 2011. La precipitación efectiva varió entre un 85 y 60% de la lluvia caída, utilizando para el cálculo el método de la curva número de CN II 85 para la condición de humedad antecedente dos. El método de la curva número se describe en materiales y métodos del capítulo IV.

El balance hídrico climático resultante de la demanda atmosférica ETp (Penman-Monteith) y las precipitaciones ocurridas de emergencia a madurez fisiológica presentaron un déficit de 339 y 324 mm durante el primer año en maíz y soja respectivamente. En el segundo año de ensayo el déficit fue menor con 257 y 95 mm en maíz y soja respectivamente. Sin embargo, el déficit hídrico ajustado por la precipitación efectiva, experimentado por los cultivos bajo la condición de secano, durante los dos años de experimentos fue mayor con 424 y 372 mm de déficit en 2010 en maíz y soja respectivamente y 318 y 314 mm en maíz y soja respectivamente en 2011 (Figura 2.3).

Tabla 2. 3. Distribución mensual de las precipitaciones durante las campañas 2010 y 2011 en Concepción del Uruguay, Entre Ríos.

<i>Campaña</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>total</i>
2010	46	19	32	96	177	55	424
2011	152	86	38	49	266	129	721
Promedio (1968 2012)	113	113	115	106	120	123	690

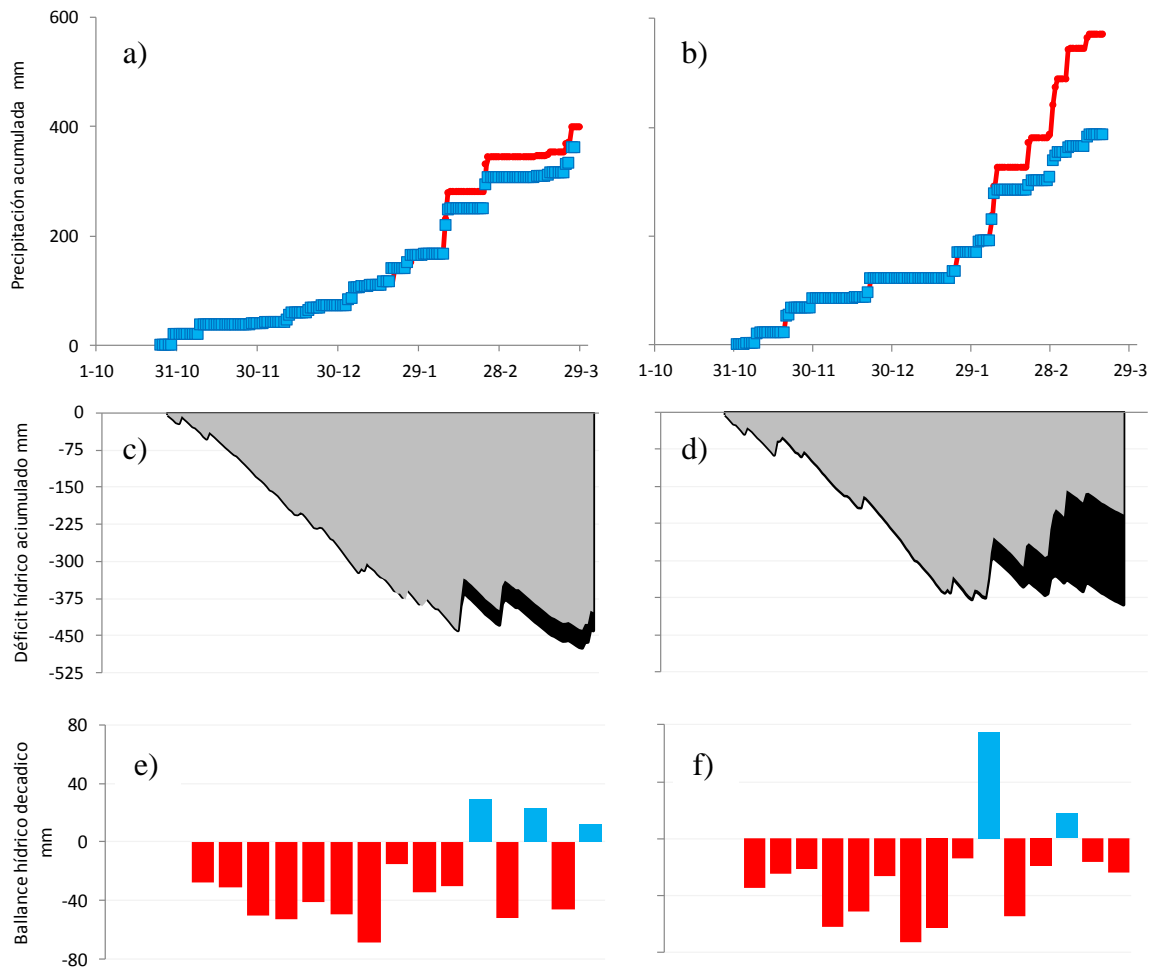


Figura 2. 3: Evolución de las precipitaciones y el balance hídrico climático desde emergencia a madurez fisiológica de los cultivos de maíz y soja. Precipitación acumulada en mm (línea roja) y precipitación efectiva acumulada (línea azul) para el año 2010 a) y 2011 b). Déficit hídrico acumulado entre ETp y precipitación (gris) y ETp y precipitación efectiva (negro) para el año 2010 c) y 2011 d). Balance hídrico decádico con precipitación efectiva para el año para el año 2010 e) y 2011 f).

El balance hídrico decádico, entre la evapotranspiración de referencia y la precipitación efectiva en secano, muestra que en ambos años los cultivos estuvieron sujetos a déficit hídrico y solo a partir del mes de febrero mejoraron las condiciones hídricas para el cultivo de maíz y soja (Figura 2.3).

Desarrollo de los cultivos

El primer año hubo problemas con la implantación de soja producto del daño por corte de plántulas y cotiledones ocasionado por palomas, obligando al resembrar 20 días más tarde y utilizar protección con redes. En el primer año, se tuvo que eliminar el tratamiento TR1 en soja, por presentar bajo stand de plantas en dos de sus repeticiones luego de la resiembra.

Debido al desfase de la fecha de siembra entre maíz y soja en el primer año y dado que en las dos campañas la fecha de siembra fue similar se utilizó como escala de tiempo el tiempo térmico, considerando despreciable el efecto del fotoperiodo sobre la fenología del cultivar de soja. La duración del ciclo desde emergencia a madurez fisiológica en soja fue de 137 y 135 días y en maíz 127 y 123 días para los años 2010 y 2011, respectivamente. Expresados en tiempo térmico, el cultivar de soja presentó un ciclo 192 °Cd más largo que el híbrido de maíz (Tabla 2.4).

El cultivar de soja presentó una mayor duración de la etapa emergencia–R3 en el primer año con respecto al segundo; en maíz hubo poca variación en la duración de los estados fenológicos en ambos años.

Tabla 2. 4 . Suma térmica °Cd desde emergencia a diferentes estados fenológicos en maíz y soja.

<i>Campaña</i>	<i>Soja</i>				<i>Maíz</i>		
	<i>R2</i>	<i>R3</i>	<i>R5</i>	<i>R7</i>	<i>R1</i>	<i>R2</i>	<i>R6</i>
2010	710	993	1469	2121	850	1003	1935
2011	600	806	1285	2116	801	1025	1918
%CV	11,9	14,7	9,4	0,2	4,2	1,5	0,6

Estados fenológicos determinados en soja con escala de Fehr y Caviness (1977) y en maíz con la escala de Ritchie y Hanway (1982). La fecha de siembra de maíz y soja en 2010 fue el 19/10 y 03/11 respectivamente. En 2011 la fecha de siembra de maíz y soja fue el 27/10.

Lámina de agua aplicada

El agua útil almacenada en el suelo hasta los 2 metros de profundidad al momento de la emergencia de los cultivos fue 198 y 178 mm, lo cual representa el 64 y 58% del agua útil total del suelo para las campañas 2010 y 2011, respectivamente.

El riego se comenzó luego de que los cultivos se implantaron: en el primer año, el 3 de diciembre a los días 40 días de la emergencia del maíz y a los 23 días de la emergencia de soja. En el segundo año, se inició el 1 de diciembre a los 28 y 30 días de la emergencia de soja y maíz, respectivamente. Las láminas de riego aplicadas fueron contrastantes entre tratamientos, en ambos años generando condiciones hídricas diferentes (Tabla 2.5). En la Tabla 2.6 se presenta la distribución de las láminas de riego aplicadas en cada tratamiento durante el 2010 y 2011.

Tabla 2. 5. Láminas de riego aplicadas y proporción la ETp-pp cubierta, en cada tratamiento de riego durante las dos campañas.

<i>Campaña</i>		<i>TR1</i>	<i>TR2</i>	<i>TR3</i>
2010	Riego aplicado mm	44	87	189
	% ETp-pp	18	34	75
2011	Riego aplicado mm	70	110	340
	% ETp-pp	30	52	156

% ***ETp-pp***. Porcentaje promedio de la diferencia entre evapotranspiración Penman-Monteith y las precipitaciones, cubierto por el aporte de riego.

El primer año, se presentaron algunas limitaciones operativas en la disponibilidad instantánea de agua para cubrir las demandas de cada tratamiento, por lo cual no se logró llegar a los niveles de riego establecidos por la diferencia entre ETp-pp de 25%, 50% y sin restricción hídrica, para TR1, TR2 y TR3, respectivamente, pero se lograron niveles de reposición de 18%, 34% y 75% (Tabla 2.5).

Tabla 2. 6. Distribución de las láminas de riego (mm) aplicadas en cada tratamiento desde la emergencia del cultivo de maíz en 2010 y 2011 agrupadas en periodos de 10 días.

Días desde Emergencia	2010			2011		
	TR1	TR2	TR3	TR1	TR2	TR3
10	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	12	14
50	4	8	18	14	36	38
60	6	12	28	7	25	20
70	7	17	41	20	7	110
80	11	24	41	30	30	128
90	6	9	23	-	-	30
100	12	14	36	-	-	-
110	-	-	-	-	-	-
120	-	-	-	-	-	-
130	-	-	-	-	-	-

En el segundo año se consiguió tener mayor capacidad operativa en el suministro de agua y se lograron alcanzar los niveles propuestos en los tratamientos. En el caso de TR3 se procedió a administrar agua periódicamente para asegurar que no existieran restricciones en algún periodo (Tabla 2.5)

CAPITULO III. Economía del Carbono. Impacto de la disponibilidad de agua

El proceso de generación y mantenimiento de estructuras vegetativas y reproductivas está ligado al intercambio neto de carbono resultante de la fotosíntesis y la respiración de mantenimiento y crecimiento y las diferencias entre los metabolismos C3 y C4. La economía de carbono a nivel de cultivo es a la vez es afectada por la restricción de recursos, por un lado la disponibilidad de agua, principal limitante de la generación de rendimiento (Nagore *et al.*, 2014) y la provisión de nutrientes (Mollier y Pellerin, 1999; Salvagiotti *et al.*, 2008). Donde el rendimiento depende de la cantidad de agua que logre evapotranspirar el cultivo; la eficiencia de uso del agua o biomasa producida por cada unidad de agua y la partición hacia granos o índice de cosecha, asociado a la disponibilidad de agua en la etapa reproductiva (Passioura, 1977).

Por otro lado, la generación de biomasa depende de la radiación interceptada, consecuencia del estado fisiológico de la planta que determina la captura y la eficiencia de uso de la radiación y su partición a los destinos. El estrés hídrico limita la captura de radiación al reducir la expansión foliar y disminuir la duración del canopeo. Bajo estrés hídrico se produce una menor tasa de expansión de las hojas y una mayor senescencia foliar (Dardanelli *et al.*, 2003b). El estrés hídrico en la planta provoca el cierre de estomas que resulta en pérdida de la eficiencia fotosintética del canopeo y por lo tanto disminución de la eficiencia de uso de la radiación (Monteith, 1972). La eficiencia de intercepción de la radiación, también es afectada por la provisión de nutrientes, principalmente nitrógeno.

En soja, la disminución del contenido de agua del suelo reduce primero la fijación de nitrógeno debido a su mayor sensibilidad, incluso antes que la reducción de la expansión foliar y el intercambio gaseoso (Sinclair, 1984; Racca, 1990). La fijación simbiótica disminuye bajo estrés hídrico debido a la sensibilidad de los transportadores

del nitrógeno, desde el nódulo al resto de la planta y esto provoca la acumulación de compuestos nitrogenados que afectan la actividad de fijación de nitrógeno atmosférico (Sinclair *et al.*, 2007).

La generación de rendimiento es afectada, por la ocurrencia y duración de períodos de estrés en estados fenológicos previos o posteriores al crítico que pueden afectar la acumulación de materia seca, sin modificar la partición hacia granos (Board *et al.*, 2005; Igbadun *et al.*, 2006).

En maíz, el periodo crítico (PC) es determinante del rendimiento por su elevada sensibilidad a los estreses y su corta duración, 227°Cd antes y 100 °Cd post floración femenina (Otegui y Andrade, 2000). Durante el PC, ocurre la liberación de polen, aparición de los estigmas, e inicio de llenado de granos (Cárcova *et al.*, 2000). La deficiencia hídrica provoca retrasos en la emergencia de estigmas y aborto de estructuras (Otegui *et al.*, 1995; Payero *et al.*, 2008 y El-Hendawy *et al.*, 2008). Durante el periodo crítico, la tasa de crecimiento por planta es indicativa de su condición fisiológica y determina el número de granos fijados (Vega *et al.*, 2001a; Cárcova *et al.*, 2003).

Las características del enraizamiento del maíz y la alta sensibilidad a déficit hídrico en el corto período crítico brindan una elevada probabilidad de respuesta al riego suplementario. Otegui (1992) señalan respuestas al riego de 20 kg ha⁻¹ por mm aplicado en ensayos realizados en el sudeste de Buenos Aires. En un suelo vertisol, Pozzolo *et al.* (1999) obtuvieron 13.500 kg ha⁻¹ con 80 mm de riego en una campaña con un balance hídrico positivo de 73 mm, lo que demuestra el potencial productivo cuando no hay restricciones hídricas aparentes.

El cultivo de soja no presentaría la misma respuesta al riego suplementario por las diferencias en la duración y sensibilidad del periodo crítico, que abarca de los estadios de R4 a inicio de R6 (Andriani *et al.*, 1991; Jiang y Egli, 1993). En soja, las deficiencias hídricas al comienzo de las etapas reproductivas provocan disminución del área foliar y de la eficiencia de conversión, aborto de estructuras reproductivas, que puede ser compensado por mayor fijación de nuevos frutos o mayor peso de granos (Andrade y Sadras, 2000). Pero al igual que en maíz el número de granos está determinado por la tasa de crecimiento del cultivo en el periodo crítico (Vega *et al.*, 2001a; Egli, 2005). Andriani *et al.* (1997) señalan que bajo deficiencias hídricas severas en etapas reproductivas avanzadas R5 – R7, se pueden producir pérdidas de rendimiento mayores al 40% en el cultivo de soja.

Materiales y métodos

3.1 Determinaciones

Biomasa aérea

Se cuantificó la biomasa aérea mediante muestreos de 1m² por unidad experimental (UE) cada 15 días aproximadamente realizados simultáneamente en soja y maíz. El material recolectado fue separado en las diferentes estructuras, en maíz: hojas, tallo y espiga; en soja: folíolos, tallos y vainas. En cada muestreo se recolectó el material senescente correspondiente de hojas. Se registró el peso seco después de secado en estufa a 60°C.

Índice de área foliar

A una alícuota de las hojas del muestreo para biomasa, se le midió la superficie con un equipo LiCor (Li-3100 AREA METER) que luego se secó en estufa a 60°C hasta peso constante. El área foliar se calculó multiplicando el peso seco total de hojas y la relación

área foliar/peso seco de la alícuota. El índice de área foliar se determinó como el cociente entre el área foliar y la superficie de cultivo muestreada.

El área foliar media de las hojas funcionales, en los distintos tratamientos se determinó a través del recuento del número de hojas sin síntomas de senescencia del muestreo de biomasa.

Intercepción de Radiación solar

La intercepción de radiación se midió con un ceptómetro Cavadevices (BAR-RAD) de 50 cm, que fue ubicado en forma perpendicular a las líneas de cultivo cada 15 días, por encima y por debajo de la canopia activa, evitando estratos senescentes. Las mediciones se realizaron únicamente en el horario de las 13 a 14 hs. Cada dato fue el promedio de tres mediciones realizadas en la UE. La fracción de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada por el cultivo (f) se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$f = 1 - \frac{I}{I_0}$$

Donde I es el PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), medido debajo de la canopia activa e I_0 es el PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), sobre la canopia.

La radiación incidente fue obtenida de los registros diarios de la estación meteorológica ubicada a 300 m del ensayo. La radiación fotosintéticamente activa incidente (PAR_{inc} , $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) fue estimada diariamente multiplicando la radiación incidente por 0,5 (Monteith, 1972). Para un determinado período, el PAR interceptado (PAR_i , MJ m^{-2}), fue calculado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{PAR}_i = \sum_{N=1}^N f_N * \text{PAR}_{inc}$$

Donde N es el número de días desde la emergencia del cultivo. El valor f_N es la fracción de PAR interceptada un N día desde a emergencia.

$$f_N = \frac{f_1 - f_0}{N_1 - N_0} + f_{N-1}$$

El valor f_N entre mediciones fue estimado diariamente por interpolación lineal entre dos mediciones sucesivas, donde f_i y f_0 es la variación en la fracción de PAR interceptada entre muestreos sucesivos y f_{N-1} es la fracción de PAR interceptado el día previo de cada estimación diaria.

3.2 Variables calculadas

Eficiencia del uso de la radiación

La eficiencia del uso de la radiación (EUR) se calculó mediante la relación entre la biomasa aérea acumulada y el PAR interceptado, acumulado de emergencia a madurez fisiológica, para los siguientes períodos: Período vegetativo desde emergencia a R1 en maíz y desde emergencia a R3 en soja. Período reproductivo, desde R1 a R6 en maíz y de R3 a R7 en soja. Período crítico de determinación del rendimiento, de R1 a R3 en maíz y de R3 a R5 en soja. Periodo de llenado de granos, de R3 a R6 en maíz y de R5 a R7 en soja. Donde la EUR es el valor de la pendiente en la regresión ajustada entre la biomasa aérea y la radiación interceptada acumulada.

Rendimiento y componentes

El rendimiento en grano se determinó mediante la cosecha de 5 m² y corrección a humedad de comercialización de 13,5% y 14% para soja y maíz, respectivamente. Los componentes de rendimiento se calcularon sobre una muestra de 1 m² por UE. En soja se determinó número de plantas, número de vainas, peso seco de rastrojo y granos, peso de mil granos y se calculó el número de granos y el índice de cosecha. En maíz, el

número de plantas y espigas, peso seco de rastrojo y granos, peso de 1000 granos y se calculó el número de granos y el índice de cosecha.

El número de granos se calculó a través de la determinación del peso seco de los granos y el peso de mil granos.

El índice de cosecha se calculó como la relación entre el rendimiento en granos y la biomasa aérea total acumulada a madurez fisiológica.

Análisis estadístico

En las variables que presentan evolución en el tiempo, se realizó la comparación del efecto año, tratamiento y cultivo, a través del análisis de medidas repetidas en el tiempo por medio de modelos lineales mixtos del software R project, para corregir la falta de homocedasticidad en algunos tratamientos, se asumió el ajuste de heteroscedasticidad agrupada por tiempo (Di Rienzo, 2011).

Para la comparación entre años se eliminó del análisis el tratamiento TR1, debido a que en el año 2010 se dio por perdido a este tratamiento. Por lo tanto las comparaciones entre años incluyeron a los tratamientos secano, TR2 y TR3. Se abrió el análisis por año cuando se encontró efecto año en la variable de interés y se incluyó al tratamiento TR1 en este análisis.

Las medias de los tratamientos se compararon mediante el test de comparación múltiple de medias de LSD Fisher ($p < 0,05$).

Se ajustaron regresiones lineales entre biomasa y PAR interceptado acumulado para calcular la EUR. El efecto de los tratamientos en las regresiones se evaluó por medio de la utilización del análisis de regresiones con variables Dummy del paquete InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2016).

Resultados

En los dos años de ensayo el contenido de agua inicial del suelo fue similar con 64% y 58% del agua útil que decayó progresivamente con el avance del desarrollo de los cultivos y el incremento del déficit hídrico (Figura 2.3), provocando estrés hídrico a partir del inicio de las etapas reproductivas lo que permitió observar diferencias entre tratamientos y la respuesta de los cultivos al aporte de riego. Bajo la condición de secano, la precipitación efectiva de emergencia a madurez fisiológica fue de 307 mm y 318 mm para 2010 y 2011, respectivamente (Figura 2.3). Durante el segundo año el aporte de riego realizado a los tratamientos fue mayor al suministrado en el primer año (Tabla 2.5).

Evolución del Índice de área foliar

El índice de área foliar generado fue contrastante entre los años ($p < 0,0001$), durante el segundo año se incrementó un 55% con respecto al generado en el primer año en ambos cultivos (Tabla 3.1). El IAF máximo, se registró alrededor de floración en maíz e inicio de formación de granos en soja y luego comenzó a decaer. El aporte de riego tuvo efecto en la duración del IAF e incrementó el IAF máximo en soja. Los valores máximos alcanzados en TR3 fueron 2,7 y 4,7 en maíz y 5,9 y 7,8 en soja en 2010 y 2011, respectivamente. El cultivo de soja presentó la mayor respuesta al aporte de agua con un 70% de incremento en el IAF máximo generado en TR3, respecto a secano, en los dos años, mientras que en maíz este incremento fue de solo 10 % (Figura 3.1).

El IAF determinado 15 días antes de madurez fisiológica mostró un comportamiento diferencial entre los cultivos. En maíz, el riego aumentó la duración del área foliar, por una menor reducción del IAF con valores del 14 % y 87 % del IAF máximo alcanzado en el secano y TR3 respectivamente y 46% para los tratamientos TR1 y TR2 (Tabla 3.7).

En soja, la reducción del IAF fue menor, solo se diferenció TR3 de secano. El IAF promedio de los dos años resultó un 61% y 66% del IAF máximo para secano y TR3, respectivamente, durante el segundo año la reducción del IAF fue menor en todos los tratamientos (Tabla 3.8).

Tabla 3. 1. Evolución del índice de área foliar en 2010 y 2011 en maíz y soja en distintos momentos expresado en tiempo térmico °Cd.

	Tiempo Térmico desde emergencia °Cd				
	490 (±63)	646 (±16)	956 (±28)	1256 (±44)	1593 (±87)
2010	0,85 g	2,00 e	2,47 d	3,11 c	2,57 d
2011	1,62 f	3,79 b	4,95 a	3,36 b	3,38 c
Secano	1,16 g	2,60 de	3,00 cd	2,43 e	1,63 f
TR2	1,20 g	2,90 cd	3,71 b	3,25 bc	2,87 cd
TR3	1,33 fg	3,18 c	4,41 a	4,92 a	4,43 a
Cultivo					
Soja	0,61 e	2,37 c	4,06 a	4,49 a	4,16 a
Maíz	1,85 d	3,41 b	3,36 b	2,58 c	1,79 d
Fuentes de variación					
Año	<0,0001				
Tratamiento	<0,0001				
Cultivo	<0,0001				
Día	<0,0001				
Tratamiento * Año	0,0027				
Tratamiento * Cultivo	<0,0001				
Tratamiento * Día	<0,0001				
Año * Cultivo	0,7346				
Año * Día	<0,0001				
Cultivo * Día	<0,0001				
Tratamiento * Año * Cultivo	0,0752				
Tratamiento * Año * Día	0,0004				
Tratamiento * Cultivo * Día	0,0052				

ANOVA realizado con medidas repetidas en el tiempo. Solo fueron incluidos los tratamientos secano, TR2 y TR3, por la pérdida del tratamiento TR1 en soja del año 2010. Periodo comparado hasta 15 días antes de madurez fisiológica en maíz y en R6 en soja. Letras diferentes indican diferencias significativas test LSD Fisher ($<p 0,05$).

Valores entre paréntesis indican dispersión entre cultivos y años en cada momento de muestreo.

La evolución del IAF durante la etapa vegetativa no presentó diferencias entre tratamientos en ninguno de los cultivos. Al avanzar sobre la etapa reproductiva,

comenzaron a diferenciarse los tratamientos por el efecto del riego con mayores reducciones en el área foliar, cuanto menor fue la disponibilidad de agua (figura 3.1).

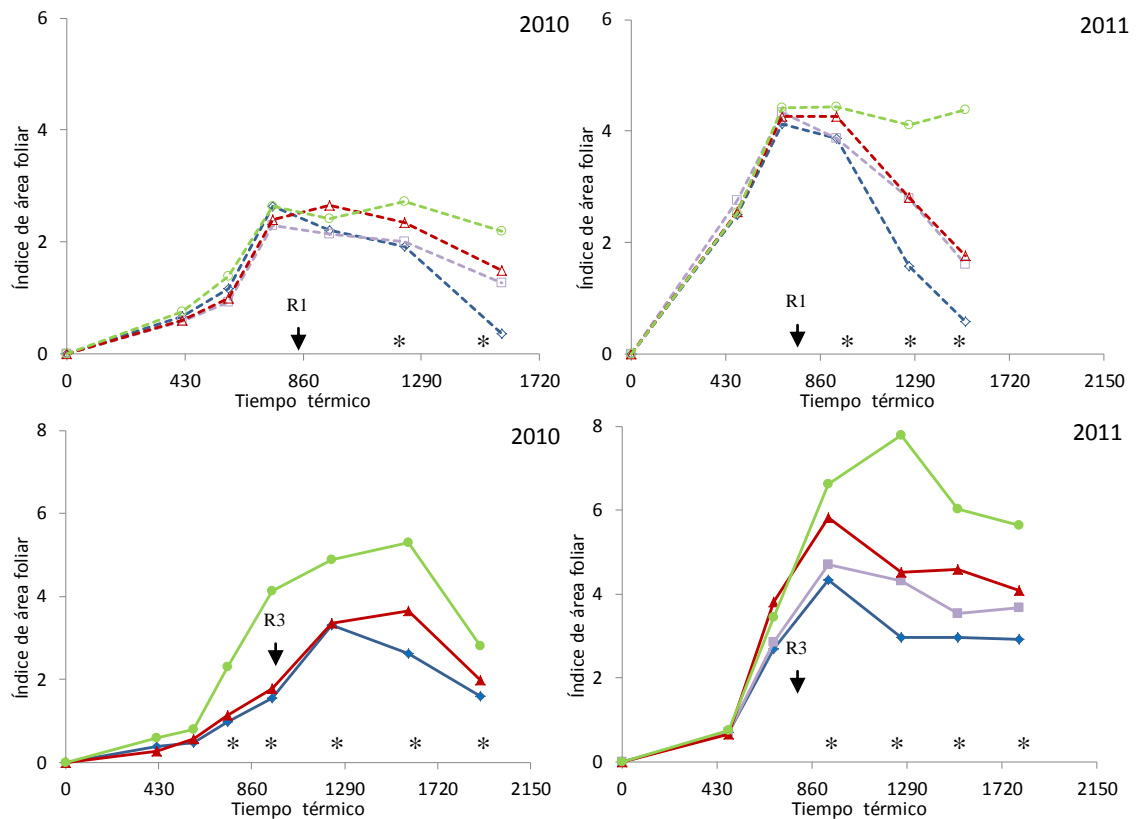


Figura 3. 1: Evolución de Índice de área foliar en función del tiempo térmico desde emergencia hasta 15 días antes de madurez fisiológica para el año 2010 (izquierda) y 2011(derecha). Línea llena (soja) y línea punteada (maíz), para los tratamientos secano (rombo azul), TR1 (cuadrado violeta), TR2 (triángulo rojo) y TR3 (círculo verde). Los asteriscos (*) indican diferencias significativas ($<p 0,05$) entre los tratamientos.

Al analizar la conformación del IAF, los cultivos presentaron diferente respuesta al riego en cuanto al número y el tamaño de hojas. En maíz a partir de floración el número de hojas fotosintéticamente activas disminuyó en todos los tratamientos, debido al proceso de senescencia. En el muestreo 15 días antes de madurez fisiológica se registró una reducción en el número de hojas respecto a floración de 64, 43, 41 y 31% para secano, TR1, TR2 y TR3 respectivamente en el primer año, y de 70 %, 52 % y 59 % para secano, TR1 y TR2, respectivamente y de solo 16% en TR3 en el segundo año. (Figura 3.2).

En maíz, la disponibilidad hídrica afectó el área foliar funcional desde el inicio del llenado de granos a 15 días antes de madurez fisiológica. El área fotosintética media de las hojas funcionales disminuyó marcadamente en secano y levemente en TR1 y TR2 (Figura 3.2) Durante el segundo año se observó la misma repuesta entre los tratamientos, pero el área foliar por hoja fue un 50% mayor que en el año 2010, lo que contribuyó a generar un mayor IAF, con diferencias más marcadas entre secano y TR3 (Figura 3,2).

En soja, el riego incrementó levemente el número de hojas y durante la etapa reproductiva, una vez alcanzado el IAF máximo las reducciones del numero de hojas fueron de 50% en 2010 y 20 % en 2011, hasta 15 días antes de madurez fisiológica. En cuanto al tamaño de las hojas, el riego tuvo un gran impacto permitiendo una mayor expansión foliar, siendo las hojas de TR3 un 63% más grandes que las de secano en el primer año y 77% en el segundo. Además en el segundo año el área foliar por hoja fue un 50% mayor que en el primero lo que posibilitó generar altos valores de IAF.

Intercepción de radiación

Las diferencias en el IAF generadas por los tratamientos ($<p 0,0001$) se plasmaron en la capacidad de captar la radiación incidente. La intercepción, durante todo el periodo de crecimiento de los cultivos fue superior en 2011 ($<p 0,0001$) con respecto al año 2010 (Tabla 3.2). En 2010 en maíz los tratamientos de riego se diferenciaron del secano a partir de floración, el cual no logró superar el 47 % de intercepción a diferencia del tratamiento TR3 que alcanzó 66 % (Figura 3.3). Durante el llenado de granos de (1256 -1593°Cd) la intercepción de TR3 fue superior al resto de los tratamientos con 76%, seguido por TR1, TR2 y secano con 65, 63 y 45%, respectivamente.

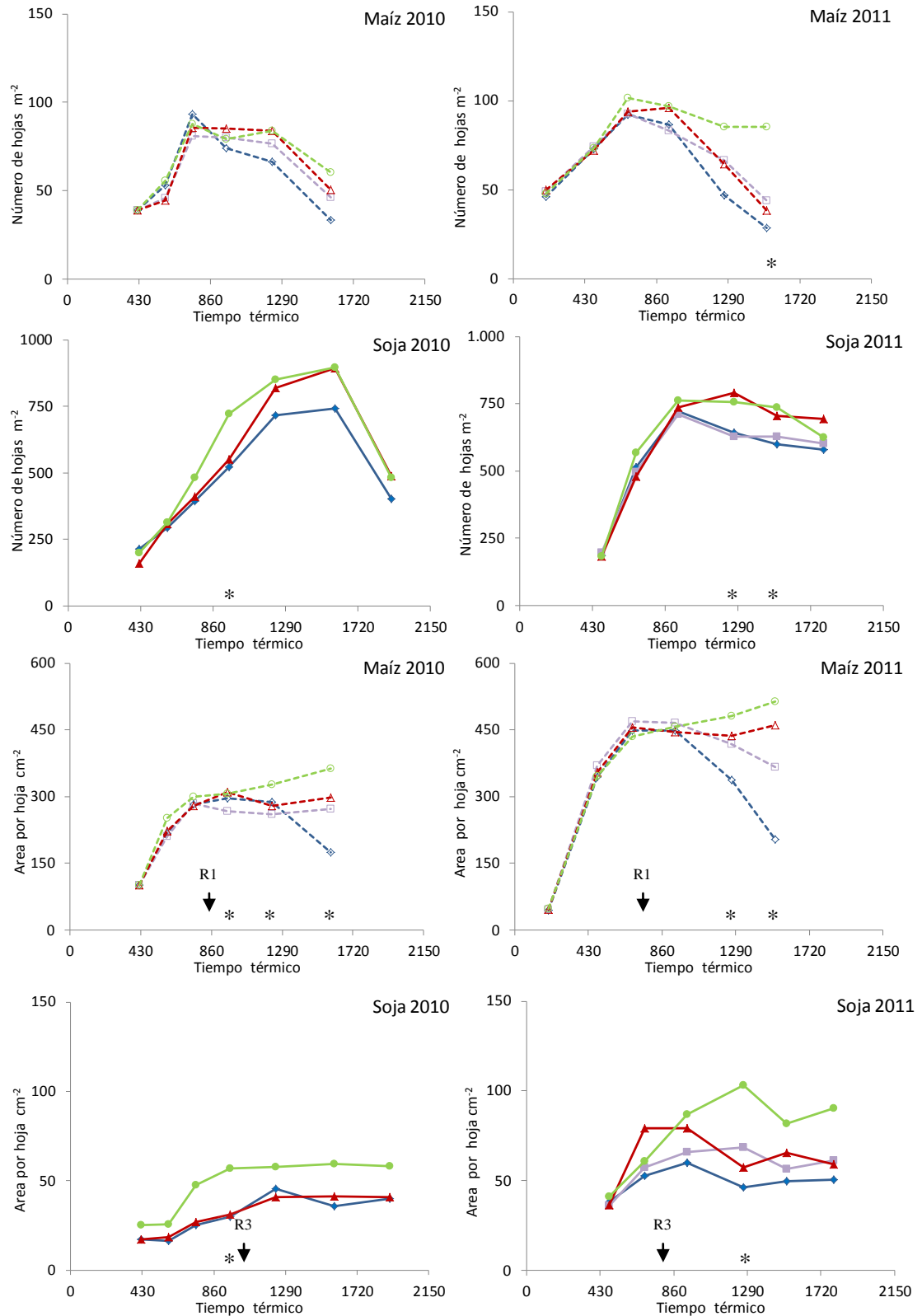


Figura 3. 2: Evolución de la conformación del Índice de área foliar en número de hojas m⁻² y área foliar promedio por hoja funcional en función del tiempo térmico desde emergencia a 15 días antes de madurez fisiológica para el año 2010 (izquierda) y 2011(derecha). Línea llena (soja) y línea punteada (maíz), para los tratamientos secano (rombo azul), TR1 (cuadrado violeta), TR2 (triangulo rojo) y TR3 (circulo verde).

Hacia el final del llenado de granos, independientemente del tratamiento, la intercepción de radiación decayó asociada a la reducción del IAF, pero seco se diferenció del resto con solo 19% de captación (Figura 3.3).

Tabla 3. 2. Evolución de la intercepción de radiación fotosintética activa en 2010 y 2011 en maíz y soja en distintos momentos expresado en tiempo térmico °Cd.

	Tiempo Térmico desde emergencia °Cd				
	270 (±61)	575 (±71)	956 (±28)	1256 (±44)	1593 (±87)
2010	0,17 h	0,30 g	0,52 f	0,68 cd	0,63 de
2011	0,25 g	0,61 e	0,82 a	0,75 bc	0,79 ab
Secano	0,20 h	0,40 g	0,55 e	0,56 e	0,56 e
TR2	0,22 h	0,45 fg	0,68 d	0,71 d	0,74 cd
TR3	0,21 h	0,52 ef	0,78 bc	0,83 ab	0,88 a
Cultivo					
Soja	0,28 f	0,49 de	0,67 c	0,78 b	0,88 a
Maíz	0,14 g	0,43 e	0,67 c	0,65 c	0,54 d
Fuentes de variación					
Año			<0,0001		
Tratamiento			<0,0001		
Cultivo			<0,0001		
Día			<0,0001		
Tratamiento * Año			0,4054		
Tratamiento * Cultivo			0,6640		
Tratamiento * Día			<0,0001		
Año * Cultivo			<0,0001		
Año * Día			<0,0001		
Cultivo * Día			<0,0001		
Tratamiento * Año * Cultivo			0,0364		
Tratamiento * Año * Día			0,8265		
Tratamiento * Cultivo * Día			>0,0001		

ANOVA realizado con medidas repetidas en el tiempo. Solo fueron incluidos los tratamientos seco, TR2 y TR3, por la pérdida del tratamiento TR1 en soja del año 2010. Periodo comparado hasta madurez fisiológica de maíz y 20 días antes de madurez fisiológica en soja. Letras diferentes indican diferencias significativas test LSD Fisher ($<p 0,05$).

Valores entre paréntesis indican dispersión entre cultivos y años en cada momento de muestreo.

En el 2011 la fracción de radiación interceptada fue mayor a la lograda en 2010, las diferencias en maíz comenzaron después de V8, donde TR2 y TR3 fueron superiores alcanzando 83% y 90% de intercepción, respectivamente. Solo TR3 pudo mantener

valores cercanos al 90% durante la etapa reproductiva. En el resto de los tratamientos la intercepción decayó a partir de floración (Figura 3.3).

En soja, en el 2010 TR3 se diferenció del secano a partir del inicio de riego, durante la etapa vegetativa y parte de R5. Solo TR3 alcanzó el 90% intercepción en R3, secano y TR2 presentaron 42% y 49% de intercepción (Figura 3.3). Durante el llenado de granos no hubo diferencias entre los tratamientos debido a la mejora en la captura en secano y TR2 que lograron 89% y 83%, similares al 88% logrado en TR3.

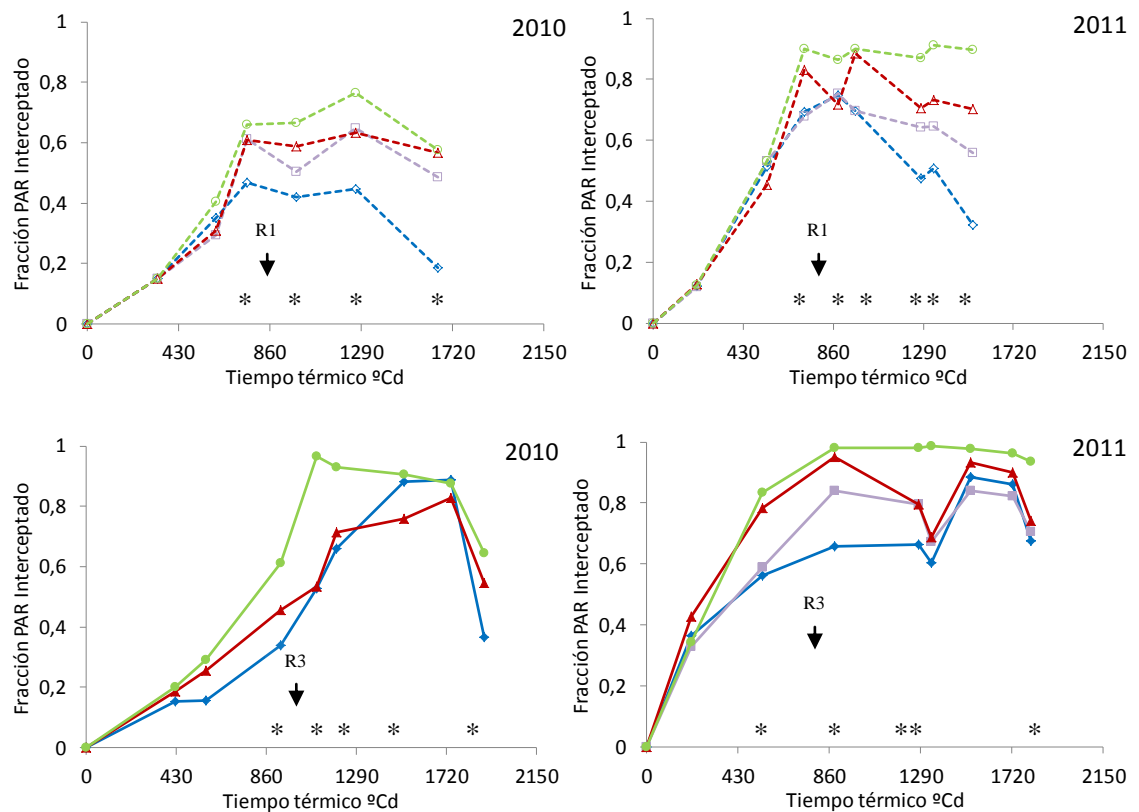


Figura 3. 3: Evolución de la Intercepción de radiación en función del tiempo térmico desde emergencia para el año 2010 (izquierda) y 2011(derecha). Línea llena (soja) y línea punteada (maíz), para los tratamientos secano (rombo azul), TR1 (cuadrado violeta), TR2 (triángulo rojo) y TR3 (círculo verde). Los asteriscos (*) indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos.

Al igual que en maíz, en 2011 los niveles de intercepción en soja fueron mayores a los del 2010. Las diferencias entre los tratamientos se produjeron en R2 donde TR2 y TR3 capturaron el 78 y 84% de la radiación, llegando al 95 y 98%, respectivamente en

R3. Al inicio de R5, los tratamientos secano, TR1 y TR2 presentaron una caída de la intercepción de radiación, coincidente con la restricción hídrica que presentaban en ese momento, seguida de la recuperación de la misma durante la etapa final de R5 donde no hubo diferencias entre tratamientos (Figura 3.3).

Biomasa aérea acumulada

La evolución de la biomasa aérea acumulada en los cultivos respondió significativamente a la disponibilidad de hídrica ($<p 0,0001$). En el segundo año la producción de biomasa aérea fue mayor a la generada en el primero ($<p 0,0001$). Las diferencias entre los tratamientos, comenzaron a partir de los 956 °Cd, correspondientes al inicio de las etapas reproductivas en ambos cultivos (Tabla 3.3). En los dos años, la respuesta de los cultivos a los tratamientos de riego fue similar y no presentó diferencias significativas ($>p 0,05$).

Durante el 2010, se encontraron diferencias entre los tratamientos debido a los niveles de riego y al tipo de cultivo. El maíz presentó mayor acumulación de biomasa aérea que soja con una relación maíz / soja de 2,8 al inicio del riego y 1,73 hacia el final del ciclo, respectivamente (Figura 3.4). Las diferencias entre tratamientos comenzaron a manifestarse a partir de los 956 °Cd, luego del inicio de formación de vainas en soja y floración en maíz (figura 3.4).

En maíz, el riego produjo incrementos en la biomasa aérea acumulada al final del ciclo de 23 %, 36 %, 92% para los tratamientos TR1 TR2 y TR3 respectivamente, con una producción de biomasa de 1094 g m⁻² en secano. En soja, la magnitud de los incrementos fue inferior que en maíz, con 31 % y 55% para los tratamientos TR2 y TR3, respectivamente con una biomasa acumulada en secano de 661 g m⁻² (Figura 3.4).

Tabla 3. 3. Análisis de varianza de la evolución de la biomasa aérea en 2010 y 2011 en maíz y soja en distintos momentos expresado en tiempo térmico °Cd.

	Tiempo Térmico desde emergencia °Cd					
	490 (±63)	646 (±16)	956 (±28)	1256 (±44)	1593 (±87)	1805 (±12)
2010	63,2 i	188,3 h	496,1 g	741,4 f	960,7 d	1213,0 bc
2011	167,5 h	488,9 f	848,3 e	1201,4 c	1296,3 b	1477,4 a
Secano	116,8 k	328,2 j	575,0 i	751,4 gh	816,2 fg	901,7 ef
TR2	111,4 k	336,6 j	702,7 h	954,7 e	1076,5 d	1260,3 c
TR3	118,0 k	351,1 j	739,0 gh	1207,7 c	1493,0 b	1873,0 a
Cultivo						
Soja	49,6 i	172,9 h	353,0 g	558,5 f	724,8 e	986,0 d
Maíz	181,2 h	504,3 f	991,4 d	1384,1 c	1532,2 b	1704,0 a
Fuentes de variación						
Año			<0,0001			
Tratamiento			<0,0001			
Cultivo			<0,0001			
Día			<0,0001			
Tratamiento * Año			0,1461			
Tratamiento * Cultivo			0,0336			
Tratamiento * Día			<0,0001			
Año * Cultivo			<0,0001			
Año* Día			<0,0001			
Cultivo * Día			<0,0001			
Tratamiento * Año * Cultivo			0,9282			
Tratamiento * Año * Día			<0,0001			
Tratamiento * Cultivo * Día			>0,0001			

ANOVA realizado con medidas repetidas en el tiempo. Solo fueron incluidos los tratamientos secano, TR2 y TR3, por la pérdida del tratamiento TR1 en soja del año 2010. Periodo comparado hasta madurez fisiológica de maíz y 20 días antes de madurez fisiológica en soja. Letras diferentes indican diferencias significativas test LSD Fisher ($<p 0,05$).

Valores entre paréntesis indican dispersión entre cultivos y años en cada momento de muestreo.

En 2011, la biomasa acumulada fue mayor que en 2010 en todos los tratamientos asociada a mejores condiciones ambientales y la aplicación de mayores láminas de riego (Figura 3.4). Las diferencias en crecimiento debido al efecto de los niveles de riego y el tipo de cultivo siguieron una tendencia similar al 2010.

El cultivo de maíz, presentó la mayor acumulación de biomasa aérea; la relación maíz/soja fue 4,0 al inicio del riego y 1,65 hacia el final del ciclo. Si bien el riego se

comenzó a los 424° Cd, con el cultivo de soja en V7 y el maíz en V6 las diferencias en la acumulación de biomasa debido a los tratamientos de riego comenzaron a partir de los 936 °Cd, similar a lo ocurrido en el 2010, coincidiendo con R3, en soja y R1 en maíz.

Las diferencias, en promedio de los dos cultivos, encontradas al efecto riego en 2011 a los 936°Cd, marcan una separación entre los tratamientos con mayor oferta hídrica (TR2 y TR3) y los de menor disponibilidad (Secano y TR1), con aumentos de 20 % y 25% en TR2 y TR3 respectivamente. A partir del inicio de llenado de granos, 1266 °Cd y hacia el final del ciclo TR2 logró un 39 % de incremento y TR3 126 % respecto a secano (Tabla 3.3).

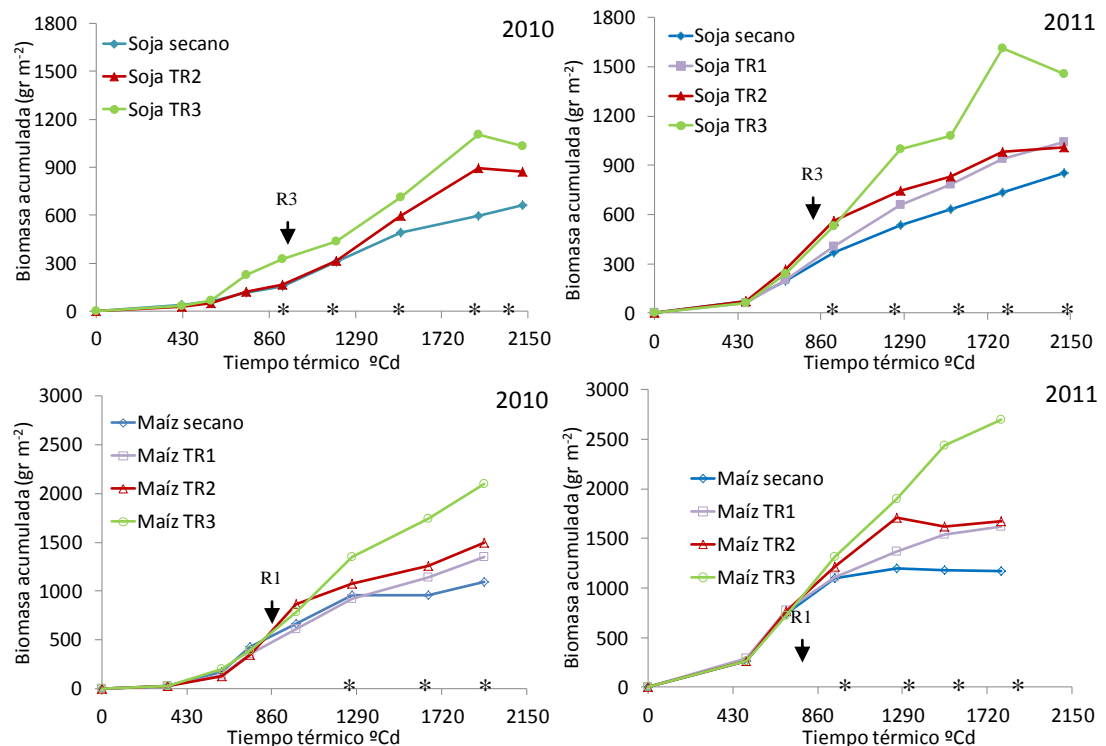


Figura 3. 4: Evolución de la biomasa aérea acumulada en los tratamientos de riego para maíz y soja en tiempo térmico. Símbolos llenos (soja) símbolos vacíos (maíz); secano (rombo azul), TR1 (cuadrado violeta), TR2 (triángulo rojo) y TR3 (círculo verde). Los asteriscos (*) indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos.

En maíz, se lograron aumentos de 38 %, 43 % y 131% para TR1, TR2 y TR3, con una biomasa acumulada en secano de 1167 g m⁻². En soja, los aumentos fueron 22, 18 y

70% para los mismos tratamientos con una biomasa de 854 g m^{-2} en seco. En 2011 al igual que en 2010 el maíz presentó mayor respuesta al riego suplementario que soja (Figura 3.4).

Eficiencia de uso de la radiación en maíz

La EUR de emergencia a madurez fisiológica fue afectada por los tratamientos de riego ($p < 0,005$), y presentó diferencias significativas entre años ($p < 0,05$). El valor medio, alcanzado en los dos años fue $2,07 \text{ g Mj}^{-1}$, $2,44 \text{ g Mj}^{-1}$, $2,52 \text{ g Mj}^{-1}$ y $3,29 \text{ g Mj}^{-1}$ para seco, TR1, TR2 y TR3 respectivamente (Tabla 3.4). La EUR lograda en 2010 y 2011 en seco fue de $2,80 \text{ g Mj}^{-1}$ y $1,87 \text{ g Mj}^{-1}$, respectivamente. En 2010, solo TR3 se diferenció del seco con $3,33 \text{ g Mj}^{-1}$, un incremento de 16%, mientras que TR2 y TR1 no presentaron diferencias significativas con seco. En el 2011, TR3 presentó la mayor EUR, $3,27 \text{ g Mj}^{-1}$ con un incremento de 75 % respecto a seco mientras que TR1 y TR2 se diferenciaron de seco con incrementos similares de 26% y 30 % (Tabla 3.5).

Tabla 3. 4. Efecto del año y los tratamientos de riego en la Eficiencia de Uso de la Radiación (EUR) g Mj^{-1} , en el cultivo de maíz para los años 2010 y 2011 en distintos periodos del ciclo del cultivo: **E-R6** Emergencia-Madurez fisiológica. **E-R1** Emergencia-aparición de estigmas. **R1-R6** Aparición de estigmas-madurez fisiológica. **R1-R3** Aparición de estigmas-inicio de llenado de granos. **R3-R6** Inicio de llenado de granos-Madurez fisiológica.

	Eficiencia de Uso de Radiación g Mj^{-1}				
	E-R6	E-R1	R1-R6	R1-R3	R3-R6
Año	*	**	**	**	ns
Tratamiento	**	Ns	**	**	**

Letras diferentes indican diferencias significativas. Nivel de significancia * $p > 0,05$, ** $p > 0,01$.

Durante la fase vegetativa, desde Emergencia a R1, no hubo efecto de los tratamientos ($p > 0,05$), registrando una EUR media para los dos años de $3,36 \text{ g Mj}^{-1}$. En el año 2011, las EUR fueron superiores ($p < 0,001$), registrando valores promedio de $3,30 \text{ g Mj}^{-1}$ en 2010 y $3,46 \text{ g Mj}^{-1}$ en 2011. Por otro lado, la fase reproductiva (floración a

madurez fisiológica) presentó diferencias entre años y tratamientos ($p < 0,001$). La EUR fue mayor en TR3 en ambos años, manteniendo valores similares a la etapa vegetativa, mientras el resto de los tratamientos registraron caídas en la EUR. TR1 y TR2 fueron diferentes al secano, que registró el valor más bajo $0,86 \text{ g Mj}^{-1}$ que representa el 26 % la EUR alcanzada por TR3. En 2011 los valores de EUR de TR1, TR2 y secano fueron inferiores a los del año anterior. La mayor diferencia la presentó secano con $1,96 \text{ g Mj}^{-1}$ y $0,61 \text{ g Mj}^{-1}$ en el 2010 y 2011, respectivamente.

En el periodo crítico, comprendido desde la emergencia de inflorescencia masculina hasta R3 hubo diferencias significativas entre años y tratamientos ($p < 0,001$) separando en dos grupos a los tratamientos secano y TR1 con la menor EUR y TR2 y TR3 con EUR superiores, $2,79 \text{ g Mj}^{-1}$ y $3,17 \text{ g Mj}^{-1}$ (Tabla 3.4). En 2010 no hubo diferencias entre tratamientos. En 2011 la EUR presentó diferencias entre los tratamientos según la disponibilidad hídrica, diferenciándose TR2 y TR3 de secano que solo logró $0,79 \text{ g Mj}^{-1}$ (Tabla 3.5).

Durante el período de llenado de granos, la magnitud de las diferencias entre los tratamientos fue mayor ($p < 0,001$), sin presentar diferencias entre años. Solo TR3 mantuvo eficiencias similares a la etapa vegetativa, $3,0 \text{ g Mj}^{-1}$, diferenciándose del resto de los tratamientos. En TR1 y TR2 la EUR fue de $1,91 \text{ g Mj}^{-1}$ y $1,48 \text{ g Mj}^{-1}$, respectivamente, superiores a la registrada en secano de $0,29 \text{ g Mj}^{-1}$ (Tabla 3.4).

En resumen durante la fase reproductiva la eficiencia de uso de la radiación en maíz se vio afectada por la disponibilidad hídrica, solo el tratamiento TR3 pudo sostener la misma EUR durante todo el ciclo. Es llamativo el comportamiento de TR2 cuya eficiencia en este periodo cayó marcadamente.

Tabla 3. 5. Eficiencia de Uso de la Radiación (EUR; g MJ^{-1}), en el cultivo de maíz en distintos periodos del ciclo del cultivo: **E-R6** Emergencia-Madurez fisiológica. **E-R1** Emergencia -aparición de estigmas. **R1-R6** Aparición de estigmas-madurez fisiológica. **R1-R3** Aparición de estigmas-inicio de llenado de granos.

		Eficiencia de Uso de Radiación g MJ^{-1}			
Año	Tratamientos	E-R6	E-R2	R2-R6	VT-R3
		(0-1935°Cd)	(0-984°Cd)	(984-1935°Cd)	(752-1266°Cd)
2010	Secano	2,85 a	3,49	1,96 a	3,64
	TR1	2,50 a	2,87	2,27 a	2,67
	TR2	2,65 a	3,75	1,81 a	3,22
	TR3	3,32 b	3,09	3,33 b	3,80
		E-R6	E-R1	R1-R6	R1-R3
		(0-1918°Cd)	(0-867°Cd)	(867-1918°Cd)	(867-1324°Cd)
2011	Secano	1,87 a	3,34	0,61 a	0,79 a
	TR1	2,36 b	3,46	1,70 b	1,59 ab
	TR2	2,44 b	3,69	1,55 b	2,37 bc
	TR3	3,27 c	3,35	3,21 c	3,00 c

Unidades expresadas en °Cd corresponden a tiempo térmico de cada periodo. Letras diferentes indican diferencias significativas. $p > 0,05$.

Eficiencia de uso de la radiación en soja

En soja la EUR fue inferior a la registrada en maíz pero a diferencia del maíz no hubo efectos entre años. En secano la EUR fue de $1,03 \text{ g MJ}^{-1}$. Solo TR3 se diferenció estadísticamente de secano, con un incremento de 44 % con $1,49 \text{ g MJ}^{-1}$, mientras que TR1 y TR2 fueron similares al secano (Tabla 3.6).

En la primera etapa del cultivo (E-R3), no hubo diferencias entre años ni entre tratamientos de riego, el promedio de secano fue de $1,13 \text{ g MJ}^{-1}$. (Tabla 3.6).

En la fase reproductiva, se registró efecto del riego sobre la EUR. El aumento fue de 77% para TR3 con respecto a secano. Durante esta etapa, TR1 y TR3 lograron mantener los niveles de EUR a diferencia de secano y TR2 que redujeron la EUR.

Tabla 3. 6. Efecto del año y los tratamientos de riego en la Eficiencia de Uso de la Radiación (EUR) g Mj^{-1} , en el cultivo de soja para los años 2010 y 2011 en distintos periodos del ciclo del cultivo: **E-R7** Emergencia-Madurez fisiológica. **E-R3** Emergencia-formación de vainas. **R3-R7** Formación de vainas-madurez fisiológica. **R3-R5** Formación de vainas-inicio de llenado de granos. **R5-R7** Inicio de llenado de granos-Madurez fisiológica.

	Eficiencia de Uso de Radiación g Mj^{-1}				
	E-R7	E-R3,5	R3,5-R7	R3,3-R5,3	R5,3 -R7
Año	ns	Ns	ns	Ns	ns
Tratamiento	**	Ns	**	**	**
Secano	1,03 a	1,13	0,87 a	0,85 a	0,75 a
TR1	1,27 a	1,17	1,27 a	1,27 a	1,52 a
TR2	1,17 a	1,44	0,93 a	0,98 a	0,61 a
TR3	1,49 b	1,35	1,54 b	1,47 b	1,73 b

Letras diferentes indican diferencias significativas. Nivel de significancia * $p > 0,05$, ** $p > 0,01$.

En el periodo crítico (R3-R5), se observó incremento de la EUR por el aporte de riego en TR3 de 73% con respecto a secano, que presentó la menor EUR de $0,85 \text{ g Mj}^{-1}$. Durante el llenado de granos la limitación en la provisión de agua afectó la EUR en secano lo cual permitió observar respuestas significativas al riego. La EUR alcanzada por secano represento el 43% de la lograda por el tratamiento TR3, con valores de $0,75 \text{ g Mj}^{-1}$ y $1,73 \text{ g Mj}^{-1}$ en secano y TR3, respectivamente (Tabla 3.6).

Rendimiento y componentes

El rendimiento se incrementó con el aporte de agua en ambos años, con máximos de $1552,1 \text{ g m}^{-2}$ en maíz y $743,1 \text{ g m}^{-2}$ en soja en 2011. El rendimiento en TR3, promedio de las dos campañas fue de 1370 g m^{-2} en maíz y de 601 g m^{-2} en soja. La disponibilidad hídrica permitió incrementos significativos en soja, en los tratamientos TR2 y TR3 para los dos años. En maíz las diferencias se produjeron en TR1, TR2 y TR3. En maíz el aumento en el rendimiento con respecto al secano fue de 34 %, 37 % y 98 % el primer año y de 62 %, 65 % y 187 % en el segundo para los tratamientos TR1, TR2 y TR3 respectivamente (Tabla 3.7). En soja la magnitud del incremento fue menor

con valores de 33 % y 43 % para TR2 y TR3 en el primer año y de 35 %, 34 % y 103 % para los tratamientos de riego TR1, TR2 y TR3 en 2011, respectivamente (Tabla 3.8).

El número de granos fue el principal componente del rendimiento tanto en maíz como en soja explicando más del 90 % del rendimiento en ambos años (Figura 3.5). En maíz, se diferenciaron de secano el tratamiento TR3, seguido por TR1 y TR2, las respuestas en TR3 fueron de 54 y 66% para los años 2010 y 2011, respectivamente (Tabla 3.7). En este componente soja presentó mayor respuesta al riego que maíz con diferencias en TR2 y TR3 con respecto a secano, con incrementos de 55 % y 149 % para TR3 en los años 2010 y 2011 respectivamente (Tabla 3.8).

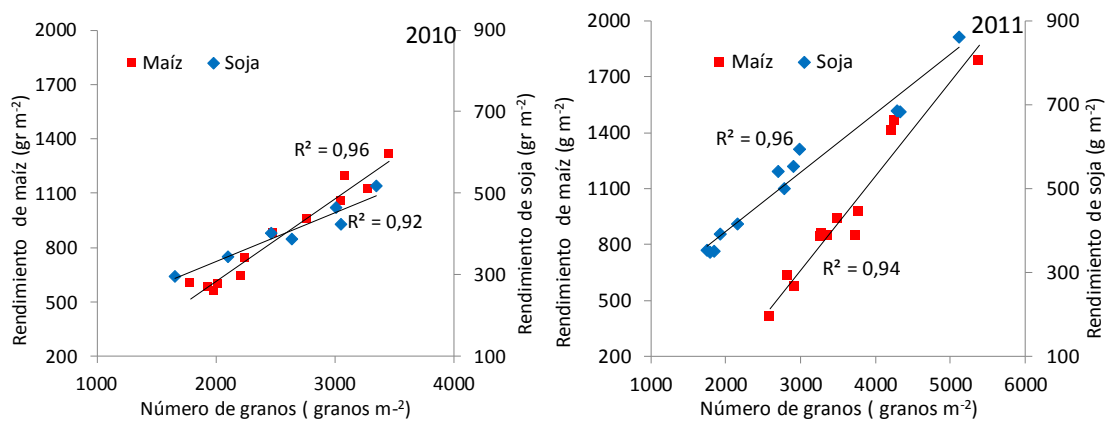


Figura 3. 5: Relación entre rendimiento y número de granos. Soja (rombo azul), Maíz (cuadrado rojo) en el año 2010 (izquierda) y 2011(derecha). En soja el ($Rendimiento = 93,9 + 0,12 * N^o \text{ granos } m^{-2}$) en 2010 y ($117,4 + 0,14 * N^o \text{ granos } m^{-2}$) en 2011. En maíz el ($Rendimiento = -293,9 + 0,45 * N^o \text{ granos } m^{-2}$) en 2010 y ($-855,1 + 0,51 * N^o \text{ granos } m^{-2}$) en 2011.

En soja el PMG se redujo 14 % en TR3 con respecto al secano en 2010 y 2011 respectivamente, mientras que en maíz el PMG aumentó 48%. Con incrementos de 28 y 74% para el 2010 y 2011 (Tabla 3.8).

Tabla 3. 7. Componentes de rendimiento de maíz. Medias de tratamientos de riego para 2010 y 2011. Número de granos m^{-2} (N° Gr), peso de mil granos (PMG), Rendimiento m^{-2} (Rdt), número de espigas m^{-2} (N° ESP), índice de cosecha (IC), índice de área foliar máximo (IAF max) y índice de área foliar final (IAF final).

Maíz	N° Gr $n^{\circ} m^{-2}$	PMG G	Rdt $g m^{-2}$	N° ESP $n^{\circ} m^{-2}$	IC %	IAF max $m^2 m^{-2}$	IAF final $m^2 m^{-2}$	
2010	2599,6 a	258,7 a	877,1	7,83	0,53	2,68 a	1,33 a	
2011	3599,8 b	291,0 b	964,6	8,08	0,56	4,38 b	2,08 b	
Secano	2430,1 a	223,0 a	569,2 a	7,17 a	0,50	3,41 ab	0,47 a	
TR1	2966,3 b	270,0 b	840,1 b	7,17 a	0,57	3,32 a	1,44 b	
TR2	3087,3 b	276,4 b	903,9 b	8,17 a	0,54	3,63 bc	1,63 b	
TR3	3915,0 c	330,4 c	1370,2 c	9,33 b	0,57	3,77 c	3,28 c	
2010	Secano	2073,6 a	253,4 b	598,9 a	7,3 a	0,55	2,69 b	0,36 a
	TR1	2397,5 ab	291,9 c	804,9 b	7,0 a	0,59	2,31 a	1,27 b
	TR2	2438,5 bc	294,3 c	820,0 b	9,0 b	0,54	2,87 b	1,49 b
	TR3	3201,9 cd	325,1 d	1188,3 c	9,0 b	0,57	2,86 b	2,19 c
2011	Secano	2786,6 a	192,6 a	539,5 a	7,0 a	0,46 a	4,13 c	0,58 a
	TR1	3535,2 ab	248,1 b	875,3 b	7,3 a	0,54 b	4,34 cd	1,61 b
	TR2	3449,3 a	258,4 b	891,4 b	7,3 a	0,53 ab	4,39 cd	1,77 bc
	TR3	4628,1 b	335,7 d	1552,1 d	9,7 b	0,57 b	4,68 d	4,38 d
Fuentes de variación								
Año	<0,0001	<0,0001	0,0854	0,5247	0,0634	<0,0001	<0,0001	
Tratamiento	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0036	0,0606	0,0005	<0,0001	
Año*Tratamiento	0,2499	0,0037	0,0269	0,1910	0,2738	0,0709	0,0001	
C.V. (%)	11,4	5,0	12,6	11,8	8,0	5,5	17,6	

En columnas y para cada año letras diferentes indican diferencias significativas test de Tukey $p < 0,05$.

El número de estructuras reproductivas por m^{-2} fue afectado por la provisión de agua. En maíz, TR3 presentó prolificidad a diferencia de secano y TR1 que lograron fijar solamente las espigas primarias (Tabla 3.7). En soja, el número de vainas por m^{-2} se incrementó con el aumento de la lámina de riego diferenciándose ($P < 0,05$) TR3 del resto de los tratamientos con incrementos respecto a secano de 67% y 131 % para 2010 y 2011 respectivamente (Tabla 3.8).

El índice de cosecha en soja y maíz no mostró diferencias significativas ($P > 0,05$) entre los tratamientos en ninguna de las campañas (Tabla 3.7 y 3.8).

Tabla 3. 8. Componentes de rendimiento de soja. Medias de tratamientos de riego para 2010 y 2011. Número de granos m^{-2} (Granos), peso de mil granos (PMG), Rendimiento m^{-2} (Rdt), número de vainas m^{-2} (Vainas), índice de cosecha (IC), índice de área foliar máximo (IAF max) y índice de área foliar final (IAF final).

Soja	Granos $n^{\circ} m^{-2}$	PMG G	Rdt g m^{-2}	Vainas $n^{\circ} m^{-2}$	IC %	IAF max $m^2 m^{-2}$	IAF final $m^2 m^{-2}$	
2010	2609,9	157,3 a	405,2 a	1277,1	0,47	4,05 a	2,11 a	
2011	2880,8	186,6 b	523,2 b	1282,9	0,47	5,70 b	4,08 b	
Secano	1854,5 a	187,6 b	346,9 a	902,8 a	0,45	3,92 a	2,40 a	
TR1	2495,8 ab	197,8 b	458,2 ab	1139,7 a	0,47	4,85 a	3,67 ab	
TR2	2756,1 b	167,5 a	494,7 bc	1196,5 a	0,48	4,76 a	3,04 ab	
TR3	3908,5 c	160,7 a	629,6 c	1838,7 b	0,49	6,79 b	4,50 b	
2010	Secano	1878,2 a	171,4 b	320,0 a	977,2 a	0,49	3,32 a	1,60
	TR1	-	-	-	-	-	-	-
	TR2	2900,1 b	146,9 a	425,9 ab	1250,6 ab	0,49	3,70 ab	1,98
	TR3	3189,8 b	158,7 ab	505,7 ab	1637,3 bc	0,49	5,30 cd	2,81
2011	Secano	1838,6 a	198,4 c	364,8 ab	853,3 a	0,43	4,32 abc	2,93
	TR1	2493,8 ab	197,8 c	494,7 b	1139,6 a	0,47	4,85 bcd	3,68
	TR2	2612,0 ab	188,1 c	490,4 b	1142,4 a	0,49	5,82 d	4,09
	TR3	4576,6 c	162,0 b	743,0 c	1973,0 c	0,51	7,79 e	5,63
Fuentes de variación								
Año	0,2281	<0,0001	0,0139	0,9598	0,9701	0,0009	0,0059	
Tratamiento	0,0002	0,0003	0,0026	0,0007	0,2742	0,0005	0,0948	
Año*Tratamiento	0,0128	0,0031	0,0988	0,2773	0,0556	0,2519	0,6382	
C.V. (%)	15,9	3,8	17,4	18,6	6,9	14,5	35,5	

Las letras indican diferencias significativas test de LSD Fisher $p < 0,05$.

La relación entre peso de granos y número presentó un comportamiento diferente entre maíz y soja. Para maíz hubo un incremento en el PMG de 0,055 g por cada grano adicional generado bajo riego. En soja la respuesta fue negativa con una disminución del PMG de 0,015 g por cada grano adicional (Figura 3.6).

El riego produjo aumento en todos los componentes, salvo en el PMG que se incrementó en maíz y disminuyó en soja.

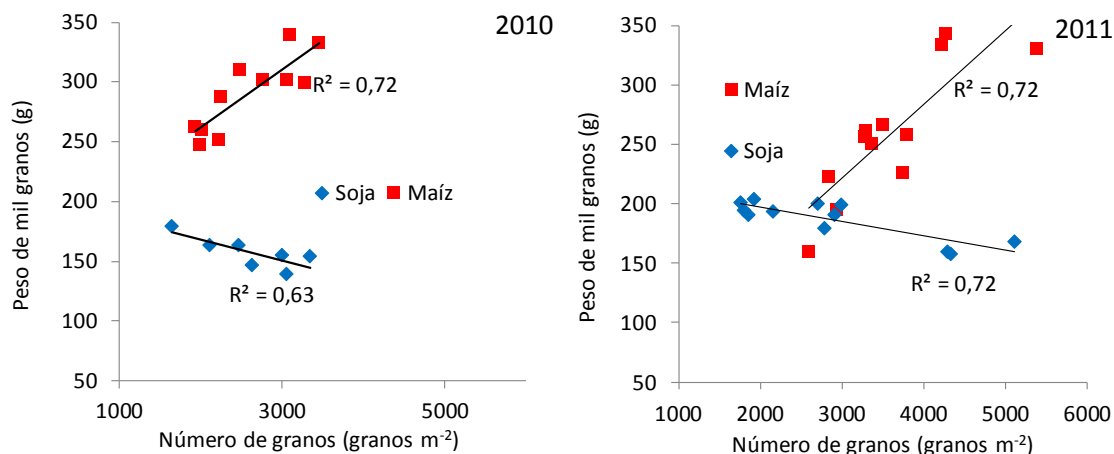


Figura 3. 6: Relación entre número de granos y peso de granos para Soja (rombo azul), Maíz (cuadrado rojo) en el año 2010 (izquierda) y 2011(derecha). En soja el ($\text{Peso de mil granos} = 203,2 - 0,02 * N^{\circ} \text{ granos m}^{-2}$) en 2010 y ($\text{Peso de mil granos} = 221,5 - 0,01 * N^{\circ} \text{ granos m}^{-2}$) en 2011. En maíz el ($\text{Peso de mil granos} = 166,6 + 0,048 * N^{\circ} \text{ granos m}^{-2}$) en 2010 y ($\text{Peso de mil granos} = 35,1 + 0,06 * N^{\circ} \text{ granos m}^{-2}$) en 2011.

Asociación entre los componentes de rendimiento

En maíz, el rendimiento se correlacionó con la biomasa, el número de granos y el PMG, la mayoría de los componentes mostraron una elevada correlación con la duración del IAF durante el llenado de granos y una menor asociación con el IC.

En soja, el rendimiento se asoció con la biomasa, el número de granos y el PMG. Sin embargo el PMG y el rendimiento se asociaron negativamente. En cuanto al IAF máximo generado, este solo se asoció significativamente con la biomasa y el rendimiento en el segundo año de ensayo.

El número de granos se relacionó positivamente con la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) durante el periodo crítico. En maíz, la TCC en el período comprendido entre 15 días antes y 15 días después de floración presentó incrementos de 97 y 67 granos.m⁻² por cada g.m⁻²d⁻¹ de incremento en la TCC en 2010 y 2011 respectivamente. Las tasas de crecimiento por planta durante esta etapa fueron de 1,97 a 5,10 g pl d⁻¹ (Figura 3.7).

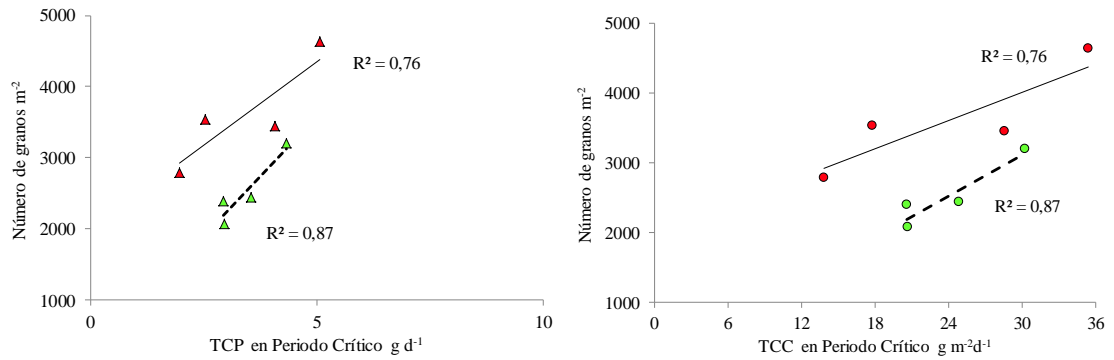


Figura 3. 7: Relación entre el número de granos m⁻² y la tasa de crecimiento por planta g pl d⁻¹ (TCP) y la tasa de crecimiento del cultivo m⁻² (TCC) de maíz durante el periodo crítico, 15d antes de R1 y 15 d después. $N^{\circ} \text{ granos} = 175 + 683 * \text{TCP}$ en 2010 y $1996 + 470 * \text{TCP}$ en 2011. $N^{\circ} \text{ granos} = 175 + 97 * \text{TCC}$ en 2010 y $1996 + 67 * \text{TCC}$ en 2011. 2010 en verde y 2011 en rojo.

En soja, el número de granos también se relacionó positivamente con la TCC durante el periodo crítico, comprendido entre R3 a R6. El aumento promedio para 2010 y 2011 fue de 182 granos m⁻² por cada g.m⁻²d⁻¹ de incremento en la TCC (Figura 3.8)

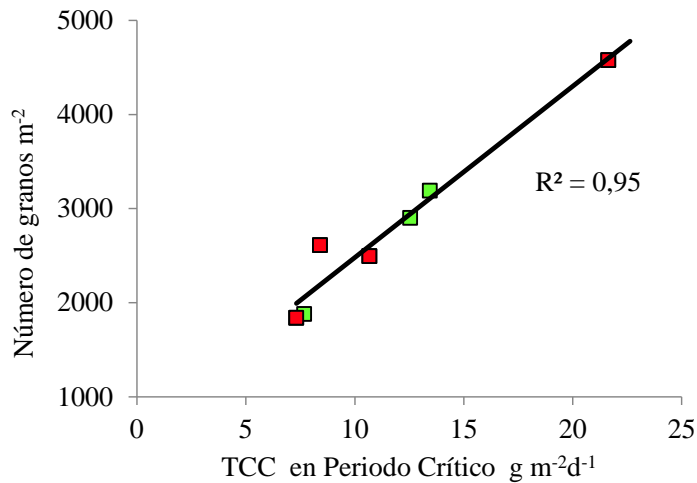


Figura 3. 8: Relación entre el número de granos m⁻² y la tasa de crecimiento del cultivo de soja durante el periodo crítico R3-R6 en los dos años de ensayo 2010 y 2011. $N^{\circ} \text{ granos} = 658 + 182 * \text{TCC}$. 2010 en verde y 2011 en rojo.

Discusión

El índice de área foliar alcanzado por los tratamientos fue mayor durante el segundo año incrementándose un 55% con respecto al generado en el primer año en ambos cultivos. El IAF máximo se registró alrededor de floración en maíz e inicio de formación de granos en soja y luego comenzó a decaer. El cultivo de soja presentó una mayor plasticidad en la estructura de canopeo que el maíz, con una mayor respuesta al aporte de agua con incrementos de 70% en el tratamiento TR3 con respecto a secano (Tabla 3.8), mientras que en maíz la respuesta fue de 10% en coincidencia con lo encontrado por Otegui *et al.* (1995).

La capacidad de generación y mantenimiento del IAF en soja y maíz en función de la disponibilidad de agua se debió a ajustes en el número, tamaño y senescencia de las hojas. El aporte de riego afectó la duración del IAF a través del retraso de la tasa de senescencia en maíz, mientras que en soja este efecto fue mucho menor, si bien las mayores reducciones en el área foliar se dieron bajo condiciones de menor disponibilidad de agua (Figura 3.1).

En maíz a partir de floración, el IAF comenzó a disminuir debido a la reducción del número de hojas, producto del aumento de la senescencia foliar asociada al inicio de la etapa reproductiva en coincidencia con lo encontrado por Borrás *et al.* (2003) y acentuado por la restricción hídrica (Figura 3.1). En soja, el riego incrementó el IAF como resultado de aumentar levemente el número de hojas y a un gran impacto en el tamaño de las hojas con incrementos de más de 60% en los tratamientos sin restricción hídrica en coincidencia con lo reportado por Sivakumar y Shaw (1978). En girasol, Granier y Tardieu (1999) determinaron que el déficit hídrico provocó mayor reducción del área foliar, cuando la hoja se encontraba en la etapa de división celular y su impacto fue menor en la etapa de expansión celular de la hoja. En los tratamientos

secano y TR1 las hojas estuvieron expuestas a estas condiciones resultando en un menor área foliar. En el primer año no se logró alcanzar el 90% de intercepción de radiación incidente, determinado como la máxima intercepción en maíz (Maddonni y Otegui, 1996). En el segundo año TR3, alcanzó estos valores de intercepción con un IAF de 4,4. Farré y Faci (2006) determinaron intercepciones máximas de 91% en tratamientos sin restricción hídrica. En los tratamientos de menor disponibilidad de agua se obtuvieron IAF máximos similares a TR3. Sin embargo, a pesar de haber alcanzado el IAF crítico, no lograron alcanzar los niveles de intercepción de radiación de TR3 debido a modificaciones en la arquitectura del canopeo bajo estrés hídrico, que reducen el área foliar expuesta a la radiación incidente (Farré y Faci, 2006).

En soja, Baigorri *et al.* (1997) citan como valores de IAF crítico entre 3,1-4,5, similar al alcanzado por TR3 en 2010. En 2011 todos los tratamientos lograron $IAF > 4$, pero la condición de estrés hídrico experimentada por cada tratamiento, determinó la reducción de la captura de radiación.

Producción de Biomasa

El cultivo de maíz presentó una mayor capacidad de generación de biomasa y una mayor capacidad de respuesta a la disponibilidad de agua que la soja. Independientemente del tratamiento de riego aplicado, el cultivo de maíz presentó durante los dos años un crecimiento 3,1 veces mayor al de soja, hasta el periodo de inicio de llenado de granos. La biomasa aérea acumulada promedio a madurez fisiológica fue 1,7 veces superior a la de soja, similar a 1,87 reportado por Andrade (1995) en cultivos conducidos bajo riego. Estas diferencias podrían deberse a la composición química de las diferentes estructuras y a una mayor EUR del maíz, expresada en equivalentes glucosa reportada por Faraldo *et al.* (2011), coincidente con

Andrade (1995), que resaltó la mayor eficiencia del maíz por tratarse de una especie C4 y al mayor costo energético para producción de aceite en soja.

El efecto de los tratamientos de riego comenzó a manifestarse luego del periodo vegetativo (956 °Cd), a partir de R3 en soja y R1 en maíz. Coincidentemente con lo reportado por Andriani *et al.* (1997), cuando el cultivo de soja inicia el período reproductivo (R1) comienza el periodo de mayor sensibilidad al déficit hídrico y se acentúa durante R5–R7; donde la restricción en la tasa de crecimiento determina la biomasa acumulada y el rendimiento obtenido (Board *et al.*, 2005).

En el segundo año de ensayo la biomasa acumulada fue mayor que en el primer año en todos los tratamientos. Posiblemente, la menor producción de biomasa lograda en el primer año tanto en maíz como en soja se deba a un estrés inicial sufrido durante noviembre donde solo precipitaron 19 mm (Tabla 2.3). El sistema radical solo había profundizado hasta el momento 40 cm (Figura 4.1) y el contenido de agua útil de ese estrato era de tan solo 12%, lo que expuso al cultivo a condiciones de déficit. La ocurrencia de periodos de estrés durante la etapa vegetativa puede producir reducción del rendimiento en el cultivo de maíz (Igbadun *et al.*, 2006; 2007), al igual que en soja (Andriani *et al.*, 1997).

Eficiencia en el uso de radiación

En maíz, el aporte de láminas crecientes de riego modificó la EUR de emergencia a madurez fisiológica, manteniéndose elevada en el tratamiento bien provisto de agua (TR3), entre 3,33 y 3,27 g Mj⁻¹ para los años 2010 y 2011. Estos valores están en el rango de 3,2 a 3,4 g Mj⁻¹ reportados por Sinclair *et al.* (1999) y ligeramente inferiores a 3,5 g Mj⁻¹ medidos por Kiniry *et al.* (1989) en un vertisol de Australia. Andrade (1995), en el SE de Buenos Aires, reportó EUR de 2,77 g Mj⁻¹ para todo el ciclo del cultivo de maíz, valores similares a TR1 y TR2. En la etapa vegetativa se registraron valores más

altos de EUR que en la etapa reproductiva, sin diferencias entre los tratamientos. A partir de la etapa reproductiva se evidenciaron diferencias entre los tratamientos a favor de la disponibilidad de agua. Durante la etapa de llenado de granos normalmente se produce una disminución en la EUR asociada a la removilización de nitrógeno de las hojas hacia los granos (Sinclair *et al.*, 1999). En este estudio el estrés hídrico aumentó este efecto, siendo seco el tratamiento más afectado con EUR de 1,96 y 0,61 g Mj⁻¹ para los años 2010 y 2011, respectivamente. Durante la etapa reproductiva, solo TR3 mantuvo valores cercanos a los citados por Sinclair *et al.* (1999). La reducción en la EUR de los otros tratamientos con respecto a TR3 desde la floración, fue producto de la restricción al consumo de agua, al incrementar la senescencia foliar y disminuir la tasa fotosintética del área foliar remanente (Guiamet *et al.*, 2010; Qi *et al.*, 2012), Estos procesos redujeron la tasa de crecimiento y la acumulación de materia seca a pesar de generar escasos cambios en la radiación interceptada con el área funcional remanente.

Los valores de EUR en soja resultaron inferiores a los de maíz; no solo por tratarse de un especie C3, sino también por el alto costo energético de la acumulación de nitrógeno (Sinclair *et al.*, 1999). Al igual que en maíz la eficiencia de uso de la radiación fue mayor en los tratamientos de riego. TR3 alcanzó en promedio 1,49 g Mj⁻¹, similar a los reportados por Muchow (1985) de 1,32 gr Mj⁻¹ en soja bien provista de agua, pero algo inferiores a los 1,62 g Mj⁻¹ y 1,74 g Mj⁻¹ encontrados por Caviglia *et al.* (2004) y Andrade (1995) respectivamente. Los valores de EUR en los distintos momentos del cultivo nunca lograron alcanzar el valor de 2,04 g Mj⁻¹ promedio de diferentes trabajos reportado por Sinclair (1999).

En la primera etapa del cultivo (E-R3) no se observaron efectos significativos del año y de los tratamientos. Sin embargo, los valores de EUR entre los tratamientos presentaron una variación de 1,13 g Mj⁻¹ en seco a 1,35 g Mj⁻¹ en TR3, promedio de los dos años.

Esto pudo ser producto de que en el primer año el secano presentó la mayor EUR, mientras que los tratamientos con alta disponibilidad de agua presentaron bajas eficiencias de conversión (datos no presentados). Sin embargo, en el segundo se observó un ligero incremento en la eficiencia en función de la disponibilidad de agua (datos no presentados). El comportamiento observado en el primer año pudo deberse a que el IAF de secano fue muy bajo de 0,4 a 1,5 lo que habría mejorado la eficiencia de uso por una subestimación de la interceptación de la radiación. Muchow (1985) reportó que con valores de interceptación de radiación, al mediodía, inferiores al 50 % se subestima un 25 % la interceptación y esta subestimación aumenta cuanto menor es la interceptación, provocando una sobrestimación en la EUR del orden del 15-20%.

Durante la etapa reproductiva, la EUR se vio afectada por la disponibilidad de agua en cada tratamiento. La cual pudo ser debida a la incapacidad de los cultivos de sostener la demanda hídrica ambiental y manifestar estrés hídrico. Esta situación se asemejaría a la descrita por Muchow (1985) donde el cambio de una condición de bien provisto a desecamiento provoca una reducción relativa de la interceptación de la radiación mucho menor que la reducción de la EUR, dado que las hojas senescentes continúan interceptando. Por otra parte el estrés hídrico reduce la conductancia estomática que está directamente relacionada con la tasa de fotosíntesis neta (Neysobouri y Hatfield, 1986). Otro efecto del estrés hídrico sin el cierre estomático que pudo causar la reducción de la EUR es la inhibición de la fotosíntesis por sobrecalentamiento consecuencia de la reducción del enfriamiento transpiratorio (Stöckle y Kemanian 2009).

En el tratamiento TR3 sin limitaciones hídricas la EUR en soja fue constante a lo largo de todo el ciclo como lo reportado por Andrade (1995) sin disminución en la etapa

reproductiva a pesar del mayor valor energético de los granos y al alto costo energético de la acumulación de nitrógeno.

Rendimiento y componentes del rendimiento

El aporte de riego suplementario incrementó el número de estructuras reproductivas por m^{-2} de los cultivos de maíz y soja. En términos generales, el aporte de riego logró disminuir el nivel de estrés posibilitando mayor generación de biomasa y estructuras reproductivas, coincidente con las respuestas presentadas por Della Maggiora *et al.* (2000) en diferentes cultivos ante el aporte de riego.

En maíz, el aumento de rendimiento por el riego estuvo asociado con la biomasa acumulada en el ciclo, dado que no hubo diferencias importantes en el índice de cosecha. El número de granos, principal componente del rendimiento, aumentó con el riego a partir de una mayor fijación de granos por espiga y al aumento del número de espigas por la fijación de espigas secundarias en TR2 y TR3 como consecuencia del incremento de la tasa de crecimiento alrededor de floración. La tasa de crecimiento del cultivo en el periodo crítico superó el umbral de $1,6 \text{ g pl d}^{-1}$ propuesto por Vega *et al.* (2001b) y Andrade y Sadras (2000) para la fijación de granos (Figura 3.7). Por otra parte la fijación de granos en espigas secundarias se logró con tasas entre 4 y 5 g pl d^{-1} , inferiores a las reportadas por Andrade y Sadras (2000).

El rendimiento se incrementó gradualmente con el consumo de agua debido al aporte de riego en ambos años alcanzando rendimientos de $1188,3$ y $1552,1 \text{ g m}^{-2}$ en el tratamiento sin restricción hídrica con respuestas superiores al 100%. TR1 y TR2 generaron un rendimiento similar entre ellos con un rendimiento medio de $847,9 \text{ gr m}^{-2}$ con y respuestas medias de 35 y 64% para el primer y segundo año.

El rendimiento promedio de TR3 en los dos años en maíz es coincidente con el potencial de $13,5 \text{ tn ha}^{-1}$ estimado para suelos con características vérticas de Entre Ríos

(Aramburu Merlos *et al.*, 2015). El rendimiento alcanzado en TR3 en el segundo año se encuentra dentro del rango de rendimiento potencial en maíz logrado en Argentina de 21,4 y 17,5 tn ha⁻¹ reportado Salvagiotti (2009). Al cubrir las necesidades nutricionales e hídricas, la matriz del suelo no restringió el rendimiento del cultivo. Sin embargo, cuando el contenido de agua descendió por debajo del umbral de agua útil el rendimiento logrado fue solo el 56% del bien provisto (TR3). Gambin *et al.* (2006) determinaron la importancia de las condiciones de crecimiento en maíz alrededor de floración no solo en la definición del número de granos sino también en el peso potencial de los granos.

La falta de diferencias entre TR1 y TR2 en 2010 se debería al aporte de riego realizado en este último que posibilitó un crecimiento algo mayor hasta el inicio de llenado de granos pero fue insuficiente para lograr un mayor número de granos, disminuyendo el IC. El IAF y la intercepción de radiación fueron similares en los dos tratamientos a lo largo del ciclo. En 2011, se esperaban mayores diferencias asociadas a las láminas de riego aplicadas entre estos tratamientos. La falta de diferencias pudo ser debida a que el contenido agua útil, del primer metro de profundidad durante floración y cuaje se encontraba cercano a punto de marchitez permanente. Las láminas de 30 mm aplicadas en R1 y luego en R1 +18 días en TR2, durante el cuaje de granos, fueron insuficientes a diferencia de lo ocurrido en el TR1 que recibió 30 mm en R1 + 7 días favoreciendo una mayor fijación de granos que la esperada a partir de la lámina total aplicada en el ciclo. Otegui *et al.* (1995) encontraron que el número de granos se relacionó con el consumo de agua durante el periodo crítico. Igbadun *et al.* (2007) reportaron que la reducción del rendimiento fue mayor cuando se suspendió el riego en floración con respecto a otros momentos similar a lo descripto para TR2.

El incremento del rendimiento en maíz estuvo relacionado al aumento lineal del número y peso de granos (Figura 3.6). El incremento del peso de la semilla está relacionado a la disponibilidad de asimilados post anthesis (Borrás *et al.*, 2004). Es probable que en este estudio, el riego mejorara la relación fuente destino durante el periodo crítico al posibilitar una mayor duración del área foliar. El aumento del peso del grano está asociado al aumento de la tasa de crecimiento por planta alrededor de floración, 15 días antes y después de silking, debido a la mayor relación fuente destino (Gambín *et al.*, 2006).

En soja, el riego permitió lograr rendimientos de 743,1 g m⁻², en TR3 con un incremento de 103% en el 2011. En los tratamientos intermedios, la respuesta fue de 34% en ambos años, similar a lo ocurrido en maíz. El rendimiento alcanzado por TR1 y TR2, representó el 66% del logrado por TR3.

El rendimiento se correlacionó con la biomasa acumulada, número de granos y al IAF durante el llenado de granos. La tasa de crecimiento durante el periodo crítico se relacionó con el número de granos similar a lo reportado por Vega *et al.* (2001b) y Egli (2005), las TCC alcanzadas en TR3 fueron semejantes a las de Kantolic *et al.* (2013) quienes alcanzaron el máximo número de granos con TCC próximas a 20 g m⁻²d⁻¹ (Figura 3.8).

La mejora de las condiciones de crecimiento generó y fijó un gran número de vainas y granos con mayor respuesta que en el cultivo de maíz. Pero el incremento del número de granos redujo el peso de los granos en -0,015 g por cada grano adicional (Figura 3.6). Las condiciones que favorecieron la fijación de granos en soja generaron competencia de destinos, debido a la co-limitación de fuente/destino que redujo el peso de granos por menor disponibilidad de asimilados similar a lo reportado por Borrás *et al.* (2004).

CAPITULO IV: Economía del agua. Disponibilidad de agua y su utilización

En los vertisoles, la disponibilidad de agua para las plantas está afectada por la dificultad para captar agua, debido a la reducción de la infiltración por la expansión de las arcillas por humedecimiento (Unger, 1982) y la consecuente reducción de la precipitación efectiva (Beney *et al.*, 1976; Kinderknecht *et al.*, 2004). Por otro lado la capacidad de almacenaje de agua útil se ve disminuida por el alto contenido de arcillas expandibles (Castiglione y Morrás, 2007), aumentando la retención hídrica, con valores de humedad volumétrica de 53% (Benavídez *et al.*, 1998), pero no el agua útil (Tasi y Wilson, 2007).

Otro efecto de esta textura es la distribución desuniforme de las raíces por las grietas y el suelo adyacente a las mismas (Passioura, 2002, Dardanelli *et al.*, 2003a) lo que sumado a la impedancia mecánica (Micucci y Taboada, 2006), reduce el aprovechamiento de agua (Amato y Ritchie, 2002). El crecimiento agrupado genera señales que reducen la tasa crecimiento (Passioura, 2002). En este sentido, Dardanelli *et al.*, (2003b) observaron en argiudoles vérticos un retraso de 10 días en alcanzar profundidades similares a suelos sin limitaciones.

La evapotranspiración de los cultivos es limitada por la oferta hídrica (Dardanelli *et al.*, 2004). En ausencia de restricción hídrica, el cultivo de maíz logra consumos de agua de 550 mm (Uhart *et al.*, 1996; Andriani, 2000) y el de soja de 630 mm en la región pampeana (Weir *et al.*, 2008). El consumo de agua se encuentra estrechamente relacionado con la producción de biomasa y rendimiento (Purcell *et al.*, 2007; Nagore *et al.*, 2014).

Las características del enraizamiento de maíz y soja en cuanto a la capacidad de profundización y exploración del perfil pueden generar diferencias en el aprovechamiento del agua y la respuesta al riego, particularmente en los vertisoles

Materiales y métodos

Exploración radical

La exploración radical se determinó mediante la realización de perfiles verticales de distribución de raíces en los tratamientos secano y TR3 en ambos cultivos, a través del seguimiento y profundización de calicatas. Sobre la cara expuesta de la calicata, perpendicular a las hileras de cultivo, se descubrieron las raíces mediante la acción de un cuchillo con el cual se exfolió el perfil para eliminar el efecto de alisado producido por la pala, que impedía observar las raíces. Una vez finalizado este procedimiento se colocó una cuadrícula de 70 cm de largo por 50 cm de ancho con celdas de 2 x 2 cm ubicada de manera de abarcar 2 líneas de cultivo.

La distribución y abundancia de raíces en el perfil se determinó mediante el recuento de la proporción de celdas ocupadas por raíces con respecto al total de celdas cada 10 cm de profundidad. La abundancia de raíces se cuantificó por medio de una escala de valorización de: 0 (sin raíces), 1 (una raíz pequeña) 2 (dos raíces pequeñas) 3 (más de dos raíces pequeñas o raíces grandes) 4 (más de dos raíces grandes o raíz principal)

En soja se realizaron observaciones en los estadios fenológicos: V6 (vegetativo temprano), R1 (inicio de floración) y R5 (inicio de llenado de granos) de la escala Fehr y Caviness (1977), mientras que en maíz en: V5 (vegetativo temprano), Vt (emergencia de la inflorescencia masculina) y R2 (cuaje e inicio de llenado de granos) de la escala Ritchie y Hanway (1982).

La digitalización del perfil vertical de raíces se realizó sobre una plantilla de Excel en la cual la escala de abundancia fue traducida a una escala de colores asignando a cada celda de Excel la lectura de abundancia de cada celda de la grilla.

La profundización máxima alcanzada en los tratamientos de secano y TR3 se determinó en las calicatas en la etapa fenológica de inicio de llenado de granos en ambos cultivos.

Agua en el suelo

El Agua disponible en el perfil, hasta los 2 m se calculó como la lámina contenida entre límite superior y límite inferior. Para estimar la disponibilidad de agua en el suelo se realizaron mediciones de humedad gravimétrica cada 15 días hasta los 2 m, desde la siembra y previo a cada riego. Las muestras extraídas se secaron en estufa a 105°C por 48 hs. En el segundo año, las mediciones de humedad se realizaron con sonda de neutrones, Troxler, modelo 4302 y se complementaron con muestreos de suelo.

La precipitación efectiva se estimó mediante el método de la Curva Número (USDA 1969) ajustado por Scotta y Paparotti (1989), teniendo en cuenta la condición de humedad antecedente para cada evento y condición del cultivo, referido al grado de cobertura del suelo y el grupo hidrológico del suelo.

Consumo de agua

El consumo de agua se calculó en intervalos máximos de 15 días en base a la variación del almacenaje de agua hasta los 2 m de profundidad entre dos muestreos sucesivos y los aportes de precipitación efectiva y riego expresados en milímetros de agua utilizando la siguiente ecuación:

$$ETc = P_{ef} \pm \Delta Alm + R$$

Donde ET_c es el consumo de agua en mm entre dos muestreos sucesivos, P_{ef} es la precipitación efectiva en mm, ΔAlm es la variación de la lámina de agua en suelo entre dos muestreos sucesivos en mm, y R es el aporte de riego en mm durante el intervalo.

Comparando la ETP y la evaporación del tanque A con el consumo promedio diario de los períodos evaluados del tratamiento TR3, se calculó el coeficiente de cultivo (K_c) para maíz y soja.

Eficiencia del uso del agua

La eficiencia del uso del agua (EUA) se calculó mediante la relación entre la biomasa aérea acumulada y el consumo de agua acumulado de emergencia a madurez fisiológica, para los siguientes períodos: Período vegetativo desde emergencia a R1 en maíz y desde emergencia a R3 en soja. Período reproductivo, desde R1 a R6 en maíz y de R3 a R7 en soja. Período crítico de determinación del rendimiento, de R1 a R3 en maíz y de R3 a R5 en soja. Período de llenado de granos, de R3 a R6 en maíz y de R5 a R7 en soja. Donde la EUA es el valor de la pendiente en la regresión ajustada entre la biomasa aérea y el consumo de agua. Además se calculó la EUA ajustada por déficit de presión de vapor, donde el consumo de agua se corrigió dividiendo su valor por el DPV diurno medio. Para estimar el DPV diurno, se aplicó el factor de ponderación 0,72 sugerido por Abbate *et al.* (2004).

$$DPVd = (e^{\circ}_{T_{max}} * 0,72 + e^{\circ}_{T_{min}} - (e^{\circ}_{T_{min}} * 0,72)) - e_a$$

Dónde $DPVd$ es déficit de presión de vapor diurno. $e^{\circ}_{T_{max}}$ es la presión de saturación a la temperatura máxima. $e^{\circ}_{T_{min}}$ es la presión de saturación a la temperatura mínima. e_a es la presión de vapor real. 0,72 es el factor de ponderación.

Agua útil

Se determinó como la proporción o fracción de la lámina de agua contenida en el suelo comprendida entre el límite superior y el límite inferior. Cuyos valores oscilan entre 0 y 1.

Umbral crítico de agua útil

La tasa relativa de evapotranspiración es afectada en respuesta a la disminución del contenido de agua útil del suelo o agua disponible para la planta. El concepto general es que no hay reducción en el proceso hasta que la cantidad de agua extraíble cae hasta cierto valor umbral, tras lo cual, el proceso se reduce en proporción al agua extraíble (Ritchie, 1981). El umbral agua disponible para la planta, es el valor para el cual la velocidad de los procesos fisiológicos, en plantas estresadas comienzan a divergir de un valor de referencia (Sadras y Milroy, 1996).

Para esta determinación, se realizó una regresión entre el crecimiento relativo en la biomasa aérea y el contenido de agua útil desde el período de inicio del riego hasta el agotamiento del contenido de agua útil para la profundidad de 30-100 cm, donde esta tomó valores entre 0 y 1, para los contenidos de agua útil entre el límite inferior y límite superior respectivamente. El período posterior de recuperación del contenido de agua útil, no fue considerado. El crecimiento relativo se expresó como el cociente de la biomasa aérea generada entre cada tratamiento y TR3, donde esta asumió un valor entre 0 y 1. Se consideró que por debajo del valor de 0,9 el crecimiento se encuentra limitado. La profundidad de 0-30 cm, fue excluida del análisis para minimizar el efecto de la evaporación del suelo ya que presentó contenidos de humedad por debajo del límite inferior.

Para comprobar la consistencia de la regresión del umbral crítico, se comparó la biomasa acumulada para cada cultivo con el contenido de agua útil presente en el

secano en los estratos 30-100 cm y 0-200 cm, considerando que en 0-200 cm el efecto de la evaporación del suelo de 0-30 cm se reduce.

La evolución del agua útil se realizó mediante el seguimiento del contenido de agua del suelo en cada momento de muestreo expresado en porcentaje del agua útil de 0-100cm y de 0-200 cm profundidad.

Para estimar las diferencias en el comportamiento de maíz y soja en el agotamiento de agua del suelo se comparó el contenido mínimo de agua alcanzado en cada estrato durante el ciclo de crecimiento de los cultivos.

Temperatura de la canopia

En el año 2011 se realizaron mediciones de temperatura de aire y canopia en el estrato superior cada 15 días con un termómetro infrarrojo (OMEGA OS-562). Cada dato fue el promedio de tres mediciones, las que se realizaron entre las 13 y 15 hs, en un ángulo de 30° y a 30 cm de distancia de la canopia y con la sonda del termómetro ubicada a la misma altura de medición para medir la temperatura del aire.

Índice de estrés

Las mediciones temperatura del aire y la canopia se utilizaron para calcular el grado de estrés hídrico del cultivo en función del déficit de presión de vapor registrado el día de la medición. Se calculó el CWSI (Índice de estrés hídrico del cultivo) utilizando las ecuaciones de Idso (1982) para soja y Cárcova *et al.* (1998) para maíz.

$$CWSI = [(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{LB}] / [(T_c - T_a)_{UB} - (T_c - T_a)_{LB}]$$

Donde T_c , es la temperatura de la canopia, T_a , es la temperatura del aire, LB es línea base inferior que indica la diferencia de temperatura del cultivo sin estrés y UB línea base superior que indica la diferencia de temperatura del cultivo estresado.

Análisis estadístico

Para la variable consumo de agua, se realizó la comparación del efecto año, tratamiento y cultivo, a través del análisis de medidas repetidas en el tiempo por medio de modelos lineales mixtos del software R project, para corregir la falta de homocedasticidad en algunos tratamientos, se asumió el ajuste de heteroscedasticidad agrupada por tiempo (Di Rienzo, 2011).

Para la comparación entre años se eliminó del análisis el tratamiento TR1, debido a que en el año 2010 se dio por perdido a este tratamiento en el cultivo de soja. Por lo tanto las comparaciones entre años incluyeron a los tratamientos secano, TR2 y TR3. Se abrió el análisis por año cuando se encontró efecto año, donde se incluyó al tratamiento TR1 en este análisis.

Las medias de los tratamientos se compararon mediante el test de comparación múltiple de medias de LSD Fisher ($p < 0,05$).

Se ajustaron regresiones lineales entre biomasa y consumo de agua acumulado para calcular la EUA. El efecto de los tratamientos en las regresiones se evaluó por medio de la utilización del análisis de regresiones con variables Dummy del paquete InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2016).

Por otra parte se analizaron relaciones entre variables indicativas del funcionamiento del cultivo (ej: agua útil, temperatura de la canopia, etc.) y las variables respuesta (Biomasa aérea, IAF y rendimiento).

Resultados

Perfil de raíces. Crecimiento del sistema radical

Los perfiles de raíces realizados en maíz y soja en los tratamientos secano y TR3, permitieron observar la evolución en la profundización y colonización del sistema radical de ambos cultivos.

En 2010 el sistema radical en maíz presentó en el estado fenológico de (V7) una profundización de 40 cm y en floración (R1) 150 cm, donde la colonización fue mayor bajo riego. En los primeros 40 cm, se observó 80 % de colonización contra 57% logrado en secano. Entre los 40 y 100 cm de profundidad la colonización fue similar en ambos tratamientos. Por debajo de los 100 cm secano presentó mayores valores de colonización que TR3 (Figura 4.2).

En soja, el sistema radical alcanzó una profundidad de 140 cm en R2 con una colonización superior al 50 % en los primeros 40 cm. La máxima profundidad fue 183 cm en R5,5 con importante colonización superficial, que decreció marcadamente entre los 30 y 40 cm de profundidad (con valores inferiores al 30 %) y por debajo del metro (inferiores al 15 %). Tanto en maíz como en soja se observó una abundante concentración de raíces en el primer metro de profundidad con distribuciones agrupadas de raíces sobre las grietas (Figura 4.1). Hasta el primer metro, los valores de colonización fueron de 41 % y 32 % para TR3 y secano.

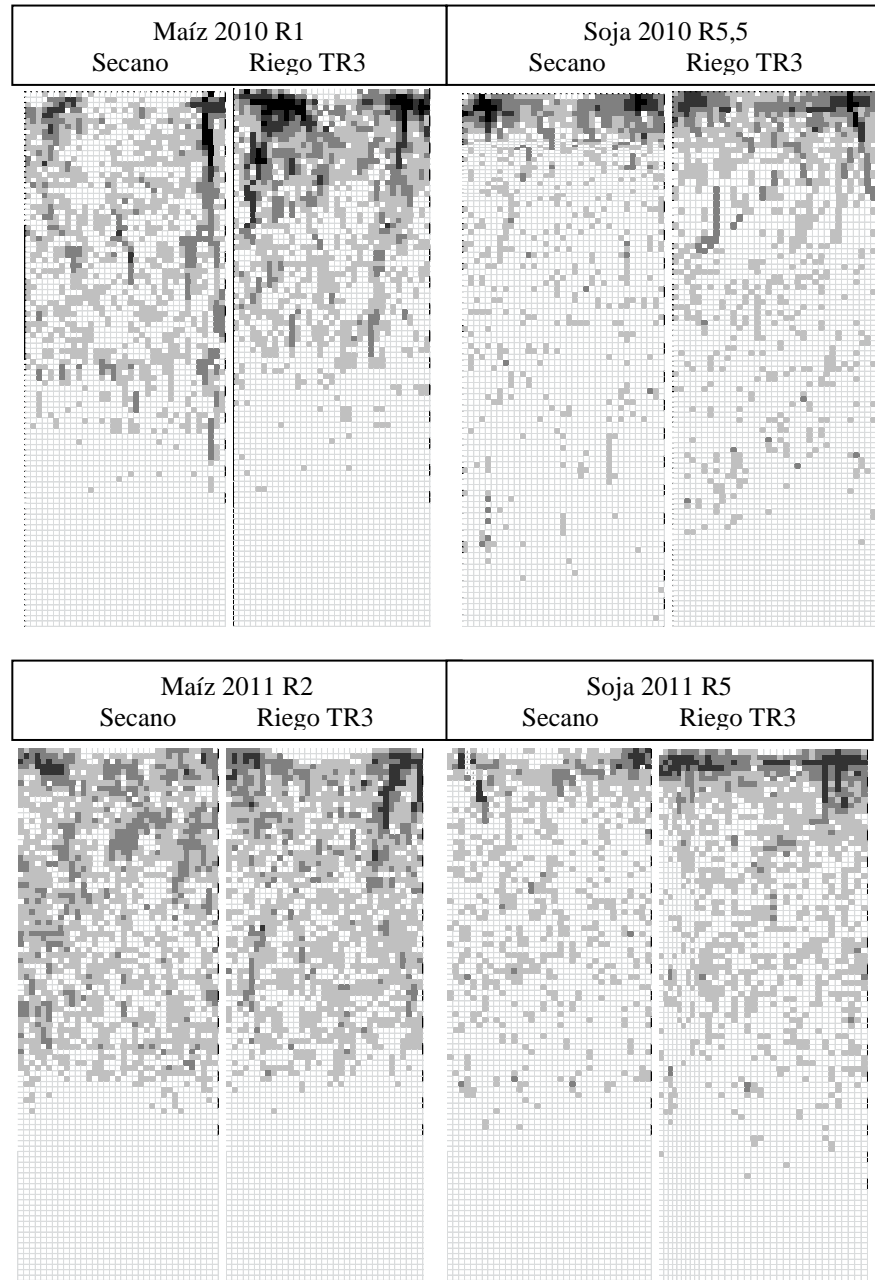


Figura 4. 1 Mapa de distribución de raíces de soja y maíz hasta los 2 m de profundidad en secano y riego en 2010 y 2011. Datos tomados en 70 cm de ancho incluyendo 2 líneas de cultivo consecutivas. Escala de grises indica grado de abundancia de raíces.

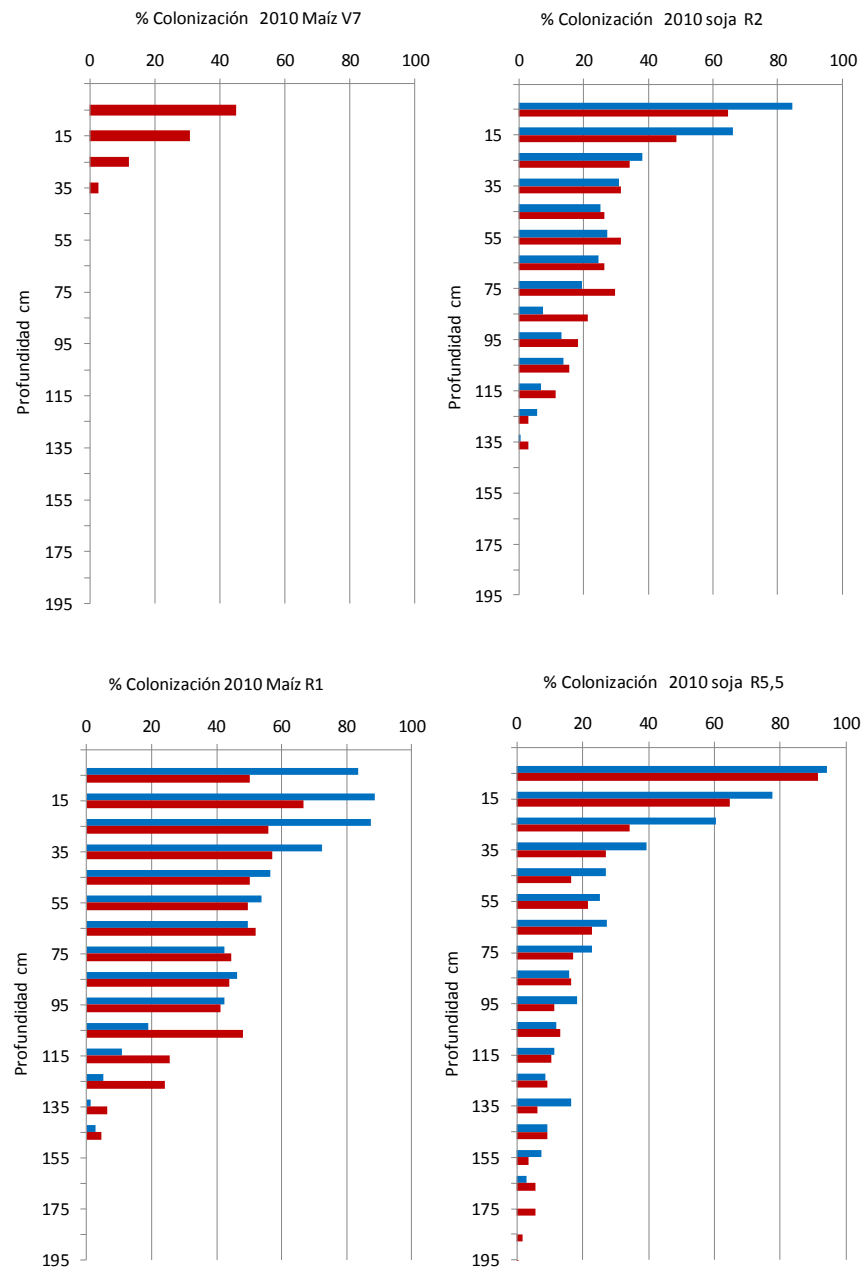


Figura 4. 2: Perfil de raíces de soja y maíz y porcentaje de colonización y profundización dividido en estratos de 10 cm en seco y riego en el año 2010. Secano (barra roja) y riego (barra azul). Datos tomados en 70 cm de ancho incluyendo 2 líneas de cultivo consecutivas.

Durante el segundo año, los perfiles de raíces en maíz mostraron que el avance del sistema radical, presentó una mayor profundización que en 2010, alcanzando 100 cm de profundidad en (V8) y una mayor abundancia de raíces, en cuaje (R2) (Figura 4.1). La profundización máxima alcanzó los 144 cm en R2, (Figura 4.3). Hasta el primer metro, los valores de colonización estuvieron por encima del 50%. Si bien hubo reducción a

partir de los 60 cm, la colonización fue similar entre los tratamientos hasta los 100 cm. Por debajo de esta profundidad, secano presentó mayores valores que TR3 cayendo drásticamente en ambos tratamientos por debajo de los 120 cm.

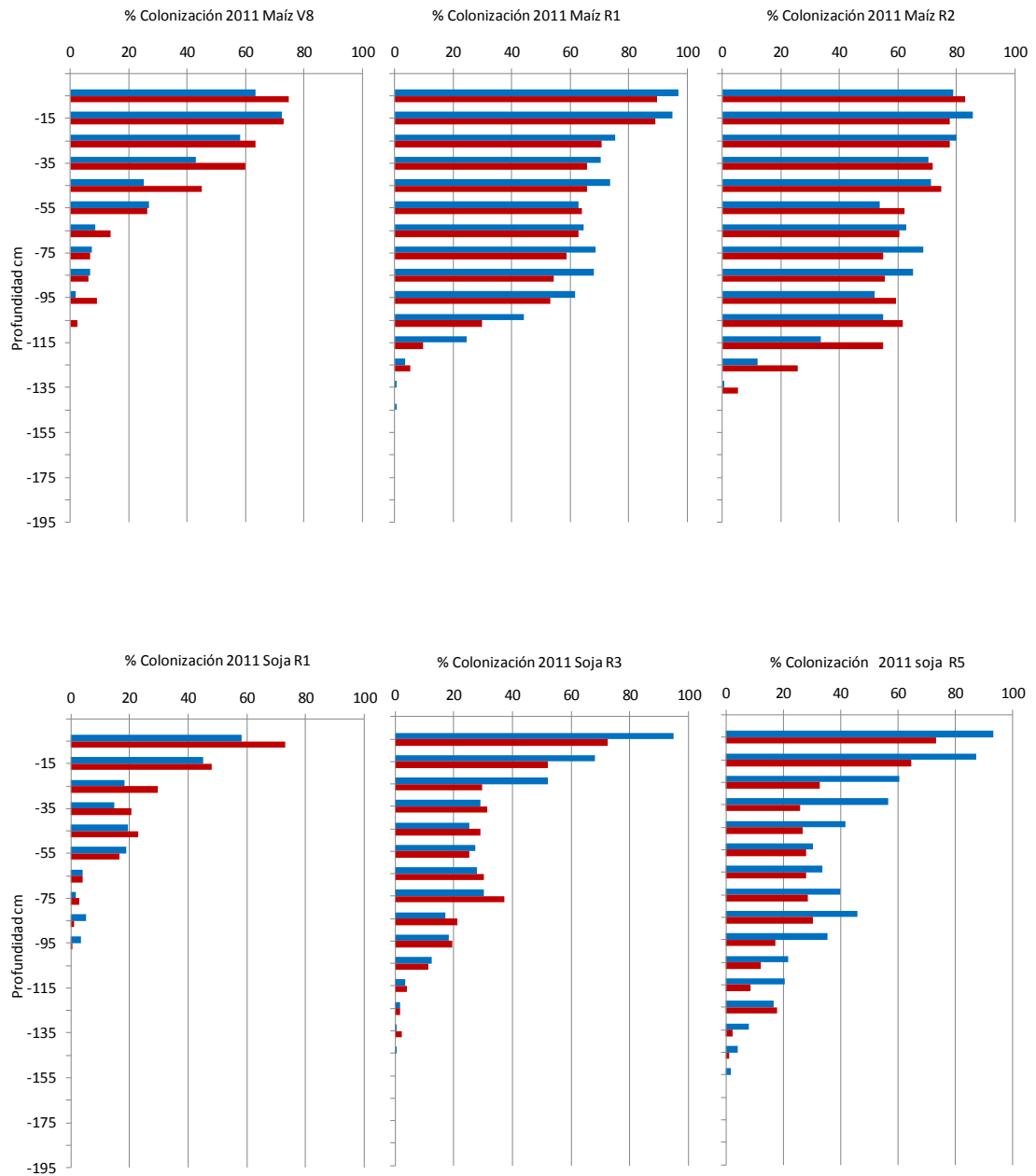


Figura 4. 3: Perfil de raíces del cultivo de soja y maíz en 2011. Porcentaje de colonización y profundización dividido en estratos de 10 cm en la condición de Secano (barra roja) y riego (barra azul). Datos tomados en 70 cm de ancho incluyendo 2 líneas de cultivo consecutivas.

La soja, en el año 2011, alcanzó una profundidad promedio de 160 cm con importante colonización superficial que decreció marcadamente entre los 30 y 40 cm de

profundidad, con valores inferiores al 30 % de colonización en secano. A diferencia del riego que presentó una reducción gradual hasta los 60 cm y superado este estrato hubo una recuperación en la colonización del suelo. En el primer metro, los valores promedio de colonización fueron de 52 % y 35% para el TR3 y secano, mientras que por debajo del metro presentaron valores inferiores al 20% (Figura 4.3).

En el segundo año, ambos cultivos presentaron una mayor colonización del perfil que en el primero, con una distribución agrupada sobre las grietas. Entre los 50 y 70 cm de profundidad en coincidencia con el horizonte B_{22t}, se observó una gran restricción para la exploración de raíces. Por debajo de los 70 cm se apreció un incremento en la colonización que luego decayó con la profundidad (Figura 4.1).

Evolución del agua útil

El agua útil inicial, acumulada en el perfil del suelo al momento de la emergencia fue algo inferior en el segundo año con respecto primero. El agua útil inicial de 0-100 cm de profundidad fue de 0,68 y 0,54 en 2010 y 2011, respectivamente y 0,65 y 0,58 de 0-200 cm para los mismos años (Figura 4.4).

En maíz durante el 2010 el agua útil en el primer metro de profundidad fue disminuyendo hasta alcanzar en el período de floración valores menores a 0,20 en todos los tratamientos. En secano, el contenido de agua del suelo continuó decayendo hasta alcanzar durante el período de llenado de granos valores por debajo del límite inferior (Figura 4.4). Al momento de floración el agua útil de 0 a 200 cm en todos los tratamientos fue de 0,30. Durante el llenado de granos secano alcanzó contenidos inferiores a 0,12 de agua útil.

En 2011, el agua útil de 0-100 cm de profundidad disminuyó en secano, TR1 y TR2 hasta alcanzar valores por debajo de 0,30 en floración. Mientras que TR3 se mantuvo en valores de 0,50 de agua útil (Figura 4.4).

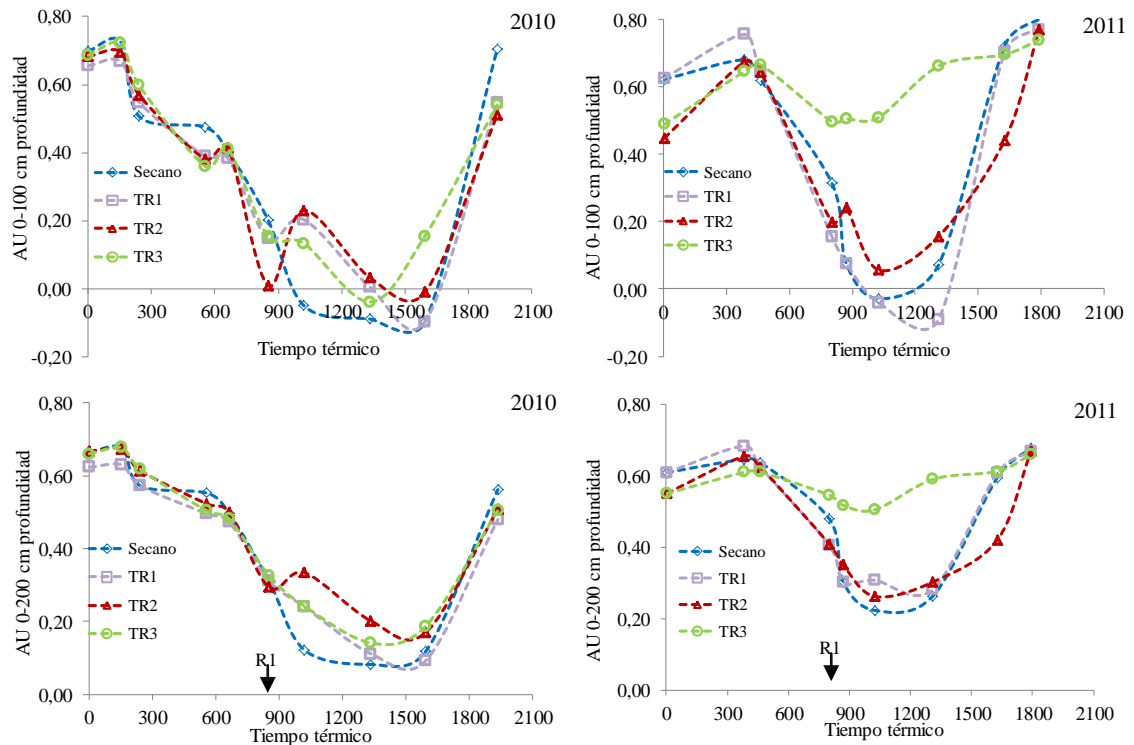


Figura 4. 4: Evolución del agua útil de 0-100 cm y de 0-200 cm de profundidad en los tratamientos de riego para maíz en tiempo térmico, en 2010 y 2011. Secano (rombo azul), TR1 (cuadrado violeta), TR2 (triángulo rojo) y TR3 (círculo verde).

Durante el período de llenado de granos, secano y TR1 alcanzaron tenores de humedad similares al punto de marchitez. El agua útil de 0-200 cm en los tratamientos, TR2, TR1 y secano, alcanzó valores inferiores a 0,48 en floración y a 0,30 durante el llenado de granos mientras que TR3 se mantuvo con valores superiores a 0,55 (Figura 4.4).

En soja, el agua útil inicial fue mayor en el primer año con 0,66 al primer metro y 0,62 hasta los dos metros de profundidad, mientras que en el segundo año fue de 0,52 y 0,56 para 0-100 cm y 0-200 cm respectivamente (Figura 4.5).

En los dos años, el agua útil presente del primer metro en soja decayó a partir de V6-7 (400°Cd) hasta alcanzar el mínimo en R4. La recuperación del contenido de agua útil fue posterior al estado fenológico de R5. En 2010, todos los tratamientos presentaron el mismo patrón, donde el secano y TR1 registraron valores menores a 0,16. La reducción del agua útil de 0 a 200 cm llegó a valores por debajo de 0,22 en secano y TR2 (Figura 4.5).

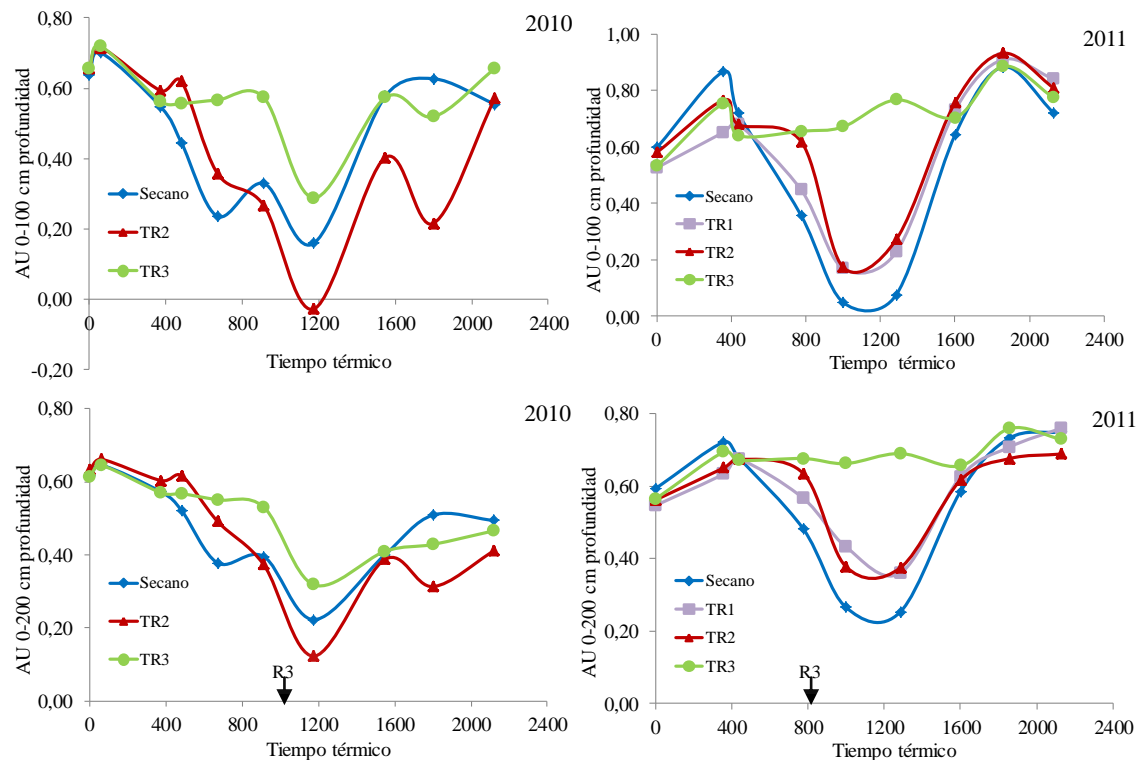


Figura 4. 5: Evolución del agua útil 0-100 cm y 0-200 cm en los tratamientos de riego para soja en tiempo térmico para 2010 y 2011. Secano (rombo azul), TR1 (cuadrado violeta), TR2 (triángulo rojo) y TR3 (círculo verde).

En el segundo año, el tratamiento TR3 mantuvo niveles de agua útil por encima de 0,60, mientras el resto de los tratamientos mostró una disminución a partir de V7 a los 400 °Cdía, alcanzando el mínimo en R4 (999 °Cd) con valores por debajo de 0,17 (Figura 4.5). Al considerar de 0-200 cm la disminución fue menor con valores de 0,38 para TR1 y TR2 y 0,26 para el secano a diferencia de TR3, que se mantuvo por encima del valor inicial de agua útil (Figura 4.5).

Características de extracción de agua del perfil

El agotamiento fue diferente en los dos años presentándose un mayor agotamiento en el primer año con contenidos próximos al límite inferior hasta los 150 cm. En los dos años, se registraron valores por debajo de límite inferior en el estrato de 0-30 cm en todos los tratamientos asociado a la evaporación directa del suelo.

En 2010, el cultivo de maíz en secano presentó mayor agotamiento que la soja desde los 50 cm hasta los 150 cm de profundidad. Superada esta profundidad, la soja dejó menos agua que maíz (Figura 4.6).

En el 2011, las diferencias en el agotamiento hasta los 150 cm fueron menos marcadas entre maíz y soja, por debajo de esta profundidad se observó un mayor agotamiento en soja (Figura 4.6).

El aporte de riego realizado en TR3 durante los dos años afectó el agotamiento registrándose mayor contenido de agua en todo el perfil del suelo con respecto al resto de los tratamientos. En 2011 el contenido de agua entre 50 y 200 cm nunca decayó por debajo del 0,35 de agua útil en ninguno de los dos cultivos. La menor extracción de agua se observó en el horizonte de 50-70 cm debido a las características de este horizonte y al mayor aporte de riego.

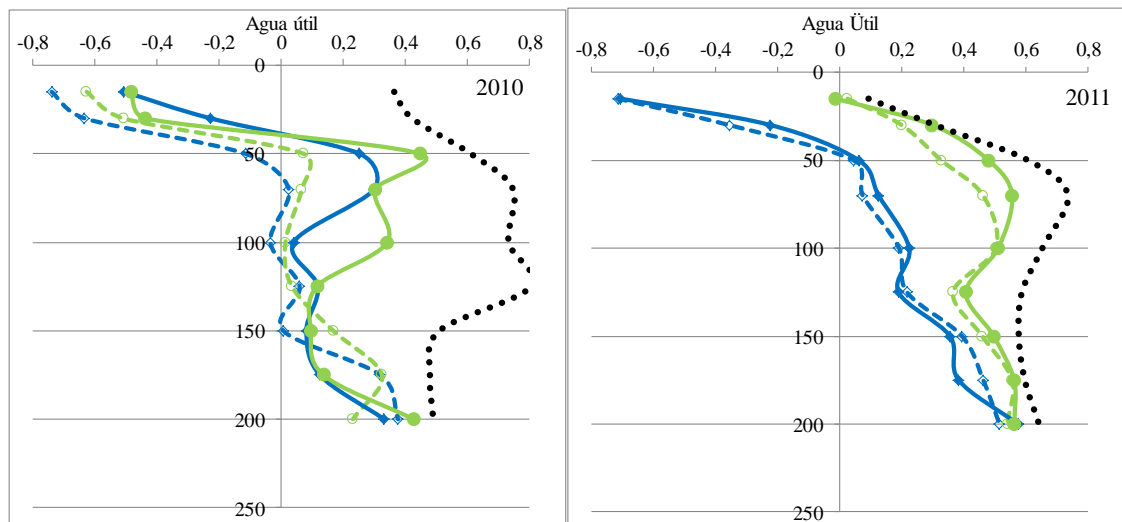


Figura 4. 6: Agotamiento del agua útil del perfil del suelo para 0-200 cm de profundidad en maíz (línea punteada) y soja (línea llena) en los años 2010 y 2011. Tratamientos secano (azul), TR3 (verde). El agua útil inicial de cada año se indica en línea punteada negra.

Consumo de agua

El agua útil inicial almacenada en el suelo hasta los 2 metros de profundidad al momento de la emergencia fue de 198 y 178 mm correspondientes al 0,64 y 0,58 de

agua útil, para las campañas 2010 y 2011, respectivamente. El riego comenzó luego de que los cultivos se implantaron, en el primer año el 3 de diciembre a los 40 días de la emergencia del maíz y 23 días de la emergencia de soja. En el segundo año, el riego se inició el 1 de diciembre a los 28 y 30 días de la emergencia de soja y maíz, respectivamente. Las láminas de riego aplicadas fueron contrastantes entre tratamientos en ambos años generando condiciones hídricas diferentes (Tabla 2.5). La eficiencia de utilización del riego por goteo en los dos años de experimento fue del 80%, permitiendo incrementar la evapotranspiración de los cultivos 0,8 mm por cada mm de riego aportado (Figura 4.7).

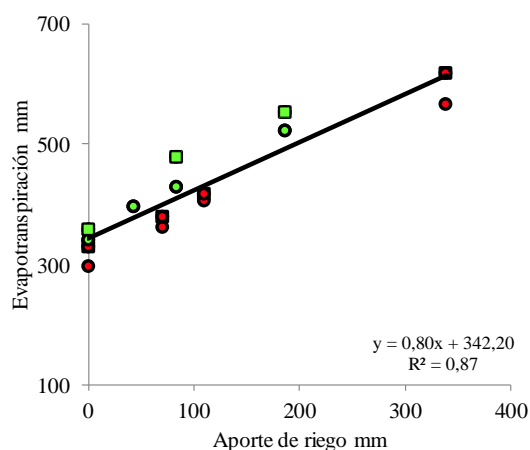


Figura 4. 7: Relación entre evapotranspiración y lámina de riego aportada en maíz y soja en los dos años de ensayo. Cuadrados (soja), círculos (maíz) 2010 en verde y 2011 en rojo.

La evapotranspiración en los dos años de evaluación mostró diferencias según el aporte de riego realizado ($p < 0,0001$). Las diferencias en la disponibilidad hídrica generada en los tratamientos afectó el consumo de agua ($p < 0,0001$). Estas diferencias se manifestaron a los 835 °Cd cuando el cultivo de maíz se encontraba en floración y la soja alrededor del estado de R3 (Tabla 4.1). A partir de este momento el consumo de agua en secano fue inferior al resto de los tratamientos, mientras que TR2 y TR3 no presentaron diferencias. En el inicio de llenado de granos en maíz y R4 en soja TR3 se

diferenció de TR2. Estas diferencias entre los tratamientos se mantuvieron hasta madurez fisiológica.

Tabla 4. 1. Análisis de varianza de la evolución del consumo de agua acumulado en 2010 y 2011 en maíz y soja en distintos momentos expresado en tiempo térmico °Cd.

	Tiempo Térmico desde emergencia °Cd					
	484 (±33)	835 (±46)	1054 (±42)	1316 (±18)	1592 (±22)	1846 (±21)
2010	81,0 h	203,6 f	303,3 d	358,4 c	391,1 b	422,1 a
2011	58,0 i	154,6 g	261,5 e	353,5 c	414,1 a	424,0 a
Secano	67,7 k	163,1 j	245,1 h	282,1 g	299,4 fg	309,2 f
TR2	65,2 k	185,5 i	283,1 g	349,4 e	389,8 d	418,9 c
TR3	75,6 k	188,7 i	319,1 f	436,4 c	518,5 b	542,2 a
Cultivo						
Soja	61,9	171,6	281,0	346,1	387,4	420,9
Maíz	77,1	186,6	283,9	365,8	417,7	426,0
Fuentes de variación						
Año	<0,0001					
Tratamiento	<0,0001					
Cultivo	<0,0001					
Día	<0,0001					
Tratamiento * Año	0,0399					
Tratamiento * Cultivo	0,0007					
Tratamiento * Día	<0,0001					
Año * Cultivo	0,1704					
Año* Día	<0,0001					
Cultivo * Día	0,2665					
Tratamiento *Año * Cultivo	0,1093					
Tratamiento * Año * Día	<0,0001					
Tratamiento * Cultivo * Día	0,4864					

ANOVA realizado con medidas repetidas en el tiempo. Solo fueron incluidos los tratamientos secano, TR2 y TR3, por la pérdida del tratamiento TR1 en soja del año 2010. Periodo comparado hasta madurez fisiológica de maíz y 20 días antes de madurez fisiológica en soja. Letras diferentes indican diferencias significativas test LSD Fisher ($<p 0,05$). Valores entre paréntesis indican dispersión entre cultivos y años en cada momento de muestreo.

La evolución del consumo de agua en 2010 no mostró diferencias entre tratamientos al inicio del riego (477 °Cd y 296 °Cd desde la emergencia del maíz y soja respectivamente). A partir de 881°Cd, se hallaron diferencias significativas, por efecto del riego en el cultivo de maíz (Figura 4.8), donde TR3 fue superior que secano y TR1, con un incremento en la evapotranspiración de 35% con respecto a secano.

Durante el llenado de granos a partir de los 1570 °Cd TR2 se diferenció de secano, junto con TR3. A la madurez fisiológica el consumo de agua logrado por los tratamientos fue de 339, 395, 427 y 521 mm para secano, TR1, TR2 y TR3, respectivamente (Figura 4.8). Lo cual representó un incremento en la evapotranspiración con respecto a secano de 16%, 26 % y 54% respectivamente.

El cultivo de soja, presentó un mayor consumo final asociado con la mayor duración del ciclo. Las diferencias entre los tratamientos debido a la limitación en el consumo comenzaron a los 1097 °Cd, en el estado de R3, donde TR2 y TR3 fueron superiores al secano. El Tratamiento TR3 se diferenció de TR2 y secano, desde el inicio de llenado de granos hasta madurez fisiológica. El consumo alcanzado por los tratamientos fue 358, 478 y 552 mm en secano, TR2 y TR3. La magnitud de la respuesta fue similar al maíz con 32 % y 54 % de incremento para TR2 y TR3, respectivamente, (Figura 4.8).

En el segundo año, el riego se inició a los 424 C°d, después de la emergencia. En maíz el efecto de los tratamientos de riego sobre el consumo de agua se manifestó a partir de los 1012 °Cd en el estado de floración y cuaje, diferenciándose TR3 de los tratamientos secano y TR1, mientras que TR2 se diferenció de secano. Durante el llenado de granos 15 días antes de madurez fisiológica todos los tratamientos se diferenciaron del secano. El consumo final de los tratamientos fue 297, 361, 406 y 565 mm para secano, TR1, TR2 y TR3, respectivamente. En estos tratamientos el consumo fue un 21%, 36% y 90% superior al secano (Figura 4.8).

En soja las diferencias entre tratamientos para la evapotranspiración comenzaron a los 1012 °Cd en el estado fenológico de R3. A partir de R5 hasta madurez fisiológica, todos los tratamientos de riego se diferenciaron de secano. TR3 presentó el mayor

consumo con 617 mm, seguido de TR2 y TR1 con 416 y 378 mm. lo que representó un incremento de 15, 27 y 88 % para los tratamientos TR1, TR2y TR3 respectivamente.

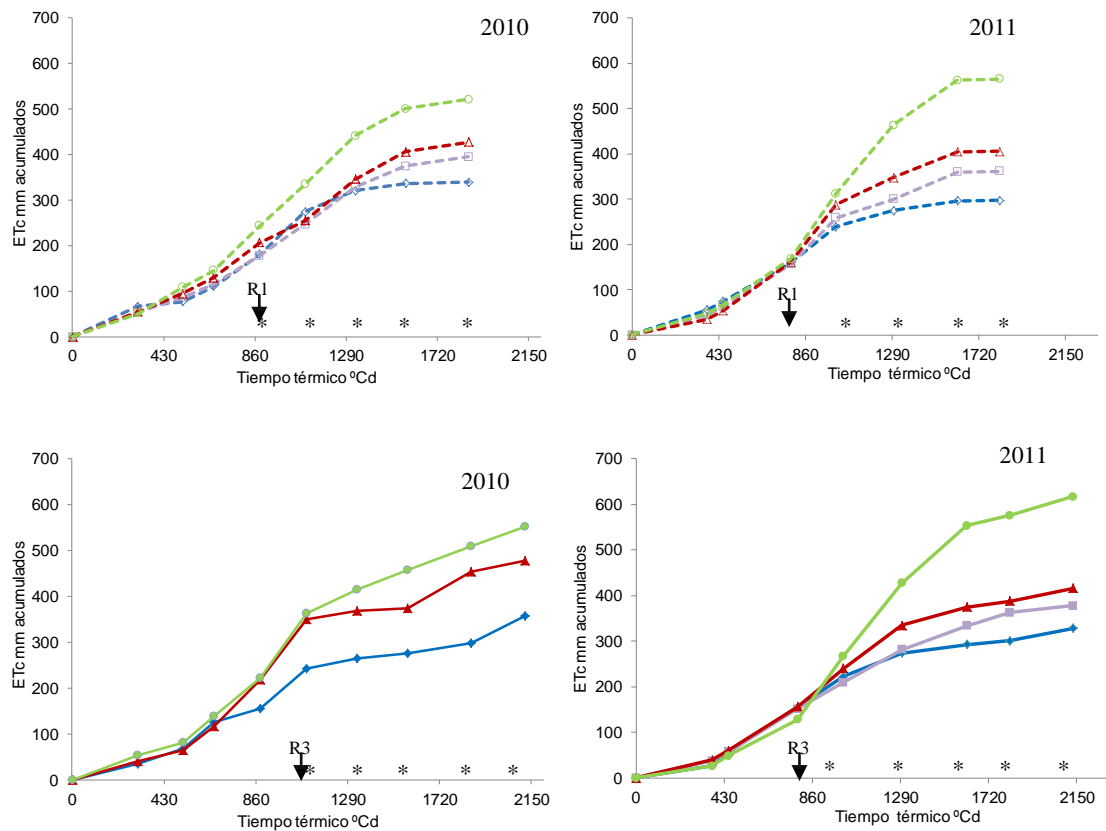


Figura 4. 8: Evolución del consumo de agua en los tratamientos de riego en maíz y soja en función del tiempo térmico desde emergencia. 2010 (izquierda), 2011(derecha). Línea llena (soja) y línea punteada (maíz), para los tratamientos secano (rombo azul), TR1 (cuadrado violeta), TR2 (triángulo rojo) y TR3 (círculo verde). Los asteriscos (*) indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos.

En ambos años la evapotranspiración se mantuvo similar entre los tratamientos hasta las etapas reproductivas. A partir de ese momento, fue limitada por la oferta de agua disponible, acentuando cada vez más las diferencias entre tratamientos, que comenzaron en los estadios que definen el número de granos tanto en maíz como en soja (Figura 4.8).

Evapotranspiración diaria

La evapotranspiración de los cultivos superó la demanda atmosférica a partir de floración en maíz e inicio de formación de vainas en soja. La máxima evapotranspiración diaria coincidió con el inicio de los periodos reproductivos, con

valores de 10 mm d^{-1} en maíz y $9,4 \text{ mm d}^{-1}$ en soja en 2010 y de $11,1 \text{ mm d}^{-1}$ y $10,7 \text{ mm d}^{-1}$, durante el 2011 en el tratamiento TR3. El resto de los tratamientos no logró cubrir la demanda atmosférica. (Figura 4.9).

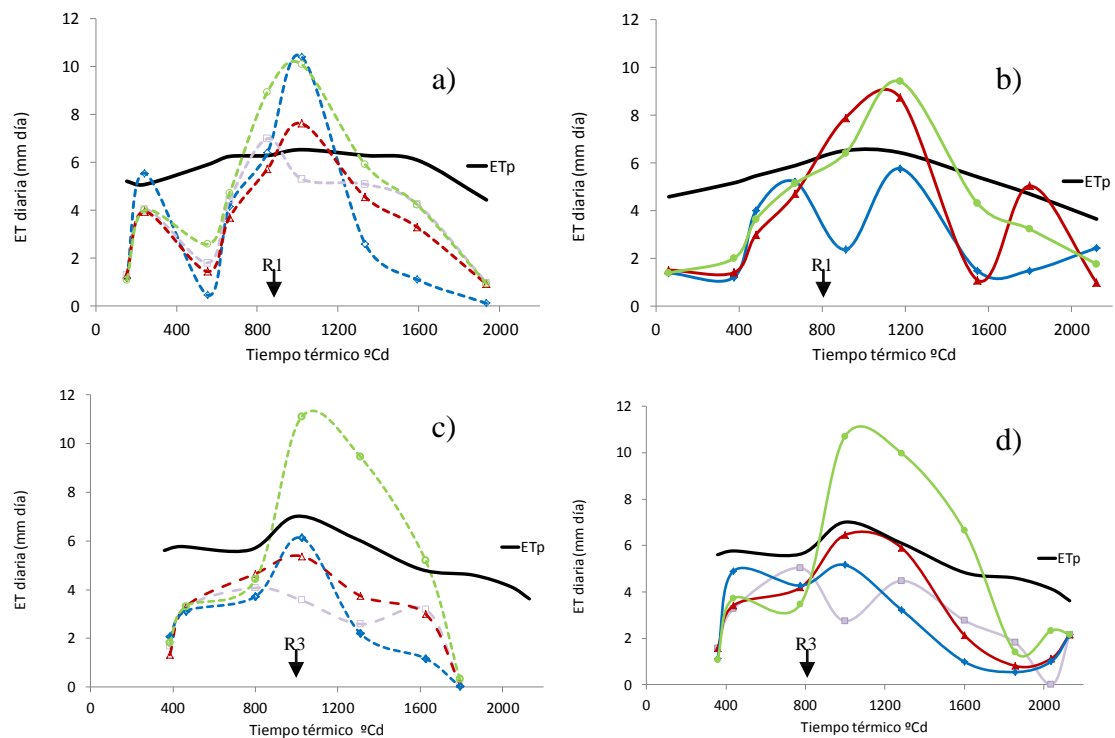


Figura 4. 9: Evolución de la evapotranspiración diaria en mm en los tratamientos de riego para maíz y soja en función del tiempo térmico desde emergencia a madurez fisiológica. a (maíz 2010) , b (soja 2010), c (maíz 2011) y d (soja 2011). Línea negra indica ETp Penman –Monteith. Línea llena (soja) y línea punteada (maíz), para los tratamientos secano (rombo azul), TR1 (cuadrado violeta), TR2 (triángulo rojo) y TR3 (circulo verde).

El coeficiente de cultivo (K_c) permitió evidenciar la capacidad de evapotranspiración que poseen los cultivos con respecto a la demanda atmosférica (ETp) durante el periodo de crecimiento. El k_c de los cultivos se incrementó gradualmente a partir de 0,3 hasta alcanzar valores superiores a 1 luego de los 800 °Cd , con valores máximos promedio para los dos años de 1,59 y 1,53 para maíz y soja respectivamente.

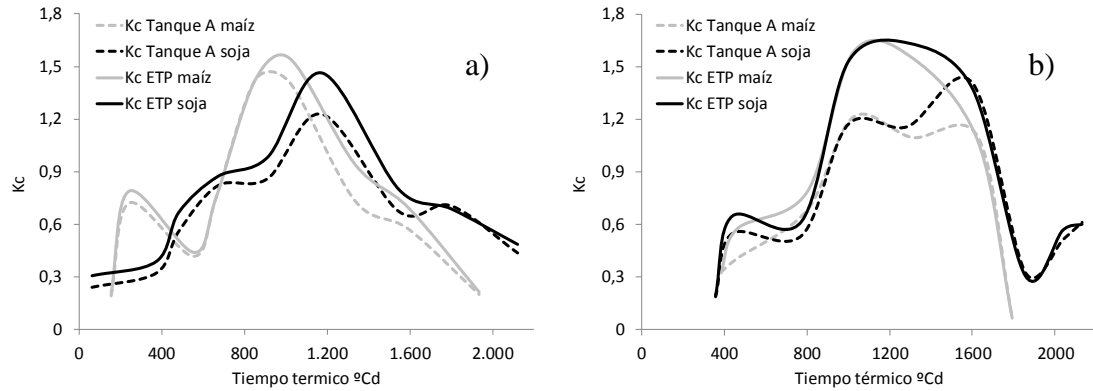


Figura 4. 10: Evolución del Kc calculado con ETP Penman- Monteith y Evaporación Tanque A en los tratamientos de riego para maíz y soja a lo largo del cultivo expresado en tiempo térmico °Cd. a (2010) y b (2011).

Los valores de Kc calculados con tanque A fueron inferiores a los estimados con ETP.

Los valores máximos, calculados con tanque A fueron de 1,31 en maíz y 1,32 en soja para los dos años (Figura 4.10).

El Kc medio obtenido con los valores calculados en 2010 y 2011 muestra la evolución del Kc durante el ciclo desde emergencia a madurez fisiológica para ambos cultivos. El Kc se mantuvo con valores de por encima de 1, durante 700 °Cd, equivalente a 40 días, sin mayores variaciones entre soja y maíz. (Figura 4.11).

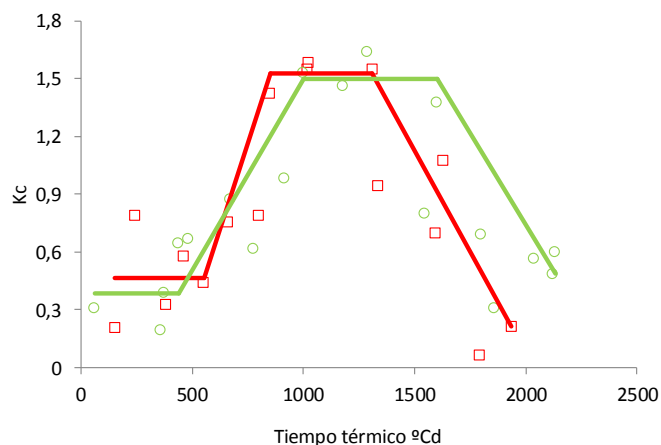


Figura 4. 11: Evolución del Kc medio calculado con ETP Penman- Monteith durante los dos años de ensayo para maíz y soja en tiempo térmico. Línea verde (soja) y línea roja (maíz).

Eficiencia de uso del agua en maíz

La EUA para la generación biomasa aérea en el período de emergencia a madurez fisiológica fue afectada por el aporte de riego en los dos años. El incremento promedio

en TR3 fue de 17% respecto a secano. Durante la etapa vegetativa no se registraron diferencias entre tratamientos, mientras que en la etapa reproductiva, la disminución de la disponibilidad de agua redujo la EUA (Tabla 4.2). Los valores fueron diferentes entre años. En secano, la EUA de E- R6 fue de 3,23 g mm⁻¹ y 4,23 g mm⁻¹, mientras que en TR3 fue de 4,33 g mm⁻¹ y 4,70 g mm⁻¹ para 2010 y 2011, respectivamente (Tabla 4.3), lo que representa un incremento de 34% y 11% respecto al secano.

Durante la fase vegetativa, (emergencia-floración), no se observaron efectos del riego sobre la EUA. En 2011, los valores promedio durante esta etapa fueron superiores a los de 2010, con 4,55 g mm⁻¹ y 3,37 g mm⁻¹ respectivamente. (Tabla 4.3). En la fase reproductiva, TR1 y TR3 mantuvieron los niveles de EUA de la fase vegetativa, mientras TR2 y secano registraron valores inferiores. Asociado a la disminución de la EUA se observó pérdida de biomasa en tallos (datos no presentados) como consecuencia de la removilización con disminuciones del orden del 44 % al 28 % en los tratamientos secano, TR1y TR2 a partir de floración, a diferencia del tratamiento TR3 que presentó reducciones de 17 % y 6 % de la biomasa acumulada en tallos en el 2010 y 2011, respectivamente.

Tabla 4. 2. Efecto del año y los tratamientos de riego en la eficiencia de uso del agua (EUA) g mm⁻¹, en el cultivo de maíz para los años 2010 y 2011 en distintos periodos del ciclo del cultivo: **E-R6** Emergencia-Madurez fisiológica. **E-R1** Emergencia-aparición de estigmas. **R1-R6** Aparición de estigmas-madurez fisiológica. **R1-R3** Aparición de estigmas-inicio de llenado de granos.

	Eficiencia del uso de agua g mm ⁻¹			
	E-R6	E-R1	R1-R6	R1-R3
Año	**	**	**	**
Tratamiento	*	ns	*	ns

Letras diferentes indican diferencias significativas. Nivel de significancia * $p > 0,05$, ** $p > 0,01$.

Durante el periodo crítico, en 2010, la EUA solo disminuyó en TR2, mientras que el resto de los tratamientos mantuvo los niveles de EUA de la etapa vegetativa. En el

2011, no hubo diferencias entre los tratamientos; sin embargo se observó que la EUA tendió a disminuir con la reducción de la disponibilidad de agua.

Tabla 4. 3. Eficiencia de uso del agua (EUA) g mm^{-1} , en el cultivo de maíz en distintos periodos del ciclo del cultivo: **E-R6** Emergencia-Madurez fisiológica. **E-R1** Emergencia-aparición de estigmas. **R1-R6** Aparición de estigmas-madurez fisiológica. **R1-R3** Aparición de estigmas-inicio de llenado de granos.

		Eficiencia de uso del agua g mm^{-1}			
Año	Tratamientos	E-R6 (0-1935°Cd)	E-R2 (0-984°Cd)	R2-R6 (984-1935°Cd)	VT-R3 (752-1266°Cd)
2010	Secano	3,23 a	2,80	3,06 ab	2,59 ab
	TR1	3,69 ab	3,40	3,75 ab	3,14 ab
	TR2	3,77 ab	4,52	2,46 a	1,66 a
	TR3	4,34 b	2,77	4,70 b	3,76 b
		E-R6 (0-1918°Cd)	E-R1 (0-867°Cd)	R1-R6 (867-1918°Cd)	R1-R3 (867-1324°Cd)
2011	Secano	4,23 ab	5,01	1,71 a	2,52
	TR1	4,48 ab	4,46	4,54 ab	3,01
	TR2	4,15 a	4,29	2,97 a	3,56
	TR3	4,70 b	4,46	5,30 b	3,96

Unidades expresadas en °Cd corresponden a tiento térmico de cada periodo. Letras diferentes indican diferencias significativas. $p > 0,05$.

Eficiencia de uso del agua en maíz corregida por DPV

La EUA_{dpv} presentó el mismo comportamiento que la EUA, tanto para todo el ciclo como para las etapas vegetativa y reproductiva. El incremento en la EUA_{dpv} en TR3 con respecto a secano de E-R6 fue de 17%, con $9,63 \text{ g Kpa mm}^{-1}$ de eficiencia alcanzada por TR3 para 2010 y 2011 (Tabla 4. 4). Las diferencias durante la etapa reproductiva fueron significativas entre secano y TR3 con valores de $5,81 \text{ g Kpa mm}^{-1}$ y $10,2 \text{ g Kpa mm}^{-1}$, respectivamente (Tabla 4. 4).

Tabla 4. 4. Efecto del año y los tratamientos de riego en la Eficiencia de uso del agua (EUA) g Kpa mm^{-1} , en el cultivo de maíz para los años 2010 y 2011 en distintos periodos del ciclo del cultivo: **E-R6** Emergencia-Madurez fisiológica. **E-R1** Emergencia-aparición de estigmas. **R1-R6** Aparición de estigmas-madurez fisiológica. **R1-R3** Aparición de estigmas-inicio de llenado de granos.

	Eficiencia de uso del agua corregida por dpv g Kpa mm^{-1}			
	E-R6	E-R1	R1-R6	R1-R3
Año	**	**	**	**
Tratamiento	*	ns	*	*

Letras diferentes indican diferencias significativas. Nivel de significancia * $p > 0,05$, ** $p > 0,01$.

En 2010, la EUA_{dpv} de E-R6 se incrementó con el aumento del nivel de riego un 33% en TR3 con respecto a secano. En 2011, hubo diferencias significativas entre TR2 y TR3 (Tabla 4.5).

Tabla 4. 5. Eficiencia de uso del agua corregida por déficit de presión de vapor (EUA_{dpv}) g Kpa mm^{-1} , en el cultivo de maíz en distintos periodos del ciclo del cultivo: **E-R6** Emergencia-Madurez fisiológica. **E-R1** Emergencia - aparición de estigmas. **R1-R6** Aparición de estigmas-madurez fisiológica. **R1-R3** Aparición de estigmas-inicio de llenado de granos.

Año	Tratamientos	Eficiencia de uso de agua corregida por dpv g Kpa mm^{-1}			
		E-R6 (0-1935°Cd)	E-R2 (0-984°Cd)	R2-R6 (984-1935°Cd)	VT-R3 (752-1266°Cd)
2010	Secano	6,93 a	6,15	6,20 ab	7,98 ab
	TR1	7,85 ab	7,65	7,54 ab	6,66 ab
	TR2	7,93 ab	9,69	4,95 a	3,50 a
	TR3	9,26 b	6,04	9,49 b	7,94 b
2011	Secano	9,15 ab	9,42	2,73 a	8,33
	TR1	9,46 ab	8,56	8,43 ab	8,24
	TR2	8,72 a	8,36	5,27 a	10,41
	TR3	9,82 b	8,64	10,56 b	10,95

Unidades expresadas en °Cd corresponden a tiento térmico de cada periodo. Letras diferentes indican diferencias significativas. $p > 0,05$.

Eficiencia del uso del agua en soja

En el cultivo soja, a diferencia del maíz no se observó incremento de la EUA de emergencia a madurez fisiológica (E-R7) con el aporte de riego, con valores medios de $2,40 \text{ g mm}^{-1}$ en secano y $2,37 \text{ g mm}^{-1}$ en TR3 (Tabla 4.6). La etapa de emergencia a

formación de vainas (E-R3) presentó menor eficiencia que en la etapa de formación de vainas a madurez fisiológica (R3- R7), con valores medios de $1,89 \text{ g mm}^{-1}$ de E-R3, y $3,08 \text{ g mm}^{-1}$ en R3-R7 (Tabla 4.6).

En 2010, en la primera etapa del cultivo E-R3, la EUA en secano fue de $1,38 \text{ g mm}^{-1}$ sin diferencias con los tratamientos de riego, mientras que en 2011, TR2 y TR3 con $2,78 \text{ g mm}^{-1}$ y $2,46 \text{ g mm}^{-1}$ respectivamente se diferenciaron de secano, con $1,84 \text{ g mm}^{-1}$ (Tabla 4.7).

Tabla 4. 6. Efecto del año y los tratamientos de riego en la Eficiencia de uso del agua (EUA) g mm^{-1} , en el cultivo de soja para los años 2010 y 2011 en distintos períodos del ciclo del cultivo: **E-R7** Emergencia-Madurez fisiológica. **E-R3** Emergencia – formación de vainas. **R3-R7** Formación de vainas-madurez fisiológica. **R3-R5** Formación de vainas-inicio de llenado de granos.

	Eficiencia de uso del agua g mm^{-1}			
	E-R7	E-R3	R3-R7	R3-R5
Año	**	**	**	**
Tratamiento	Ns	ns	Ns	ns

Letras diferentes indican diferencias significativas. Nivel de significancia * $p > 0,05$, ** $p > 0,01$.

Durante la etapa de formación de vainas a madurez fisiológica, no se hallaron diferencias significativas entre los tratamientos. Sin embargo, en cada año se observaron comportamientos diferentes en los tratamientos. En 2010, la EUA tendió a aumentar con el aporte de riego. Por el contrario en 2011, la EUA decayó con el aumento de la lámina aplicada (Tabla 4.7). En el período crítico, las EUA fueron similares a las de la etapa vegetativa con un valor promedio de $2,17 \text{ g mm}^{-1}$ en ambos años (Tabla 4.6).

Tabla 4. 7. Eficiencia de uso del agua (EUA) g mm^{-1} , en el cultivo de soja en distintos periodos del ciclo del cultivo: **E-R7** Emergencia-Madurez fisiológica. **E-R3** Emergencia –formación de vainas. **R3-R7** Formación de vainas-madurez fisiológica. **R3-R5** Formación de vainas-inicio de llenado de granos.

		Eficiencia de uso del agua g mm^{-1}			
Año	Tratamientos	E-R7	E-R3	R3-R7	R3-R5
		(0-2121 °Cd)	(0-984 °Cd)	(984-1935 °Cd)	(984-1266 °Cd)
2010	Secano	2,13	1,38	2,63	2,14
	TR1				
	TR2	2,04	0,98	4,00	2,18
	TR3	2,12	1,39	3,59	1,51
		E-R7	E-R3	R3-R7	R3-R5
		(0-2116 °Cd)	(0-923 °Cd)	(923-2116 °Cd)	(923-1533 °Cd)
2011	Secano	2,54 a	1,84 a	3,87	2,97
	TR1	2,90 b	2,42 ab	3,43	2,82
	TR2	2,53 a	2,78 b	2,41	2,04
	TR3	2,45 a	2,46 b	2,53	2,14

Unidades expresadas en °Cd corresponden a tiento térmico de cada periodo. Letras diferentes indican diferencias significativas. $p > 0,05$.

Eficiencia de uso del agua en soja corregida por DPV

La EUA_{dpv} en E-R7 fue afectada por la disponibilidad hídrica en los dos años. TR1 presentó la mayor EUA_{dpv} , diferenciándose de secano y TR3 que alcanzaron valores de 4,77 y 465 $\text{g Kpa m}^{-2} \text{mm}^{-1}$ respectivamente (Tabla 4.8). Durante la etapa de E-R3, no hubo diferencias entre los tratamientos. TR3 presentó una EUA_{dpv} de 4,21 $\text{g Kpa m}^{-2} \text{mm}^{-1}$ en esta etapa, mientras que en la etapa de R3-R7, logro 4,73 $\text{g Kpa m}^{-2} \text{mm}^{-1}$. El resto de los tratamientos también lograron EUA_{dpv} mayores durante la etapa de R3-R7.

En 2010, solamente se observaron diferencias significativas en el periodo de E-R3 donde el tratamiento TR2 presentó la mayor eficiencia. En 2011, durante E-R7, TR1 presentó el mayor valor de EUA_{dpv} . En la etapa de E-R3 el aporte de riego produjo el aumento en la EUA_{dpv} , donde secano presentó valores menores a los de TR2 y TR3 (Tabla 4.9).

Tabla 4. 8. Efecto del año y los tratamientos de riego en la Eficiencia de uso del agua corregida por déficit de presión de vapor (EUA_{dpv}) $g Kpa mm^{-1}$, en el cultivo de soja para los años 2010 y 2011 en distintos periodos del ciclo del cultivo: **E-R7** Emergencia-Madurez fisiológica. **E-R3** Emergencia – formación de vainas. **R3-R7** Formación de vainas-madurez fisiológica. **R3-R5** Formación de vainas-inicio de llenado de granos.

	Eficiencia corregida por dpv $g Kpa mm^{-1}$			
	E-R6	E-R1	R1-R6	R1-R3
Año	**	**	**	**
Tratamiento	*	ns	ns	ns

Letras diferentes indican diferencias significativas. Nivel de significancia * $p > 0,05$, ** $p > 0,01$.

Tabla 4. 9. Eficiencia de uso del agua (EUA) $g mm^{-1}$, en el cultivo de maíz en distintos periodos del ciclo del cultivo: **E-R7** Emergencia-Madurez fisiológica. **E-R3** Emergencia – formación de vainas. **R3-R7** Formación de vainas-madurez fisiológica. **R3-R5** Formación de vainas-inicio de llenado de granos.

Año	Tratamientos	Eficiencia de uso del agua dpv $g Kpa mm^{-1}$			
		E-R7	E-R3	R3-R7	R3-R5
2010	Secano	4,30	3,17 ab	4,32	4,71
	TR1				
	TR2	4,20	2,36 a	5,94	4,95
	TR3	4,31	3,23 b	5,55	4,24
2011	Secano	5,10 ab	3,71 a	6,49	6,32
	TR1	5,75 b	4,50 ab	6,26	6,08
	TR2	4,99 ab	5,69 b	4,19	4,24
	TR3	4,77 a	5,03 b	4,49	4,27

Unidades expresadas en $^{\circ}Cd$ corresponden a tiento térmico de cada periodo. Letras diferentes indican diferencias significativas. $p > 0,05$.

En maíz para la producción de grano, la EUA aumentó con el riego en los dos años con valores superiores a $1,8 g mm^{-1}m^{-2}$ de secano. En los tratamientos TR1 y TR2 la eficiencia fue similar, $2,0 g mm^{-1}m^{-2}$ en 2010 y $2,3 g mm^{-1}m^{-2}$ en 2011, mientras que TR3 alcanzó $2,3 g mm^{-1}m^{-2}$ en 2010 y $2,7 g mm^{-1}m^{-2}$ en 2011. En soja la EUA para la producción de granos no presentó diferencias entre los tratamientos. La eficiencia fue de $0,87 g mm^{-1}m^{-2}$ en 2010 y $1,20 g mm^{-1}m^{-2}$ en 2011.

Limitación al crecimiento ante la disponibilidad de agua

En el cultivo de maíz la tasa de acumulación de biomasa en secano disminuyó después de los $688 ^{\circ}Cd$ momento que coincidió con 8 días aproximadamente (161 y $118 ^{\circ}Cd$) antes de emergencia de estigmas R1 en 2010 y 2011, respectivamente. En ese momento

la proporción de agua útil de secano se encontraba en 0,39 en el estrato 30 a 100 cm y 0,31 en el estrato 0 a 200 cm en 2010. Al segundo año, la respuesta fue similar con valores de agua útil en secano de 0,40 y 0,48 para las mismas profundidades. En los muestreos sucesivos, el agua útil decayó por debajo de los valores mencionados y limitó la producción de biomasa (Tabla 4.10).

Cuando el crecimiento relativo en términos de biomasa fue equivalente al 90% de la generada sin restricción hídrica (TR3) se determinó el umbral crítico. Éste fue 0,40 del agua útil en maíz para ambos años, considerando el estrato de 30-100 cm de profundidad (Figura 4.12).

En 2010, se observaron algunos puntos que dificultaron la asociación del modelo. La causa de esto pudo ser la variabilidad en el muestreo realizado a los 36 días de emergencia, generada por errores de muestreo. Estos valores fueron excluidos de modelo de análisis.

El cultivo de soja, en el primer año, no exhibió diferencias en acumulación de biomasa entre los tratamientos hasta los 688 °Cd (R1). A partir de este estado, el crecimiento disminuyó en secano. Los valores de agua útil a los 688 °Cd fueron de 0,56 y 0,47 en los estratos de 30-100 cm y 0-200 cm, respectivamente (Tabla 4.11). Durante el 2011, al igual que lo observado en el año anterior, la acumulación de biomasa disminuyó después de los 688 °Cd, cuando el cultivo se encontraba en el estado fenológico de R2 con contenidos de agua útil de 0,52 y 0,48 en los estratos de 30-100 y 0-200 cm, respectivamente. El umbral crítico en soja, en función del crecimiento de biomasa relativo se encontraría en 0,50 de agua útil considerando 30-100 cm profundidad a partir de los datos de 2010 y 2011 (Figura 4.13).

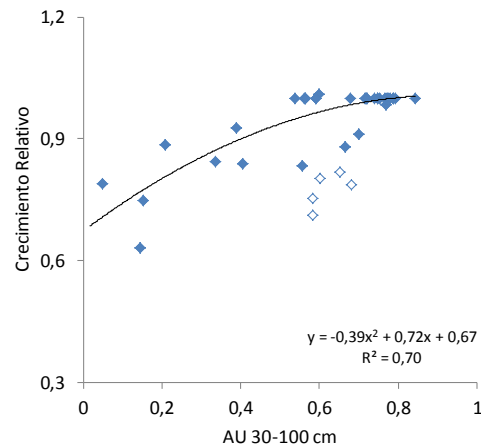


Figura 4. 12: Umbral crítico de agua en el suelo para el cultivo de maíz. Relación entre crecimiento relativo y la proporción de agua útil del perfil del suelo de 30 -100 cm de profundidad para los años 2010 y 2011. Símbolos vacíos indican valores del año 2010 que no fueron incluidos en el ajuste.

Tabla 4. 10. Relación entre la acumulación de biomasa aérea del cultivo de maíz en los tratamientos secano, TR1, TR2 y TR3 y el contenido de agua útil en secano en los estratos de 30-100 cm (AU 30-100 cm) y 0-200 cm de profundidad (AU 0-200 cm) en cada momento de muestreo para los años 2010 y 2011.

		Tiempo térmico desde emergencia					
		483 (±12)	688 (±13)	936 (±11)	1266 (±5)	1519 (±13)	1796 (±3)
2010							
	Secano	170,6 k	419,6 j	669,2 hi	957,4 efg	957,0 efg	1094,4 def
	TR1	139,8 kl	355,7 j	605,7 i	922,6 efg	1141,5 de	1350,3 cd
	TR2	129,9 kl	389,1 j	865,0 fg	1074,2 def	1262,6 cd	1494,2 bc
	TR3	199,3 k	429,6 j	786,6 h	1349,5 cd	1742,4 b	2101,0 a
	AU 30-100 cm	0,67	0,39	0,06	0,05	0,02	0,79
	AU 0-200 cm	0,55	0,31	0,12	0,08	0,12	0,56
2011							
	Secano	263,3 h	741,9 g	1099,5 f	1198,0 ef	1177,9 ef	1166,5 ef
	TR1	295,7 h	778,8 g	1107,2 f	1365,2 de	1540,9 cd	1615,6 cd
	TR2	268,4 h	762,6 g	1215,3 ef	1706,1 c	1616,4 cd	1669,4 cd
	TR3	267,4 h	726,4 g	1312,9 e	1896,1 b	2436,7 a	2698,5 a
	AU 30-100 cm	0,72	0,40	0,15	0,14	0,71	0,78
	AU 0-200 cm	0,64	0,48	0,22	0,26	0,60	0,68

ANOVA realizado con medidas repetidas en el tiempo. Periodo comparado hasta madurez fisiológica de maíz. Letras diferentes indican diferencias significativas test LSD Fisher ($<p 0,05$).

Valores entre paréntesis indican dispersión entre cultivos y años en cada momento de muestreo.

Tabla 4. 11. Reducción de la acumulación de materia seca y la proporción de agua útil de 30-100 cm y 0-200 cm de profundidad en soja presentada en secano en cada momento de muestreo para los años 2010 y 2011.

	Tiempo térmico desde emergencia						
	483 (±12)	688 (±13)	936 (±11)	1266 (±5)	1519 (±13)	1796 (±3)	2121
2010							
Secano	36,4 k	58,3 j	152,9 i	308,3 h	492,0 fg	598,0 def	664,4 de
TR1							
TR2	26,9 kl	50,3 j	168,2 i	316,3 h	593,9 ef	895,4 bc	871,5 c
TR3	44,6 k	65,7 j	326,7 h	433,7 g	713,4 d	1106,3 a	1032,1ab
AU 30-100 cm	0,58	0,56	0,36	0,25	0,12	0,03	0,67
AU 0-200 cm	0,50	0,47	0,31	0,24	0,11	0,09	0,48
2011							
Secano	71,8 l	194,9 k	371,2 i	537,5 h	634,8 fgh	737,1 efg	854,3 cdef
TR1	64,3 l	202,4 k	404,1 ij	661,4 fgh	783,5 def	937,8 cdef	1043,2 bc
TR2	71,1 l	267,9 jk	562,1 gh	747,7 ef	832,9 cdef	982,5 cdef	1007,8 bcd
TR3	63,1 l	239,9 k	528,8 h	998,3 bcd	1079,3 b	1610,3 a	1454,6 a
AU 30-100 cm	0,85	0,52	0,23	0,16	0,71	0,81	0,89
AU 0-200 cm	0,68	0,48	0,27	0,25	0,59	0,73	0,75

ANOVA realizado con medidas repetidas en el tiempo. En el año 2010 solo fueron incluidos los tratamientos secano, TR2 y TR3, por la pérdida del tratamiento TR1. Período comparado hasta madurez fisiológica de soja. Letras diferentes indican diferencias significativas test LSD Fisher ($<p 0,05$).

Valores entre paréntesis indican dispersión entre cultivos y años en cada momento de muestreo.

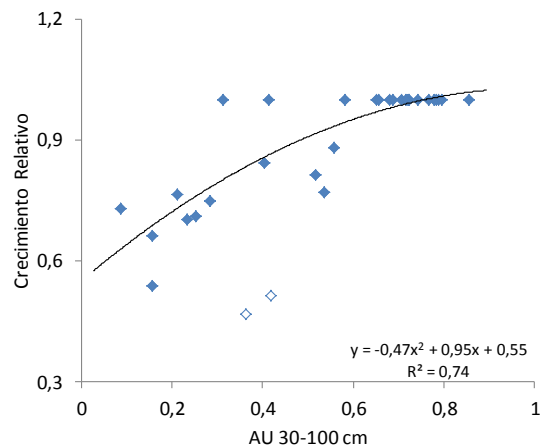


Figura 4. 13: Umbral crítico de agua en el suelo para el cultivo de soja. Relación entre crecimiento relativo del cultivo de soja y la proporción de agua útil del perfil del suelo para el estrato 30 -100 cm de profundidad para el año 2010 y 2011. Símbolos vacíos valores del año 2010 que no fueron incluidos en el ajuste.

La evapotranspiración alcanzada por los cultivos fue el resultado de la utilización del agua inicial almacenada en el suelo hasta su máxima disminución, el aprovechamiento del agua proveniente de la precipitación efectiva y del riego aplicado.

Bajo las condiciones ambientales experimentadas durante los dos años de ensayo con deficiencias hídricas los cultivos extrajeron gran parte del agua útil acumulada en el perfil del suelo dejando como agua útil remanente a madurez fisiológica menos del 22% en maíz y del 25 % en soja para la profundidad de 0-200 cm. La extracción del contenido de agua en secano fue de 206 mm en maíz y 160 mm en soja, con respecto al agua útil inicial almacenada en el suelo en 2010. En 2011, el aprovechamiento fue menor siendo 130 mm en maíz y 125 mm en soja. Estos valores fueron considerados como el aporte de agua del suelo a los cultivos (Tabla 4.12).

Tabla 4. 12. Contribución de los diferentes aportes de agua a la evapotranspiración y al balance hídrico del suelo en maíz y soja.

	2010				2011			
Maíz	Secano	TR3	TR2	TR1	Secano	TR3	TR2	TR1
Aporte pp efectiva	307,6	286,3	293,4	307,6	318,4	259,8	253,9	289,5
Aporte Riego	0	186,9	84,2	44,0	0	339,2	110,1	70,4
Aporte Suelo	206,6	191,6	181,8	193,7	133,1	40,5	115,3	119,9
AU remanente del perfil	0,0	13,0	25,1	0,0	55,3	130	55,7	68,9
Recarga de AU del perfil	175,0	143,4	132,2	149,1	154,6	74,5	74,8	119,4
mm ETc	339,3	521,4	427,3	395,2	296,9	565,1	405,8	361,4
Soja								
Aporte pp efectiva	319,9	319,9	319,9	-	416,1	369,1	384,8	418,4
Aporte Riego	0	186,9	84,2	-	0	339,2	110,1	70,4
Aporte Suelo	160,6	138,1	182,7	-	125,5	31,9	103,1	81,6
AU remanente del perfil	30,2	55,4	13,8	-	58,4	143,1	71,1	83,5
Recuperación AU del perfil	122,9	92,0	113,7	-	213,6	123,4	182,4	192,6
mm ET	357,6	552,0	474,3	-	327,6	616,8	415,6	377,8

El aporte de agua, por parte de la precipitación efectiva en los dos años de experimento varió entre 254mm y 418 mm, en función del contenido de humedad del suelo, que presentó cada tratamiento. Prácticamente la mitad de la precipitación efectiva se produjo hacia el final del ciclo de los cultivos contribuyendo principalmente a la recarga del perfil (Tabla 4.12).

Índice de estrés hídrico por temperatura de canopia

El índice de estrés hídrico (CWSI) determinado en el año 2011, por temperatura de canopia permitió caracterizar el estrés en 3 momentos diferentes del cultivo durante la etapa reproductiva. El tratamiento TR3, sin restricción hídrica, se mantuvo con valores de CWSI cercanos a cero y el resto de los tratamientos incrementaron el CWSI en función de la menor disponibilidad de agua. En maíz, las mediciones realizadas, entre los 8 días después de floración (935 °Cd) y 20 días después de floración (1137 °Cd) se observó el incremento del CWSI mayor a 0,20, asociado a la reducción del crecimiento en los tratamientos secano y TR1 (Tabla 4.13).

Tabla 4. 13. Evaluación del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) en maíz y soja según los distintos tratamientos de riego en diferentes momentos. Datos del año 2011.

TT °Cd	Momentos de muestreo					
	935 °Cd		1072 °Cd		1137 °Cd	
	Soja	Maíz	Soja	Maíz	Soja	Maíz
DPV	3,3 kpa		2,69 kpa		4,67 kpa	
Estado Fenológico	R2	R1	R3	R2	R3	R3
Secano	0,68	0,41	0,61	0,27	0,73	0,61
TR1	0,51	0,24	0,73	0,28	0,65	0,33
TR2	0,25	0,19	0,23	-0,08	0,47	0,30
TR3	0,09	0,12	0,06	-0,09	-0,28	0,09

Mediciones realizadas en el período desde los 935 °Cd (8 días después de floración en maíz y en R3 en soja) hasta los 1137 °Cd (20 días después de floración en maíz y en R4 en soja). DPV indica el déficit de presión de vapor diurno registrado en cada momento de medición.

En soja, se observó el aumento de los valores de CWSI por encima de 0,25 en inicio de formación de vainas (935°Cd). El cual, se asoció a la reducción del crecimiento en seco y TR1. En el estado fenológico de R4 (1137 °Cd), también se observó el incremento en el CWSI en el tratamiento TR2 que presentó un valor de 0,47 (Tabla 4.14).

La relación entre la tasa de crecimiento de maíz y el CWSI, bajo diferentes condiciones hídricas en las mediciones realizadas a los 935 y 1127 °Cd fue negativa ($p < 0,0001$) (Figura 4.14).

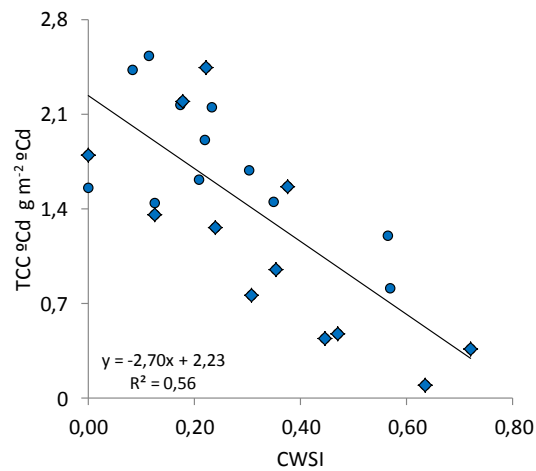


Figura 4. 14: Relación entre Tasa de Crecimiento del Cultivo (TCC) por unidad de tiempo térmico en ($\text{g m}^{-2} \text{°Cd}$) y el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) en maíz cultivado bajo diferentes tratamientos de riego para el año 2011 en dos momentos de muestreo: Círculos (a 935°Cd) y rombos (a 1137°Cd). $TCC = 2,23 - 2,70 * CWSI$ ($p < 0,0001$).

En soja, esta relación para los mismos períodos presentó un ajuste de 0,55 y una significancia de ($p < 0,0001$; Figura 4.15). Los valores negativos corresponden a los valores de CWSI alcanzados por TR3.

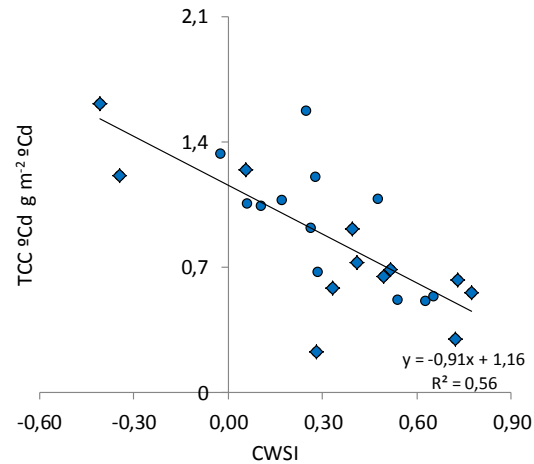


Figura 4. 15: Relación entre Tasa de Crecimiento del Cultivo (TCC) por unidad de tiempo térmico en ($\text{g m}^{-2} \text{°Cd}$) y el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) en de soja cultivado bajo diferentes tratamientos de riego para el año 2011 en dos momentos de muestreo: Círculos (a 935°Cd) y rombos (a 1137°Cd). $TCC = 1,16 - 0,91 * CWSI$ ($p < 0,0001$).

Discusión

Las condiciones climáticas exploradas en los dos años de ensayo son representativas del clima de la zona. Los déficits hídricos registrados entre emergencia y madurez fisiológica variaron de 96 mm a 393 mm, los que se corresponden con una probabilidad de ocurrencia de 67 % y 19 % respectivamente según los registros climáticos de la EEA C. del Uruguay. En consecuencia, se considera que los resultados obtenidos reflejan el comportamiento de los cultivos de maíz y soja en situaciones comunes en los suelos vertisoles de la región centro-este de la provincia de Entre Ríos.

Al momento de la emergencia de los cultivos, el agua útil almacenada en el suelo hasta los 2 metros de profundidad no superó el 0,64 de AU, a pesar de que durante el período de barbecho (mediados abril a mediados octubre) se registraron 600 mm y 663 mm de precipitación para el primer y segundo año, respectivamente. Esto muestra la dificultad de recarga del perfil debido de la baja tasa de infiltración que presenta este tipo suelo y la escasa capacidad de transmitir el agua a los horizontes inferiores al disminuir la tasa de infiltración con el aumento del contenido de humedad, asociado a la alta proporción

de arcillas expandibles (Beney *et al.*, 1976; Unger, 1982; Kinderknecht, *et al.*, 2004). La recarga por debajo del metro de profundidad fue limitada alcanzando en promedio menos de 62 % del agua útil después del periodo de barbecho e incluso al final del ciclo de los cultivos. Donde prácticamente la mitad de la precipitación efectiva contribuyó a la recarga del perfil, debido a que entre el 60% y 68 % de las precipitaciones se concentraron hacia el final del ciclo (Tabla 4.12).

Dinámica de agotamiento del agua. Limitación al crecimiento

Tanto en maíz como en soja se observó una distribución agrupada de raíces sobre las grietas en el primer metro de profundidad, coincidente con lo reportado por (Dardanelli *et al.*, 2004) en suelos con elevado contenido de arcilla. El riego incrementó la colonización pero no así la profundización alcanzada por los cultivos. El maíz alcanzó una profundidad de 150 cm con mayor colonización del perfil que la soja. El sistema radical de soja alcanzó una profundidad máxima de 183 cm coincidente con lo reportado por Andriani *et al.* (1997) que determinaron 180-200 cm de profundización en un argiudol típico. Sin embargo, las profundizaciones alcanzadas en este experimento son inferiores a alcanzadas en suelos sin limitaciones para el crecimiento radical. Por ejemplo, Dardanelli *et al.* (2004) reportaron más de 220 cm de profundización en cultivares de soja implantados sobre un suelo haplustol éntico de Córdoba. Esta diferencia pudo ser debida a la reducción en la velocidad de crecimiento de las raíces por el incremento del contenido de arcilla y el aumento de la impedancia (Dardanelli *et al.*, 2003a).

La importante colonización superficial observada en soja decreció marcadamente entre los 30 y 40 cm de profundidad principalmente en secano. Esto estaría asociado a la arquitectura del sistema radical y al efecto del riego, como lo observaron Benjamin y Nielsen, (2006) en un suelo franco limoso. Dichos autores encontraron que la superficie

de raíces en secano disminuyó con respecto al riego en todo el perfil con una elevada concentración en los primeros 23 cm, que representó el 58 % y 70 % del total de raíces en riego y secano respectivamente.

En la profundidad 50 a 70 cm (horizonte B_{22t}) se observó una marcada disminución de la colonización de raíces, siendo más restrictivo para soja similar a lo descrito por Micucci y Taboada (2006) para horizontes Bt vérticos y al igual que lo descrito por Hati *et al.* (2006) en un vertisol de la India. El tratamiento TR3 de ambos cultivos extrajo menos agua de este horizonte que del resto del perfil asociado a la restricción (Figura 4.6). Superada esta capa de suelo, los cultivos lograron extraer mayor cantidad de agua pero el agotamiento disminuyó gradualmente a partir de 125 cm. El maíz presentó una mayor capacidad de agotamiento del agua útil del perfil del suelo de 0 a 125 cm de profundidad que la soja (Figura 4.6). Experiencias realizadas por Singh *et al.*, (1995) muestran que el maíz realiza una mayor extracción incluso con respecto a otras gramíneas en los primeros 45 cm.

Producto de la evaporación del suelo, se observó desecamiento por debajo del límite inferior en los primeros 30 cm de profundidad, independientemente del tipo de cultivo siendo mayor en secano. Esto magnificó la restricción hídrica atravesada por los cultivos de 0-100 cm de profundidad con contenidos de agua por debajo del límite inferior (Figuras 4.4 y 4.5).

La disponibilidad de agua afectó la tasa de acumulación de biomasa aérea a partir de contenidos de agua útil de 0,40 en maíz y 0,50 en soja. El umbral obtenido en soja fue inferior al reportado por Dardanelli *et al.* (1991) quienes encontraron que la evapotranspiración cayó drásticamente por debajo de 0,62 de agua útil en correspondencia con el potencial agua de la hoja de -0,14 Mpa. Sin embargo, Sadras y Milroy (1996) plantean que los umbrales basados en expansión de tejidos son menos

sensibles que los determinados por el potencial agua en hoja y además los umbrales son afectados por la textura de suelo con valores de 0,43 de agua útil para texturas finas y siendo mayor en dicotiledóneas que en monocotiledóneas. Los umbrales hallados en esta experiencia se encuentran dentro de estos rangos, al igual que las diferencias en soja y maíz, en coincidencia por lo reportado por Ray y Sinclair (1998).

El maíz alcanzó el umbral crítico de agua útil en floración y la soja en R4 - R5, con un retraso de aproximadamente 20 días o 300 C°d en agotar el perfil. Esto podría deberse a las diferencias en la capacidad de colonizar el perfil asociadas a la arquitectura de raíces. Dardanelli *et al.* (2004) reportaron que en horizontes vérticos la disminución en la densidad de raíces y su distribución limitan la tasa de extracción de agua en soja.

Ante la deficiencia hídrica, los cultivos extrajeron gran parte del agua útil inicial del perfil en el momento de máximo desecamiento, dejando como agua útil remanente en el estrato de 0-200 cm de profundidad menos del 22 % en maíz e inferior al 25% en soja. Las extracciones máximas fueron 206 mm en maíz y 182 mm en soja producto de la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo.

Consumo de agua

El consumo de agua en secano fue de 339 y 297 mm en maíz y 357 y 327 mm en soja para el 2010 y 2011, respectivamente. En el tratamiento TR3, con el aporte de 189 mm en 2010 y 340 mm en 2011, el consumo aumentó a 521 mm y 565 mm en maíz y 552 mm y 617 mm en soja en el 2010 y 2011 respectivamente. Estos valores son similares a los 630 mm reportados por Weir *et al.* (2008) como consumo potencial para cultivares de soja de GM IV de similar de ciclo que el cultivar utilizado en este ensayo. En maíz el consumo potencial registrado por Uhart *et al.* (1996) y Andriani (2000) fue de 500-550 mm en cultivares con ciclos de 140 días coincidentes con los registrados en este trabajo.

Las diferencias en el consumo de agua se produjeron a partir de floración del cultivo de maíz e inicio de formación de vainas en soja en 2010 y 2011, respectivamente. En el mismo sentido, Cárcova *et al.* (1998) encontraron que la restricción al consumo de agua de tres híbridos de maíz en un suelo franco arcillo limoso se produjo a partir de los 50 días de la siembra con contenidos iniciales de agua disponible de 60 %. Dardanelli *et al.* (2004) determinaron que el cultivo de soja manifestó déficit hídrico a partir de los 50 días de la siembra con el comienzo de las máximas tasas de extracción de agua en un suelo sin restricciones.

La mayor respuesta al riego observada en 2011 en consumo de agua fue debida a una menor ETc acumulada en seco y al mayor aporte de riego. En ambos años el riego aportado produjo un aumento lineal de la ETc acumulada de 0,8 mm por mm de riego (Figura 4.7).

La máxima evapotranspiración diaria coincidió con el inicio de los periodos reproductivos. La ETc en TR3 superó la demanda atmosférica a partir de floración en maíz e inicio de formación de vainas en soja con valores de ETp entre 6,5 y 7 mm d⁻¹. El resto de los tratamientos no logró acompañar la demanda atmosférica debido al déficit hídrico en coincidencia por lo reportado por Dardanelli *et al.* (2004).

El Kc de los cultivos se incrementó gradualmente a partir de 0,3 hasta alcanzar valores superiores a 1 luego de los 800 °Cd, con máximos promedio para los dos años de 1,59 y 1,53 para maíz y soja respectivamente (Figura 4.11). Los valores alcanzados son superiores a los reportados por Zhao *et al.* (2010) en maíz de 1,2 en condiciones ambientales de menor demanda atmosférica (4,31 mm de ETp Penman-Monteith) y a los reportados por Andriani *et al.* (1997) en soja con valores de 1,24 y 1,17 estimados con ETp Penman. Dardanelli *et al.* (2003a) sostiene que los valores de Kc solo tienen

validez local debido a que son calculados con fórmulas simples. Por otra parte, Allen *et al.* (1998) sostienen que los valores de K_c se incrementan en presencia de condiciones semiáridas con baja humedad relativa mínima y velocidades de viento superiores a los 2 m seg^{-1} , y que también debe tenerse en cuenta el efecto oasis que incrementa la demanda.

Las diferencias en la disponibilidad de agua generadas en los dos años de ensayo permitieron observar una respuesta lineal de la biomasa aérea final y la ET_c lograda por los cultivos con el incremento de la lámina consumida con diferencias propias de cada especie. En maíz, se observó un aumento de la EUA con el aporte de riego, coincidente con lo reportado por El-Heldawy *et al.* (2008). La EUA del tratamiento TR3 estimada para los dos años en el periodo de emergencia- madurez fisiológica fue de $4,56 \text{ g mm}^{-1}$.

Durante la etapa vegetativa en maíz, no se halló efecto del riego sobre la EUA aunque sí hubo diferencias entre años (Tabla 4.5). Durante 2010, la menor EUA pudo ser debida a una mayor proporción de evaporación en la ET_c asociada a un IAF menor a 2 tal como lo reportan Ritchie y Basso (2008), que sumado al déficit durante noviembre, previo al inicio del riego, favorecieron el desecamiento del suelo por debajo del límite inferior en los primeros 40 cm. Otro factor que favoreció la pérdida de humedad desde el suelo fue la falta de cobertura por la labranza para la preparación de la cama de siembra en año 2010, a diferencia de 2011 cuando los cultivos se implantaron en siembra directa. En este sentido, Tolk *et al.* (1999) mostraron una mejora del 21% de la EUA en maíz por efecto del mulch en un suelo franco arcilloso.

En la fase reproductiva, la EUA estuvo relacionada con la disponibilidad hídrica. Los tratamientos TR2 y secano mostraron una disminución respecto a la fase vegetativa, mientras que TR1 y TR3 mantuvieron los niveles de eficiencia en $3,94 \text{ g mm}^{-1}$ y $5,11 \text{ g}$

mm^{-1} , similares a los reportados por Otegui *et al.* (1995) de 4,2 y 5,1 g mm^{-1} durante la etapa de 40 días centrados en silking para tratamientos bajo riego.

La disminución de la EUA durante la fase reproductiva de TR1 y TR2 puede explicarse porque el contenido de agua del suelo era inferior al umbral de agua útil, particularmente en 2010, cercano al límite inferior, durante floración y hasta 30 días después de ésta. Sumado a que el aporte de agua de riego no fue suficiente para sostener la demanda, coincidente con los resultados de El-Hendawy *et al.* (2008).

La reducción de la EUA no solo se debió a la menor tasa de crecimiento sino también a la pérdida de biomasa acumulada en los tallos (datos no presentados) como consecuencia de la removilización ocurrida en los tratamientos bajo estrés.

En soja, no se observó incremento de la EUA de emergencia a madurez fisiológica con el aumento de la lámina de agua (Tabla 4.6) con valores similares en secano y TR3 de 2,4 g mm^{-1} y 2,37 g mm^{-1} para los dos años, respectivamente. En la etapa comprendida entre emergencia y formación de vainas, en 2011 el riego incrementó la EUA de 20 a 51 % con respecto al secano. Esta mejora pudo ser debida a menores pérdidas por evaporación en los tratamientos bajo riego, dado la mayor proporción de suelo cubierto evidenciado por una mayor intercepción de radiación que secano que solo logró 66%.

En la etapa reproductiva, la EUA fue mayor que en la vegetativa con valores promedio de 3,40 g mm^{-1} y 3,06 g mm^{-1} para el primer y segundo año respectivamente, posiblemente debido las menores pérdidas por evaporación como lo reportan Sinclair *et al.* (1984) quienes encontraron que las pérdidas por evaporación se minimizan con IAF superiores a 4, similares a los de esta experiencia. El comportamiento del cultivo durante la etapa reproductiva fue diferente en cada año. En 2010, la EUA tendió a incrementar con el aporte de riego, mientras que en el segundo año, decayó con el

aumento de la lámina aplicada. Este efecto en la EUA puede ser explicado por lo reportado por Abbate *et al.* (2004) que encontraron que en condiciones limitantes de agua la EUA aumenta por el cierre estomático a diferencia del bien provisto de agua que incrementa el consumo y no la fotosíntesis. En condiciones de alta disponibilidad, el aumento del consumo de agua no es lineal con la producción de biomasa y rendimiento tal como fue reportado por Purcell *et al.* (2007) mostrando una respuesta asintótica a partir de los 444 mm de transpiración.

La EUA corregida por déficit de presión de vapor presentó en TR3 la misma tendencia que la EUA con valores de $9,63 \text{ g mm}^{-1}$ en maíz y de $4,65 \text{ g mm}^{-1}$ en soja. Posiblemente debido al estrecho rango de dpv explorado de 1,91 y 1,78 Kpa para el primer y segundo año. En este estudio, la corrección difirió de la reportada por Abbate *et al.* (2004) en trigo por quienes exploraron rangos de dpv de 0,5 -1,5 Kpa, a través de localidades.

El estrés hídrico caracterizado por CWSI determinado por temperatura de canopia mostró relación con la TCC en ambos cultivos durante el periodo de crecimiento. Se observó que cuando el CWSI aumentó por encima de 0,20 la tasa de crecimiento disminuyó en 11% respecto del control regado por cada incremento del CWSI. Cárcova *et al.* (1998) reportaron que valores por encima de 0,20 CWSI se producen cuando el contenido de agua disponible se encuentra por debajo del umbral crítico en maíz. Por otra parte Candogan *et al.* (2013) indican que valores de CWSI superiores a 0,22 en soja reducirían el rendimiento. En este trabajo, la tasa de crecimiento disminuyó 8% respecto del control regado por cada incremento del CWSI por encima de 0,25.

Las EUA para grano logradas en maíz en secano, TR1 y TR2 son similares a las EUA reportadas por Uhart *et al.* (1996) bajo riego de 1,8 y $2 \text{ g mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ante déficit moderados en floración. En el caso de TR3 las eficiencias fueron superiores a las logradas en TR1 y TR2. El-Hendawy *et al.* (2008), en tratamientos con distintos niveles

de riego, reportaron que las EUA fueron menores con respecto al bien provisto de agua cuando el contenido de agua útil fue cercano a punto de marchitez y el aporte de riego no logró cubrir la demanda. El importante aporte de riego realizado en TR3 permitió lograr altas EUA, incluso en el primer año que presentó contenidos de agua útil inferiores al umbral de agua útil.

La productividad del agua para rendimiento en grano de soja fue de 0,87 y 1,20 g mm⁻¹m⁻² para el 2010 y 2011, respectivamente sin diferencias entre tratamientos en coincidencia con los resultados de Dardanelli *et al.* (1991) quienes encontraron que períodos de estrés hídrico en etapas reproductivas no afectaron la EUA para grano. Esto podría deberse a que las restricciones en la generación de biomasa por el déficit hídrico no afectaron en gran medida la partición a hacia granos según lo reportado por Board *et al.* (2005) y a la respuesta lineal de la biomasa al consumo de agua (Purcell *et al.*, 2007). Durante la etapa reproductiva los tratamientos de mayor disponibilidad de agua presentaron una disminución en la EUA, lo que posibilitó compensar las pequeñas diferencias en la conversión y partición de la biomasa entre los tratamientos con la consecuente ausencia de respuesta al riego en la productividad del agua para la producción de grano.

CAPITULO V. Conclusiones Generales

Los resultados obtenidos en este trabajo permitieron responder a los objetivos planteados sobre el efecto del riego suplementario en los cultivos de maíz y soja en un suelo vertisol y profundizar el conocimiento sobre i) los mecanismos de generación y partición de la biomasa en maíz y soja (Capítulo III) ii) el efecto de la disponibilidad de agua sobre el crecimiento y la arquitectura del sistema radical y el consumo de agua sobre la generación del rendimiento bajo condiciones climáticas de déficit hídrico (Capítulo IV). Los principales resultados hallados en este trabajo se resumen en la Figura 5.1.

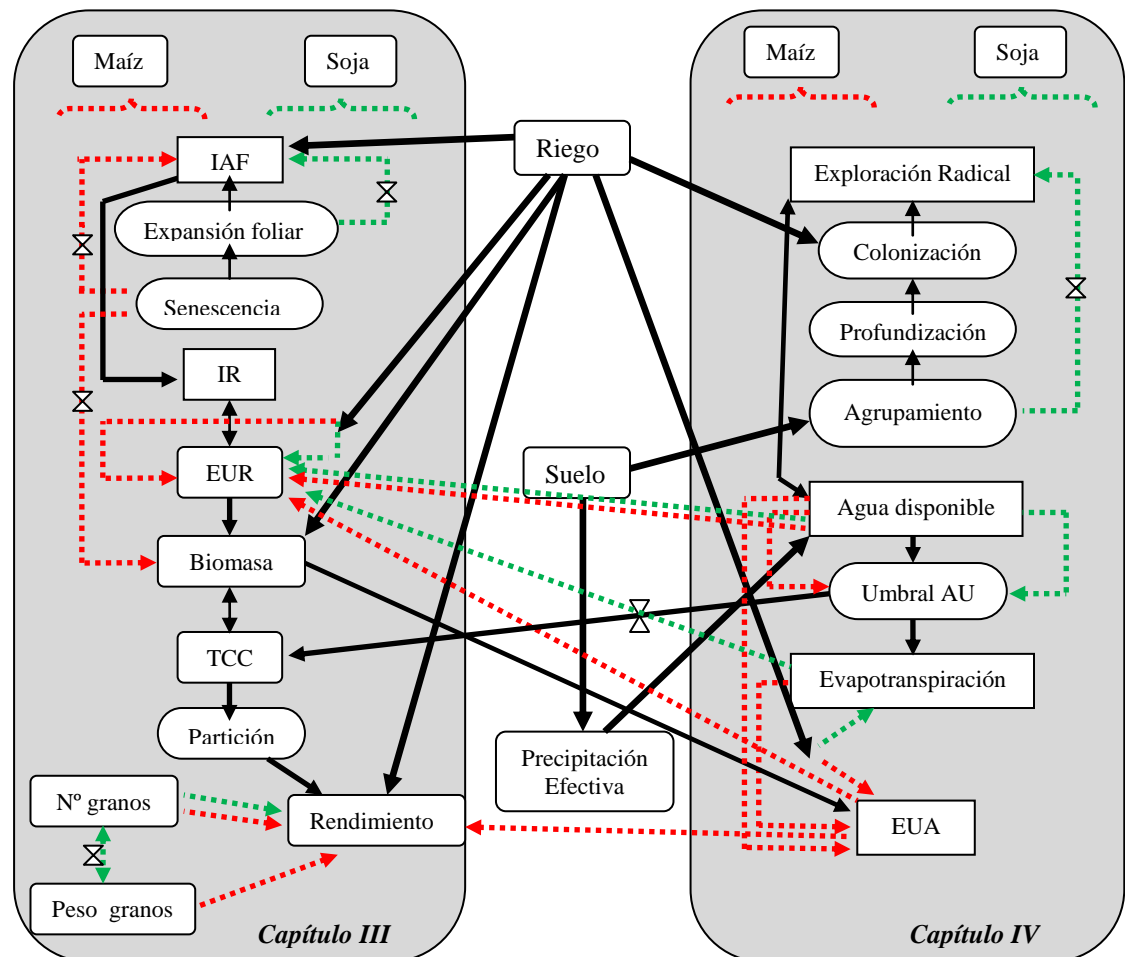


Figura 5. 1: Esquema de principales resultados hallados en este estudio por efecto del riego sobre de la disponibilidad de agua y su impacto en el crecimiento y partición de la biomasa. Respuestas generales esperadas (línea negra) y respuestas particulares o específicas en maíz (línea roja) y en soja (línea verde) y las interrelación entre la economía de carbono (Capítulo III) y economía del agua (Capítulo IV).

En este trabajo se pudo establecer cómo el aporte de riego permite incrementar la biomasa aérea en ambos cultivos, sin modificaciones importantes en la partición hacia los destinos reproductivos, a pesar de que los cultivos experimentaron condiciones de estrés hídrico durante el período crítico. En general las diferencias en la biomasa acumulada estuvieron dadas por la reducción en la tasa de crecimiento. Sin embargo esta respuesta al riego no fue lineal en los tratamientos de riego intermedios TR1 y TR2, en los cuales el contenido de agua útil fue cercano o por debajo del umbral. La respuesta al riego fue baja alcanzando solamente 56-66% del rendimiento logrado en el bien provisto.

Los mecanismos de generación del IAF y de captura de radiación fueron diferentes en maíz y soja. El aporte de riego tuvo mayor impacto sobre la expansión foliar en soja y un menor efecto en la duración del área foliar. En cambio en maíz, el efecto estuvo dado por la mayor duración del área foliar por medio del retraso y disminución de la tasa de senescencia durante la etapa reproductiva (Borrás *et al.*, 2003 Qi *et al.*, 2012). En soja, este efecto fue mucho menor (Figura 3.1) pero contribuyó a generar un mayor IAF a través de una mayor expansión foliar (Sivakumar y Shaw, 1978).

Si bien los dos cultivos presentaron patrones de senescencia diferentes, ambos exhibieron caídas de la EUR ante el aumento del déficit hídrico. En soja, la respuesta estuvo dada por la pérdida de funcionalidad del canopeo principalmente, producto de la caída de la tasa fotosintética debido al estrés hídrico (Monteith 1977; Neyshabouri y Hatfield, 1986). En maíz, la reducción en la captura se debió a la pérdida de área de captación de radiación por senescencia a partir de floración y de la capacidad fotosintética. El aporte de riego contribuyó a mantener los niveles de EUR durante la etapa reproductiva en TR3 con valores de $3,21 \text{ g Mj}^{-1}$ en maíz y $1,54 \text{ g Mj}^{-1}$ en soja.

La disponibilidad de agua afectó la relación fuente destino en maíz, permitiendo incrementar el número y peso de los granos en función de la mejora en la tasa de crecimiento por planta (Figura 3.7; Vega *et al.*, 2001b; Gambin *et al.*, 2006). El incremento del peso de la semilla está relacionado a la disponibilidad de asimilados post anthesis (Borrás *et al.*, 2004), (Figura 3.7). En este estudio el riego mejoró la relación fuente destino durante el período crítico lo que posibilitó el mayor peso de semilla. En soja, el aumento del número de vainas y el consiguiente número de granos por m^{-2} , se asoció con la disminución del peso de los mismos. Probablemente, la competencia de los destinos (Figura 3.7) conllevó a la co-limitación de fuente y destino (Borrás *et al.*, 2004).

Bajo la condición de bien provisto en el segundo año de ensayo se logró alcanzar 1552 $g m^{-2}$ en maíz y 743 $g m^{-2}$ en soja, que pueden ser considerados como rendimientos potenciales para la zona.

En resumen, los resultados obtenidos durante los dos años de evaluación de la evolución de la producción de biomasa, eficiencia de uso de la radiación y la determinación del rendimiento y sus componentes permiten ***Aceptar la Hipótesis “El crecimiento y rendimiento de maíz y soja en el centro este de Entre Ríos están limitados por la disponibilidad hídrica. La utilización de riego atenúa la restricción hídrica impuesta por la matriz del suelo y modifica la eficiencia de utilización de la radiación, permitiendo incrementar la productividad”.***

La restricción hídrica en el suelo vertisol estaría dada por: limitaciones en la captación de agua debido a la baja precipitación efectiva, dificultad para la exploración radical y colonización de los horizontes con alto contenido de arcillas.

El elevado contenido de arcillas limita la transferencia de agua hacia el interior del suelo debido a la baja tasa de infiltración que favorece las pérdidas de agua por escurrimiento y reduce la precipitación efectiva con la consiguiente dificultad de recarga del perfil por debajo del metro de profundidad en el periodo de barbecho y durante el ciclo del cultivo.

La profundización lograda por los cultivos fue algo menor a la de otros suelos, lo cual disminuye la disponibilidad de agua para la planta por reducir el volumen de suelo explorado. La arquitectura del sistema radical del maíz permitió un mayor aprovechamiento del agua del primer metro del perfil del suelo con respecto a la soja.

El elevado contenido de arcillas y estructura presente por debajo de los 40 cm hasta los 70 cm limitó la colonización radical con la consiguiente reducción del agua disponible para la planta además del crecimiento agrupado de raíces por las grietas y caras de los agregados. Superada estas capas de suelo que restringieron la colonización de raíces, se observó una recuperación de la exploración del suelo. Por debajo del metro de profundidad, la colonización cayó drásticamente en soja y gradualmente en maíz. A pesar de esto el sistema radical del cultivo de maíz logró alcanzar 150 cm de profundidad y la soja 183 cm. Estas mediciones son importantes para el ajuste en los balances hídricos sobre suelos vertisoles de Entre Ríos al cuantificar el aporte de agua del suelo. La realización de los perfiles de raíces permitió visualizar distribuciones agrupadas de raíces sobre las grietas pero no evaluar el efecto sobre el aprovechamiento del agua como lo sugieren Dardanelli *et al.* (2003a).

A pesar de las limitaciones planteadas a la exploración del sistema radical bajo la condición de secano, los cultivos lograron extraer gran parte del agua inicial

almacenada en el suelo alcanzando los mínimos contenidos después de R1 en maíz y R3 en soja dejando en los dos metros de profundidad menos de 0,12 de agua útil en 2010 y 0,22 en 2011. La extracción de agua del suelo por evaporación directa y transpiración en condiciones de secano fue de 206 mm en maíz y 160 mm en soja hasta los dos metros de profundidad con la mayor contribución por parte del primer metro del cual extrajeron completamente el agua útil.

El aporte de riego suplementario afectó la dinámica de agotamiento del agua al disminuir la extracción de agua proveniente del suelo con el incremento de la lámina de riego aportada. La soja mostró menor capacidad de extracción y un retraso de 20 días (300 °Cd) aproximadamente en alcanzar el máximo agotamiento con respecto al maíz, posiblemente debido a menor colonización del suelo y a la distribución agrupada.

En los primeros 30 cm se registraron contenidos de agua por debajo del límite inferior por la evaporación del suelo. En la profundidad de 50 a 70 cm, coincidente con horizonte B_{22t}, los cultivos experimentaron reducción de la colonización independientemente del riego siendo más notable en soja lo que limitó la extracción de agua de este horizonte.

Se logró determinar el contenido de agua útil del suelo por debajo del cual se limita el crecimiento. El umbral de agua útil para la profundidad de 30-100 cm en el vertisol utilizado en este estudio se encontraría en 0,50 en soja a diferencia del maíz que presentó menor sensibilidad al contenido mínimo de agua en el suelo con 0,40 de agua útil (Sadras y Milroy, 1996)

El estrés hídrico experimentado por los tratamientos también fue caracterizado por la temperatura de canopia por medio del CWSI. Los valores por encima de 0,20 en maíz y 0,25 en soja redujeron la tasa de crecimiento. El CWSI mostró ser un buen indicador para determinar la condición hídrica del cultivo y de sencilla implementación.

En resumen, los resultados obtenidos en las evaluaciones de dinámica de agotamiento y seguimiento de la profundización y colonización del sistema radical en los perfiles de raíces permiten ***Aceptar la Hipótesis “El aporte de riego suplementario en un suelo vertisol afecta la dinámica de agotamiento del agua del suelo de manera diferente en maíz y soja”.***

Se logró determinar el consumo de agua para los cultivos en condiciones de diferente disponibilidad y cuantificar la contribución al consumo por parte de la precipitación efectiva y del agua almacenada en el perfil. Bajo la condición de secano, los cultivos lograron ETc promedio de los dos años de 318 mm en maíz y 342 mm en soja. El aporte de la precipitación efectiva fue 148 mm en maíz y 199 mm en soja y el agua almacenada a la siembra de los cultivos aportó 170 mm y 143 mm para maíz y soja respectivamente.

La extracción máxima del agua inicial fue de 206 mm en maíz y 160 mm en soja. Solo el 50 % de la precipitación efectiva contribuyó a la ETc debido a que más del 60% de la lluvia ocurrió hacia el fin del ciclo, contribuyendo mayormente a la recarga del perfil.

Esto remarca que bajo las condiciones naturales de producción en los vertisoles, el agua almacenada al momento de siembra contribuiría con más del 50% del agua consumida por los cultivos, en más del 50% de los años, a pesar de las limitaciones en la tasa de extracción de agua que presentan en el todo el perfil (Dardanelli *et al.*, 2003b).

El aporte de láminas de riego crecientes incrementó la ETc llegando en los tratamientos sin restricción hídrica a superar la demanda atmosférica con consumos de 565 mm en maíz y 617 mm en soja. Las diferencias en el consumo comenzaron a partir de floración en maíz e inicio formación de vainas en soja asociado a la disminución del contenido de agua del suelo.

Las diferencias en la disponibilidad de agua afectaron en forma diferente a cada cultivo en la eficiencia de uso de los recursos. En maíz, la EUR y EUA estuvieron determinadas por la disponibilidad de agua en la etapa reproductiva.

La EUA se redujo en función de la disponibilidad de agua en maíz producto de la imposibilidad de mantener el área foliar y la tasa de crecimiento. En soja, no se observaron diferencias marcadas por la disponibilidad de agua, posiblemente por el menor efecto del déficit sobre la senescencia foliar durante la etapa reproductiva. Por otra parte, la EUA en soja aumentó en la etapa reproductiva independientemente de la disponibilidad de agua asociada a la disminución de las pérdidas por evaporación, pasando de $1,89 \text{ g mm}^{-1}$ en vegetativo a $3,08 \text{ g mm}^{-1}$. Sin embargo en el segundo año el aporte de riego provocó disminución por un aumento en la ETc que no fue acompañado linealmente por la biomasa (Purcell *et al.*, 2007).

La disminución de la disponibilidad de agua afectó en mayor proporción a la EUR que a la EUA. Sin embargo la EUA en maíz fue afectada en menor medida y no se modificó en soja (Figura 5.2). El patrón presentado en maíz es coincidente con la relación positiva entre EUA y EUR presentada por Caviglia *et al.* (2004). Estos resultados muestran que el efecto del déficit repercute en la EUR en maíz y soja y en menor medida en la EUA en maíz, como consecuencia de que la pérdida de área foliar o de su funcionalidad afectó más a la conversión de radiación que a la evapotranspiración.

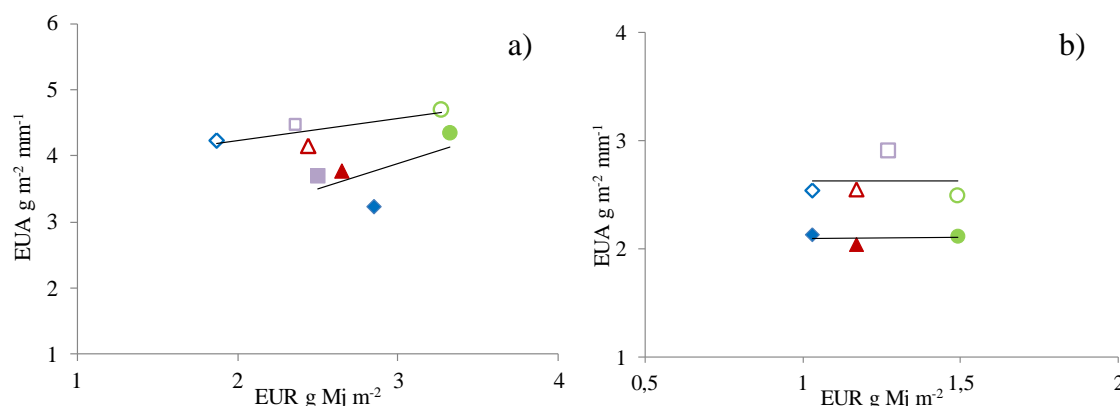


Figura 5. 2: Relación entre eficiencia del uso del Agua (EUA) y Eficiencia del uso de la Radicación (EUR) desde emergencia a madurez fisiológica. A) maíz ; b) soja. Tratamientos secano (rombo), TR1 (cuadrado), TR2 (triángulo) y TR3 (círculo); Símbolos llenos (2010) y símbolos abiertos (2011).

En resumen, los resultados obtenidos en las evaluaciones de consumo de agua y eficiencia de uso del agua permiten *Aceptar parcialmente la Hipótesis “La utilización de riego incrementa la productividad de los cultivos de maíz y soja por aumento del consumo y la eficiencia de utilización del agua”*. ya que en el caso particular de soja el incremento del consumo no significó un incremento en la EUA.

Hallazgos relevantes o implicancias de la tesis

La información generada en los dos años de ensayo permitió romper con supuestos sobre la profundización de raíces y el agua potencialmente disponible para la planta en los suelos vertisoles de Entre Ríos al lograr cuantificar la profundidad alcanzada por el sistema radical (150 cm en maíz y 183 cm en soja) y la capacidad de extracción del agua acumulada en el suelo en los 2 metros de profundidad. El contenido de agua útil remanente o que no lograron extraer presente en el suelo represento menos del 22% del contenido de agua útil en maíz y del 25% en soja, respectivamente. Estos resultados muestran que la contribución hídrica del suelo en condiciones naturales de secano es importante. Sin embargo, se comprobó una limitada capacidad de recarga del suelo por

debajo de 100 cm de profundidad, sumado a una reducida precipitación efectiva en el barbecho y durante el ciclo de cultivo. Otro hallazgo fue que la colonización por la presencia del horizonte B_{22t} entre los 50-70 cm disminuye siendo este efecto más marcado en soja que en maíz.

Se logró determinar el umbral de agua útil en maíz y soja que puede ser utilizado en los planteos agrícolas sobre suelos vertisoles de Entre Ríos. Asimismo, se generó información sobre el rendimiento que puede ser logrado sin limitaciones hídricas en la zona de estudio, información clave para la cuantificación de brechas.

Los hallazgos mencionados permitieron profundizar el conocimiento de la relación entre la disponibilidad de agua y la generación de rendimiento en un vertisol y contribuir con información base para explicar y estimar el comportamiento de los cultivos sobre suelos vertisoles de la provincia de Entre Ríos. Dicha información aporta bases para el ajuste de balances hídricos además de conocimiento sobre el funcionamiento del cultivo para su uso en modelos de simulación.

Futuras Implicancias

Futuras investigaciones deberían determinar el efecto de las características vérticas y el efecto del agrupamiento de raíces sobre las tasas de extracción de agua en maíz y soja sobre vertisoles de Entre Ríos.

Asimismo, se debería profundizar el conocimiento sobre la respuesta de los cultivos a la frecuencia de riego en contenidos de agua próximos al umbral crítico para determinar estrategias de riego para maximizar el beneficio económico del uso del agua de riego e indagar sobre prácticas de manejo que permitan incrementar la recarga de agua del perfil en toda su profundidad.

CAPITULO VI: BIBLIOGRAFIA

- Abbate, P. 2004. Agroclima: Un programa para el cálculo de la evapotranspiración por el método FAO Penman-Monteith desde planillas de cálculo o lenguajes de programación. 10° Reunión Argentina y 4° Latinoamericana de Agrometeorología. Mar del Plata.
- Abbate, P; Dardanelli, J; Cantero, M; Maturano, M; Melchiori, R; Suero, E. 2004. Climatic and water availability effects on water-use efficiency in wheat. *Crop Science* 44. 474-483.
- Allen. R; Pereira. L; Raes. D; Smith. M. 1998. Crop evapotranspiration- guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage. Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. Italy.
- Amato, M; Ritchie, J. 2002. Spatial distribution of roots and water uptake of maize (*Zea mays* L.) as affected by soil structure. *Crop Science* 42. 773-780.
- Andrade, F. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Research* 41. 1-12.
- Andrade, F; Sadras, V. 2000. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Eds Andrade, F y Sadras, V. EEA INTA Balcarce-Fac de Ciencias Agrarias UNMP.
- Andriani, J; Andrade, F; Suero, E; Dardanelli, J. 1991. Water deficit during reproductive growth of soybeans. I. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components. *Agronomie* 11. 737-746.
- Andriani, J; Dardanelli, J; Lorenzo, N; Prieto, D; Baigorri, H. 1997. Uso del agua y riego. En: El cultivo de soja en Argentina. Ed. Giorda, L y Baigorri, H. INTA Centro Regional Córdoba. 141-150.
- Andriani, J. 2000. Consumo de agua en maíz. En: El agua en los sistemas productivos para mejorar la producción 13. INTA EEA Oliveros. Santa Fe. Pp. 6-11.
- Aramburu Merlos, F; Monzon, J; Mercau, J; Taboada, M; Andrade, F; Hall, A; Jobbagy, E; Cassman, K; Grassini, P. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research* 184. 145-154.
- Benavídez, R; Grantón, M; Valenti, R; Arévalo, S. 1998. Características hídricas de los suelos. Métodos de laboratorio y estimaciones: su evaluación y aplicación para suelos de Entre Ríos. XVI Congreso argentino de la Ciencia del Suelo. Villa Carlos Paz.
- Beney, M; Kakish, U; Moresco, R; Muñoz, E; Nani, L. 1976. Algunas propiedades físicas de los suelos de Entre Ríos y su relación con la erosión. IDIA. Suplemento 33. 16-19.
- Benjamin, J; Nielsen, D. 2006. Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea. *Field Crops Research* 97. 248-253.
- Board, J; Modali, H. 2005. Dry matter accumulation predictors for optimal yield in soybean. *Crop Science* 45. 1790-1799.
- Borrás, L; Maddonni, G; Otegui, M. 2003. Leaf senescence in maize hybrids: Plant population, row spacing and kelner set effects. *Field Crops Research* 82. 13-26.

- Borrás, L; Slafer, G; Otegui, M. 2004. Seed dry weight to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. *Field Crops Research* 86. 131-146.
- Candogan, B; Sincik, M; Buyukangaz, H; Demirtas, C; Goksoy, A; Yazgan, S. 2013. Yield, quality and crop water stress index relationships for deficit-irrigated soybean (*Glycine max L.*) in sub-humid climatic conditions. *Agricultural water management* 118. 113-121.
- Cárcova, J; Maddonni, G; Ghera, C. 1998. Crop water stress index of three maize hybrids grown in soils with different quality. *Field Crops Research* 55.165-174.
- Cárcova, J; Uribealarea, L; Borrás, M; Otegui, M; Westgate, M. 2000. Synchronous pollination within and between ears improves kernel set in maize. *Crop Science* 40.1056-1061.
- Cárcova, J. 2; Borrás, L y Otegui, E. 2003. Ciclo Ontogénico, Dinámica del Desarrollo y Generación del Rendimiento y la Calidad en Maíz. Pp. 135-157; En: Satorre, E y col. Eds. *Producción de Granos: Bases funcionales para su manejo*. Facultad de Agronomía. UNBA
- Castiglioni, M; Morrás, H. 2007. Uso de análisis digital de imágenes para el estudio de la porosidad de la zona no saturada de argiudoles de Argentina. Pp. 83-88. En: *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo* vol. VIII. J. Giraldez, Cervera y F, Jiménez Homero.
- Caviglia, O; Sadras, V; Andrade, F. 2004. Intensification of agriculture in the south-eastern pampas I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat-soybean. *Field Crops Research* 87. 117-129.
- Dardanelli, J; Suero, E; Andrade, F; Andriani, J. 1991. Water deficit during reproductive growth of soybeans. II Water use and water deficiency indicators. *Agronomie* 11. 747-756.
- Dardanelli, J; Calmon, J; Jones, J; Andriani, J; Díaz, M; Colino, D. 2003. Use of a crop model to evaluate soil impedance and root clumping effects on soil water extraction in three argentine soils. *American society of agricultural engineers*. Vol 46. Pp. 1265-1275.
- Dardanelli, J; Colino, D; Otegui, E; Sadras, O. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. Pp. 377-434; En: Satorre, E y col. Eds. *Producción de Granos: Bases funcionales para su manejo*. Facultad de Agronomía. UBA.
- Dardanelli, J; Ritchie, J, Calmon, M; Andriani, J; Collino, D. 2004. An empirical model for root water uptake. *Field crops research* 87. 59-71.
- Della Maggiora, A; Gardiol, J; Irigoyen, A. 2000. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Eds Andrade, F y Sadras, V. EEA INTA Balcarce-Fac de Ciencias Agrarias UNMP.
- Di Rienzo, J. 2011. Modelos lineales mixtos: aplicaciones en InfoStat / Di Rienzo, J; Macchiavelli, R; Casanoves, F. - 1a. ed. - Córdoba : Grupo Infostat. 193 p.

- Di Rienzo, J; Casanoves, F; Balzarini, M; Gonzalez, L; Tablada, M; Robledo, C. 2016. InfoStat versión 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Egli, D. 2005. Flowering, Pod Set and Reproductive Success in Soya Bean. *Journal Agronomy & Crop Science* 191. 283-291.
- El-Hendawy, S; El-Lattief, E; Ahmed, M; Schmidhalter, U. 2008. Irrigation rate and plant density effects on yield and water use efficiency of drip-irrigated corn. *Agricultural Water Management* 95. 836-844.
- Engler, P; Vicente, G; Cancio, R. 2007. Evolución de la agricultura y la sustentabilidad a lo largo de un siglo en Entre Ríos. Pp.19-32. En: Caviglia, O; Papparotti, O; Sasal, M. *Agricultura sustentable en Entre Ríos*. INTA Paraná.
- Faraldo, M; Vergara, G; Casagrande G; Arnaiz, J; Mirasson, H; Ferrero C. 2011. Eficiencia en el uso del agua y radiación en maíz, girasol y soja en la región oriental de la pampa. Argentina. *Agronomía Tropical* 61(1). 47-57.
- Ferh, W; Caviness, C. 1977. Stages of soybean development. Special Report 80. Iowa State University, Ames, Iowa. p 11.
- Farré, I; Faci, J. 2006. Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment. *Agricultural water management* 83. 135-143.
- Gambín, B; Borrás, L; Otegui, M. 2006. Source-sink relations and kernel weight differences in maize temperate hybrids. *Field Crops Research* 95, 316-326.
- Granier, C; Tardieu, F. 1999. Leaf expansion and cell division are affected by reducing absorbed light before but not after the decline in cell division rate in the sunflower leaf. *Plant Cell and Environment* 22. 1365- 1376.
- Guiamet, J; Acciaresi, H; Tambussi, E. 2010. Senescencia foliar: Regulación e impacto sobre el rendimiento de los cultivos. Pp.93-105. En: Miralles, D. *Avances en ecofisiología de cultivos de granos*. Universidad Nacional de Buenos Aires.
- Hati, K; Mandal, K; Misra, A; Ghosh, P; Bandyopadhyay, K. 2006. Effect of inorganic fertilizer and farmyard manure on soil physical properties, root distribution, and water-use efficiency of soybean in Vertisols of central India. *Bioresource Technology* 97. 2182-2188.
- Hein y Purnell 1974. Los suelos de la Estación Experimental Agropecuaria Concepción del Uruguay provincia de Entre Ríos. Serie Técnica N° 43 pp 65. EERA Paraná
- Idso, S. 1982. Non-water-stressed baselines, A key to measuring and interpreting plant water-stress. *Agricultural Meteorology* 27. 59-70.
- Igbadun, H; Mahoo, H; Tarimo, A; Salim, B. 2006. Crop water productivity of irrigated maize crop in Mkoji sub-catchment of the Great Ruaha River Basiin. *Tanzan. Agricultural Water Management* 85. 141-150.
- Igbadun, H; Tarimo, A; Salim, B. Mahoo, H. 2007. Evaluation of selected crop water production functions for an irrigated maize crop. *Agricultural Water Management* 94. 1-10.
- Jian, H; Egli, D.1993. Shade induced changes in flower and pod number and flower and fruit abscission in soybean. *Agronomy Journal* 85. 221-225.

- Kantolic, A; Peralta, G; Slafer, G. 2013. Seed number responses to extended photoperiod and shading during reproductive stages in indeterminate soybean. *Europe Journal Agronomy* 51. 91-100.
- Kinderknecht, G; Paparotti, F; Saluzzio, F. 2004. Estudio de la erosionabilidad de un suelo vertisol mediante el uso de un simulador de lluvia. *Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná. Entre Ríos.*
- Kiniry, J; Jones, C; O'toole, J; Blanchet, R; Cabelguenne, M; Spanel, D. 1989. Radiation-Use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five grain-crop species1. *Field Crops Research* 20. 51-64.
- Maddonni, G; Otegui, M. 1996. Leaf area, light interception, and crop development in maize. *Field Crops Research* 48. 81-87.
- Marbán, L; Ratto, S. 2005. *Tecnologías en análisis de suelos.* ed. AACCS. p 215.
- Micucci, F; Taboada, M. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally-and zero-tilled soil in the humid pampas of Argentina. *Soil & Tillage Research* 86. 152-162.
- Mollier, A; Pellerin, S. 1999. Maize root system growth and development as influenced by phosphorus deficiency. *Journal of Experimental Botany* 50. 487-497.
- Monteith, J. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology* 9. 747 -766.
- Muchow, R. 1985. An analysis of the effects of water-deficits on grain legumes grown in a semiarid tropical environment in terms of radiation interception and efficiency of use. *Field Crops Research* 11. 309-323.
- Nagore, L; Echarte, L; Andrade, F; Della Maggiora, A. 2014. Crop evapotranspiration in Argentinean maize hybrids released in different decades. *Field Crops Research* 155. 23-29.
- Neyshabouri, M; Hatfield, J. 1986. Soil water deficit effects on semi-determinate and indeterminate soybean growth and yield. *Field Crops Research* 15. 73-84.
- Otegui, M. 1992. Incidencia de una sequía alrededor de antesis en el cultivo de maíz. Consumo de agua, producción de materia seca y determinación del rendimiento. Tesis de Magister Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias. Univ. Nac. De Mar del Plata. 93 pp.
- Otegui, M; Andrade, F; Suero, E. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Research* 40. 87-94.
- Otegui, M; Andrade, F. 2000. New relationships between light interception, ear growth and kernel set in maize. Pp 89-102. En: Westgate, M; Boote, K. *Physiology and modeling of kernel set in maize.* Crop Science. 89-102.
- Oszust, J. 2010. Ajuste metodológico para la determinación de las constantes hídricas en suelos de Entre Ríos. Tesis de graduación. FCA-UNER. Oro Verde
- Passioura, J. 1977. Grain yield, harvest index, and water use of wheat. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science* 43.117-120.
- Passioura, J. 2002. Soil conditions and plant growth. *Plant, Cell and Environment* 25. 311-318.

- Payero, J; Melvin, S; Irmak, S; Tarkalson, D. 2006. Yield response of corn to deficit irrigation in a semiarid climates. *Agricultural Water Management* 84. 101-112.
- Payero, J; Tarkalson, D; Irmak, S; Davison, D; Petersen, J. 2008. Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semiarid climate. *Agricultural Water Management* 95. 895–908.
- Plan Mapa de Suelos., 1999. Carta de Suelos de la Rca Argentina Departamento San Salvador. Entre Ríos. Acuerdo complementario del convenio INTA-Gob. de ER. EEA Paraná. Serie de Relevamiento Rec. Naturales N° 18.
- Plan Mapa de Suelos., 2000. Carta de Suelos de la Rca Argentina Departamento Villaguay. Entre Ríos. Acuerdo complementario del convenio INTA-Gob. de ER. EEA Paraná. Serie de Relevamiento Rec. Naturales N° 19.
- Plan Mapa de Suelos., 2002. Carta de Suelos de la Rca Argentina Departamento Colón. Entre Ríos. Acuerdo complementario del convenio INTA-Gob. de ER. EEA Paraná. Serie de Relevamiento Rec. Naturales N° 21.
- Plan Mapa de Suelos., 2003. Carta de Suelos de la Rca Argentina Departamento Uruguay. Entre Ríos. Acuerdo complementario del convenio INTA-Gob. de ER. EEA Paraná. Serie de Relevamiento Rec. Naturales N° 22.
- Pozzolo, O; Seró, C; Pitter, E; Bruno, J. 1999. Evaluación de cultivares de maíz. . IPG Centro Oeste de Entre Ríos. Resultados experimentales 1997-1998. Serie de divulgación técnica N° 22. EEA INTA Concepción del Uruguay. 18-22.
- Purcell, L; Edwards, J; Brye, K. 2007. Soybean yield and biomass responses to cumulative transpiration: Questioning widely held beliefs *Field Crops Research* 101. 10–18.
- Qi, W; Liu, H; Liu, P; Dong, S; Zhao, B; So, H; Li, G; Liu, H; Zhang, J; Zhao, B. 2012. Morphological and physiological characteristics of corn (*Zea mays* L.) roots from cultivars with different yield potentials. *European Journal of Agronomy* 38. 54-63.
- Racca, R. 1996. Efectos de diferentes períodos de penuria hídrica sobre: fijación biológica del N₂, crecimiento, desarrollo y productividad en soja. En V Curso nacional de ecofisiología y manejo del cultivo de soja. 22-26 Julio de 1996. EEA INTA Oliveros.
- R Core Team. 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Ratliff, L; Ritchie, J; Cassel, D. 1983. Field-Measured limits of soil water availability as related to laboratory-measured properties. *Soil Science Society of America* 47. 770-775.
- Ray, J; Sinclair, T. 1998. The effect of pot size on growth and transpiration of maize and soybean during water deficit stress. *Journal of Experimental Botany* 49. 1381-1386.
- Ritchie, J. 1981. Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. *Plant and Soil* 58. 81-96.

- Ritchie, J; Basso, B.2008. Water use efficiency is not constant when crop water supply is adequate or fixed: The role of agronomic management. *Europe Journal Agronomy* 28. 273-281.
- Ritchie, S; Hanway, J. 1982. How a corn plant develops. Special Report 48. Crop Extension S., Iowa State Univ. of Science and Technology. Ames. Iowa.
- Rodriguez, H; Gange, J; De Battista, J; Arias, N. 2006. Evaluación del potencial de rendimiento del cultivo de soja en vertisoles. Resultados 2005/06. Cultivo de soja en el Centro este de Entre Ríos. Serie producción vegetal 47. INTA Concepción del Uruguay. 53-60.
- Sadras, V; Milroy, S. 1996. Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A Review. *Field Crops Research* 47. 253-266.
- Salvagiotti, F; Cassman, K; Specht, E; Walters, D; Weiss, A; Dobermann, A. 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research* 108 .1-13
- Salvagiotti, F. 2009. Rendimientos potenciales en maíz. Brechas de producción y prácticas de manejo para reducirlas. Para mejorar la producción 41. INTA Oliveros. 61-66.
- Scotta, E; Papparotti, O. 1989. Manual de sistematización de tierras para control de erosión hídrica y aguas superficiales excedentes. 2° ed. Corregida y aumentada. Serie didáctica N° 17. INTA Paraná. 21-24.
- SIBER (Sistema de Información de la Bolsa de Cereales de Entre Ríos). 2012. Bolsa de Cereales de Entre Ríos. www.bolsaCER.com.ar.
- Sinclair. T; Tanner. C; Bennett. J. 1984. Water-Use Efficiency in Crop Production. *BioScience*. Vol 34. N° 1. Pp. 36-40.
- Sinclair, T; Muchow, R. 1999. Radiation Use Efficiency. *Adv. Agronomy* 65. 215-265.
- Sinclair, T. 2005. Theoretical analysis of soil and plant traits influencing daily plant water flux on drying soil. *Agronomy Journal* 97. 1148-1152.
- Sinclair, T; Purcell, L; King, A; Sneller, C; Chen, P; Vadez, V. 2007. Drought tolerance and yield increase of soybean resulting from improved symbiotic N₂ fixation. *Field Crops Research* 101. 68-71.
- Singh, D; Singh, P. 1995. Agronomic and physiological responses of sorghum, maize and pearl millet to irrigation. *Field Crops Research* 42. 57-67.
- Sivakumar, M; Shaw, H. 1978. Leaf response to water deficits in soybean. *Physiology Plant* 42.134-138
- Stöckle, C; Kemanian, A. 2009. Crop radiation capture and use efficiency: A framework for crop growth analysis. Pp. 145-165. En: Sadras, V; Calderini, D. Eds. *Crop Physiology applications for genetic improvement and agronomy*. Elsevier.
- Tasi, H; Bedendo, D. 2001. Aptitud agrícola de las tierras de la provincia de Entre Ríos. Plan Mapa de Suelos. INTA Serie Extensión N° 19. 10 p.
- Tasi, H; Wilson, M; Paz González, A; Indelángelo, N; Sasal, M. 2007. Sensibilidad de algunas propiedades de un vertisol con uso ganadero-agrícola para indicar calidad de suelos. 10th International Symposium on Soil and Plant Analysis Budapest, Hungary 2007.

- Tolk, J; Howell, T; Evertt, S. 1999. Effect of mulch, irrigation, and soil type on water use and yield of maize. *Soil and tillage research* 50.137-147.
- Uhart, S; Andrade, F; Frugone, M. 1996. Producción potencial de maíz. Impacto de la sequía sobre el crecimiento y el rendimiento. Material didáctico N° 12. INTA Balcarce. p 29.
- Unger, P. 1982. Management of crops on clay soils in the tropics. USDA, Agricultural Research Service, Conservation and Production Research Laboratory, Bushland, Texas 79012, USA. *Tropical. Agriculture. (Trinidad)* 59. 110-122.
- USDA. Soil Conservation Service. 1969. Engineering field manual for conservation practices. Washington DC.
- Vega, C; Andrade, F; Sadras, V; Uhart, S; Valentinuz, O. 2001a. Seed Number as a function of growth. A comparative study in soybean, sunflower, and maize.
- Vega, C; Andrade, F; Sadras, V. 2001b. Reproductive partitioning and seed set efficiency in soybean, sunflower, and maize. *Field Crops Research* 72. 163-175.
- Weir, E; Arce, E; Arce, J. 2008. Evapotranspiración potencial del cultivo de soja de 1ª, medida con lisímetros versus formula de Penman. Uso eficiente del agua. Coeficiente del cultivo. INTA Marcos Juárez. XII Reunion Argentina de Agrometeorología. San Salvador de Jujuy.
- Zhao, W; Liu, B; Zhang, Z. 2010. Water requirements of maize in the middle Heihe River basin, China. *Agricultural Water Management* 97. 215-223.