



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR**

TESIS DE MAGISTER EN CIENCIAS AGRARIAS

**Rendimiento de maíz en el Valle Inferior del Río Negro:  
Evaluación de la frecuencia de riego y la fertilización nitrogenada**

LUCIO GABRIEL REINOSO

BAHIA BLANCA

ARGENTINA

2014

---

## **PREFACIO**

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Magister en Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito de la EEA Valle Inferior del Río Negro y las determinaciones se realizaron en el laboratorio de Edafología del Departamento de Agronomía de la Universidad Nacional del Sur, durante el período comprendido entre el 3 de Noviembre de 2009 y el 7 de diciembre de 2013. La misma se desarrolló bajo la dirección del Ing. Agr. (Msc) Pablo Zalba, profesor adjunto de la cátedra “Fundamentos de Edafología” de la UNS y la Co-dirección del Ing. Agr. Dr. Roberto Simón Martínez, técnico de la Estación Experimental Agropecuaria Valle Inferior del Río Negro convenio INTA-Provincia de Río Negro.

[Firma del Alumno]



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR  
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el ..../..../..... , mereciendo la calificación de .....(.....)

---

## **Rendimiento de maíz en el Valle Inferior del Río Negro: Evaluación de la frecuencia de riego y de la fertilización nitrogenada**

**Resumen:** La producción de maíz bajo riego gravitacional constituye una alternativa productiva en los valles de la norpatagonia con altas producciones de grano, pero sin un control preciso de la cantidad agua aplicada. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de distintos manejos del riego y de la nutrición con nitrógeno (N) sobre la producción de maíz en condiciones agrícolas de alto rendimiento para mejorar la eficiencia de uso de dichos recursos en el valle inferior del río Negro. Se planteó que una reducción moderada del agua de riego no afectará la eficiencia de uso del N (EUN) pero mejorará la eficiencia de uso del agua de riego (EUAr). El efecto favorable de una correcta nutrición nitrogenada sobre la EUAr y la eficiencia de uso de la radiación (EUR) se mantendrá frente a la reducción de la frecuencia de riego. Se realizaron ensayos experimentales durante tres ciclos en parcelas divididas con tres repeticiones, siendo la frecuencia de riego el tratamiento principal y la fertilización nitrogenada el subtratamiento. Los tratamientos fueron: Alta Frecuencia de riego (AF) (se programó el riego cuando el potencial  $>-40$  kPa), Frecuencia Media (MF) (potencial  $>-90$  kPa) y Baja Frecuencia (BF) (potencial  $>-160$  kPa), utilizando sensores Watermark® para definir los momentos de riego. Las dosis de N fueron: 0, 70, 140, 210, 280 y 350 kg de N ha<sup>-1</sup> durante el ciclo 2006/07 y de 0, 140 y 280 Kg N ha<sup>-1</sup> en los ciclos 2007/08-2009/10. Se midió la cantidad de agua aplicada, la evolución del potencial agua a 25 cm de profundidad y del contenido de agua en el suelo mediante la sonda Diviner® 2000 y gravimetría. Se evaluó el comportamiento del área foliar, su efecto sobre la interceptación y uso de la radiación, la producción de biomasa y de rendimiento en grano y sus componentes. Se determinó la absorción y acumulación de N en biomasa aérea en floración y madurez fisiológica y se analizaron las EUAr, EUN y EUR. En promedio en los tratamientos MF y BF se aplicó un 30% y un 50% menos a agua que en AF. La mayor EUAr se asoció al tratamiento BF en los tres ciclos de estudio con valores entre 1,76 y 3.04 kg m<sup>-3</sup> y se incrementó a medida que disminuyó la cantidad de agua aplicada (i.e. BF>MF>AF). Asimismo, se observó una reducción del índice de área foliar (IAF); la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RAFi); la EUR en aproximadamente 10% y el rendimiento en grano entre el 20% y el 34%, siendo el número de granos más afectado que el peso. MF no se diferenció de AF en el IAF, la RAFi, biomasa ni en el rendimiento en grano en ninguno de los tres ciclos estudiados. La producción de

---

biomasa, el rendimiento, la EUR y la EUAr se incrementaron hasta 280 kg N ha<sup>-1</sup> en todas las frecuencias de riego. Una reducción moderada del agua de riego del 30%, asociada al tratamiento MF, mejoró la EUAr en un 27 % y no afectó de modo significativo la EUN con respecto a al tratamiento AF. Por lo hasta aquí expuesto el tratamiento MF es el que mejor compensó la mayor EUR y EUN logrando rendimientos similares al tratamiento AF pero con una significativa mejora en EUAr.

**Palabras clave:** maíz, frecuencia de riego, eficiencia uso del nitrógeno, eficiencia de uso del agua, eficiencia de uso de radiación.

---

**Maize yield in “Valle Inferior del Río Negro”: Assessing the irrigation frequency, and the nitrogen fertilization.**

**ABSTRACT:** Maize (*Zea mays* L.) production with surface irrigation is a productive alternative in the valleys of Northern Patagonia with high grain yields, but without a precise control of the amount of water applied. The aim of this study was to evaluate the effect of different management of the irrigation and nutrition with nitrogen (N) on maize production in high-yielding agricultural conditions to improve the efficiency of the use of these resources in the Valle inferior del Rio Negro. It was suggested that a moderate reduction in irrigation water will not affect the N use efficiency (NUE) but will improve the efficiency in irrigation water use (WUE<sub>i</sub>). The favorable nitrogen effect on WUE<sub>i</sub> and in radiation use efficiency (RUE) will be maintained against the reduction of the frequency of watering. Experimental tests were performed for three cycles split plot with three replications, considering the water frequency the main treatment and nitrogen fertilization as secondary treatment. The treatments were: High Frequency (AF) (potential > -40 kPa), Medium Frequency (MF) (potential > -90 kPa) and Low Frequency (BF) (potential > -160 kPa) using Watermark sensors to define the moments of irrigation. Nitrogen rates were 0, 70, 140, 210, 280 and 350 kg N ha<sup>-1</sup> during the 2006/07 cycle and 0, 140 and 280 kg N ha<sup>-1</sup> in cycles 2007/08-2009/10. The amount of water applied, water evolution potential at 25 cm depth and the water content in soil through the probe Diviner ® 2000 and gravimetrically were measured. The behavior of leaf area, its effect on the interception and use of radiation, biomass production and grain yield and its components were evaluated. Absorption and accumulation of N in aboveground biomass was determined at silking and physiological maturity and NUE, WUE<sub>i</sub> and RUE were analyzed. In average at the MF and BF treatments were applied 30% and 50% less water than in AF. A High EUAr was associated with BF treatment in the three study cycles with values between 1.76 and 3.04 kg m<sup>-3</sup>, and increased as the amount of water applied decreased (*i.e.* BF > MF > AF). Also a reduction in the leaf area index (LAI), radiation intercepted by the canopy (PAR<sub>i</sub>), the RUE about 10% and grain yield between 20% and 34%, with the kernel number affected more than the weight of the kernels was observed. MF did not differ from AF in leaf area, LAI, PAR<sub>i</sub>, biomass or grain yield in any of the three cycles studied. Biomass production, grain yield, RUE, and WUE<sub>i</sub> increased to 280 kg N ha<sup>-1</sup> at the different irrigation frequencies. A moderate reduction of irrigation water (30%),

---

associated with treatment MF, improved by 27% EUA and did not affect significantly the EUN regarding AF treatment. As far exposed the MF treatment is the best trade off the greater RUE and EUN with similar yields to AF treatment but with a significant improvement in EUAr.

Key words: Maize, irrigation frequency, nitrogen use efficiency, water use efficiency, radiation use efficiency.

---

**Dedicatoria:**

A Sofía y a mi hija, Agustina.

A mis padres Susana y Eduardo.

**Agradecimientos**

Llegado a este momento, quiero agradecer a todas las personas e instituciones que hicieron posible el desarrollo y finalización de esta Tesis.

A mis directores de Tesis, en INTA Roberto Simón Martínez, por sus consejos, el tiempo, paciencia, y compromiso dedicados a este trabajo, y en la UNS a Pablo Zalba por su apoyo permanente para que esta Tesis llegase a fin.

Al departamento de Agronomía y a los profesores de la Universidad Nacional del sur por proporcionar los medios y las condiciones necesarias para la realización de esta Tesis.

Al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Argentina (INTA) por el financiamiento de este trabajo.

A mis compañeros de la EEA Valle Inferior, muy especialmente a los Chicos del Laboratorio por colaborar en las mediciones en “pleno verano” y en las determinaciones químicas.

A la profesora Sonia Pérez del Centro Documental de la EEA Valle Inferior Convenio INTA-Provincia de Río Negro por las búsquedas de bibliografía.

El mayor agradecimiento para mi familia por su apoyo incondicional y por el ánimo que me dio y da a lo largo de la realización de este trabajo; a Sofía por su paciencia y amor, y a mis padres y hermanos por estar y seguir acompañándome en lo que elija.

Sin su desinteresado aporte y su valiosa colaboración no hubiese sido posible la realización del presente trabajo.

---

## Índice General

<b>Introducción</b> .....	1
Hipótesis .....	8
Objetivo General .....	8
Objetivos específicos .....	8
<b>Materiales y métodos</b> .....	9
Localización de los sitios experimentados .....	9
Caracterización agroclimática de la región del valle inferior del Río Negro .....	10
Radiación solar global durante el estudio .....	13
Temperaturas durante el estudio .....	14
Suelos y topografía .....	16
Diseño experimental .....	17
Cultivo de maíz .....	17
Metodología para la programación del riego y seguimiento de la humedad del suelo .....	19
Evaluación de la calidad del agua de riego utilizada .....	23
Evaluaciones en los cultivos de maíz .....	25
Observaciones fenológicas .....	25
Materia seca aérea .....	25
Área foliar .....	26
Intercepción de radiación .....	27
Absorción de nitrógeno .....	28
Evapotranspiración .....	29
Eficiencia del uso del agua de riego .....	31
Producción de grano y componentes del rendimiento .....	32
Análisis estadístico .....	32
<b>Resultados y Discusión</b> .....	33
Caracterización de perfiles de suelos .....	33
Calibración del sensor Watermark .....	44
Tensión de agua en el suelo .....	45
Evolución del contenido de agua en el suelo .....	48
Efecto de las frecuencias de riego sobre el desarrollo, crecimiento y rendimiento del cultivo .....	54
Producción de biomasa aérea .....	56
Partición de materia seca total de los distintos órganos aéreos .....	63
Rendimiento y componentes .....	70
Efecto del nitrógeno sobre el rendimiento y sus componentes .....	75
Eficiencia de uso del agua de riego .....	77
Eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) .....	81
Intercepción y eficiencia de uso de la radiación .....	87
Eficiencia de uso de la radiación (EUR) .....	93
<b>Conclusiones</b> .....	98
<b>Bibliografía</b> .....	100

---

## Indice de Figuras

Figura 1. Localización geográfica del valle inferior del Río Negro (Arg.) donde se ubican las parcelas experimentales. ....	10
Figura 2. Sumas mensuales de horas de sol efectivas en tres ciudades Argentinas (FAO, 1969) .....	12
Figura 3. Radiación solar global de Enero en Argentina (promedio de todos los meses de enero de la serie 1971-2000) en $Mj\ m^{-2}\ dia^{-1}$ .....	12
Figura 4. Temperaturas medias mensuales de la serie 1965-2008. EEA Valle Inferior. ....	13
Figura 5. Déficit hídrico medio estimado para el valle inferior del Río Negro según la ETP (Blaney y Criddle, 1962) y lluvias. ....	14
Figura 6. Radiación solar global ( $MJ\ m^{-2}$ ) para Balcarce, Pergamino y Viedma. Se grafican los promedios decádicos de los tres ciclos de cultivo estudiados y el fotoperíodo (horas) calculado para la region del VIRN. ....	15
Figura 7. Evolución de las temperaturas medias mensuales durante el ciclo de cultivo en los tres años estudiados y la temperatura media histórica (1965-2010) .....	16
Figura 8. Temperatura media del aire y temperaturas máximas y mínimas absolutas mensuales para el ciclo 2009/10 (a), 2007/08 (b) y 2006/07 (c) a partir de registros de la estación meteorológica de la EEA VI .....	16
Figura 9. Curvas de retención de humedad para los distintos horizontes del lote 14 (a) y del lote 2 (b). H vol. %: humedad volumétrica. pF: logaritmo decimal de la tensión. ....	44
Figura 10. Calibración del sensor de matriz granular Watermark en el cultivo de maíz. $\Omega$ es la resistencia eléctrica en kilo ohms y Humedad Vol % es la humedad volumétrica del suelo del lote 2 en %. ....	46
Figura 11. Evolución del contenido de agua del suelo en el periodo de mayor demanda hídrica, a partir de datos obtenidos con las sondas Diviner, para el tratamiento Baja Frecuencia de riego del ciclo 2009/10. ....	51
Figura 12. Evolución del potencial agua del suelo durante los ciclos de cultivo 2006/07 (a), 2007/08 (b) y 2009/10 (c) para las tres frecuencias de riego estudiadas (AF, MF y BF). La flecha ↓ indica el 50% de floración femenina. DDE: días desde la emergencia. PP: precipitación. ....	48
Figura 13. Evolución del contenido de agua del suelo en el periodo de mayor demanda hídrica, a partir de datos obtenidos con las sondas Diviner, para el tratamiento Media Frecuencia de riego del ciclo 2009/10. ....	51
Figura 14. Evolución del contenido de agua del suelo en el periodo de mayor demanda hídrica, a partir de datos obtenidos con las sondas Diviner, para el tratamiento Alta Frecuencia de riego del ciclo 2009/10. ....	52
Figura 15. Evolución del contenido de agua (mm) a diferentes profundidades (20, 40, 60 y 80 cm) del perfil del suelo para el tratamiento Baja Frecuencia de riego. ....	53
Figura 16. Evolución del contenido de agua (mm) a diferentes profundidades (20, 40, 60 y 80 cm) del perfil del suelo para el tratamiento Media Frecuencia de riego. ....	53
Figura 17. Evolución del contenido de agua (mm) a diferentes profundidades (20, 40, 60 y 80 cm) del perfil del suelo para el tratamiento Alta Frecuencia de riego. ....	54
Figura 18. Relación entre la humedad volumétrica medida con la sonda Diviner y la tensión de agua en el suelo (vertisol) medida con Watermark. ....	55
Figura 19. Relación entre la dosis de fertilizante nitrogenado (N) y la materia seca aérea total (MST) para el ciclo 2006/07. AF es Alta frecuencia, MF es Media frecuencia y BF es Baja frecuencia. ....	59
Figura 20. Dinámica de acumulación de biomasa aérea para cada frecuencia de riego: (a) AF, (b) MF y (c) BF, agrupados por nivel de fertilización: N0, N140 y N280. ....	

---

Datos correspondientes al ciclo 2009/10. La flecha hacia abajo indica el 50% de floración. AF es Alta frecuencia, MF es Media frecuencia y BF es Baja frecuencia. 61	
Figura 21. Acumulación de N en biomasa aérea hasta la madurez para las tres frecuencias de riego estudiadas en el ciclo 2009/2010. La flecha hacia abajo indica el 50% de floración. AF es Alta frecuencia, MF es Media frecuencia y BF es Baja frecuencia. Valores promedio para todos tratamientos de fertilización. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey $\alpha=0,05$ ) .....	63
Figura 22. Acumulación de N en biomasa aérea hasta la madurez para las distintas dosis de fertilización del ciclo 2009/2010. La flecha hacia abajo indica el 50% de floración. AF es Alta frecuencia, MF es Media frecuencia y BF es Baja frecuencia. Valores promedio para todos tratamientos de fertilización. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey $\alpha=0,05$ ).....	64
Figura 23. Evolución de la acumulación de biomasa aérea media (peso seco) por hectárea, y su partición entre órganos de la planta, para los tratamientos de riego (a) AF, (b) MF y (c) BF y para el tratamiento N280. (Ciclo 2009/10). La flecha hacia abajo indica 50% de floración. AF: alta frecuencia, MF: media frecuencia y BF: baja frecuencia. ....	68
Figura 24. Evolución de la MS de tallos en relación a la MS total (MS tallo/MST) según el tiempo térmico desde emergencia (TTDE). Se grafican los valores medios de cada frecuencia de riego y N280 del ciclo 2009/10. AF: alta frecuencia, MF: media frecuencia y BF: baja frecuencia. ....	69
Figura 25. Evolución de la MS de hojas en relación a la MS total (MS hoja/MST) en función del tiempo térmico desde emergencia (TTDE). Se grafican los valores medios de cada frecuencia de riego y N280 del ciclo 2009/10. AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia. La flecha hacia abajo indica 50% floración .....	70
Figura 26. Evolución de la MS de espiga en relación a la MS total (MS espiga/MST) en función del tiempo térmico desde floración (TTDF). Se grafican los valores medios de cada frecuencia de riego y N280 del ciclo 2009/10. AF: alta frecuencia, MF: media frecuencia y BF: baja frecuencia. ....	71
Figura 27. Efecto de las frecuencias de riego en el rendimiento en grano en los ciclos 2006/07, 2007/08 y 2009/10 para cada frecuencia de riego (AF, MF y BF). Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey $\alpha=0,05$ ) AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia....	73
Figura 28. Relación entre el rendimiento y los componentes del NG y PG según las frecuencias de riego para el ciclo 2006/07 (a), 2007/08 (b) y 2009/10 (c). AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia de riego. P1000 es el peso de 1000 granos. ....	75
Figura 28. Eficiencia de uso del agua de riego (EUAr) para rendimiento en grano de maíz en los tres ciclos de cultivo para Alta Frecuencia (AF) Media Frecuencia (MF) y Baja Frecuencia (BF) de riego para los tres ciclos de estudio. Letras minúsculas distintas sobre cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey $\alpha=0,05$ ) Promedio de tratamientos de fertilización con N. ....	79
Figura 30. Rendimiento en grano de maíz según dosis creciente de nitrógeno. Valores medios para tres frecuencias de riego del ciclo 2006/07. Las letras minúsculas distintas sobre las columnas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey $\alpha=0,05$ ).....	77
Figura 31. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC) en periodos alrededor de floración (R1) en función de las frecuencias de riego para el ciclo 2009/2010. Letras	

---

minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey $\alpha=0,05$ ) AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia....	73
Figura 32. Relación entre la eficiencia de uso de agua (EUA) y los niveles de nitrógeno en el suelo (N inorgánico inicial + N fertilizante). Los datos corresponden a los ciclos 2006/07, 2007/08 y 2009/10.....	81
Figura 33: Rendimiento de grano de maíz según tratamientos de fertilización con nitrógeno en los ciclos 2007/08 y 2009/10. Valores medios para las tres frecuencias de riego. Las letras minúsculas distintas sobre cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos y campañas (Tukey $\alpha=0,05$ ).....	78
Figura 34. Eficiencia del uso del agua de riego para la producción de grano en función de tres dosis de nitrógeno, aplicadas como fertilizante, para los ciclos 2006/07, 2007/08 y 2009/10. Letras minúsculas distintas sobre las columnas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey $\alpha=0,05$ ).....	82
Figura 35. Requerimientos de nitrógeno en biomasa aérea para distintos niveles de producción de maíz. Los datos corresponden a los valores medios de los tres ciclos analizados (2006/07, 2007/08 y 2009/10).....	87
Figura 36. Eficiencia de uso de nitrógeno en función a las distintas dosis de nitrógeno aplicadas y según de las frecuencias de riego analizadas durante el ciclo 2006/07. AF (línea continua) es alta frecuencia, MF (línea discontinua) es media frecuencia y BF (línea discontinua con puntos ) es baja frecuencia.....	90
Figura 37. Índice de área foliar (IAF) en función de la dosis de nitrógeno aplicado para los tres tratamientos de riego ( AF, MF y BF) del ciclo 2006/07. Letras minúsculas distintas sobre las columnas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey $\alpha=0,05$ ) AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia. ....	92
Figura 38. Evolución del IAF en función de los días desde emergencia para los tres tratamientos nitrogenados (N0, N140 y N280) y para cada frecuencia de riego (AF, MF y BF) para el ciclo 2009/10. AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia.....	93
Figura 39. Porcentaje de radiación fotosintéticamente activa interceptada en R1 según tratamientos de riego (AF, MF y BF) y niveles de fertilización con nitrógeno (N0, N140 y N280) para el ciclo 2007/2008. Letras minúsculas distintas sobre las columnas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey $\alpha=0,05$ ) AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia.....	94
Figura 40. Evolución del porcentaje de radiación fotosintéticamente activa interceptada (%RFAi) en función de los días desde emergencia (DDE) para los tratamientos de riego AF, MF y BF y sus combinaciones con los niveles nitrogenados N0, N140 y N280 correspondiente al ciclo 2009/10. AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia. ....	95
Figura 41. Relación entre la materia seca acumulada (MST) y la radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (RFAi) durante el ciclo del cultivo para la comparación entre frecuencias de riego. AF (línea discontinua) es alta frecuencia, MF (línea punteada) es media frecuencia y BF( línea continua) es baja frecuencia. ....	96
Figura 42. Relación entre la materia seca acumulada (MST) y la radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (RFAi) durante el ciclo del cultivo en función de distintos entre niveles nitrogenados N0 (línea continua), N140 (línea discontinua) y N280 (línea punteada). ....	98

---

## Indice de Tablas

Tabla 1. Conductividad eléctrica. del agua del Río Negro en Viedma según por el Departamento Provincial de Agua de la Provincia de Río Negro. ....	26
Tabla 2. Características físico-químicas del agua de riego tomadas en la compuerta de la EEAVI y utilizada en el ensayo durante el ciclo 2009/10.....	26
Tabla 3. Descripción del perfil perteneciente al lote 14 maíz. ....	37
Tabla 4. Propiedades físico-químicas del perfil del suelo analizado en el Lote 14.....	38
Tabla 5. Descripción del perfil del suelo perteneciente al Lote 2. ....	40
Tabla 6. Propiedades físico-químicas del perfil del suelo analizado (Lote 2). ....	42
Tabla 7. Contenido de Nitrógeno de nitratos (N-NO <sub>3</sub> ) edáfico en la siembra.....	44
Tabla 8. Contenido de agua en capacidad de campo (CC), en el punto de marchitez permanente (PMP) y de agua útil para los perfiles (a) y (b). ....	45
Tabla 9. Número de riegos aplicados al cultivo en las tres frecuencias de riego (AF, MF y BF) para los tres años de ensayos. ....	50
Tabla 10. Cantidad de agua aplicada, lluvia, agua útil (AU) a la siembra y al finalizar el ciclo, agua total recibida y ETc para los tres años de ensayos. ....	50
Tabla 11. Tiempo térmico y duración en días de las distintas etapas fenológicas del maíz en el tratamiento Alta frecuencia de riego y N280 para los ciclos 2006/07 (año 1), 2007/08(año 2) y 2009/10 (Año 3). V6= sexta hoja expandida; MF= madurez fisiológica del grano.....	57
Tabla 12. Efectos de las frecuencias de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en la acumulación de materia seca total (kg ha <sup>-1</sup> ), en floración de los tres ciclos estudiados. AF es Alta frecuencia, MF es Media frecuencia y BF es Baja frecuencia. letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey). ....	59
Tabla 13 Efectos de las frecuencias de riego y de la fertilización nitrogenada en la producción de la materia seca total aérea (kg ha <sup>-1</sup> ), en 5 fechas de muestreo del ciclo 2009/10. AF es Alta frecuencia, MF es Media frecuencia y BF es Baja frecuencia. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey $\alpha=0,05$ ).....	61
Tabla 14 Coeficientes, nivel de significación estadística y coeficiente de determinación (R <sup>2</sup> ) de los polinomios de tercer grado que representan la evolución de de la materia seca total en promedio para el ciclo 2009/10. AF es Alta frecuencia, MF es Media frecuencia y BF es Baja frecuencia.....	62
Tabla 15. Relación entre la materia seca acumulada a floración y la MST, para los ciclos 2006/07, 2007/08 y 2009/10 para cada dosis de nitrógeno y frecuencia de riego.....	63
Tabla 16. Efectos de las frecuencias de riego, de la fertilización nitrogenada en la acumulación de materia seca total aérea particionada (kg ha <sup>-1</sup> ), en floración (R1) y en madurez (R6) del ciclo 2006/07. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey $\alpha=0,05$ ).....	67
Tabla 17. Efectos de las frecuencias de riego, de la fertilización nitrogenada en la acumulación de materia seca total aérea particionada (kg ha <sup>-1</sup> ), en floración (R1) y en madurez (R6) del ciclo 2007/08. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey $\alpha=0,05$ ).....	68
Tabla 18. Efectos de las frecuencias de riego, de la fertilización nitrogenada en la acumulación de materia seca total aérea particionada (kg ha <sup>-1</sup> ), en floración (R1) y en madurez (R6) del ciclo 2009/10. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey $\alpha=0,05$ ).....	68

---

Tabla 19. Número de granos m <sup>-2</sup> (NG), peso individual de los granos (PG) y rendimiento en los tres ciclos de cultivo para Alta Frecuencia (AF) Media Frecuencia (MF) y Baja Frecuencia (BF) de riego y tratamientos de fertilización con nitrógeno. Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey $\alpha=0,05$ ) .....	75
Tabla 20. Eficiencia de uso del agua de riego según los niveles de fertilización nitrogenada y las frecuencias de riego para los tres ciclos analizados. Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey $\alpha=0,05$ ). DMS es la diferencia mínima significativa. ....	84
Tabla 21. Nitrógeno total en biomasa aérea en R1 (N-planta-R1), en R6 (N-pl- R6) y nitrógeno en granos (Ng) de maíz según diferentes dosis de N y tres frecuencias de riego del ciclo 2006/07. AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia de riego. Las letras minúsculas distintas en sentido vertical para cada frecuencia e riego indican diferencias significativas entre tratamientos de fertilización (Tukey $\alpha=0,05$ ) .....	88
Tabla 22. Nitrógeno total en biomasa aérea en R1 (N-planta-R1), en R6 (N-pl- R6) y nitrógeno en granos (Ng) de maíz según diferentes dosis de N y tres frecuencias de riego del ciclo 2007/08. AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia de riego. Las letras minúsculas distintas en sentido vertical para cada frecuencia e riego indican diferencias significativas entre tratamientos de fertilización (Tukey $\alpha=0,05$ ) .....	89
Tabla 23. Nitrógeno total en biomasa aérea en R1 (N-planta-R1), en R6 (N-pl- R6) y nitrógeno en granos (Ng) de maíz según diferentes dosis de N y tres frecuencias de riego del ciclo 2009/10. AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia de riego. Las letras minúsculas distintas en sentido vertical para cada frecuencia e riego indican diferencias significativas entre tratamientos de fertilización (Tukey $\alpha=0,05$ ) .....	89
Tabla 24. Nitrógeno total en biomasa aérea en R1 (N-planta-R1), en R6 (N-pl- R6) y nitrógeno en granos (Ng) de maíz según las tres frecuencias de riego de los tres ciclos estudiados. AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia de riego. Ng es el nitrógeno en granos. Las letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias significativas entre tratamientos de riego (Tukey $\alpha=0,05$ ) .....	90
Tabla 25. Componentes de la eficiencia de uso del nitrógeno en maíz del testigo y 5 dosis de N, para las tres frecuencias de riego del ciclo 2006/07. EUN: eficiencia de uso de N; Efis.: eficiencia fisiológica o de utilización. Eac: eficiencia de acumulación de N en grano. Eabs: eficiencia de absorción; ICN: Índice de Cosecha del N .....	92
Tabla 26. Componentes de la eficiencia de uso del nitrógeno en maíz en función de 3 dosis de N, para las tres frecuencias de riego del ciclo 2007/08. EUN: eficiencia de uso de N; Efis.: eficiencia fisiológica o de utilización. Eac: eficiencia de acumulación de N en grano. Eabs: eficiencia de absorción; ICN: Índice de Cosecha del N .....	93
Tabla 27. Componentes de la eficiencia de uso del nitrógeno en maíz en función 3 dosis de N, para las tres frecuencias de riego del ciclo 2009/10. EUN: eficiencia de uso de N; Efis.: eficiencia fisiológica o de utilización. Eac: eficiencia de acumulación de N en grano. Eabs: eficiencia de absorción; ICN: Índice de Cosecha del N .....	93
Tabla 28. Efectos de las frecuencias de riego, de la fertilización nitrogenada en el área foliar y en el índice de área foliar en floración para los ciclos 2006/07, 2007/08 y 2009/10. AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia. Las	

---

letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias significativas entre tratamientos de riego (Tukey $\alpha=0,05$ ).....	95
Tabla 29. Efectos de las frecuencias de riego, de la fertilización nitrogenada en el porcentaje de intercepción de radiación en R1 del ciclo 2006/07 y en doce hojas (V12), en floración (R1) y en grano lechoso (R3) del ciclo 2009/10 .....	100

## **Introducción**

La agricultura mundial emplea el 70% del agua disponible (FAO, 2010) para regar el 17% de la superficie agrícola mundial la cual genera el 40% de la producción final (Juan García, 2008). Es importante, entonces, mantener la agricultura de regadío para satisfacer la demanda futura de alimentos. Se estima que la población mundial podría llegar a los 9.100 millones de habitantes para el año 2050 (ONU, 2005). Como consecuencia de este crecimiento en la población, la mejora en la calidad de la dieta consumida y las crecientes necesidades de biocombustibles, se espera un incremento significativo de la demanda mundial de cereales (FAO, 2004). El incremento de la superficie cultivada es limitada, por lo tanto, el aumento de la producción agrícola debe proceder de tierras que ya están en uso, haciendo más eficiente la utilización de los recursos limitados que brinda el ambiente, entre estos el agua (FAO, 2002). Por otro lado, la oferta del recurso hídrico para la agricultura es cada vez más limitado por lo que se requiere de sistemas de cultivos con altos niveles de eficiencia en el uso del agua (Debaeke y Aboudrare, 2004). En este sentido, Sagardoy (2001) expuso que para el año 2030 la agricultura de regadío mundial tendría que generar el 47% de la producción final agraria y, paralelamente, se debería aumentar la eficiencia en el uso del agua de riego del 43% al 50%.

La superficie bajo riego en la Argentina es actualmente de alrededor de 2.200.000 ha. De ella, la mitad está en regiones áridas y semiáridas (Zappi, 2012) como son los valles andinos de Jujuy, Salta, Tucumán, Catamarca, La Rioja, Santiago del Estero, San Juan, Mendoza, Neuquén, Río Negro, Chubut y sur de las provincias de La Pampa y Buenos Aires. El agua es la gran limitante para el desarrollo de la agricultura en estas zonas por lo que es necesario optimizar el uso de la misma en los sistemas de riego. Por lo tanto las diferentes técnicas de riego que se adopten deben incluir un mejoramiento de la eficiencia global de uso de agua para satisfacer los requerimientos hídricos de cultivos en los distintos momentos de su desarrollo, en especial en sus periodos críticos. En muchos sistemas de producción tanto el agua como el nitrógeno son limitantes para el cultivo de maíz (*Zea mays* L.)(Cox *et al.*, 1993). La optimización de ambos insumos aportará a la sostenibilidad de estos sistemas. En Argentina el 70% del área regada se efectúa por el método superficial o gravitacional (PROCISUR, 2009). Las pérdidas de agua hacia capas profundas en parcelas de riego llevan asociados problemas medioambientales ya que diluyen y arrastran pesticidas y/o fertilizantes provocando con

ello problemas de contaminación difusa a nivel regional (Foster y Chilton, 1998). La amplia presencia del riego por gravedad justifica la necesidad de hacer un uso más eficiente del agua a nivel de parcela. El aumento general de la eficiencia de aplicación del agua de riego no sólo se consigue con la conversión a sistemas presurizados de riego, sino que, puede ser suficiente con la modernización y la aplicación de tecnologías a los riegos tradicionales por gravedad (Clemmens, 1998).

Las características del riego gravitacional, como el utilizado en el Valle Inferior del Río Negro, implican que en cada riego se aplique la cantidad de agua necesaria para llevar al suelo a capacidad de campo (CC). Luego de un determinado intervalo de tiempo, se realiza una nueva aplicación llevando nuevamente el suelo a CC sin un control preciso, por parte del productor, de la cantidad total de agua aplicada. Además, la distribución del agua de riego en las chacras del valle involucra el turnado en la época de mayor demanda hídrica atmosférica, lo cual, dependiendo de la superficie permite realizar un evento de riego con una frecuencia aproximada de una vez por semana. Bajo estas condiciones, según estudios realizados por Agua y Energía Eléctrica (1987), los productores riegan antes de que se haya consumido el 60 % del agua útil para las plantas llegando los excedentes al sistema de drenaje disminuyendo considerablemente la eficiencia del uso del agua (EUA).

Si bien el cálculo del agua aplicada se realiza de acuerdo a parámetros físicos que gobiernan la determinación de la lámina de reposición, el volumen de la misma finalmente aplicado supera ampliamente el valor de la demanda neta. Esto es válido tanto para los cultivos anuales como para los perennes a consecuencia de que la aplicación de agua por el método gravitacional carece de la sensibilidad suficiente para reponer exactamente el número de milímetros calculados por la ecuación de determinación de lámina. En la práctica no es posible la aplicación de láminas inferiores a 60 u 80 mm., en riego por surco o melga, aún en condiciones óptimas de nivelación, como es el caso de la nivelación con la utilización de rayo láser, el cual incrementa sensiblemente la eficiencia de aplicación del agua de riego (Sanchez, 2013). La tasa de evapotranspiración, la cual determina la demanda neta, es cuantitativamente inferior a la lámina bruta. Es por eso que en el manejo de este método, además de la velocidad de avance (Zumelzú y Roqué, 2012), la pendiente, el caudal instantáneo, el ancho y largo de melga o surco (Pereira, 1999), radica en la determinación del momento o frecuencia de riego que implica conocer cada cuanto tiempo se riega cada lote.

El desarrollo de los sensores para la medición del agua en el suelo permite tener una aproximación o un mejor conocimiento de cuánto y cuándo regar dando información sobre el contenido volumétrico de agua en el suelo (TDR “Time-domain Reflectometer” y FDR “Frequency-domain Reflectometer”) como también puede indicar el potencial matricial (watermark y electrotensiómetro) (Thompson *et al.*, 1996). La utilización de estos sensores de humedad que permitan conocer el estado hídrico y el potencial agua del suelo, podrían optimizar el momento oportuno de riego, mejorando la EUA sin disminuir la productividad del cultivo. Los sensores de humedad del suelo permiten tener un mayor conocimiento del consumo del recurso en las distintas partes de una parcela el cual no es uniforme debido principalmente a la variabilidad espacial del suelo. Con una medida continua del estado hídrico del suelo y en función del tiempo real, con dichos sensores y tomando datos entre riegos consecutivos, se puede obtener una aproximación del flujo hídrico y, con ello, llevar a cabo una planificación del riego capaz de satisfacer las necesidades del cultivo. La comprensión del sistema planta-suelo-agua genera una oportunidad para la gestión de la demanda de agua en respuesta al consumo de humedad del suelo por evapotranspiración de las plantas de maíz. Con la programación del riego, el tiempo y el control de la cantidad de agua aplicada se puede alcanzar las metas de rendimiento mientras se practica la conservación del agua, evitando pérdidas innecesarias por drenaje (Guitjens, 1990).

La zona núcleo del cultivo de maíz en la República Argentina puede definirse de acuerdo a las referencias bibliográficas y boletines técnicos ubicada al norte del paralelo 35°S, en la zona que comprende el norte de Buenos Aires, sur de Santa Fé y sur-este de Córdoba (INTA, 1997; Dekalb, 2012; Pioneer, 2012). Esta ubicación se asocia principalmente a una disponibilidad hídrica aceptable para lograr un buen rendimiento en el cultivo de secano (López Bellido, 1991). Al sur y al oeste de la zona núcleo, el maíz necesita del riego para poder lograr producción de grano. Desde el punto de vista térmico, en los valles de la norpatagonia, si bien el verano no es de larga duración, presenta temperaturas máximas no excesivas acordes para un adecuado crecimiento y, además, se prolonga en forma moderada más allá de la iniciación del otoño (FAO, 1969) Esto facilita que la duración de los procesos de crecimiento se prolonguen, posibilitando al cultivo disponer de más días de fotosíntesis durante el ciclo. Esta combinación de factores otorga a los valles norpatagónicos condiciones para la plena expresión del rendimiento del cultivo de maíz.

Si se considera que la región maicera de los EEUU, se ubica entre los 38° y los 43° latitud N, el valle inferior del Río Negro (VIRN) (40°48'lat S) sería una región geográficamente apta para maíces de alto rendimiento. La norpatagonia concentra en los grandes valles una actividad agropecuaria intensiva de alrededor de 280.000 hectáreas regadas con una superficie potencial, en la provincia de Río Negro, que se puede estimar entre 700.000 y 800.000 hectáreas (Agua y Energía Eléctrica; 1987). La provincia de Río Negro cuenta con varios valles irrigados que se extienden a lo largo del Río Negro y del Río Colorado. El río Negro ha realizado, en la planicie aluvial del valle inferior, diferentes deposiciones de arenas, limos y arcillas de origen fluvio-glacial, a partir de los cuales evolucionó el complejo los suelos que se presenta en este valle. Masotta (1970) clasificó algunas series de suelo presentes en la zona de desarrollo del Instituto de desarrollo del Valle Inferior (IDEVI) basados en características químicas y morfológicas con el objeto de determinar su aptitud de riego. El maíz de regadío constituye una alternativa productiva para los agricultores de los valles de la norpatagonia, que cuenta con características agroclimáticas de alta radiación y presenta una amplitud térmica considerable las cuales definen las condiciones ambientales más apropiadas para la alta producción del cultivo en condiciones de riego (Arriaga *et al.*, 1984). De una serie de ensayos comparativos de rendimiento realizados por el INTA Valle Inferior cultivados sin limitaciones hídrico nutricionales y alta densidad los cuales se acercaron a los potenciales del cultivo para la zona, se destacan datos puntuales de rendimiento en el orden de magnitud de los 20000 kg.ha<sup>-1</sup> (Margiotta. *et al.*, 2008 y 2009, Reinoso *et al.*, 2009). También se han publicado datos de ensayos con rendimientos equivalentes a los 16000 kg ha<sup>-1</sup>(Rivas y Matarazzo, 2006, 2007, 2009) en el valle inferior del Río Colorado, con una salinidad mayor que la del Río Negro, y trabajos en el Alto Valle del Río Negro (Cancio, 2012) y en los valles de la provincia del Chubut, con rendimientos cercanos a los 34000 kg ha<sup>-1</sup> de materia seca para silo de planta entera (Matinata, 2010). Sin embargo, diversos factores, entre otros, la heterogeneidad de los suelos, el manejo del agua, la aplicación de fertilizantes y el control de malezas hacen que no se observe en grandes extensiones de altos rendimientos (Martinez *et al.*,2012).

La producción de granos en el cultivo de maíz está principalmente limitada por el uso de fertilizantes nitrogenados y la disponibilidad de agua en el suelo (Maddonni, 2001). El riego suplementario en este cultivo es una herramienta que puede ayudar a aumentar la productividad y fundamentalmente a estabilizar los rendimientos (Martellotto *et al.*,

2002). Diversos autores señalan que el aumento de la fertilización nitrogenada produce un incremento en el rendimiento de materia seca, aumentando además el contenido proteico del grano de maíz (Muchow y Sinclair, 1994; Sinclair y Muchow, 1995). Sin embargo, el desconocimiento de su correcto manejo tiene como principal riesgo su impacto negativo sobre el ambiente, la alteración de los recursos y el uso inadecuado de insumos. El interés en la relación entre la producción de cultivos y la eficiencia en el uso del agua se incrementa debido a la escasez del agua de riego y a su costo creciente (Maturano, 2002). El cultivo de maíz es altamente sensible a las deficiencias hídricas durante la floración, momento en el cual, la fijación de estructuras reproductivas puede ser severamente reducida (Andrade y Sadras, 2000). Además, si el estrés se presenta en etapas vegetativas, afecta la expansión foliar reduciendo el índice de área foliar y la radiación incidente interceptada (Dardanelli *et al.*, 2003).

A mayores latitudes, durante el ciclo cultivo durante el verano, la radiación incidente es mayor (Andrade, 1992). El aumento del crecimiento del maíz depende en forma positiva de esta radiación y por lo tanto, el rendimiento (Andrade, *et al.*, 1996). Esta relación no solo se vincula con el aprovechamiento de la radiación incidente, sino también con la capacidad de canopeo para interceptarla y con la eficiencia del cultivo para transformarla (Uhart y Andrade, 1995). Bajo condiciones potenciales, el crecimiento del cultivo es proporcional a la cantidad de radiación fotosintéticamente activa incidente, a la eficiencia con la que el cultivo la intercepta y de la eficiencia con la que las plantas utilizan la energía interceptada para fijar dióxido de carbono (Gallagher y Biscoe, 1978, Andrade, 1996). En este sentido para alcanzar altos rendimientos se debe lograr la intercepción de la radiación solar incidente que asegure las máximas tasas de crecimiento del cultivo, ocurriendo esto cuando el índice de área foliar (IAF) aumenta hasta el IAF crítico, que permite captar el 95 % de la radiación incidente.

Ensayos de fertilización a campo realizados en el Valle Inferior del Río Negro por Margiotta *et al.* (1988) y Margiotta y Martínez (1992) determinaron que podían incrementarse significativamente los rendimientos de maíz bajo riego mediante la aplicación de nitrógeno con fechas de siembra de mediados de octubre y densidades de siembra de 10 plantas (m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>. El efecto de la fertilización nitrogenada en los cultivos agrícolas sobre la eficiencia en el uso del agua (EUA), de la radiación (EUR) y del nitrógeno (EUN) ha sido bien documentada (Cooper *et al.*, 1987; Sinclair y Horie, 1989; Huggins y Pan, 1993; Paponov *et al.*, 1996). En general, se ha encontrado que con el incremento de la disponibilidad de N para los cultivos la EUA y la EUR

aumentan, mientras que la EUN tiende a decrecer. En efecto, experiencias previas demostraron que la EUA estuvo explicada por las variaciones producidas en la EUR por efecto de la nutrición nitrogenada (Caviglia y Sadras, 2001). Los elevados requerimientos de N para lograr altos rendimientos (Martinez *et al.*, 2004) en el cultivo de maíz en la norpatagonia bajo condiciones de riego gravitacional y, considerando que, el uso de dosis que excedan los requerimientos del cultivo puede provocar efectos negativos para el ambiente, (Sainz Rosas *et al.*, 2001) se destacan la importancia de la correcta evaluación de la disponibilidad de N. El movimiento de nitratos en los suelos y las pérdidas por lixiviación pueden ser afectadas por varios factores (Hergert, 1986; Criado, 1996; Sieling *et al.*, 1997; Kaluli *et al.*, 1999). Las principales causas son: 1) transformaciones de N en el suelo, 2) dinámica de absorción de N por parte del cultivo, 3) lluvias excesivas, 4) textura del suelo, y 5) manejo del riego y la fertilización nitrogenada. Cuando el riego, o las lluvias, exceden la evapotranspiración existe un riesgo potencial de lixiviación. La optimización de la aplicación de agua y nitrógeno, y la reducción de la lixiviación se logra con la adecuada incorporación de los mismos de acuerdo a las necesidades del cultivo (Maturano, 2002).

Una de las metodologías más aceptada para cuantificar la dinámica del nitrógeno en el sistema suelo-planta es la del balance de nitrógeno. Simula procesos de ganancias, pérdidas y transformaciones de este elemento en el sistema pudiendo obtenerse la cantidad de fertilizante nitrogenado requerido por el cultivo, de acuerdo a la ecuación formulada por Meisinger (1984). El diagnóstico de requerimiento de N en maíz más utilizado en sistemas de secano en Argentina se basa en la determinación del contenido de N como nitratos ( $N-NO^3$ ) hasta los 60 cm de profundidad antes de la siembra y en etapas vegetativas tempranas (V6) (Díaz Zorita y Duarte, 1997; Mistrorigo *et al.*, 1997 y Ruiz *et al.*, 2001). Sin embargo, también se ha propuesto la determinación de  $N-NO^3$  a una profundidad de 30 cm en el estadio de seis hojas (V6) (Ritchie y Hanway, 1992) siendo un adecuado estimador de la disponibilidad de nitrógeno para el cultivo (Fox *et al.*, 1989; Sainz Rozas *et al.*, 2000). A su vez, se ha demostrado una mayor eficiencia de recuperación del N cuando las aplicaciones se realizan en este estadio fenológico (Sainz Rozas *et al.*, 2004). Si bien el método del balance de N es conceptualmente sólido, es importante destacar que se trata de una aproximación empírica, donde no se toman en cuenta los procesos que determinan el rendimiento, ni aquellos que afectan la dinámica del nitrógeno en el sistema suelo-planta, implicando la necesidad de calibrar esta metodología para cada ambiente (Salvagiotti *et al.*, 2002).

Utilizar la dosis de N aplicado como el N disponible en el suelo es cuestionable ya que no todo el fertilizante aplicado es aprovechado y no todo el N disponible proviene del mismo (Pierce y Rice, 1988). Se define como provisión de N ( $N_p$ ) a la suma de las fuentes potencialmente disponibles como el N proveniente del fertilizante ( $N_f$ ), el contenido de N residual inorgánico previo a la siembra ( $N_r$ ), el mineralizado ( $N_{min}$ ), el fijado ( $N_{fij}$ ), y el N deposicional ( $N_{dp}$ ) (incluyendo el atmosférico, aportado por el agua de riego, y por escorrentía) (Pierce y Rice, 1988). La EUN, según la definición anterior, sería el rendimiento en grano por unidad de N provisto. Sin embargo, si ocurren pérdidas de N, entonces sólo una parte de N provisto es retenido en el sistema suelo-planta, por lo que es necesario definir el N disponible ( $N_{disp}$ ) =  $N_p$  – pérdidas de N o calculado en base a lo absorbido por el cultivo ( $N_{tR6}$ ) más el nitrógeno en el suelo en madurez fisiológica ( $N_{hR6}$ ). Las pérdidas de N están constituidas por el N inmovilizado, el N lixiviado, las pérdidas de N gaseoso, y el N fijado químicamente. Esta nueva definición de N disponible permite desarrollar las siguientes relaciones, ya que la EUN [rendimiento en grano ( $N_{provisto}$ )<sup>-1</sup>] es el producto de dos factores: a) eficiencia del N disponible [ $N_{disp} \cdot N_p$ ]<sup>-1</sup>, que es la fracción del N provisto disponible luego de descontar las pérdidas de la fuente de N disponible en el suelo; y b) EUN disp: rendimiento en grano( $N_{disp}$ )<sup>-1</sup>, que es una medida de la capacidad del cultivo de usar el N disponible para la producción de grano (Moll *et al.*, 1982). La relación entre el rendimiento en grano ( $N_{disp}$ )<sup>-1</sup> es el resultado de dos procesos fisiológicos: a) la eficiencia en la absorción del N disp, definida como la relación  $N_t (N_{disp})^{-1}$  donde  $N_t$  es el contenido de N total en planta en madurez fisiológica y b) la eficiencia en la utilización del N, definida como el rendimiento en grano ( $N_t$ )<sup>-1</sup> (Huggins y Pan, 1993). En la región de los valles norpatagónicos la información sobre los efectos de las frecuencias de riego y del N en la EUA, EUN y la EUR de cultivos de maíz de alto rendimiento son insuficientes. No existe información sobre clasificación taxonómica de los suelos de VIRN, que figuran en bibliografía como complejo de suelos (Geointa, 2012). La descripción y el análisis de los mecanismos involucrados en las respuestas a la variación de los factores agua y nitrógeno en la generación del rendimiento y en el establecimiento de las eficiencias de uso de esos recursos permitiría readecuar la actual estrategia de producción de maíz de alto rendimiento en el valle inferior haciendo un mejor uso del agua de riego en un marco de sustentabilidad ambiental.

## **Hipótesis**

- Una reducción moderada del agua de riego no afectará la EUN pero mejorará la EUA.
- El efecto favorable de una correcta nutrición nitrogenada sobre la EUAr y la EUR se mantendrá frente a la reducción de la frecuencia de riego.

## **Objetivo General**

Evaluar el efecto de distintos manejos del riego y de la nutrición con nitrógeno sobre la producción de maíz en condiciones agrícolas de alto rendimiento para mejorar la eficiencia de uso de dichos recursos en el valle inferior del río negro.

## **Objetivos específicos**

- Determinar una frecuencia de riego, por medio de sensores de potencial agua del suelo, que optimice la EUA y la EUN para la producción de maíz de alto rendimiento en la zona del Valle Inferior del Río Negro.
- Evaluar el comportamiento del área foliar, su efecto sobre la captura y uso de la radiación, la producción de biomasa, rendimiento en grano y sus componentes frente a distintas dosis de nitrógeno y frecuencias de riego para las condiciones del Valle Inferior del Río Negro.
- Caracterizar y clasificar los suelos de la zona de estudio.

## Materiales y métodos

### Localización de los sitios experimentados

La zona en que se enfoca el estudio está ubicada en la parte este de la patagonia septentrional, dentro del valle inferior del río Negro (Arg.). Se trata de una larga planicie fluvio-aluvial que se extiende por unos 100 km en la margen derecha de río, desde la primera angostura (sitio de la bocatoma del distrito de riego del IDEVI,) éste hasta la desembocadura en el océano Atlántico (Rosso, 2012). Los ensayos se realizaron durante los ciclos agrícolas 2006/07, 2007/2008 y 2009/10 en la Estación Experimental Agropecuaria Valle Inferior del Río Negro (EEAVI) convenio Provincia de Río Negro- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). La EEAVI está ubicada en las siguientes coordenadas geográficas: latitud:  $40^{\circ} 48' S$ ; longitud:  $63^{\circ} 05' O$ ; y altitud: 4 m sobre el nivel del mar (Figura 1).

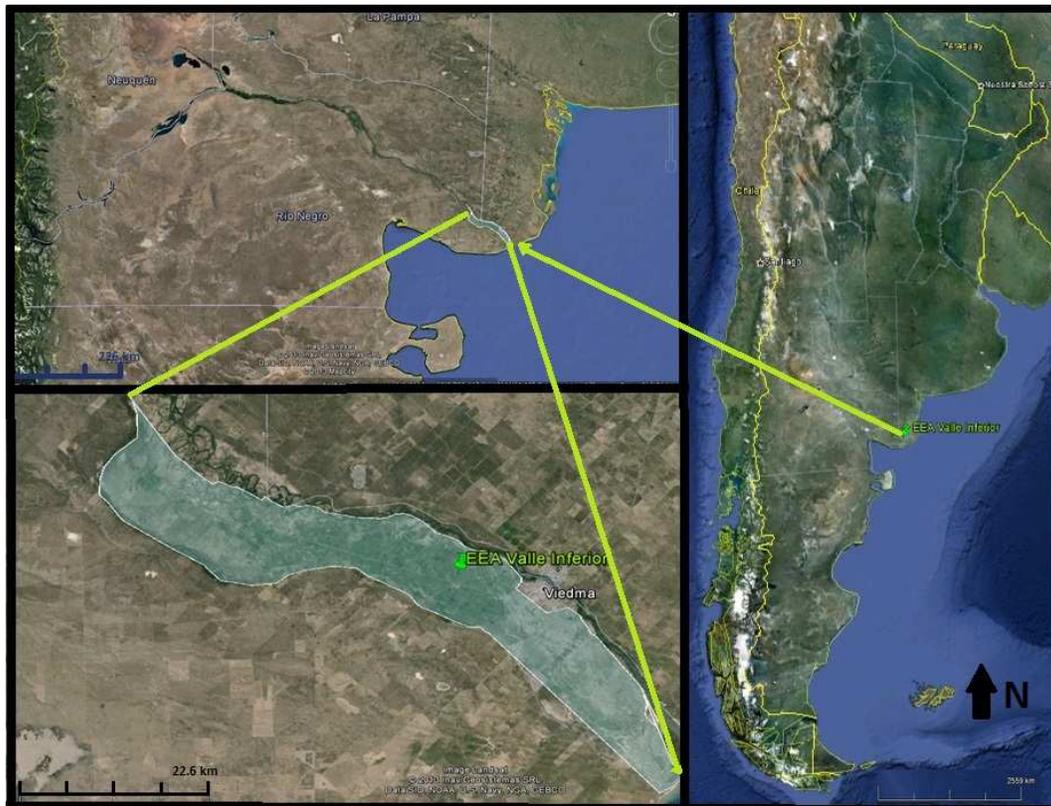


Figura 1. Localización geográfica del valle inferior del Río Negro (Arg.) donde se ubican las parcelas experimentales.

### Caracterización agroclimática de la región del valle inferior del Río Negro.

El clima del valle inferior del Río Negro (VIRN) se clasifica según Thorntwaite (1948) y Burgos y Vidal (1951) como semiárido mesotermal, con nulo exceso de agua y baja concentración térmica estival (BB' 2 da'). Papadakis (1960) por su parte, lo clasifica como "peripampeano semiárido casi marítimo". Por su latitud y como consecuencia de su cercanía al mar, presenta un régimen térmico moderado por efecto marítimo. En la Figura 2 se observan las horas de sol efectivas mensuales de Viedma (Río Negro.), comparadas con dos localidades de la Argentina (FAO, 1969) y en la figura 3 se presenta la de la radiación solar global promedio para el mes de Enero en la República Argentina (Murphy, 2008), mostrando a la zona como una de las que más radiación recibe durante el periodo crítico del cultivo de maíz del país. Desde el punto de vista térmico, en el valle inferior del río Negro, si bien el verano no es de larga duración, presenta temperaturas máximas no excesivas acordes para un adecuado crecimiento y, además, se prolonga en forma moderada más allá de la iniciación del otoño. Esto facilita que la duración de los procesos de crecimiento se prolonguen, posibilitando al cultivo disponer de más días de fotosíntesis en el ciclo. Esta combinación de factores otorga a los valles norpatagónicos condiciones para la plena expresión del rendimiento del cultivo de maíz.

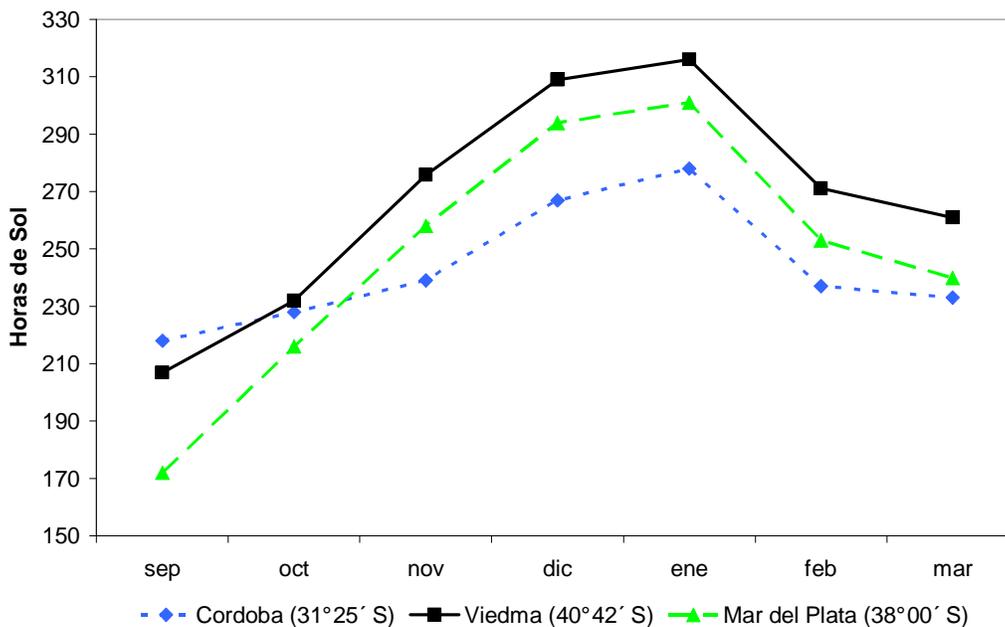


Figura 2. Sumas mensuales de horas de sol efectivas en tres ciudades Argentinas (FAO, 1969)

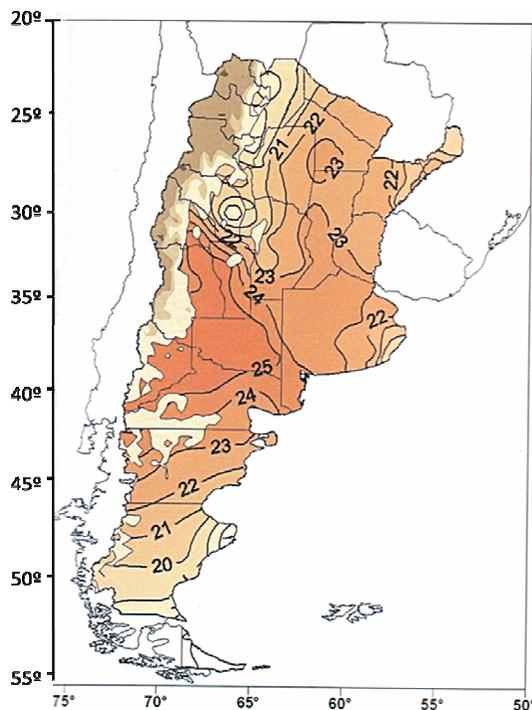


Figura 3. Radiación solar global de Enero en Argentina (promedio de la serie 1971-2000) en  $\text{Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ .

Según los registros de la estación agrometeorológica de la EAAVI en una serie de 44 años, el valle presenta una temperatura media anual de  $14,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la temperatura máxima media anual es de  $20,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , registrándose en los meses de enero, febrero y diciembre las temperaturas medias máximas más elevadas. La temperatura mínima media anual es de  $7,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ubicándose en los meses de junio, julio y agosto los valores menores del año (Figura 4). El promedio de días libres de heladas meteorológicas es de 199 días, con fecha media de primera helada correspondiente al 1° de mayo, y la fecha media de la última al 13 de octubre.

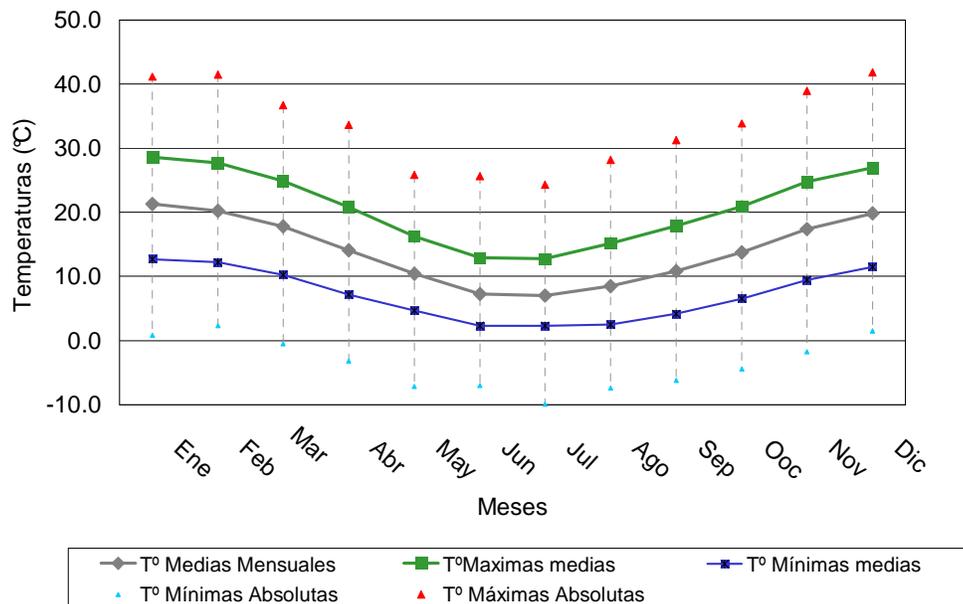


Figura 4. Temperaturas medias mensuales de la serie 1965-2008. EEA Valle Inferior.

Según los registros en la misma serie de años en la EEAVI, la precipitación media anual es de 408 mm, con variaciones interanuales entre 196 mm (2008) y de 697 mm (2000). Estacionalmente el régimen de precipitaciones es primavero-estival, concentrándose el 65 % de las lluvias. Sin embargo, la distribución no es homogénea, ya que en los meses de diciembre y enero no superan los 65 mm (Fig.5)

La evapotranspiración (ETP) anual calculada según las fórmulas sugeridas por Blaney-Criddle (1962), Thornthwaite (1948) y Turc (1961), es de 1037 mm, 1058 mm y 1009 mm respectivamente.

El déficit hídrico o necesidad de riego según la ETP calculada mediante Blaney-Criddle (1962) y las precipitaciones es de unos 650 milímetros anuales (Figura 5). Las precipitaciones no cubren las necesidades hídricas de los cultivos en ninguno de los meses, acentuándose el déficit en el periodo estival.

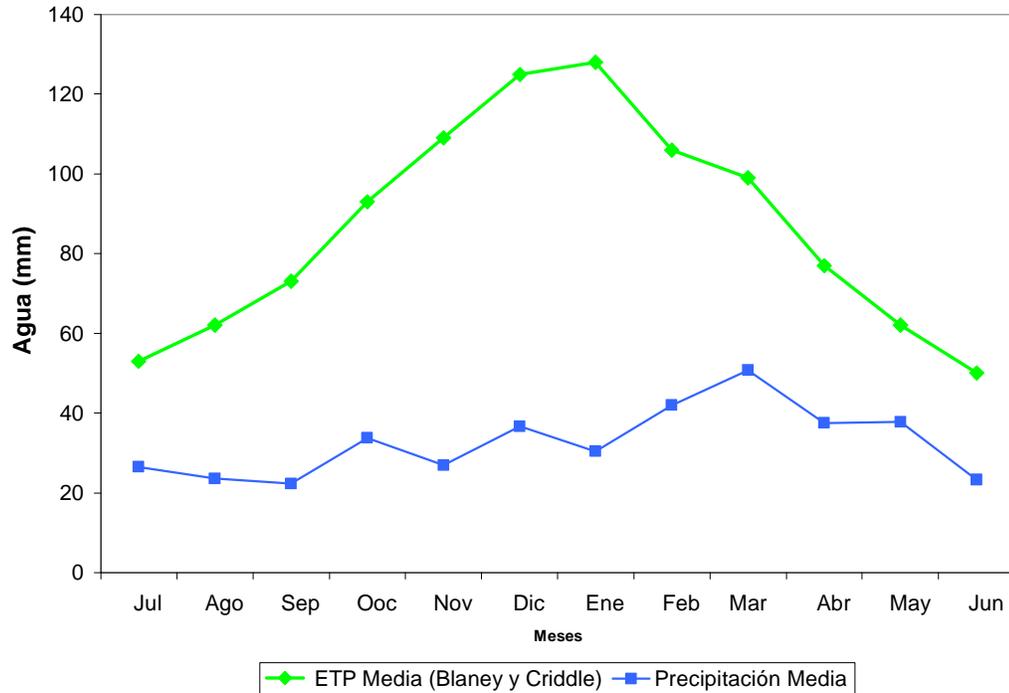


Figura 5. Déficit hídrico medio estimado para el valle inferior del Río Negro según la ETP (Blaney y Criddle, 1962) y lluvias.

### Radiación solar global durante el estudio

En la Figura 6 se presenta la evolución de la radiación solar global media para Balcarce (Bs.As.)(Andrade, *et al.* 1996), Pergamino (Bs.As.)(Totis de Zeljkovich, 2012) y Viedma (R.N.) y el fotoperiodo para esta ultima localidad. Los datos de corresponden a la media de los promedios decádicos durante los tres años estudio (2006/07, 2007/08 y 2009/10), a partir de registros de la estación meteorológica de la EEAVI. Se observa que la radiación solar global en Viedma durante el ciclo del cultivo de maíz es superior a la hallada en Balcarce durante toda la estación de crecimiento. Con respecto a Pergamino, la radiación en Viedma solo es superior 15 días antes y después del 21 de Diciembre, donde el sol alcanza su mayor altura aparente en el cielo, y la duración del día es máxima

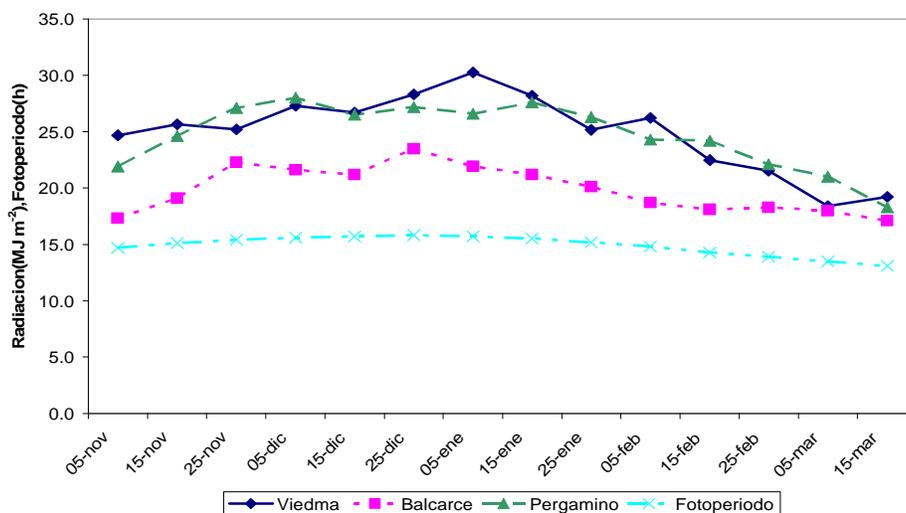


Figura 6. Radiación solar global ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) para Balcarce, Pergamino y Viedma. Se grafican los promedios decádicos de los tres ciclos de cultivo estudiados y el fotoperíodo (horas) calculado para la region del VIRN.

### Temperaturas durante el estudio

Durante los tres años de estudio las temperaturas medias durante el ciclo de cultivo fueron  $18,8^{\circ}\text{C}$  en 2006/07,  $19,1^{\circ}\text{C}$  en 2007/08 y  $18,4^{\circ}\text{C}$  en 2009/10 y se ubicaron por encima de la media histórica ( $18,21^{\circ}\text{C}$ ). En la Figura 7 se presentan las temperaturas medias mensuales para los tres ciclos de cultivo, así como también la media histórica observándose un comportamiento similar en los tres periodos estudiados. Temperaturas medias entre  $23^{\circ}\text{C}$  y  $24^{\circ}\text{C}$  han sido consideradas como límite máximo (Kiesselbach, 1950, citado por Shaw, 1988) a partir del cual los rendimientos comienzan a disminuir por cada grado de incremento. Las temperaturas máximas absolutas, por sobre  $35^{\circ}\text{C}$  que pueden afectar el rendimiento, se presentan en la figura 8. Si bien en los tres años estudiados existen temperaturas máximas absolutas por encima de dicha temperatura, la frecuencia de ocurrencia se ubicó de entre 3 y 5 días en todo el ciclo, con una duración media de 2,3 horas y en ningún caso la duración total superó las 4 horas.

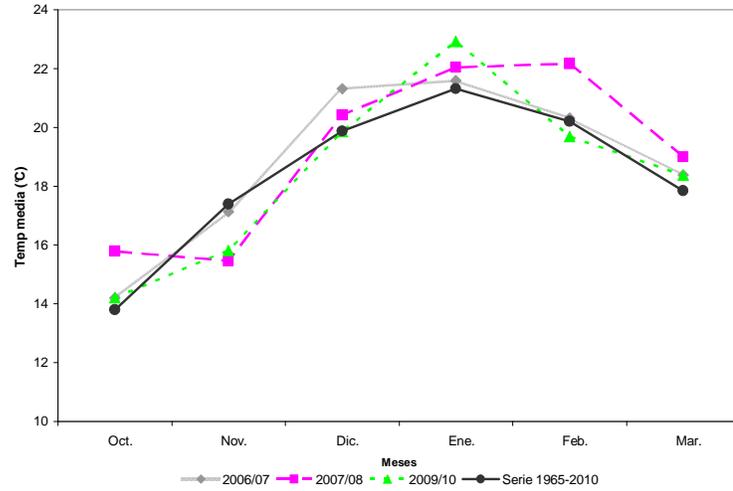


Figura 7. Evolución de las temperaturas medias mensuales durante el ciclo de cultivo en los tres años estudiados y la temperatura media histórica (1965-2010).

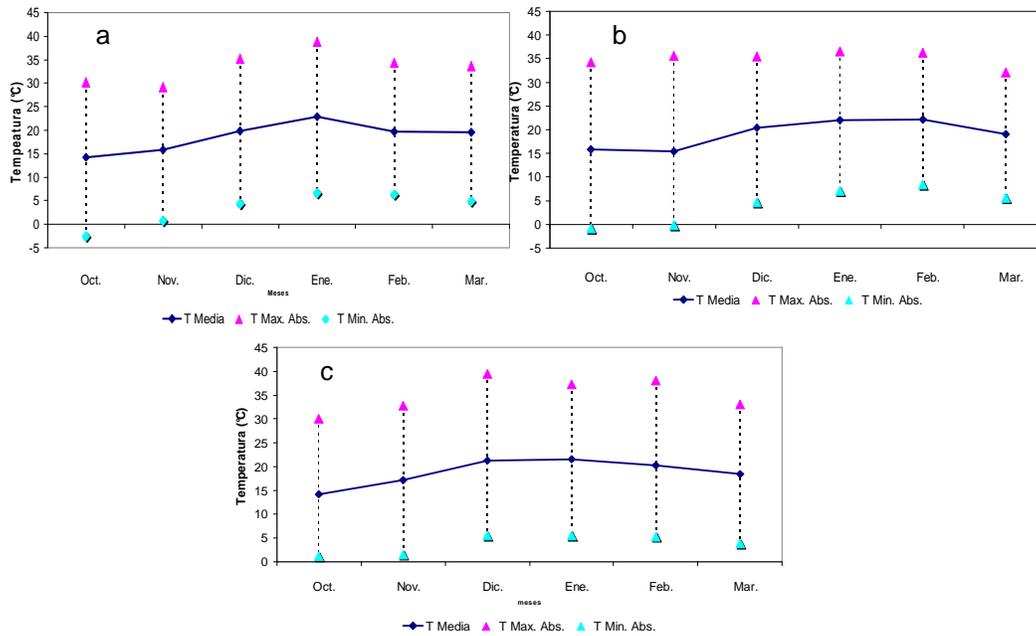


Figura 8. Temperatura media del aire y temperaturas máximas y mínimas absolutas mensuales para el ciclo 2009/10 (a), 2007/08 (b) y 2006/07 (c) a partir de registros de la estación meteorológica de la EEAVI.

## Suelos y topografía

La zona bajo riego del valle inferior del Río Negro (Arg.), se encuentra desarrollada sobre sedimentos aluvionales depositados por procesos fluviales recientes, con presencia de estratificaciones cuyo origen se debe a dos reiteradas introgresiones marinas donde, en general, dominan suelos de textura media a fina. El relieve es plano a muy suavemente ondulado con formación de cordones que superan en algunos casos los dos metros de altura (Masotta, 1970).

Las pendientes generales tanto en sentido longitudinal como transversal al río son prácticamente nulas. Su elevación media sobre el nivel del mar oscila alrededor de los 4 m. Las cotas más altas del terreno, entre 5 y 6 m, corresponden a lomadas que en forma de cordones se distribuyen por toda la superficie del valle, pero con prevalencia en el sector norte. Con el fin de responder al primer objetivo específico referido a la caracterización y clasificación de los suelos de los sitios de estudio se realizaron las siguientes evaluaciones:

- Descripción de los horizontes (secuencia, espesor, características).
- Clasificación de suelos según Soil Survey Staff Keys to Soil Taxonomy (2006).
- Determinación de las constantes hídricas edáficas, siguiendo la metodología de las membranas de Richards (Klute, 1986). La curva de retención hídrica refleja la capacidad del suelo o cualquier otro medio poroso, para retener el agua en función de la succión (tensión) ejercida. Las curvas de retención hídrica (pF) (Ec.1), se definen como el logaritmo decimal de la succión expresado en una altura de agua en centímetros (h):

$$pF = -\log . h \quad (Ec 1)$$

- Se utilizan principalmente para (Stakman,1980): estimar la disponibilidad de agua total en el suelo potencialmente absorbible por las plantas; estimar determinados valores de humedad característicos de la relación suelo-agua-planta, como la capacidad de campo (Cc) y el punto de marchitez permanente (PMP); clasificar los suelos y determinar la relación entre la humedad del suelo y otras propiedades físicas. Si bien este método permite mediciones de potencial en un rango amplio (pF 2,7 a 4,8), no abarca toda la gama de valores presentes en el suelo, sobre todo con elevados contenidos de humedad.

- Determinación de la densidad aparente de cada uno de los horizontes, aplicando el método de cilindros (Klute, 1986).
- Además, se determinaron las condiciones edáficas iniciales del perfil del suelo en lo que se refiere a:
  - Situación hídrica inicial en cada una en las parcelas, hasta 0,60 m de profundidad. Siguiendo la metodología gravimétrica (Klute, 1986).
  - Situación nutricional inicial y final en cada una de las parcelas, hasta 0,60 m de profundidad, en base al nitrógeno (N-NO<sub>3</sub>), presentes en el suelo en cada subparcela: (Método del ácido cromotrópico de West y Ramachandran, 1962), Fosforo extractable (P) (Olsen, 1954), Conductividad eléctrica y pH (potenciométrico).
- Se determinó la evolución hídrica edáfica en cada parcela hasta 0,60 m de profundidad por gravimetría y en el año 2009/10 también con la sonda de capacitancia Diviner ®.

### **Diseño experimental**

Anualmente, se establecieron nueve parcelas de 84 m<sup>2</sup> cada una, de 15 surcos espaciados a 0,7 m entre si y de 8 m de longitud. El diseño experimental fue en parcelas divididas con tres repeticiones, siendo la frecuencia de riego el tratamiento principal y la fertilización nitrogenada el subtratamiento. Los tratamientos de frecuencia de riego fueron: "alta frecuencia" (AF), frecuencia media" (MF) y "baja frecuencia" (BF).

Cada parcela se dividió en 6 subtratamientos de fertilización con nitrógeno (N) en dosis equivalentes a 0, 70, 140, 210, 280 y 350 kg N ha<sup>-1</sup> durante el ciclo 2006/07 y en tres subtratamientos de 0, 140 y 280 Kg N ha<sup>-1</sup> en los ciclos 2007/08 y 2009/10. En todos los casos se aplicó en superficie el N como urea (0-46-0) al suelo, dividiendo la dosis en los estadios V4 y V6.

### **Cultivo de maíz**

En los ciclos 2006/07 y 2007/08 Se utilizó el híbrido simple de maíz (*Zea mays* L.) Dekalb 684 RR2, mientras que en el ciclo 2009/10 el híbrido simple Dekalb 747 MGRR2. La cama de siembra se preparo mediante dos pasadas de rastra y una de cincel. Luego se conformaron los surcos a 0,7 m de separación y se fertilizó con 100 kg ha<sup>-1</sup> de súper fosfato triple (0-46-0) con un aporcadador que cuenta con cajones para

distribuir fertilizante incorporado al suelo. La siembra se realizó el 15 Noviembre de 2006, 17 Noviembre de 2007 y el 29 Octubre de 2009 en forma manual, colocando 3 semillas por golpe y raleando hasta obtener una densidad equivalente 100.000 plantas  $\text{ha}^{-1}$  (Martinez *et al.*, 2004). El control de malezas se realizó en preemergencia con atrazina (50%) a razón de 3 l  $\text{ha}^{-1}$  y metolaclor (96% e.c.) a razón de 1,3 l  $\text{ha}^{-1}$ . En posemergencia, en el estado de V4 (Ritchie y Hanway, 1982) se aplicó glifosato 74,7 % SG (Round Up UltraMax ®) aplicando 1,5 Kg  $\text{ha}^{-1}$ . Los cultivos antecesores fueron zapallo (*Cucurbita máxima*) en el primer ciclo, maíz en el segundo y pastura degradada en base alfalfa (*Medicago sativa*) en el tercero. Los ensayos se mantuvieron libres de plagas y enfermedades.

### **Sensores de matriz granular Watermark ®**

Los sensores de matriz granular (SMG) son una opción para estimar indirectamente el contenido de agua del suelo, son de bajo costo y relativamente fáciles de instalar y usar. (Leib *et al.*, 2003). El movimiento de agua entre el suelo y el sensor es manifestado en variaciones de la resistencia eléctrica entre los electrodos incluidos en un cuerpo de material polimérico del dispositivo (Chard, 2005), donde dichas variaciones de resistencia eléctrica son convertidos a potencial mátrico del suelo. Su medida se basa en el paso de la corriente a través del material polimérico, el cual conduce mayor o menor electricidad en función de la actividad del agua en equilibrio con la humedad del suelo. La resistencia eléctrica aumenta al incrementarse la succión del agua en el suelo, o a medida que disminuye la humedad del suelo.

El uso de estos sensores exige una ecuación de calibración para convertir los valores de resistencia eléctrica (0 a 27 kohms) a valores de potencial mátrico ( $\Psi_m$ : 0 a 200 cb). Thompson y Armstrong (1987) desarrollaron una ecuación de calibración para un modelo anterior al Watermark 200. Posteriormente, Thompson y Doerge (1996) verificaron que la ecuación de calibración de Thompson y Armstrong (1987) era también precisa para el modelo actual, el SMG 200SS. Shock *et al.* (1998) utilizando tensiómetros desarrollò una ecuación de calibración para el Watermark 200SS, para el rango de -10 a -75 kPa, la cual es utilizada por el fabricante como la calibración por defecto. Sin embargo Hanson y colaboradores (2000) y Leib y colaboradores (2003) confirman que dependiendo del tipo de suelo se pueden operar correctamente en un

rango de -15 a -180 kPa, valores mucho menores que los alcanzados con los tensiómetros, pero con baja resolución en suelos muy húmedos.

Para la calibración se instalaron nueve sensores a 25 cm de profundidad y se tomaron en distintas etapas del ciclo del cultivo de maíz lecturas de tensión del sensor watermark®, temperatura y humedad gravimétrica, siempre cuando el suelo se estaba secando.

Los valores de tensión del sensor se convirtieron a valores de resistencia por medio de la ecuación 2 provista por el fabricante:

$$\Omega = 0,726 + 0,143(C) \dots \dots \dots E_c \quad (2)$$

Donde,  $\Omega$  es la resistencia eléctrica en kilo ohms y C es la lectura en centibares del sensor watermark®. Los valores de humedad gravimétrica fueron convertidos en humedad volumétrica por medio de la densidad aparente del suelo.

### **Metodología para la programación del riego y seguimiento de la humedad del suelo.**

El criterio de programación de riego utilizado se basó en la medida de la tensión de la humedad del suelo con SMG Watermark® 200ss (Irrometer Corp., Riverside, CA, USA) a 25 cm de profundidad sobre el surco de cultivo). En base a esto, se establecieron los tres tratamientos de riego según la oportunidad o frecuencia de riego: AF= potencial >-40 kPa; al fijar un valor de lectura más bajo implica riegos con mayor frecuencia para mantenerse por debajo del mismo. El objetivo de esta estrategia fue cubrir las máximas necesidades del cultivo, imitando un manejo similar al del productor del Valle Inferior; Media Frecuencia (MF) (potencial >-90 kPa) reducir el número de riegos y la cantidad de agua aplicada respecto de AF; y Baja Frecuencia (BF) (potencial >-160 kPa) generando déficit hídrico moderado. Antes de comenzar con los tratamientos hídricos se realizaron 3 riegos para lograr el stand de plantas buscado. En base a los resultados preliminares de rendimiento hallados en el tratamiento BF del primer ciclo (2006/07) se modificó el criterio de riego para el segundo y tercer ciclo de estudio buscando una mayor reducción en el agua aplicada por lo que no se realizaron riegos posteriores al comienzo de los tratamientos en BF. La lectura de los sensores se realizó aproximadamente cada 2 días durante el ciclo de crecimiento del cultivo. La tensión de la humedad del suelo a la que se aplica el riego varía dependiendo del tipo de suelo y a la profundidad que se coloque el sensor de humedad. La calibración y la experiencia que se tenga del sitio predeterminado optimizan la utilización de este

método en la programación de la irrigación (Enciso, 2007). Para facilitar la instalación en el campo, y posterior retiro al finalizar el ciclo del cultivo, cada sensor se fijó con pegamento al extremo inferior de un tubo de PVC de 17 mm de diámetro y, en la parte superior, se colocó un prensacables para evitar el ingreso de agua desde la parte superior del tubo. Se soldaron 6 m de cable bipolar a cada salida del sensor para realizar la lectura inmediatamente después del riego desde afuera de la zona regada (Fotografía 1). Para la instalación en el campo se perforo el suelo con un barreno de 4 cm de diámetro y se introdujo barro realizado con el mismo suelo extraído en el lugar con la finalidad de lograr un íntimo contacto entre el suelo y las paredes del sensor. Previo a la instalación, los sensores se colocaron en un balde con agua durante 24 horas para saturar los mismos y, así, desplazar todo el aire contenido en los mismos. Antes y después de cada evento de riego se efectuó el seguimiento de humedad edáfica durante todo el ciclo de cultivo mediante el método gravimétrico a tres profundidades: 0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm.



Fotografía 1. Sensor Watermark® 200SS y medidor (30KTCD) modificado para su lectura desde fuera de las parcelas de riego.

El método de riego utilizado fue gravitacional por surcos, conduciendo el agua hasta cada parcela por medio de una manga de polietileno de 400 mm de diámetro y 0,3 mm de espesor. Sobre misma se adosaron 8 aberturas plásticas de 50 mm de diámetro para la salida del agua en cada parcela. El bajo requerimiento de presión, permitió instalar las mangas directamente con toma de agua desde la acequia. La compuerta o boquilla de

riego permite regular el caudal fácilmente con su sistema de tapa corrediza, tipo guillotina. Para equiparar presiones y liberar burbujas de aire y suciedad, se instalaron tambores de 200 litros de chapa a los que se le adosó la manga de polietileno en la entrada de cada bloque de la parcela experimental (Fotografía 2). Cada tratamiento de riego fue rodeado por bordos de suelo para que toda el agua que ingresaba a la parcela infiltre en la misma. Se encontraba distanciado 7 surcos de la parcela adyacente para evitar movimientos laterales del agua en la subsuperficie. Al momento de regar, cuando cada frecuencia lo requería, se llenaba la manga con agua y luego se abrían las compuertas tomándose el tiempo total de aplicación y el caudal erogado. De esta manera se determinó la cantidad de agua aplicada a cada parcela en cada riego.

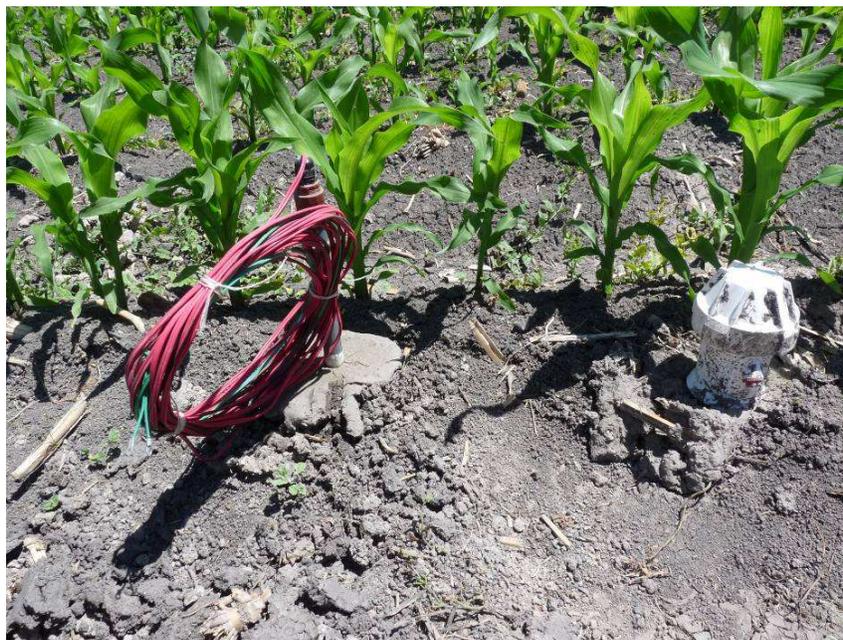


Fotografía 2. Vista de la manga de polietileno durante el riego de una parcela.

Además, en el ciclo 2009/10 se realizó el seguimiento de la humedad del suelo por medio de una sonda de capacitancia FDR (Frequency Domain Reflectometry. Sonda “Diviner 2000®” Sentek Pty. Ltd., Stepney, Australia). Este equipo permite seguir la evolución del contenido hídrico del suelo midiendo la frecuencia de un circuito eléctrico oscilante, como función de la constante dieléctrica del suelo que rodea a los sensores, que es una característica intrínseca de la mezcla suelo-agua-aire. La sonda determina el contenido de agua en el suelo mediante la medida de la capacitancia, donde cada sensor,

que se ubica en un tubo de PVC enterrado en el suelo, actúa como parte de un capacitor en el cual los dipolos permanentes de las moléculas de agua en un medio dieléctrico se polarizan y alinean en un campo eléctrico. Para contribuir a la constante dieléctrica, los dipolos eléctricos, deben responder a la frecuencia del campo eléctrico. La libertad de los dipolos para responder está determinada por las fuerzas locales de unión a nivel molecular, de forma que la respuesta global es el resultado de la inercia molecular, las fuerzas de unión y la frecuencia del campo eléctrico. Determinando la capacitancia se obtiene la constante dieléctrica y, en consecuencia, la estimación del contenido de agua del suelo (Dean *et al*, 1987).

Se introdujo los tubos de PVC procurando minimizar el disturbio del suelo. Para ello, se utilizó el equipo de instalación provisto por el fabricante (Sentek, 1999). Para que el tubo quedara vertical, y en íntimo contacto con el suelo, se preparó barro con el que se llenó el pozo donde luego se introdujeron los tubos. (Fotografía 3). Los tubos fueron sellados en la parte superior con una caperuza fijada con silicona, que posee una tapa roscada para permitir el acceso de la sonda.



Fotografía 3. Vista del cultivo de maíz con los sensores Watermark® (izquierda) y Diviner® (derecha) instalados.

La sonda Diviner®, dispone un sensor cubierto por una carcasa de plástico de protección unido a una varilla de 180 cm de longitud, dentro de la cual se encuentran

colocados unos dispositivos electromagnéticos a distancias de 10 cm, cuya función es indicar las profundidades de 10 a 160 cm (Fotografía 4). De esta forma, a medida que se introduce la sonda en el tubo se almacenan los registros para cada profundidad en intervalos de 10 cm con los valores en unidades de humedad volumétrica.

Se instaló un tubo de PVC por parcela sobre el surco junto al sensor Watermark®. Se realizaron mediciones, de 10 a 160 cm de profundidad, antes del riego y 48 horas después del mismo. Para la instalación se utilizó un barreno provisto por el fabricante de 3 tramos para poder perforar el perfil hasta 1.8 m y tratando de que quede en íntimo contacto con el suelo para evitar errores de lectura. Se operó el equipo con la ecuación de calibración por defecto, con lo cual, los datos muestran cambios relativos de agua en el suelo en base a una ecuación desarrollada sobre distintos tipos de suelo. Se utilizó este tipo de medida para evaluar los cambios relativos en la dinámica de agua en el suelo y para su comparación con el sensor Watermak.



Fotografía 4. Equipo Diviner® instalado para el seguimiento de la humedad volumétrica por capacitancia.

### **Evaluación de la calidad del agua de riego utilizada**

El agua utilizada para los riegos fue derivada del río Negro a través del sistema de riego administrado por el Consorcio de Riego del Valle Inferior. En la Tabla 1 se presentan los valores de conductividad eléctrica del agua (CE) del Río Negro en toma a la altura de Viedma durante todo el año. Las características físico-químicas del agua se exponen en la Tabla 2. La clasificación de la calidad del agua de riego utilizada en los ensayos según las normas del laboratorio de Riverside-USDA (1964) fue: C1-S1; donde C1 indica Agua de baja salinidad, apta para el riego en todos los casos y S1 agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos.

Tabla 1. Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) del agua del Río Negro en Viedma según por el Departamento Provincial de Agua de la Provincia de Río Negro.

<b>Año</b>	<b>Ene.</b>	<b>Feb.</b>	<b>Mar.</b>	<b>Abr.</b>	<b>May.</b>	<b>Jun.</b>	<b>Jul.</b>	<b>Ago.</b>	<b>Sept.</b>	<b>Oct.</b>	<b>Nov.</b>	<b>Dic.</b>
<b>2007</b>	210	210	188	240	136	118	124	126	310	290	270	230
<b>2008</b>	-	250	-	294	286	235	-	225	255	193	115	271
<b>2009</b>	193	254	267	314	401	133	162	185	153	249	197	194
<b>2010</b>	224	232	451	221	261	239	135	170	223	346	300	246
<b>Promedio</b>	<b>209</b>	<b>237</b>	<b>302</b>	<b>267</b>	<b>271</b>	<b>181</b>	<b>140</b>	<b>177</b>	<b>235</b>	<b>270</b>	<b>221</b>	<b>235</b>

Tabla 2. Características físico-químicas del agua de riego tomadas en la compuerta de la EEAVI y utilizada en el ensayo durante el ciclo 2009/10.

<b>Parámetros</b>	<b>Resultados</b>
<b>pH</b>	<b>8,25</b>
<b>CE (<math>\mu\text{S cm}^{-1}</math>)</b>	<b>293</b>
<b>Sodio, Na (<math>\text{mg L}^{-1}</math>)</b>	<b>16,2</b>
<b>Magnesio, Mg (<math>\text{mg L}^{-1}</math>)</b>	<b>5,8</b>
<b>Calcio, Ca (<math>\text{mg L}^{-1}</math>)</b>	<b>21,2</b>
<b>Potasio, K (<math>\text{mg L}^{-1}</math>)</b>	<b>7,4</b>
<b>RAS</b>	<b>2.2</b>
<b>Boro, B (<math>\text{mg L}^{-1}</math>)</b>	<b>&lt; 0,1</b>
<b>Nitrógeno de nitratos, N-NO<sub>3</sub>- (<math>\text{mg L}^{-1}</math>)</b>	<b>1,0</b>
<b>Sulfatos, SO<sub>4</sub><sup>-</sup> (<math>\text{mg L}^{-1}</math>)</b>	<b>58</b>

<b>Fósforo P (mg L<sup>-1</sup>)</b>	<b>0,1</b>
--------------------------------------	------------

## **Evaluaciones en los cultivos de maíz**

### **Observaciones fenológicas**

Las distintas fases y etapas del ciclo de desarrollo se determinaron siguiendo la escala de Ritchie y Hanway (1982). Para la fijación de las distintas fases del ciclo se consideró que el cultivo estaba en un estadio cuando el 50 % de las plantas alcanzaban esa fase.

Las fechas en que se fijaron las distintas fases se han referido al número de días transcurridos desde emergencia y con el tiempo térmico (TT) acumulado (Jones y Kiniry, 1986; Otegui, *et al.*, 1992; Andrade, *et al.*, 1996). Se utilizó una temperatura base de crecimiento de 8° C debido a que el material vegetal es originario de regiones templadas. El cálculo de TT se efectuó con la siguiente expresión:

$$TT = \sum n ( T_{med} - T_b ) \dots\dots\dots(Ec.3)$$

Dónde; TT= tiempo térmico expresado en ° C; T<sub>med</sub>, temperatura media del aire expresada en °C; T<sub>b</sub> temperatura base de desarrollo, expresada en °C; y n: número de días considerados en la sumatoria ( $\Sigma$ ).

Las fases observadas fueron las siguientes: emergencia (E); seis hojas (V6); floración (R1); madurez fisiológica del grano (R6).

### **Materia seca aérea**

Para los ciclos 2006/07 y 2007/08 se evaluó la producción de biomasa en floración femenina (R1) y en madurez fisiológica (R6), mientras que en el 2009/10 se cuantificó la evolución de la materia seca (MS) lo largo del ciclo. Los momentos de muestreo en el ciclo agrícola 2009-2010 fueron a los 16, 31, 45, 56, 71, y 135 días desde la emergencia en estadios de V2, V4, V6, V12, R1, y R6, respectivamente. El tamaño de la muestra utilizada para la medición en cada etapa del ciclo, fue de 3 plantas por muestreo y parcela para el seguimiento de la evolución de la MS. Cuando se determinó la producción de biomasa total en R1 y en R6 se cortaron 5 plantas contiguas de cada parcela de los 3 surcos centrales. Fueron cortadas al ras del suelo y separadas en hoja (lámina), tallo (incluidas las vainas foliares), brácteas + pedúnculo de la espiga, grano y

marlo. Cada órgano se pesó por separado en su estado fresco, se tomó una muestra y se colocó a secar en estufa con ventilación forzada a 65°C durante, aproximadamente 15 días, hasta peso constante. En floración y madurez fisiológica se determinó el contenido de nitrógeno de cada órgano en que se particionó la MS, en base al método semi-microKjedhal utilizando un destilador BÜCHI B-98 del laboratorio de suelos y agua de la EEAVI. Con el valor absoluto en porcentaje y la producción de materia seca, se calculó el contenido de nitrógeno en la biomasa aérea total.

### Área foliar

Las mediciones de superficie foliar se realizó en forma indirecta, midiendo la longitud (L) y el ancho (A) de cada hoja desplegada de las plantas seleccionadas para la determinación de MS. Los momentos de muestreo fueron los mismos que se siguió para el estudio de la evolución de la materia seca en 2009/10 y entre VT y R1 en los ciclos 2006/07 y 2007/08. El área fotosintéticamente activa de cada hoja se calculó utilizando la Ec (4) (Francis *et al.*, 1969; Stewart y Dwyer, 1999):

$$Af = 0,74 L \cdot A \dots \dots \dots \text{Ec.(4)}$$

Donde, Af es el área foliar de la hoja (cm<sup>2</sup>), L la longitud de la lámina, desde la inserción con la vaina hasta el ápice (cm) y A el máximo ancho de la lámina foliar (cm). Los valores de Af obtenidos, teniendo en cuenta la densidad poblacional, se utilizaron para estimar el índice de área foliar (IAF), el cual muestra la superficie del área foliar fotosintéticamente activa de un cultivo por unidad de superficie de suelo (Andrade *et al.*, 1996) De acuerdo a esto, el IAF de cada subparcela estudiada, se definió como:

$$IAF = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{AF}{m} dp \dots \dots \dots \text{Ec.(5)}$$

Dónde, IAF es el índice de área foliar (cm<sup>2</sup> cm<sup>-2</sup>), AF es el área foliar de cada hoja (i) (j) (cm<sup>2</sup>), n el número de hojas medidas en la planta j, m el número de plantas estudiadas por subparcela y dp la densidad poblacional (plantas m<sup>-2</sup>).

### Intercepción de radiación

Para la medición de la intercepción de radiación solar por el cultivo se registraron los valores de radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada por el cultivo utilizando un ceptometro ó sensor lineal quantum® (Cavadevices, B.A, Argentina, Fotografía 5), integrando el flujo de fotones recibido en un metro lineal. Se realizaron 5 mediciones en las distintas dosis de nitrógeno en cada tratamiento de riego alrededor de floración. También se siguió la evolución en el ciclo registrando la intercepción de radiación en V2, V4, V6, V12, R1 y R6. La barra se ubicó desde el centro de un entresurco hasta el centro del entresurco contiguo durante el medio día solar, en días soleados, de acuerdo a la metodología propuesta por Gallo y Daughtry (1986). El porcentaje de RFA interceptada (RFAi) por el cultivo se calculó de acuerdo a la ecuación 6:

$$RFAi = [1 - (It I0^{-1})] \times 100 \dots \dots \dots Ec. (6)$$

Donde, It es la RFA medida entre el suelo y la primera hoja verde, e I0 es la RFA incidente por encima del cultivo. Para el cálculo de la RFAi fue considerada la fracción de la radiación fotosintéticamente activa, comprendida entre las longitudes de onda de 400 a 700 nm, de la radiación global. La radiación solar global (Rg) fue registrada por la estación meteorológica de la EEAVI. Los valores registrados diariamente fueron multiplicados por un factor de eficiencia climática (Ec) de 0,48 para transformarlos en RFA incidente (Varlet-Grancher *et al.*, 1982; Varlet-Grancher *et al.*, 1989). Para cada momento de medición se calculó el porcentaje de RFAi con respecto a RFA. Los valores diarios de dicho porcentaje se estimaron aplicando la técnica de la regresión no lineal aplicada a los momentos de muestreo, y se acumularon para obtener el valor de RFA absorbido en V2-V4, V4-V6, V6-V12, V12-R1 y R1-R6 del ciclo 2009/10 (Uarth *et al.*, 1995). La eficiencia de conversión de la radiación (EUR) se estimó a partir de la pendiente de la regresión lineal entre biomasa acumulada y RFAi acumulada (Sinclair y Muchow, 1999).



Fotografía 5. Ceptómetro para la medición de la radiación fotosintéticamente activa.

### Absorción de nitrógeno

Para el estudio de la dinámica de absorción de nitrógeno se analizó el contenido de nitrógeno en las plantas mediante su determinación en hojas, tallos, marlos + brácteas y granos. Los momentos de muestreo fueron los mismos que los descritos en las mediciones de la materia seca particionada. Las plantas muestreadas fueron secadas en estufa a 65°C hasta peso constante y luego molidas. La determinación de N se realizó en el laboratorio de la EEA VI sobre muestra tamizada en malla de 1 mm y se utilizó el método semimicro-Kjeldhal. El nitrógeno mineralizado se estimó en cada frecuencia de riego de acuerdo a la ecuación 7:

$$N_{min} = N_{tR6} + N_{hR6} - N_r \cdot E \dots \dots \dots (Ec. 7)$$

Dónde,  $N_{min}$  ( $kg\ ha^{-1}$ ) es el nitrógeno mineralizado durante el ciclo,  $N_{tR6}$  es el contenido de nitrógeno en las plantas estudiadas en el estado de R6 ( $kg\ ha^{-1}$ ),  $N_{hR6}$  es el contenido de N de nitratos en el suelo en R6 ( $kg\ ha^{-1}$ ),  $N_r$  es el nitrógeno residual inorgánico previo al desarrollo del cultivo (equivalente a N de nitratos en el suelo a la siembra en  $kg\ ha^{-1}$ ) y E es la eficiencia de uso del nitrógeno inorgánico inicial. El valor de la eficiencia de uso del nitrógeno inorgánico inicial (E), a los fines de los cálculos se considera igual a 0,5 (Meisinger, 1994). Para evaluar la eficiencia de uso de nitrógeno se utilizó la metodología de Huggins y Pan (1993), mencionado por Maturano (2002). El valor del nitrógeno presente en el suelo ( $N_p$ ), se obtuvo de acuerdo a la ecuación 8.

$$N_p = N_f + (N_r + N_{min}) \dots \dots \dots (Ec. 8)$$

Dónde,  $N_f$  es el nitrógeno aportado por el fertilizante ( $\text{kg ha}^{-1}$ ),  $N_r$  es el contenido de nitrógeno residual inorgánico previo al crecimiento del cultivo ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y  $N_{\text{min}}$  es el nitrógeno mineralizado durante el ciclo de cultivo ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).

También se calculó el nitrógeno disponible de acuerdo a la ecuación 9:

$$N_{\text{disp}} = N_{\text{tR6}} + N_{\text{hR6}} \dots \dots \dots \text{(Ec. 9)}$$

Dónde,  $N_{\text{disp}}$  es el nitrógeno disponible ( $\text{kg ha}^{-1}$ ),  $N_{\text{tR6}}$  es el contenido nitrógeno en la planta en estado de R6 ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y  $N_{\text{hR6}}$  es el contenido de N de nitratos en el suelo en R6. Las pérdidas de N por volatilización no fueron consideradas ya que se efectuó un riego inmediatamente a la fertilización con urea. Las pérdidas por lixiviación no fueron medidas ya que el objetivo es estudiar las modificaciones ocurridas en los distintos parámetros que han sido medidos, como consecuencia de los distintos manejos de la fertilización nitrogenada simulando las condiciones de cultivo a campo que se utilizan en el valle inferior del río Negro.

A partir de estos cálculos, se estimaron los siguientes índices:

- Eficiencia en el uso del nitrógeno presente ( $R_g N_p^{-1}$ )
- Eficiencia de absorción ( $N_{\text{tR6}} N_p^{-1}$ )
- Eficiencia de utilización ( $R_g \cdot N_{\text{tR6}}^{-1}$ )
- Eficiencia de acumulación de nitrógeno en el grano ( $N_g N_{\text{disp}}^{-1}$ )
- Índice de cosecha del Nitrógeno ( $N_g N_{\text{tR6}}^{-1}$ )

Dónde  $R_g$  es el rendimiento en grano a 14% de humedad.

### **Evapotranspiración**

En esta tesis para la determinación de la evapotranspiración del cultivo de referencia se utilizó el método de FAO-Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) que permite calcular la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) diaria ( $\text{mm día}^{-1}$ ) y horaria ( $\text{mm hora}^{-1}$ ). El método FAO Penman-Monteith fue desarrollado haciendo uso de la definición del cultivo de referencia como un cultivo hipotético que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado. El método reduce las imprecisiones del método anterior de FAO Penman y produce globalmente valores más consistentes con datos reales de uso de

agua de diversos cultivos. La evapotranspiración de referencia se ve afectada por factores climáticos, ya que expresa el poder evaporativo de la atmósfera en una determinada localización y momento del año, pero sin embargo no considera las características del cultivo o del suelo. Una situación habitual es la estimación de la evapotranspiración de referencia mediante fórmulas empíricas basadas en parámetros climáticos.

Su expresión para periodos diarios es la siguiente:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma\left(\frac{900}{T + 273}\right)U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (\text{Ec. 10})$$

Dónde,  $ET_o$  es la evapotranspiración de referencia ( $\text{mm día}^{-1}$ ),  $Rn$  es la radiación neta en la superficie del cultivo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),  $R_a$  es la radiación extraterrestre ( $\text{mm día}^{-1}$ ),  $G$  es el flujo del calor de suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),  $T$  es la temperatura media del aire a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $u_2$  es la velocidad del viento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $e_s$  es la presión de vapor de saturación (kPa),  $e_a$  es la presión real de vapor (kPa),  $e_s - e_a$  es el déficit de presión de vapor (kPa),  $\gamma$  constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) y  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

Los datos climáticos necesarios para la estimación de  $ET_o$  se obtuvieron de la Estación Agrometeorológica ubicada en la EEAVI distante 500 m de los sitios experimentales.

A partir de la  $ET_o$ , la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ), se obtuvo multiplicando la  $ET_o$  por un coeficiente adimensional específico para cada cultivo ( $K_c$ ). El coeficiente de cultivo integra las características y particularidades de cada cultivo que lo hacen diferente del cultivo de referencia y expresa la diferencia entre la evapotranspiración de la superficie cultivada y la superficie del pasto de referencia (Allen *et al.*, 1998) mediante la siguiente expresión:

$$ET_c = K_c \times ET_o \dots \dots \dots (Ec.11)$$

Se dividió el ciclo agronómico del cultivo de maíz en cuatro etapas: (1) Establecimiento (2) crecimiento vegetativo (3) mediado del ciclo y fin de ciclo (Doorenbos y Pruitt, 1984). Los valores de  $K_c$  utilizados fueron seleccionados de la tabla presentada en la publicación de riego y drenaje de FAO N° 56 (Allen *et al.*, 1998) para maíz de grano y ciclo FAO 700, creciendo en zonas semiáridas.

### **Eficiencia del uso del agua de riego**

La eficiencia del uso del agua (EUA) es la relación entre la acumulación de biomasa, expresada como la asimilación de  $CO_2$ , biomasa total o rendimiento del cultivo en grano, y el consumo hídrico expresado como transpiración, evapotranspiración, agua aplicada o entrada total de agua al sistema (Stewart *et al.*, 1977; Molden, 1997; Dehghanianij *et al.*, 2009). Las características del riego gravitacional, como el utilizado en las chacras del valle inferior del Río Negro, hace que si bien el cálculo de agua aplicada se realiza de acuerdo a parámetros físicos que gobiernan la determinación de la lámina de reposición, el volumen de la misma finalmente aplicado, por lo general, supera ampliamente el valor de la demanda neta, terminando una gran parte en el sistema de drenaje. En general, la tasa de evapotranspiración la cual determina la demanda neta de agua, es cuantitativamente inferior a la lámina bruta aplicada por lo que la utilización de la  $ET_c$  para el cálculo de la eficiencia de uso de agua no refleja adecuadamente las variaciones en la cantidad de agua aplicada en función de las distintas frecuencias de riego planteadas. En base a esto, se calculó la EUA en relación al agua total recibida por el cultivo (riego + precipitaciones) según la ecuación sugerida por Tanner y Sinclair (1983) (ecuación 12).

$$EUA = Y (A_t^{-1}) \dots \dots \dots (Ec. 12)$$

Donde, EUA es la eficiencia de uso del agua de riego aplicada más las precipitaciones ( $kg \cdot m^{-3}$ ),  $Y$  es el rendimiento en grano ( $kg \cdot ha^{-1}$ ) y  $A_t$  es el agua aplicada mediante el riego más la precipitación ( $m^3 \cdot ha^{-1}$ ).

### **Producción de grano y componentes del rendimiento**

Se cosecharon en R6 todas las espigas en forma manual sobre los dos surcos centrales de cada tratamiento en una superficie de 7 m<sup>2</sup>. Se contó el número de plantas y de espigas en cada muestra, utilizándose una trilladora estacionaria para desgranar las mazorcas. Los granos se colocaron en estufa a 65° C hasta peso constante. La determinación del peso individual de los granos se realizó sobre 300 granos por muestra. Se estimó el número de granos por m<sup>2</sup> en base a el peso unitario del grano y el rendimiento en R6 (madurez fisiológica) ajustándose a un contenido de un 14,5 % de humedad.

### **Análisis estadístico**

Los resultados de la producción de MS, los componentes del rendimiento, la EUN, la EUA y la EUR obtenidos en el presente trabajo fueron sometidos a análisis de la varianza (ANOVA) según un diseño bloques en parcelas divididas. Para determinar diferencias entre medias se utilizó Tukey con nivel de riesgo  $\alpha$  del 5 %. Se realizaron análisis de regresión simple utilizando el programa Infostat (Infostat, 2008). La selección del modelo matemático elegido en los casos donde se realizó el análisis de regresión, se realizó teniendo en cuenta la parte de la varianza que explicaba el modelo ( $R^2$  ajustado), y la significación agronómica del mismo, privilegiando siempre aquellos modelos con menor número de parámetros, de manera tal de reducir el intervalo de confianza en las estimaciones. Las rectas ajustadas se compararon de a pares con pruebas "t", partiendo de una primera hipótesis nula: igualdad de pendientes (paralelismo) y, si ésta era aceptada, se testeó la igualdad de ordenadas al origen (rectas coincidentes) (Camina, R. com. personal).

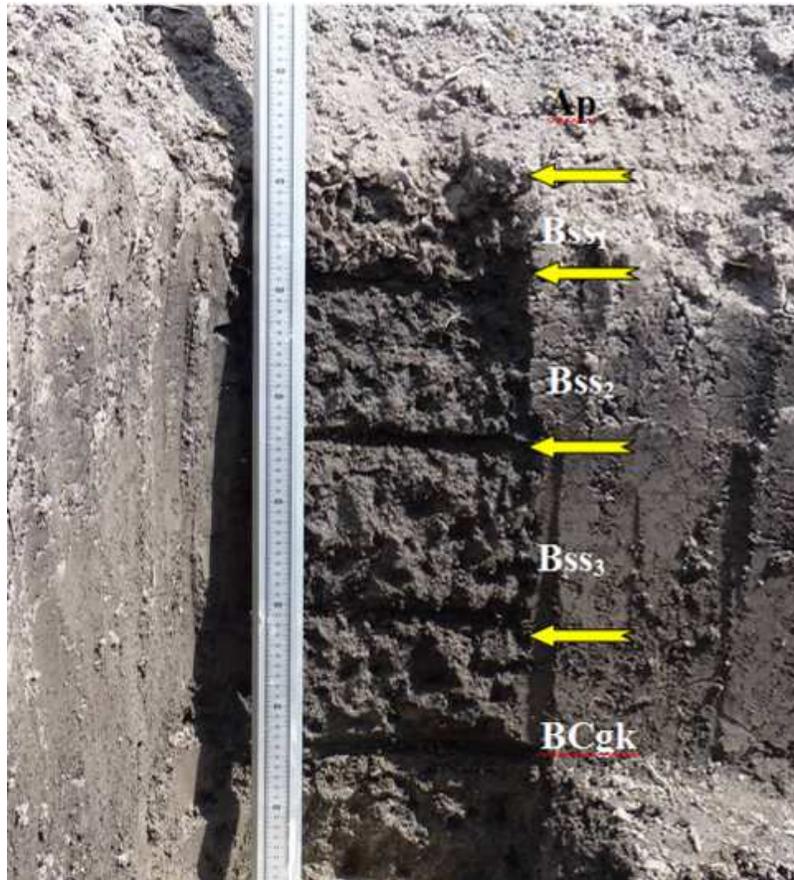
## Resultados y Discusión.

### Caracterización de perfiles de suelos.

Los ensayos se realizaron durante los ciclos 2006/07 en el lote 14 y durante el 2007/08 y 2009/10 en el lote 2, ambos pertenecientes a la EEAVI. Desde el punto de vista geomorfológico los suelos están ubicados en planos subnormales correspondientes a meandros abandonados y colmatados por sedimentos aluviales de fina granulometría. Se trata de sedimentos de origen fluviolacustre que fueron depositados en condiciones de tranquilidad y que han sido sistematizados en el año 1971 con fines de riego gravitacional. Los resultados de la descripción los perfiles de suelos correspondientes a cada sitio experimental su clasificación según normas descriptas en Soil Taxonomy (2006) se presentan a continuación:

#### Descripción del perfil N°1

- Nombre del perfil: Lote 14.
- Fecha de evaluación: 01/12/2010
- Ubicación: 40°48' 06,6 S 63° 04' 11,2 O
- Lugar: Estación Experimental Agropecuaria Valle Inferior del Río Negro convenio Provincia de Río Negro-INTA.
- Altitud: 4 m.s.n.m.
- Paisaje/geoforma: Planicie aluvial.
- Relieve: Plano, ligeramente deprimido.
- Microrrelieve: no se observa.
- Gradiente: < 0,5%
- Material parental: sedimentos aluviales de textura fina en cuencas cerradas (albardones semilunares).
- Erosión: no se observa.
- Vegetación: rastrojo maíz rastreado.
- Otras: suelo sistematizado para riego.
- Clasificación Taxonómica: **Haplustert Árido, Fino, Térmico. Fase: Moderadamente bien drenada.**



Fotografía 6. Perfil de suelo del primer año de ensayo de maíz. (Lote 14)

Tabla 3. Descripción del perfil perteneciente al lote 14 maíz..

Horizonte	Profundidad (cm)	Espesor	Características morfológicas
<b>Ap</b>	0-16	16	10 YR 4/1 gris oscuro en seco; 10YR 3/1 gris muy oscuro en húmedo; arcilloso; bloques subangulares, finos, moderados a fuertes; poco consolidado; firme; muy plástico muy adhesivo; raíces finas comunes; sin reacción al HCl 10%; limite claro y plano.
<b>Bss<sub>1</sub></b>	16-29	13	10 YR 5/1 gris en seco; 10 YR 3/1 gris muy oscuro en húmedo; arcilloso; bloques subangulares, gruesos, moderados; muy consolidado; firme; muy plástico muy adhesivo; abundantes cutanes de tensión; raíces finas comunes; sin reacción al HCL al 10%;.
<b>Bss<sub>2</sub></b>	29-45	16	10 YR 4/1 gris oscuro en seco; 10 YR 3/1 gris muy oscuro en húmedo; arcilloso; bloques subangulares, gruesos, moderados; muy consolidado; friable; muy plástico muy adhesivo; abundantes cutanes de tensión; raíces escasas; sin reacción al HCl al 10%; limite claro y plano.
<b>Bss<sub>3</sub></b>	45-62	17	10 YR 5/1 gris en seco; 10 YR 3/1 gris muy oscuro en húmedo; arcilloso; bloques subangulares, medios, moderados a débil; consolidado; friable; muy plástico muy adhesivo; abundantes cutanes de tensión; raíces muy escasas: sin reacción al HCl al 10%; limite claro y plano
<b>BCgk</b>	62-105	28	10 YR 6/1 gris a gris claro en seco: 10 YR 3/1 gris muy oscuro en húmedo; arcilloso; bloques subangulares, finos, débil, consolidado; platico, adhesivo; ausencia de raíces; moderada reacción al HCl al 10%; comunes motas de Caco3 blando pulverulento, comunes moteados de Fe y Mn.
	Napa		CE 2,2 ds/m pH 7,7

Nota: Hay evidencia de agrietamientos hasta los 60 cm.

Tabla 4. Propiedades físico-químicas del perfil del suelo analizado en el Lote 14..

Determinaciones	Metodología	Horizonte				
		Ap	Bss <sub>1</sub>	Bss <sub>2</sub>	Bss <sub>3</sub>	BCgk
Profundidad (cm)		<b>0-16</b>	<b>16-29</b>	<b>29-45</b>	<b>45-62</b>	<b>62-105</b>
Arena (g Kg <sup>-1</sup> )	Bouyoucos	116	120	84	68	108
Limo (g Kg <sup>-1</sup> )	Bouyoucos	376	384	328	376	328
Arcilla (g Kg <sup>-1</sup> )	Bouyoucos	508	496	588	556	564
Textura	USDA	Arcillosa	arcillosa	Arcillosa	Arcillosa	Arcillosa
pH (1:2,5)	Potenciometría	7,60	7,90	8,00	8,10	8,40
Ce (mS cm <sup>-1</sup> ) <sub>1,2,5</sub>	Resistencia eléctrica	0,50	0,51	0,57	0,60	0,76
Materia Orgánica Total (%)	Walkley y Black	5,02	3,59	2,80	2,15	1,74
NITROGENO TOTAL	Kjeldhal	0,27	0,25	0,14	0,10	0,10
Relación C/N		10,64	8,09	11,69	11,94	10,09
Fósforo Extr. (mg kg <sup>-1</sup> )	Método Olsen	27,70	17,10	4,30	2,70	3,80
Yeso (%)	Emisión atómica	0,02	0,03	0,05	0,03	0,13
Sodio intercambiable (mg kg <sup>-1</sup> )	Emisión atómica	317	272	664	1003	1959
Calcio Extr. (mg kg <sup>-1</sup> )	Emisión atómica	5430	6260	5490	5120	7970
Magnesio Extr. (ppm)	Emisión atómica	1050	980	1530	1770	1890
RAS	-	1,02	0,83	2,02	3,05	5,06
Azufre Extr. S (mg kg <sup>-1</sup> )	Emisión atómica	26.9	sd	Sd	Sd	Sd
Hierro Extr. Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	Emisión atómica	12.32	sd	Sd	Sd	Sd
Manganeso Extr. Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	Emisión atómica	3.22	sd	Sd	Sd	Sd
Cobre Extr. Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	Emisión atómica	1.92	sd	Sd	Sd	Sd
Zinc Extr. Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	Emisión atómica	0.60	sd	Sd	Sd	Sd
Boro Extr. B (mg kg <sup>-1</sup> )	Emisión atómica	0.92	sd	Sd	Sd	Sd
Capacidad de intercambio catiónico (meq. 100g <sup>-1</sup> )	Reemplazo con acetato de sodio, extracción con acetato de amonio y determinación por emisión atómica	34,20	34,60	37,30	34,60	36,60

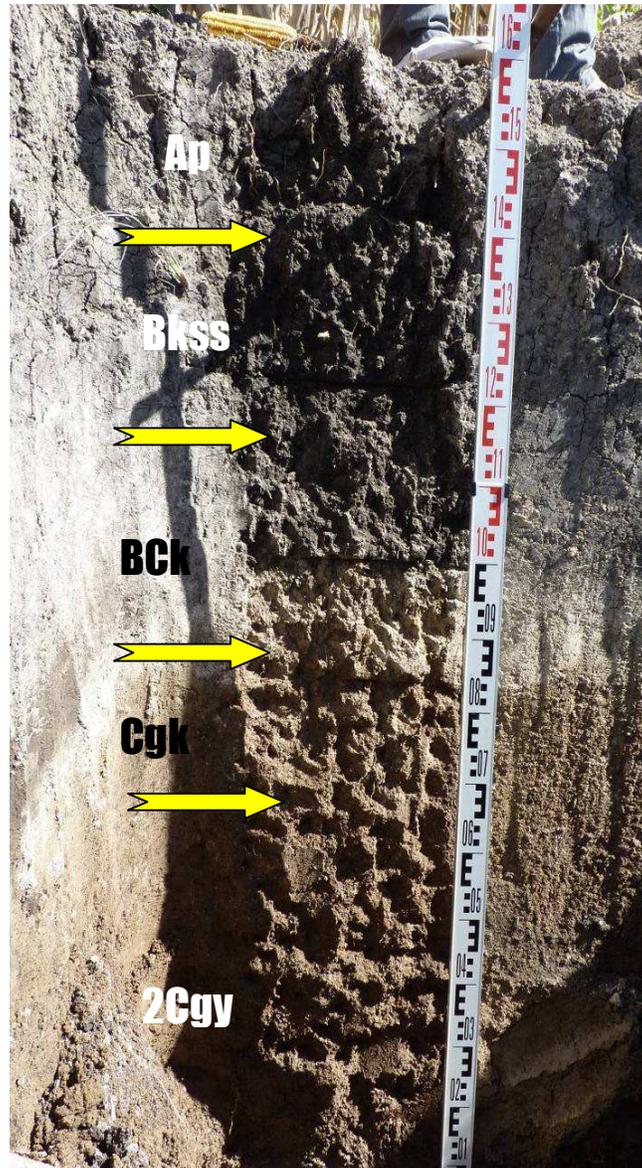
Descripción del perfil N°2.

- Nombre del perfil: Lote 2.
- Fecha: 02/12/2010.
- Ubicación: 40°47' 51,7 S; 63° 03'38,9 O.
- Lugar: Estación Experimental Agropecuaria Valle Inferior del Río Negro convenio Provincia de Río Negro-INTA.
- Altitud: 4 m.s.n.m.
- Paisaje/geoforma: Planicie aluvial.
- Relieve: Plano, ligeramente deprimido.
- Microrrelieve: no se observa.
- Gradiente: < 0,5%
- Material parental: sedimentos aluviales de textura fina en cuencas cerradas (albardones semilunares).
- Erosión: no se observa.
- Vegetación: rastrojo maíz
- Otras: suelo sistematizado para riego.
- Clasificación Taxonómica: **Gypsiustert arídico, Fino, Térmico. Fase: Moderadamente bien drenada.**

Tabla 5. Descripción del perfil del suelo perteneciente al Lote 2..

<b>Horizonte</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Espesor</b>	<b>Características morfológicas</b>
<b>Ap</b>	0-19	19	10 YR 5/1 gris en seco; 10YR 3/2 pardo gris muy oscuro en húmedo; arcillo limoso; bloques subangulares, gruesos, fuertes; muy consolidado; duros; muy plástico, muy adhesivo; raíces finas comunes; muy ligera reacción al HCl 10%; comunes motas de $\text{CaCO}_3$ blandas pulverulentas; limite claro y plano.
<b>Bssk</b>	19-44	25	10 YR 5/1 gris en seco; 10 YR 3/1 gris muy oscuro en húmedo; arcillo limoso; bloques subangulares, gruesos, fuertes; muy consolidado; duros; muy plástico, muy adhesivo; cutanes de tensión comunes; raíces finas comunes; ligera reacción al HCl al 10%; comunes motas de $\text{CaCO}_3$ blandas pulverulentas; limite claro a gradual y plano.
<b>Bck</b>	44-67	24	10 YR 6/1 gris a gris claro en seco; 10 YR 3/1 gris muy oscuro en húmedo; arcillo limoso; bloques subangulares, medios, moderados; consolidado; blando; raíces muy escasas; moderada reacción al HCl al 10%; abundantes motas de $\text{CaCO}_3$ blandas pulverulentas; limite abrupto y plano.
<b>Cgk</b>	67-85	18	10 YR 7/2 gris claro en seco; 10 YR 5/2 pardo grisáceo en húmedo; franco arcillo limoso; bloques subangulares, medios y finos, débil; consolidado; blando; comunes motas de $\text{CaCO}_3$ blandas pulverulentas; raíces muy escasas; moderada a fuerte reacción al HCl al 10%; escasos moteados de Fe y Mn ; limite claro y plano.
<b>2Cgy</b>	85-165	80	10 YR 7/2 gris claro en seco: 10 YR 5/2 pardo grisáceo en húmedo; franco limoso; bloques subangulares, finos, muy débiles, consolidado a poco consolidado; muy friable; raíces muy escasas; leve a moderada reacción al HCl al 10%; yeso vermicular, nódulos y cristales comunes.
	napa		CE 6,6 ds/m pH 7,4

Nota: Hay evidencia de agrietamientos hasta los 60 cm.



Fotografía 7. Perfil de suelo del segundo año de ensayo de maíz (Lote 2).

Tabla 6. Propiedades físico-químicas del perfil del suelo analizado (Lote 2)..

Característica	Metodología	Horizonte				
		Ap	Bssk	Bck	Cgk	2Cgy
Profundidad (cm)	-	<b>0-19</b>	<b>19-43</b>	<b>43-67</b>	<b>67-85</b>	<b>85-165</b>
Arena (g Kg <sup>-1</sup> )	Bouyoucos	12,8	8,8	16,8	11,6	18,8
Limo (g Kg <sup>-1</sup> )	Bouyoucos	44,4	41,6	41,5	51,6	64,4
Arcilla (g Kg <sup>-1</sup> )	Bouyoucos	42,8	49,6	41,7	36,8	16,8
Textura	USDA	Arcillo limoso	arcillo limoso	arcillo limoso	franco arcillo limoso	Franco limoso
pH (1:2,5)	Potenciometría	8,2	8,3	8,5	8,8	8
Ce (mS cm <sup>-1</sup> ) <sub>1:2,5</sub>	Resistencia eléctrica	0,71	0,51	0,52	1,14	4,5
Materia Orgánica Total (%)	Walkley y Black	2,91	3,12	2,4	0,5	0,4
NITROGENO TOTAL	Kjeldhal	0,149	0,153	0,112	0,048	0,061
Relación C/N		11,23	11,67	12,35	6,02	3,76
Fósforo Extr. (mg kg <sup>-1</sup> )	Método Olsen	16,8	14,5	3,4	4	6,7
Yeso (%)	Emisión atómica	0,11	0,043	0,056	0,158	5,67
Sodio intercambiable (mg kg <sup>-1</sup> )	Emisión atómica	268	440	1116	1389	2759
Calcio Extr. (mg kg <sup>-1</sup> )	Emisión atómica	8210	8490	11260	10130	18600
Magnesio Extr. (ppm)	Emisión atómica	1290	2010	2710	1680	1690
RAS	Riverside	0,7	1,1	5,1	2,4	3,3
Azufre Extr. S (mg kg <sup>-1</sup> )	Emisión atómica	29,7	sd	sd	Sd	Sd
Hierro Extr. Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	Emisión atómica	3,66	sd	sd	Sd	Sd
Manganeso disponible Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	Emisión atómica	1,62	sd	sd	Sd	Sd
Cobre Extr. Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	Emisión atómica	1,36	sd	sd	Sd	Sd
Zinc Extr. Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	Emisión atómica	0,62	sd	sd	Sd	Sd
Boro Extr. B (mg kg <sup>-1</sup> )	Emisión atómica	1,54	sd	sd	Sd	Sd
Capacidad de intercambio catiónico (meq. 100g <sup>-1</sup> )	Reemplazo con acetato de sodio, extracción con acetato de amonio y determinación por emisión atómica	34,9	38,2	36,7	33,7	n.d.

Como se puede apreciar en las descripciones, los perfiles de suelos analizados tienen diferencias y semejanzas en sus características morfológicas que resalta la variación de los colores debido a la

diversidad de los sedimentos fluviolacustres depositados. Para ellos es común la manifestación del proceso de gleyzación, donde son comunes por las manchas que evidencian las condiciones de oxidación-reducción en ellos y la presencia de estructuras de bloques sub-angulares a prismática, sobre todo en la parte media del perfil. Masotta (1970) había descripto los suelos del valle a nivel de serie en base a características químicas y morfológicas con fines de riego, pero sin utilizar ninguna clasificación, por lo que esta es la primera cita de vertisoles en el VIRN. La homogeneidad observada en el perfil y los relativos altos niveles de materia orgánica en el subsuelo se asocia a procesos de haploidización por argilopedoturbación, típico de los vertisoles en los cuales durante los periodos secos el topsoil ingresa por las grietas (Soil Taxonomy, 2006). En el periodo húmedo o cuando se riega, la arcilla se expande provocando que las grietas se cierren con un volumen extra de material que produce tensiones y la masa del suelo se rompe generando cutanes de arcilla (slikensides), agregados en forma de cuña y mezclando el material (inversión del perfil). También se presenta en los dos perfiles una capa de no más de 5 cm de espesor con estructura granular con agregados de tamaño reducido (1 a 2 mm de diámetro) producida por los ciclos de humedecimiento y secado de arcillas expandibles en la superficie del suelo denominado automullido o self-mulching. Estos tipos de suelos muestran niveles adecuados de fertilidad, estructura y distribución de poros, sin limitaciones para la producción, pero si se cultivan mientras que el suelo es demasiado húmedo, la labranza, el tráfico de la maquinaria o de los animales en estas condiciones es probable que se genere compactación (Mc Mullen, 2000).

### Nitrógeno en el suelo

Los contenidos de N-NO<sub>3</sub> en kg ha<sup>-1</sup> hasta 0.6 m de profundidad al momento de la siembra, se presentan en la Tabla 7. El contenido inicial es un promedio de toda la parcela experimental. Se puede observar una disponibilidad media en los dos primeros ciclos y más alta el tercer año.

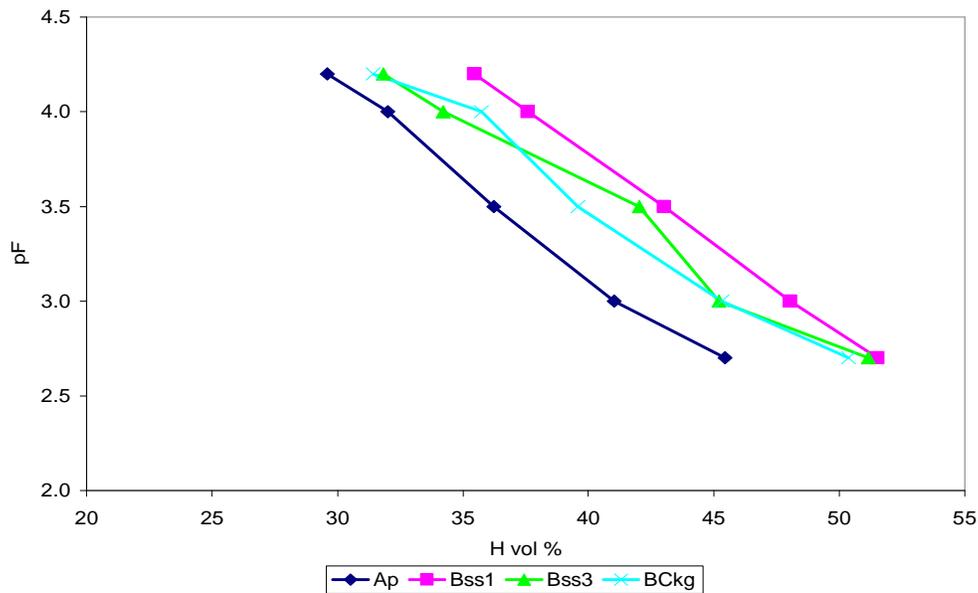
Tabla 7. Contenido de Nitrógeno de nitratos (N-NO<sub>3</sub>) edáfico en la siembra.

Prof. (cm)	N disponible (kg ha <sup>-1</sup> )		
	2006/07	2007/08	2009/10
0-20	35	73	77
20-40	38	52	52
40-60	31	28	63
<b>Total</b>	<b>104</b>	<b>153</b>	<b>192</b>

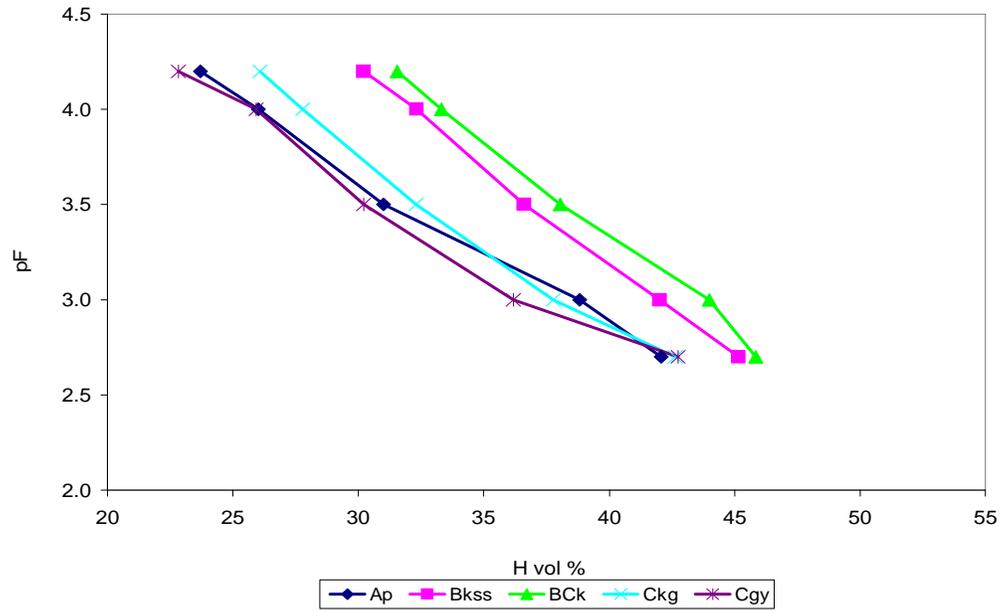
### Propiedades físicas y constantes hídricas.

En la Figura 9 se pueden observar las curvas de retención de agua determinadas en muestras disturbadas de suelo correspondientes a los dos lotes donde se realizaron los ensayos. Los límites de humedad expresados en bares fueron: 0.5, 1.0, 3.0, 3.5, 10 y 15 bar, equivalentes a valores de  $pF = 2.7, 3.0, 3.5, 4.0$  y  $4.2$  respectivamente.

La cantidad de agua retenida por el suelo depende, entre otros factores, de la distribución de los diferentes componentes sólidos, distribución y tamaño de los poros, contenido de materia orgánica, estabilidad de la estructura del suelo y tipo de arcillas presentes. Una característica de los suelos del valle inferior del río Negro es la presencia de altos contenidos de arcillas expandibles (Masotta, 1970), que le confieren características particulares durante el proceso de humedecimiento y secado, debido a la interacción coloidal. A partir de las curvas características de humedad, el agua útil de cada horizonte se obtuvo por diferencia entre el contenido hídrico entre 0.5 bar y 15 bar. En la Tabla 8 se presentan los resultados de CC, punto de marchitez permanente (PMP) y agua útil (AU) obtenidos para el perfil 1 (a) y el perfil 2 (b). Por las características granulométricas de ambos perfiles se observa alta capacidad de retención en los horizontes que contienen mayor cantidad de arcilla y diferenciándose principalmente por las distintas profundidades de cada perfil de suelo.



(a)



(b)

Figura 9. Curvas de retención de humedad para los distintos horizontes del lote 14 (a) y del lote 2 (b). H vol. %: humedad volumétrica. pF: logaritmo decimal de la tensión..

Tabla 8. Contenido de agua en capacidad de campo (CC), en el punto de marchitez permanente (PMP) y de agua útil para los perfiles (a) y (b)..

(a) (Lote 14)

<i>Horizonte</i>	<i>Profundidad</i>	<i>CC</i> ( <i>cm/cm</i> )	<i>PMP</i> ( <i>cm/cm</i> )	<i>Agua útil</i> ( <i>cm/cm</i> )	<i>Agua</i> <i>útil/horizonte</i> ( <i>mm</i> )
<b>Ap</b>	0-16	0.454	0.296	0.158	25.3
<b>Bss1</b>	16-29	0.515	0.354	0.160	20.8
<b>Bss2</b>	29-45	0.544	0.368	0.175	28.0
<b>Bss3</b>	45-62	0.511	0.318	0.193	32.8
<b>BCkg</b>	62-105	0.503	0.314	0.189	81.3
				<b>Total</b>	<b>188.49</b>

(b) (Lote 2)

<i>Horizonte</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>CC (cm/cm)</i>	<i>PMP (cm/cm)</i>	<i>Agua útil (cm/cm)</i>	<i>Agua útil/horizonte (mm)</i>
<b>Ap</b>	0-19	0.42	0.277	0.144	28.58
<b>Bkss</b>	19-43	0.45	0.302	0.149	42.3
<b>Bck</b>	43-67	0.458	0.315	0.143	43.9
<b>Ckg</b>	67-85	0.426	0.260	0.165	29.8
<b>Cgy</b>	85-165	0.427	0.228	0.199	159.3
				Total	<b>304.00</b>

### Calibración del sensor Watermark ®

La relación entre la resistencia eléctrica medida con el sensor watermark® y el contenido volumétrico de agua se presenta en la figura 10. La calibración de los sensores a campo en el suelo de los sitios de ensayo mostró una alta correlación entre resistencia y el contenido volumétrico de agua. El mejor ajuste fue el exponencial, concordando con lo hallado por Light *et al.* (1991) para un suelo arcilloso pero en condiciones de laboratorio. Bertolino *et al.* (2002) mencionan que es conveniente realizar una calibración del dispositivo para cada suelo y a diferentes profundidades para poder caracterizar su respuesta en periodos de humedecimiento y secado. En un suelo arenoso o franco, el sensor es de valor limitado, ya que generalmente gran parte del agua en el suelo se ha ido antes de que los poros finos en el watermark se comiencen a drenar y el sensor registra el cambio tardíamente. Busscher (2009) menciona que en los suelos de arcillosos, como los de éste estudio, y en particular para los cultivos que no son sensibles a estrés hídrico leve, cuando el sensor alcanza -150 kPa de tensión de humedad del suelo, aun existe agua disponible para las plantas. En base a la esta calibración y a las curvas de retención hídrica del lote 2 se observa que valores de entre -5 y -15 kPa (1-2  $\Omega$ ) del sensor watermark el suelo se encuentra cercano a capacidad de campo; entre -80 y -100 kPa (10-12  $\Omega$ ) se agotó un 50% del agua disponible y entre -160 y -180 kPa (26-28  $\Omega$ ) se agotó alrededor del 90% de agua disponible para las plantas a esa profundidad.

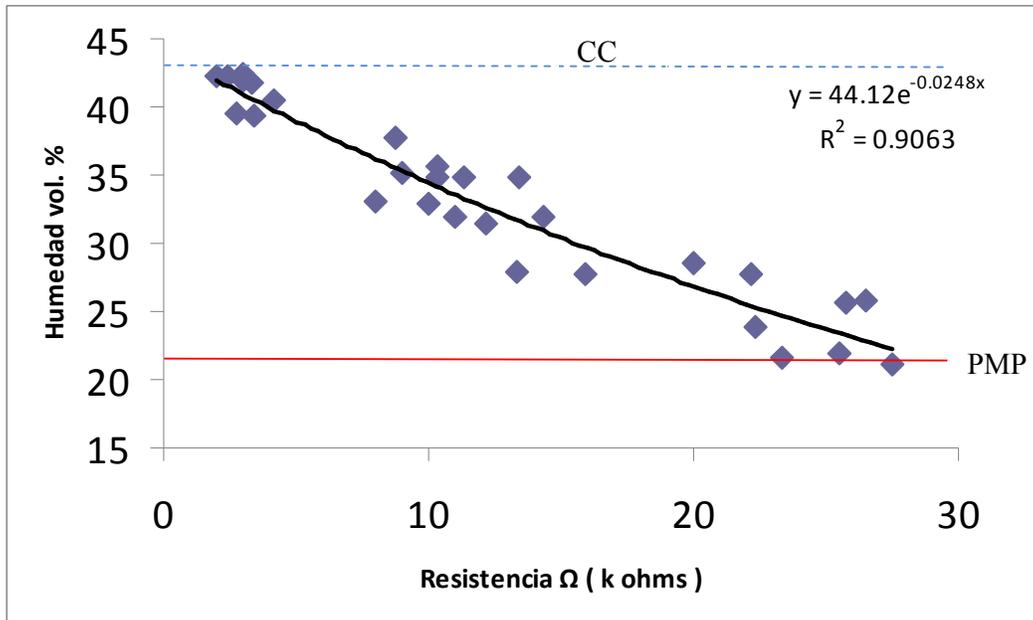
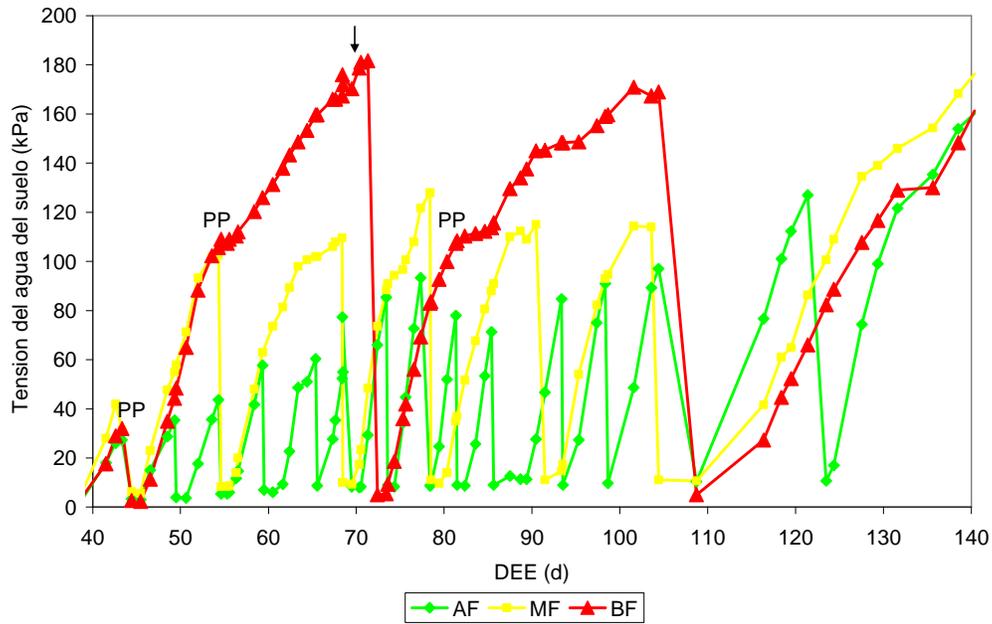


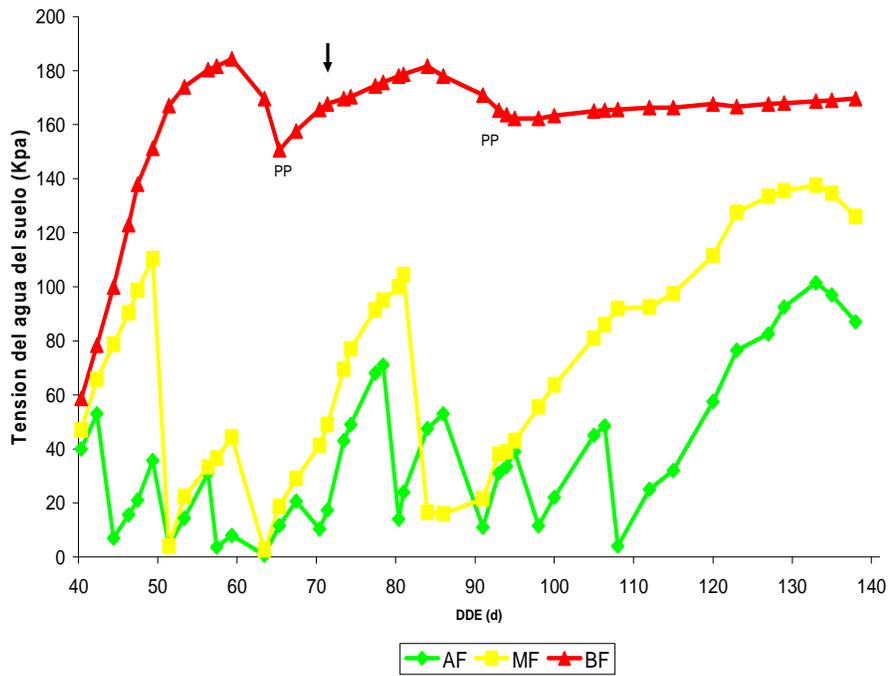
Figura 10. Calibración del sensor de matriz granular Watermark® en el cultivo de maíz.  $\Omega$  es la resistencia eléctrica en kilo ohms y Humedad Vol % es la humedad volumétrica del suelo del lote 2 en %. CC es capacidad de campo y PMP es punto de marchitez permanente.

### Tensión de agua en el suelo

En base al criterio regular el momento en que se realizaba un evento de riego en función de la tensión del agua del suelo, producto de la evapotranspiración del cultivo de maíz, se obtuvo el número de riegos y la cantidad agua aplicada para cada tratamiento en los tres años de ensayo. En la Figura 11 se presenta la evolución de la tensión del agua del suelo a 25 cm de profundidad en los tres tratamientos de riego para los tres años de ensayos (a, b, y c). La disminución en el potencial agua entre 0 y 10 indica los eventos de riego.

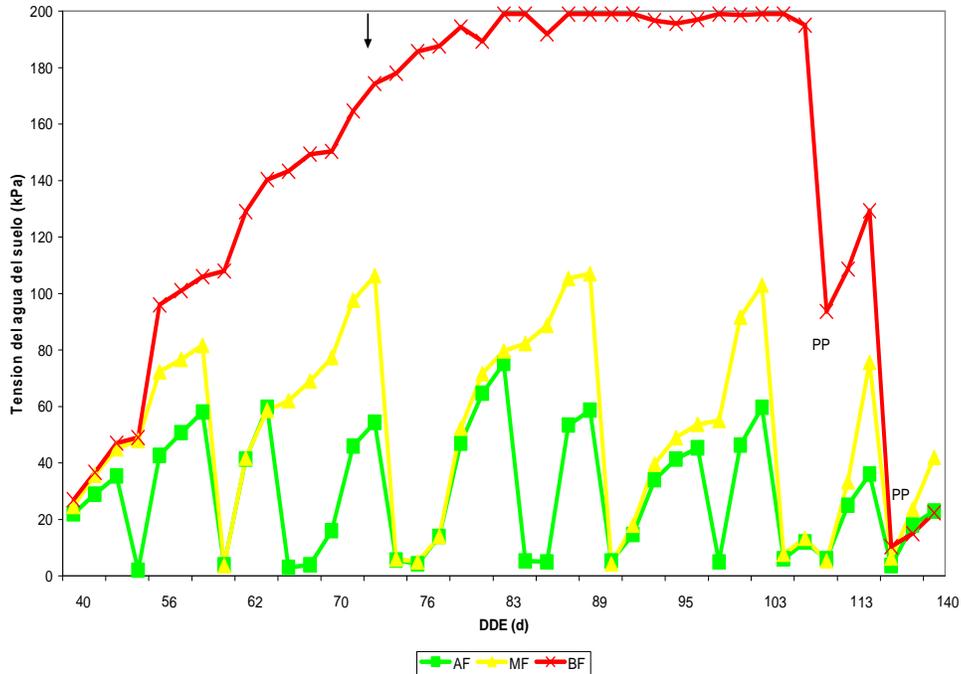


(a)



(b)

Dónde AF: alta frecuencia, MF; media frecuencia y BF; baja frecuencia. La flecha ↓ indica el 50% de floración femenina. DDE: días desde la emergencia. PP: precipitación..



(c)

Figura 11. Evolución del potencial agua del suelo durante los ciclos de cultivo 2006/07 (a), 2007/08 (b) y 2009/10 (c) para las tres frecuencias de riego estudiadas (AF, MF y BF). La flecha ↓ indica el 50% de floración femenina. DDE: días desde la emergencia. PP: precipitación..

En la Tabla 9 se presenta el número de riegos aplicados y en la Tabla 10 figuran los valores de agua útil a la siembra y al finalizar el ciclo de cultivo, los volúmenes de agua de riego, lluvia y total, que recibió cada tratamiento en los tres años estudiados. Los valores estimados de evapotranspiración del cultivo (ETc) durante los tres años estudiados, se ubicaron entre 600 y 680 mm en el ciclo de cultivo, presentándose en el tratamiento BF de riego un déficit promedio del 20% sobre la ETc, sin considerar las pérdidas por eficiencia de aplicación del riego. Doorenbos y Pruitt (1984) mencionan que el maíz evapotranspira entre 400 y 700 mm en su ciclo, según condiciones ecológicas. Si bien en el primer ciclo de cultivo (2006/07) fue mayor número de riegos que los otros dos ciclos, la cantidad de agua de riego suministrada fue similar (Tabla 10).

Tabla 9. Número de riegos aplicados al cultivo en las tres frecuencias de riego (AF, MF y BF) para los tres años de ensayos..

Ciclos de cultivo	Número total de riegos		
	Alta Frecuencia	Media Frecuencia	Baja Frecuencia
<b>2006/07</b>	<b>15</b>	<b>8</b>	<b>5</b>
<b>2007/08</b>	<b>12</b>	<b>6</b>	<b>4</b>
<b>2009/10</b>	<b>12</b>	<b>7</b>	<b>3</b>

En parte, esto podría asociarse a que la capacidad de almacenaje del perfil del suelo en el primer sitio experimental era menor (188 mm vs. 304 mm), con lo cual la recarga de agua del perfil en cada evento de riego era inferior en el primer sitio experimental que en el segundo. En promedio en los tratamientos MF se aplicó un 30% menos de agua que en AF. El tratamiento BF redujo la aplicación de agua en 50% respecto de AF (Tabla 9).

Tabla 10. Cantidad de agua aplicada, lluvia, agua útil (AU) a la siembra y al finalizar el ciclo, agua total recibida y ETc para los tres años de ensayos..

	2006/07			2007/08			2009/10		
	Alta Frec.	Media Frec.	Baja Frec.	Alta Frec.	Media Frec.	Baja Frec.	Alta Frec.	Media Frec.	Baja Frec.
<b>AU Inicio (mm)</b>	123	123	123	204	204	204	241	241	241
<b>AU Final (mm)</b>	143	153	111	253	232	201	243	232	219
<b>Milímetros aplicados</b>	1113	734	537	1197	761	522	1175	824	419
<b>Lluvia (mm)</b>	229	229	229	60	60	60	168	168	168
<b>Agua Total (mm)</b>	1342	963	766	1257	821	582	1343	992	587
<b>ETc (mm)</b>	601	-	-	622	-	-	683	-	-

### **Evolución del contenido de agua en el suelo**

En las Figuras 12, 13 y 14 se muestra la evolución del contenido de agua del suelo en el periodo de mayor demanda hídrica, que se extiende aproximadamente desde 15 días antes hasta 21 días

después de la floración (Robins y Domingo, 1953; Shaw, 1988 y Otegui, 1992), a partir de datos obtenidos con las sondas Diviner, para las los tratamientos baja, media y alta frecuencia de riego respectivamente y correspondientes a N280 del ciclo 2009/10. Las medidas realizadas con la sonda Diviner mostraron las variaciones del contenido agua total en los primeros 80 cm en el suelo luego de un evento de riego y como éste se fue secando en función del consumo del cultivo. En BF se observa una disminución gradual de la humedad a lo largo del ciclo del cultivo (Figura 12) mientras que en MF (Figura 13) y AF (Figura 14) se marcan los eventos de riego con incrementos en el contenido de agua en el perfil. Consecuentemente con los valores medidos con el sensor watermark se aprecia que la humedad volumétrica tomada con la Diviner® mantiene una estrecha relación con los datos de tensión en el periodo analizado, poniendo en evidencia la posibilidad de utilizar los sensores watermark® para el seguimiento del estado hídrico del suelo para la producción de maíz con riego gravitacional en este tipo de suelos.

Al analizar la evolución del contenido de agua a distintas profundidades durante el ciclo del cultivo se aprecia que la mayor fluctuación en el contenido volumétrico del agua en el perfil ocurre en los primeros 20-40 cm, por estar concentrado en este estrato, el mayor volumen de raíces. Estos datos concuerdan con los hallados por Rodríguez *et al.* (2011) quienes encontraron que para maíz con riego sembrado en vertisoles en Entre Ríos, Argentina el tratamiento de riego que repuso el 90 % de la ETP mostró una mayor colonización en los 50 cm superficiales.

En la Figura 15, correspondiente al tratamiento BF se observa, que el suelo se seca en profundidad gradualmente a medida que se avanza en el ciclo de crecimiento del cultivo, primero agotando el agua en los 40 cm iniciales, luego a 60 cm y para mediados de Enero hasta los 80 cm de profundidad. Los datos hallados concuerdan con los expresados por Dardanelli *et al.* (2003) donde la evolución en el tiempo de la humedad volumétrica en una determinada capa de suelo, desde el momento en que el cultivo comienza a extraer agua de ella, sigue un patrón de reducción exponencial.

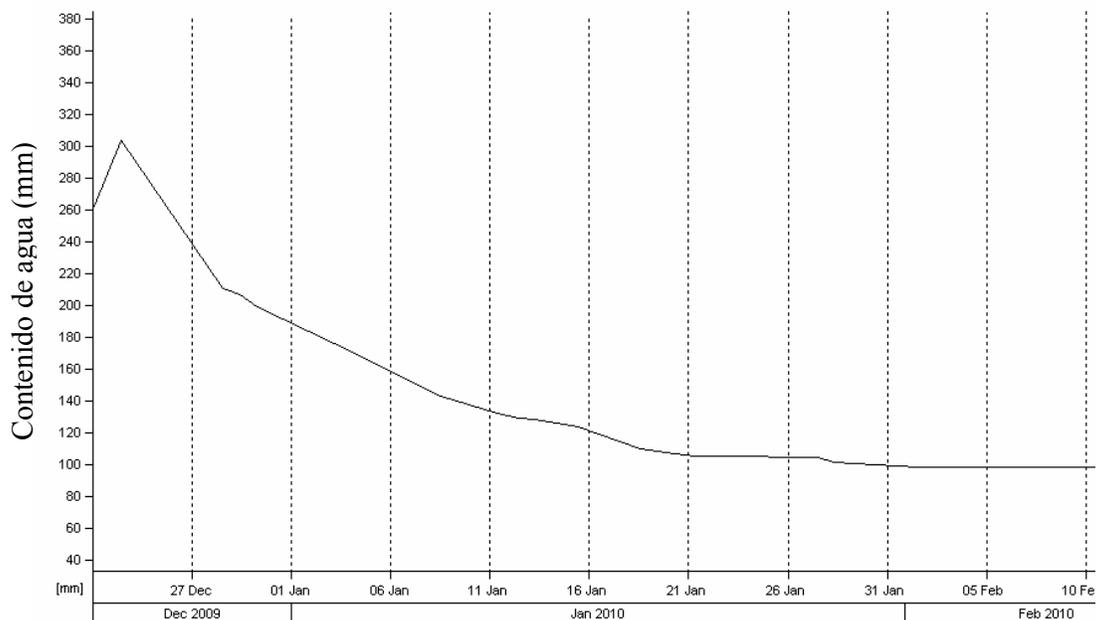


Figura 12. Evolución del contenido de agua del suelo hasta 0,8 m en el periodo de mayor demanda hídrica, a partir de datos obtenidos con las sondas Diviner®, para el tratamiento Baja Frecuencia de riego y N280 del ciclo 2009/10..

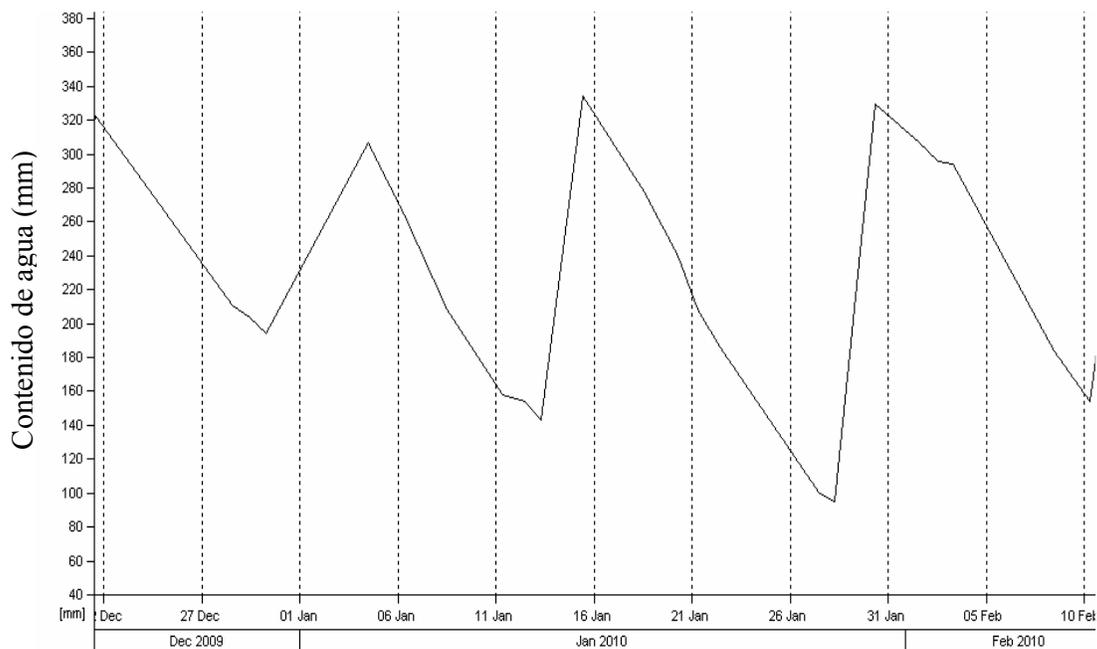


Figura 13. Evolución del contenido de agua del suelo hasta 0,8 m en el periodo de mayor demanda hídrica, a partir de datos obtenidos con las sondas Diviner®, para el tratamiento Media Frecuencia de riego y N280 del ciclo 2009/10.

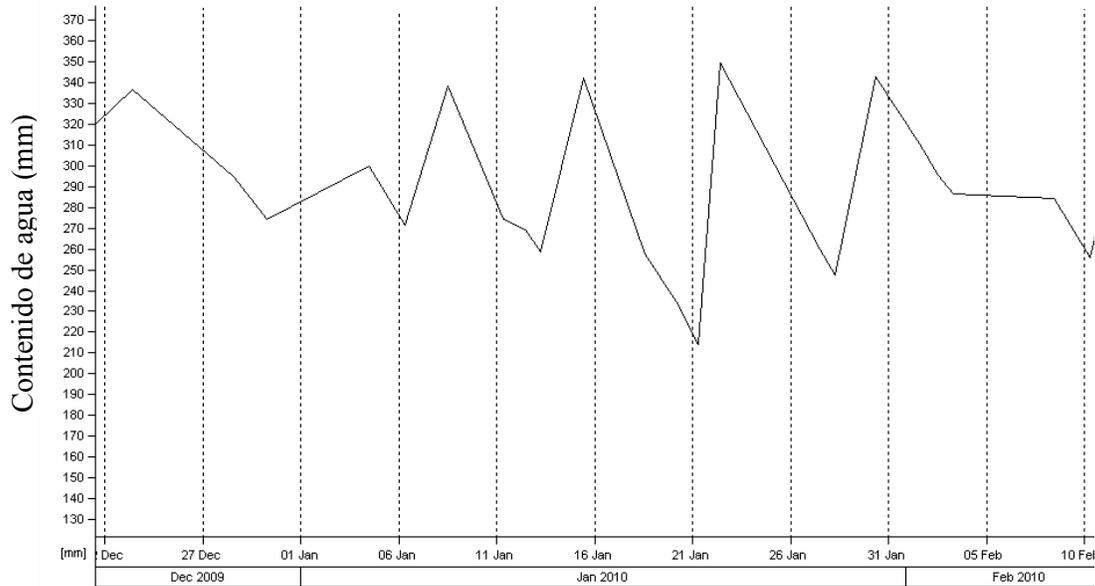


Figura 14. Evolución del contenido de agua del suelo hasta 0,8 m en el periodo de mayor demanda hídrica, a partir de datos obtenidos con las sondas Diviner®, para el tratamiento Alta Frecuencia de riego y N280 del ciclo 2009/10.

En MF (Figura 16) la extracción de agua alcanza una profundidad máxima de 60 cm a partir del 10 de enero y en AF prácticamente toda el agua se extrajo de los 40 cm iniciales (Figura 17) lo cual ilustra sobre el exceso de agua suministrado en este tratamiento. Se observaron incrementos en la extracción de agua en capas profundas al disminuir la disponibilidad hídrica. La absorción de cantidades relativamente pequeñas de agua del subsuelo puede producir incrementos significativos en el rendimiento, principalmente cuando ella ocurre durante las etapas reproductivas en donde se definen el número de granos o su peso (Passioura, 1983; Boyer y Westgate, 2004; Benjamin y Nielsen, 2006; Kirkegaard *et al.*, 2007). Las distintas estrategias del cultivo para hacer uso del agua en momentos de sequía, podría ser una evidencia de que los umbrales de riego, no deberían ser fijos e iguales para cada cultivo. Se deben tener en cuenta factores como la velocidad de profundización radical la tasa de absorción, máxima profundidad de absorción de agua, y además otros aspectos también fundamentales como son el tipo de suelo y la demanda atmosférica (Severina, 2012).

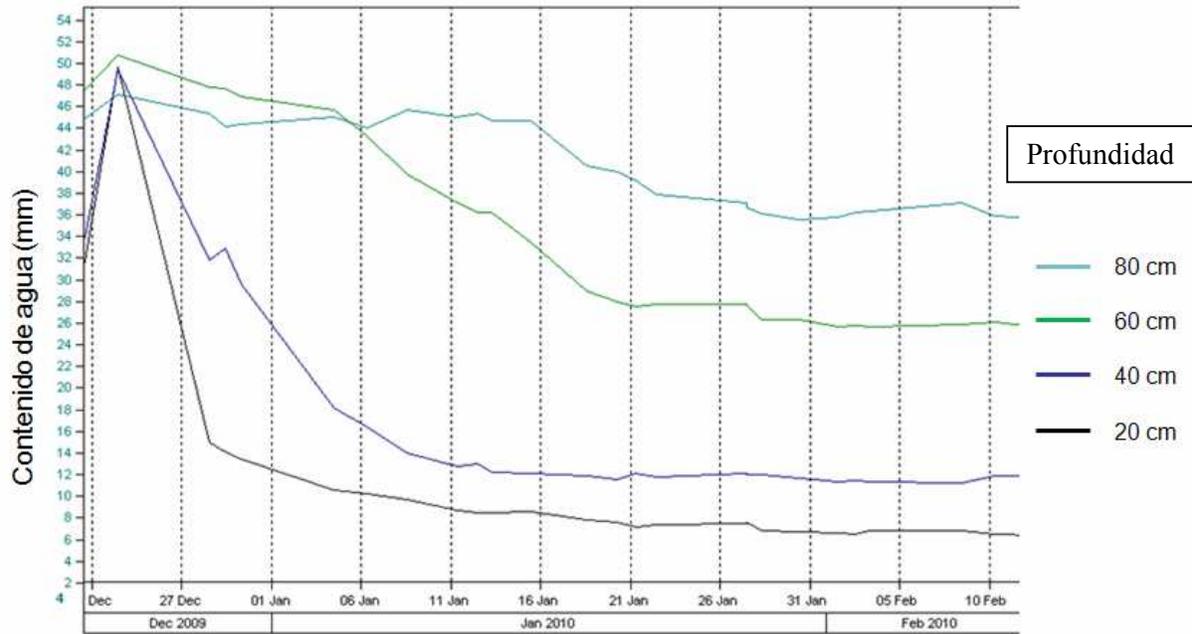


Figura 15. Evolución del contenido de agua (mm) a diferentes profundidades del perfil del suelo para el tratamiento Baja Frecuencia de riego y N280 del ciclo 2009/10..

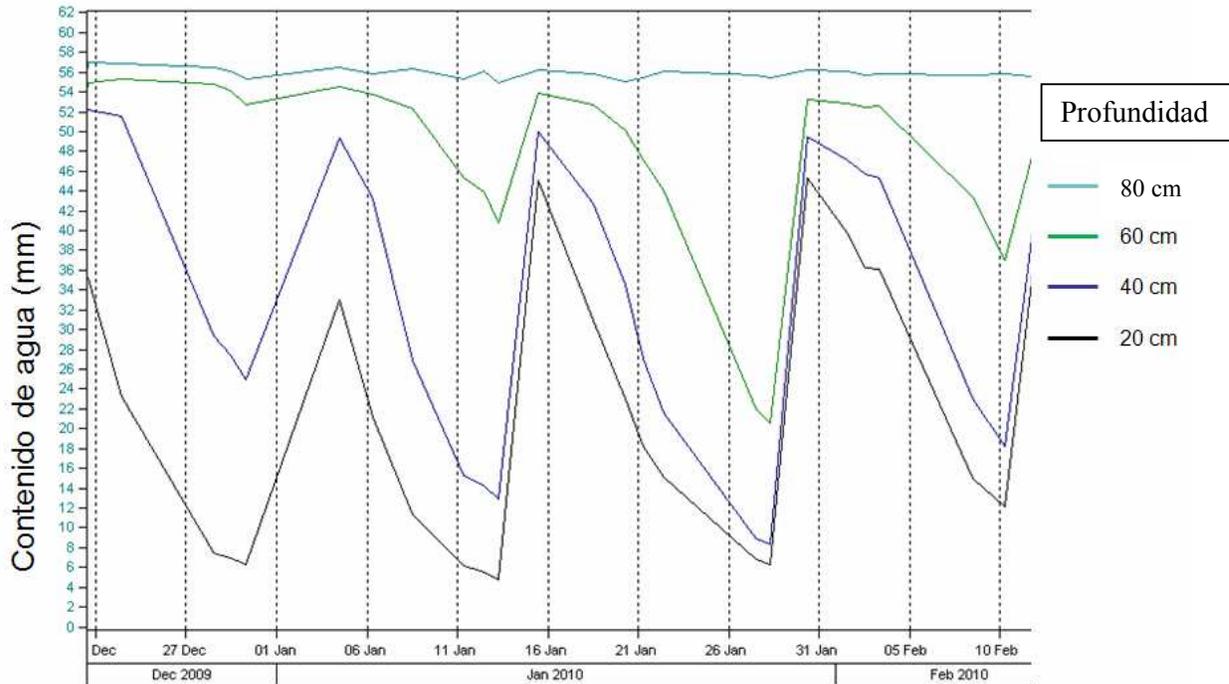


Figura 16. Evolución del contenido de agua (mm) a diferentes profundidades del perfil del suelo para el tratamiento Media Frecuencia de riego y N280 del ciclo 2009/10.

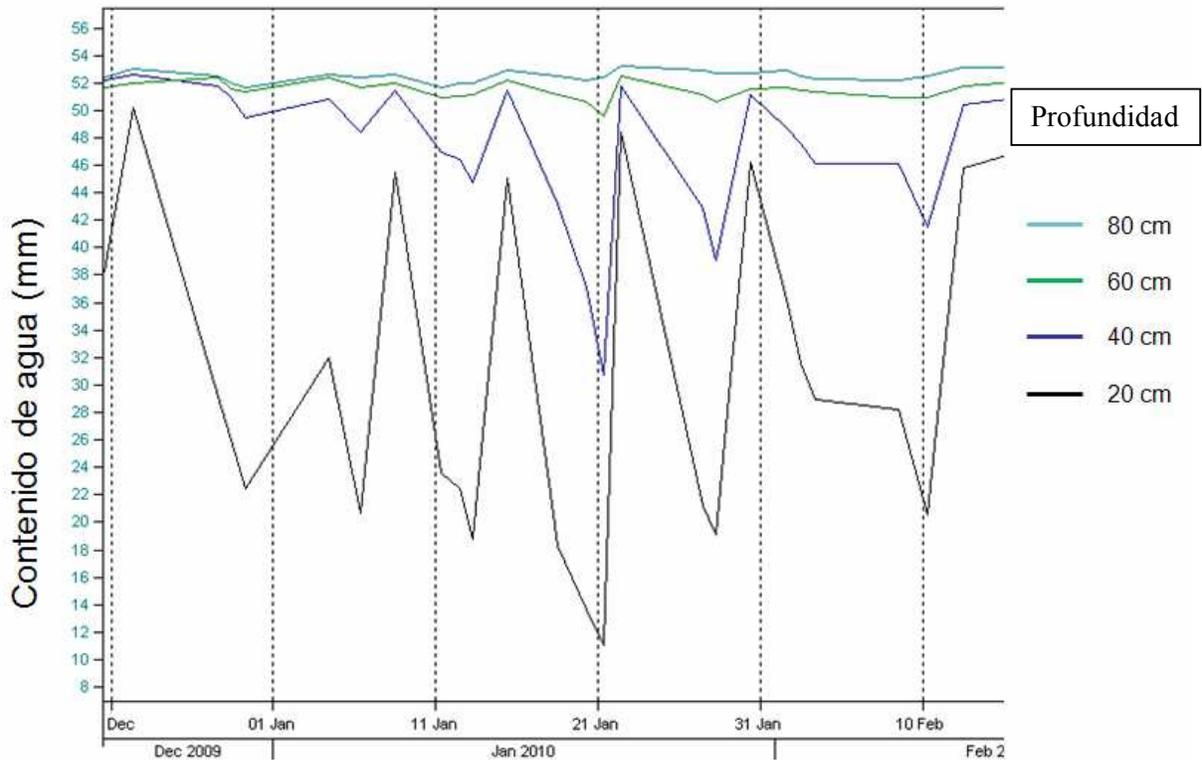


Figura 17. Evolución del contenido de agua (mm) a diferentes profundidades del perfil del suelo para el tratamiento Alta Frecuencia de riego y N280 del ciclo 2009/10..

Aunque, la humedad en términos volumétricos estimada con la sonda Diviner® se ajusta a la cantidad de agua que hay en el suelo, el seguimiento con los sensores Watermark®, en términos de tensión, es un indicativo de la disponibilidad o de la facilidad con que el cultivo la puede aprovechar. De los análisis de la evolución de la tensión de agua y de la humedad volumétrica en el suelo medida con la sonda Diviner® y considerando la relación entre las mediciones entre ambos sensores (Figura 18), se pone de manifiesto la posibilidad de utilizar a campo los sensores Watermark® en el seguimiento de la programación del riego en el suelo del valle inferior del río Negro, permitiendo detectar si se está haciendo un adecuado manejo del mismo y en función de la demanda del cultivo a lo largo del ciclo.

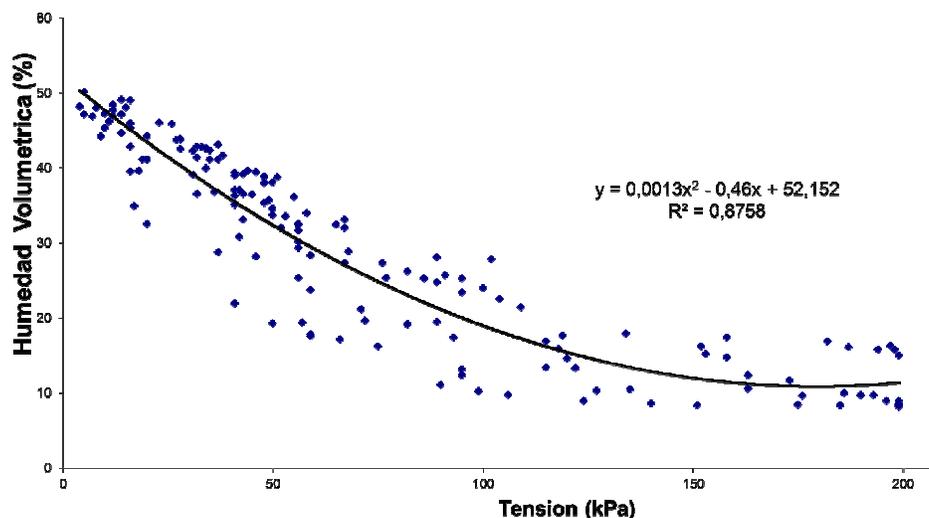


Figura 18. Relación entre la humedad volumétrica medida con la sonda Diviner® y la tensión de agua en el suelo a 25 cm de profundidad medida con Watermark®..

### Efecto de las frecuencias de riego sobre el desarrollo, crecimiento y rendimiento del cultivo

Entre los factores ambientales que condicionan la capacidad del maíz para producir biomasa, la radiación lumínica y la temperatura son importantes determinantes del rendimiento máximo (Andrade *et al.*, 1996). La temperatura es el factor que mayor importancia tiene sobre la tasa de crecimiento y desarrollo de las plantas, pues determina la tasa de producción y expansión foliar que conforman el dosel vegetal a través del cual interceptan la radiación (Tollenar *et al.*, 1979)

En la Tabla 11 se presenta la duración y tiempo térmico medios para todos los tratamientos durante los ciclos 2006/07, 2007/08 y 2009/10, ya que las diferencias entre tratamientos en este sentido no fueron significativas. Ni las frecuencias de riego, ni de los diferentes niveles de N, tuvieron influencia en la duración total de ciclo de cultivo, ya que la única diferencia observada fue en el momento de ocurrencia de la floración. Para cada año se observaron diferencias en R1 en alta frecuencia y media frecuencia en donde se anticipó dos días respecto de baja frecuencia. En lo que respecta a la disponibilidad de N, el tratamiento testigo (N0) floreció 2 días más tarde que los tratamientos fertilizados. Estas diferencias representan en tiempo térmico 42,2 °C aproximadamente. Maturano (2002) encontró diferencias de 32 °C anticipando la antesis en maíz cuando la dosis de nitrógeno se incrementó de 36 a 90 kg.ha<sup>-1</sup> de nitrógeno. Rivetti *et al.* (2001) para el mismo híbrido y en Río Cuarto (Córdoba), en el cual las fases reproductivas se atrasaron

entre 5 y 7 días. Fernández *et al.* (1996) observaron leves demoras en varios estadios fenológicos pero dichas diferencias desaparecieron antes de panojamiento. Uhart y Andrade (1995) también observaron demoras de alrededor de 9 días en los estadios vegetativos y 11 días en polinización en cultivos de maíz con riego y con deficiencias de nitrógeno. El estrés hídrico puede acelerar o bajar la tasa de desarrollo en función de la intensidad del estrés (Brisson y Delécolle, 1991).

Tabla 11. Tiempo térmico y duración en días de las distintas etapas fenológicas del maíz en el tratamiento Alta frecuencia de riego y N280 para los ciclos 2006/07 (año 1), 2007/08(año 2) y 2009/10 (Año 3). V6= sexta hoja expandida; MF= madurez fisiológica del grano..

Año	Etapas del ciclo	Duración de la etapa (días)	Duración acumulada (días)	Tiempo térmico (°C)	Tiempo térmico acumulado (°C)
1	Siembra-emergencia	8	8	76	76
	Emergencia-V6	34	42	418	494
	V6- Floración femenina	28	70	383	877
	Floración Femenina- MF	69	139	799	1676
2	Siembra-emergencia	10	10	85	85
	Emergencia-V6	33	43	408	493
	V6- Floración femenina	27	70	386	879
	Floración Femenina- MF	70	140	876	1755
3	Siembra-emergencia	12	12	75	75
	Emergencia-V6	44	56	454	529
	V6- Floración femenina	28	84	395	924
	Floración Femenina- MF	65	149	790	1714

La duración del periodo entre floración y madurez fisiológica, para un mismo genotipo, depende especialmente de la temperatura (Derieux y Bonhomme, 1982; Kiniry y Bonhomme, 1991). Sin embargo, situaciones ambientales desfavorables que determinen una insuficiente provisión de fotoasimilados a los granos anticipan la madurez fisiológica, limitando su peso final (Daynard y Duncan, 1969; Cirilo y Andrade, 1996). Según el genotipo, el requerimiento térmico del período entre floración y madurez varía entre 600 y 900 °C acumulados sobre una base de 8 °C (Kiniry y Bonhomme, 1991 citado por Andrade, *et al.*, 1996). En la Tabla 11 se observa que la duración de la etapa entre R1 y R6 se ubicó entre 799 y 876 °C dependiendo de los años. Cirilo (1994) encuentra, para el sudeste de Buenos Aires, una sumatoria térmica de 828 °C a 927 °C para cumplir esta etapa. Estas variaciones pueden deberse a la acción de otro factor ambiental, al empleo de una temperatura base no adecuada (Castillo *et al.*, 1987) o contabilizar temperaturas máximas por encima de la óptima que limitan el crecimiento (Gilmore *et al.*, 1958).

### **Producción de biomasa aérea**

Las diferencias en la acumulación de materia seca debido al factor riego se manifestaron a partir de R1, sin encontrarse interacción entre las variables agua y nitrógeno. En R1 la acumulación de biomasa en los tratamientos de AF y MF fue, en promedio, 19 % mayor que en BF en los tres ciclos estudiados mostrando que una menor disponibilidad de agua por una menor frecuencia de riego desde V4 disminuyó la producción de biomasa a R1. (Tabla 12). A mayores valores de biomasa y un constante índice de cosecha observado cuando no existen déficits hídricos (Sinclair y Horie, 1989), ni temperaturas de crecimiento muy bajas (Wilson *et al.*, 1995), determina un mayor rendimiento de granos. Se ha determinado que el número de granos (NG) queda establecido en un período de aproximadamente 30 días centrado en la floración, motivo por el cual es definido como el período crítico. La incidencia de una deficiencia hídrica cuando tiene lugar en este período, como la presentada en el tratamiento BF, no solo afecta la producción de MST sino que provoca mayores mermas en el NG porque coincide con el crecimiento activo de la espiga, la emergencia de estigmas y el inicio de llenado de granos (Grant, 1989; Hall *et al.*, 1981; Westgate y Boyer, 1986).

En madurez fisiológica, la producción de MST mostró un comportamiento similar a R1 (Tabla 12) donde se hallaron diferencias para el factor agua entre los tratamientos BF con respecto a MF y AF en los tres ciclos de cultivo.

Tabla 12. Efectos de las frecuencias de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en la acumulación de materia seca total ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), en floración de los tres ciclos estudiados. AF es Alta frecuencia, MF es Media frecuencia y BF es Baja frecuencia. letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey).

Factor Agronómico	Nivel	MST R1 ( $\text{kg ha}^{-1}$ )			MST R6 ( $\text{kg ha}^{-1}$ )		
		2006/07	2007/08	2009/10	2006/07	2007/08	2009/10
Frecuencia de riego	AF	6836 a	9371 a	15126 a	23991 a	26146 a	38060 a
	MF	6724 a	9254 a	15415 a	24138 a	24215 a	39029 a
	BF	5496 b	6613 b	13114 b	19706 b	17186 b	33370 b
Significación		**	**	**	**	**	**
Fertilización nitrogenada	N0	4535 a	7604 a	13068 a	15419 a	18269 a	32049 a
	N70	5232 ab			17825 ab		
	N140	6343 bc	8297 ab	15161 b	21681 b	22180 b	37558 b
	N210	7082 c			26082 c		
	N280	7321 c	9336 b	15426 b	28334 c	27097 c	40853 c
	N350	7595 c			26330 c		
Significación		0,05	0,05	0,01	0,05	0,01	0,05
Interacción		NS	NS	NS	NS	NS	NS

En R6 se observó una menor producción de MST en el tratamiento con menos frecuencia de riego (BF) del 18 % y 19 % en el ciclo 2006/07, del 32% y 30 % en el ciclo 2007/08 y del 12% y 15 % con respecto a AF y MF. Si bien no se encontraron diferencias significativas entre AF y MF en la MST, agronómicamente MF se ubicó levemente por encima de AF en dos de los tres años analizados.

Durante el ciclo 2006/07 se fertilizó cada parcela elemental con 6 dosis de nitrógeno, con el fin de obtener una curva de producción de MST según cada frecuencia de riego (Figura 18). Se ajustó un modelo cuadrático a la relación MST/ dosis de nitrógeno para cada frecuencia de riego. (Muchow, 1994; Sinclair y Amir, 1992; Terman y Noggle, 1973). La producción de MST se incrementó a medida que la dosis fue creciendo hasta N280 en las tres frecuencias de riego, siendo un 12 y 19 % mayor en MF y AF respecto de BF y sin encontrarse diferencias estadísticas entre AF y MF. En tal sentido se sugiere la existencia de un límite en la cantidad de N absorbido por el cultivo, sobre el cual no ocurre incremento en la producción de MST, debido posiblemente a la limitación de otro factor. Esto se debe a que la relación entre el rendimiento de un cultivo y el N disponible está afectada por factores genéticos, ambientales y de manejo (Carcova, 2004). La relevancia de esta segregación entre niveles hídricos, radica en la posibilidad de optar entre curvas de mayor o menor

producción MST, en función de la frecuencia de riego aplicada y así estimar la dosis de N a aplicar en cada caso.

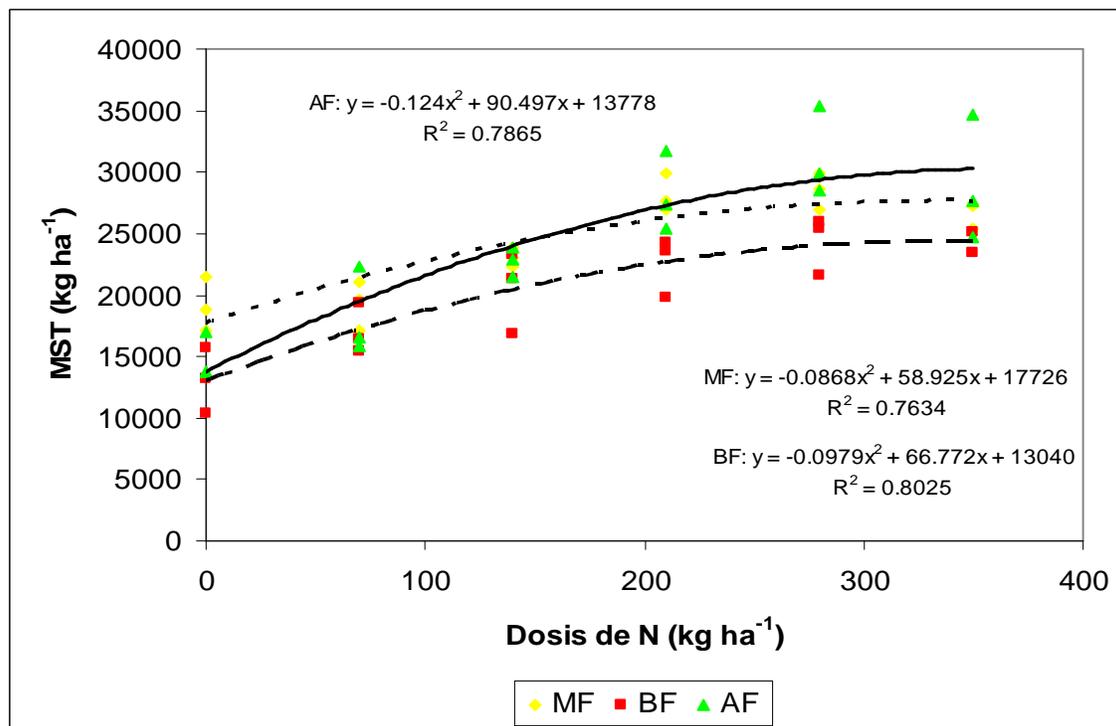


Figura 19. Relación entre la dosis de fertilizante nitrogenado (N) y la materia seca aérea total (MST) para el ciclo 2006/07. AF es Alta frecuencia, MF es Media frecuencia y BF es Baja frecuencia.

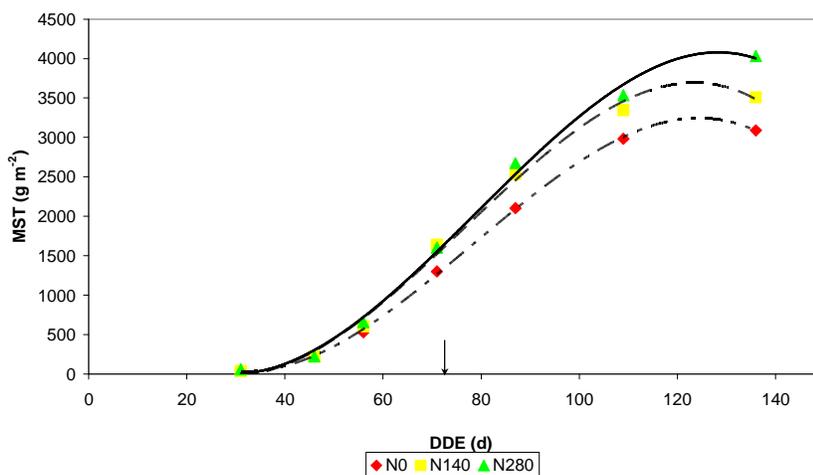
En la Figura 20 a, b y c se puede observar la dinámica de acumulación de materia seca aérea desde la emergencia para las distintas dosis de nitrógeno dentro de cada nivel hídrico del ciclo 2009/10. El estrés nitrogenado redujo la materia seca acumulada en órganos aéreos en los tres ciclos de ensayo, estando relacionados con la intensidad del estrés. Las diferencias entre los tratamientos nitrogenados comenzaron a manifestarse a partir de V9, mientras que entre las frecuencias de riego fue en R1 (Tabla 13). La mayor acumulación de MST, al igual que en los ciclos anteriores, se logra en AF y MF y para la dosis de 280 kg ha<sup>-1</sup> de N. Se detectaron diferencias en N0 con respecto a N140 y ésta última respecto de N280. Considerando el promedio de las tres frecuencias de riego, se observó que las diferencias en la producción de MST entre el testigo N0 y las dosis N140 y N280 se ubicaron en el orden del 29 y 38 % en 2006/07, del 18 y 33 % en 2007/08 y del 15 y 23 % en 2009/10 respectivamente. Girardin *et al.* (1987) encuentran una reducción del 25 % en la producción de MST debida a una deficiencia nitrogenada.

Tabla 13. Efectos de las frecuencias de riego y de la fertilización nitrogenada en la producción de la materia seca total aérea ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), en 5 fechas de muestreo del ciclo 2009/10. AF es Alta frecuencia, MF es Media frecuencia y BF es Baja frecuencia. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey  $\alpha=0,05$ ).

Factor agronómico	Nivel	MST ( $\text{kg ha}^{-1}$ )				
		V9	R1	R3	R4	R6
Frecuencia de riego	AF	5974 a	15126 a	24392 a	32883 a	38060 a
	MF	6257 a	15415 a	23291 a	31354 a	39029 a
	BF	6023 a	13114 b	19605 b	27911 b	33370 b
Fertilización nitrogenada	N0	5630 a	13068 a	19794 a	28143 a	32049 a
	N140	6017 ab	15161 b	22897 b	31101 b	37558 b
	N280	6607 b	15426 b	24597 b	32903 b	39853 c

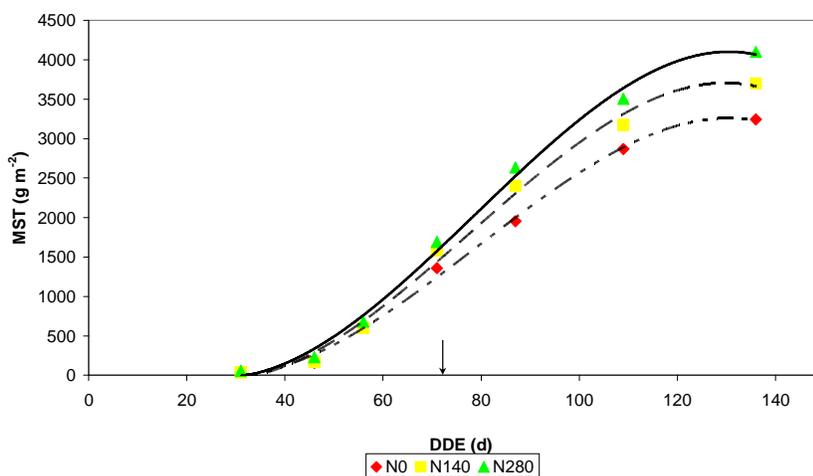
(a)

AF



(b)

MF



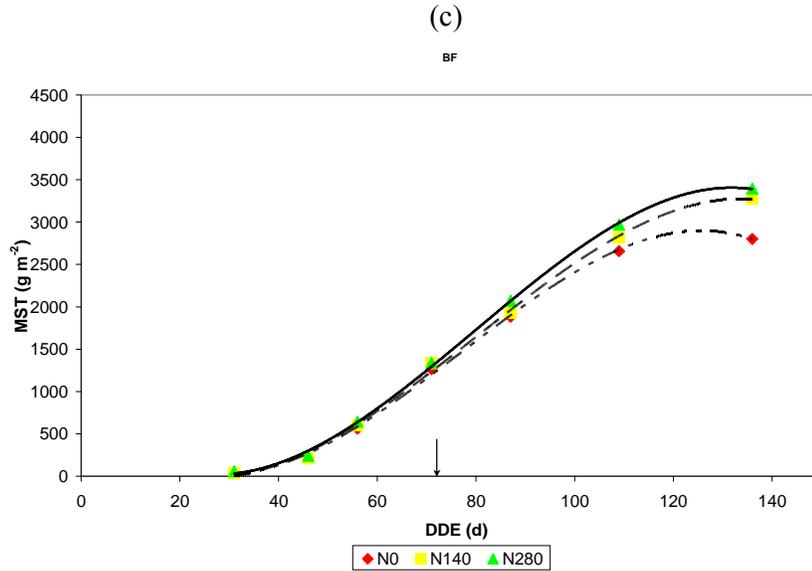


Figura 20. Dinámica de acumulación de biomasa aérea para cada frecuencia de riego: (a) AF, (b) MF y (c) BF, agrupados por nivel de fertilización: N0, N140 y N280. Datos correspondientes al ciclo 2009/10. La flecha hacia abajo indica el 50% de floración. AF es Alta frecuencia, MF es Media frecuencia y BF es Baja frecuencia..

Tabla 14. Coeficientes, nivel de significación estadística y coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de los polinomios de tercer grado que representan la evolución de de la materia seca total en promedio para el ciclo 2009/10. AF es Alta frecuencia, MF es Media frecuencia y BF es Baja frecuencia.

Tratamiento	$a (x)^3$	$b (x)^2$	$c (x)$	$d$	Nivel de significación	$R^2$
AF N0	-0.0085	2.0037	-103.71	1582	0.01	0.999
AF N140	-0.0088	2.0266	-95.60	1260	0.05	0.995
AF N280	-0.0085	2.0215	-97.45	1336	0.01	0.996
MF N0	-0.0059	1.4089	-63.32	777	0.05	0.987
MF N140	-0.0071	1.6546	-73.33	853	0.01	0.993
MF N 280	-0.0061	1.4526	-58.11	557	0.05	0.982
BF N0	-0.0062	1.4325	-65.79	867	0.01	0.998
BF N140	-0.0038	0.914	-31.06	180	0.05	0.996
BF N280	-0.0048	1.1581	-46.58	489	0.01	0.997

Hasta la floración, la acumulación de biomasa aérea varió entre 29 y 43 % de la MST en los distintos tratamientos, midiéndose las mayores relaciones MST R1/MST R6 en el tratamiento BF y para los niveles inferiores de N que han sufrido una deficiencia hídrica (Tabla 15). Cox *et al.* (1993) también encuentran, una reducción en la acumulación de MST en el tratamiento que no recibió N, debido a una disminución en el área foliar y en la eficiencia fotosintética de la misma. Uhart y Andrade (1995) encuentran, en un ensayo de maíz bajo riego, disminuciones de 59 y 68 %, en la MST, 15 días después de la floración y en R6, respectivamente, como respuesta a una deficiencia

nitrogenada en el cultivo de maíz. Esto muestra que en floración aún falta producir una importante ganancia de MST hasta madurez fisiológica (Andrade *et al.*, 1996), que en condiciones hídricas y nitrogenadas no limitantes se observó en los tratamientos AF y MF con 280 kg ha<sup>-1</sup> de N en los tres ciclos estudiados. El patrón de crecimiento encontrado en el presente trabajo es consistente con los descriptos por distintos autores (Duncan, 1975; Andrade *et al.*, 1996).

Tabla 15. Relación entre la materia seca acumulada en floración y la MST en R6, para los ciclos 2006/07, 2007/08 y 2009/10 para cada dosis de nitrógeno y frecuencia de riego..

<b>Frecuencia de riego</b>	<b>Fertilización nitrogenada</b>	<b>MST R1/MST R6 2006/07</b>	<b>MST R1/MST R6 2007/08</b>	<b>MST R1/MST R6 2009/10</b>
<b>AF</b>	<b>0</b>	<b>0.34</b>	<b>0.38</b>	<b>0.40</b>
	<b>70</b>	<b>0.36</b>		
	<b>140</b>	<b>0.34</b>	<b>0.37</b>	<b>0.42</b>
	<b>210</b>	<b>0.32</b>		
	<b>280</b>	<b>0.29</b>	<b>0.34</b>	<b>0.38</b>
	<b>350</b>	<b>0.30</b>		
<b>MF</b>	<b>0</b>	<b>0.28</b>	<b>0.48</b>	<b>0.40</b>
	<b>70</b>	<b>0.31</b>		
	<b>140</b>	<b>0.34</b>	<b>0.37</b>	<b>0.40</b>
	<b>210</b>	<b>0.32</b>		
	<b>280</b>	<b>0.30</b>	<b>0.34</b>	<b>0.38</b>
	<b>350</b>	<b>0.28</b>		
<b>BF</b>	<b>0</b>	<b>0.37</b>	<b>0.40</b>	<b>0.43</b>
	<b>70</b>	<b>0.29</b>		
	<b>140</b>	<b>0.27</b>	<b>0.39</b>	<b>0.39</b>
	<b>210</b>	<b>0.29</b>		
	<b>280</b>	<b>0.33</b>	<b>0.37</b>	<b>0.37</b>
	<b>350</b>	<b>0.31</b>		

La evolución de la acumulación de N en la biomasa aérea hasta la madurez según las frecuencias de riego y dosis de fertilización del ciclo 2009/2010 se presenta en las Figuras 21 y 22 respectivamente. Para las tres frecuencias de riego, las diferencias en la absorción de N comienzan a manifestarse a partir de la floración (Figura 21). El nitrógeno es acumulado en partes vegetativas hasta los 10-15 días posteriores a la floración para luego ser removilizado hacia los granos en crecimiento en función de la relación fuente/destino (Andrade *et al.*, 1996). El patrón de acumulación de N fue muy similar al ritmo de acumulación de materia seca coincidiendo con lo mencionado por Ciampitti *et al.* (2010) para ensayos de fertilización de maíz de la Red de Nutrición CREA del Sur de Santa Fe. La acumulación de N en la biomasa aérea alcanzó valores medios entre 201 y 304 kg ha<sup>-1</sup>, con diferencias según las frecuencias de riego y las dosis de nitrógeno a partir de floración. El nitrógeno acumulado hasta la floración representó un 65% en AM y MF y un 75% en BF del total en cosecha, mostrando que el déficit hídrico de éste tratamiento condicionó la

absorción del nitrógeno. En cuanto a los niveles de fertilización con N se observaron diferencias en la acumulación de N en la biomasa aérea entre N0 y los niveles superiores de fertilización (N140 y N280) a partir de la floración. El N acumulado en floración varió entre 76% para N0 y 65% para N140 y N280 con respecto al nitrógeno total acumulado en la biomasa en madurez. El tratamiento BF redujo la acumulación de N en R6 en un 20% con respecto a AF y MF, por los que se debe considerar al realizar la fertilización ya que se corre el riesgo de que el nitrógeno excedente se lixivie. Resultados similares fueron descritos por otros autores (Aldrich y Leng, 1974; Andrade, 1995; Maturano, 2002). En general, la cantidad de N absorbida pos floración se encuentra directamente determinada por la demanda de N del grano. En maíz, las diferencias en el nivel de removilización pre-floración y la tasa de absorción de N, contribuyen a diferentes contenidos de N en grano y rendimientos del cultivo (Muchow, 1988).

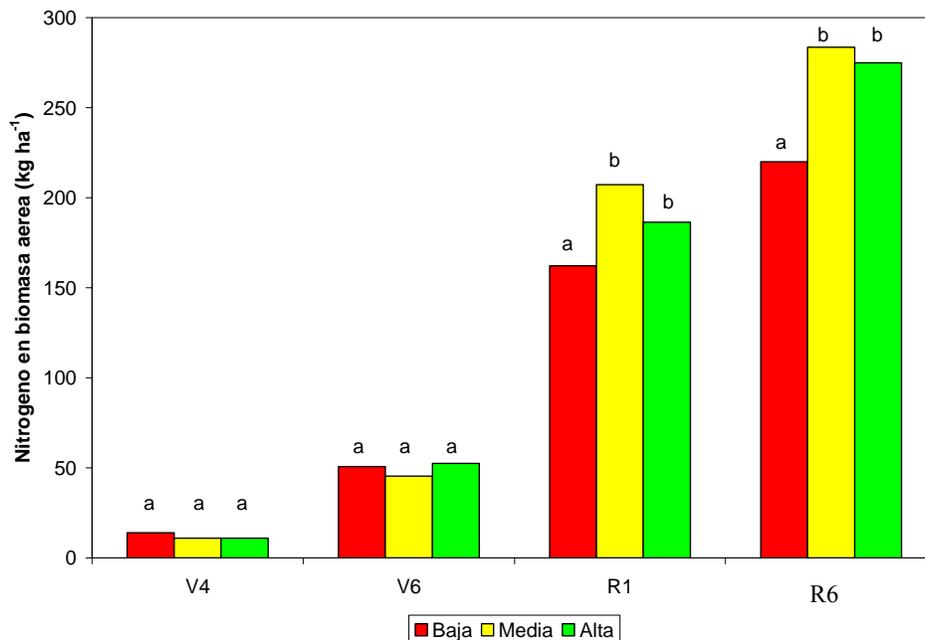


Figura 21. Acumulación de N en biomasa aérea hasta la madurez para las tres frecuencias de riego estudiadas en el ciclo 2009/2010. La flecha hacia abajo indica el 50% de floración. AF es Alta frecuencia, MF es Media frecuencia y BF es Baja frecuencia. Valores promedio para todos tratamientos de fertilización. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos en cada estadio fenológico (Tukey  $\alpha=0,05$ ).

Los resultados hasta aquí presentados, demuestran que para obtener altas producciones de MST de maíz el suelo a través de la mineralización y/o mediante el aporte de fertilizantes deben suministrar alta disponibilidad de N no solo en estadios tempranos de su ciclo, para su asimilación y acumulación en los órganos de reserva y su posterior removilización hacia los destinos reproductivos sino también en posfloración para mantener el ritmo de absorción de N necesario en

esta etapa. La optimización de la aplicación de agua mediante la determinación de la frecuencia de riego mas adecuada y la dosis de N para esa frecuencia permitirían una menor probabilidad de lixiviación de ese elemento hacia los sistemas de drenaje y finalmente al Rio Negro.

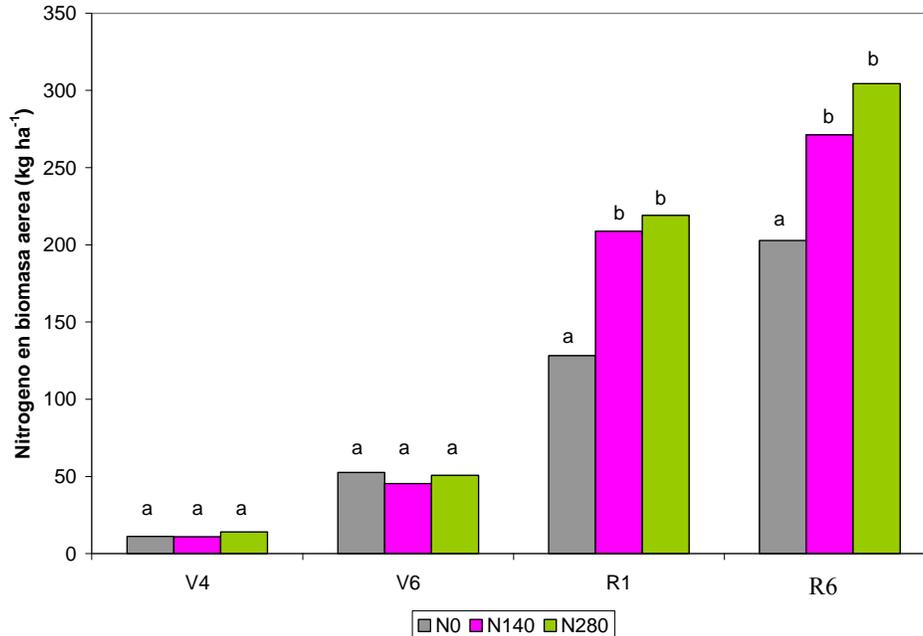


Figura 22. Acumulación de N en biomasa aérea hasta la madurez para las distintas dosis de fertilización del ciclo 2009/2010. La flecha hacia abajo indica el 50% de floración. AF es Alta frecuencia, MF es Media frecuencia y BF es Baja frecuencia. Valores promedio para todos tratamientos de fertilización. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey  $\alpha=0,05$ ).

### Partición de materia seca total de los distintos órganos aéreos.

La importancia de analizar la participación de los distintos órganos aéreos en la materia seca total permite indagar acerca de la estrategia puesta en juego para determinar el número de estructuras reproductivas y el llenado efectivo de los granos a cosecha (Andrade, *et al.*, 1996).

El análisis de la varianza realizado en el ciclo 2006/07 de la MS de los distintos órganos aéreos no se encontró interacción entre las variables agua y nitrógeno (Tabla 16). Analizando el comportamiento de las frecuencias de riego se observaron diferencias en la producción de MS de hojas de tallos y espigas entre los tratamientos de BF respecto a los de AF y MF. Los cultivos conducidos bajo el criterio de riego BF rindieron 12 % menos en hojas, 33% menos en tallos y 17 % menos en espigas en promedio respecto de los tratamientos AF y MF.

Tabla 16. Efectos de las frecuencias de riego, de la fertilización nitrogenada en la acumulación de materia seca total aérea particionada ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), en floración (R1) y en madurez (R6) del ciclo 2006/07. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey  $\alpha=0,05$ ). NS: diferencia no significativa ( $p < 0.05$  ó  $0.01$ )

Factor agronómico		R1		R6			
		Laminas foliares ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Tallo ( tallo + vaina foliar+panoja) ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Lamina Foliar ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Tallo (tallo + vaina foliares, $\text{kg ha}^{-1}$ )	Brácteas ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Espiga (Grano + Marlo) ( $\text{kg ha}^{-1}$ )
Frecuencia de riego	AF	3378 a	7946 a	2748 a	6123 a	1035 a	14243 a
	MF	3008 a	7297 a	2678 a	6838 a	966 a	14299 a
	BF	2529 b	5881 b	2372 b	4334 b	948 a	11911 b
Nivel de significación		0.05	0.01	0.05	0.01	NS	0.01
Fertilización nitrogenada	0	2254 a	5050 a	2153 a	3744 a	712 a	8708 a
	70	2615 ab	6358 ab	2229 ab	4486 ab	788 a	10193 ab
	140	2823 ab	7157 bc	2507 abc	5174 bc	976 a	12884 ab
	210	3302 b	8131 c	2702 bcd	5832 cd	1100 ab	15834 b
	280	3529 b	8090 c	2932 cd	6328 cd	1171 bc	16231 c
	350	3307 b	7461 c	2876 cd	6226 cd	1182 c	16155 c
Nivel de significación		0.05	0.01	0.05	0.05	0.05	0.01
Interacción	Nivel de significación	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Durante el segundo año de ensayos (2007/08), en promedio de todos los tratamientos nitrogenados, BF rindió 21% menos en MS de hoja, 36% menos en MS de tallos, 23% menos en MS de brácteas y 32% menos en espigas que en AF y MF (Tabla 17). En el ciclo 2009/10, no se observaron diferencias en la producción de MS de hojas, tallos y espigas entre los tratamientos AF y MF. En cambio, existieron diferencias entre estas dos frecuencias y el tratamiento BF en la acumulación de MS de tallos y espigas, resultando no significativas para hoja entre AF y BF. El tratamiento de riego BF produjo aproximadamente un 17 % menos de MS de tallo, de hoja y de espiga que el MF, siendo esta última la frecuencia de riego que más rindió (Tabla 18).

Tabla 17. Efectos de las frecuencias de riego, de la fertilización nitrogenada en la acumulación de materia seca total aérea particionada ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), en floración (R1) y en madurez (R6) del ciclo 2007/08. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey  $\alpha=0,05$ ). NS: diferencia no significativa ( $p < 0.05$  ó  $0.01$ )

Factor agronómico		R1		R6			
		Lamina foliar ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Tallo ( tallo + vainas foliares+pan) ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Lamina Foliar ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Tallo (tallo + vainas foliares, $\text{kg ha}^{-1}$ )	Brácteas ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Espiga (Grano + Marlo) ( $\text{kg. ha}^{-1}$ )
Frecuencia de riego	AF	3490 a	5821 a	2687 a	7414 a	1892 a	14010 a
	MF	3258 a	5961 a	2354 ab	7211 a	1808 ab	12948 a
	BF	2562 b	3638 b	1987 b	4575 b	1423 b	9096 b
Nivel de significación		0.01	0.01	0.05	0.01	0.05	0.05
Fertilización nitrogenada	280	3500 a	5667 a	2001 a	5092 a	1417 a	9867 a
	140	2988 ab	4965 ab	2222 b	6502 b	1523 a	11823 b
	0	2821 b	4789 b	2805 b	7606 b	2183 b	14365 c
Nivel de significación		0.05	0.05	0.05	0.01	0.01	0.01
Interacción	Nivel de significación	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Tabla 18. Efectos de las frecuencias de riego, de la fertilización nitrogenada en la acumulación de materia seca total aérea particionada ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), en floración (R1) y en madurez (R6) del ciclo 2009/10. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey  $\alpha=0,05$ ). NS: diferencia no significativa ( $p < 0.05$  ó  $0.01$ )

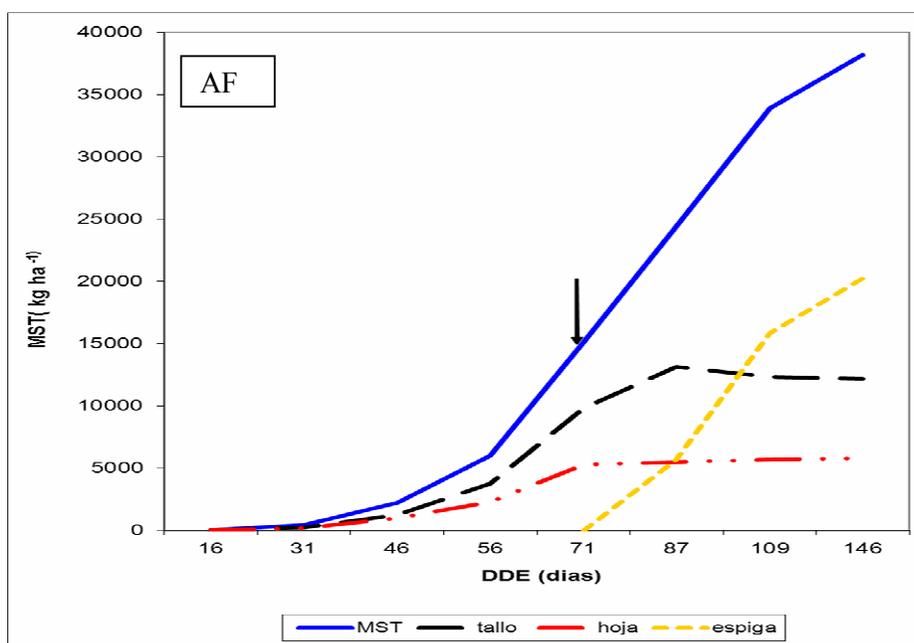
Factor agronómico		R1		R6		
		Laminas foliares ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Tallo ( tallo + vainas foliares+panoja) ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Lamina Foliar ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Tallo (tallo + vainas foliares + panoja) ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Espiga (Grano + Marlo + Brácteas) ( $\text{kg ha}^{-1}$ )
Frecuencia de riego	AF	5290 ab	9835 a	5469 ab	12564 a	20026 a
	MF	5623 a	9792 a	5784 a	12514 a	20730 a
	BF	4607 b	8507 b	4825 b	10278 b	17391 b
Nivel de significación		0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Fertilización nitrogenada	280	5686 a	9739ab	4378 a	10860 a	16669 a
	140	5350 ab	9811 a	5608 b	12154 ab	19975 b
	0	4483 b	8584 b	6091 b	12942 b	21648 c
Nivel de significación		0.01	0.05	0.05	0.05	0.01
Interacción	Nivel de significación	NS	NS	NS	NS	NS

En la Figura 23 se presenta la evolución del peso total y de las distintas fracciones de los órganos aéreos del cultivo de maíz según los tratamientos de riego alta (AF) y baja frecuencia (BF) del ciclo

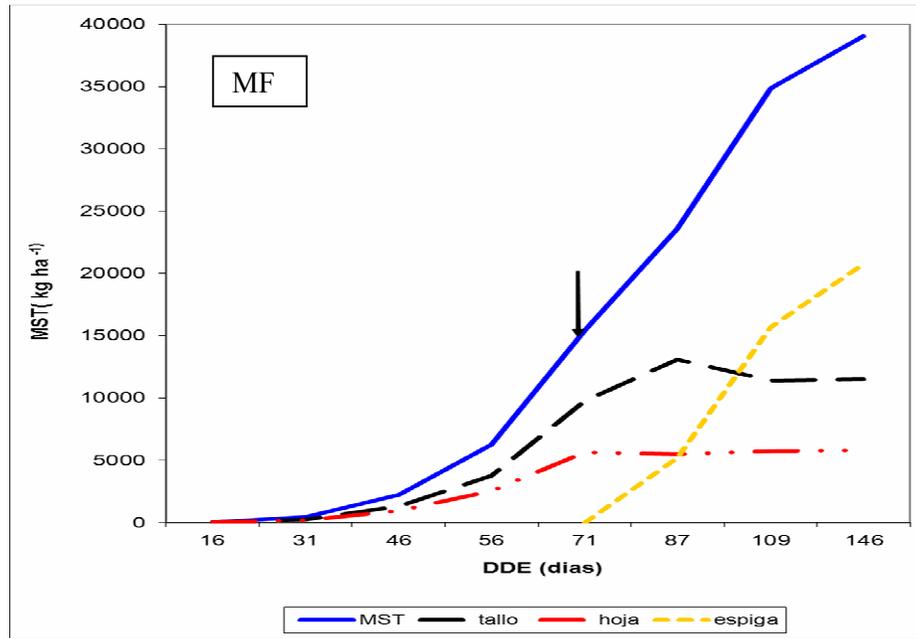
2009/10 y para valores promedio de todos tratamientos con N. El análisis de MST (Tabla 18) mostró una mayor producción tanto para AF como MF llegando en promedio a  $3900 \text{ g m}^{-2}$  con respecto a BF que logra en  $3200 \text{ g m}^{-2}$  ( $p < 0.05$ ).

Durante los primeros estadios (V2 a V6) de crecimiento se observó, para ambos tratamientos de riego, que la producción de MST fue similar y se destinó a generar tejidos foliares y tallos en proporciones similares. A partir de la encañazón, la tasa de acumulación en el tallo se incrementó, aumentando su participación en la MST de las plantas. Hasta la floración se observó la acumulación del 39 % de la MST en BF y el 37 % en AF y MF, a partir de allí la producción de tejidos foliares prácticamente se detuvo. En los tratamientos AF y MF, la acumulación de MS en los tallos fue mayor que BF prolongándose durante unos 15 días desde posfloración, para luego comenzar a disminuir, sugiriendo el inicio de la removilización de carbohidratos solubles a partir del tallo. Farré y colaboradores (2000) mostraron que el decrecimiento del peso de hojas y tallos en estadios vegetativos avanzados se debió a la senescencia y translocación de asimilados a los órganos reproductivos, similarmente a lo observado en este ensayo a partir de R1.

(a)



(b)



(c)

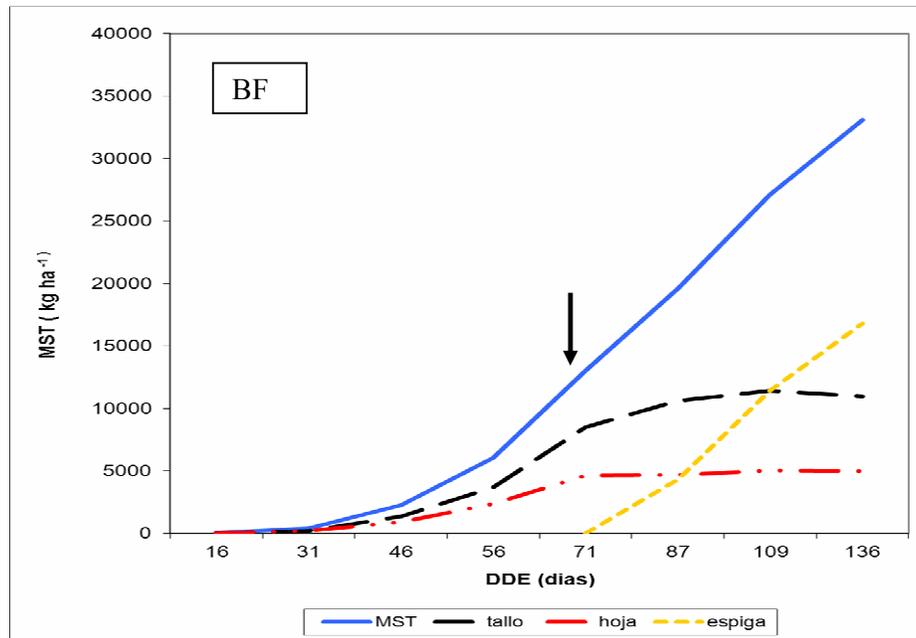


Figura 23. Evolución de la acumulación de biomasa aérea media (MST), y su partición entre órganos de la planta, para los tratamientos de riego (a) AF, (b) MF y (c) BF y para el tratamiento N280 en el Ciclo 2009/10. La flecha hacia abajo indica 50% de floración. AF: alta frecuencia, MF: media frecuencia y BF: baja frecuencia de riego.

La evolución de la relación de MS tallo con respecto a la MST para los valores medios en los tres tratamientos de riego se presenta en la Figura 24. Se observó que hay aumento en la proporción de

tallo en la MST hasta floración (842 °C TTDE), mientras que a partir de allí, disminuye al aumentar la MS de las espigas y en parte a la removilización de carbohidratos a partir del tallo hacia la misma. No se observan diferencias entre las relaciones Estallo/MST para los tres tratamientos hídricos. La repartición de estructuras de reservas en la planta no se realiza según una proporción fija, depende de las necesidades en carbohidratos estructurales del tallo, que es un carácter de fuerte componente genético, poco modificado por la disponibilidad de asimilados (Ruget, 1991).

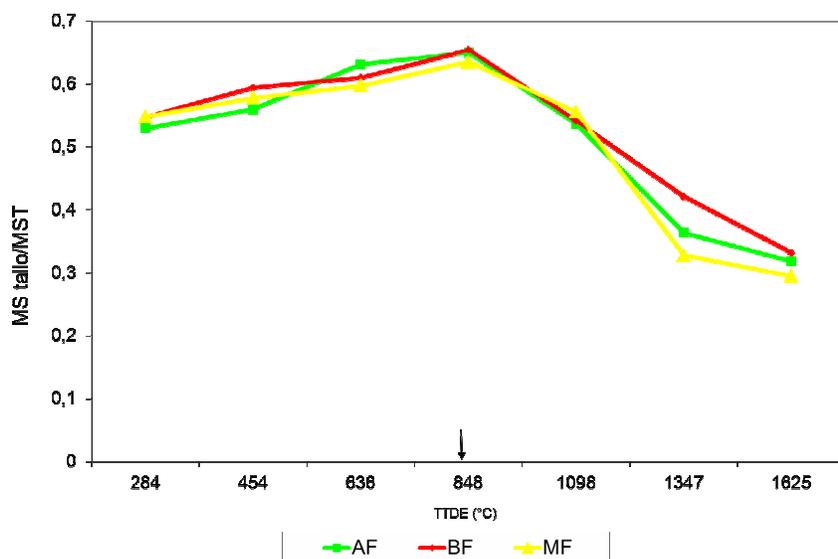


Figura 24. Evolución de la MS de tallos en relación a la MS total (MS tallo/MST) según el tiempo térmico desde emergencia (TTDE). Se grafican los valores medios de cada frecuencia de riego y N280 del ciclo 2009/10. AF: alta frecuencia, MF: media frecuencia y BF: baja frecuencia. La flecha hacia abajo indica 50% de floración.

En la Figura 25 se presenta la evolución de la relación MS hoja MST<sup>-1</sup> para valores medios, en la cual se observó un decrecimiento constante a lo largo del ciclo del cultivo de maíz desde V4 (284 °C TTDE), donde es máxima, hasta floración (842 °C TTDE). Luego declina más abruptamente por el incremento en la MS de las espigas hasta madurez fisiológica. La relación MS hoja/MST se comportó muy estable ante cambios en las frecuencias de riego y nitrógeno impuestos, ya que no se observan diferencias en su evolución ni en la magnitud de los valores medidos dentro de cada nivel hídrico ni nitrogenado. En los cereales, existe un corto período luego de la germinación, cuando las raíces constituyen el destino más importante para las reservas de la semilla. Luego de este momento, esa dominancia se pierde cuando la parte aérea es expuesta a la radiación solar, y las hojas se transforman en la principal fuente de carbono mediante la fotosíntesis (Wardlac, 1990).

Una vez que comienza el crecimiento exponencial del tallo, la relación MShoja/MST disminuye progresivamente.

Al observar la evolución de la relación MS espiga/MST (Figura 26), vemos que los tratamientos AF y MF presentan un comportamiento similar, diferenciándose del tratamiento BF a partir de los 300°C día después de floración (TTDF). El menor valor medio observado en BF indicaría que la menor frecuencia de riego, asociada a la menor disponibilidad/oferta de agua, redujo en parte el peso de los destinos (granos) como demandantes de fotoasimilados y en consecuencia de la MS de espiga. En la floración, la cantidad de MS particionada a espiga crece en forma exponencial, mostrando una tendencia totalmente diferente a la que siguen el tallo y las hojas fotosintetizadoras, lo que deja en evidencia que, a partir de este momento, la espiga es el órgano dominante, compitiendo por asimilados con hojas, panícula y tallo (Otegui *et al.*, 1995). Es importante remarcar que las frecuencias de riego modificaron el peso absoluto de las espigas y su participación en la materia seca total.

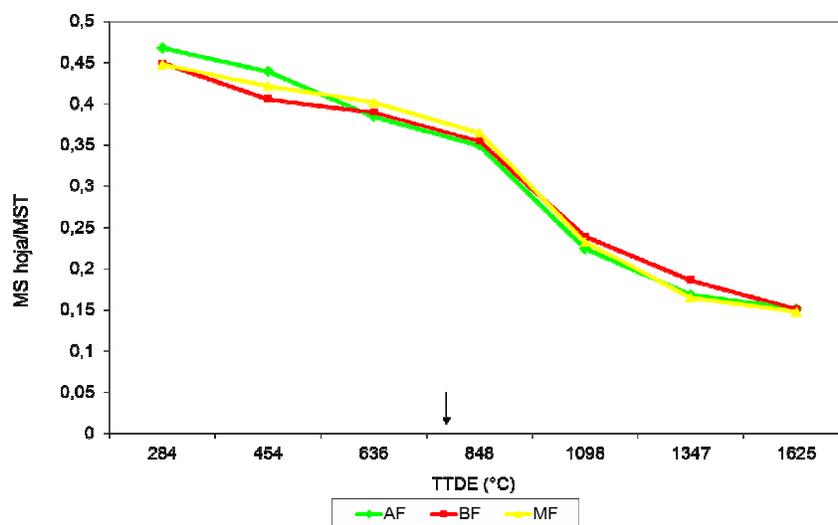


Figura 25. Evolución de la MS de hojas en relación a la MS total (MS hoja/MST) en función del tiempo térmico desde emergencia (TTDE). Se grafican los valores medios de cada frecuencia de riego y N280 del ciclo 2009/10. AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia. La flecha hacia abajo indica 50% de floración.

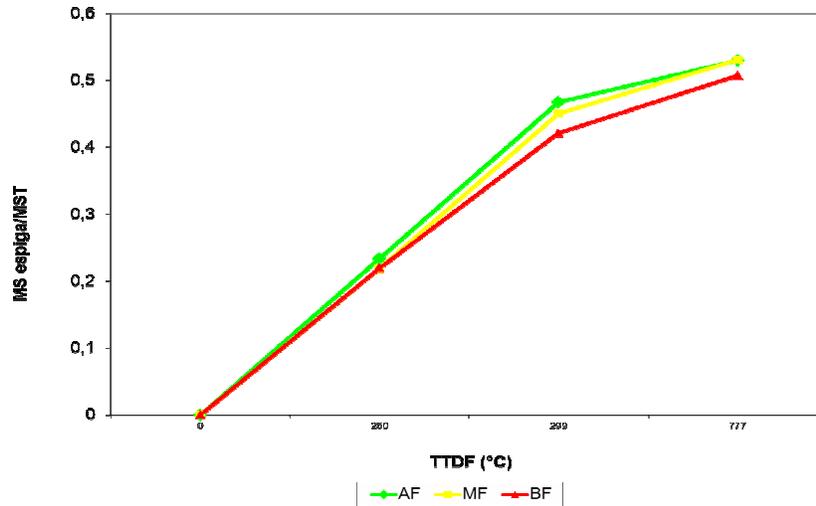


Figura 26. Evolución de la MS de espiga en relación a la MS total (MS espiga/MST) en función del tiempo térmico desde floración (TTDF). Se grafican los valores medios de cada frecuencia de riego y N280 del ciclo 2009/10. AF: alta frecuencia, MF: media frecuencia y BF: baja frecuencia.

La flecha hacia abajo indica 50% de floración.

## Rendimiento en grano y componentes

El rendimiento del cultivo de maíz puede ser separado en dos componentes principales: el número de granos  $m^{-2}$  (NG), y el peso individual de los granos (PG). En la tabla 19 se muestra el comportamiento de ambos parámetros en los ciclos 2006/07, 2007/08 y 2009/10 según las frecuencias de riego. Las diferencias en NG, PG y rendimiento fueron altamente significativas cuando se analizaron las frecuencias de riego. La disminución del rendimiento en el ciclo 2006/07, como consecuencia de la menor disponibilidad hídrica en el tratamiento BF, fue del 20% con respecto a MF y AF (Figura 27). El PG resultó más afectado que el NG en el tratamiento BF, ya que se encontraron disminuciones cercanas al 8 y el 11%. Condiciones hídricas desfavorables durante las primeras etapas del llenado pueden provocar la reducción del número final de células espermáticas, disminuyendo el peso del grano (Jones *et al.*, 1985).

En el ciclo 2007/08 el comportamiento hallado fue similar al ciclo anterior, en donde se encontraron diferencias estadísticas para NG y PG. Dentro del tratamiento de riego, se diferenciaron AF y MF del tratamiento BF en los rendimientos en grano y en el NG. Los menores rendimientos en el tratamiento BF fueron 34% y de 29% inferiores a los tratamientos AF y MF (Figura 27). La disminución en el NG en el tratamiento BF fue del 23% con respecto a los tratamientos con mayor frecuencia de riego (AF y MF). El PG mostró diferencias en las tres frecuencias de riego, siendo un 14% menor en BF con respecto al tratamiento sin limitantes hídricas AF.

Tabla 19. Número de granos  $m^{-2}$ (NG), peso individual de los granos (PG) y rendimiento en los tres ciclos de cultivo para Alta Frecuencia (AF) Media Frecuencia (MF) y Baja Frecuencia (BF) de riego y tratamientos de fertilización con nitrógeno. Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey  $\alpha=0,05$ ). NS: diferencia no significativa ( $p < 0.05$  ó  $0.01$ )

Factor	Nivel	2006/07			2007/08			2009/10		
		NG $m^{-2}$	PG (mg)	Rendimiento ( $kg\ ha^{-1}$ )	NG $m^{-2}$	PG (mg)	Rendimiento ( $kg\ ha^{-1}$ )	NG $m^{-2}$	PG (mg)	Rendimiento ( $kg\ ha^{-1}$ )
Frecuencia de riego	AF	4055 a	315.83 a	12854 a	4042 a	344.1 a	13942 a	5191 a	332,9 a	17487 a
	MF	3700 ab	327.78 a	12185 a	4124 a	315.4 b	13101 a	5520 a	337,2 a	18388 a
	BF	3588 b	291,15 b	10896 b	3101 b	296,2 c	9202 b	4377 b	289,98 b	12717 b
Significación		0.05	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01
Fertilización nitrogenada	N0	2896 a	263.79 a	7611 a	3245 a	298.63 a	9746 a	4772 a	308a	14844 a
	N70	3418 ab	289.53 ab	9847 b						
	N140	3739 bc	324.18 bc	12087 c	3711 b	323.86 b	12073 b	5027ab	324 a	16471b
	N210	4139 c	335.97 c	13826 d						
	N280	4169 c	336.72 c	13983 d	4311 c	333.13 b	14425 c	5288 b	326 a	17279 b
	N350	4325 c	336.24 c	14517 d						
Nivel de significación		0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	NS	0.01
Interacción		NS	NS	0.05	NS	NS	NS	NS	NS	NS

En el ciclo 2009/10, al analizar las frecuencias de riego las diferencias halladas para rendimiento fue en promedio un 30% inferior en BF que en AF y MF. La reducción en el NG observada en el tratamiento de baja frecuencia de riego fue de 20% y 16% con respecto a los de alta y media frecuencia.

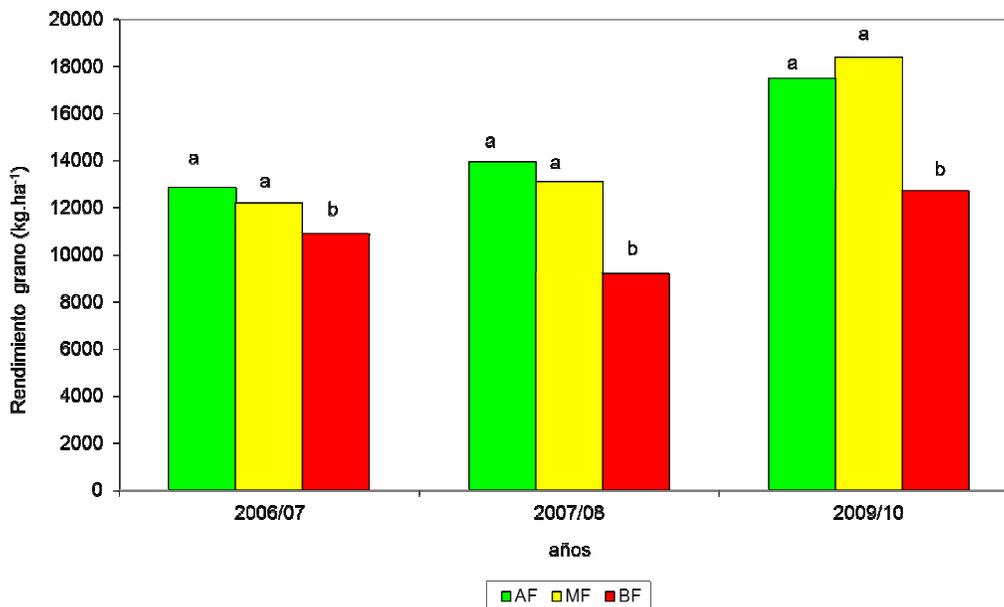


Figura 27. Efecto de las frecuencias de riego en el rendimiento en grano en los ciclos 2006/07, 2007/08 y 2009/10 para cada frecuencia de riego (AF, MF y BF). Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey  $\alpha=0,05$ ) AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia.

En la figura 28 se presenta la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) en periodos alrededor de floración en función de las frecuencias de riego para el ciclo 2009/2010. Se observó una disminución del 23 % en la TCC en el tratamiento BF en los periodos comprendidos entre 15 días antes de floración y 15 días posteriores al mismo. Otegui (1992) describió disminuciones del 15% en la tasa de crecimiento del cultivo por la ocurrencia de deficiencias hídricas, provocadas mediante la aplicación de coberturas plásticas, durante 40 días alrededor de la floración en cultivos de maíz en Balcarce, Buenos Aires. La proporción de granos fijados (viables) en relación al número de óvulos depende de la tasa de crecimiento de la planta alrededor de floración (Andrade *et al.*, 1999). Esto explicaría la disminución en el NG en el tratamiento BF.

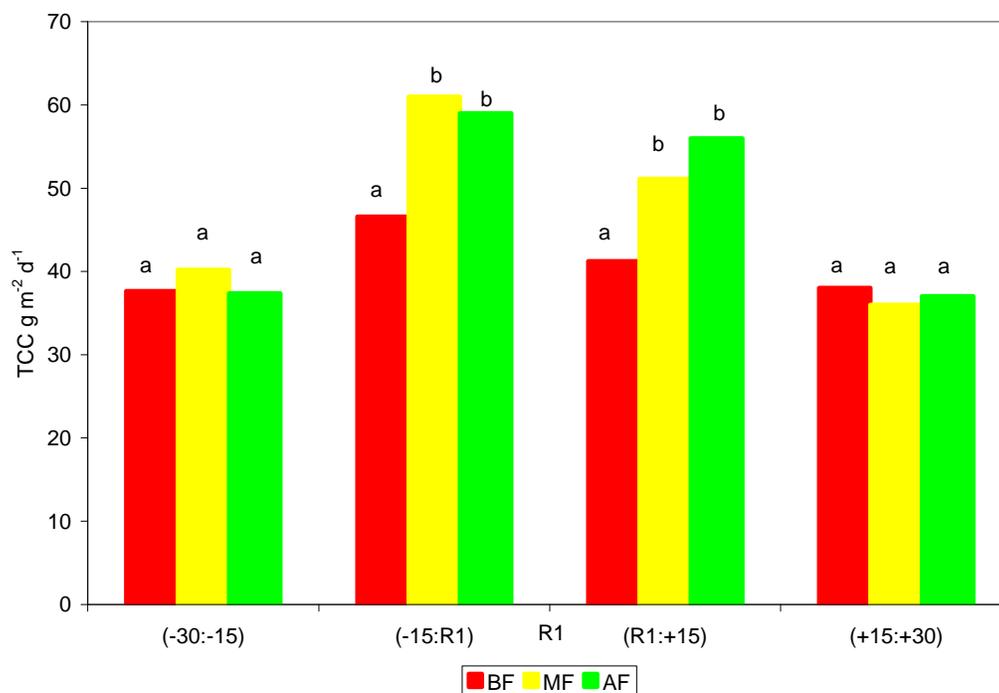
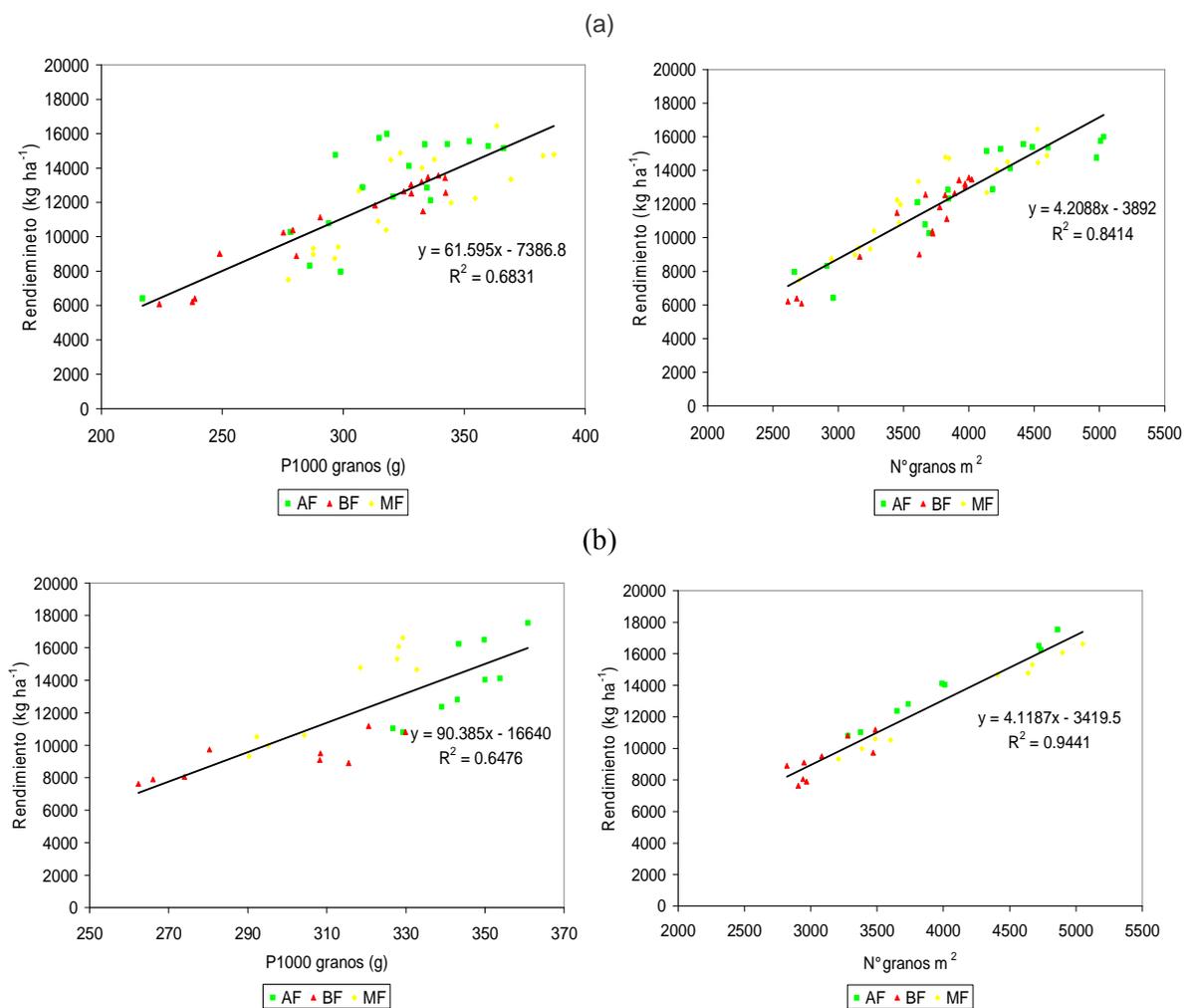


Figura 28. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC) en periodos alrededor de floración (R1) en función de las frecuencias de riego para el ciclo 2009/2010. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey  $\alpha=0,05$ ) AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia de riego.

En la figura 29 se presenta la relación entre el rendimiento y los componentes del NG y PG según las frecuencias de riego para los tres ciclos estudiados. La asociación entre estos componentes y el rendimiento fue siempre positiva. El número de granos por metro cuadrado fue la variable que mejor explicó la variación de los rendimientos en los tres años. El comportamiento observado coincide con los descriptos por varios autores (Muchow *et al.*, 1990; Andrade, 1995; Salvaghiotti *et al.*, 2002) donde el rendimiento es función del número de granos fijados por unidad de superficie y, en menor medida, del peso individual de los granos.



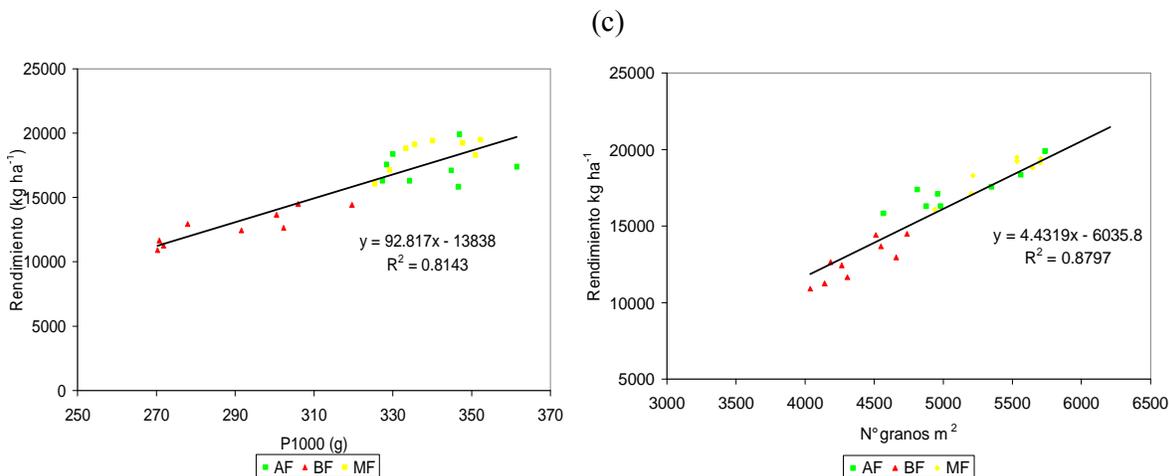


Figura 29. Relación entre el rendimiento y los componentes del NG y PG según las frecuencias de riego para el ciclo 2006/07 (a), 2007/08 (b) y 2009/10 (c). AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia de riego. P1000 es el peso de 1000 granos..

Durante las dos semanas posteriores a la floración se acumula poco peso en el grano, pero se determina el peso potencial del mismo. Un estrés hídrico en este período afectará tanto el número de granos como el peso potencial de los granos viables (Borrás *et al.*, 2004). El efecto del estrés hídrico en el peso unitario de grano es considerable cuando este ocurre al final del período de llenado de granos (Claassen y Shaw, 1970). Si bien el PG es considerado dentro de los componentes numéricos del rendimiento como el más estable (Carcova *et al.*, 2003; Melchiori *et al.*, 2006), la baja disponibilidad hídrica asociada al tratamiento BF, redujo tanto el PG como el NG con respecto de AF y MF en los tres ciclos de ensayo. Los resultados obtenidos en cuanto al PG y al NG, concuerdan con la experiencia de Pandey *et al.* (2000) quienes también encontraron disminución en el PG al provocarse déficits hídricos en el cultivo, durante el crecimiento reproductivo y en algunas fases del crecimiento vegetativo. El PG disminuye en condiciones de estrés hídrico por la reducción de la tasa fotosintética, disminuyendo la asimilación total y la provisión de fotoasimilados durante la etapa de llenado efectivo del grano (Andrade *et al.*, 1996). Las diferencias encontradas en los valores de PG ante cambios en la disponibilidad hídrica por las frecuencias de riego evaluadas indicarían que la tasa de llenado fue distinta cuando el agua fue factor el limitante. Durante la etapa efectiva de llenado los granos demandan asimilados a tasa constante. El peso de los granos está determinado por un componente potencial (alta influencia genética) y otro ambiental (condiciones de llenado). Los cambios en el peso de grano por efectos ambientales son modulados por la relación entre la demanda diaria de las espigas para llenar dichos granos y la oferta de carbohidratos que sostengan dicha demanda (Borrás *et al.*, 2004). Debido al mayor potencial de rendimiento (más demanda), los híbridos modernos de maíz son más dependientes de buenas condiciones durante el

llenado de granos para no ver afectado el peso de los mismos (Echarte *et al.*, 2006). La intensidad y el momento del estrés durante el llenado condicionan la magnitud de la merma en el rendimiento (Borrás *et al.*, 2004).

### **Efecto del nitrógeno sobre el rendimiento y sus componentes .**

En el ciclo 2006/07, cuando se evaluaron dosis crecientes de nitrógeno, se observaron diferencias en el rendimiento en grano entre el testigo (N0) hasta la dosis de 210 kg ha<sup>-1</sup> de N, aunque el máximo rendimiento se ubicó en N350 (Figura 30). El tratamiento testigo (N0) mostró rendimientos entre 22 y 42 % menores que los tratamientos fertilizados entre N70 y N350. También se observó que el NG se incrementó con dosis crecientes de N entre el 15 y el 33%. El PG mostró un comportamiento similar en los tres ciclos, observándose incrementos para los tratamientos fertilizados entre 9 al 21% con respecto al testigo (Tabla 19). Jones y *et al.* (1985) encuentran que la deficiencia de nitrógeno afecta la provisión de asimilados durante la etapa de llenado efectivo de grano y el tamaño potencial del grano.

En el ciclo 2007/08 el comportamiento en rendimiento fue similar al ciclo 2006/07, donde las diferencias fueron altamente significativas para rendimiento en grano y NG, siendo significativas para PG. Las diferencias estadísticas entre niveles de fertilización nitrogenada separan a los tres tratamientos entre sí. El incremento en rendimiento fue de 32% en el tratamiento N280 y de 20% en el tratamiento N140 con respecto al tratamiento testigo (Figura 31). El PG fue afectado significativamente por el nitrógeno, encontrándose diferencias entre N0 y los dos niveles superiores. La disminución en el peso en el tratamiento N0 fue del 10,5% y del 7,5% frente N280 y N140 respectivamente (Tabla 18). Uhart y Andrade (1995) también encontraron que deficiencias de N en maíz sembrado en Balcarce, Buenos Aires sin limitaciones hídricas, redujeron el peso de los granos, en este caso, entre 9 y 25% y el rendimiento en grano entre 14 y 80% respecto de tratamientos sin estrés. El déficit de N puede disminuir el peso de los granos afectando la fuente de asimilados (menor superficie y duración del área foliar y menor tasa fotosintética), durante el llenado y posiblemente el número de células endospermáticas y gránulos de almidón en postfloración temprana (Uhart, 1995). El NG también fue modificado según la oferta de nitrógeno, aumentando su número a medida que se incrementó la dosis de N. El tratamiento N0 tuvo un 25% menos de granos que N280 y un 12,5% menos que N140. Las deficiencias de N reducen el rendimiento en grano afectando tanto el NG como el peso de los granos (Uhart y Andrade, 1995)

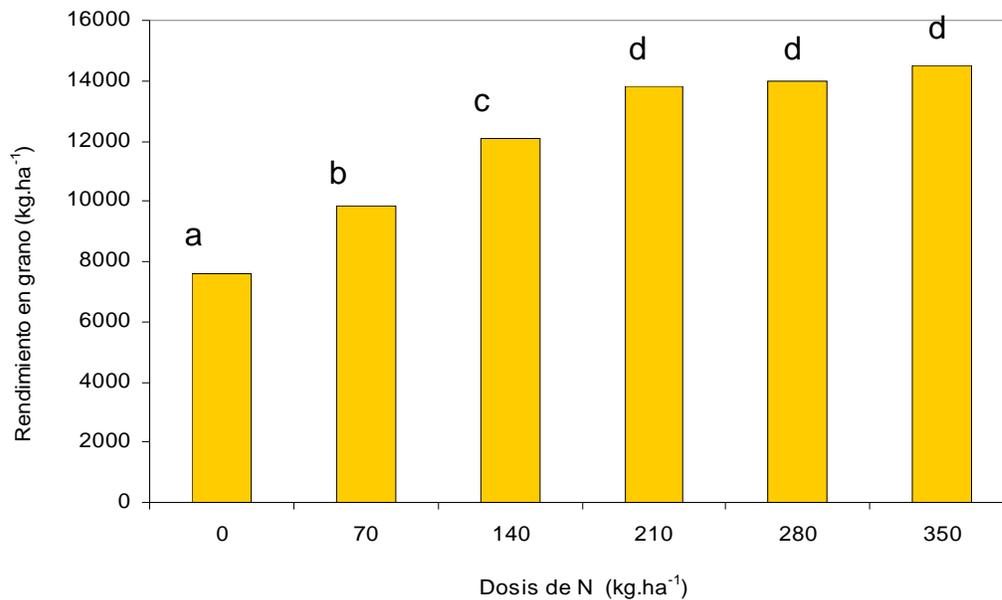


Figura 30. Rendimiento en grano de maíz según dosis creciente de nitrógeno. Valores medios para tres frecuencias de riego del ciclo 2006/07. Las letras minúsculas distintas sobre las columnas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey  $\alpha=0,05$ ).

Para el ciclo 2009/10, al analizar las dosis de nitrógeno, las diferencias fueron altamente significativas en los rendimientos de grano, significativas para los NG, sin efectos sobre el PG ( $p=0.0771$ ). La disminución en el NG fue del 10% y del 5% para N280 y N140 con respecto al testigo N0 (Tabla 19). Las diferencias según nivel nitrogenado permitieron separar el tratamiento N0 de los dos niveles superiores de fertilización (N140 y N280), pero N280 fue el tratamiento con mayor rendimiento. La disminución en el rendimiento hallada en N0 debido al estrés nitrogenado fue del 15% respecto de N280 y del 10% con respecto a N140. Igualmente debemos recordar que el nivel de nitrógeno disponible en el suelo a la siembra era elevado ( $192 \text{ Kg N ha}^{-1}$ ) lo que explica no haber encontrado diferencias significativas por encima de N140.

En síntesis, las deficiencias de N redujeron NG, el PG (en dos de los tres ciclos) y el rendimiento en grano. La dinámica de la mineralización del N no es suficiente para producir rendimientos máximos potenciales en el maíz. La translocación de fotoasimilados a la espiga durante el período crítico está altamente relacionada con la definición del NG. Una deficiencia de nitrógeno afecta esta translocación ya que disminuye los valores de IAF y, en consecuencia, la intercepción de la radiación y la eficiencia en el uso de la misma (Novoa y Loomis, 1981; Sinclair y Horie, 1989). Asimismo, el componente PG resulta de la competencia entre el número de granos y la oferta de fotoasimilados (Plénet, 1995).

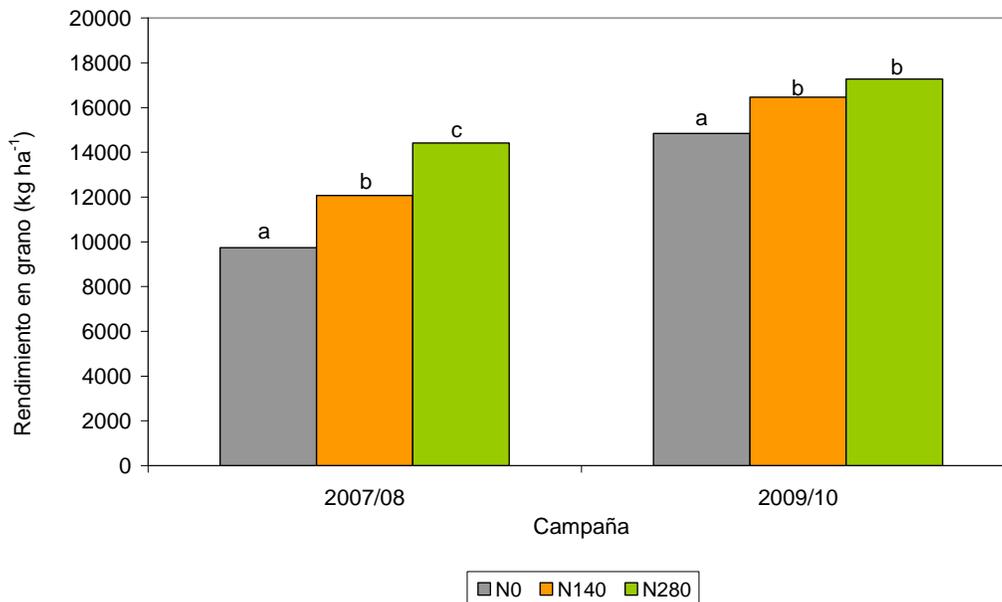


Figura 31: Rendimiento de grano de maíz según tratamientos de fertilización con nitrógeno en los ciclos 2007/08 y 2009/10. Valores medios para las tres frecuencias de riego. Las letras minúsculas distintas sobre cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos y campañas (Tukey  $\alpha=0,05$ ).

### Eficiencia de uso del agua de riego

En la Figura 32, se exponen los resultados de la eficiencia de uso del agua de riego (EUAr) según las frecuencias de riego, en los tres ciclos agrícolas estudiados.

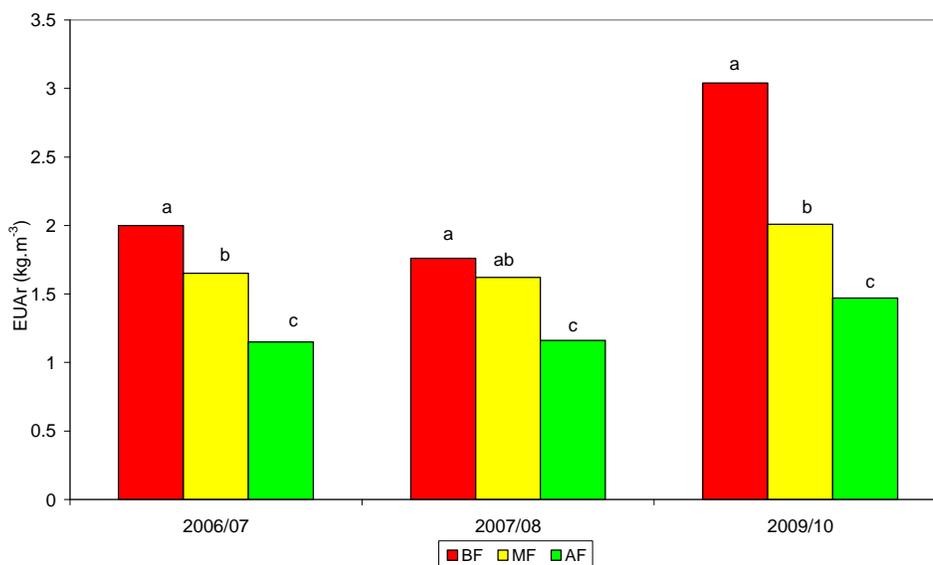


Figura 32. Eficiencia de uso del agua de riego (EUAr) para rendimiento en grano de maíz en los tres ciclos de cultivo para Alta Frecuencia (AF) Media Frecuencia (MF) y Baja Frecuencia (BF) de riego para los tres ciclos de estudio. Letras minúsculas distintas sobre cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey  $\alpha=0,05$ ). Promedio de tratamientos de fertilización con N.

La EUAr de riego varió entre 1,15 y 3,04 kg m<sup>-3</sup> según el tratamiento y ciclo de producción (Tabla 20). Otros autores han encontrado valores del orden de 0,5 kg m<sup>-3</sup> (Pandey, 2000) y 2,7 kg m<sup>-3</sup> (Kang, 2000). Valores similares a los de este ensayo fueron mencionados tanto por Vallone *et al.* (2003) como por Rivetti (2006) para la zona de Marcos Juárez (Córdoba, Argentina). Los valores observados para el año 2009/10 son superiores a los obtenidos en los años anteriores, en el cual se utilizó un híbrido (DK 747 MGRR) con mayor potencial de rendimiento en grano (De Santa Eduvigis, com. pers.) y mejor adaptado a las condiciones de los valles de la norpatagonia ya que se posicionó entre los híbridos con mayor rendimiento en los ensayos comparativos de rendimiento de la EEA Valle Inferior (Margiotta *et al.*, 2009).

Tabla 20. Eficiencia de uso del agua de riego según los niveles de fertilización nitrogenada y las frecuencias de riego para los tres ciclos analizados. Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey  $\alpha=0,05$ ). DMS es la diferencia mínima significativa..

Factor	Nivel	Eficiencia de uso del agua de riego (kg m <sup>-3</sup> )					
		2006/07		2007/08		2009/10	
Nitrógeno	0	0.96	a	1.26	a	1.90	a
	70	1.37	b				
	140	1.62	c	1.55	b	2.17	ab
	210	1.86	cd				
	280	1.89	d	1.84	c	2.35	b
	350	1.93	d				
	N	54		27		27	
	DMS		0.23159		0.16745		0.18545
Error		0.0347		0.02		0.0245	
Frecuencia de riego	BF	2	a	1.76	a	3.04	a
	MF	1.65	b	1.62	ab	2.01	b
	AF	1.15	c	1.16	b	1.47	c
	N	54		27		27	
	DMS		0.31822		0.33686		0.25131
	Error		0.156		0.0819		0.0456
Interacción N*Riego				NS			

Se observaron diferencias en la EUAr entre los tratamientos de BF y de AF en los tres años de estudio. La EUAr en MF se diferenció de BF solamente en dos de los tres años estudiados, mostrando valores intermedios de eficiencia entre AF y BF. Debido a los diferentes niveles hídricos asociados a las frecuencias de riego estudiadas, la tendencia encontrada fue a un incremento de la EUAr a medida que disminuyó la disponibilidad hídrica. Si bien los tratamientos de BF de riego fueron los que mayores eficiencias presentaron, a su vez fueron los que menos grano produjeron en los tres ciclos analizados. La reducción en la cantidad de agua aplicada en el tratamiento MF determinó un 29% de incremento en la EUAr respecto a AF para el promedio de todos los

tratamientos con N. La elección de cultivares es una estrategia para mejorar la eficiencia de uso del agua, debido a que existe variabilidad intraespecífica (Dardanelli, 2003).

Las diferencias en la EUA según los tratamientos de fertilización se observaron entre N0, N140 y N280 en los dos primeros ciclos los cuales presentaban niveles iniciales de nitrógeno edáfico intermedios. En el 2009/10 las diferencias se observaron entre N140 y N280 respecto de N0, coincidiendo con los altos contenidos de nitrógeno edáfico inicial. El resultado del análisis de varianza (Tabla 20) mostró diferencias estadísticamente significativas para el factor nitrógeno. La aplicación de nitrógeno incrementó la EUA para granos en todos los niveles hídricos analizados. Dentro de cada nivel hídrico, las eficiencias fueron crecientes con las dosis de N, midiéndose las mayores eficiencias para las dosis más altas de nitrógeno (N280 y N350). Se encontró una relación positiva entre el contenido de nitrógeno edáfico y la EUA (Figura 33). La fertilización nitrogenada modifica la EUA en maíz (Dardanelli, 2003). En este trabajo se observaron mejoras en la EUA de riego en la producción de granos por la aplicación de 140 y 280 kg de N del 40 y 50% en 2006/07, del 20 y 32% en 2007/08 y del 12 y 20 % en 2009/10 respectivamente (Figura 34). Esta respuesta decreciente entre ciclos puede atribuirse a la disponibilidad inicial de nitrógeno edáfico creciente entre el primer, segundo y tercer ciclo de cultivo (Tabla 7).

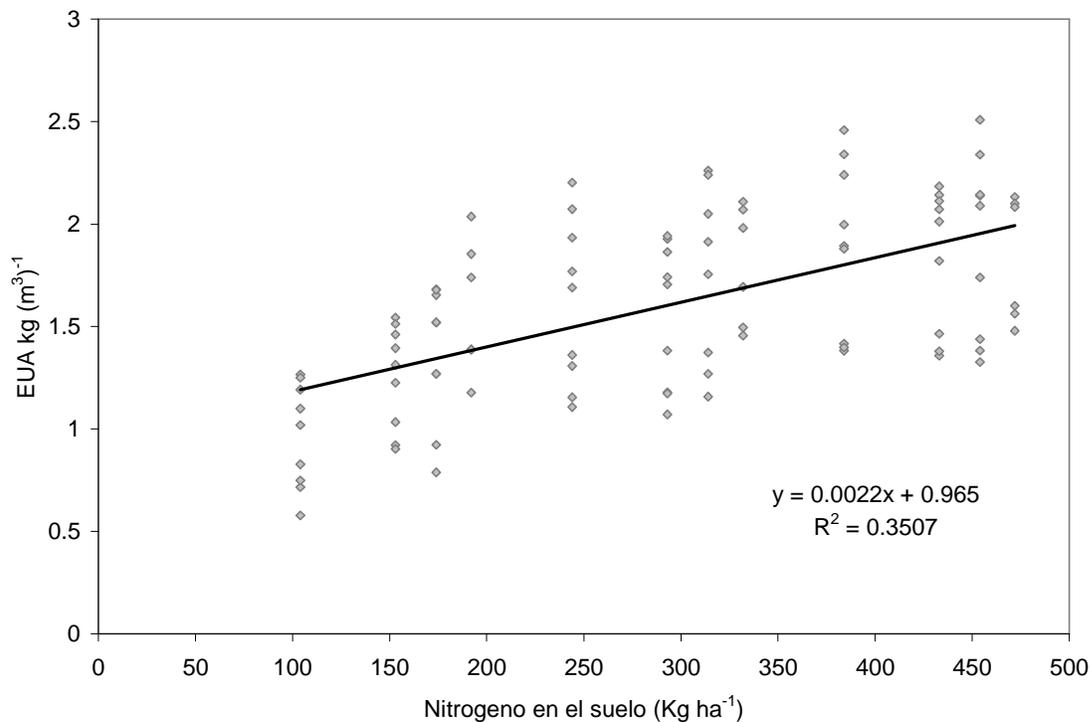


Figura 33. Relación entre la eficiencia de uso de agua (EUA) y los niveles de nitrógeno en el suelo estimado (N inorgánico inicial + N fertilizante). Los datos corresponden a los ciclos 2006/07, 2007/08 y 2009/10.

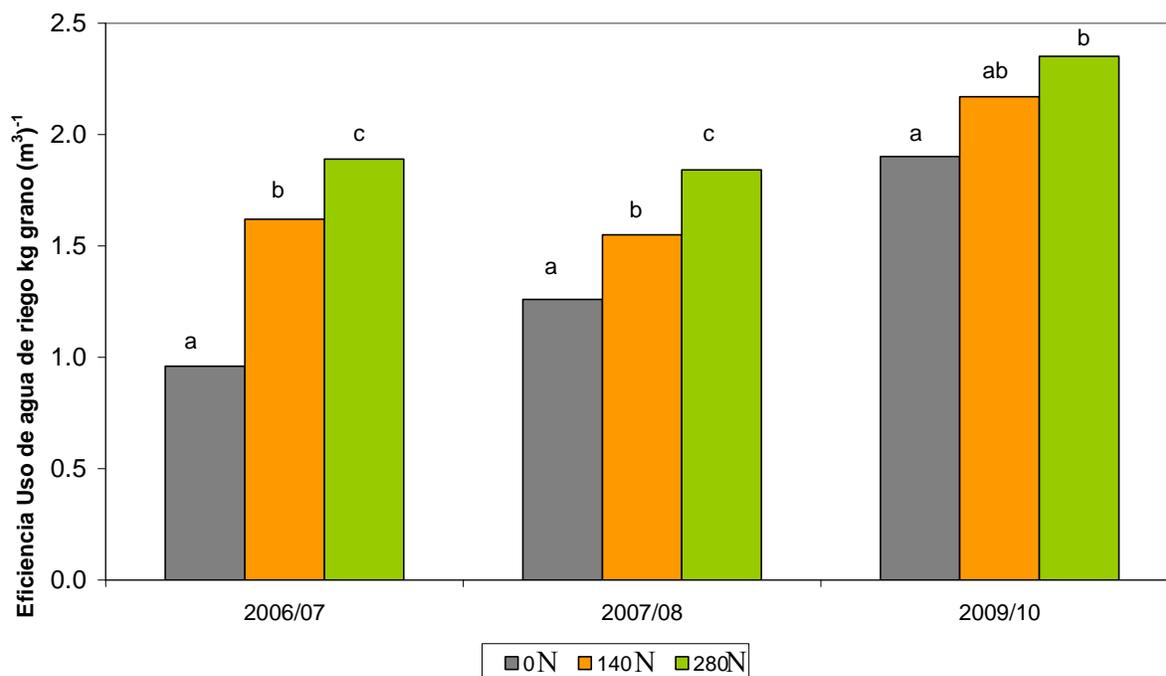


Figura 34. Eficiencia del uso del agua de riego para la producción de grano en función de tres dosis de nitrógeno, aplicadas como fertilizante, para los ciclos 2006/07, 2007/08 y 2009/10. Letras minúsculas distintas sobre las columnas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey  $\alpha=0,05$ ).

Darwich (1989) describió que el cultivo de maíz fertilizado generaba 1,75 kg de grano por  $m^3$  de agua disponible mientras que uno sin fertilizar lograba 1.21  $kg\ m^{-3}$ , datos similares a los observados en esta tesis. Pandey *et al.* (2000), en un trabajo con riego deficitario en maíz cultivado en un ambiente semiárido, mostraron que el incremento en la fertilización nitrogenada produce aumentos en la EUA para granos en todos los niveles hídricos, aunque la absorción de N decrece con déficit hídricos severos. El efecto del N en el incremento de la EUA, se debió a la mayor absorción de N la cual incrementó tanto de la producción de MST como de la producción de granos. Este comportamiento sugiere que para este ambiente, es importante ajustar los niveles de riego según los niveles de fertilización nitrogenada, con el objetivo de lograr altos rendimientos, con altos niveles de eficiencia del uso del agua de riego en el valle inferior del río Negro.

### Eficiencia de uso del nitrógeno (EUN)

La necesidad de fertilización puede ser establecida analizando el balance entre la oferta y la demanda del nutriente en el sistema suelo planta. En la Tablas 21, 22 y 23 se observa el efecto de las distintas dosis de nitrógeno aplicadas frente a los contenidos de N en planta en R1 y R6 y N en granos, según las tres frecuencias de riego estudiadas en los ciclos 2006/07, 2007/08 y 2009/10. Se observó que con el incremento en la dosis de fertilizante también se incrementó el contenido de nitrógeno en planta en R1 y R6 y en el grano en los tres ciclos evaluados. En cuanto a las frecuencias de riego encontró que el tratamiento BF disminuyó la acumulación de nitrógeno en la biomasa área y en el grano en los tres años (Tabla 24).

Tabla 21. Nitrógeno total en biomasa aérea en R1 (N-planta-R1), en R6 (N-pl- R6) y nitrógeno en granos (Ng) de maíz según diferentes dosis de N y tres frecuencias de riego del ciclo 2006/07. AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia de riego. Las letras minúsculas distintas en sentido vertical para cada frecuencia e riego indican diferencias significativas entre tratamientos de fertilización (Tukey  $\alpha=0,05$ ).

Frecuencia de riego	N Fertilizante	N planta R1	N Planta R6	Ng
	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>
AF	0	36,5 a	107,5 a	89,4 a
	70	78,0 ab	157,2 b	130,5 b
	140	92,2 bc	203,7 c	158,6 bc
	210	136,7 cd	233,5 cd	183,2 c
	280	147,1 d	240,8 cd	182,1 c
	350	160,2 d	267,4 d	200,0 c
BF	0	27,6 a	79,1 a	61,1 a
	70	43,7 b	112,4 a	95,7 b
	140	56,2 bc	194,2 b	168,9 bc
	210	64,9 c	227,2 bc	190,4 c
	280	116,7 d	236,6 c	192,4 c
	350	109,1 d	229,8 c	185,1 c
MF	0	32,31 a	101,00 a	88,28 a
	70	54,12 b	112,21 a	88,56 a
	140	85,34 bc	152,13 b	115,89 bc
	210	124,92 c	227,28 c	179,84 c
	280	145,29 d	237,06 c	183,96 c
	350	139,78 d	247,52 c	186,09 c

Tabla 22. Nitrógeno total en biomasa aérea en R1 (N-planta-R1), en R6 (N-pl- R6) y nitrógeno en granos (Ng) de maíz según diferentes dosis de N y tres frecuencias de riego del ciclo 2007/08. AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia de riego. Las letras minúsculas distintas en sentido vertical para cada frecuencia e riego indican diferencias significativas entre tratamientos de fertilización (Tukey  $\alpha=0,05$ ).

Frecuencias de Riego	N Fertilizante kg ha <sup>-1</sup>	N planta R1 kg ha <sup>-1</sup>		N Planta R6 kg ha <sup>-1</sup>		Ng kg ha <sup>-1</sup>	
AF	0	39,1	a	134,6	a	90,9	a
	140	97,8	b	198,8	b	137,3	b
	280	149	c	266,2	c	178,0	c
MF	0	35,7	a	112,6	a	75,8	a
	140	85,4	b	201,5	b	137,1	b
	280	140,1	c	252,5	c	168,7	c
BF	0	29,8	a	110,1	a	71,6	a
	140	78,1	b	140,3	b	94,1	a
	280	98,7	b	195,6	c	124,4	b

Tabla 23. Nitrógeno total en biomasa aérea en R1 (N-planta-R1), en R6 (N-pl- R6) y nitrógeno en granos (Ng) de maíz según diferentes dosis de N y tres frecuencias de riego del ciclo 2009/10. AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia de riego. Las letras minúsculas distintas en sentido vertical para cada frecuencia e riego indican diferencias significativas entre tratamientos de fertilización (Tukey  $\alpha=0,05$ ).

Frecuencias de Riego	N Fertilizante kg ha <sup>-1</sup>	N planta R1 kg ha <sup>-1</sup>		N Planta R6 kg ha <sup>-1</sup>		Ng kg ha <sup>-1</sup>	
AF	0	115,6	a	203,6	a	135,7	a
	140	218,8	b	303,1	b	194,2	b
	280	225,0	b	317,6	b	181,4	b
MF	0	138,9	a	235,0	a	155,5	a
	140	233,1	b	296,8	b	180,7	b
	280	250,0	b	318,8	b	186,4	b
BF	0	130,0	a	169,5	a	112,4	a
	140	174,2	b	213,7	b	126,9	a
	280	182,4	b	276,9	c	167,2	b

Tabla 24. Nitrógeno total en biomasa aérea en R1 (N-planta-R1), en R6 (N-pl- R6) y nitrógeno en granos (Ng) de maíz según las tres frecuencias de riego de los tres ciclos estudiados. AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia de riego. Ng es el nitrógeno en granos. Las letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias significativas entre tratamientos de riego (Tukey  $\alpha=0,05$ ).

	Riego	N-planta (kg ha <sup>-1</sup> ) R1		N-planta (kg ha <sup>-1</sup> ) R6		Ng (kg ha <sup>-1</sup> )	
2006/07	AF	108.4	a	201.7	a	157.3	a
	MF	96.9	a	179.9	ab	148.9	ab
	BF	69.7	b	169.8	b	139.2	b
2007/08	AF	95.3	a	199.8	a	135.4	a
	MF	87.6	a	188.8	a	127.1	a
	BF	68.3	b	148.5	b	96.6	b
2009/10	AF	186.4	a	274.8	a	170.4	a
	MF	207.3	b	283.5	a	174.3	a
	BF	162.1	c	220	b	135.5	b

En la figura 35 se muestra el requerimiento de nitrógeno del cultivo de maíz para diferentes rendimientos de grano obtenidos en las tres frecuencias de riego y las dosis de fertilización de los tres ciclos analizados. La pendiente de la regresión lineal indica que el maíz necesitó absorber alrededor de 18 kg de nitrógeno por tonelada de grano. Sin embargo este valor puede variar de acuerdo a los híbridos y a la existencia o no de consumos en exceso, que puede elevar la concentración y el contenido de nitrógeno en la biomasa aérea, pero no el rendimiento (Desvignes, 1992). El valor es algo inferior al descrito por Andrade y *et al.* (1995) para maíz con dosis diferenciales de nitrógeno quienes usando la misma metodología hallaron un valor de 20 kg de N por tonelada de grano. Al analizar las frecuencia de riego la mayor eficiencia fisiológica se asoció a los tratamientos AF y MF y con dosis de 0 y 70 kg N, que se corresponden con 13 y 12 kilos de N acumulados por cada tonelada de grano producido (Tablas 25, 26 y 27). El rango de valores encontrado en la literatura varía entre 16 y 23 kg de nitrógeno acumulado en biomasa aérea por tonelada de granos (Fontanetto *et al.*, 2001; Alvarez, 2001; Andrade *et al.* 1996; Di Nápoli y Gonzalez Montaner, 1997; Ruiz *et al.* 1997). Con mayores dosis de fertilizante nitrogenado se halló que el requerimiento de N por unidad de rendimiento se encuentra entre los 16 y los 19 kg del elemento por cada tonelada de grano. Di Nápoli y Gonzalez Montaner (1997) proponen un valor de 18 kg N T<sup>-1</sup> grano (ajustado a 14 % de humedad) como promedio de situaciones con respuesta a la fertilización, valor igual al descrito precedentemente en base a la totalidad de datos de rendimiento analizados, y de 21 kg N T<sup>-1</sup> grano en promedio de las situaciones sin respuesta.

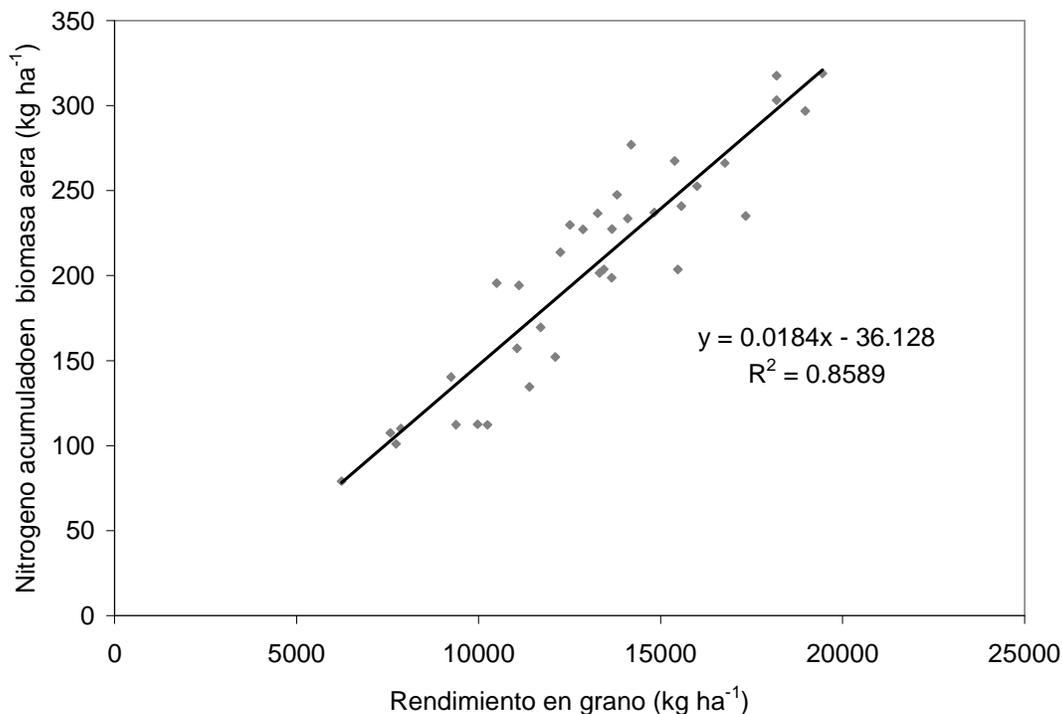


Figura 35. Requerimientos de nitrógeno en biomasa aérea para distintos niveles de producción de maíz. Los datos corresponden a los valores medios de los tres ciclos analizados (2006/07, 2007/08 y 2009/10).

La EUN disminuyó a al aumentar la dosis de N aplicada y al reducir la disponibilidad hídrica. Si bien los mayores rendimientos de grano ocurrieron con las máximas dosis de N ensayadas (Tabla 19), no se alcanzaron con ellas las mayores EUN. Esta fue mayor en los tratamientos N70 en 2006/07 (Tabla 25) y con el tratamiento testigo (N0) en 2007/08 (Tabla 26) y 2009/10 (Tabla 27).

Los valores observados para este parámetro variaron entre 41 y 20 kg de grano kg<sup>-1</sup> N.

La eficiencia en la absorción de N tuvo un rango de valores de 0.36-0.60 la dónde la mayor eficiencia en la absorción se dio para el tratamiento de fertilización N140. En cuanto a las frecuencias de riego, los menores valores de absorción se ubicaron en el tratamiento BF. La restricción hídrica asociada al tratamiento BF limitó la absorción del N (Tablas 25, 26 y 27). La mayor disponibilidad hídrica produjo absorciones mayores de N La cantidad de N disponible para la planta depende directamente del manejo del agua en distintos sistemas de riego (Cantliffe *et al.*, 1998). Cuando ésta es insuficiente la absorción del nitrógeno y los rendimientos disminuyen marcadamente y si es excesiva provoca lavado y pérdida de nitrógeno (Karam *et al.*, 2002).

Los valores de la eficiencia en la acumulación de N en el grano fueron siempre mayores para las menores dosis de N, en las tres frecuencias de riego. La eficiencia fisiológica para la producción de

granos se incrementó desde, 50 a 80 kg de grano/kg de N absorbido, a medida que la disponibilidad de N disminuyó. Estos valores se ubicaron por encima de los 40-50 kg de grano por kilo de nitrógeno absorbido mencionados para maíz con distintas dosis de N en Balcarce por Uhart (1990) y Andrade (1995). Resultados similares fueron descriptos por Huggins y Pan (1993), quienes trabajando con labranza convencional y labranza cero en el cultivo de trigo, cultivado con diferentes niveles de nutrición nitrogenada, encontraron que la aplicación de N disminuyó las eficiencias en el uso del N, en la fisiológica y en la acumulación en grano. Barbieri *et al.* (2001) en un ensayo de distanciamiento entre hileras en maíz sembrado en Balcarce con dos dosis de N describen que la eficiencia fisiológica para la producción de granos disminuyó con la adición de N y no se observaron diferencias significativas entre distanciamientos.

Tabla 25. Componentes de la eficiencia de uso del nitrógeno en maíz del testigo y 5 dosis de N, para las tres frecuencias de riego del ciclo 2006/07. EUN: eficiencia de uso de N; Efis.: eficiencia fisiológica o de utilización. Eac: eficiencia de acumulación de N en grano. Eabs: eficiencia de absorción; ICN: Índice de Cosecha del N..

Dosis de N (kg.ha <sup>-1</sup> )	Alta Frecuencia						Media Frecuencia						Baja Frecuencia					
	0	70	140	210	280	350	0	70	140	210	280	350	0	70	140	210	280	350
EUN (kg gr kg <sup>-1</sup> Np)	37,9	41,0	39,6	34,4	32,5	28,0	37,7	37,2	35,1	32,9	30,6	24,9	27,8	31,9	30,5	29,6	26,3	21,8
Eabs	0,54	0,58	0,60	0,57	0,50	0,49	0,49	0,41	0,44	0,55	0,49	0,45	0,35	0,38	0,50	0,51	0,47	0,40
Efis(kg gr kg <sup>-1</sup> NtR6)	70,5	76,3	66,0	60,4	64,6	57,5	76,6	91,3	79,6	60,1	62,6	55,8	68,8	73,5	57,2	56,6	56,1	54,4
Eac	0,45	0,48	0,47	0,45	0,38	0,36	0,43	0,38	0,34	0,36	0,38	0,34	0,37	0,36	0,36	0,33	0,34	0,32
ICN	0,83	0,83	0,78	0,78	0,76	0,75	0,87	0,79	0,76	0,79	0,78	0,75	0,77	0,85	0,87	0,84	0,81	0,81

Tabla 26. Componentes de la eficiencia de uso del nitrógeno en maíz en función de 3 dosis de N, para las tres frecuencias de riego del ciclo 2007/08. EUN: eficiencia de uso de N; Efis.: eficiencia fisiológica o de utilización. Eac: eficiencia de acumulación de N en grano. Eabs: eficiencia de absorción; ICN: Índice de Cosecha del N..

Dosis de N (kg.ha <sup>-1</sup> )	Alta Frecuencia			Media Frecuencia			Baja Frecuencia		
	0	140	280	0	140	280	0	140	280
EUN (kg gr kg <sup>-1</sup> Np)	39,64	31,93	29,54	39,88	34,15	30,19	29,87	22,92	19,33
Eabs	0,47	0,46	0,47	0,45	0,52	0,48	0,42	0,35	0,36
Efis (kg gr kg <sup>-1</sup> NtR6)	84,74	68,70	62,98	88,61	66,11	63,39	71,42	65,87	53,69
Eac	0,32	0,32	0,31	0,30	0,35	0,32	0,27	0,23	0,23
ICN	0,68	0,69	0,67	0,67	0,68	0,67	0,65	0,67	0,64

Tabla 27. Componentes de la eficiencia de uso del nitrógeno en maíz en función 3 dosis de N, para las tres frecuencias de riego del ciclo 2009/10. EUN: eficiencia de uso de N; Efis: eficiencia

fisiológica o de utilización. Eac: eficiencia de acumulación de N en grano. Eabs: eficiencia de absorción; ICN: Índice de Cosecha del N..

Dosis de N (kg.ha <sup>-1</sup> )	Alta Frecuencia			Media Frecuencia			Baja Frecuencia		
	0	140	280	0	140	280	0	140	280
EUN (kg gr kg <sup>-1</sup> Np)	39,13	33,96	26,92	40,60	33,46	27,51	32,38	24,42	22,13
Eabs	0,51	0,57	0,47	0,55	0,52	0,45	0,45	0,43	0,43
Efis (kg gr kg <sup>-1</sup> NtR6)	76,03	60,02	57,28	73,78	63,92	61,02	69,06	57,33	51,27
Eac	0,34	0,36	0,27	0,36	0,32	0,27	0,31	0,25	0,26
ICN	0,67	0,64	0,57	0,66	0,61	0,58	0,66	0,59	0,60

En la Figura 36 se presentan los ajustes cuadráticos significativos entre la EUN según las tres frecuencias de riego en función de la dosis de fertilización en el ciclo 2006/07. Las mayores EUN se dieron en los tratamientos con AF y MF de riego, sin encontrarse diferencias entre ellos en los tres años analizados, pero si con respecto a BF. Este resultado pone de manifiesto que ante una reducción moderada del agua de riego del 30%, asociada al tratamiento MF, no afectó de modo significativo la EUN. El manejo del agua de riego y la distribución de fertilizantes influyen significativamente en la eficiencia del uso del nitrógeno (Thompson y Doerge, 1996). En condiciones como la del ensayo con el agregado de altas dosis de N con el objeto de obtener altos rendimientos, debe ir asociado del correcto manejo de la cantidad de agua agregada, con el objeto de ahorrar agua, mejorar la absorción de N y evitar bajas EUN.

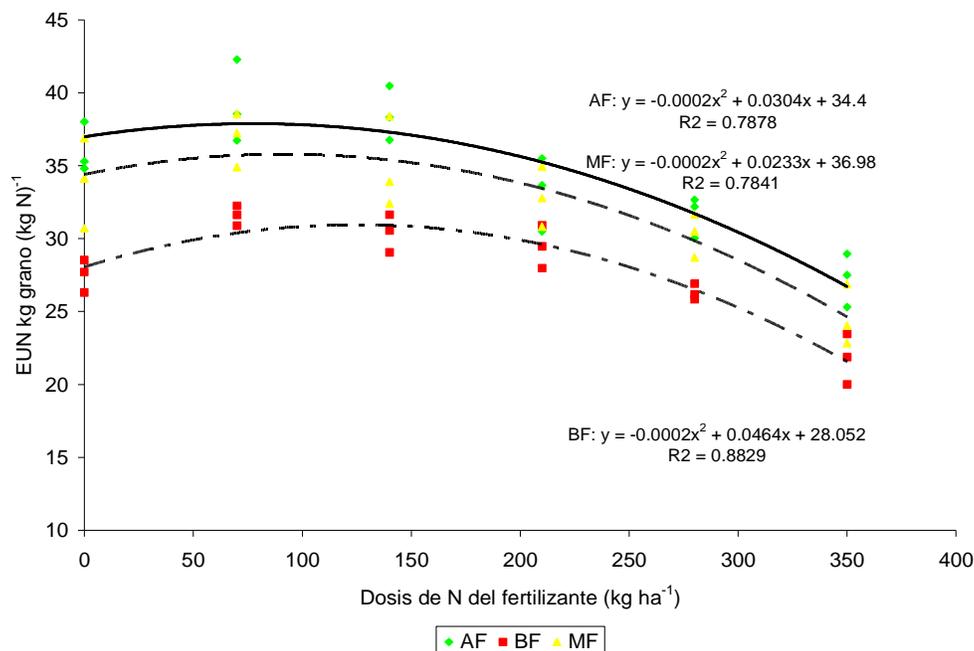


Figura 36. Eficiencia de uso de nitrógeno en función a las distintas dosis de nitrógeno aplicadas y según de las frecuencias de riego analizadas durante el ciclo 2006/07. AF (línea continua) es alta frecuencia, MF (línea discontinua) es media frecuencia y BF (línea discontinua con puntos) es baja frecuencia.

### Intercepción y eficiencia de uso de la radiación.

Uno de los principales objetivos del manejo de cultivos de alta producción es lograr que las hojas intercepten la mayor parte de la radiación incidente y por lo tanto mayor tiempo posible para utilizarla en la producción de materia seca de las plantas (Andrade y Sadras, 2000). Los valores medios de área foliar por planta hallados variaron entre 4500 y 6400 cm<sup>2</sup> pl<sup>-1</sup> siendo similares a los encontrados por otros autores en condiciones hídrico nutricionales equivalentes (Andrade *et al.*, 1996, Maturano, 2002) pero con densidades inferiores (8,0 y 8,9 pl m<sup>-2</sup>) a las utilizadas en éste trabajo (10 pl m<sup>2</sup>). El AF se incrementó a medida que la dosis de N suministrado con el fertilizante fue mayor hasta un valor de 280 kg ha<sup>-1</sup> de N y se redujo frente a la restricción hídrica del tratamiento BF. La dinámica de la intercepción de radiación por las hojas está relacionada a la evolución del índice de área foliar (IAF), definido como la superficie foliar fotosintéticamente activa por unidad de superficie del suelo (Cárcova, 2003). Los valores de IAF en R1 variaron entre 3,5 y 7,2 según se modificaron las disponibilidades de agua y nitrógeno. La alta densidad de plantas produjo un incremento alrededor de 17 % en los valores máximos de IAF comparados a los descriptos por otros autores los cuales varían entre 2,7 y 5,7 con densidades entre 3,0 y 9,0 pl m<sup>-2</sup> (Andrade *et al.*, 1996; Maturano, 2002; Otegui *et al.*, 1995). Durante el ciclo 2006/07 el análisis de

la varianza para los factores frecuencia de riego y nitrógeno en R1, mostró diferencias significativas en ambos factores, sin hallarse interacción entre variables ( $p=0,84$ ). La información disponible no mostró diferencias en el IAF en floración entre AF y MF, pero sí entre estos dos tratamientos de riego y BF (Tabla 28). La reducción en el IAF en BF fue del 12 % y 19 % respecto de MF y AF. Al analizar los niveles de fertilización con N se observó que los mayores valores de IAF correspondieron a tratamientos entre N210 y N280, diferenciándose significativamente de N0, N70 y N140 (Figura 32). En el tratamiento testigo (N0) se encontró un 29 % menos de IAF que en los niveles N210 y N280. Muchow (1988) estudió el desarrollo del área foliar bajo diferentes niveles de N pero con densidades muy inferiores a las de este trabajo, y describió valores de IAF en R1 de 2,3, 3,4, 3,7 y 3,5 bajo niveles de N de 0, 60, 120, y 240 kg N ha<sup>-1</sup> respectivamente. Esta disminución en el IAF se asoció a la menor tasa de expansión de las hojas y, por consiguiente de la intercepción de radiación, siendo más afectada que la fotosíntesis ante deficiencias de N (Trapani y Hall, 1996). Para el ciclo 2007/08 el comportamiento del IAF fue similar al hallado en 2006/07, sin encontrarse diferencias entre AF y MF, pero sí entre estas respecto de BF (Tabla 28). La disminución en el IAF en el tratamiento BF con respecto a AF fue del 21%. Con relación a los niveles nitrogenados se observaron diferencias entre N0 y los dos tratamientos fertilizados, N140 y N280. En cada nivel hídrico, los mayores valores de IAF se hallaron en tratamientos con la mayor cantidad de nitrógeno aportado (N280), Este comportamiento valida la importancia del N para definir el tamaño de las hojas y la eficiencia fotosintética (Uarth y Andrade, 1995).

Tabla 28. Efectos de las frecuencias de riego, de la fertilización nitrogenada en el área foliar y en el índice de área foliar en floración para los ciclos 2006/07, 2007/08 y 2009/10. AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia. Las letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias significativas entre tratamientos de riego (Tukey  $\alpha=0,05$ ).

Factor	Nivel	Área Foliar (cm <sup>2</sup> pl <sup>-1</sup> )			Índice de Área Foliar		
		2006/07	2007/08	2009/10	2006/07	2007/08	2009/10
Frecuencia de riego	AF	5146 a	5452 a	6386 a	5.28 a	5.82 a	6.37 a
	MF	4768 a	5526 a	6494 ab	4.86 a	5.29 a	6.26 ab
	BF	4165 b	4485 b	5967 b	4.25 b	4.58 b	5.81 b
Fertilización nitrogenada	N0	3640 a	4577 a	5757 a	3.77 a	4.67 a	5.60 a
	N70	4240 ab			4.33 ab		
	N140	4577 bc	5184 b	6527 b	4.66 abc	5.29 b	6.40 b
	N210	5294 c			5.38 d		
	N280	5280 c	5702 b	6564 b	5.39 d	5.82 b	6.44 b
	N350	5126 bc			5.23 cd		
Interacción		NS	NS	NS	NS	NS	NS

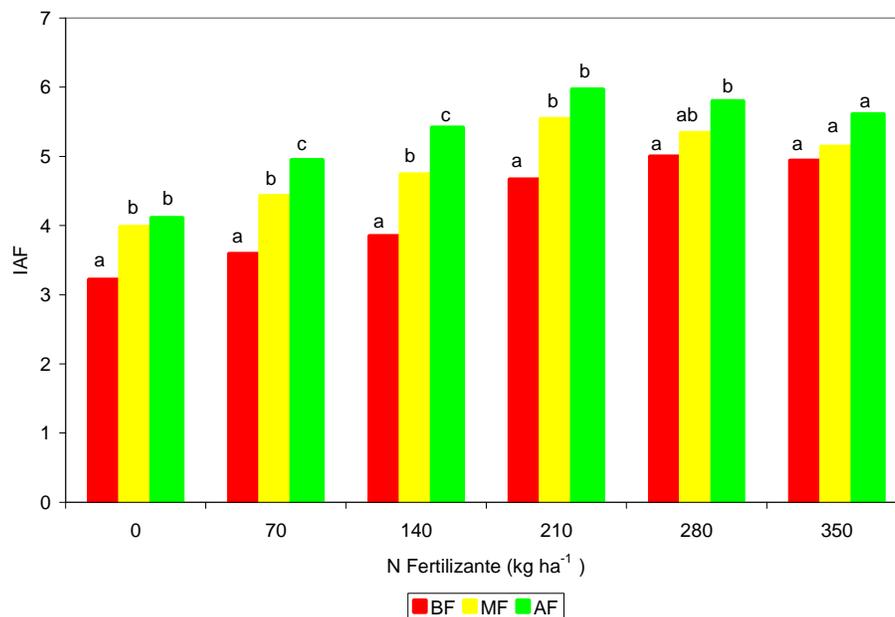


Figura 37. Índice de área foliar (IAF) en función de la dosis de nitrógeno aplicado para los tres tratamientos de riego (AF, MF y BF) del ciclo 2006/07. Letras minúsculas distintas sobre las columnas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey  $\alpha=0,05$ ) AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia..

En la Figura 38 se presenta la evolución del IAF desde la emergencia según tratamientos de fertilización nitrogenada y frecuencias de riego para el ciclo 2009/10. Las diferencias en el IAF tanto por los tratamientos de riego como por los niveles nitrogenados, comienzan a manifestarse en floración (71 días desde la emergencia). Los valores de IAF máximo se observaron próximos a floración para todos los tratamientos. En la floración solo se detectaron diferencias en el IAF entre los tratamientos de riego AF y MF con respecto a BF. Gran parte del efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento de los cultivos opera a través de la disminución de la expansión foliar y/o del aumento de la senescencia foliar y, por lo tanto, afectando la intercepción de radiación (Gifford *et al.*, 1984). En el factor nitrógeno las diferencias se observaron entre los tratamientos con fertilización nitrogenada (N140 y N280) y el testigo (N0). Las mayores diferencias entre niveles nitrogenados se observaron en floración en AF y MF, donde se describió 14 y 12 % menos de IAF en el tratamiento testigo N0 con respecto a N280. Esto podría deberse, a que en el tratamiento BF, la menor disponibilidad hídrica afectó la expansión foliar reduciendo el índice de área foliar y a su vez las hojas comenzaron a secarse más rápidamente que en los tratamientos MF y AF. En cuanto a los tratamientos nitrogenados, se observó aproximadamente 15% menos IAF en el tratamiento testigo (N0) con respecto a N280. En promedio para los tres años las diferencias en magnitud del IAF debidas a la fertilización con N, fueron superiores a las halladas debido a la frecuencia de

riego. Los incrementos en el IAF como respuesta a dosis crecientes de N, confirman los resultados de estudios anteriores realizados por Evans (1978), Duncan (1975) y Andrade (1995) y se tradujeron una mayor cantidad de radiación interceptada y de la eficiencia con que la se transforma en biomasa.

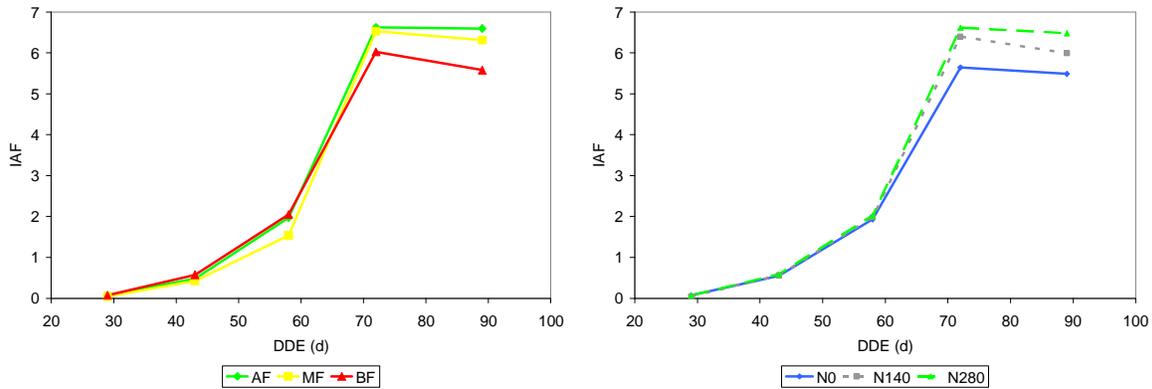


Figura 38. Evolución del IAF en función de los días desde emergencia para los tres tratamientos nitrogenados (N0, N140 y N280) y para cada frecuencia de riego (AF, MF y BF) para el ciclo 2009/10. Datos promedio. AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia. DDE: días desde emergencia.

Al analizar los datos de radiación fotosintéticamente activa interceptada en floración (R1) en la campaña 2007/08 se observó una disminución del 13,5 % de radiación interceptada en el tratamiento BF de riego con respecto a MF y AF (Figura 39). Sólo los tratamientos de riego con mayor frecuencia (AF y MF), alcanzaron 95 % de intercepción. Como se mencionó la menor frecuencia de riego del tratamiento BF redujo el AF y el IAF por disminución de la expansión foliar (NeSmith y Ritchie, 1992) produciéndose una reducción en la cantidad de radiación interceptada por el cultivo. Los tratamientos N140 y N280 se diferenciaron estadísticamente de N0 en la cantidad de RFAi solo en AF y MF, debido al mayor área foliar desarrollado por el agregado de nitrógeno. Las deficiencias de nitrógeno disminuyen la cantidad de radiación interceptada por el cultivo y la eficiencia de conversión en biomasa (Andrade *et al.*, 1996).

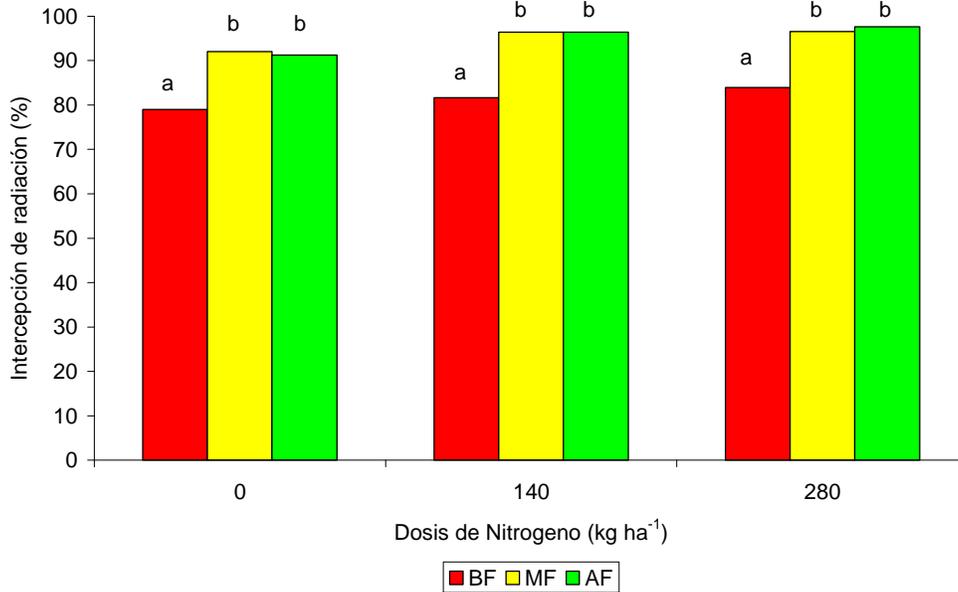


Figura 39. Porcentaje de radiación fotosintéticamente activa interceptada en R1 según tratamientos de riego (AF, MF y BF) y niveles de fertilización con nitrógeno (N0, N140 y N280) para el ciclo 2007/2008. Letras minúsculas distintas sobre las columnas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey  $\alpha=0,05$ ) AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia..

En el ciclo 2009/10, donde se siguió la evolución de la interceptación de radiación a lo largo del cultivo (Figura 40), se hallaron diferencias altamente significativas en el porcentaje de RFAi en los tratamientos de riego sólo entre BF respecto de AF y MF en a partir de V12 hasta R3 (Tabla 29). Dentro de cada frecuencia de riego, se observa que el porcentaje de interceptación a lo largo del ciclo en N0 se encuentra demorado con respecto de N140 y N280, llegando a alcanzar el valor de IAF crítico a los 89 DDE solo en AF y MF lo cual implicó una menor cantidad de radiación para transformarla en biomasa y en grano.

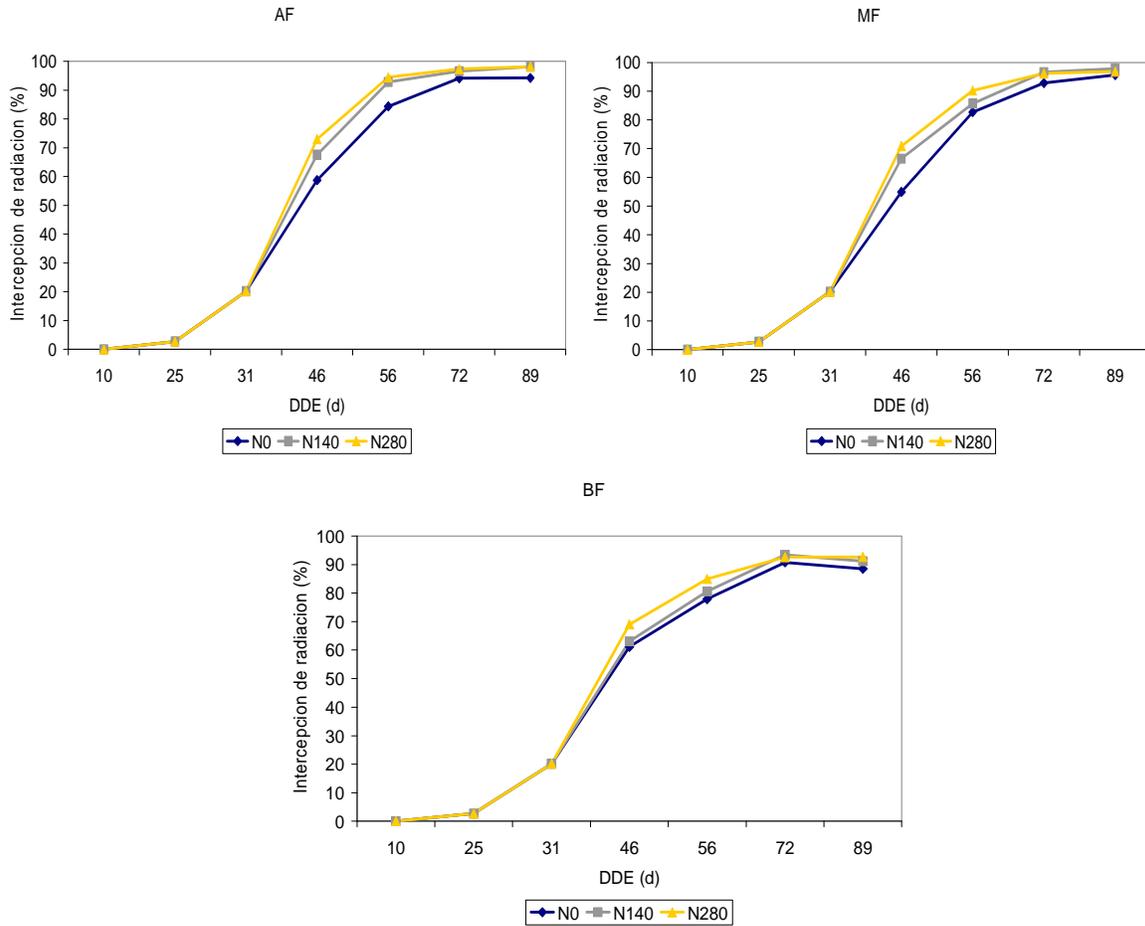


Figura 40. Evolución del porcentaje de radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) en función de los días desde emergencia (DDE) para los tratamientos de riego AF, MF y BF y sus combinaciones con los niveles nitrogenados N0, N140 y N280 correspondiente al ciclo 2009/10. AF es alta frecuencia, MF es media frecuencia y BF es baja frecuencia.

Tabla 29. Efectos de las frecuencias de riego, de la fertilización nitrogenada en el porcentaje de intercepción de radiación en R1 del ciclo 2006/07 y en doce hojas (V12), en floración (R1) y en grano lechoso (R3) del ciclo 2009/10.

Factor	Nivel	Intercepción de Radiación (%)			
		2007/08 R1	V12	2009/10 R1 R3	
Frecuencia de riego	AF	95.85 a	90.57 a	96.02 a	96.87 a
	MF	95.45 a	86.22 b	95.19 a	96.78 a
	BF	81.52 b	81.13 c	92.59 b	90.72 b
Fertilización nitrogenada	N0	88.64 a	81.68 a	92.91 a	92.75 a
	N140	91.46 ab	86.35 b	95.52 b	95.73 b
	N280	92.71 b	89.88 b	95.37 b	95.91 b
Interacción		NS	NS	NS	NS

### Eficiencia de uso de la radiación (EUR)

En las Figuras 41 y 42 se presenta la relación entre la materia seca aérea total (MST) en función de la radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada por el cultivo (RFAi) durante el ciclo 2009/10 a partir de V6. Se ajustaron modelos lineales a la relación  $MST (RFAi)^{-1}$  a cada frecuencia de riego y dosis de nitrógeno, siendo altamente significativos. La pendiente de esta relación es una medida de la eficiencia de conversión de la RFAi en biomasa vegetal o eficiencia del uso de la radiación (EUR) (Andrade *et al.*, 1996).

El valor obtenido es un promedio para todo el ciclo del cultivo y no se consideró la biomasa radicular. Al comparar las rectas de regresión la información disponible fue insuficiente para determinar diferencias entre la EUR de AF y MF ( $p=0.865$ ), pero sí entre estas y BF. Los valores de EUR medios fueron 4,070, 4,030 y 3,62 g MS MJ<sup>-1</sup>, para AF, MF y BF respectivamente. La disminución de la EUR en BF fue del 10% con respecto a los tratamientos AF y MF. La disminución en la eficiencia de conversión de radiación interceptada en biomasa se explicaría por caídas en la tasa de fotosíntesis por unidad de área foliar debida a factores estomáticos y no estomáticos (Boyer, 1970; Kramer, 1983).

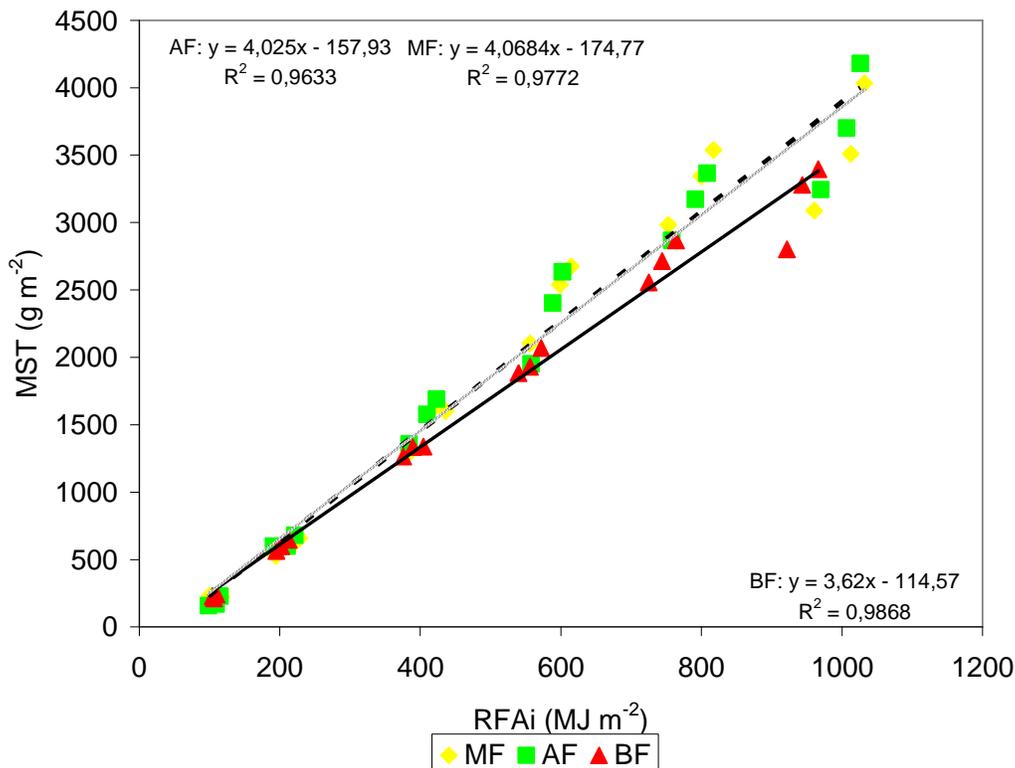


Figura 41. Relación entre la materia seca acumulada (MST) y la radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (RFAi) durante el ciclo del cultivo para la comparación entre frecuencias de riego. AF (línea discontinua) es alta frecuencia, MF (línea punteada) es media frecuencia y BF (línea continua) es baja frecuencia.

Al analizar la EUR para los distintos tratamientos nitrogenados La EUR aumentó con las dosis más altas de N aplicado observándose valores de 4,24 g MS MJ<sup>-1</sup> para N280, 3,94 g MS MJ<sup>-1</sup> para N140 y 3,55 g MS MJ<sup>-1</sup> para N0. Las diferencias en la EUR se hallaron entre N0 y N280 (p=0.0034), pero no entre éstos y N140 (p= 0.078 y p=0.21 respectivamente). La menor oferta de N en N0 disminuyó el 16% la EUR en comparación con N280 y 10% respecto a N140. La eficiencia de uso de la radiación fue más afectada por deficiencias nitrogenadas que por las frecuencias de riego.

Uhart y Andrade (1995) encuentran caídas en la EUR debido a deficiencias de nitrógeno entre 7 y 51 % estando relacionadas con la intensidad del estrés. Esta disminución en la EUR se explica en parte por el bajo ritmo fotosintético, producto del bajo contenido de N en hoja (Novoa y Loomis, 1981). Resultados similares fueron descriptos por Muchow y Davis (1988) en maíz y sorgo cultivado bajo riego en los trópicos semiáridos donde las diferencias en la acumulación de biomasa debido al suministro de dosis variables de nitrógeno se asociaron con diferencias tanto en la intercepción de radiación y la eficiencia con la que interceptó la radiación para producir materia seca. Andrade *et al.* (1992) encontraron valores de EUR para el sureste bonaerense de entre 2,63 y 4,09 g MJ<sup>-1</sup> para el período siembra-floración, para diferentes fechas de siembra y distintos años de ensayo. Valores de EUR de 3,3 g MJ<sup>-1</sup> fueron hallados por Williams y colaboradores (1965) y de 4,14 g MJ<sup>-1</sup>, por Otegui *et al.* (1995) en maíz con sequías inducidas mediante coberturas plásticas del suelo en Balcarce, Argentina. Kiniry *et al.* (1989), Prince (1991) y Cárcova *et al.* (2003) mostraron que hay una gran variabilidad entre los valores de EUR, en parte debido a la gran diversidad de métodos y fuentes de error en su cálculo. Se encontró, para ciclo 2009/10, que la deficiencia nitrogenada en promedio en disminuyó la intercepción en 3%, mientras que la EUR se redujo en un 12%. Muchow y Davis (1988) en maíz bajo riego con dosis variables de N mostraron que se reduce en mayor medida la EUR que la RFAi ante deficiencias nitrogenadas, debido a que al disminuir el porcentaje de proteína en las hojas se reduce la eficiencia fotosintética, pero sin llegar a afectar, el área foliar y reducir el porcentaje de intercepción.

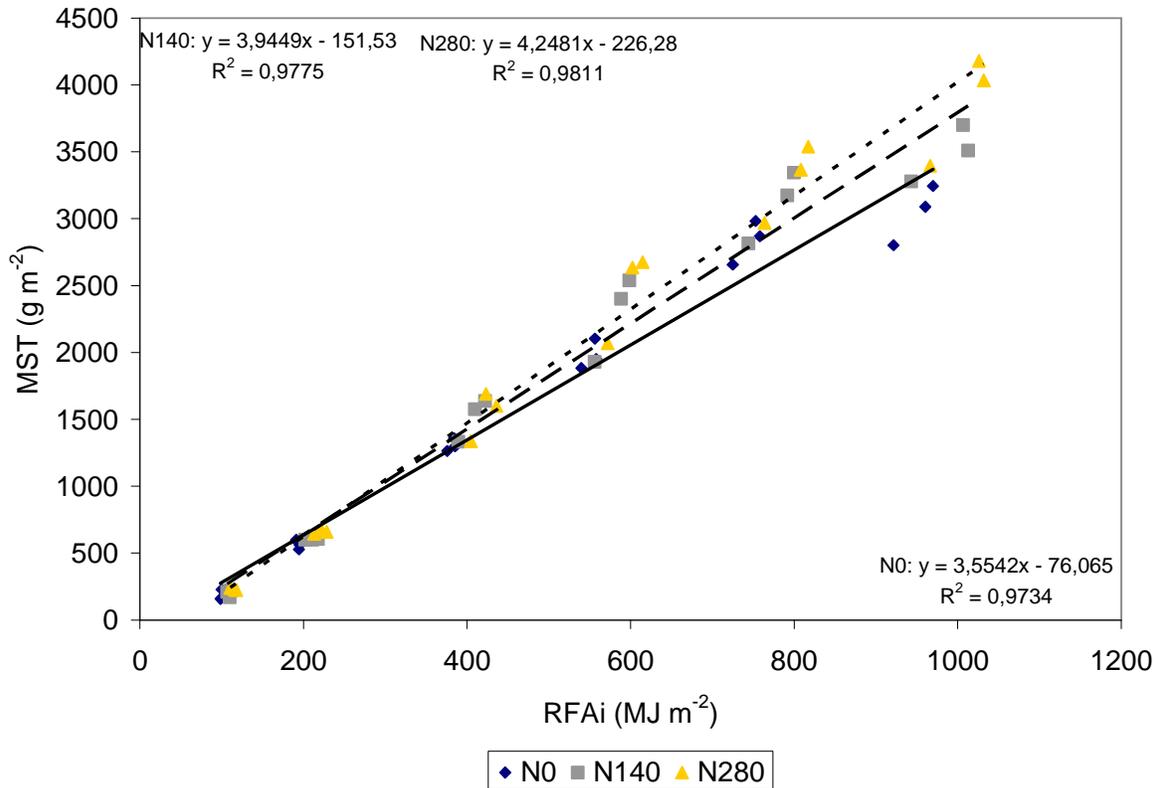


Figura 42. Relación entre la materia seca acumulada (MST) y la radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (RFAi) durante el ciclo del cultivo en función de distintos niveles nitrogenados N0 (línea continua), N140 (línea discontinua) y N280 (línea punteada).

Se debe considerar que, al analizar la EUR, la pendiente de esta regresión tiende a suavizar las variaciones que se dan en las distintas etapas durante el desarrollo del cultivo (Plenet, 1995).

A medida que avanza el ciclo del cultivo, aumenta la proporción de hojas senescentes y, consecuentemente, disminuye la eficiencia fotosintética (Tollenaar y Aguilera, 1992). Este hecho, sumado al aumento de la respiración de mantenimiento y de la biomasa, explica el menor valor del coeficiente de conversión, o EUR, para el período postfloración (Ruget, 1991). Además, la medición directa realizada sobre el cultivo en este trabajo considera la absorción de hojas en proceso de senescencia, tendiendo a subestimar la EUR en post floración (Gallo y Daughtry, 1993). La disminución en el área foliar fotosintéticamente activa del cultivo como consecuencia de deficiencias hídricas (Ej. BF) y/o nitrogenadas (Ej. N0) conduce en ambos casos a la reducción en la cantidad de radiación interceptada por el cultivo, así como también la disminución en la eficiencia de conversión de la RFAi en biomasa. La tasa de acumulación de MST varía en proporción directa con la proporción de radiación interceptada (Sinclair y Horie, 1989; Andrade *et al.*, 1996), y ésta con el IAF. Por lo tanto, las variaciones en la disponibilidad hídrica como consecuencia de las frecuencias de riego y los distintos niveles nitrogenados aplicados que

produjeron valores de IAF inferiores al crítico resultaron en valores menores de EUR, debido a que una fracción elevada del IAF está sometida a un nivel de radiación cercano al de saturación fotosintética. Según Sinclair y Horie (1989), las hojas que están lumínicamente saturadas, son menos eficientes que aquellas hojas sombreadas. A medida que la proporción de hojas sombreadas aumenta, la EUR también aumenta.

Las condiciones variables de crecimiento del cultivo de maíz, generadas a través de distintas frecuencias de riego a partir del potencial agua del suelo y de dosis de fertilización con nitrógeno, afectaron la instalación del área foliar, intercepción de la radiación fotosintéticamente activa, eficiencia en el uso de la radiación y del N y los componentes del rendimiento en los tres ciclos analizados. La programación de las frecuencias de riego a través de la medición de la tensión del agua en el suelos por medio de sensores Watermark permitió la reducción en un 30% del agua aplicada en el tratamiento MF con respecto de AF, sin observarse diferencias en la producción de MST ni en el rendimiento en grano entre dichas frecuencias. Además, la intercepción de radiación, el IAF y la EUR se mantuvieron sin mayores variaciones frente a esa reducción moderada del agua de riego. Si bien la EUAr fue mayor para el tratamiento BF la restricción hídrica redujo el establecimiento del área foliar, la intercepción de radiación y la EUR, afectando la tasa de crecimiento del cultivo alrededor del periodo crítico y provocando una reducción del rendimiento en grano del 20-34% respecto de las otras frecuencias estudiadas. La deficiencia hídrica asociada al tratamiento BF causó reducciones de mayor magnitud en el NG que en el PG. El comportamiento descrito tendría su origen en la fuerte respuesta del número de granos a la TCC en el periodo crítico. A medida que se incrementó la dosis de N aumentó la producción de MST y el rendimiento, así como también la EUAr en las tres frecuencias estudiadas. La EUN disminuyó a al aumentar la dosis de N aplicada y al reducir la disponibilidad hídrica La menor EUN se observó para BF donde a restricción hídrica limitó principalmente la absorción del N, con la posibilidad de que el nitrógeno remanente sea lixiviado hacia las napas provocando un efecto negativo hacia el ambiente. Una reducción moderada del agua de riego del 30%, asociada al tratamiento MF, mejoró la EUAr en un 27 % y no afectó de modo significativo la EUN con respecto a al tratamiento AF. Por lo hasta aquí expuesto el tratamiento MF es el que mejor compensó la mayor EUR y EUN logrando rendimientos similares al tratamiento AF pero con una mayor EUAr, optimizando el uso del agua de riego.

A partir de los ensayos descritos y resultados obtenidos en el presente trabajo se ha logrado aumentar el conocimiento en cuanto al ajuste del manejo del riego y de la fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz de alta productividad en la zona del valle inferior del Rio Negro, con el objeto de mejorar la eficiencia de uso de dichos recursos. Además se ha indagado sobre como los

tratamientos aplicados modificaron los componentes ecofisiológicos responsables de la determinación del crecimiento, como la eficiencia del cultivo para interceptar radiación fotosintéticamente activa incidente y la eficiencia para convertirla en biomasa en zonas que más radiación solar global reciben, durante el periodo crítico del cultivo de maíz, de Argentina.

El presente, es el primer estudio en documentar la clasificación de dos suelos presentes en el valle inferior del Rio Negro como Vertisoles en el según el sistema de clasificación de suelos Soil Taxonomy (2006). La relación observada en estos suelos entre el potencial agua medido con sensores de matriz granular y de la humedad volumétrica en el suelo medida con la sonda Diviner®, pone de manifiesto la posibilidad de que los productores utilicen en el cultivo de maíz los sensores watermark en el seguimiento de la programación del riego gravitacional en valle inferior del río Negro, permitiendo detectar si se está haciendo un adecuado manejo del mismo y en función de la demanda del cultivo a lo largo del ciclo.

## Conclusiones

De los resultados alcanzados en los tres años de experimentación que dieron soporte a esta Tesis, cuya finalidad fue estudiar el efecto de distintos manejos del riego y de la nutrición con nitrógeno sobre la producción de maíz en condiciones agrícolas de alto rendimiento para mejorar la eficiencia de uso de dichos recursos en el valle inferior del Rio Negro, se desprenden las siguientes conclusiones:

- No se hallaron diferencias en el AF, el IAF, la RAFi, en la producción de materia seca total aérea ni en el rendimiento en grano entre AF y MF en ninguno de los tres ciclos estudiados.
- La reducción del rendimiento en grano, en el tratamiento BF para los tres años analizados, fue del 20-34% respecto de las otras frecuencias estudiadas. El componente de rendimiento NG fue más afectado que el PG por la menor disponibilidad hídrica del tratamiento BF.
- El tratamiento BF fue el que mayor EUAr presentó en los tres ciclos de estudio con valores entre 1,76 y 3.04 kg m<sup>-3</sup>, diferenciándose de AF y MF. Se observó una tendencia a un incremento en la EUAr a medida que disminuye la cantidad de agua aplicada. Si bien el tratamiento BF fue el que mayores eficiencias de uso de agua presentó, a su vez fue el que presentó menores rendimientos a través de todos sus componentes.
- Para los tres tratamientos de riego, y para los tres años estudiados, se incrementó entre 15 y 38% la producción de MST a medida que la dosis de N aumentó hasta una dosis de 280 kg N ha<sup>-1</sup>.
- El AF y el IAF se incrementaron a medida que la dosis de N suministrado con el fertilizante fue mayor hasta un valor de 280 kg ha<sup>-1</sup> de N y se redujeron entre 12% y 21% frente a la restricción hídrica del tratamiento BF. Solamente los tratamientos AF y MF alcanzaron el “valor crítico” del 95% de intercepción.
- El aumento de la dosis de nitrógeno aplicada incrementó entre 12% y 50% la EUAr para la producción de granos en todos los niveles hídricos analizados, estableciéndose las mayores eficiencias para las dosis más altas de nitrógeno (N280 y N350).
- Una reducción moderada del agua de riego del 30%, asociada al tratamiento MF, mejoró la EUAr en un 27 % y no afectó de modo significativo la EUN con respecto a al tratamiento AF.
- La EUR para todo el ciclo de cultivo alcanzó valores de 4 g MS MJ<sup>-1</sup> sin encontrarse diferencias entre AF y MF. La deficiencia nitrogenada y la menor frecuencia de riego redujeron la EUR. En ambos casos se produjo una reducción en la cantidad de radiación

interceptada por el cultivo, así como también la disminución en la eficiencia de conversión de la RFAi en biomasa.

- Por lo hasta aquí expuesto el tratamiento MF es el que mejor compensó la mayor EUR y EUN logrando rendimientos similares al tratamiento AF pero con una significativa mejora en EUAr.

### **Propuestas a futuro:**

- Se considera importante dar continuidad a este tipo de estudios aplicados a los cultivos que son parte de la rotación con maíz en el valle inferior como la soja, cebolla y pasturas, para estudiar de forma dinámica la influencia del cultivo antecesor en las economías del agua, del nitrógeno y del carbono, en un marco de sustentabilidad ambiental.
- Se propone en el corto plazo la utilización modelos de simulación de crecimiento y desarrollo, como una herramienta integradora de los diferentes procesos involucrados en el crecimiento, desarrollo y formación del rendimiento de los cultivos, que permite identificar las principales limitantes en la producción de los mismos. La integración de estos modelos con el uso de sistemas de información geográfico (SIG), permite la identificación de problemas en la producción, muchos de ellos asociados a la gran variabilidad de las propiedades físicas y químicas de suelos aluviales y son una herramienta de ayuda a la toma de decisiones, a gran escala.
- Sería importante trabajar con una metodología similar en otro ambiente, con suelos con otras características, como por ejemplo en valle inferior del río Colorado.
- Continuar con los estudios de calibración de los sensores FDR, en suelos de la región, para tener mayor confiabilidad en los valores absolutos de las mediciones. Realizar un seguimiento de la humedad volumétrica del suelo con sensores FDR de medición continua en distintas posiciones desde la cabecera hasta el pie de la tirada de riego, complementando esta información con datos de potencial agua y análisis básicos de conductividad hidráulica, para conocer la dinámica del agua en el suelo en el cultivo de maíz bajo riego gravitacional.

---

**Bibliografía**

Agua y Energía Eléctrica, 1987. "Estudio para el aprovechamiento integral del río Negro". Informe final: Sector Riego Agrícola. Diagnóstico de la eficiencia de riego predial actual. Convenio agua y energía eléctrica- Prov. de Río Negro. 220 pp.

Aldrich, S.R. y E.R. Leng. 1974. Producción moderna de maíz. Editorial Hemisferio Sur. Argentina. 308 pP.

Allen, R.G.; L.S. Pereira; D. Raes y M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO Irrigation and Drainage Paper N°56, FAO, Rome, Italy.

Alvarez R. y C. Alvarez. 2001. Eficiencia de conversión de nitrógeno en cultivos de maíz de la pampa ondulada. VII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.

Andrade, F. 1992. Radiación y temperatura determinan los rendimientos máximos de maíz. Boletín técnico N°106. INTA EEA Balcarce. 16 pp.

Andrade, F.H., Vega C., Uhart S., Cirilo A., Valentinuz O. and Cantarero M..1999. Kernel number determination in maize. Crop Sci. 39:453–459 pp.

Andrade, F. y V.O. Sadras (Eds.). 2000. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. EEA INTA Balcarce – Fac. de Ciencias Agrarias UNMP. 443 pp.

Andrade, F.; A. Cirilo; S. Uhart y M. Otegui. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Editorial la Barrosa. Balcarce. 292 pp.

Arriaga, H.O.; M.E. Chidichimo; D.M. Cattaneo; N.M. Orsini; F.A. Margiotta; H. Iglesias; E. Bardelois; J. Salguero y M. Figueroa. 1984. "El cultivo del maíz con riego al sur del paralelo 40 L

Barbieri, P. A.; H.R. Sainz Rozas; H.E. Echeverría y F.H. Andrade. 2001. Eficiencia de uso del nitrógeno en maíz (*Zea Mays* L.) bajo siembra directa en función de la distancia entre hileras y la disponibilidad de nitrógeno. Congreso Nacional de Maíz. 7-9 de noviembre de 2001. Pergamino. AR. En 7o. Congreso Nacional de Maíz, S" III Congreso Nacional de Maíz, Pergamino. 134-145pp.

- 
- Benjamin, J.G. y D.C. Nielsen. 2006. Water deficit on root distribution of soybean, field pea and chickpea. *Field Crops Research* 97, 248-253 pp.
- Bertolino A.V., Souza F.A., Fernandes A.P., Rangel N.F., Campos A.M., Shock, T.M.. 2002. Monitoring de field soil matrix potential using mercury tensiometer and granular matrix sensor, *Unsaturated Soils. Recife Brasil. Lisse Swets and Zeitlinger; Vol 1:335–338 pp.*
- Brisson, N. y R. Delécolle. 1991. Développement et modèles de simulation de culture *Agronomie*, 12. 253–263 pp.
- Blaney, H.F. y W.D. Criddle. 1962. Determining consumptive use and irrigation water requirements. U. S. Dept. Agr. Agricultural Research Service Tech Bull 1275. 59 pp.
- Boyer, J.S. 1970. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean, and sunflower at various leaf water potentials. *Plant Phisiol.* 46: 233-235 pp.
- Boyer, J.S. 1982. Plant productivity and environment. *Science* 218: 443-448 pp.
- Boyer, J.S. y W.E. Westgate. 2004. Grain yields with limited water. *Journal of Experimental Botany* 55: 2385– 2394 pp.
- Borrás, L.; G.A. Slafer y M.E. Otegui. 2004. Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. *Field Crops Research*, 86: 131-146 pp.
- Burgos, J.J. y A.L. Vidal. 1951. Los climas de la República Argentina según la nueva clasificación de Thornthwaite. *Meteoros I (1) Buenos Aires.*
- Busscher, W.J. 2009. Book Review -Field Estimation of Soil Water Content. *Journal of Soil and Water Conservation.* 64:116A.
- Cancio, H. 2012. Resultados ensayos de maíz bajo riego en los valles irrigados de Patagonia Norte. III Jornadas de Maíz y Otros Forrajes para el Norte de la Patagonia. 26/09/2012. Plottier, Neuquén.

Carcova, J.; G. Abeledo y M. Lopez-Pereira. 2003. Análisis de la generación del rendimiento: Crecimiento, partición y componentes. En: Satorre, E.; R. Benech Arnold; G. Slafer; E. De La Fuente; D. Miralles; M. Otegui y R. Savin. Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía. 75-95 pp.

Castillo, H. y F. Santibáñez. 1987. Efecto de la temperatura sobre la fenología del trigo (Cultivar Aurifén). Agricultura Técnica (Chile), 47(1), 29-34 pp.

Cantliffe, D.J.; G.J.Hochmuth; I. Karchi; I. Secker; y S. Ben-Yehoshua. 1998. Nitrogen fertility requeriment for iceberg lettuce grow on sandland with plastic mulch and drip irrigation. Proc. Fla. State. Hort. Soc. 110: 306-309 pp.

Caviglia O.P. y V.O. Sadras. 2001. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water and radiation use efficiency of wheat. Field Crops Research 69:259-266 pp.

Campos, H.; M. Cooper; J.E. Habben; G.O. Edmeades y J.R. Schussler. 2004. Improving drought tolerance in maize: view from industry. Field Crop Research 90: 19-34 pp.

Chapman, S.; M. Cooper; D. Podlich y G. Hammer. 2003. Evaluating plant breeding strategies by simulating Gene Action and Dryland Environment Effects. Agronomy Journal 95: 99-113 pp.

Chard, J. 2005. Watermark Soil Moisture Sensors: Characteristics And Operating Instructions, Utah State University. 1-8 pp.

Ciampitti, I.; M. Boxler y F. García. 2010. Nutrición de maíz: requerimientos y absorción de nutrientes. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. IPNI Cono Sur. 48: 14-18 pp.

Cirilo, A.G. 1994. Desarrollo, crecimiento y partición de materia seca en cultivos de maíz sembrados en diferentes fechas. Tesis Magister Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, Buenos Aires. Argentina. 86 pp.

Cirilo, A.G. y F.H. Andrade. 1996. Sowing date and kernel weight in maize. Crop Science 36: 325-331 pp.

- Claassen, M. y R.H. Shaw. 1970. Water deficit effects on corn. II. Grain components. *Agron. J.* 62: 652-655 pp.
- Clemmens, A.J. 1998. Achieving high irrigation efficiency with modern surface irrigation. Irrigation Association Expo Technical Conference. IA-USWCL. Falls Church. 161-168 pp.
- Cooper P.J.M.; P.J. Gregory; D. Tully y H.C. Harris. 1987. Improving water use efficiency of annual crops in the rainfed farming systems of West Asia and North Africa. *Experimental Agriculture* 23:113-158 pp.
- Cox, W. J.; S. Kalonge; D.J.R. Cherney y W.S. Reid. 1993. Growth, yield and quality of forage maize under nitrogen management practices. *Agron. J.* 85:341-347 pp.
- Criado, S.R. 1996. Considerations on main factors which take part in nitrate contamination of groundwater in Spain with relationship to other EU countries. *Fertil. Res.* 43: 203-207 pp.
- Dardanelli, J.; D. Collino; M.E. Otegui y V. Sadras. 2003. Bases Funcionales para el Manejo del Agua en los Sistemas de Producción de los Cultivos de Granos. *Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo.* 375-440 pp.
- Darwich, N. 1998. Manual de la fertilidad de suelos y uso de fertilizantes. Mar del Plata, 182 pp
- Daynard, T.B. y W.G. Duncan. 1969. The black layer and grain maturity in corn. *Crop Sci.* 9: 473-476 pp.
- Dean, T.J.; J.P. Bell; A.J. Baty. 1987. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique. Part I. Senso design and performance. *J. Hydrol. (Amsterdam)* 93:67-78 pp.
- Debaeke, P. y A. Aboudrare. 2004. Adaptation of crop management to water-limited environments. *Europ. J. Agronomy* 21: 433-446 pp.
- de Juan J.A. y F.J. Santa Olalla. 1993. El cálculo y la estimación de la evapotranspiración. En: F.J. Santa Olalla y J.A. de Juan (coords.), *Agronomía del Riego*. Ed. Mundi-Prensa, S.A. y Universidad de Castilla-La Mancha, Madrid, España. 373-423 pp.

---

Dekalb. 2012. [en línea [http://www.dekalb.com.ar/index.php?id\\_semilla=1](http://www.dekalb.com.ar/index.php?id_semilla=1)] [Acceso: 1 de abril de 2013].

Di Napoli, M. 2001. Análisis comparado de deficiencias de nitrógeno y azufre en el cultivo de maíz en siembra directa. Monografía Especialista Programa de Post-Grado en Producción Vegetal. FCA-INTA Balcarce. Argentina.

Dehghanisani, H.; M. Nakhjavani; A.Z. Tahiri y H. Anyoji. 2009 Assessment of wheat and maize water productivities and production function for cropping system decisions in arid and semiarid regions, *Irrig. and Drain*, 58: 105-115 pp.

Derieux, M. y R. Bonhomme. 1982. Heat units requirements for maize hybrids in Europe. Results from the European FAO subnetwork: I. Sowing-silking period. *Maydica* 27: 59-77 pp.

Dreccer, M.; R. Ruiz y G. Madonni. 2003. Bases ecofisiológicas de la nutrición en los cultivos de grano. *Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo*. 481-497 pp.

Diaz-Zorita, M. y G. Duarte. 1997. Fertilización nitrogenada de maíz en el oeste bonaerense. *Actas VI Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino. Buenos Aires*. 144-146 pp.

Di Napoli, M. y G. Gonzalez Montaner. 1997. Parámetros del modelo de balance de nitrógeno para el cultivo de maíz en el sur de la provincia de Santa Fe. *VI Congreso Nacional de Maíz. Pergamino (III)*. 166-172 pp.

Doorenbos, J. y A.H. Kassan. 1986. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Paper n° 33, FAO, Roma, Italia.

Doorenbos, J. y W.O. Pruit. 1984. Las necesidades de agua de los cultivos. *Irrigation and Drainage Paper n° 24*, FAO, Rome, Italy.

Duncan, W.G. 1975. Maize. In *Crop physiology. some case histories* (ed. L.T. Evans), Cambridge and London, Cambridge University Press. 28-50 pp.

- Echarte, L.: F.H. Andrade; V.O. Sadras y P. Abbate. 2006. Kernel weight and its response to source manipulations during grain filling in Argentinean maize hybrids released in different decades. *Field Crops Research*, 96: 307-312 pp.
- Enciso, J.; D. Porter y X. Peries. 2007. Irrigation Monitoring with Soil Water Sensors (Spanish). [En Línea: <http://hdl.handle.net/1969.1/87470>. ] [ Consulta:10 Mayo 2013]
- Evans, C. 1978. The influence of irradiance before and after anthesis on grain yield and its components in microcrops of wheat grown in a constant daylength and temperature regime. *Field Crops Res.* 91: 259-265 pp.
- FAO, 1969. Estudio sobre la rehabilitación de tierras en el valle de Viedma, Informe final Volumen II, Roma, 1969. FAO/SF: 72/ ARG 11.
- FAO, 2002. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Agua y Cultivos: Logrando el uso óptimo del agua en la agricultura. Roma. 26 pp.
- FAO, 2004. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2003-04. Roma. [En línea: <http://www.fao.org/docrep/006/y5160s/y5160s08.htm#de>] [ Acceso: Marzo 2012]
- FAO. 2010. AQUASTAT database. [en línea]. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. Accesible en: [[http://www.fao.org/nr/water/aquastat/dbase/AquastatWorldDataEng\\_20101129.pdf](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/dbase/AquastatWorldDataEng_20101129.pdf)]. [Acceso: Marzo 2012 ]
- Farré, I.; M. van Oijem.; P.A. Leffelaar y J.M. Faci. 2000. Analysis of Maize growth for different irrigation strategies in Northeastern Spain. *European Journal of Agronomy*. 12:225-238 pp.
- Fernández, J.E.; F.Moreno; J.M. Murillo; J.A. Cayuela; E. Fernández-Boy y F. Cabrera. 1996. Water use and yield of Maize with two levels of nitrogen fertilization in SW Spain. *Agricultural Water Management*. 29: 215-233 pp.

---

Fontanetto, H., H. Vivas y O. Keller. 2001. Eficiencia de uso del nitrógeno en maíz con siembra directa. Efecto de la densidad de siembra. Información Técnica de Cultivos de Verano. Campaña 2001. INTA, EEA Rafaela. Publicación Miscelánea N° 95, N° 3: 1-5 pp.

Foster, S.S.D. y P.J. Chilton. 1998. As the land so the water. The effects of agricultural cultivation on groundwater. En: Candela, L. y A. Aureli. (Eds.). Agricultural threats to groundwater quality. Workshop Proceedings. IHP-UNESCO, IAMZ-CIHEAM y Geotechnical Engineering and Geosciences Department-UPC. Zaragoza. 15-44 pp.

Fox, R.H.; G.W. Roth; K.V. Iverson y W.P. Piekielek. 1989. Soil and tissue nitrate test compared for predicting soil nitrogen availability to corn. *Agron. J.* 81: 971-974 pp.

Gallagher, J.N. y P.V. Biscoe. 1978. Radiation absorption, growth and yield of cereals. *J. Agric. Sci. Camb.* 91, 47-60 pp.

Gallo, K.P. y C.S.T Daughtry. 1986. Techniques for measuring intercepted and absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. *Agron. J.* 78: 752-756 pp.

Gardner, F.P.; R.B. Pearce y R.L. Mitchell. 1985. Physiology of crop plants. Iowa State University Press. Ames, IO, USA.

Geointa. 2012. Atlas de suelos de la republica argentina. INTA. [en línea] Búsqueda 24/03/2013.

Gifford, R.M. y J.H. Thorne. 1984. Crop productivity and photoassimilate partitioning. *Science* 225: 801-808 pp.

Gilmore, E.C. y J.S. Rogers. 1958. Heat Units as a Method of Measuring Maturity in Corn *Agron. J.* 50:611–615 pp.

Girardin, P; M. Tollenaar, A. Deltour y J. Muldoon, 1987. Temporary N starvation in maize (*Zea mays* L.): effects on development, dry matter accumulation and grain yield. *Agronomie* 7: 289-296pp.

Grant, R. F.1989. Simulation of maize phenology. *Agron. J.* 81:451-457 pp.

---

Greenwood, D.J.; G. Lemaire; G. Gosse; P. Cruz; A. Draycott y J.J. Langdale. 1990. *Annals of Botany*. 66:425-436 pp.

Guitjens, J.C. 1990. En: Stewart, B.A. y D.R. Nielsen. (Eds.). *Irrigation of agricultural crops. Agronomy Monograph N° 30. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wi.* 537-568 pp.

Hall, A.J.; J.H. Lemcoff y N. Trapani. 1981. Water stress before and during flowering in maize and its effects on yield, its components, and their determinants. *Maydica* 26: 19-30 pp.

Hanson, B.; S. Orloff y P. Douglas. 2000. *California Agriculture [Agricultura Californiana]*, Volumen 54, No. 3:38-42 pp.

Hergert, G.W. 1986. Nitrate leaching through sandy soil as affected by sprinkler irrigation management. *J. Environ. Qual.* 15: 272-278 pp.

Hopkins, S. y D. Jones. 1983. *Research guide to the arid lands of the world.* Orix Press 1983. 391pp.

Huggins, D.R. y W.L. Pan. 1993. Nitrogen efficiency component analysis: an evaluation of cropping systems differences in productivity. *Agronomy Journal* 85:898-905 pp.

Infostat 2008. Grupo Infostat/FCA. Versión 2008/8. Universidad Nacional de Córdoba. Ed. Brujas, Córdoba, Argentina.

INTA. 1997. *Guía Práctica para el cultivo de Maíz.* Buenos Aires. Argentina. 180 pp.

Ishitani, M.; I. Rao; P. Wenzl; S. Beebe y J. Tohme. 2004. Integration of genomics approach with traditional breeding towards improving abiotic stress adaptation: drought and aluminum toxicity as case studies. *Field Crop Res.* 90: 35-45 pp.

Jones, G.H. 1992. *Plants and Microclimate. A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology.* Second edition. Cambridge University Press. Cambridge, Great Britain. 428 pp.

Jones, R.J.; J. Roessle y S. Ouattar. 1985. Thermal environment during endosperm cell division in maize: effect on number of endosperm cells and starch granules. *Crop Sci.* 25: 830-834 pp.

- 
- Jones, C. A. y J. R. Kiniry. 1986. CERES-maize. A simulation of maize growth and development. Texas, A&M Univ. Press.
- García, J.R. 2008. El agua y la producción mundial de alimentos [en línea]. Agua y riego - Problema del agua. Accesible en: [<http://www.aguayriego.com/mostrartabajo.php?codigo=504&cat=produccionaliment>]. [ Acceso: Junio 2011]
- Kang, S.; W. Shi y J. Zhang. 2000. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation. *Field Crops Research* 67: 207-214 pp.
- Kaluli, J.W.; C.A. Madramootoo; X. Zhou; A.F. Mackenzie y D.L. Smith. 1999. Subirrigation systems to minimize nitrate leaching. *J. Irrig. Drain. Eng.* 125 (2): 52-58 pp.
- Karam, F.; O. Mounzer; F. Sarkis y R. Lahoud. 2002. Yield and Nitrogen recovery of lettuce under different irrigations regimes. *J. Appl. Hort.* 4: 70:76 pp.
- Kiniry, J.R.; A. Jones; J.C.O'Toole; R. Blanchet; M. Cabelguenne y D.A. Spanel. 1989. Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain filling for five grain cropspecies. *Field Crops Res.* 20: 51-64 pp.
- Kiniry, J.R. y R. Bonhomme. 1991. Predicting maize phenology. En: Hodges, T. (Ed.). *Predicting crop phenology*. Boca Raton, Ann Arbor., CRC Press. 115-131 pp.
- Kirkegaard, J.; J. Lilley; G. Howe y J. Graham. 2007. Impact of subsoil water on wheat yield. *Australian Journal of experimental Agriculture.* 58, 303-315.
- Klute, A. 1986. *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.* 2nd.ed. Madison, Wis. ASA-CSSA-SSSA.
- Kramer, P.J. 1983. *Water relations of plants.* Academic Press. New York. p. 342389.
- Leib BG; J.D. Jabro y G.R. Matthews. 2003. Field evaluation and performance comparison of soil moisture sensors. *Soil Sci* 168:396-408

---

Lopez Bellido, M. 1991. Cultivos Herbáceos. Vol I. Cereales. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. España.

Maddonni, G.A.; M.E. Otegui y A.G. Cirilo. 2001. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize architecture and light attenuation. *Field Crop Res.* 71:183–193.

Margiotta, F.A.; L. Reinoso y R.S. Martínez. 2008. Evaluacion de Materiales Comerciales de Maiz Campaña 2007/2008. 13 pp. EEA INTA Valle Inferior. [en línea:<http://anterior.inta.gov.ar/f/?url=http://anterior.inta.gov.ar/valleinferior/info/documentos/vegetal/MaizBeltran.pdf>] [Acceso: Abril 2012. ]

Margiotta, F.A.; L. Reinoso y R.S. Martínez. 2009. Evaluación de materiales comerciales de maíz. Campaña 2008/2009. 25 pp. EEA INTA Valle Inferior. [en línea: [http://www.syngentaenvivo.com.ar/2012/ensayos/Maizgrano/ECR\\_Maiz\\_Viedma\\_Beltran\\_2008\\_09.pdf](http://www.syngentaenvivo.com.ar/2012/ensayos/Maizgrano/ECR_Maiz_Viedma_Beltran_2008_09.pdf)]. [ Acceso: Abril 2012. ]

Margiotta, F.A.; R.M. Martínez; H. Iglesias; O. Arriaga; H.O. Chidichimo y M.E. Sempe. 1988. Fertilización de maíz bajo riego en el Valle Inferior de Río Negro. .Actas IV Congreso Nacional de Maiz. Pergamino. pag:106-112.

Margiotta, F.A. y R. Martinez. 1992. Efecto de la Época de Siembra, Densidad y Fertilización sobre el Rendimiento de Maíz de regadío en el Valle Inferior del Río Negro. V Congreso Nacional del Maíz y II Reunión Sud Americana de Maiceros

Martellotto, E.; A. Salinas; J.P. Giubergia; V. Capuccino; P. Salas; E. Lovera; J. Pappalardo y J. Gorgas. 2002. Riego Suplementario en Cultivos Extensivos en la Provincia de Córdoba. Proyecto Regional de Agricultura Sustentable e Impacto Ambiental INTA EEA Manfredi. Córdoba. Argentina.

Martínez, R.M.; H. Chaves; F.A. Margiotta; A. Alarcón y R.S. Martínez. 2004. Producción de maíz en el valle inferior del Río Negro: efecto de la distribución de semillas, la densidad de plantas y la fertilización nitrogenada. *Pilquén*. Año VI: 6:1-7.

Martínez, R.S.; L. Reinoso ; F.A. Margiotta y R.M. Martinez. 2012. Buscando alcanzar altos rendimientos del cultivo de maíz: experiencias en los valles Norpatagónicos . En: actas de la 3º Reunión Internacional de riego, 30 y 31 de Octubre de 2012. INTA Manfredi, Córdoba, Argentina

Masotta, H.T. 1970. Reconocimiento detallado de suelos con fines de riego en el área de influencia del canal secundario VII. Valle Inferior del Río Negro, Argentina. Serie Técnica 5. Instituto de Desarrollo del Valle Inferior del Río Negro (IDEVI). Estación Experimental de Riego y Cultivos. 98 pp

Matinata, E. 2010. Informe programa Maíz Sorgo 2009/2010. Ministerio de Industria, Agricultura y Ganadería. Trelew, Chubut. 7 pp.

Maturano, M.; E. Guevara y S. Mellar. 2002. Efecto del nivel hídrico y nitrogenado en la eficiencia en el uso del agua y el nitrógeno en el cultivo de maíz. Rev. Tec. Agrop. INTA Pergamino. Vol.VII N° 21 Pág. 8-11.

Meisinger, J.J. 1984. Evaluating plant-available nitrogen in soil crops system. En: Hauck, R.D. (ed) Nitrogen in Crop Production. ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wisconsin USA

Mc Mullen, B. 2000. SOIL pak for vegetable growers. Edited by Ann Munroe, Warriewood NSW. ISBN for the SOILpak series 0 7310 9848 X

Melchiri, R.J.M.; O.P. Caviglia; N. Faccendini; A. Bianchini y W.R.. Raun. 2006. Evaluación de fertilización nitrogenada basada en la utilización de un sensor óptico. INTA EEA Paraná. Actualización Técnica en maíz. Serie Extensión n° 41 33-36 pp.

Mistrorigo, D.; O.R. Valentinuz; R. De Carli. 1997. Fertilización de maíz en siembra directa en Entre Ríos. Actas VI Nacional de Maíz. AIANBA, Pergamino, Buenos Aires. 114-117 pp.

Molden, D. 1997. Accounting for water use and productivity. SWIM Paper I. Colombo, Sri Lanka: International Irrigation Management Institute.

Moll, R.H., Kamprath E.J. y Jackson W.A. 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency to nitrogen utilization. Agron. J. 74:562-564.

Muchow, R.C. y R. Davis. 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment II. Radiation interception and biomass accumulation. Field Crops Res. 18: 17-30 pp.

---

Muchow, R. C.; T. R. Sinclair y J. M. Bennet. 1990. Temperature and solar radiation effects on potential maize yields across locations. *Agron. J.* 82:338-343.

Muchow, R.C. y T.R. Sinclair. 1994. Nitrogen response of leaf photosynthesis and canopy radiation use efficiency in field-grown maize and sorghum. *Crop Sci.* 34:721-727.

Murphy, G.M. 2008. Atlas Agroclimático de la Argentina. – 1ª ed. – Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. 160 pp.

Ne Smith, D. S. y J. T. Ritchie. 1992. Short- and long term response of corn to preanthesis soil water deficit. *Agron. J.* 84: 107-113.

Nobel, P.S. 1991. *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. Academic Press, Inc. Los Angeles, Calif. 345-392 pp.

Novoa, R. y R.S. Loomis. 1981. Nitrogen and plant production. *Plant and Soil.* 58: 177-204 pp.

Olsen, S. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Department of Agriculture. Circular n°, 939.

ONU (Organización de las Naciones Unidas). 2005. *Population Challenges and Development Goals*. ST/ESA/SER.A/248. New York. 70 pp.

Otegui, M.E. 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 Magister Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata. 93 pp.

Otegui, M.E.; M.G. Nicolini; R.A. Ruiz y P.A. Dodds. 1995. Sowing date effects on grain yield composition of different maize genotypes. *Agron. J.* 87: 29-33 pp.

Passioura, J.B. 1983. Roots y drought resistance. *Agricultural Water Management*, 7, 265-280 pp.

Pandey, R. K.; J. W. Maranville y A. Admou. 2000. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment. I. Grain yield and yield components. *Agric. Water Management* 46 :1-13.

Papadakis, J. 1960. Clima y ecología. Plan de desarrollo agrícola del Valle de Viedma. Anexo I Consejo Agrario Nacional. Italconsult. Roma.

Paponov, I.; W. Aufhammer; H.P. Kaul y F.P. Ehmele. 1996. Nitrogen efficiency components of winter cereals. *European Journal of Agronomy* 5:115-124 pp.

Pereira, L.S. y R.G. Allen. 1999. Crop Water Requiriments. En: van Liez, H.N. (ed.); L.S. Pereira (coed); F.R. Steinez (coed.). *CIGR Handbook of Agricultural Engineering. Land and Water Engineering (Vol I), Irrigation and Drainage (Cap. 5)*, 213-262. Edited by CIGR, The International Commission of Agricultural Engineering, published by ASAE. ASAE, St. Joseph, MI, USA.

Pierce, F.J. y C.W. Rice. 1988. Crop rotation and its impact on efficiency of water and nitrogen use. En: Hargrove, W. L. (ed.). *Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen*. Madison, Wis., ASA, CSSA, and SSSA, Special Publ. N°51. 21-42 pp.

Pioneer. 2012. [en línea <http://www.pioneer.com/web/site/argentina>. ] [ Consulta: 1 de septiembre de 2012]

Plénet, D. 1995. Fonctionnement des cultures de maïs sous contrainte azotée. Détermination et application d'un indice de nutrition. Thèse de Docteur, INPL, Nancy, France. Université. 115 pp.

Prince, S. D. 1991. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. *Int. J. Remote Sen.* 12: 1313-1330.

Procisur. 2009. El riego en los países del Cono Sur / IICA, Montevideo: IICA, 2010 112 p., ISBN 978-92-9248-269-5

Reinoso, L.; R.S. Martínez; F. Margiotta; R.M. Martínez y P. Zalba. 2009. Estudios de frecuencias de riego sobre el rendimiento de maíz en el Valle Inferior del Rio Negro. En Congreso Nacional del Agua Ed: Dirección Oficial de Impresiones, Rawson. 318 pp. ISBN: 978-987-25369-0-9

Ritchie, S.W. y J.J. Hanway. 1982. How a corn plant develops. Iowa State Univ. Spec. Rep 48. Coop. Ext. Service, Ames, IA.

Rivas, J y Matarazzo, R. 2009. Evaluación de Materiales Normales de Maíz, campaña 2008/2009. 14 pp. En línea [<http://inta.gob.ar/documentos/evaluacion-de-materiales-normales-de-maiz.-eea-inta-ascasubi-2008-09>] [Consulta 5 de septiembre de 2012].

Riverside-USDA. 1964. "Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos" (Manual N° 60 del U S D A). Traducido y publicado por el Instituto Nacional de Investigaciones Agronómicas. Méjico. 115 pp.

Rivetti, A.; J.M.P. Puiatti; J.A. Morábito y A.N. Garello. 2001. Riego complementario del maíz en la zona semiárida argentina en el marco de una agricultura sustentable. Seminario Nacional. «Manejo sustentable del recurso hídrico en zonas áridas». Mendoza. Argentina. 107 pp.

Robins, J.S.; C.E. Domingo. 1953. Some effects of severe soil moisture deficits at specific growth stages in corn. *Agronomy Journal*, 45: 618-621p.

Rosso, J.C. 2012. "Nuestro querido IDEVI: relatos y visiones de una utopía y su realidad". Editorial EDUCO. 221 pp.

Rodríguez, H.J.; J.J. De Battista y J.L. Dardanelli. Eficiencia en el uso del agua en soja y maíz en un vertisol de Entre Ríos. En: Actas del Quinto congreso de la Soja del Mercosur. 14 al 16 de Septiembre de 2011, Rosario Santa fe, Argentina.

Ruget, F. 1991. Présentation d'une méthode simple d'estimation de la contribution de réserves pour le remplissage des grains chez le maiz. *Agronomie* 11: 505-510 p.

Ruiz, R.A.; E.H. Satorre; G.A. Maddonni; J. Cárcova y M.E. Otegui. 2001. Umbrales de decisión para la fertilización nitrogenada en maíz. En: Actas VII Congreso Nacional de Maíz, 2 pp. Pergamino, Buenos Aires, Noviembre 2001. AIANBA (en CD).

Sagardoy, J.A. 2001. La seguridad alimentaria mundial futura y el desarrollo del riego. XIX Congreso Nacional de Riegos. Asociación Española de Riegos y Drenajes (AERYD). Zaragoza. 12 a 14 de junio. 13-14.

Sainz Rosas, H.R.; H.E. Echeverria; E. Herfurth y G.A. Studertt. 2001. Nitrato en la base del talo en maíz. II Diagnostico de la nutrición nitrogenada. *Ciencia del Suelo* 19 (2)

---

Sainz Rozas, H.R.; H.E. Echeverría; G.A. Studdert y G.F. Dominguez. 2000. Agron. J 92:1176 - 1183 p.

Sainz Rozas H.R., H.E. Echeverría y P.A. Barbieri. 2004. Nitrogen balance as affected by application time and nitrogen fertilizer rate in irrigated no-tillage maize. Agron. J. 96: 1622-1631.

Salvagiotti, F.; H. Pedrol; J. Castellarín; J. Capurro; J.C. Felizia; A. Gargicevich; O. Gentili; J. Méndez; N. Trentino. 2002. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz. I – Relación entre la respuesta en rendimiento y la disponibilidad de nitrógeno a la siembra. Revista "Para mejorar la producción" EEA Oliveros INTA. Ediciones INTA. Nro. 20. 67-70 p.

Sánchez, R.M. 2013 Estimación de los requerimientos hídricos de los principales cultivos en el valle bonaerense del río Colorado. Informe Técnico N° 40 INTA-UNS ISSN 03283399.

Schulsser, J.R. y M.E. Westgate. 1991. Maize kernel set at lower potential: I Sensitivity to reduced assimilates during early kernel growth. Crop Sci. 31: 1196-1203 pp.

Sentek. 1999. Diviner 2000. User Guide Version 1.0. (CD-Room). Sentek, Pty. Australia

Severina, I. 2012. La funcionalidad de los sistemas radicales y su aplicación para optimizar el uso del Balance Hídrico En: 3° Reunión Internacional de riego, 30 y 31 de Octubre de 2012. INTA Manfredi, Córdoba, Argentina.

Shaw, R.H. 1988. Climate requerimient. En: Sprague, G.F. y J.W. Dudley (Eds.). Corn and corn improvement. 3. ed. Madison, Wis., ASA\_CSSA-SSSA. 986 pp (Agronomy N° 18)

Shibles, R. 1976. Terminology pertaining to photosynthesis. Crop Sci. 16: 437-439 p.

Shock, C.C.; J.M. Barnun y M. Seddigh. 1998. Calibration of watermark soil moisture sensors for irrigation management. Proceedings of the International Irrigation Show, San Diego, CA. Irrigation Association. 139-146 p.

Sieling, K.; O. Gunther-Borstel y O. Hanus. 1997. Effect of slurry applications and mineral nitrogen fertilization on N leaching in different crop combinations. J. Agric. Sci. 128: 79-86 p.

---

Sinclair, T. y J. Amir. 1992. A model to assess nitrogen limitations on the growth and yield of spring wheat. *Field Crops Res.* 30:63-78 pp

Sinclair, T.R. y R.C. Muchow. 1995. Effect of nitrogen supply on maize yield. I. Modeling physiological responses. *Agron. J.* 87:632-641 p.

Sinclair, T.R. y T. Horie. 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation-use efficiency: A review. *Crop Science* 29: 90-98 p.

Soil Survey Staff. *Keys to Soil Taxonomy.* 2006. 10th Edition. Washington, DC: Natural Resource Conservation Service. USDA. 328 p.

Stakman, W.P. 1980. Measuring soil moisture. En: *Drainage principles and applications.* Vol III. Wageningen. 221-251 p.

Stewart, C.R.; S.F. Boggess, D. Aspirnll y L.C. Paleg. 1977. Inhibition of proline oxidation by water stress. *Plant Physiol.* 59:930-932 p.

Tanner, C.B. y T.R. Sinclair. 1983. Efficient water use in crop production: research or research. *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production.*

Terman, G. y J. Noggle. 1973. Nutrient concentration changes in corn as affected by dry matter accumulation with age and response to applied nutrients. *Agron. J.* 65:941-945 p.

Thomson, S.J. y C.F. Armstrong. 1987. Calibration of the Watermark model 200 soil moisture sensor. *Appl. Eng. Agric.* 3:186-189 p.

Thompson, T.L. y T.A. Doerge. 1996. Nitrogen and water interactions in subsurface trickle-irrigated lettuce. Agronomic, economic and environmental outcomes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 168-173 p.

Thorntwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographic Review* 38: 55-94 p.

---

Tollenaar, M.; T.B. Muldoon y R.B. Hunter. 1979. Effect of temperature on rate of leaf appearance and flowering date in maize. *Crop Sci.* 19: 363-366 p.

Tollenaar, M. y A. Aguilera. 1992. Radiation use efficiency of an old and new maize hybrid. *Agron. J.* 84: 536-541 p.

Totis de Zeljkovich, L.E. 2012. 'Requerimientos agroclimáticos del cultivo de maíz' (Capítulo 1). En: Eyherabide, G. (Ed.), "Bases para el manejo del cultivo de maíz". Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires Argentina. 7-24 p.

Trápani, N. y A.J. Hall. 1996. Effects of level of insertion and nitrogen supply on the expansion of leaves of field-grown sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Plant and Soil* 184: 331-340 p.

Turc, L. 1954. Le bilan d'eau des sols: relation entre les précipitation l'évaporation et l'écoulement. *Annales Agronomiques*, N:4 491-595 p.

Uhart, S.A. 1995. Efecto de la disponibilidad de nitrógeno y carbono sobre la determinación del número de granos y del rendimiento en maíz. Tesis DR. Univ. Nac. de Mar del Plata, Buenos Aires. 110 p.

Uhart, S.A. y F.H. Andrade. 1995. Nitrogen deficiency in maize. I Effects on crop growth, development, dry matter partitioning and kernel set. *Crop Sci.*, 35: 1376-1383 p.

Vallone, P.; V. Gudelj; C. Galarza y B. Masiero. 2003. Potencial de rendimiento en maíz sin restricciones hídricas ni nutricionales. Campaña 2002/2003. Estación Experimental Marcos Juárez. INTA Marcos Juárez. Córdoba. Argentina. [<http://www.inta.gov.ar/mjuarez/info/documentos/maiz/potrend03/>] [Acceso:19/05/2010].

Westgate, M.E. y J.S. Boyer. 1986. Silk and pollen water potentials in maize. *Crop Sci.* 26: 946-951 p.

White, J.W.; G.S. McMaster y G.O. Edmeades. 2004. Genomics and crop response to global change: what have we learned?. *Field Crop Research* 90: 165-169 p.

---

Williams, W.A.; R.S. Loomis y C.R. Lepley. 1965. Vegetative growth of corn as affected by population density. I. Productivity in relation at interception of solar radiation. *Crop. Sci.* 5: 211-215 p.

Zappi, C.A. 2012. Evaluación de las posibilidades de expansión del riego en la Argentina. En: *Actas de la VI Jornadas de Actualización en Riego y Fertirriego*. Mendoza, Argentina.

Zumelzú, G. y C. Roqué. 2012. Riego Discontinuo en Siembra Directa. [En línea <http://pyrargentina.com.ar/images/galerias/61-201104281715091.pdf>, Hoja Técnica Nro. 17 P&R. 6 pág.] [Consulta: 6 de septiembre de 2013]