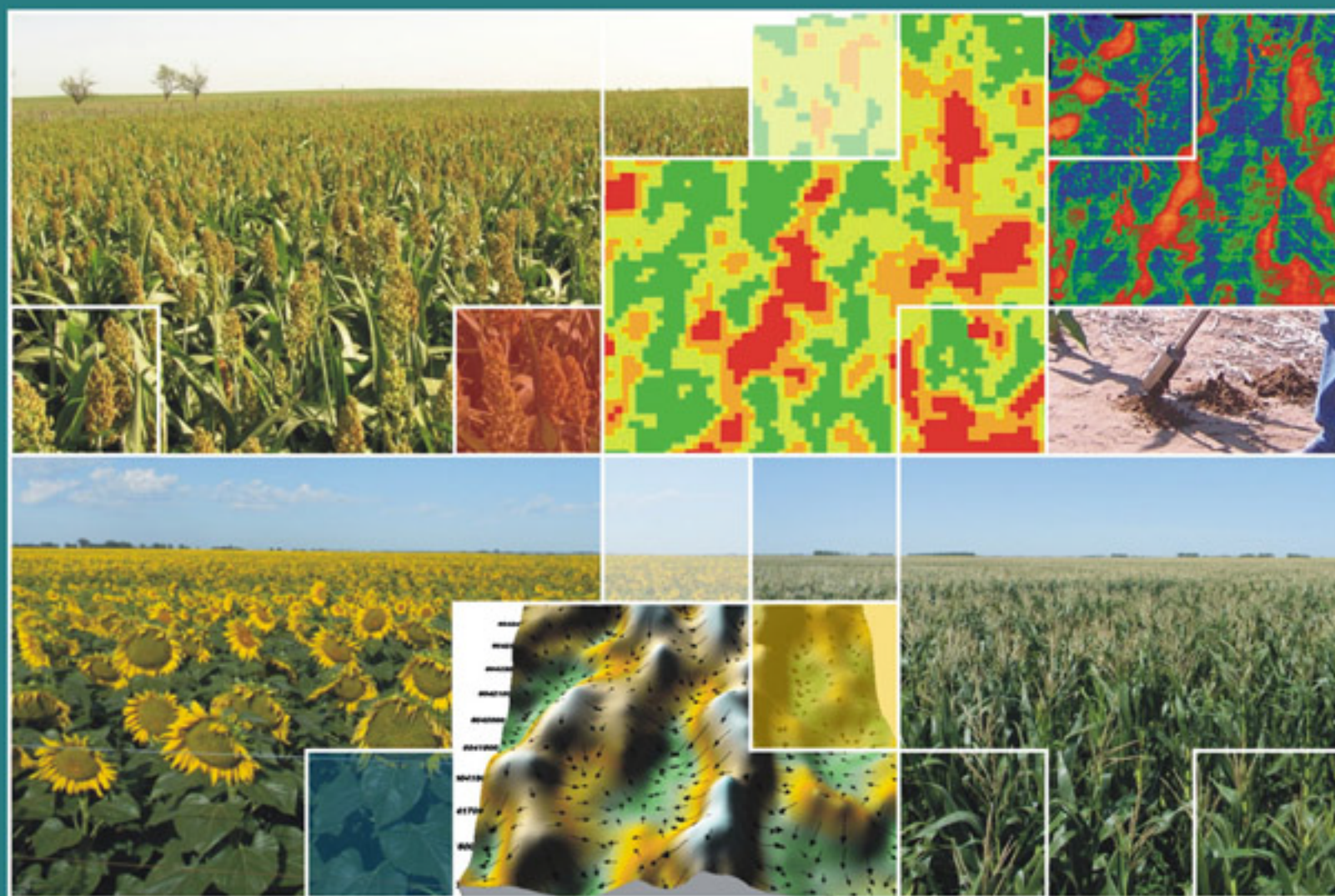


Avances de la agricultura por ambientes en la región semiárida pampeana

Editores: *Andrés Corró Molas y Eugenia Ghironi*



▪ Ediciones

Instituto Nacional de
Tecnología Agropecuaria



Avances de la agricultura por ambientes en la región semiárida pampeana

Editores: Andrés Corró Molas y Eugenia Ghironi



EEA Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas"
**Instituto Nacional de
Tecnología Agropecuaria**

Diseño Gráfico

Dis. Gráf. Francisco Etchart

Impresión

Gustavo J. Moyano

Luisa Blatner de Mayoral

Impreso en los talleres gráficos de la
EEA INTA Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas"

Tirada de 500 ejemplares

Agosto de 2012



EDICIONES INTA
EEA INTA Anguil Ing. Agr. Guillermo Covas
(6326) Anguil, La Pampa, Argentina.

Contenidos

CAPÍTULO 1	5
Necesidad de reconocer, jerarquizar y categorizar factores que afectan la producción y sustentabilidad	
Alberto Quiroga	

CAPÍTULO 2	10
Imágenes satelitales y aéreas en aplicaciones sitio-específicas	
María Soledad Mieza, Federico D. Kovac y Daniel E. Martínez	

CAPÍTULO 3	15
Estudio de la relación entre la temperatura de la cobertura vegetal e índice de vegetación en girasol en ambientes con deficiencias hídricas	
Mauricio Farrell	

CAPÍTULO 4	21
Manejo sitio-específico de densidades en los cultivos de girasol, maíz y sorgo en la región semiárida pampeana central	
Eugenia Ghironi, Andrés Corró Molas, Adriana Gili, Eduardo Hevia, Hugo Reinoso	

CAPÍTULO 5	56
Agronomía por ambientes en la práctica	
Daniel E. Martínez	

Anexo color	63

Alberto Quiroga
EEA INTA Anguil “Ing. Agr. Guillermo Covas”
UNLPam, Facultad de Agronomía, La Pampa

Aspectos del manejo por ambientes. Necesidad de reconocer, jerarquizar y categorizar factores que afectan la producción y sustentabilidad

El desafío de hacer más eficientes los sistemas mixtos de regiones semiáridas-subhúmedas implica adecuar los recursos y prácticas agronómicas a los requerimientos de los cultivos y aptitud de los suelos. Para alcanzar este objetivo resulta clave identificar los factores que inciden sobre la productividad, y con más razón, establecer un orden jerárquico de los mismos para distintos ambientes de acuerdo a la “Ley del Mínimo”. Un manejo integral debe incorporar además aspectos de gestión ambiental que al igual que el rendimiento de un cultivo requiere de precisiones y abordaje sitio-específico. El uso de tecnología “por defecto” puede dar lugar a una baja eficiencia de uso del agua, mientras que el uso de tecnología “por exceso” puede generar efectos contraproducentes en los recursos. En este contexto exponemos algunos resultados e ideas con la finalidad de contribuir a un uso más racional y sustentable de los recursos agua y suelo, al cual la Agricultura y Ganadería de precisión pueden realizar un aporte relevante.

Los términos manejo por ambientes, manejo sitio-específico fueron desarrollados en el contexto de Agricultura de Precisión (AP) y definido por algunos autores como la *“Adecuación de la aplicación de recursos y de prácticas agronómicas a los requerimientos de suelos y cultivos, teniendo en cuenta tanto las variaciones en el espacio como en el tiempo dentro de un potrero”*. Esta “adecuación” no solo debe contemplar la productividad de los cultivos sino también la conservación de los recursos suelo y agua. Las técnicas de AP no han sido adoptados por los productores en

la medida que se esperaba y entre las posibles razones se mencionan la falta de desarrollo de sistemas de soporte de decisiones y las escasas experiencias de evaluación de la variabilidad temporal y espacial en experimentación a campo.

En relación con la sustentabilidad

Por lo expuesto, para lograr avanzar en cuanto al “manejo sustentable por ambientes”, es necesario que la complejidad y multidimensión de los procesos sean simplificados a través de indicadores. Cantú et al., (2008) señalan que el antecedente más importante surge de la Organización para el Desarrollo y la Cooperación Económica (1991) cuando publica el SET preliminar de indicadores ambientales y posteriormente (1995) lanza el modelo de Presión, Estado y Respuesta para evaluar y monitorear los proyectos de desarrollo y las condiciones del ambiente a distintas escalas.

Este Modelo parte de una relación de causalidad donde se considera que las actividades humanas ejercen una PRESIÓN sobre el ambiente, cambiando la calidad de los recursos naturales (ESTADO). La información sobre estos cambios enriquece las instancias de toma de decisiones en la sociedad (RESPUESTA).

Teóricamente, sí se puede evaluar cual es la presión de uso al que es sometido cualquier recurso natural y, por otra parte, si ha través de los cambios de estado o calidad del recurso se puede evaluar el efecto de esa presión, es posible establecer la necesidad de regulaciones o el cambio de las mismas si estas ya existieran (Cantú et al., 2008).

Sin embargo se plantea cierta complejidad, dado que frente al mismo indicador de presión los indicadores de estado pueden responder de distinta manera de acuerdo a la granulometría del suelo, comprobándose en algunos casos (ej. materia orgánica) efecto de aditividad (Quiroga et al., 2008), situación que limita el uso de indicadores individuales resultando conveniente el uso de indicadores compuestos (Quiroga et al., 2005). Además, para un mismo indicador de presión y en suelos de similar composición granulométrica el indicador de estado puede variar en función del espesor del suelo. Estas situaciones tienen lugar en regiones semiáridas, dado que tanto la granulometría como el espesor de suelo son principales factores condicionantes de la capacidad de retención de agua útil y consecuentemente de la productividad.

Por ello, Cantú et al., (2008) indican que algunos modelos son criticados por sus relaciones causales que resultan muy simplistas y pueden conducir a considerar los sistemas naturales como receptores pasivos, que no presentan mecanismos de autorregulación que permitan equilibrar o compensar los cambios (resiliencia, capacidad buffer).

Resulta clave entonces, desde el punto de vista de la sustentabilidad y en orden a elaborar estrategias de manejo conservacionistas, diferenciar ambientes con distinto potencial productivo.

En relación con la productividad

Reconocer y jerarquizar los factores que generan variación de rendimiento es el paso inicial del manejo por ambientes o sitio-específico. Es necesario reconocer si un factor es causa principal de variación, o al igual que el rendimiento, es consecuencia de la influencia de otro factor. En una segunda etapa es necesario categorizar el factor a través de su rango de variación. Es decir establecer categorías para la toma de decisiones.

Por ejemplo, si la diferente capacidad de retención de agua (CRA) de los suelos (loma y bajo) de un mismo lote condiciona el rendimiento y el efecto acumulado de estas diferencias de rendimiento condiciona en el tiempo los contenidos de materia orgánica (diferente fertilidad entre sitios), es posible que también encontremos relación entre contenido de N y rendimiento. Esto nos llevaría a fertilizar diferencialmente con N los

ambientes. Sin embargo tanto el rinde como N son consecuencia de variaciones en la CRA, con lo cual el ajuste “diferencial” de la fertilidad nitrogenada entre ambientes no produce necesariamente los efectos esperados (aumento de rendimiento en sitio de menor CRA). Es decir se identificó el factor y se lo jerarquizó, en este caso agua esta antes que N. Pero esto no basta, es necesario categorizar los niveles de agua disponible estableciendo un valor a partir del cual es más probable la respuesta a la fertilización. Por ejemplo, para verdeos de invierno en el este de La Pampa, es necesario disponer a la siembra de + 80 mm de agua útil en los primeros 140 cm del perfil para decidir una fertilización nitrogenada; para girasol es conveniente establecer el cultivo en perfiles con disponibilidades de agua superiores a los 120 mm en los primeros 200cm de perfil (Figura 1). En esta Figura se comprueba que con un almacenaje de 120 mm es posible reducir significativamente los riesgos del cultivo. Complementariamente debe tenerse en cuenta el perfil hídrico, es decir, como está distribuída la humedad en el perfil del suelo. Perfiles con el mismo contenido de agua útil pueden presentar distinta distribución, lo cual puede dar lugar a diferencias en el desarrollo del cultivo.

El ajuste del manejo por ambientes también requiere del conocimiento de las características del cultivar que se utilizará. Por ej. en verdeos de invierno existen importantes diferencias entre especies y entre cultivares dentro de una especie en las curvas de acumulación de materia seca (crecimiento). Un verdeo de mayor precocidad requiere inicialmente de más agua y nitrógeno. Además aparece un factor clave que es la profundidad efectiva de las raíces (PER), la cual puede condicionar significativamente la disponibilidad de agua entre cultivares de una misma especie y de la misma manera dejar distintas reservas de agua útil en el perfil para el cultivo sucesor. Concretamente, el mapa de variación de rendimientos de un lote puede variar entre cultivares de soja si el factor condicionante fue la disponibilidad de agua. De la misma manera la respuesta a N puede variar entre híbridos de maíz en la medida que aquéllos con mayor profundidad efectiva de raíces se encuentren menos limitados por la disponibilidad de agua. Es decir que a través de la rotación-secuencia de cultivos no siempre se uti-

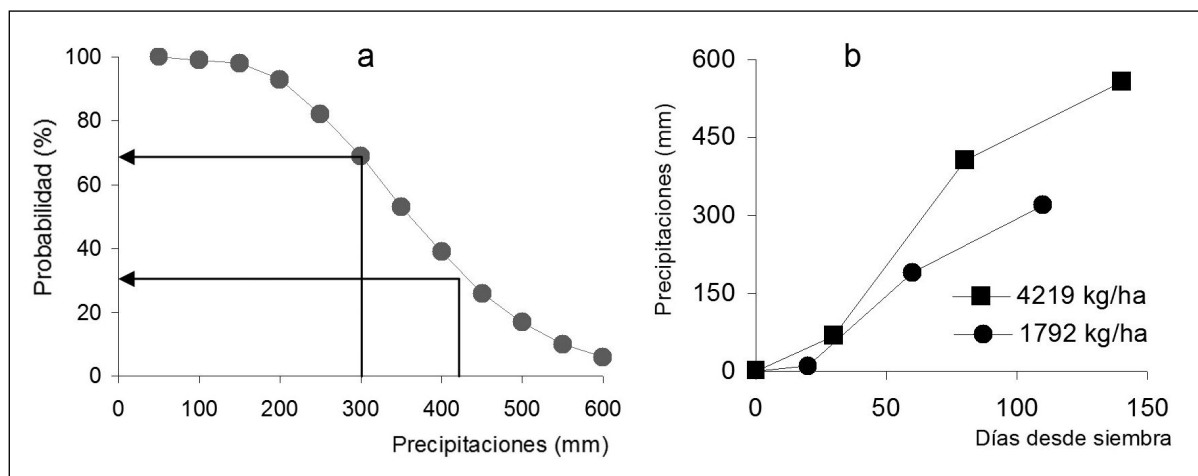


Figura 1. a) Probabilidad de ocurrencia de precipitaciones de octubre a febrero, (Anguil, 1921-2005). **b)** Usos consuntivos, ciclo y rendimiento para un híbrido de girasol con y sin limitaciones hídricas.

liza el mismo espesor de suelo, el cual resultará variable en función de la PER. Finalmente, un mismo cultivar (igual PER) puede experimentar distinto comportamiento condicionado por la condición física del suelo, principalmente por la macroporosidad: proporción, orientación, interconexión, tortuosidad, estabilidad.

En relación con el manejo del agua

Por lo expuesto, las estrategias de manejo del agua en sistemas de producción de secano deben necesariamente abordar problemáticas en la captación, almacenaje, conservación y eficiencia de uso, resultando necesario: a) un mejor conocimiento sobre los factores que gobiernan la relación transpiración/evaporación, la eficiencia de almacenaje (interfase suelo-atmósfera) y la eficiencia de uso del agua pluvial, resultando en este punto clave la identificación de las mejores combinaciones genotipo/ambiente/manejo para una producción más eficiente; b) un mejor conocimiento sobre la dinámica de las napas (oportunidad o riesgo), principalmente en cuanto a su variación estacional.

En estas condiciones, la capacidad de retención (CRA) y los contenidos de agua útil (AU) a la siembra poseen una significativa influencia en la productividad. Esta disponibilidad de agua resulta dependiente de aspectos genéticos de los suelos determinantes de la CRA (textura, espesor), del cultivo (ciclo, índice de cosecha, profundidad efectiva de raíces: PER) y del manejo (sistema de

labranza, cultivo antecesor, barbecho, cobertura). El régimen hídrico también puede ser influenciado por la presencia de la napa freática (profundidad, ascenso capilar, contenido de nutrientes) y por factores que condicionan la captación (infiltración, conductividad hidráulica), almacenaje y eficiencia de uso del agua.

Si bien todos los factores mencionados pueden ejercer algún grado de influencia sobre la producción, el peso relativo de los mismos normalmente varía entre sitios-ambientes con distintas características edafoclimáticas. Identificar los factores más importantes (a nivel de sitio) y establecer cierto orden jerárquico en los mismos resulta imprescindible para sentar las bases del manejo.

Probabilidad de precipitaciones, usos consuntivos y rendimientos

Cuando se analiza la gestión del agua en un sistema de producción es conveniente considerar la rotación de cultivos como una secuencia de usos consuntivos que se suceden en el tiempo en un mismo potrero y que, como se mencionó anteriormente, utilizaran distintos espesores de suelo. Durante el ciclo de cada cultivo resulta necesario considerar también cual es la probabilidad de que las precipitaciones cubran los requerimientos hídricos del mismo. En tercera instancia es necesario evaluar si la diferencia entre las precipitaciones (oferta) y los requerimientos del cultivo (demanda) puede ser cubierta con el agua almacenada en el suelo en periodos previos a la

Tabla 1. Capacidad de retención de agua (mm) en función del espesor de suelo y del contenido de arcilla más limo. Mayor número de X indica mayor aptitud (la condición física de los suelos de textura más fina puede limitar el cultivo).

Espesor (m)	Arcilla + Limo (%)				
	20	30	40	50	60
0,4	X	X	X	X	X
0,8	X	XX	XX	XX	XXX
1,2	XX	XXX	XXX	XXXX	XXXX
1,6	XXX	XXXX	XXXX	XXXXX	XXXXX
2	XXXX	XXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX

siembra (barbecho). Esto dependerá entre otros factores de la capacidad de retención de agua del suelo (textura y espesor del mismo), y también de la profundidad efectiva de las raíces (PER) del cultivo en cuestión. De este primer análisis, surge una idea bastante aproximada sobre la viabilidad del sistema de producción (Figura 1).

La cobertura con residuos del suelo es uno de los principales factores que regula la dinámica hídrica en la interfase suelo-atmósfera y consecuentemente puede influenciar significativamente sobre el ambiente. Prasad y Power (1991) mostraron que la cobertura del suelo tiende a optimizar la relación transpiración/evaporación, reduciendo las pérdidas por evaporación e incrementando la eficiencia de uso del agua. Sin embargo, el espesor de suelos y/o la PER condiciona la eficiencia de los barbechos y los efectos de la cobertura (Fernández, 2007). Fontana et al. (2006) comprobaron además que el rendimiento de trigo, para un mismo nivel de cobertura, varió no sólo con el espesor de suelo sino también con la textura. Estos autores determinaron que en perfiles del mismo espesor y cobertura de rastrojo el rendimiento de trigo fue mayor en aquellos de granulometrías más finas. Sobre la base de lo expuesto en la Tabla 1, se presenta una clasificación utilitaria de perfiles de suelos en base a la composición granulométrica y el espesor. Ambos parámetros son los principales condicionantes de la capacidad de retención de agua, y como se expuso anteriormente, de la eficiencia de los barbechos y la producción de los cultivos en la región semiárida pampeana.

Influencia de la napa

La presencia de napa y/o ascenso capilar desde la zona saturada representa una oportunidad para cubrir los requerimientos de uso consuntivo de los cultivos pero también un riesgo de salinización y/o alcalinización de los suelos. Saks et al. (2010) evaluaron durante tres años la contribución de las napas al rendimiento del cultivo de maíz y respuesta a la fertilización nitrogenada. La Figura 3 muestra la variación del rendimiento de maíz de los tratamientos testigos (1262 a 13322 kg ha⁻¹) y fertilizados (829 a 18113 kg ha⁻¹) en función de los contenidos de agua útil a la siembra. En sitios con menor reserva de agua útil el aporte de N no influyó positivamente sobre el cultivo, registrándose similares e incluso menor rendimiento que el testigo. Los rendimientos promedio de los tratamientos sin fertilizar variaron entre 4012 (sin napa) y 9454 (con napa) con una mayor respuesta a la fertilización en los sitios con napa (+ 3060 kg ha⁻¹) respecto de los sin napa (+ 360 kg ha⁻¹).

En base a lo expuesto, es evidente que al elaborar estrategias de manejo resulta necesario considerar la condición de sitio por el peso relativo de los distintos factores que condicionan la producción y también la sustentabilidad. Por ejemplo, la adopción de la siembra directa puede contribuir significativamente a una mayor eficiencia de uso del agua pluvial si la secuencia de cultivos posibilita la realización de barbechos adecuados, si el nivel de cobertura es suficiente para optimizar la relación transpiración/evaporación, si el perfil de suelo posee una adecuada capacidad de retención de agua, si la profundidad efectiva de raíces es adecuada para ese perfil y si los nutrientes no condicionan la EUA.

BIBLIOGRAFÍA

- Cantú M., A. Becker, J. Bedano. 2008. Evaluación de la sustentabilidad ambiental en sistemas agropecuarios. UNRCuarto, 184pp.
- Eiza M., P. Carfagno, A. Quiroga. 2010. Eficiencia en el uso del agua de distintos cultivos de cobertura en el oeste de la provincia de Buenos Aires. XXI Congreso AACs, Rosario.
- Fernández, R., Quiroga, A., Noellemeyer, E., Funaro, D., Montoya, J., Hitzmann, B., Peinemann, N. 2008. A study of

the effect of the interaction between site-specific conditions, residue cover and weed control on water storage during fallow. *Agric. Water Manage.* 95, 1028-1040.

- Fernández R. 2007. Efecto de la cobertura del suelo durante el barbecho para cultivos estivales en la región semiárida pampeana. Tesis Magister en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca. Argentina. 72 pp
- Fontana F., M. Paturlane, M. Saks, A. Quiroga. 2006 Efecto del suelo sobre propiedades edáficas y rendimiento de trigo en la región semiárida pampeana. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Frasier I., R. Fernandez y A. Quiroga. 2010. Influencia del manejo sobre la eficiencia de uso del agua para la producción de forraje en centeno. I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Azul, Buenos Aires.
- Jobbágy, E.G. y Santoni, C. 2006. La (nueva) agricultura y la hidrología en la llanura chaco pampeana: Desafíos para las próximas décadas. XXII Reunión Argentina de Ecología: Hechos y Perspectivas.
- Lampurlanés J., C. Cantero-Martínez. 2003. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. *Agron. J.* 95: 526-536.
- Nielsen D., P. Unger, P. Miller. 2005. Efficient Water Use in Dryland Cropping Systems in the Great Plains. *Agron. J.* 97:364-372.
- Noellemeyer E., A. Quiroga, D. Estelrich. 2006. Soil quality in three range soils of the semi-arid Pampa of Argentina. *Journal of Arid Environments* 65:142-155.
- Pala M., J. Ryan, H. Zhang, M. Singh, H. Harris. 2007. Water-use efficiency of wheat-based rotation systems in a Mediterranean environment. *Agric. Water Manage.* 93:136-144.
- Quiroga A., D. Buschiazzo, N. Peinemann. 1998. Management of discriminant properties in semiarid soils. *Soil Science* 163 (7):591-597.
- Quiroga A., M. Díaz-Zorita, D. Buschiazzo. 2001. Safflower productivity as related to soil water storage and manage-

ment practices in semiarid regions. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32(17&18):2851-2862.

- Quiroga A., R. Fernández, D. Funaro, N. Peinemann. 2008. Materia orgánica en Molisoles de la región semiárida pampeana. Influencia sobre propiedades físicas y productividad. En Estudio de las Fracciones Orgánicas en Suelos de Argentina. AACCS.
- Quiroga A., R. Fernández, E. Noellemeyer. 2009. Grazing effect on soil properties in conventional and no-till systems. *Soil & Till. Res.* 105:164-170.
- Quiroga A., D. Funaro, E. Noellemeyer, N. Peinemann. 2005b. Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil & Till. Res.* 90:63-68.
- Quiroga A., D. Funaro, R. Fernández, E. Noellemeyer. 2005. Factores edáficos y de manejo que condicionan la eficiencia del barbecho en la Región Pampeana. *Ciencia del Suelo.* 23: 79-86.
- Prasad R., J. Power. 1991. Crop residue management. *Advances in Soil Sc.* 15: 205-241.
- Resch G. 2003. La sustentabilidad como contexto productivo. INTA Canals, 5pp
- Saks M., A. Quiroga, R. Fernandez, P. Zalba. 2010. Efecto de la disponibilidad de agua y nitrógeno sobre la productividad de maíz en Molisoles de la región semiárida y subhúmeda pampeana. XXI Congreso AACCS, Rosario.
- Viglizzo, E.F., Lértora, F., Pordomingo, A.J., Bernardos, J.N., Roberto, Z.E. and Valle, H.D. 2001. Ecological lessons and applications from one century of low external-input farming in the pampas of Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 83:65-81.
- Viglizzo, E.F., Jobbágy, E.G., Carreño, L., Frank, F.C., Aragón, R., Oro, L.D. and Salvador, V. 2009. The dynamics of cultivation and floods in arable lands of Central Argentina. *Hydrology and Earth System Sciences* 13:491-502.
- Wallace, J.S. 2000. Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 82, 105-119.

María Soledad Mieza¹, Federico D. Kovac¹ y Daniel E. Martínez²

¹ UNLPam, Facultad de Ingeniería, Gral. Pico, La Pampa

² Daniel Martínez & Asoc. Consultora Agropecuaria, Gral. Pico, La Pampa

Imágenes satelitales y aéreas en aplicaciones sitio específicas

INTRODUCCIÓN

Las imágenes satelitales, para usos civiles, empezaron a utilizarse en forma regular en la década de 1970 a partir del programa Landsat gestionado por la NASA y el US Geological Survey que consiste en una serie de misiones satelitales para la observación de la tierra. Los satélites de estas misiones, de los cuales hay dos actualmente en órbita y planes para otros a futuro, posibilitaron la adquisición de imágenes de todo el planeta en forma sistemática y el consiguiente desarrollo de aplicaciones para el monitoreo de recursos naturales así como efectos antrópicos. Muchas de estas aplicaciones están orientadas a la agricultura, en general a nivel regional, como estimación de superficies cultivadas, monitoreo de evolución de cultivos, etc. Dada la importancia económica de la agricultura en nuestro país, y considerando sus características particulares, esto es, grandes extensiones dedicadas a la agricultura extensiva, las imágenes satelitales representan una herramienta ideal para monitorear y caracterizar distintos aspectos de esta actividad en forma precisa, y a costos relativamente bajos comparados con las metodologías tradicionales que implican trabajos de campo exhaustivos generalmente inviábiles por motivos económicos o prácticos. Durante los últimos años, con el surgimiento de los sistemas de “Manejo de Sitio Específico” usualmente denominados como “Agricultura de Precisión” han comenzado a desarrollarse aplicaciones a escalas más pequeñas, a nivel de unidades de manejo (lotes) a partir de imágenes satelitales. Un relevamiento exhaustivo de las posibilidades y limitaciones de la teledetección en los sistemas de agricultura de preci-

sión puede encontrarse en Moran et. al. 1997. En este trabajo se detallan los requisitos necesarios para la selección de las imágenes para aplicaciones en esta escala, los datos satelitales disponibles en nuestro país, aplicaciones desarrolladas en particular en la zona NE de La Pampa y perspectivas de futuras misiones satelitales.

IMÁGENES SATELITALES

Existen muchos tipos de imágenes satelitales, para seleccionar el tipo de imagen a utilizar para aplicaciones sitio específicas algunos aspectos a tener en cuenta son:

- *El tipo de imagen a utilizar:* una de las opciones es utilizar imágenes ópticas, que son aquellas que se generan mediante sensores que capturan la porción de la radiación solar que llega al sensor a bordo del satélite luego de interactuar con la superficie terrestre (cultivos, agua, suelo desnudo, etc). De toda la radiación solar, para estudios en vegetación son especialmente de interés aquellas zonas del espectro electromagnético en el visible y algunas porciones del infrarrojo. Por lo tanto, es importante destacar que una imagen no es una foto, sino que contienen información de los valores de reflectancia de la superficie terrestre en distintas zonas del espectro electromagnético. Estas zonas en las que el sensor adquiere información se denominan bandas y son particulares para cada sensor.
- *Disponibilidad:* es necesario que las imágenes que se pretende utilizar estén disponibles en forma operativa y con una frecuencia temporal conocida.

- *Resolución espacial*: la resolución espacial está asociada al tamaño de los objetos que pueden discriminarse, o al nivel de detalle de una imagen. Al momento, imágenes de resolución espacial media, 20 a 30 m de píxel, han mostrado resultados muy satisfactorios. Para utilizar imágenes de mayor resolución espacial debe analizarse si el incremento en el costo, tiempos de procesamiento y disponibilidad justifican las aplicaciones a desarrollar.

Imágenes Landsat

Como se mencionó anteriormente las imágenes de la serie Landsat, son de las más utilizadas para aplicaciones agrícolas. Estas imágenes están disponibles desde hace casi 40 años a nivel mundial, y en Argentina desde 1997 por medio de la agencia espacial nacional (CONAE). Actualmente, están en órbita dos satélites de la serie, Landsat 5 y Landsat 7, que poseen características similares entre sí, en lo que respecta a las bandas (3 en el visible y 4 en el infrarrojo), resolución espacial (30 m) y un período de revisita de 16 días, esto es el tiempo que transcurre para que el satélite adquiera imágenes de una misma zona. Cada una de estas imágenes cubre una superficie de 185 x 185 km. Cabe mencionar que, pese a que están disponibles cada 16 días, en caso de presencia de nubes, las imágenes reflejan esa situación impidiendo obtener información del suelo.

En este momento, la disponibilidad de imágenes es limitada debido a dos situaciones particulares, una es la antigüedad del satélite Landsat 5 que ha superado ampliamente su vida útil, que usualmente es de 4 a 5 años, permaneciendo en órbita por 27 años por lo cual la adquisición de imágenes se encuentra suspendida por desperfectos técnicos. El otro satélite operativo de la serie Landsat, el 7, al poco tiempo de estar en órbita sufrió un desperfecto técnico que hace que las imágenes presenten una serie de zonas sin datos, lo que resulta en franjas oscuras en cada imagen lo que limita en muchos casos su utilización. No obstante esta situación particular actual, el gran potencial de estas imágenes, es la disponibilidad de imágenes históricas por más de 15 años sobre Argentina. En términos generales las imágenes Landsat presentan una relación adecuada entre área de cobertura, resolución espacio-temporal y costo para ser utilizadas operativamente en aplicaciones sitio específicas.

Imágenes CBERS

El programa CBERS, es un programa conjunto entre Brasil y China para el desarrollo de satélites de observación terrestre. Se han puesto en órbita al momento los satélites CBERS 1, 2 y 2B, que aunque ya no están operativos, hay disponibles imágenes multiespectrales similares a las Landsat por algunos períodos de tiempo. La resolución espacial en este caso es superior (20m), pero su resolución temporal era de 26 días.

Satélite Argentino SACC

El satélite SAC-C fue el primer satélite argentino de observación terrestre del que se dispusieron imágenes en forma operativa. Fue puesto en órbita en 2000 y pese a que la vida útil estimada era de cuatro años, proveyó imágenes en forma sistemática de nuestro país por más de diez años. Una de las cámaras a bordo del SAC-C era una cámara multiespectral denominada MMRS, en 5 bandas en el visible e infrarrojo. Sin embargo para aplicaciones a nivel de lote su resolución espacial no es adecuada (175 metros), aunque resultan muy apropiadas para estudios regionales dado su resolución espacial y ancho de barrido (360 km).

Imágenes de Alta Resolución

Imágenes de alta resolución espacial se consideran aquellas que en general tienen un tamaño de píxel de menos de 5m. Desde hace aproximadamente diez años están disponibles imágenes ópticas de alta resolución espacial que son provistas por empresas privadas, a diferencia de las anteriores que suelen ser provistas por las agencias espaciales. Algunos ejemplos de este tipo de imágenes son: IKONOS, QUICKBIRD y GEOEYE cuyas resoluciones espaciales, para las imágenes multiespectrales, son de 4m, 2.4m y 1.65m respectivamente. Pese al gran atractivo visual de este tipo de imágenes su utilización en forma sistemática se ve limitada por los costos, la necesidad de solicitarlas con anticipación y la capacidad de procesamiento necesaria. Pese a que se requiere más experiencia con este tipo de datos, al momento se han utilizado para detección de situaciones particulares, fallos en la aplicación de insumos y condiciones puntuales. Para la delimitación de ambientes debería poder contarse con mayor número de imágenes pero a-priori, no contribuyen significativamente a la delimitación de ambientes dado que la alta resolución espacial

hace también que la variabilidad espacial sea muy elevada.

Imágenes Aéreas

Otra opción para obtener datos multiespectrales de alta resolución es mediante cámaras a bordo de aviones. La resolución espacial que se puede obtener en estos casos es similar a la de las imágenes satelitales de alta resolución, en función de la cámara utilizada y la altura de vuelo. La ventaja principal de estas imágenes es que pueden adquirirse en las fechas y lugares de interés y con la frecuencia temporal deseada.

EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES

Fotointerpretación

Una vez seleccionada la imagen a utilizar existen diversas formas de extraer información de ellas. El mecanismo más simple denominado fotointerpretación consiste en observar una imagen en alguna combinación de bandas y extraer conclusiones a partir de observar la textura, el color y las formas. Para visualizar una imagen, se seleccionan tres de las bandas que las componen y se les asigna un color azul, verde o rojo; por lo que no hay una única manera de visualizar cada imagen, sino que depende de aquello que se pretende estudiar. Una de las combinaciones de bandas y colores más utilizadas para vegetación se denomina falso color compuesto Standard, que comprende las bandas verde, roja e infrarroja cercana. Esta combinación es muy utilizada para estudios en vegetación, y como característica distintiva la vegetación verde se presenta en distintos tonos de rojo.

Procesamiento digital

Como ya se mencionó, las imágenes contienen información sobre como refleja la radiación solar en cada banda un determinado cultivo o cobertura. A partir de esta información, mediante procesamiento digital utilizando softwares adecuados puede extraerse información sobre cada cultivo. Uno de los algoritmos más utilizados es el índice de vegetación ampliamente difundido denominado NDVI por sus siglas en inglés (Normalized Difference Vegetation Index) que originalmente fue definido por Tucker (1979). El NDVI se define como:

$$NDVI = \frac{Nir - R}{Nir + R}$$

Donde Nir es la reflectancia de la banda infrarroja cercana y R la reflectancia de la banda roja. Este índice puede asociarse con características de la cobertura de vegetación como la biomasa, el índice de área foliar y el porcentaje de cobertura. Toma valores de -1 a 1; en particular para la vegetación toma valores positivos siendo mayores para la vegetación vigorosa. Pueden realizarse otros tipos de procesamiento para extraer información, por ejemplo clasificaciones no-supervisadas y supervisadas, índices varios, análisis de componentes principales y otros algoritmos específicos de procesamiento de imágenes.

Ejemplos de aplicación

Las aplicaciones mostradas en este trabajo se desarrollaron en la zona NE de la Provincia de La Pampa, fundamentalmente para los cultivos de girasol y maíz para lotes cuya superficie promedio es de 100 ha.

Delimitación de ambientes productivos

Para la implementación de sistemas de Manejo de Sitio Específico una de las etapas fundamentales es la caracterización de espacial de cada unidad de manejo (lote) y la delimitación de zonas con características similares (zonas homogéneas) sobre las cuales se aplicarán dosis diferenciadas de los distintos insumos, para lo cual las imágenes satelitales y aéreas pueden resultar una opción adecuada. En la zona bajo estudio trabajos previos realizados por el grupo de investigación han presentado resultados promisorios en lo que respecta a la caracterización de zonas homogéneas intra-lote (Mieza & Martínez 2008). En el 90 % de los lotes pudieron obtenerse series temporales con patrones espaciales consistentes en el tiempo, salvo en casos particulares en que la presencia de pasturas por varios años impidió la utilización de esta metodología. A modo de ejemplo en la Figura 1 del Anexo color, se muestra una serie temporal de imágenes para distintos cultivos para un lote de 135 ha y el NDVI asociado donde se observan patrones espaciales consistentes en el tiempo. A partir de estas zonas pre-definidas se realizaron muestreos de suelo dirigidos.

Monitoreo de la evolución de cultivos

Durante el ciclo de los cultivos, las imágenes también pueden utilizarse para monitorear su evolución. Estudios previos realizados en la zona para girasol muestran una correlación positiva significativa entre el NDVI y los distintos parámetros del cultivo de girasol relevados a campo como diámetro de capítulo, altura y especialmente con el porcentaje de cobertura superficial ($r^2=0.68$) y con el rendimiento promedio por lote ($r^2=0.84$). (Mieza & Kovac 2007).

Correlación con otros datos geoespaciales

Otros datos geoespaciales tales como mapas de rendimiento y mapas topográficos a nivel de lote se correlacionaron con la información obtenida mediante imágenes satelitales a los efectos de optimizar la delimitación de ambientes. Las variaciones espaciales en las imágenes y las zonas homogéneas delimitadas oportunamente a partir de secuencias multitemporales de NDVI se correlacionaron positivamente con la topografía relativa de los lotes (Figura 2 del Anexo color). La precisión total evaluada mediante matrices de confusión osciló entre el 66% y el 94%. La topografía a su vez está generalmente relacionada con la textura del suelo (arena, arcilla y limo) observándose que zonas más altas, generalmente denominadas *lomas*, estaban asociadas a altos porcentajes de arena, lo que a su vez se manifestaba en bajos valores de NDVI y rendimiento debido posiblemente a su menor capacidad de retención hídrica. (Figura 3 del Anexo color)

Imágenes de alta resolución

Las imágenes aéreas multiespectrales se han utilizado al momento para detectar errores en la aplicación de insumos y de situaciones particulares de manejo como se muestra en la Figura 4 del Anexo color.

A FUTURO

- *Misiones Landsat*: Se prevé una continuación del programa Landsat; la próxima misión se denomina Landsat Data Continuity Mission (LDCM) o Landsat 8, tiene como fecha de lanzamiento Enero 2013 y se estima que estará operando en forma sistemática a partir de Abril de 2013. Este satélite proveerá imágenes

con características espectrales similares a las misiones anteriores, manteniendo un tamaño de píxel de 30m y un período de revisita de 16 días. Incluso está previsto un satélite Landsat 9, sin fecha definida aún, por lo que se estima se podrá contar con este tipo de imágenes para continuar desarrollando aplicaciones en agricultura de precisión.

- *Programa CBERS*: Se prevé también una continuación del programa espacial entre Brasil y China para la puesta en órbita de dos nuevos satélites, uno de ellos cuya fecha prevista de lanzamiento es a fines del presente año (CBERS-3) y otro a futuro (CBERS-4).

- *Imágenes de alta Resolución espacial*: Se estima que se incrementará la oferta de este tipo de imágenes lo que reducirá los costos siendo así más accesibles para usos agrícolas.

- *Imágenes Hiperespectrales*: Las imágenes provistas por los satélites Landsat y CBERS, se denominan multiespectrales porque adquieren información en una serie de bandas. En general se podría considerar multiespectral cuando el número de bandas es no mayor a 10. A futuro se estima estarán disponibles imágenes hiperespectrales, es decir con gran número de bandas. En 2001, la NASA puso en órbita el sensor Hyperion a bordo del satélite EO-1 para evaluar posibles aplicaciones de la tecnología hiperespectral. Este sensor estaba diseñado para proveer información en 220 bandas, con una resolución espacial de 30m. La posibilidad de contar con un gran número de bandas se estima permitirá caracterizar de una forma más precisa las distintas coberturas.

- *Datos SAR*: El plan espacial argentino prevé la puesta en órbita de dos satélites SAR en los próximos años llamados SAOCOM. SAR es el acrónimo de (Synthetic Aperture Radar) o radar de apertura sintética que incluye un tipo de sensores remotos que permiten adquirir información de la superficie pero de modo diferente a lo que sucede con los ópticos. La principal diferencia es que los radares emiten una señal y captan la señal retrodispersada, lo que les permite operar de noche o en presen-

cia de nubosidad, pero como contrapartida puede mencionarse que la extracción de información no es intuitiva y es necesario el desarrollo y validación de modelos físicos de interacción. La disponibilidad de este tipo de datos se estima permitirá desarrollar nuevas aplicaciones para complementar las realizadas a partir de datos ópticos.

- SAC-E: Está previsto también a futuro una misión conjunta entre Argentina y Brasil para la puesta en órbita de el SABIA (Satélite Argentino Brasileño de Información en Alimento, Agua y Ambiente). Esta misión de Observación de la Tierra tiene por objetivo principal la provisión de datos para información sobre agua y alimentos, con alta resolución espectral, espacial y temporal sobre el área del MERCOSUR.

CONCLUSIONES

Pese a que en este momento particular, la provisión de imágenes ópticas se encuentra limitada por problemas técnicos de los distintos satélites, las imágenes satelitales presentan gran potencial para desarrollar aplicaciones a nivel de lote para sistemas de manejo sitio específicos. Imágenes satelitales de media y alta resolución espacial se han utilizado para la caracterización de ambientes intralote y para el monitoreo de cultivos (girasol) así como imágenes de alta resolución espacial para la detección de fallos y condiciones particulares de los cultivos con resultados altamente satisfactorios. La incorporación de otras herramientas geoespaciales, por ejemplo mapas topográficos a nivel de lote, permitieron validar los resultados obtenidos y establecer las causas de la variabilidad espacial detectada mediante las imágenes. Cabe mencionar que estas metodologías son “sitio específicas” en todo el alcance del término y que están estrechamente relacionadas a

la zona geográfica de aplicación con sus condiciones particulares de cultivos, clima, etc. Los resultados obtenidos muestran que las imágenes satelitales representan una herramienta adecuada para esta escala de trabajo supliendo en parte trabajos de campo exhaustivos generalmente inviábiles por motivos económicos o prácticos. A futuro se estima que la disponibilidad de imágenes ópticas multiespectrales de las misiones previstas, así como nuevos datos provistos por sensores SAR e hiperespectrales permitirán continuar desarrollando aplicaciones agrícolas sitio específicas.

BIBLIOGRAFÍA

- Mieza, M.S., Kovac, F.D, Monitoreo de Cultivos a Nivel de Lote Mediante Imágenes Satelitales: Aplicaciones en Agricultura de Precisión. Proceedings XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección Mar del Plata, ARGENTINA - 19 al 21 de septiembre de 2007 Editores Raúl Rivas, Alfredo Grisotto, Mónica Sacido, ISBN 978-987-543-127-0
- Mieza, M.S., Martinez, D.E. “Agricultura de Precisión en Girasol : Avances en La Pampa.” (2008) Publicación Técnica de INTA “ El Cultivo de Girasol en la región semiárida pampeana” – ISSN 0325-2132 – Junio de 2008
- Moran, M.S., Inoue, Y., & Barnes, E. M. (1997), "Opportunities and Limitations for Image-Based Remote Sensing in Precision Crop Management", Remote Sensing Of Environment, vol. 61, pp. 319-346.
- Tucker, C.J. (1979), “Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation.” Remote Sensing of Environment, 8, pp. 127–150.

Misiones Satelitales

- Landsat: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- EO1-1: <http://eo1.usgs.gov/>
- SAOCOM: <http://www.conae.gov.ar/satelites/sao-com/siasge.html>
- SAC-C: <http://www.conae.gov.ar/satelites/sac-c.html>

Estudio de la relación entre la temperatura de la cobertura vegetal e índices de vegetación en girasol en ambientes con deficiencias hídricas

INTRODUCCIÓN

En la Región Semiárida Pampeana (RSP) el aporte pluviométrico en general no satisface la demanda hídrica de los cultivos. Para garantizar el éxito del cultivo resulta importante el agua almacenada en el suelo previo a la siembra. No obstante, diferentes aspectos relacionados con el relieve y el cultivo antecesor condicionan el almacenamiento de agua en el perfil. Rastrojos con mayor cobertura mejoran el ingreso de agua al perfil, evitan el impacto directo de la gota de lluvia y reducen el potencial del suelo a encostrarse y erosionarse (Dardanelli, 1998)

Esta situación pone de manifiesto que en los sitios donde se cultiva girasol se presentan ambientes de diferente aptitud, lo cual influye de manera significativa en la productividad del cultivo. Es por ello que la aplicación de métodos en donde se utiliza información satelital y sensores remotos permite analizar la evolución de los cultivos, a través de la interpretación de los parámetros vegetales que este expresa. La información proveniente de imágenes satelitales a través del uso de diversos índices como el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) revela las características reflectivas de la vegetación en diferentes estados fenológicos. Estas son debidas a la composición química y a las propiedades físicas que estas poseen (Hoffer, 1978). El NDVI es un índice de vegetación que relaciona la reflectancia en la longitud de onda en el canal infrarrojo (0.78-0.9 μm) y rojo (0.63-0.66 μm) (Rouse, 1973) y se relaciona directamente con diversos parámetros vegetales como la biomasa, porcentaje de cober-

tura vegetal, área foliar (Asrar, Myneni and Kanemasu, 1989; Baret and Guyot, 1991). Esta información generada desde el NDVI es usada, en muchos casos, para detectar los cambios estacionales que ocurren en la vegetación, donde diferentes métodos han sido desarrollados para monitorear el estado de los cultivos y la vegetación natural. (Akiyama et al., 2002, Xiao et al. 2002). Por otra parte, ante la presencia de un déficit hídrico acentuado, el NDVI puede considerarse un indicador conservador del estado de la planta, ya que en etapas posteriores al déficit hídrico no produce cambios en los valores del NDVI debido a la presencia de un remanente de material verde mientras que la Temperatura de Cobertura Vegetal (TCV) aumenta rápidamente ante la presencia de un estrés hídrico. (Goetz, 1997). Es por ello que el NDVI vinculado a la TCV puede ser un indicador del estado hídrico al cual está sometida la planta (Carlson, Gillies and Perry, 1994, Goetz, 1997).

El objetivo de este trabajo fue analizar diferentes parámetros como la tasa de crecimiento, longitud del ciclo estimada a partir del NDVI, el índice de área foliar (IAF) y la temperatura de cobertura vegetal del cultivo de girasol en diferentes ambientes delimitados por el relieve y el manejo, fundamentalmente agua útil y cultivos antecesores.

MATERIALES Y MÉTODOS

La experiencia se realizó durante la campaña agrícola 2010-2011 sobre un cultivo de girasol, ubicado en cercanías de la localidad de Quemú Quemú en la provincia de La Pampa. El cultivo fue

sembrado el 25 de octubre, y la emergencia total de plántulas se observó entre el 6 al 11 de noviembre. En el lote se tomaron 83 puntos georreferenciados de los cuales se obtuvieron datos de agua útil (AU) al momento de la siembra y durante el estadio de floración, IAF y TCV que fueron relacionados con datos multitemporales de NDVI obtenidos desde imágenes satelitales del sensor Thematic Mapper (TM) de la serie LANDSAT. La información multitemporal del NDVI permite obtener la curva fenológica de cada muestra evaluada, la cual se construyó a partir de imágenes obtenidas en las fechas de 11 de noviembre, 15 de diciembre del 2010, 14 de enero, 15 de febrero y 11 de marzo de 2011. Estas se reproyectaron al sistema *Transverse Mercator Datum* WGS 84. Luego se georreferenciaron a faja 4 *Gauss Krugger* utilizando como base una imagen 228-85 pancromática (píxel con resolución espacial 15 m), utilizando puntos de control entre las dos imágenes. En todos los casos se tomaron entre 18 a 25 puntos de control de corrección (Bernstein, 1978). Se realizó la calibración radiométrica que implica un proceso en el cual se convirtieron los números digitales (ND) a nivel de satélite a radiancia a tope de atmósfera (TOA) (Chander et. al., 2003; Chander et. al., 2007). Por último se realizó corrección atmosférica de las radiancia TOA, obteniendo la reflectancia de superficie, asumiendo una superficie lambertiana y bajo condiciones libre de nubes, usando el método *Dark Object Subtraction* (DOS) (Chavez, 1996; Song, 2001). Las curvas fenológicas de cada muestra evaluada fueron analizadas mediante el software Timesat (Eklundh y Jönsson, 2009) el cual devuelve información acerca de patrones estacionales como inicio y fin de la estación fenológica, período en el que se encuentra el máximo valor de NDVI, longitud del ciclo y tasa de crecimiento para cada muestra. Las estimaciones del contenido de agua útil (AU) se realizaron cada 40 cm. y hasta los 2.4 m, utilizando una grilla georreferenciada a razón de una muestra por hectárea. La determinación del AU se realizó a través del método de gravimetría. Para obtener el dato de IAF se midió el ancho de la hoja de cada planta y se integró a la ecuación de estimación propuesta por Aston, 1967. Simultáneamente se midió la TCV utilizando un radiómetro portátil Raytek. El radiómetro registra la temperatura emisiva de la superficie observada

en un ancho de banda de 8-14 μm Las mediciones de TCV se realizaron durante la medición del IAF, localizando al sensor en la parte superior del canopeo. Los horarios de medición se realizaron entre las 11.00 y 15.00 hs. Los resultados extraídos desde TIMESAT fueron analizados mediante el análisis de la varianza utilizando el software estadístico SAS.

RESULTADOS

Los contenidos de AU a la siembra mayores para los sitios evaluados se encontraron en el antecesor maíz con 212.6 mm y 218.6 mm. para el bajo y la loma respectivamente. En lo que se refiere al antecesor soja, los sitios evaluados presentaron 200.8 y 187 mm. para el bajo y loma respectivamente. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre las medias de los tratamientos. Respecto al contenido de AU en floración se observa una merma considerable, donde el sitio con antecesor maíz y relieve bajo se registraron 56 mm., mientras que para la loma solo se registró 10 mm. En los sitios con antecesor soja se registraron 37.3 y 22 mm. para el bajo y loma respectivamente. Esta situación pone de manifiesto que el cultivo antecesor afecta los contenidos de AU a la siembra. Estos datos coinciden con los hallados por Duarte (1999) quien concluyó que además del cultivo antecesor, la cantidad de residuos remanente al momento de la siembra incide significativamente en el almacenaje de agua para el cultivo de girasol. Las escasas precipitaciones registradas desde octubre a diciembre impidieron una recarga del perfil de suelo acorde para los requerimientos del cultivo durante la etapa de floración. El agua acumulada durante el período de barbecho afecta el crecimiento en los primeros estadios de los cultivos, y puede asegurar la disponibilidad de agua en el período crítico del cultivo, donde el déficit hídrico afecta los procesos de generación y definición de rendimiento (Andrade y Sadras, 2000), constituyéndose el manejo de la reserva hídrica de agua en el perfil del suelo como esencial en los cultivos de verano en regiones áridas y semiáridas. En la Figura 1 a y b se muestra la gráfica de los contenidos de AU a la siembra y en floración para cada uno de los sitios evaluados. Los perfiles se encontraban al momento de la siembra con altos contenidos de

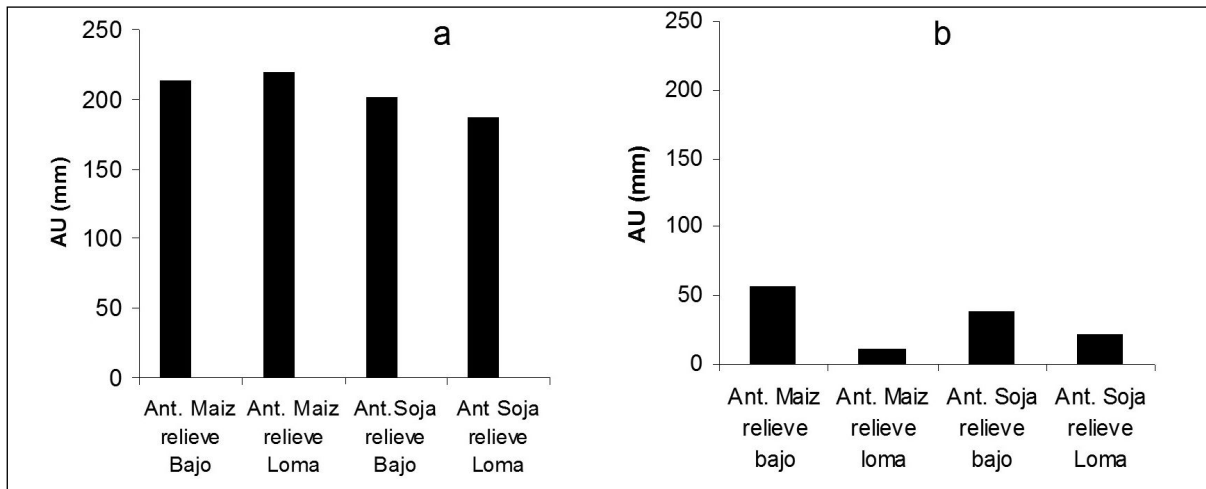


Figura 1: Agua útil a la siembra (a) y en floración (b) en el cultivo de girasol en sitios con relieve loma y bajo con anteceso- res soja y maíz.

AU mientras que en floración, y a raíz de las deficiencias pluviométricas, los contenidos de AU se mostraron por debajo de 53 mm hasta los 2.4 m. de profundidad.

La Figura 2 muestra la respuesta multitemporal del NDVI promedio de muestras tomadas a campo en cada ambiente delimitado por el antecesor y el relieve. Como puede observarse, la respuesta multitemporal de NDVI permite reconstruir el ciclo de las muestras de cultivo registrados en cada ambiente. En este aspecto, desde la fecha del 11 de noviembre hasta el 14 de enero se describe la etapa de crecimiento del cultivo, manifestando diferencias en el desarrollo entre ambientes, dado por la diferencia de las pendientes entre las curvas. La etapa de floración del cultivo observada alrededor del 14 de enero se manifiesta por los máximos valores de IAF, cuya respuesta espectral del NDVI es representada por sus máxi-

mos valores. Posterior a ésta comienza la etapa de senescencia en la cual los valores de NDVI comienzan a decrecer. Las respuestas multitemporales como las observadas en la Figura 2 pueden ser analizadas para obtener información referida a los diferentes parámetros estacionales y su vez relacionarlos con otros aspectos asociados con el ambiente en el cual se desarrolla el cultivo.

La Tabla 1 muestra los resultados de la evaluación de los datos obtenidos desde la respuesta multitemporal de NDVI de 83 muestras clasificadas por el cultivo antecesor y el relieve analizados por el software Timesat, detectando diferencias significativas ($p < 0.05\%$) en la tasa de crecimiento entre ambientes. Los máximos valores se alcanzaron en ambientes con relieve Bajo y antecesor maíz. La mayor tasa detectada se debió a un mayor contenido de AU a la siembra en el ambiente con relieve bajo, lo que la mayor cobertura en

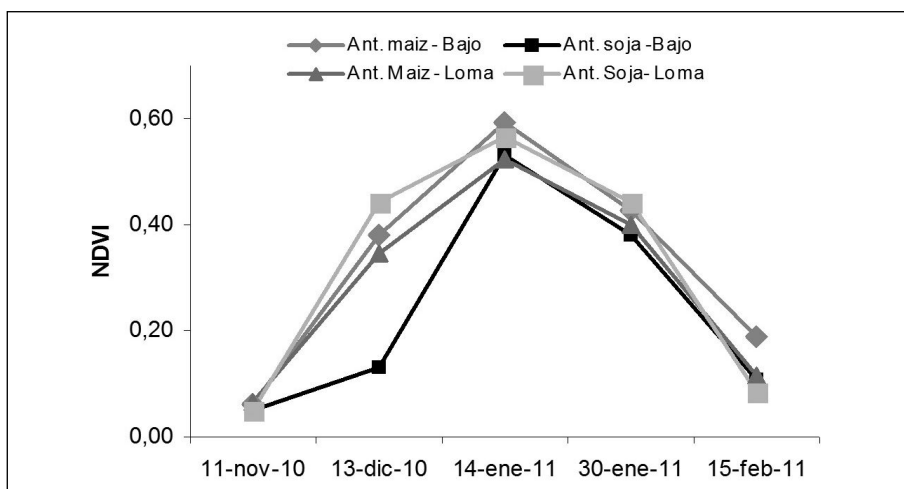


Figura 2: Reconstrucción del ciclo de crecimiento y desarrollo de las muestras distribuidas por relieve y cultivo antecesor.

Tabla 1: Resumen de los parámetros estacionales de las muestras distribuidas por relieve y antecesor.

Ambiente	Antecesor	Principio estación	Final estación	Longitud estación (días)	Período máx. valor NDVI	Máx. Valor NDVI	Tasa de crecimiento
Bajo	Maíz	7-12-10	9-2-11	64 a	15-1	0,5532 a	0,2634 a
Bajo	Soja	25-11-10	10-2-11	77 b	17-1	0,5570 b	0,2622 b
Loma	Maíz	7-12-10	8-2-11	65 b	18-1	0,5399 b	0,2529 b
Loma	Soja	9-12-10	7-2	60 b	18-1	0,4952 b	0,2288 b

rastreros de maíz han contribuido a un almacenamiento más eficiente del agua. La menor tasa de crecimiento detectada corresponde a las muestras clasificadas como de relieve loma y antecesor soja, evidenciando que en años de bajos niveles de precipitaciones como el ocurrido durante el ensayo el AU almacenada en el suelo no satisface la demanda del cultivo. El AU almacenada a la siembra y las precipitaciones que ocurren durante el ciclo de crecimiento tienen relación con la producción de biomasa y rendimiento (Micucci et al., 2002).

No obstante, las diferencias en las tasas de crecimiento infieren sobre el comportamiento de otros parámetros como el principio de la estación de crecimiento, donde las muestras localizadas en ambientes de relieve bajo se asocian con periodos de iniciación del crecimiento más tempranas. La Figura 3 muestra la respuesta del IAF en función del AU en floración, mostrando datos promedio discriminados por ambiente y antecesor. Ambientes con relieve bajo y mayor contenido de AU se relacionan con altos valores de IAF, coincidentes con una tasa de crecimiento mayor.

En la Figura 4 se observa que la evaluación de la respuesta de TCV manifiesta una relación inver-

sa con el AU, IAF y NDVI en floración, lo que evidencia que sitios condicionados por el relieve y el cultivo antecesor ejercen su influencia en los contenidos de AU, coincidente con datos de Andrade y Sadras, 2000 que concluyeron que mayores valores de IAF fueron logrados con mayores contenidos de AU. Esto trae como consecuencia que las muestras alojadas en ambientes de lomas y con cultivos antecesores que dejan escaso rastrojo durante el barbecho como es el caso de la soja, se manifiesten con valores más bajos de IAF y NDVI coincidentes con valores más altos de temperatura radiativa, expresando la presencia de un estrés hídrico.

CONCLUSIONES

El uso de imágenes multitemporales de NDVI permite la reconstrucción del ciclo de los cultivos y el análisis del comportamiento del cultivo a nivel de los diferentes ambientes que nuestros lotes ofrecen.

Por otra parte, la detección de la aptitud productiva de los ambientes, en este caso por la altimetría y los cultivos antecesores condiciona sustancialmente los contenidos de AU, situación que

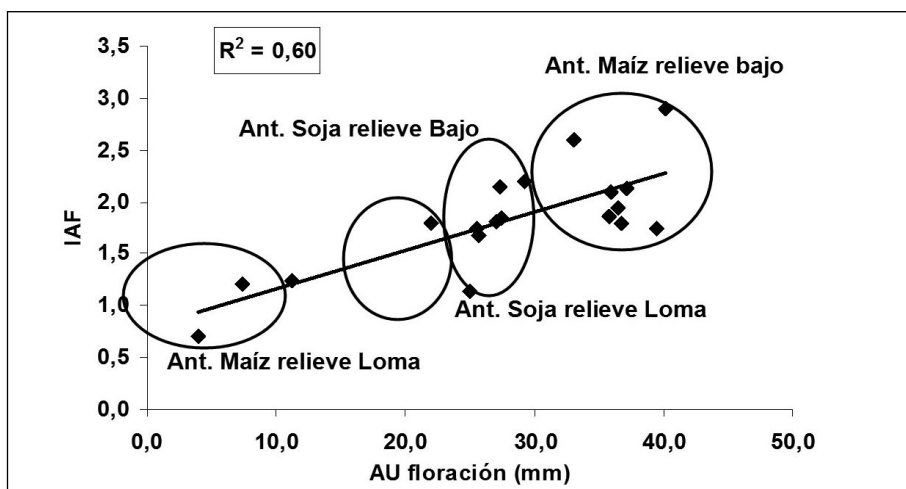


Figura 3: Relación entre el índice de área foliar (IAF) y el agua útil (AU) en floración con relieve loma y bajo y antecesores soja y maíz.

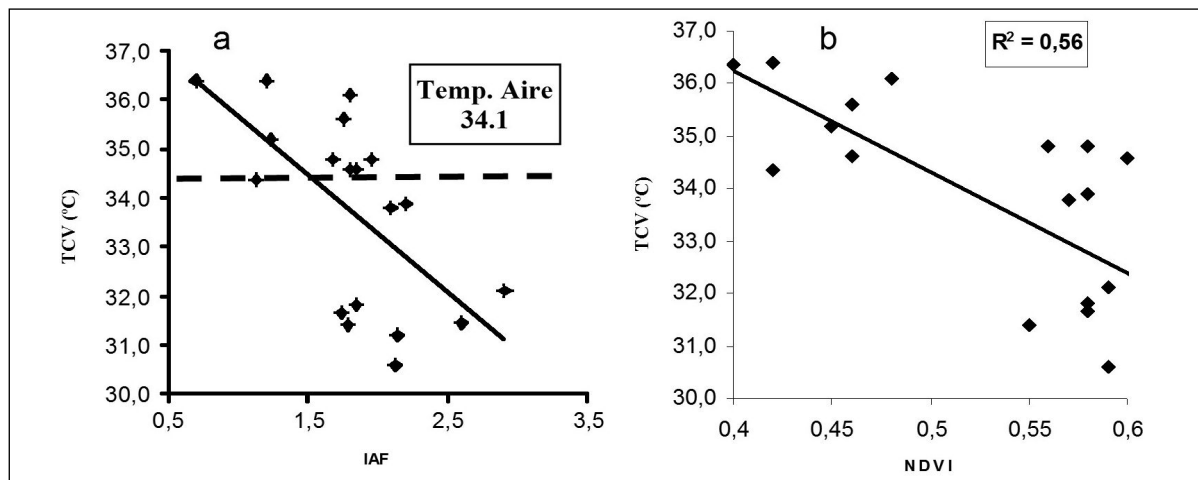


Figura 4: Relación entre TCv con el IAF (a) y el NDVI (b) medidos en floración del cultivo de girasol.

se manifiesta en la información provista a través de la medición de los diferentes parámetros vegetales estudiados con datos multitemporales de NDVI. Las deficiencias hídricas detectadas en ambientes condicionantes se manifiestan por la respuesta entre la temperatura radiativa de la vegetación y el NDVI, lo cual corrobora la presencia del estrés hídrico.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade F.H., y Sadras V.O., 2000. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. En: Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. (Eds) F.H. Andrade y V.O. Sadras. EEA-INTA Balcarce, Fac. de Ciencias Agrarias UNMP. pp 173-206.
- Asrar, G.; Myneni, R. and Kanemasu, E. 1989. Estimation of plant canopy attributes from spectral reflectance measurements. *Chap 7*. In G. Asrar (Ed) *Theory and applications of optical remote sensing* (pp252-296. New York: Wiley
- Aston, J. 1967. The relationship between transpirations and water uptake of sunflower (*Helianthus Annus*) var Advance in relation to some environmental factor. Ph. D Thesis, University of California. Davis.
- Akiyama, T; Kawamura, K.; Fukuo, A and Chen, Z. 2002. Sustainable grassland management using GIS, GPS and remote sensing in Inner Mongolia. In S. Uchida, C. Youqui (Ed) *Applications on Remote Sensig tecnology for the management of agriculture resource* (pp 13-19). Beijing. China Agricultural Sciencetech Press.
- Baret, F. and Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetations indices for LAI and APAR assessments. *Remote Sensing of Environment*, 35 pp 161-173.
- Bernstein, R. 1978. *Digital Image Processing of Earth observation sensor data*. Digital Image Processing for Remote Sensing, Nueva York, IEEE Press, pp. 55- 72.
- Carlson, T.; Gillies, R. and Perry, E. 1994. A method to make use of termal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*. 9 161-173.
- Chander , G, Member, I., Markham, B., Barsi, J. 2007. Revised Landsat 5 Thematic Mapper Radiometric Calibration. *IEEE Geoscience and Sensing Letters*, vol. 4, 3, 490-494
- Chander, G., Markham, B. 2003. Revised Landsat 5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamics Ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, 11, 2674-2677.
- Chavez, Jr., P. 1996. Image-based atmospheric correction- Revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol 2, 9, 1025-1036.
- Dardanelli J.L. 1998. Eficiencia en el uso del agua según sistemas de labranzas. En: J.L. Panigatti; H. Marelli; D. Buschiazzo y R. Gil (eds), *Siembra Directa*. INTA-SAGyP, pp. 107-115.
- Duarte G., 1999. Manejo del agua y fertilización del cultivo. En: AACREA (ed.). *Girasol. Cuaderno de actualización técnica N°62*, pp 22-33.
- Eklundh, L. and Jönsson, P. 2009. *Timesat 3.0 Software Manual*, Lund University, Sweden.
- Goetz, S. 1997. Multisensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. *International Journal of Remote Sensing*, 18 (1), 74-94.
- Hoffer, R. M.1978. Biological and physical consideration in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. In: *Remote Sensing: The Quantitative Approach*, eds P.H. Swain and S. Davis. Mc Grave-Hill. New

York , pp 227-289.

- Micucci F.G.; Taboada M.A. y Gil R. 2002. El Agua en la Producción de Cultivos extensivos: I. El suelo como un gran re-servorio. Archivo Agronómico N° 6, Informaciones Agronómicas del Cono Sur N° 15. INPOFOS Cono Sur, Argentina.
- Rouse, J.; Haas, R.; Schell, J.; Deering, D. y Harlan, J. 1973. Monitoring vegetation system in the Great plain with ERTS. In S.C. Freden, E.Mercanti, P. & Becker (Edit), Third Earth Resources Technology Satellite-I Symposium Technical presentations , section A vol I (pp 309-317). Washington, DC: National Aeronautics and space Administration (NASA SP-351).

- SAS Institute . 1999. SAS/STAT software: Changes and enhancements through release 8.0. SAS Institute, Cary, NC.
 - Song, C., Woodcock, C., Seto, K., Pax-Lenney, M y Macomber, S. 2001. Classification and change detection using Landsat TM data.: When and how to correct atmospheric effect? Remote Sensing of Environment, 78, 39-54.
 - Xiao, X.; Boles, S. Frolking, S. and Salas, W. 2002. Observation of flooding and rice transplanting of paddy rice field at the site to landscape scales in China using Vegetation sensor data. International Journal of Remote Sensing , 23. 3009-3022.
-

Eugenia Ghironi¹, Andrés Corró Molas^{1,2}, Adriana Gili², Eduardo Hevia¹ y Hugo Reinoso¹

¹ UE y DT INTA General Pico - EEA INTA Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas"

² UNLPam, Facultad de Agronomía, La Pampa

Manejo sitio-específico de densidades en los cultivos de girasol, maíz y sorgo en la región semiárida pampeana central

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura por ambientes constituye un conjunto de innovaciones que requiere adecuar los criterios de manejo a cada área georeferenciada dentro de un mismo lote. Esta tecnología incluye la dosis variable de semilla y permite ajustar la densidad de plantas a cada sitio-específico.

Andrade y Sadras (2000) mencionan que *"la elección de la densidad de plantas es clave para optimizar la productividad de los sistemas agrícolas, en especial cuando la disponibilidad hídrica es escasa para el desarrollo de los cultivos"*. Definen la densidad óptima para un cultivo como *"la mínima densidad que permite coberturas adecuadas para interceptar el máximo de radiación solar incidente durante los períodos críticos¹ en que se determina el rendimiento y que posibilita maximizar la partición de materia seca hacia las estructuras reproductivas durante dichos momentos"*. Esta densidad depende de las condiciones ambientales (disponibilidad hídrica), del manejo (fecha de siembra) y de las particularidades fisiológicas de la especie o del genotipo. Las densidades óptimas para los cultivos de girasol, maíz y sorgo han sido analizadas por numerosos autores. En el cultivo de girasol, en condiciones de

secano en el sudeste de la provincia de Bs As, los rendimientos de grano no variaron entre 35.000 y 100.000 plantas ha⁻¹ mientras que con densidades de 30.000 plantas ha⁻¹ se alcanzaron índices de área foliar que permiten obtener los máximos rendimientos para esas condiciones (Aguirrezábal et al., 1996). Pereyra y otros (2001) recomendaron para la provincia de Buenos Aires densidades entre 60 a 65.000 plantas ha⁻¹. En la Provincia de La Pampa, densidades de 45.000 plantas ha⁻¹ son de uso frecuente por la mayoría de los productores. Cuando se utilizan densidades supraóptimas, los recursos disponibles por planta se ven limitados, sin embargo, los niveles de rendimiento se mantienen cercanos al máximo debido a la capacidad del girasol de producir en estas condiciones (Andrade y Sadras, 2000). En altas densidades el porcentaje de aceite se incrementa (Hernández y Orioli, 1992) Cuando se utilizan bajas densidades, cada planta aumenta el número de granos y el peso de los mismos, y permite compensar el rendimiento por unidad de superficie dentro de un rango limitado. (Gaines et al., 1974; Villalobos et al., 1994 citado por Andrade y Sadras, 2000).

En maíz, Andrade et al. (1996) identifican la existencia de 3 situaciones de distinta oferta de recursos donde la densidad óptima es diferente. En condiciones de buena oferta ambiental, la densidad óptima es cercana a 80.000 plantas ha⁻¹ y disminuciones en la densidad provocan mermas de rendimiento. En situaciones de oferta media, densidades entre 55.000 y 80.000 plantas ha⁻¹ no producen cambios significativos en el rendimiento, mientras que en situaciones de baja oferta

¹ El período crítico se define como "aquel período del ciclo del cultivo en el cual disminuciones en la tasa de crecimiento inciden marcadamente y explican en mayor medida las variaciones en el rendimiento" (Cárcova y otros 2003). En girasol y maíz comprende desde 15 días previos a 15 días posteriores a floración mientras que en sorgo comprende desde 20 días previos a 7 posteriores a la floración. (Andrade y Sadras 2000; Ortiz D. 2010; Gambín et al 2011; Prasad et al 2008)

ambiental generadas por déficit hídrico, el incremento de densidad por encima de 50.000 plantas ha^{-1} provocó disminución de rendimiento. En coincidencia, Gardner y Gardner (1983), mencionan que la densidad óptima se reduce al incrementarse la deficiencia de agua.

Ante cambios en la densidad, el cultivo de maíz modifica el número de granos mientras que el peso de 1.000 granos presenta variación intermedia a baja (Tollenar y Dynard, 1978 y Kiniry et al. 1990 citados por Andrade et al., 2000). El maíz puede presentar mayor prolificidad ante disminuciones en la densidad (Otegui, 1995; Andrade et al., 1996). Híbridos prolíficos pueden expresar mayor estabilidad de rendimiento ante reducciones en la densidad de plantas (Sarquis, 1998)

El efecto de cambios en la densidad de plantas claramente depende de las características de los híbridos. Los híbridos de ciclo corto presentan densidades óptimas mayores a ciclos largos (Sarlangue et al. 2007).

Por otro lado, Tokatlidis et al (2011) menciona que existe diferente comportamiento de híbridos de maíz aún dentro del mismo ciclo. De acuerdo a la sensibilidad a la densidad destaca la existencia de híbridos densidad neutros e híbridos densidad dependientes. Los primeros son híbridos capaces de optimizar el rendimiento en un amplio rango de densidades mientras que los híbridos densidad dependientes poseen un rango más acotado para obtener rendimientos óptimos y son más afectados por disminución en la densidad. Los híbridos densidad neutros tienen potencial para alcanzar altos rendimientos en condiciones de sequía, donde los recursos del ambiente no pueden soportar una alta densidad de plantas. Las ventajas asociadas a híbridos densidad neutro mencionados son: el rendimiento no es afectado drásticamente por cambios en la densidad de siembra, la reducida interacción del híbrido permite una comparación segura en un amplio rango de densidades, bajo condiciones propensas a la sequía el uso de híbridos densidad neutros optimiza la eficiencia de uso de recursos por adaptación a diferentes densidades de siembra, el costo de semilla es menor a causa de la baja densidad de siembra y no es necesaria la resiembra ante fallas en la germinación. La capacidad de compensación de rendimiento a través del incremento del número de granos por planta cuando se utilizan bajas densidades es menor en maíz que en

girasol (Andrade y Sadras, 2000).

El cambio en la fecha de siembra de maíz modifica las condiciones ambientales que se producen durante el período crítico del cultivo. Para la región semiárida pampeana las siembras tardías determinan condiciones de menor temperatura y radiación durante el período crítico del cultivo. Al mismo tiempo, para la mayoría de los años, menor déficit hídrico. Para condiciones de estrés hídrico, el atraso de la fecha de siembra es una estrategia que permite evitar la coincidencia del período crítico con los momentos de mayor demanda atmosférica (Andrade y Sadras, 2000).

Fechas de siembra tardías generan plantas más grandes. Por esta razón, Andrade y Sadras (2000) indicaban que la densidad óptima para rendimiento disminuye a medida que se retrasa la fecha de siembra del cultivo de maíz en ambientes templados.

En forma similar al cultivo de maíz, la densidad óptima en sorgo es dependiente de la oferta de recursos disponible para el cultivo. Trucillo et al. (2011) indican que para la mayoría de las zonas sorgueras de Argentina, la densidad de plantas no debería ser inferior a 200.000 plantas ha^{-1} , en ambientes de menor oferta ambiental debería ser mayor a 180.000 plantas ha^{-1} y en condiciones de mínima oferta ambiental no debería bajar de 160.000 plantas ha^{-1} . Berteau y Ortiz (2010) establecieron densidades de sorgo entre 30.000 a 300.000 plantas ha^{-1} y observaron una fuerte compensación con rendimientos cercanos a 6.000 kg ha^{-1} . Determinaron un umbral de 12.6 panojas m^{-2} a partir del cual no se observaron diferencias de rendimiento ante incrementos de la densidad. Wade y Douglas (1990) observaron que con rendimientos de hasta 5000 kg ha^{-1} en cultivos en secano, los máximos rendimientos no difirieron significativamente con la densidad de 75.000 plantas ha^{-1} . Díaz et al. (2007) observaron que en años donde las lluvias fueron limitantes en el período crítico del cultivo, los mayores rendimientos se obtuvieron con densidades bajas de 14-15 plantas m^{-2} . Ante disminuciones en la densidad, el cultivo de sorgo produce mayor número de granos y de macollos por planta (Berteau et al., 2010, Díaz et al., 2010).

Díaz et al. (2010) no encontraron relación entre rendimiento y el peso de granos en un conjunto de 20 cultivares de sorgo para rendimientos entre 5.000 y 10.000 kg ha^{-1} de grano. Berteau et al. (2010) observaron diferencias entre híbridos en el

incremento del peso de los granos ante disminuciones en la densidad.

En la región semiárida pampeana el componente más importante de las condiciones ambientales que limita la productividad de los cultivos es la disponibilidad de agua. No obstante, en los cultivos estivales se presentan con frecuencia situaciones de altas temperaturas que también afectan la productividad de los cultivos. La combinación de estrés hídrico y térmico produce efectos más severos sobre el rendimiento que cuando se presentan en forma individual. Los efectos del estrés también se incrementan cuando se presentan durante el período crítico del cultivo. En el cultivo de girasol temperaturas por encima de 35 grados durante diferenciación floral, etapa incluida dentro del período crítico del cultivo, disminuyen el número de granos. (Chimenti y Hall, 2001). El mismo umbral térmico fue determinado por Rondanini et al. (2003), quienes encontraron una disminución en el peso de grano, en el contenido de aceite y cambios en la composición de ácidos grasos debidos al estrés térmico durante el llenado de granos.

Temperaturas por encima de 35 °C producen estrés térmico en maíz (Wahid et al. 2007 citados por Otegui 2010; Berry y Bjorkman, 1980; Comuri y Jones, 2001 citados por Maddoni, 2010), aunque por encima de 32 °C puede afectarse la viabilidad de polen (Herrero y Johnson, 1980). El golpe de calor en maíz afecta la producción de biomasa, la fijación de granos y el peso de los mismos dependiendo del momento de ocurrencia.

En el cultivo de sorgo Prasad et al. (2008) encontraron que exposiciones de 10 días a temperaturas de 40°C en floración y 10 días antes de floración causaron la máxima reducción del rendimiento de grano por reducción en el número de granos. Estrés por alta temperaturas a los 10, 20 y 30 días post-floración disminuyeron el rendimiento por menor peso de los granos.

El objetivo del trabajo fue determinar la densidad óptima para los cultivos de girasol, maíz de siembras temprana y de siembra tardía y sorgo, en sitios dentro del mismo lote que difieren en el potencial de rendimiento.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La experiencia se realizó durante las campañas 2008/09, 2009/10 y 2010/11 en lotes cercanos a las localidades de Dorila (S 35° 45' 50.7''

W 63° 35' 37.7''), Gral. Pico (S 35° 40' 9.5'' W 63° 39' 47.5''), Agustoni (S 35° 48' 39.4'' W 63° 26' 51''), Trebolares (S 35° 28' 59'' W 63° 36' 40''), Intendente Alvear (S 35° 23' 8.7'' W 63° 41' 19.3''), e Hilario Lagos (S 35° 01' 24.08 W 63° 54' 39.55), en la provincia de La Pampa. Dentro de cada lote se georeferenciaron dos sitios identificados como L (loma) de menor potencial de rendimiento y B (bajo) de mayor potencial de rendimiento, en base al análisis de imágenes satelitales, relevamiento planialtimétrico y mapas de rendimientos históricos. En cada sitio se planteó un ensayo de densidades en bloques al azar con 3 repeticiones. Se estudiaron cultivos de girasol, maíz de siembra temprana y tardía, y sorgo. Los ensayos fueron sembrados en siembra directa y con alta densidad. Mediante el raleo manual de plantas en la línea en el estado de 2 hojas verdaderas, se establecieron unidades experimentales de 4 surcos distanciados a 0.52 m. y de 10 m. de largo. Se evaluaron 5 tratamientos de densidades hasta 60 y 75.000 plantas ha⁻¹ logradas en girasol y maíz, respectivamente. Los híbridos utilizados en girasol fueron convencionales y alto oleico. En el cultivo de maíz se utilizaron híbridos prolíficos, MGRR. En sorgo se evaluaron 3 tratamientos de densidades hasta 140.000 plantas ha⁻¹ logradas y los híbridos usados fueron de tipo granífero y doble propósito, de ciclos intermedio, largo y corto, en todos los casos con alto tanino.

En las Tablas del Anexo se detalla el manejo cultural para los cultivos de girasol, maíz y sorgo, por híbrido y campaña.

En el cultivo de girasol las densidades fueron de 15, 25, 35, 45 y 60.000 plantas ha⁻¹ logradas. Para la campaña 2008/09 los híbridos utilizados fueron CF 31, DK 3820 y DK 4200 y las fechas de siembra 2/11/08, 29/11/2008 y 1/12/2008, respectivamente. En la campaña 2009/10 los híbridos fueron DK 4200, DK 3810 y DK 4050 con fecha de siembra 20/11/10, 23/11/10 y 20/11/10, respectivamente. En la última campaña 2010/11 el híbrido utilizado fue DK 3945 alto oleico con fechas de siembras 26/10/10, 1/11/10, 1/11/10 y 15/11/10.

En maíz de siembra temprana las densidades fueron 20, 30, 40, 50 y 75.000 plantas ha⁻¹ logradas. Los híbridos utilizados fueron DK 190 y DK 700 en los dos años evaluados y con fecha de siembra que variaron entre el 2 al 10 de octubre.

En maíz de siembra tardía las densidades evaluadas fueron iguales a las tempranas. Para la

campana 2008/09 el híbrido utilizado fue DK 682 y fecha de siembra 15/12/08. En la campana 2009/10 los híbridos utilizados fueron DK 190 y LT 624, con fecha de siembra 10/12/09. En la última campana (2010/11) los híbridos utilizados fueron DK 190 y DK700, con fechas de siembra entre el 28/11 y 3/12/10.

En el cultivo de sorgo las densidades evaluadas fueron de 70, 100 y 140.000 plantas ha⁻¹ logradas. En la campana 2008/09 se sembró el cultivar VDH 206, granífero de ciclo intermedio-corto con fecha de siembra 10/12/08. En la campana 2009/10 se sembró el cultivar Fronterizo de doble propósito de ciclo intermedio el 20/11/09. En la última campana (2010/11) los cultivares utilizados fueron de tipo graníferos, VDH 314 de ciclo intermedio-largo y VDH 114 de ciclo corto, con fecha de siembra 3/12/11.

En cada sitio se extrajeron muestras de suelo de 0 a 20 cm de espesor para determinar las fracciones granulométricas (sedimentación), materia orgánica total (MOT, Walkley y Black), fósforo extractable (P, Bray y Kurtz I). En muestras de 0-20 y 20-60 cm se determinaron los contenidos de nitrógeno de nitratos (ácido. Cromotrópico). El contenido de humedad de los suelos (método gravimétrico) se determinó a intervalos de 20 cm hasta los 300, 200 y 200 cm de profundidad para girasol, maíz y sorgo respectivamente, a la siembra, floración y madurez fisiológica. Los estados

fenológicos fueron determinados utilizando las escalas desarrolladas por Ritchie y Hanway, 1982 en maíz, por Schneiter y Miller 1981 en girasol y en sorgo por Vanderlip, R.L.1993.

Para todos los cultivos, en cada unidad experimental se cosechó una superficie de 5,2 m² que fue trillada, pesada y estimado el contenido de humedad a través de higrómetro Tesma Campo. Todos los valores de rendimiento de grano son expresados para las condiciones de humedad de recibo de cada cultivo en la Argentina. En el cultivo de girasol la concentración de materia grasa se determinó mediante Resonancia magnética nuclear y el rendimiento de grano fue ajustado de acuerdo a la metodología utilizada por la Red INTA-ASAGIR (Alvarez D. y otros, 2006).

Las variables evaluadas en el cultivo de girasol fueron: contenido de materia grasa, rendimiento ajustado por materia grasa, peso de 1000 aqueños y número de aqueños m⁻². Las variables evaluadas en el cultivo de maíz fueron: rendimiento de grano, peso de 1000 granos y número de granos m⁻². En el cultivo de sorgo se determinó rendimiento de grano, peso de 1000 granos, número de granos m⁻² y número de panojas pt⁻¹.

Los resultados se analizaron estadísticamente mediante la aplicación de regresión lineal y modelos lineales mixtos (Littell et al., 2006). Se realizaron pruebas de diferencias de medias a través del método LSD de Fisher para los efectos fijos, usando un nivel de significación del 0,05. Se utilizaron los software estadísticos R (R Development Core Team, 2011) e InfoStat (Di Rienzo et al., 2011).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Características del Clima en las campañas evaluadas 2008/09, 2009/10 y 2010/11

En la región semiárida pampeana central las precipitaciones en cantidad y oportunidad son la principal limitante productiva para los cultivos. Las precipitaciones ocurridas durante los meses de desarrollo de los cultivos (octubre a marzo) fueron de 517, 507 y 493 mm para la campana 2008/09, 2009/10 y 2010/11 respectivamente y similares al promedio histórico de la zona (1921-2010) de 534 mm. En la Figura 1 se presenta la distribución de las precipitaciones durante los meses de desarrollo del cultivo con una gran variabilidad mensual entre

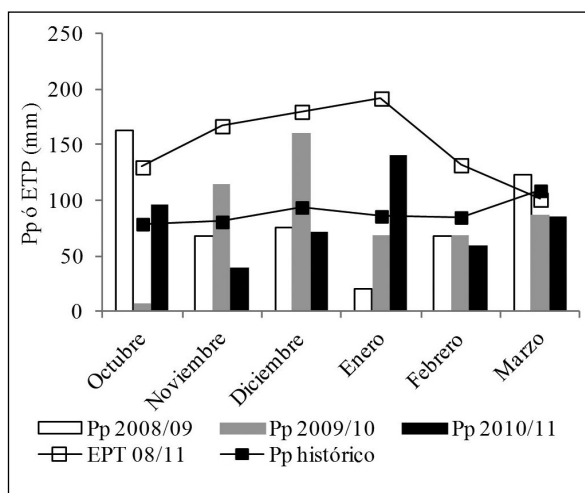


Figura 1: Precipitaciones (Pp) durante el ciclo de los cultivos para las campañas 2008/09, 2009/10 y 2010/11, promedio histórico de la zona (1921-2010) y evapotranspiración (EPT) promedio 2008-11.

Fuente: Casagrande, Guillermo. EEA Anguil.

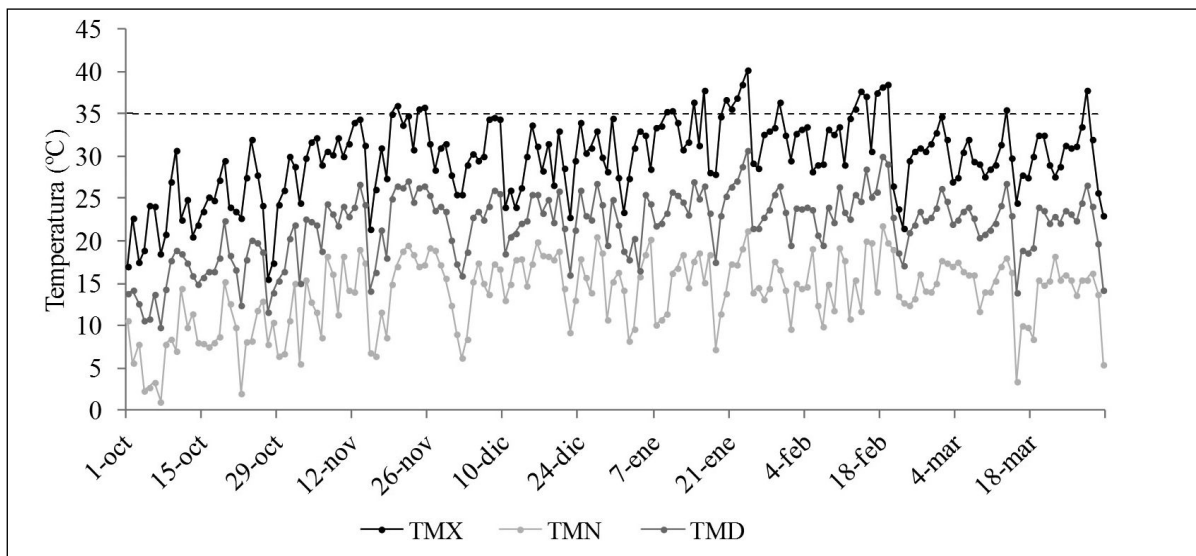


Figura 2: Temperatura diaria durante el ciclo de los cultivos en la campaña 2008/09. Temperatura máxima (TMX), Temperatura mínima (TMN) y Temperatura media (TMD). La línea horizontal discontinua indica la temperatura de 35°C.
Fuente: Casagrande, Guillermo. EEA Anguil.

años. El balance hídrico fue negativo durante todo el ciclo de los mismos.

La campaña 2008/09 se caracterizó por una fuerte deficiencia hídrica en el mes de enero, con precipitaciones inferiores en un 77 % respecto al promedio histórico. En la campaña agrícola 2009/10 las precipitaciones en los meses de noviembre y diciembre resultaron superiores al promedio histórico en un 41 y 71 % respectivamente. Para la campaña agrícola 2010/11 se

observó que las precipitaciones de los meses de noviembre y diciembre estuvieron por debajo del promedio histórico en un 50 y 24 % respectivamente, mientras que las precipitaciones ocurridas en el mes de enero superaron en un 63 % el promedio histórico.

En la región semiárida pampeana los estreses más frecuentes están asociados a déficit hídrico y altas temperaturas. Las altas temperaturas pueden afectar el rendimiento de los cultivos estiva-

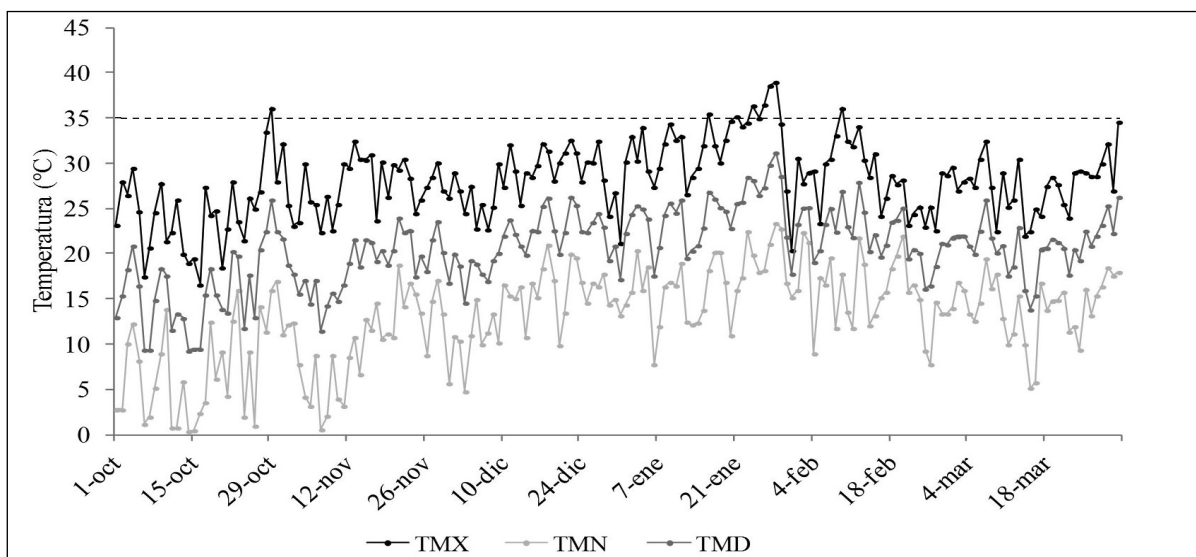


Figura 3: Temperatura diaria durante el ciclo de los cultivos en la campaña 2009/10. Temperatura máxima (TMX), Temperatura mínima (TMN) y Temperatura media (TMD). La línea horizontal discontinua indica la temperatura de 35°C.
Fuente: Casagrande, Guillermo. EEA Anguil.

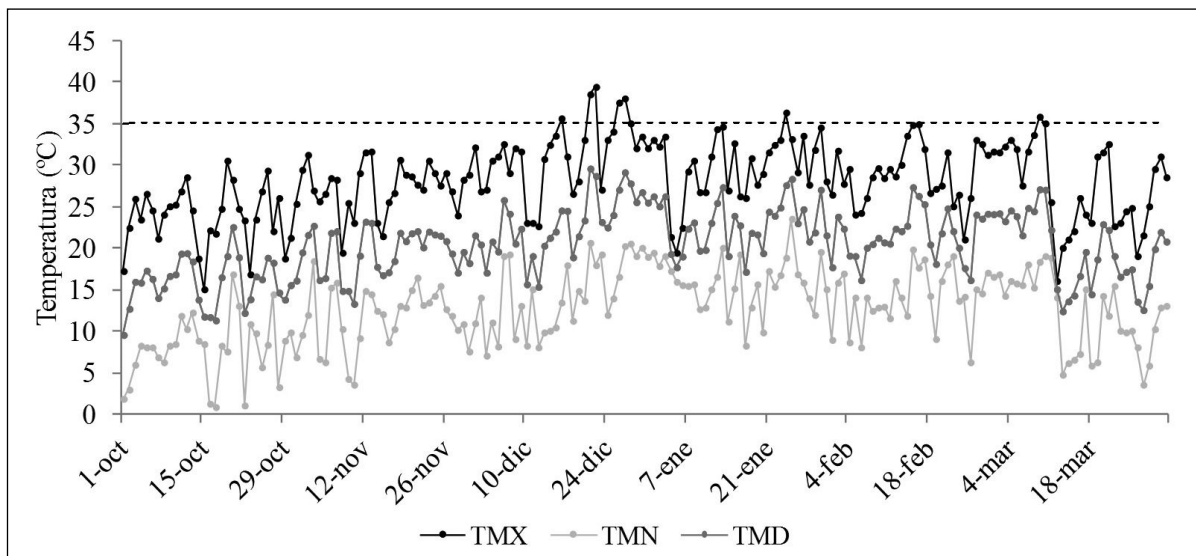


Figura 4: Temperaturas diarias durante el ciclo de los cultivos en la campaña 2010/11. Temperatura máxima (TMX), Temperatura mínima (TMN) y Temperatura media (TMD). La línea horizontal discontinua indica la temperatura de 35°C. Fuente: Casagrande, Guillermo. EEA Anguil.

les en mayor grado si están asociadas a déficit hídricos. Durante los años evaluados se registraron temperaturas máxima media diaria iguales o superiores a 35 °C, que variaron en su duración y en el momento fenológico en que ocurrieron. En la campaña 2008/09 el estrés térmico se registró durante 5 días consecutivos en el mes de enero (20 al 24) y en 6 días consecutivos del mes de febrero (13 al 19) (Figura 2). En la segunda campaña (2009/10) el estrés térmico también se registró durante 9 días consecutivos, del 20 al 29 de enero (Figura 3). En la última campaña el estrés térmico se presentó durante 8 días consecutivos, del 21 al 28 de diciembre (Figura 4).

3.2. Características edáficas

Los cultivos se establecieron en suelos Haplustoles Enticos ubicados en el noreste de La Pampa, en la subregión de la Planicie medanosa norte. El relieve es ondulado, con suelos profundos, caracterizados con lomas y bajos de textura arenosa franca y franca arenosa, respectivamente. En los sitios loma (L) los contenidos de limo + arcilla variaron entre 9 a 28 %, la materia orgánica total de 0,76 a 1,79 %, el nitrógeno de nitratos de 10 a 192 kg ha⁻¹ y el fósforo de 12,8 a 124 kg ha⁻¹. En los sitios bajo (B) los contenido de arcilla + limo variaron entre 19 a 53 %, la materia orgánica total de 1,1 a 2,82 %, el nitrógeno de nitratos de 22 a 296 kg

ha⁻¹ y el fósforo de 23 a 108 kg ha⁻¹ para el promedio de los sitios evaluados.

3.3. Girasol

Las precipitaciones ocurridas durante los meses de desarrollo del cultivo de girasol (noviembre a febrero) fueron variables entre años. Para la campaña 2008/09 fueron inferiores en un 36 % respecto del promedio histórico de la zona (1921-2010) con un aporte de 230 mm durante el ciclo. En 2009/10 resultaron similares al promedio histórico y con un aporte de 365 mm, mien-

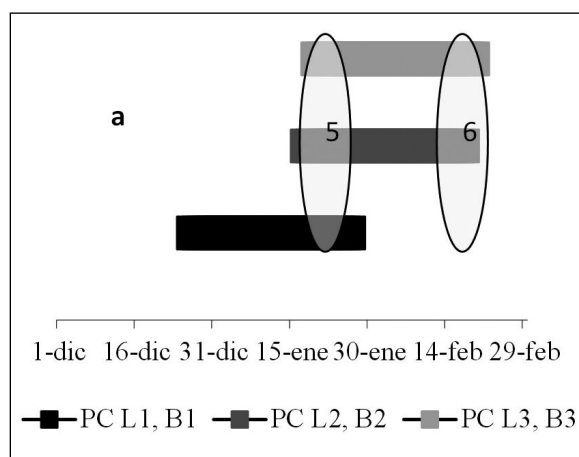


Figura 5a: Período crítico (PC) del cultivo de girasol en los sitios evaluados (L1, B1, L2, B2, L3, B3) y ocurrencia de estrés térmico durante 5 y 6 días consecutivos en 2008/09 (elipse).

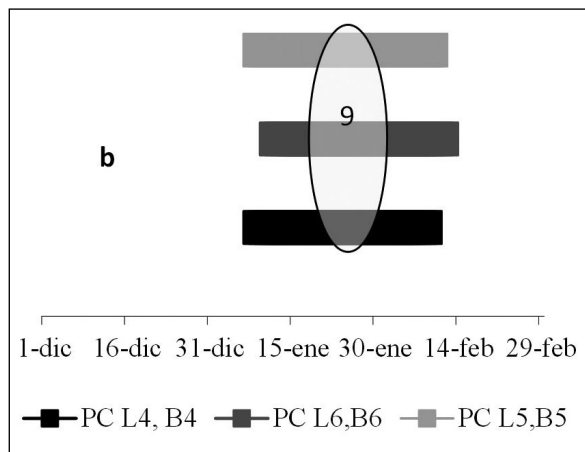


Figura 5b: Período crítico (PC) del cultivo de girasol en los sitios evaluados (L4, B4, L5, B5, L6, B6) y ocurrencia del estrés térmico durante 9 días consecutivos en 2009/10 (elipse).

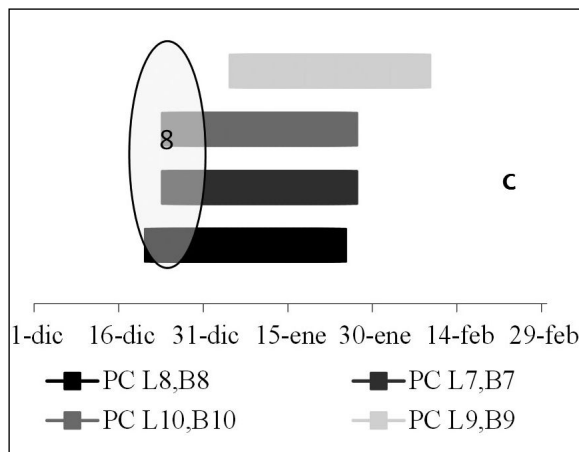


Figura 5c: Período crítico (PC) del cultivo de girasol en los sitios evaluados (L7, B7, L8, B8, L9, B9, L10, B10) y ocurrencia del estrés térmico durante 8 días consecutivos en 2010/11 (elipse).

tras que en la campaña 2010/11 fueron inferiores en un 12 % y de 310 mm.

En los 3 años evaluados se registraron estreses térmicos que afectaron de manera diferencial el período crítico según el año y la fecha de siembra (Figura 5a, 5b y 5c).

En el año 2008/09 se presentó durante el llenado de granos, en 2009/10 fue en floración y en el año 2010/11 fue a principio de floración. En ésta última campaña el llenado de aquenios se vió favorecido por las abundantes lluvias de enero.

En la Tabla 1 se describen las características edáficas de cada sitio. Los contenidos de arcilla + limo, materia orgánica total (MOT) y nitrógeno de nitratos (N NO₃⁻) fueron mayores y los de fósforo (P) menores en el sitio de mayor aptitud productiva identificado como Bajo (B). El agua útil (AU) a la siembra siempre fue superior en el B con incrementos que variaron entre 1,5 y 8,8 veces en rela-

ción a sitios de menor aptitud identificados como Loma (L). En algunos sitios B se registró presencia de napa freática entre 2,6 a 3 m. de profundidad.

El rendimiento del cultivo de girasol estuvo condicionado por el sitio ($p < 0,0127$). Los rendimientos promedios en B resultaron 2,7 y 1,7 veces superiores respecto de la loma en la campaña 2008/09 y 2009/10 respectivamente, mientras que en la campaña 2010/11 no se observaron diferencias en rendimiento entre los sitios (Figura 6). Si bien los rendimientos de B fueron siempre superiores a los rendimientos de L, las diferencias se acentúan cuando las precipitaciones del mes de enero son escasas.

Las menores diferencias entre L6 y B6 observadas en la campaña 2009/10 podrían atribuirse a un anegamiento temporal ocurrido en el mes de diciembre.

El rendimiento ajustado estuvo relacionado

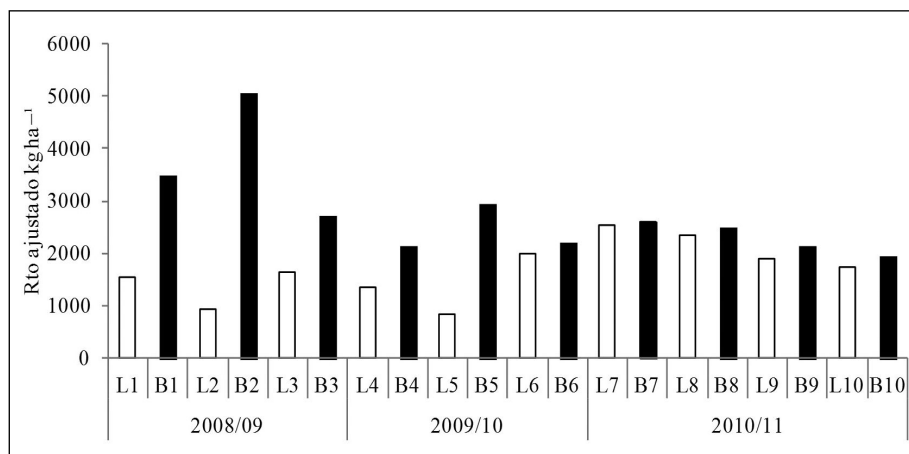


Figura 6: Rendimiento ajustado de girasol en sitios Loma (L) y Bajo (B) en los 3 años evaluados.

Tabla 1: Características edáficas de los 20 sitios evaluados.

Campaña	Sitio	Textura		M.O.T. %	N NO ₃ ⁻ 0 - 60 cm Kg ha ⁻¹	P 0 - 20 cm Kg ha ⁻¹	Napa Prof. m.	Agua útil	
		Arena Arcilla+Limo (%)	(%)					AU Siembra mm/300 cm	AU Floración mm/300 cm
2008/09	L2	79	21	1,46	51	124		56	6
	L1	91	9	0,76	10	47		58	0
	L3	84	16	1,23	20	70		55	0
	B2	57	43	2,82	83	39	2,8	492	316
	B1	79	21	1,16	22	33	3	381	230
	B3	65	35	2,39	117	63		203	79
2009/10	L4	82	18	1,62	78	80		30	14
	L5	81	19	1,6	113	67		8	13
	L6	75	25	1,69	109	32		120	89
	B4	56	44	2,51	194	85		278	126
	B5	47	53	2,5	296	23	2,6	496	455
	B6	65	35	2,4	86	65	2,8	400	259
2010/11	L7	79	21	1,46	47	125		105	30
	L9	91	9	0,76	23,3	47		29	101
	L10	84	16	1,23	192	70		108	17
	L8	84	16	1,6	41	75		185	92
	B7	57	43	2,82	66	40	2,8	391	347
	B9	79	21	1,16	23,2	33	3	161	274
	B10	65	35	2,39	45	63		238	110
	B8	68	32	1,8	59	108	2,8	273	151

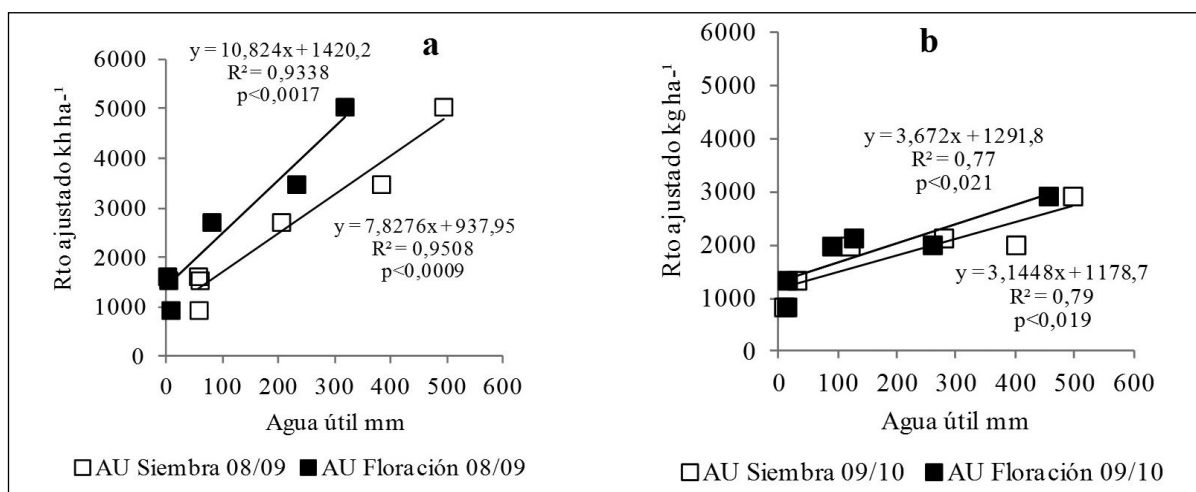


Figura 7: Relación entre el agua útil (AU) a la siembra y en floración con el rendimiento ajustado de girasol en años con precipitaciones inferiores a la media histórica durante el mes de enero. a) año 2008/09 y b) año 2009/10.

con la disponibilidad de agua útil a la siembra y floración en las campañas 2008/09 y 2009/10 (Figura 7a y 7b), donde se presentaron precipitaciones por debajo de la media histórica en el período crítico del cultivo (mes de enero). Estos resul-

tados coinciden con los encontrados por Quiroga y otros (2008) quienes encontraron relación entre el contenido de agua del suelo a la siembra y el rendimiento de girasol en años con escasas precipitaciones en el mes de enero.

Durante la campaña 2010/11, donde las precipitaciones fueron superiores a la media histórica en el mes de enero, no hubo relación entre el agua útil a la siembra ($R^2= 0,32$; $p= 0,14$) y en floración ($R^2= 0,22$; $p=0,24$) con los rendimientos obtenidos para el promedio de las densidades.

Perfil de consumo de agua de las raíces

En el girasol, el sistema radical se encuentra constituido por un eje principal o raíz primaria y por ramificaciones. El crecimiento en longitud de la raíz es rápido en comparación con el de la parte aérea. En suelos con baja resistencia a la penetración por las raíces, el ápice de la raíz primaria puede encontrarse a 30 cm de profundidad cuando la plántula termina de abrir los cotiledones y a 50-60 cm cuando ésta se encuentra en el estado de 2 hojas, dependiendo de la temperatura del suelo (Aguirrezábal et al. 1996). La raíz primaria crece verticalmente mientras no encuentre un impedimento que la desvíe, pudiendo alcanzar profundidades de hasta 3 m (Weaver, 1926). Dardanelli et al. (1997) encontraron que la profundidad de raíces aparente en girasol alcanzó entre 250 a 290 cm. según el cultivar y se produjo al inicio del llenado de granos. Begg and Turner (1976) encontraron que cuando el principal destino de los fotoasimilados es el grano, el crecimiento de otras partes de la planta es reducido a la mínima expresión.

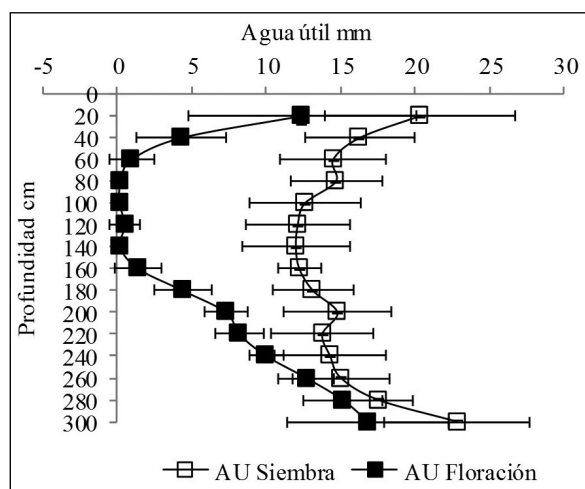


Figura 8: Agua útil (AU) en el suelo a la siembra y en floración del cultivo de girasol hasta 300 cm de profundidad para los sitios seleccionados. Las barras horizontales indican el error estándar de la media.

Para analizar el consumo de agua aparente del perfil radicular a distinta profundidad de suelo se seleccionaron los sitios que cumplieran con dos condiciones: a) ausencia de napa freática hasta 3 m, y b) agua disponible a la siembra en cantidad mayor a 126 mm hasta 3 metros de profundidad, que representa aproximadamente el 70 % de la capacidad de retención de agua del suelo. La primera condición tiende a evitar la subestimación del consumo de agua en profundidad generada por el aporte de agua desde la napa freática. La segunda condición tiende a asegurar el desarrollo óptimo del sistema radicular, el cual podría verse afectado por falta de humedad. En la Figura 8 se observan los perfiles de agua disponible a la siembra y floración.

Las diferencias en la densidad de raíces y la actividad de las mismas influyen en el consumo de agua por parte del sistema radicular. De esta forma, el consumo de agua no es homogéneo en todo el perfil. La Figura 9 muestra el consumo aparente de agua a diferentes profundidades en los sitios seleccionados. En los primeros centímetros de suelo se observa una mayor variabilidad producto de las fluctuaciones en la humedad originadas por las precipitaciones posteriores a la siembra.

El consumo de agua aparente más importante del cultivo se observa hasta 240 cm de profundidad mientras que las curvas de agua útil a la siembra y floración tienden a juntarse entre los 240 a 280 cm.

De acuerdo con estos resultados se planteó la

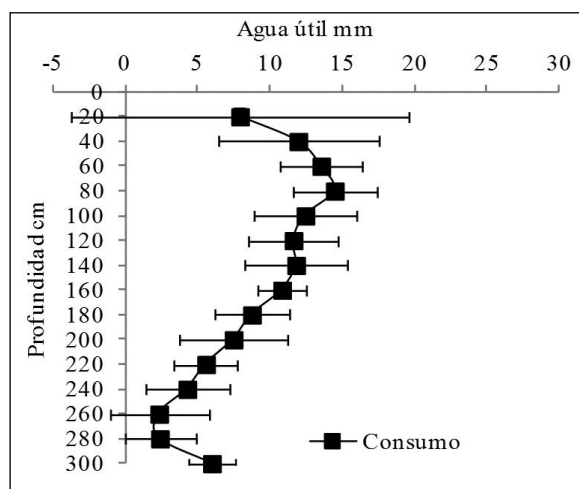


Figura 9: Consumo aparente de agua del suelo por el cultivo de girasol hasta 300 cm de profundidad para los sitios seleccionados. Las barras horizontales indican el error estándar de la media.

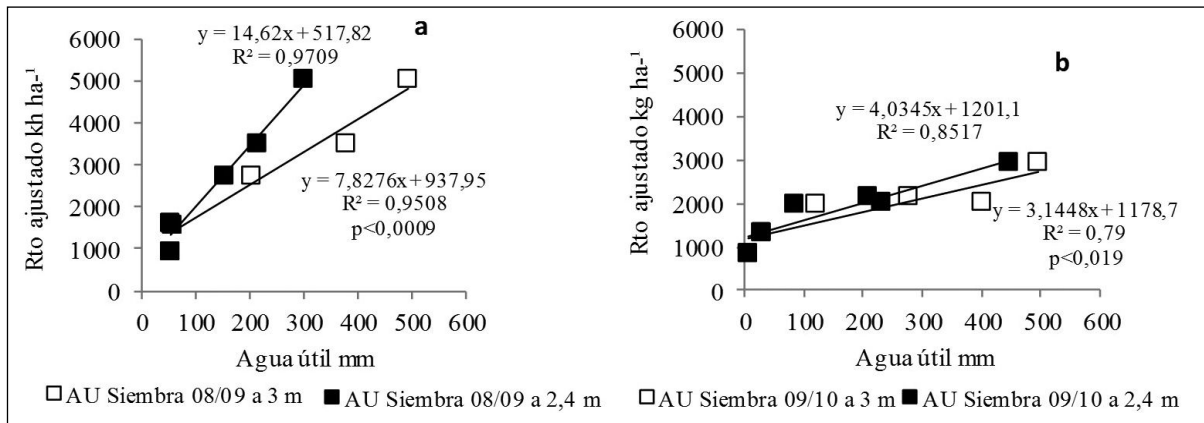


Figura 10: Relación entre el agua útil (AU) a la siembra a 2,4 y 3m. de profundidad y el rendimiento ajustado de girasol en dos años. a) año 2008/09 y b) año 2009/10.

posibilidad de evaluar el agua disponible del suelo a la siembra a una profundidad menor a 3 m. En la Figura 10a y 10b se observa la relación entre el agua a la siembra y el rendimiento ajustado considerando dos profundidades de muestreo: 3 y 2,4 m.

En base a las consideraciones anteriores se propone para los sitios que no dispongan de influencia de napa hasta 3 m de profundidad, realizar el muestreo para la determinación de humedad a la siembra a 2,4 m de profundidad. En suelos de diferentes texturas es necesario determinar la profundidad de muestreo adecuada.

Uso consuntivo por sitio

El uso consuntivo (UC) del cultivo de girasol, calculado como el agua útil a la siembra más las precipitaciones ocurridas durante todo el ciclo del cultivo menos el agua útil a madurez fisiológica varió con el sitio. En las lomas, el uso consuntivo osciló entre 434 a 322 mm. En los bajos fue de 639 a 388

mm. Los valores más altos pertenecen a los bajos con aporte de agua de napa freática (Figura 11). También se puede observar que no siempre altos valores de uso consuntivo se traducen en elevados rendimientos, como ocurrió en la campaña 2009/10. En esta campaña, el estrés térmico generado por temperaturas máximas superiores a 35° C durante 9 días consecutivos dentro del período crítico del cultivo podrían explicar los bajos rendimientos obtenidos a pesar de presentar UC elevado.

La eficiencia del uso del agua (EUA) fue calculada como la relación entre el rendimiento ajustado (kg ha⁻¹) y el consumo de agua (mm) por el cultivo de girasol.

En la Figura 12 se observa la eficiencia de uso del agua (EUA) y su relación con el rendimiento promedio en los sitios evaluados ($r^2=0,73$). En el sitio B la EUA varió entre 3,4 a 8 kg de grano mm⁻¹ de agua consumida mientras que en L fue de 2,1 a 5,4 kg de grano mm⁻¹.

Los valores más altos de EUA corresponden a

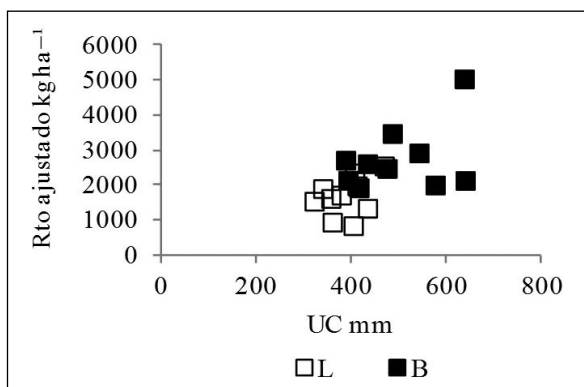


Figura 11: Uso consuntivo (UC) de girasol en función del rendimiento ajustado para sitios loma (L) y Bajo (B).

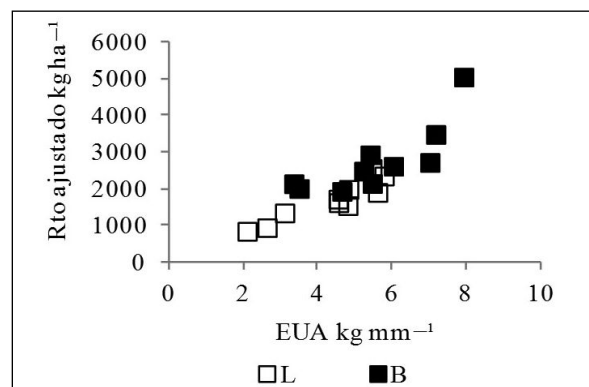


Figura 12: Eficiencia de uso del agua (EUA) de girasol en función del rendimiento ajustado en sitios loma (L) y bajo (B).

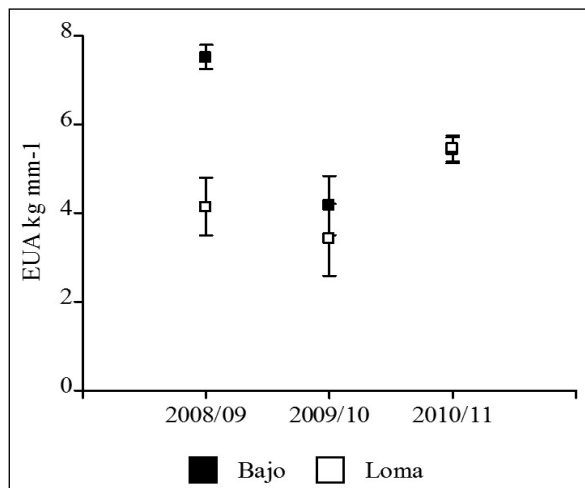


Figura 13: Eficiencia de uso del agua (EUA) de girasol en sitios loma (L) y bajo (B) en 3 campañas.

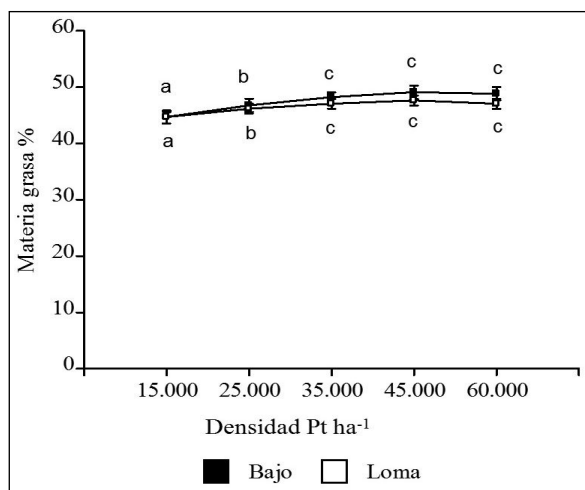


Figura 15: Contenido de materia grasa de girasol en función de la densidad de plantas ha^{-1} ($Pt\ ha^{-1}$) para sitios de diferente potencial de rendimiento (L: loma y B: bajo).

Medias con una letra común no son significativamente diferentes dentro del mismo sitio ($p < 0,05$).

bajos con aportes de agua de napa y menor número de días consecutivos con estrés térmico (año 2008/09). Sitios L en años con estrés térmico importante en el período crítico (2009/10) presentaron los valores más bajos de EUA.

En la Figura 13 se observa que los valores de EUA y las diferencias entre sitios en este indicador son dependientes del año ($p = 0,0118$).

En todos los sitios el rendimiento estuvo condicionado por el número de granos m^{-2} ($r^2 = 0,70$, $p < 0,0001$) (Figura 14). El mayor número de granos m^{-2} se observó durante 2008/09 en sitios B con aporte de napa y menor número de días consecutivos con estrés térmico.

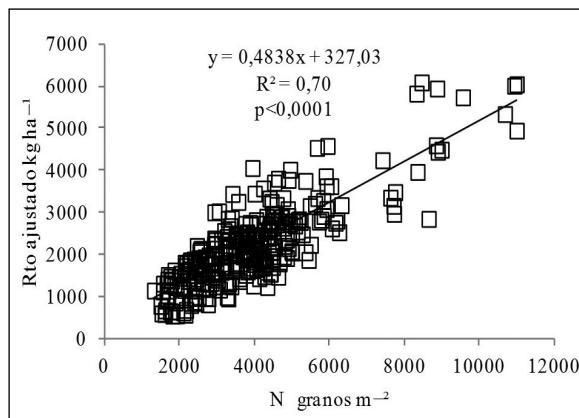


Figura 14: Relación entre el rendimiento ajustado de girasol y el número de granos m^{-2} .

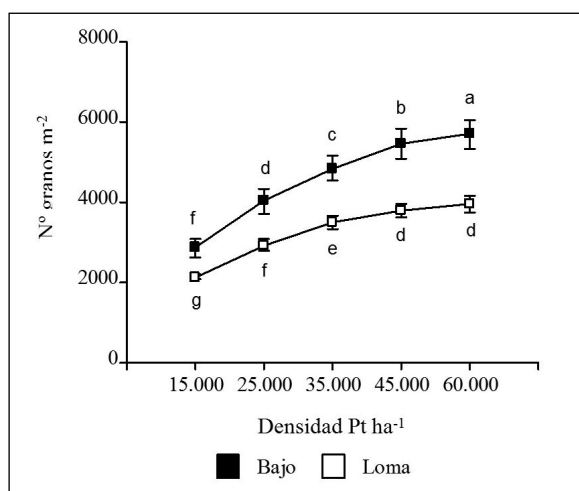


Figura 16: Número de granos m^{-2} de girasol en función de la densidad de plantas ha^{-1} para sitios de diferente potencial de rendimiento (L: loma y B: bajo).

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Efectos de cambios en la densidad sobre el rendimiento

En la Figura 15 se presenta el contenido de materia grasa y su relación con la densidad en los sitios evaluados. Se encontró interacción de la densidad con el sitio ($p = 0,0089$). Se puede observar que el contenido de materia grasa aumenta significativamente con la densidad hasta 35.000 plantas logradas ha^{-1} . A partir de este umbral no se observaron incrementos significativos en el contenido de materia grasa hasta la densidad máxima evaluada. En coincidencia, Hernández y Orioli (1992) encontraron incrementos en el contenido de materia grasa asociados al aumento en la densidad de plantas.

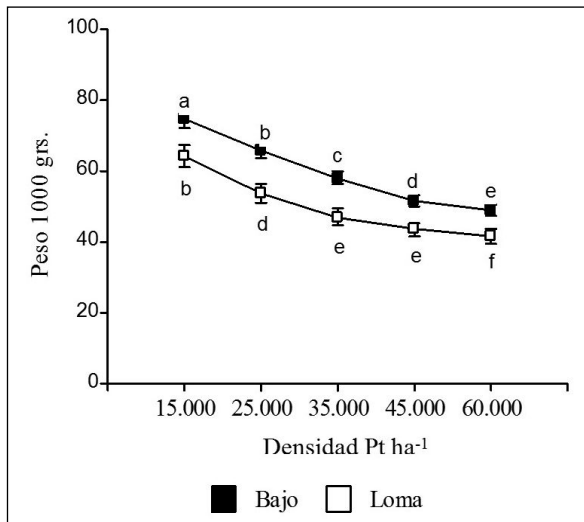


Figura 17: Peso de 1000 achenios de girasol en función de la densidad de plantas ha⁻¹ para sitios de diferente potencial de rendimiento (L: loma y B: bajo). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

El incremento del número de granos m⁻² por el aumento en la densidad de plantas estuvo condicionado por el sitio ($p < 0,0001$).

En la Figura 16 se presenta el número de granos m⁻² para diferentes densidades en los sitios evaluados. En el peso de 1000 achenios se encontró interacción significativa entre sitio y densidad ($p < 0,03$). El peso de 1000 achenios disminuye con el aumento de la densidad (Figura 17).

El análisis del rendimiento ajustado de acuerdo a las distintas densidades en estudio mostró que la variabilidad asociada al año, al lote y al híbrido no fue considerable. Este mismo comportamiento se observó cuando se estudió el número de granos, mientras que en la variable peso de 1000 granos y contenido de materia grasa la variabilidad vinculada al híbrido, al lote y al año fue de gran magnitud.

La interacción densidad por sitio produjo diferencias en los valores promedios de rendimiento ajustado ($p < 0,0001$). Se observó una mayor pérdida de rendimiento cuando se utilizaron bajas densidades en sitios B respecto de sitios más limitantes (L) (Figura 18). La densidad óptima para los sitios de mayor potencial de rendimiento fue de 35.000 plantas ha⁻¹ mientras que en sitios de menor potencial la densidad óptima fue menor, con valores de 25.000 plantas ha⁻¹.

No se observó disminución del rendimiento cuando la densidad utilizada fue el doble de la óptima. Estos resultados son coincidentes con los

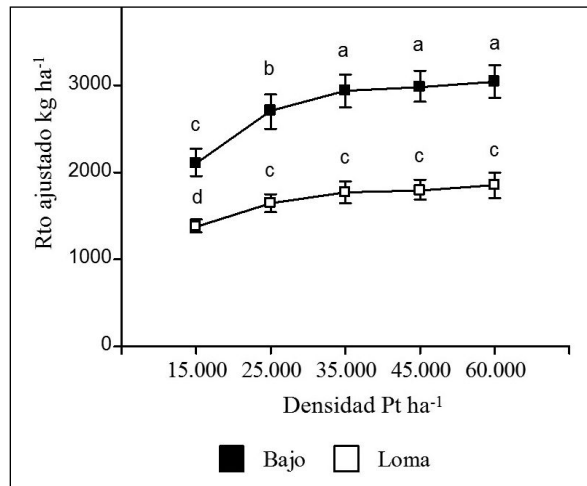


Figura 18: Rendimiento ajustado de girasol en función de la densidad de plantas ha⁻¹ para sitios de diferente potencial de rendimiento (L: loma y B: bajo). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

encontrados por Andrade y Sadras (2000) quienes observaron que la densidad óptima varía en función del ambiente y que incrementos en la densidad de girasol no tienen efectos depresores de rendimiento tan importantes en condiciones de recursos limitantes.

Conclusiones

El agua útil a la siembra es un valioso indicador de la productividad del sitio en años con precipitaciones inferiores a la media durante el período crítico. Sitios de diferente potencial de rendimiento determinan diferentes densidades óptimas. En sitios con suelos arenosos profundos de la región semiárida pampeana central de Argentina donde las expectativas de rendimiento son menores a 2 tn ha⁻¹, la densidad óptima es de alrededor de 25.000 plantas ha⁻¹ mientras que para sitios de más de 2 tn ha⁻¹ la densidad óptima es de 35.000 plantas ha⁻¹.

Para las condiciones analizadas, en los sitios de mayor potencial de rendimiento se deberían utilizar densidades aproximadamente 40 % superiores a los sitios de menor potencial.

3.4. Maíz temprano

Las precipitaciones ocurridas durante los meses de desarrollo del cultivo de maíz temprano (octubre a febrero) fueron distintas entre campa-

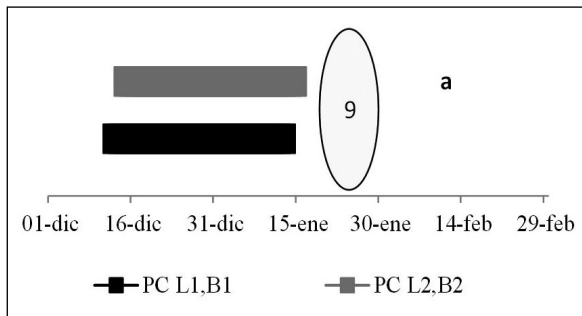


Figura 19a: Período crítico (PC) del cultivo de maíz temprano en los sitios evaluados (L1, B1, L2 y B2) y ocurrencia del estrés térmico durante 9 días consecutivos en 2009/10 (elipse)

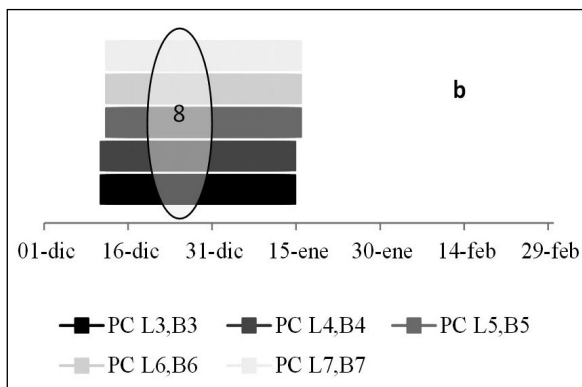


Figura 19b: Período crítico (PC) del cultivo de maíz tardío en los sitios evaluados (L3, B3, L4, B4, L5, B5, L6, B6, L7 y B7) y ocurrencia del estrés térmico durante 8 días consecutivos en 2010/11 (elipse).

ñas. Para la campaña 2009/10 fueron superiores en un 18 % respecto del promedio histórico de la zona (1921-2010) con un aporte de 500 mm durante el ciclo. En la campaña (2010/11) resultaron similares al promedio histórico y con un aporte de 414 mm.

En los 2 años evaluados se registraron estre-

ses térmicos que afectaron de manera diferencial el período crítico según el año (Figura 19a y 19b). Durante 2009/10 las temperaturas iguales o superiores a 35°C se registraron durante el llenado, mientras que en 2010/11 el estrés térmico se registró en el mes de diciembre con escasas precipitaciones y coincidiendo con el período crítico.

En la Tabla 2 se describen las características edáficas de cada sitio evaluado. Los contenidos de arcilla + limo, materia orgánica total (MOT) y nitrógeno de nitratos (N NO₃⁻) fueron mayores y los de fósforo (P) menores en el sitio de mayor aptitud productiva (B). El agua útil a la siembra siempre fue superior en el B con incrementos que variaron entre 5 a 1,7 veces en relación a sitios de menor capacidad productiva (L). En el sitio B3 se registró presencia de napa freática a 2 m. de profundidad. Las napas pueden contribuir significativamente al uso consuntivo de los cultivos con valores que pueden alcanzar el 70 % del total de agua evapotranspirada por el cultivo (Sepaskhah et al., 2003). En estudios realizados en la pampa ondulada, Portela et al. (2008) comprobaron a través de una toposecuencia de cultivos que las posiciones bajas del paisaje pueden contribuir al intercambio de agua y nitrógeno con el suelo cuando la napa se encuentra a menos de 2,5 m de profundidad. Al respecto, Passiura (1994) señaló que variaciones en la disponibilidad de agua pueden afectar la modulación del área foliar, el crecimiento radical, la eficiencia por la cual las hojas intercambian agua por CO₂ y los procesos involucrados en la generación y llenado de granos. Saks et al., 2010 encontraron que en suelos Molisoles del este de La Pampa y oeste de Buenos Aires con acuífero freático a 110 cm. de profundidad promedio, el rendimiento de maíz sin fertilización se

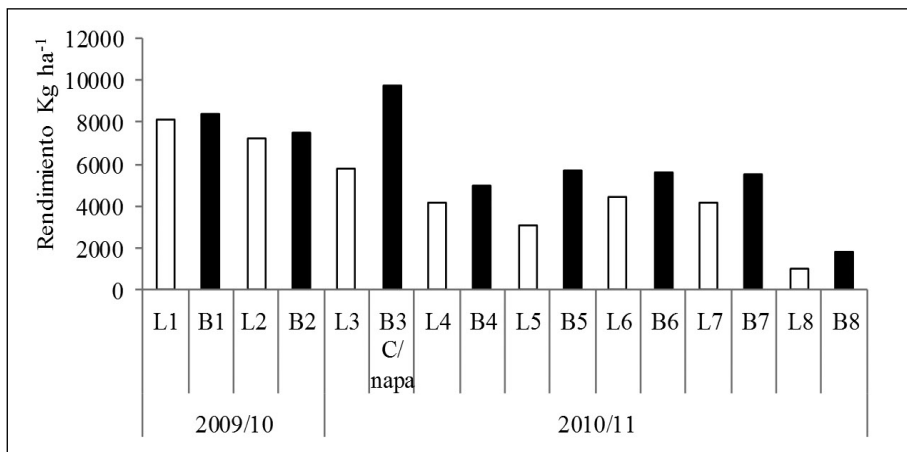


Figura 20: Rendimiento de grano de maíz temprano para los sitios evaluados en dos campañas.

Tabla 2: Características edáficas de los 14 sitios evaluados.

Campaña	Sitio	Textura			M.O.T. %	N NO ₃ ⁻ 0 - 60 cm Kg ha ⁻¹	P 0 - 20 cm Kg ha ⁻¹	Napa Prof. m.	Agua útil	
		Arena %	Limo %	Arcilla %					AU Siembra Mm/200 cm	AU Floración mm/200 cm
2009/10	L1	78	19	3	1,14	14	69		50	175
	L2	79	19	2	0,99	102	65		34	114
	B1	69	27	4	1,59	52,9	63		120	210
	B2	59	31	10	2,14	126	46		171	211
2010/11	L3	84	14	2	1	28	35		85	11
	L4	81	17	2	0,9	35	54		105	12
	L5	85	13	2	1,4	27	74		50	40
	L6	75	22	3	1,5	36	67		44	10
	L7	83	15	2	0,93	29	30		87	37
	L8	78	19	3	2,1	61	65		60	8
	B3	70	20	10	1,4	38,5	26	2	300	220
	B4	77	19	4	1,6	48	108		177	12
	B5	73	20	7	3	45	63		110	45
	B6	72	26	2	2,1	138	58		97	24
	B7	74	24	2	1,7	34	27		161	141
B8	72	25	3	2,5	88	68		100	48	

incrementó 2,35 veces en relación a sitios sin napa.

El rendimiento de grano del cultivo de maíz temprano estuvo condicionado por el sitio ($p=0.0032$). En la campaña 2010/11 los rendimientos promedios en B con napa a 2 m y sin napa resultaron 2,2 y 1,3 veces superiores respecto de la loma. Mientras que en la primer campaña (2009/10) no se observaron diferencias en rendimiento entre los sitios (Figura 20). Si bien los rendimientos del B fueron siempre superiores a los rendimientos de L, las diferencias se acentúan cuando las precipitaciones del mes de diciembre son escasas y existe disponibilidad de agua de napa al alcance de las raíces en el sitio B.

En la campaña 2009/10, donde las precipitaciones durante el período crítico fueron superiores a la media, no se observó relación entre al agua a la siembra y el rendimiento ($R^2=0,01$, $p=0,8938$). En la campaña 2010/11, donde las precipitaciones fueron escasas, se encontró una relación positiva (Figura 21). La presencia de napa se evidencia en el punto de mayor rendimiento, que disponía de 300 mm de agua útil acumulada a la siembra. En el análisis de esta campaña es

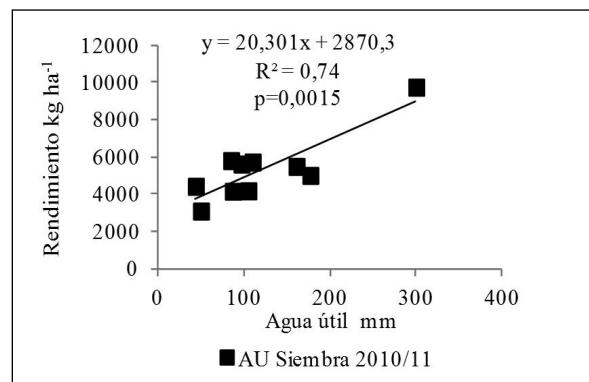


Figura 21: Relación entre el agua útil (AU) a la siembra y el rendimiento de grano de maíz temprano en un año con precipitaciones inferiores a la media histórica durante el período crítico (2010/11).

necesario considerar el estrés térmico como una limitante severa al rendimiento, que se ve potenciado en los sitios de menor disponibilidad hídrica.

El agua útil disponible al momento de floración estuvo asociada al rendimiento en ambas campañas. (Figura 22)

El período de floración es crítico para la determinación del rendimiento en grano de maíz (Andrade et al., 1996). Para las fechas de siembra

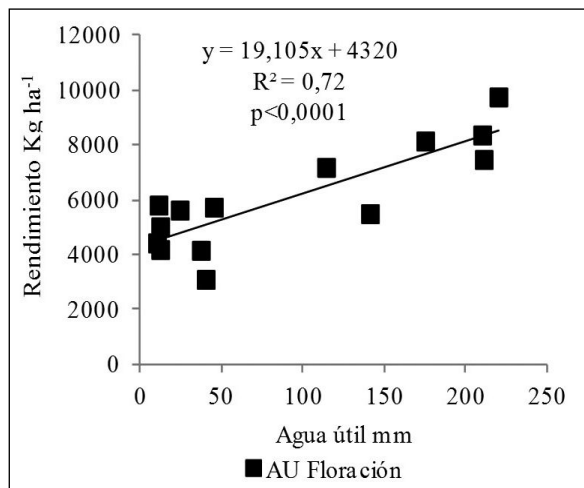


Figura 22: Relación entre el agua útil (AU) del suelo en floración y el rendimiento de grano de maíz en dos campañas.

de octubre este período se da a fin de diciembre. Las precipitaciones ocurridas en el mes de diciembre mostraron una alta relación con los rendimientos en los sitios sin napa. (Figura 23)

Perfil de consumo de agua de las raíces

El espesor de suelo explorado por las raíces es una variable que condiciona la biodisponibilidad de agua y el rendimiento de los cultivos (Kramer, 1993). Bajo estas condiciones surgen dos variables de importancia para caracterizar el efecto de la disponibilidad de agua que son la profundidad efectiva de raíces y el límite inferior de agua extractable alcanzado (Dardanelli y Bachmeier 1993). El cultivo de maíz alcanza una profundidad máxima de raíces de 170-190 cm al comienzo del período de llenado de granos (Dardanelli et al., 1997) distribuyéndose el 90 % de la masa radical en los primeros 30 cm. del suelo (Andrade et al., 1996). La profundidad efectiva de raíces puede variar significativamente como consecuencia de deficiencias hídricas tempranas (Otegui, 1992; Pandey et al 2000).

Para analizar el consumo de agua del perfil radicular a distinta profundidad de suelo se seleccionaron los sitios que cumplían con dos condiciones: a) lotes sin presencia de napa freática hasta 2 m y b) agua disponible a la siembra hasta 3 m de profundidad mayor a 126 mm que corresponde al 70 % de la CRA del suelo. La primera condición tiende a evitar la subestimación del

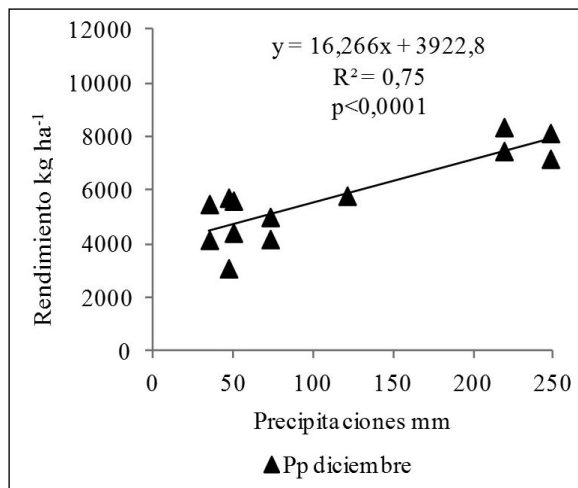


Figura 23: Relación entre las precipitaciones del mes de diciembre y el rendimiento de grano en los dos años y sitios evaluados, en el cultivo de maíz temprano.

consumo de agua en profundidad generada por el aporte de agua de la napa freática. La segunda condición tiende a asegurar el desarrollo óptimo del sistema radicular, el cual podría verse afectado por falta de humedad. En la Figura 24 se observan los perfiles de agua disponible a la siembra y en floración.

El consumo de agua más importante del cultivo se observa hasta 140 cm de profundidad mientras que las curvas de agua útil a la siembra y floración tienden a unirse a los 240 cm.

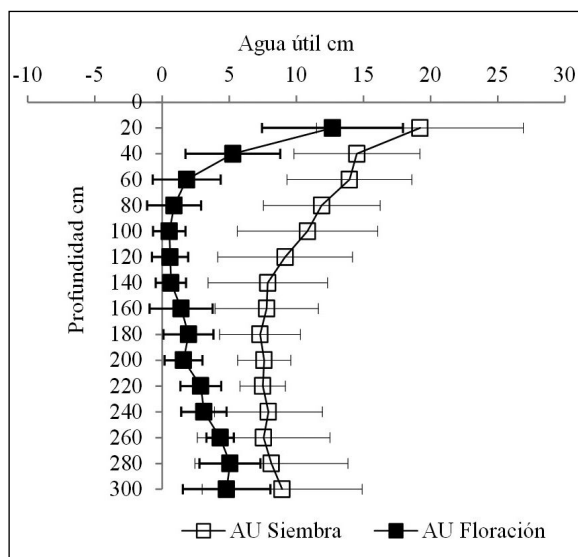


Figura 24: Agua útil (AU) en el suelo a la siembra y en floración del cultivo de maíz temprano hasta 300 cm de profundidad para los sitios seleccionados. Las barras horizontales indican el error estándar de la media.

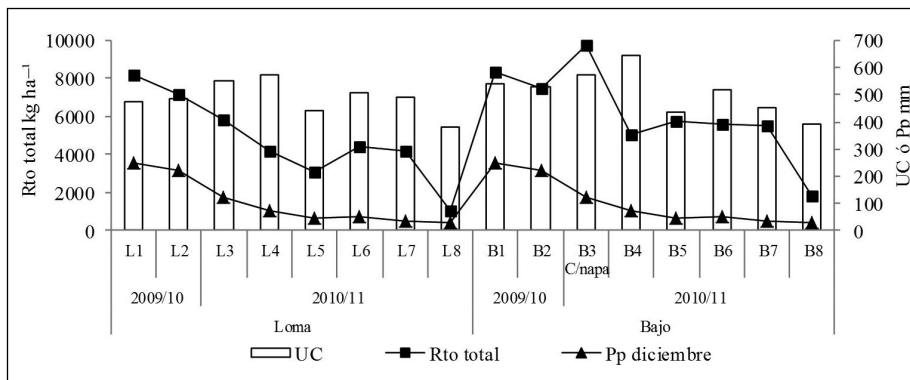


Figura 25: Uso consuntivo (UC), rendimiento de grano y precipitaciones de diciembre para los sitios y años evaluados en el cultivo de maíz temprano.

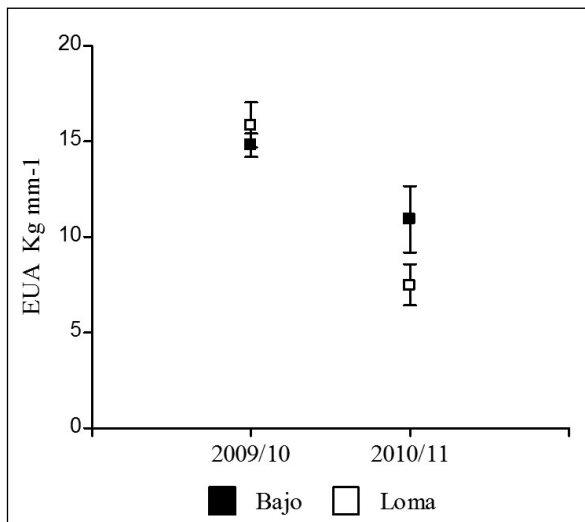


Figura 26: Eficiencia de uso del agua (EUA) de maíz temprano en sitios loma y bajo durante dos campañas.

Uso consuntivo por sitio

El uso consuntivo del cultivo de maíz temprano presentó valores de 490 y 511 mm en los sitios L y B respectivamente (Figura 25). En sitios sin napa con similar uso consuntivo, cuando las precipitaciones del mes de diciembre fueron abundantes se observaron mayores rindes de grano

tanto en B como en L.

En B3 se presentaron altos rendimientos con bajas precipitaciones en diciembre. Esto podría ser explicado por la presencia de napa a 2 m de profundidad. En estas condiciones el uso consuntivo es un parámetro que no expresa con claridad el consumo de agua del cultivo debido a la dificultad de estimar el aporte real de la napa.

La eficiencia del uso del agua (EUA) varió entre años ($p=0,0047$). En el año 2009/10, con precipitaciones abundantes en floración, la EUA fue superior y similar entre sitios ($p=0,4984$), con valor promedio de 15,4 kg de grano mm^{-1} de agua consumida. En la campaña 2010/11 la EUA varió con el sitio ($p=0,0468$). En la loma y en el bajo fue en promedio de 7,5 y 11 kg de grano mm^{-1} de agua consumida respectivamente (Figura 26). El contenido de arena de los sitios condicionó la EUA ($r = -0,47$).

En todos los sitios el rendimiento estuvo condicionado por el número de granos m^{-2} (Figura 27). El mayor número de granos m^{-2} se observó en los sitios B con napa a 2 m de profundidad, en cambio el menor número de granos m^{-2} se encontró en sitios con estrés hídrico y térmico durante el período crítico.

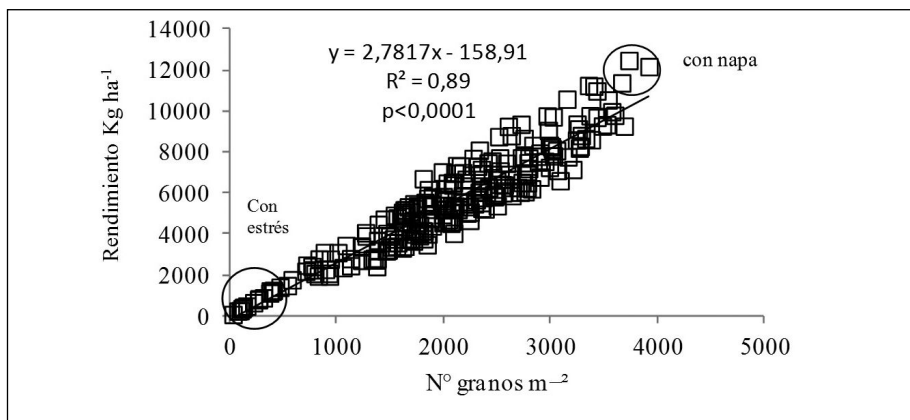


Figura 27: Rendimiento de grano en función del número de granos m^{-2} de maíz temprano para todos los sitios evaluados.

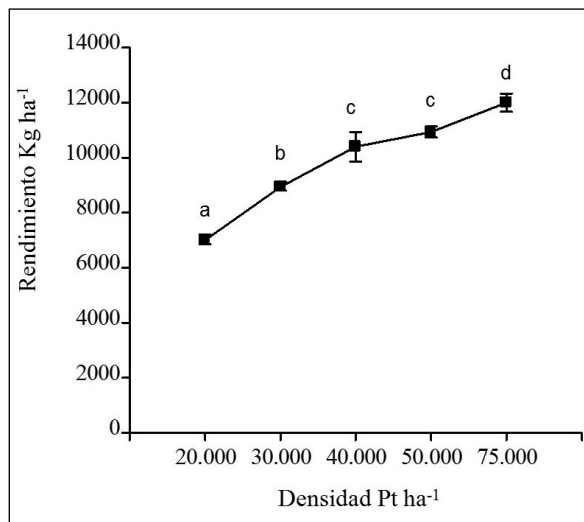


Figura 28: Relación entre el rendimiento de grano de maíz temprano y la densidad de plantas ha⁻¹ en el sitio de alto potencial de rendimiento.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

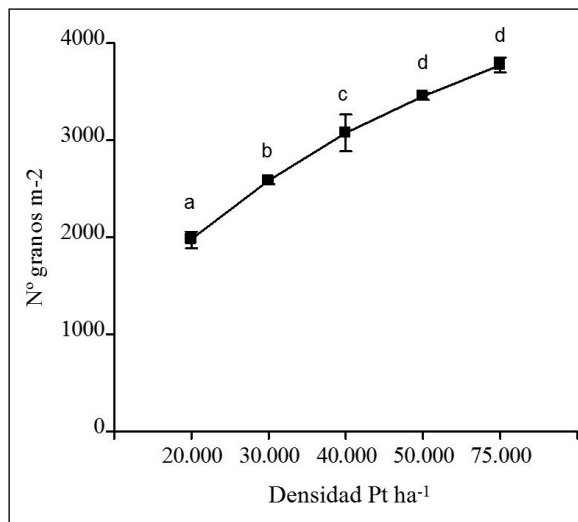


Figura 29: Relación entre el número de granos m⁻² y la densidad de plantas ha⁻¹ de maíz temprano en el sitio de alto potencial de rendimiento.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Efectos de cambios en la densidad sobre el rendimiento

Los resultados obtenidos en la región semiárida durante las campañas evaluadas presentaron diferentes ofertas de recursos determinando 3 situaciones: alto, medio y bajo potencial productivo.

En el sitio de alto potencial de rendimiento (L3,

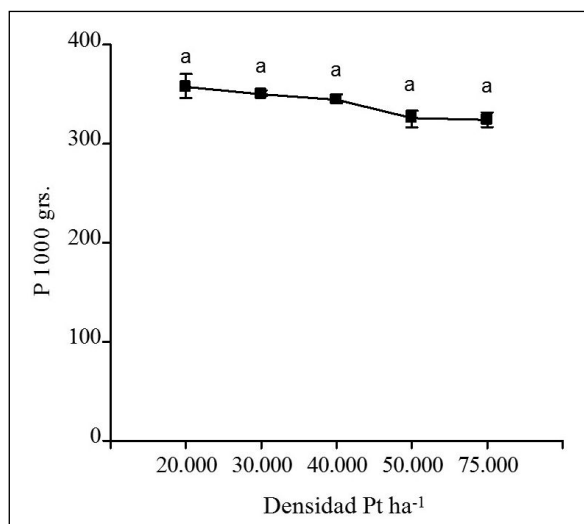


Figura 30: Peso de 1000 granos en función de la densidad de plantas ha⁻¹ en maíz temprano en el sitio de alto potencial de rendimiento.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

B3) se obtuvieron diferencias en el rendimiento de grano ante cambios de la densidad ($p < 0,0001$). En coincidencia con Andrade y Sadras (2000), en los sitios de alto potencial productivo, con rendimientos superiores a 8.000 kg ha⁻¹, el incremento de la densidad aumentó el rendimiento y la densidad óptima fue de 75.000 pt ha⁻¹. Esta situación sólo se presentó cuando se observó presencia de napa freática de buena calidad (conductividad eléctrica: 1,14 ds cm⁻¹ pH:8,64) alrededor de los 2 m. de profundidad (Figura 28).

En el sitio de alto potencial el número de granos aumentó en función de las densidades, alcanzando el máximo valor en las dos densidades mayores (Figura 29).

No se observaron diferencias significativas en el peso de 1000 granos con cambios en la densidad en el sitio de mayor potencial productivo ($p = 0,0527$) (Figura 30). En coincidencia con Andrade y Sadras, se observa que el componente de rendimiento más afectado por el cambio en la densidad es el número de granos mientras que el peso de 1000 granos presenta mayor estabilidad.

La mayoría de los sitios evaluados presentaron rendimientos dentro del rango de potencial medio, con valores entre 4.000 a 8.000 kg ha⁻¹.

Los rendimientos fueron mayores en el sitio B ($p = 0,0283$). El rendimiento promedio en esos sitios fue de 6378 kg ha⁻¹ mientras que en L fue de

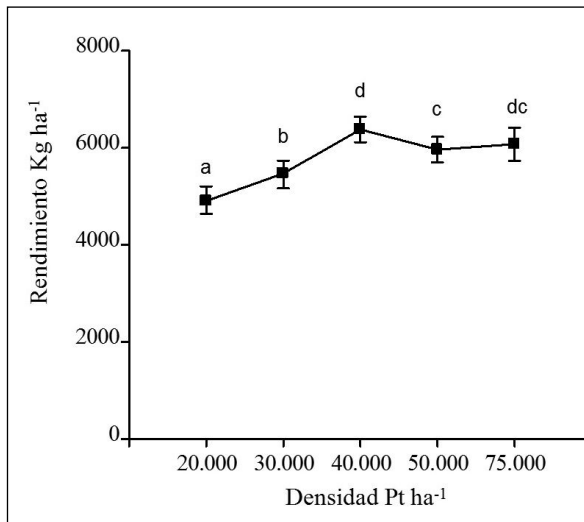


Figura 31: Rendimiento en función de la densidad de plantas ha⁻¹ de maíz temprano en sitios de potencial productivo medio.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

5293 kg ha⁻¹.

La densidad modificó el rendimiento ($P < 0,0001$). Cambios en la densidad produjeron efectos similares en el rendimiento en sitios L y B ($P = 0,7361$).

En condiciones de potencial productivo medio, la densidad óptima para sitios L y B fue de 40.000 plantas ha⁻¹ logradas. El incremento de densidad por encima de la óptima no produjo mermas de rendimiento, mientras que densidades subóptimas sí produjeron disminución (Figura 31). Similares resultados fueron alcanzados por Andrade y Sadras, (2000) quienes encontraron que en los ambientes de potencial productivo medio el rendimiento no varía en un amplio rango de densidades desde 55.000 a 80.000 plantas ha⁻¹.

No se observaron diferencias en el número de granos entre sitios L y B ($p = 0,1127$)

El aumento de la densidad incrementó el número de granos m⁻² ($p < 0,0001$) Los valores máximos se obtuvieron con 40.000 y 75.000 plantas ha⁻¹ (Figura 32). Densidades supraóptimas no provocaron caída de este componente de rendimiento mientras que densidades subóptimas generan menor número de granos m⁻². Como se indicó anteriormente, el número de granos m⁻² es el componente de rendimiento que mayor asociación presenta con el rendimiento de grano.

Se observaron diferencias en el peso de 1000

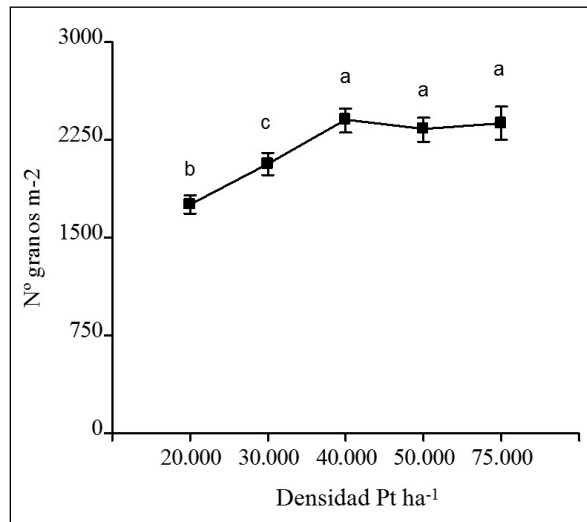


Figura 32: Número de grano m⁻² en función de la densidad de plantas ha⁻¹ de maíz temprano en sitios de potencial productivo medio.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

granos entre densidades en el sitio B mientras que en el sitio L fue similar ante cambios en la densidad ($p = 0,0411$) (Figura 33).

Sitios de bajo potencial de rendimiento se presentaron durante la campaña 2010/11 en la localidad de Hilario Lagos. Las condiciones de alta variabilidad climática que caracterizan a nuestra región semiárida pueden generar situaciones extremadamente adversas para el cultivo de maíz temprano provocando importantes caídas de rendimiento. En los sitios L8 y B8, se registraron precipitaciones de 30 mm en el mes de diciembre y 50 % menos de precipitaciones en el mes de enero con respecto al resto de los sitios evaluados. En estas condiciones se logró la menor producción de grano de las dos campañas.

El sitio B produjo mayor rendimiento que el sitio L ($p = 0,0107$). Los rendimientos obtenidos fueron 1846 y 1033 kg ha⁻¹ respectivamente.

Incrementos de la densidad disminuyeron el rendimiento ($p = 0,0053$). En sitios de baja capacidad productiva caracterizados por un déficit hídrico severo y rendimientos inferiores a 4.000 kg ha⁻¹, la densidad óptima fue considerablemente menor y de 20.000 pt ha⁻¹, aunque en esta situación, la densidad óptima no difiere estadísticamente de la de 40.000 plantas ha⁻¹ (Figura 34) Estos resultados coinciden con los obtenidos por Andrade y Sadras (2000).

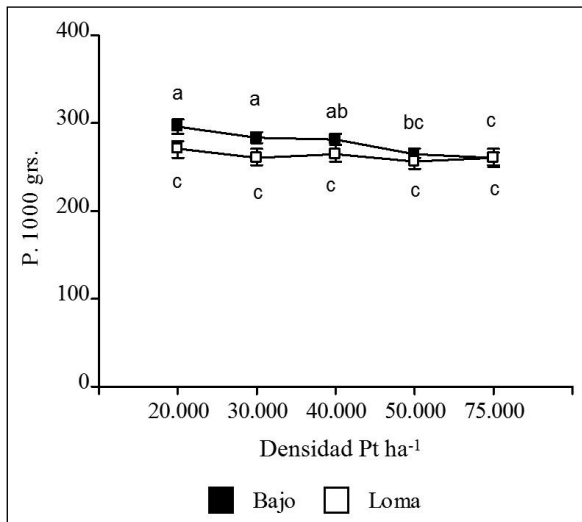


Figura 33: Peso de 1000 granos en función de la densidad de plantas ha⁻¹ de maíz temprano en sitios de potencial productivo medio.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

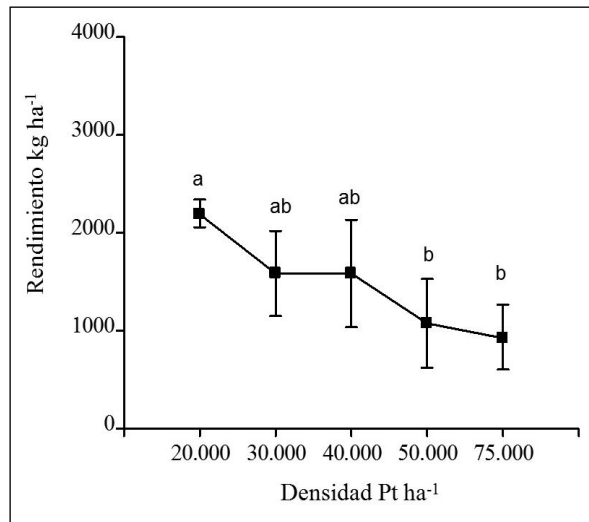


Figura 34: Rendimiento en función de la densidad de plantas ha⁻¹ de maíz temprano en sitios de potencial productivo bajo.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

La disminución del rendimiento de grano por aumento de la densidad fue similar para los sitios L y B ($p=0,0609$).

En condiciones de estrés hídrico y térmico severos el incremento de densidad produce mermas de rendimiento. Si bien esta situación no es buscada a priori, debe ser considerada como un escenario posible cuando se produce en sitios de potencial medio debido a la importante variabili-

dad climática regional.

El número de granos disminuyó en forma similar al rendimiento siendo el componente de rendimiento más sensible a cambios en la densidad ($p=0,0012$), situación que también se produce en sitios de mayor productividad (Figura 35).

El sitio B presentó mayor número de granos por m² ($p=0,0041$), siendo el número de granos por m² promedio de 653 y 355 para los sitios B y

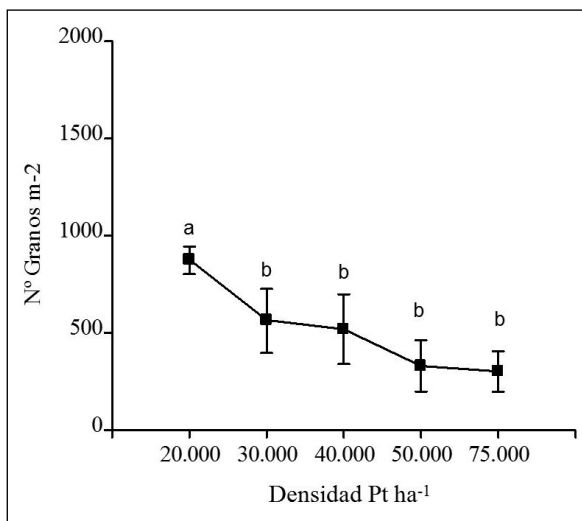


Figura 35: Número de granos en función de la densidad de plantas ha⁻¹ de maíz temprano en sitios de potencial productivo bajo.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

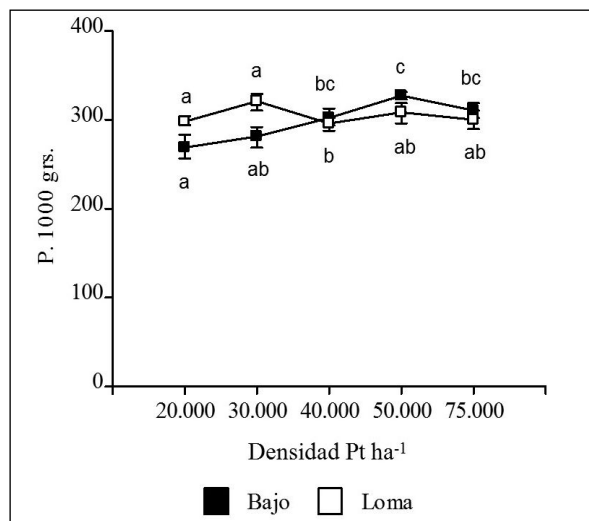


Figura 36: Peso de 1000 granos en función de la densidad de plantas ha⁻¹ de maíz temprano en sitios de potencial productivo bajo.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

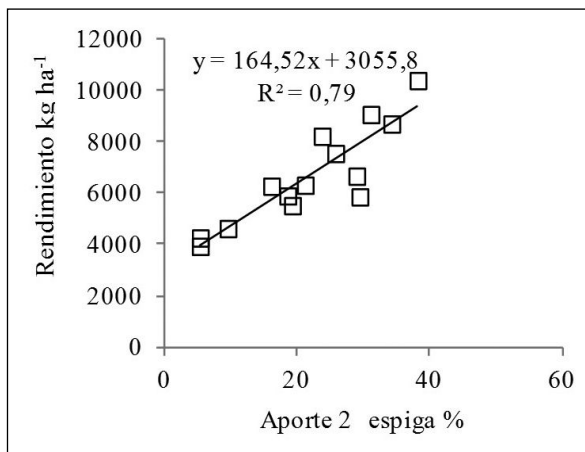


Figura 37: Aporte de la segunda espiga al rendimiento total de grano para la densidad de 40.000 pt ha⁻¹, en maíz de siembra temprana.

L respectivamente. Este comportamiento fue similar para todas las densidades ($p=0,1257$).

El peso de 1000 granos presentó diferencias entre sitios en función de la densidad analizada ($p=0,0124$) (Figura 36). Las diferencias observadas deben analizarse dentro de una situación climática adversa.

Aportes de la 2° espiga

Los materiales prolíficos presentan generalmente más estabilidad del rendimiento ante disminuciones en la densidad (Sarquis, 1998).

En situaciones de déficit hídrico severo, la segunda espiga no produce contribución al rendimiento y las densidades supraóptimas incrementan el número de plantas que no forman espigas. En esas condiciones la prolificidad no es un carácter relevante.

En la región semiárida pampeana es probable que un sitio de potencial medio, cuya densidad óptima es de 40.000 plantas ha⁻¹, genere rendi-

mientos similares a sitios de alto potencial cuando es favorecido por condiciones climáticas posteriores a la siembra. Esta mejora en las condiciones ambientales podría ser aprovechada por híbridos prolíficos que producen una segunda espiga. En la Figura 37 se presenta el aporte de la segunda espiga con respecto al rendimiento total de grano en los sitios evaluados para la densidad 40.000 plantas ha⁻¹. Esta densidad fue determinada como óptima para sitios de potencial medio. El aporte de la segunda espiga varió entre 5 y 35 % del rendimiento total de grano en sitios de potencial medio mientras que cuando el sitio fue de alto potencial el aporte de la segunda espiga llegó hasta el 38 %.

3.5. Maíz Tardío

Las precipitaciones ocurridas durante los meses de desarrollo del cultivo de maíz tardío (diciembre a marzo) también fueron distintas entre campañas. Para la campaña 2008/09 fueron inferiores en un 30 % respecto del promedio histórico de la zona (1921-2010) con un aporte de 263 mm durante el ciclo. En 2009/10 resultaron superiores en un 17% al promedio histórico y con un aporte de 438 mm, mientras que en la campaña 2010/11 fueron inferiores en un 11 % y con un aporte de 334 mm.

En los 3 años evaluados se registraron temperaturas elevadas que generaron estreses térmicos. Estos eventos meteorológicos, que se dieron en diferentes fechas según el año, afectaron de manera diferencial a los diferentes sitios evaluados en función de su duración y coincidencia con el período crítico del cultivo. En la Figura 38a, b y c se muestra el período crítico y ocurrencia del estrés térmico por sitio y año evaluado.

En la Tabla 3 se describen las características

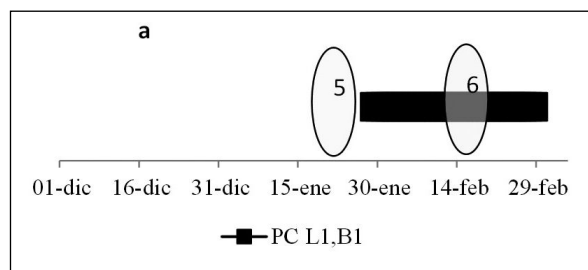


Figura 38a: Período crítico (PC) del cultivo de maíz tardío por sitio (L1, B1) y ocurrencia del estrés térmico durante 5 y 6 días consecutivos en 2008/09 (elipses).

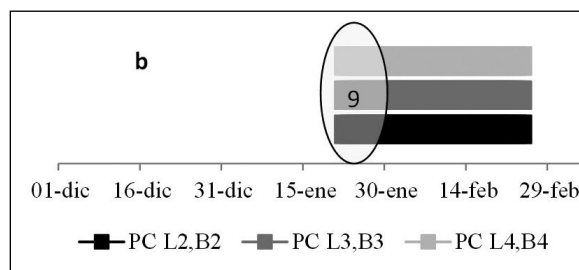


Figura 38b: Período crítico (PC) del cultivo de maíz tardío en los sitios (L2, B2, L3, B3, L4, B4) y ocurrencia del estrés térmico durante 9 días consecutivos en 2009/10 (elipse).

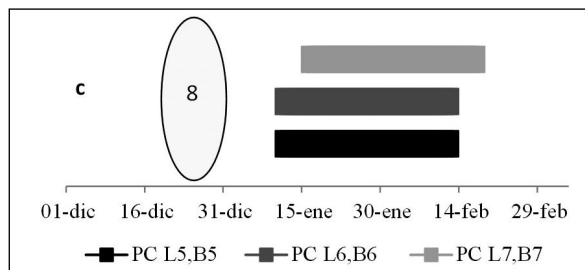


Figura 38c: Período crítico (PC) del cultivo de maíz tardío en los sitios evaluados (L5, B5, L6, B6, L7, B7) y ocurrencia del estrés térmico (elipses) durante 8 días consecutivos en 2010/11 (elipse).

edáficas de cada sitio. Los contenidos de arcilla + limo, materia orgánica total (MOT) y nitrógeno de nitratos ($N\ NO_3^-$) fueron mayores en el sitio de

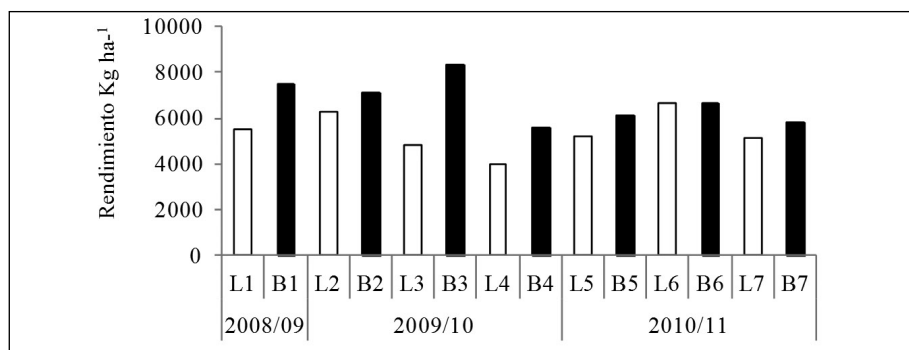


Figura 39: Rendimiento de grano de maíz tardío para los sitios evaluados en tres campañas.

Tabla 3: Características edáficas en los 14 sitios evaluados.

Campaña	Sitio	Textura			M.O.T. %	$N\ NO_3^-$ 0 - 60 cm Kg ha ⁻¹	P 0 - 20 cm Kg ha ⁻¹	Napa Prof. m.	Agua útil	
		Arena %	Limo %	Arcilla %					AU Siembra Mm/200 cm	AU Floración mm/200 cm
2008/09	L1	75	22	3	1,69	28,6	31		115	60
	B1	65	25	10	2,39	117	63	2,8	165	151
2009/10	L2	84	12	4	1,6	42	49		96	12
	L3	79	14	7	1,46	34	124		75	10
	L4	91	6	3	0,76	27	47		93	20
	B2	68	28	4	1,75	88	86		149	90
	B3	57	27	16	2,82	94	39	2,6	246	210
	B4	79	17	4	1,16	42	33		143	87
2010/11	L5	80	17	3	1,1	67	30		75	42
	L6	76	20	4	1,6	111	57		110	7
	L7	89	9	2	1	46	33		76	0
	B5	77	19	4	1,2	62	35	2,6	130	32
	B6	62	31	7	1,1	20	72	1,4	367	206
	B7	83	15	2	1,6	58	44	2,6	166	11

mayor aptitud productiva (B). El agua útil (AU) a la siembra siempre fue superior en el B con incrementos que variaron entre 3,3 a 1,4 veces en relación a sitios de menor capacidad productiva (L). En el sitio B6 se registró presencia de napa freática a 1,4 m. de profundidad.

A diferencia del maíz de siembra temprana, el rendimiento del cultivo de maíz tardío no presentó diferencias significativas entre sitios ($p=0,0667$) (Figura 39).

En la campaña 2008/09 los rendimientos promedio en el B resultaron 1,4 veces superiores respecto de la loma, mientras que en la segunda campaña (2009/10) en el B con y sin influencia de napa resultaron 1,7 y 1,3 veces superiores respecto de la loma. En la campaña 2010/11 la diferencia

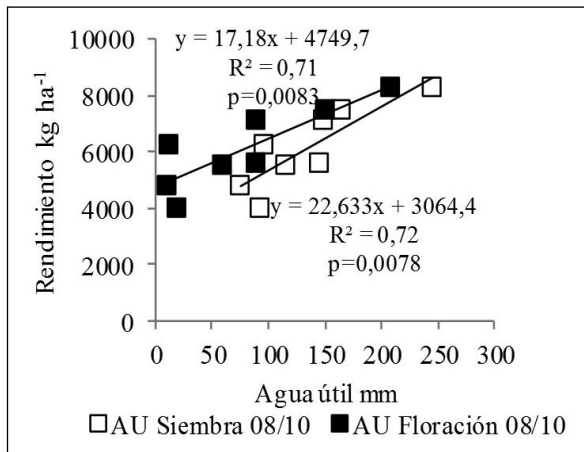


Figura 40: Relación entre el agua útil (AU) a la siembra y en floración con el rendimiento de grano, en el cultivo de maíz de siembra tardía en 2 años con precipitaciones inferiores a la media histórica durante el mes de enero.

entre sitios fue menor.

Las diferencias en rendimiento entre sitios se acentuaron cuando las precipitaciones del mes de enero fueron escasas y existieron diferencias en la disponibilidad de agua de napa de buena calidad al alcance de las raíces (B3). En el sitio B6 con presencia de napa freática a 1,4 m. de profundidad, no se observó un mayor rendimiento. En esta situación, la napa presentó valores de 3,2 de conductividad eléctrica y pH de 8,9.

El rendimiento de grano estuvo relacionado con la disponibilidad de agua útil a la siembra y en floración en las campañas 2008/09 y 2009/10 (Figura 40), donde se presentaron precipitaciones por debajo de la media histórica en el mes de enero, coincidente con el inicio del período crítico.

Durante la campaña 2010/11, donde las precipitaciones fueron superiores a la media histórica en el mes de enero, no hubo relación entre el agua útil a la siembra ($R^2=0,31$; $p=0,3304$) y en floración ($R^2=0,29$; $p=0,3532$) y los rendimientos obtenidos.

Perfil de consumo de agua de las raíces

Para analizar el consumo de agua del perfil radicular a distinta profundidad de suelo se seleccionaron los sitios que cumplían con dos condiciones: a) lotes sin presencia de napa freática hasta 2 m y b) agua disponible a la siembra hasta 2 m de profundidad mayor a 84 mm, que corresponde al 70 % de la CRA del suelo. En la Figura 41

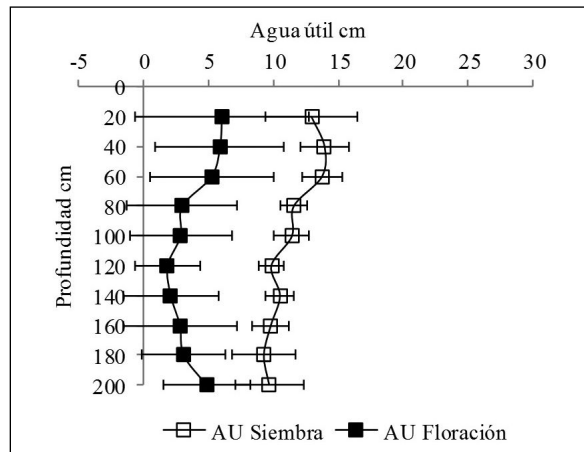


Figura 41: Agua útil (AU) a la siembra y en floración en el suelo del cultivo de maíz tardío hasta 200 cm de profundidad para los sitios seleccionados. Las barras indican el error estándar de la media.

se observan los perfiles de agua disponible a la siembra y floración. El mayor consumo es hasta 140 cm mientras que los contenidos de agua útil a la siembra y en floración se aproximan a partir de los 180 cm.

Estos resultados coinciden con Saks y otros (2012), quienes encontraron que híbridos de ciclo largo en siembras tardías presentaron mayor profundidad y abundancia de raíces que ciclos cortos. La profundidad alcanzada fue de 180 y 130 cm para híbridos de ciclos largo y corto respectivamente.

Uso consuntivo por sitio

El uso consuntivo (UC) fue similar entre sitios ($p=0,78$). En sitios L fluctuó entre 353 y 520 mm mientras que en sitios B varió entre 270 a 556 mm de agua (Figura 42).

No se observaron diferencias entre años en la eficiencia de uso del agua ($p=0,0561$).

Las diferencias encontradas entre sitios no fueron significativas ($p=0,0878$). En el sitio L varió entre 7,6 y 17,5 kg de grano mm^{-1} , mientras que en el B varió entre 10 y 20,2 kg de grano mm^{-1} de agua consumida. La misma estuvo condicionada por los contenidos de arena ($r=-0,52$) en los diferentes sitios.

Al igual que en los maíces de siembra temprana, en todos los sitios el rendimiento estuvo condicionado por el número de granos m^{-2} (Figura 43).

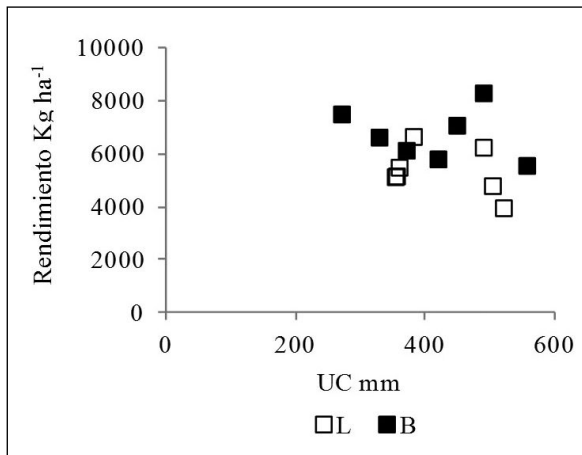


Figura 42: Uso consuntivo (UC) en función del rendimiento de grano en maíz de siembra tardía para los sitios evaluados.

Efectos de cambios en la densidad sobre el rendimiento

Todos los sitios evaluados en siembras tardías presentaron rendimientos dentro del rango de potencial medio, con valores entre 4.000 a 8.000 kg ha⁻¹. El rendimiento promedio para los maíces tardíos fue 6032 kg ha⁻¹. La densidad modificó el rendimiento ($P < 0,0001$). Cambios en la densidad produjeron efectos similares en el rendimiento en sitios L y B ($p = 0,1130$).

En condiciones de potencial productivo medio, la densidad óptima para ambos sitios fue de 50.000 pt ha⁻¹. El incremento de plantas por encima de esta densidad, no produjo mermas de ren-

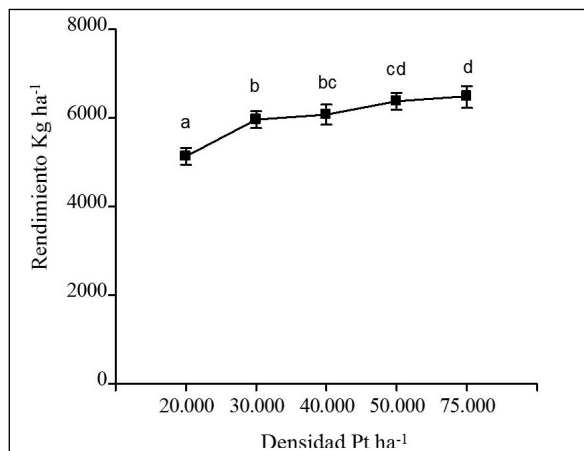


Figura 44: Rendimiento en función de la densidad de plantas ha⁻¹ de maíz de siembra tardía en sitios de potencial productivo medio.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes. ($p \leq 0,05$).

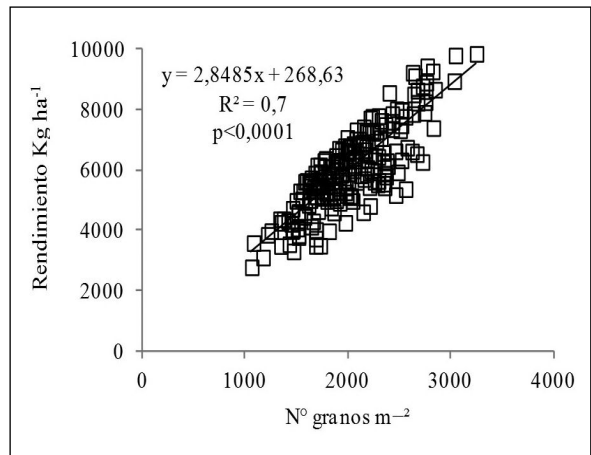


Figura 43: Rendimiento de grano en función del número de granos m⁻² en maíces de siembra tardía para los sitios evaluados.

dimiento, mientras que densidades subóptimas sí produjeron disminución (Figura 44).

No se observaron diferencias en el número de granos entre sitios L y B ($p = 0,1039$)

El aumento de la densidad incrementó el número de granos m⁻² ($p < 0,0001$) (Figura 45). Como se indicó anteriormente, el número de granos m⁻² es el componente de rendimiento que mayor asociación presenta con el rendimiento de grano. El peso de 1000 granos presentó diferencias entre sitios en función de la densidad analizada ($p = 0,0446$). La menor densidad produjo mayor peso de granos que la densidad máxima evaluada en ambos sitios.

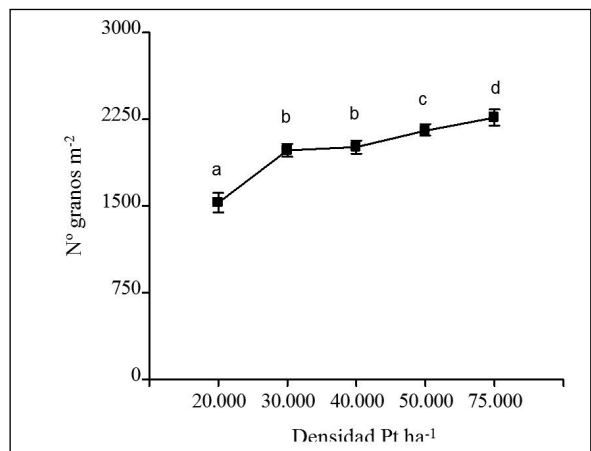


Figura 45: Número de granos m⁻² en función de la densidad de plantas ha⁻¹ de maíz de siembra tardía en sitios de potencial productivo medio.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes. ($p \leq 0,05$).

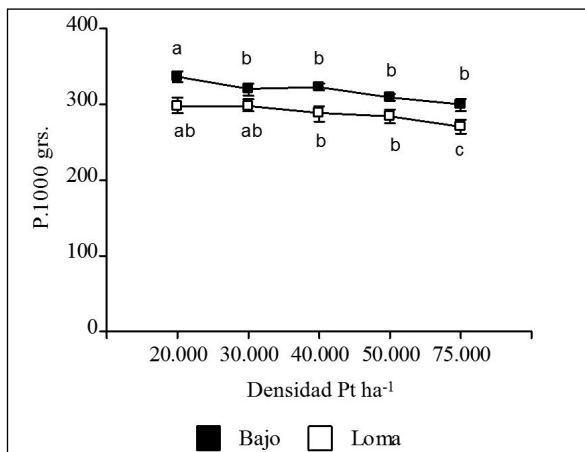


Figura 46: Peso de 1000 granos en función de la densidad de plantas ha⁻¹ de maíz de siembra tardía en sitios de potencial productivo medio.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes. ($p < 0,05$).

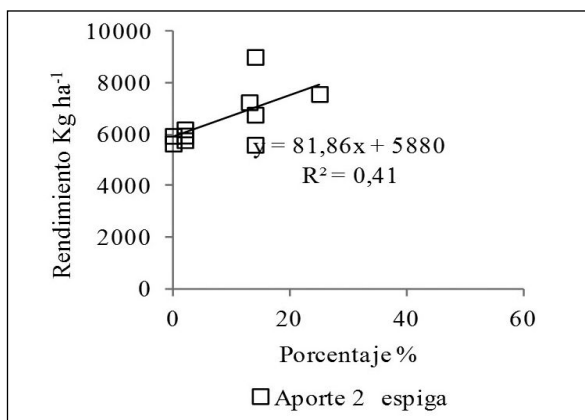


Figura 47: Aporte de la segunda espiga al rendimiento total de grano para la densidad de 50.000 pt ha⁻¹, en maíz de siembra tardía.

Aporte de la 2° espiga

En la Figura 47 se presenta el aporte de la 2° espiga con respecto al rendimiento total en los sitios evaluados para la densidad de 50.000 plantas ha⁻¹. Esta densidad fue determinada como óptima para los sitios de potencial medio. En los sitios de aptitud productiva media (4.000 a 8.000 kg ha⁻¹) el aporte de la 2° espiga varió entre el 0 y 25 % del rendimiento total.

3.6. Maíz de siembra temprana versus tardía

El análisis de las 3 campañas muestra algunas particularidades que pueden contribuir a la mayor

comprensión del impacto del manejo de la fecha de siembra en el cultivo de maíz.

Sitios de alto potencial con máximos rendimientos fueron obtenidos en condiciones de napa de buena calidad al alcance de las raíces y en siembras tempranas. Esto coincide con Andrade et al (1996), quienes manifiestan que en condiciones no limitantes de agua, las siembras tempranas permiten alcanzar mayores rendimientos que las tardías. El estrés térmico, si bien se presentó durante el período crítico del cultivo, no afectó en forma importante el rendimiento final. El efecto negativo del estrés térmico disminuye cuando el cultivo posee adecuada disponibilidad de agua.

Sitios de bajo potencial con rendimientos inferiores a 4000 kg ha⁻¹ se presentaron también en condiciones de siembras tempranas. En este caso, con disponibilidad de agua en el suelo a la siembra similar al resto de los sitios pero con escasas precipitaciones antes y durante el período crítico coincidentes con estrés térmico.

Los sitios con rendimientos dentro del rango de potencial medio fueron los más numerosos en cantidad. Esto permitió el análisis conjunto del efecto de cambios en la fecha de siembra en dos campañas. Si bien el número de campañas analizadas fue escaso en relación a los posibles escenarios climáticos en la región, es interesante este análisis ya que la distribución de las precipitacio-

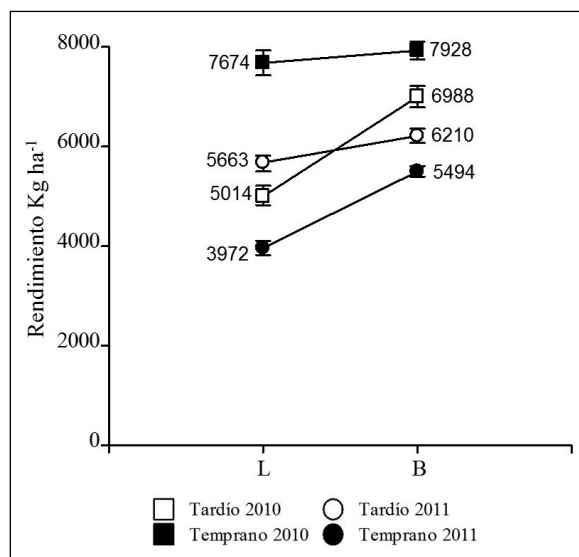


Figura 48: Rendimiento de grano para fechas de siembra temprana y tardía, en 2 campañas en función de los sitios evaluados (L: loma y B: Bajo). Maíces de potencial productivo medio.

nes durante las campañas analizadas incluye un año favorable a siembras tempranas y otro favorable a siembras tardías.

Para sitios de potencial medio se encontró interacción significativa entre la fecha de siembra, el año y el sitio para las campañas 2009/10 y 2010/11 ($p < 0,0476$) (Figura 48).

Los maíces tempranos de potencial medio lograron los mayores rendimientos en un año favorable pero los menores rendimientos en el año desfavorable. Los maíces de siembra tardía lograron rendimientos estables en años contrastantes. Estos resultados, para las condiciones de las experiencias, muestran una mayor estabilidad de rendimiento de maíces de siembra tardía en la región semiárida.

Se destaca que el atraso en la fecha de siembra es de mayor utilidad en años y/o sitios con restricciones hídricas.

La densidad óptima fue mayor en fechas de siembra tardías respecto a las siembras de octubre ($p = 0,0234$) (Figura 49).

El atraso en la fecha de siembra desde octubre a la primera quincena de diciembre permite ubicar temporalmente el período crítico en condiciones de un balance hídrico con menores déficit, evapotranspiración y probabilidad de estrés térmico. Por otro lado el período de llenado de grano se da en condiciones de menor radiación solar incidente. Estos cambios en las condiciones

durante floración y llenado podrían explicar el leve incremento de la densidad óptima que se observa en siembras tardías.

Las densidades óptimas en ambas fechas de siembra son bajas en relación a las determinadas en sitios sin limitaciones hídricas. Esta situación implica una deficiente interceptación de la radiación solar incidente. No obstante, cuando existen limitantes en la disponibilidad de agua, la interceptación de la radiación posee una jerarquía subordinada a las estrategias que permiten mejorar la eficiencia de uso del agua por el cultivo.

Los resultados aquí presentados pretenden contribuir a la generación de criterios agronómicos que permitan una mayor estabilidad de rendimientos de maíz en los sitios con déficit hídrico que caracterizan a la región semiárida pampeana central. Sin embargo, las limitaciones de recursos no han permitido abarcar todo el espectro de cultivares disponible en la región. Por el contrario, el análisis estadístico de los datos requiere acotar la variabilidad genética a fin de evaluar con mayor precisión los efectos de cambios en la densidad y fecha de siembra en diferentes sitios.

No obstante lo anterior, destacamos que varios autores han observado diferencias en el comportamiento de los cultivares ante cambios en la densidad (Tokatlidis et al. 2011 y, Sarlangue et al. 2007). Encontraron cultivares plásticos ante cambios en la densidad de plantas y otros que presentan escasa capacidad de adaptación. Los híbridos utilizados en el presente trabajo mostraron un comportamiento similar a cultivares plásticos.

3.7. Sorgo

Las precipitaciones ocurridas durante los meses de desarrollo del cultivo de sorgo fueron distintas entre campañas. Para la campaña 2008/09 fueron inferiores en un 36 % respecto del promedio histórico de la zona (1921-2010) con un aporte de 255 mm durante el ciclo. En 2009/10 resultaron similares al promedio histórico y con un aporte de 430 mm. Mientras que en la última campaña (2010/11) fueron inferiores en un 20 % y de 304 mm.

En la Tabla 4 se describen las características edáficas de cada sitio. Los contenidos de arcilla + limo variaron entre 18 a 44 %, materia orgánica (MOT) 1,28 a 2,51 %, nitrógeno de nitratos (N

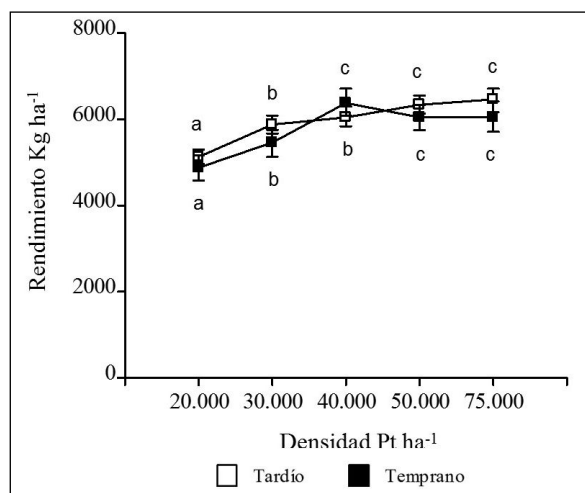


Figura 49: Rendimiento en función de la densidad de plantas ha⁻¹ en sitios de potencial productivo medio, en maíz de siembra temprana y tardía.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes. ($p < 0,05$).

Tabla 4: Características edáficas de los sitios evaluados.

Campaña	Sitio	Hibrido	Textura		M.O.T. %	N NO ₃ ⁻ 0 - 60 cm Kg ha ⁻¹	P 0 - 20 cm Kg ha ⁻¹	Agua útil	
			Arena %	Arcilla+Limo %				AU Siembra Mm/200 cm	AU Floración mm/200 cm
2008/09	1	VDH 206	82	18	1,62	40,64	79,65	65	11
	2	VDH 207	56	44	2,51	70,5	84,87	167	47
2009/10	3	Fronterizo	81	19	1,28	131	46	22	9
2010/11	4a	VDH 314	56	44	2,13	43,5	90	160	12
	4b	VDH 114	56	44	2,13	43,5	90	160	38

NO₃⁻) 40,6 a 131kg ha⁻¹ y fósforo (P) de 46 a 90 kg ha⁻¹ para los sitios evaluados

Perfiles de consumo de agua de las raíces

Robertson et al. (1993a) encontraron para el cultivo de sorgo que el cambio en el contenido de agua del suelo debido al consumo ajusta a un modelo exponencial hasta 170 cm. de profundidad, aunque midieron leves cambios hasta 190 cm. Por otro lado, Robertson et. al (1993b) observaron que el crecimiento de raíces se detuvo poco después de antesis.

Para analizar el consumo de agua por el cultivo de sorgo se seleccionaron sitios que presentaban agua útil acumulada a la siembra mayor al 70 % de la CRA del suelo. En la Figura 50 se presenta los contenidos de agua útil en el perfil de suelo hasta 2 m de profundidad, determinados a la siembra y en floración en los sitios seleccionados.

Los resultados muestran consumo de agua

aún a 2 metros, que constituye la máxima profundidad evaluada en dos campañas.

En consideración de lo anterior en 2010/11 se incrementó la profundidad de muestreo hasta 3 m. La Figura 51 muestra el contenido de agua en el perfil de suelo en dicha campaña que se caracterizó por presentar bajas precipitaciones. Se observa consumo de agua por debajo de los 2 m de profundidad.

Densidades óptimas en el cultivo de sorgo

Las diferencias en el rendimiento del cultivo de sorgo entre campañas estuvieron condicionadas principalmente por las precipitaciones registradas durante el ciclo de desarrollo del cultivo, desde la siembra a madurez fisiológica ($r=0.76$; $p=0.05$).

Para las condiciones de las experiencias no se observaron diferencias significativas en el rendimiento para densidades entre 70.000 y 140.000

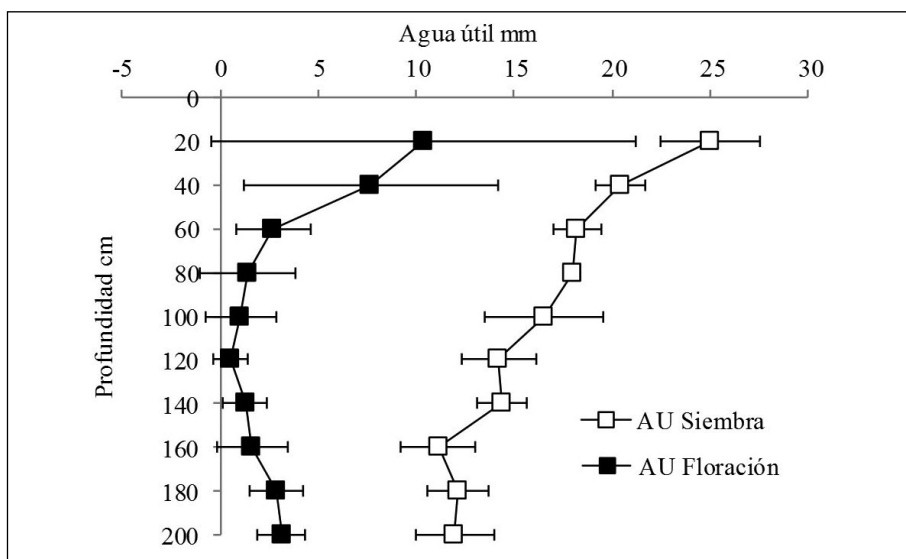


Figura 50: Agua útil (AU) en el suelo a la siembra y en floración del cultivo de sorgo hasta 200 cm de profundidad para los sitios seleccionados. Las barras indican el error estándar.

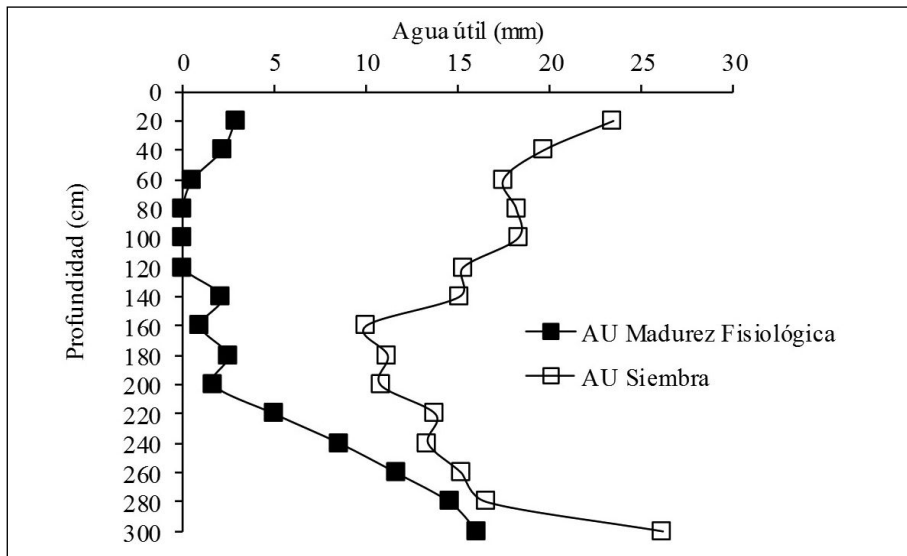


Figura 51: Agua útil (AU) en el suelo a la siembra y madurez fisiológica del cultivo de sorgo hasta 300 cm de profundidad para el sitio 4a.

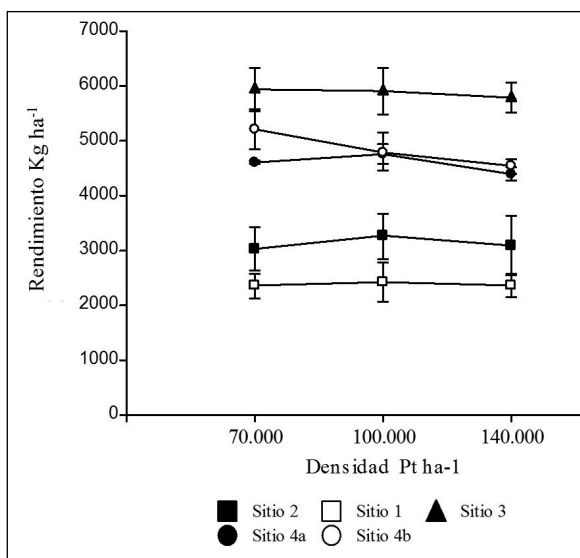


Figura 52: Rendimiento en función de la densidad de plantas ha⁻¹ en el cultivo de sorgo en diferentes sitios.

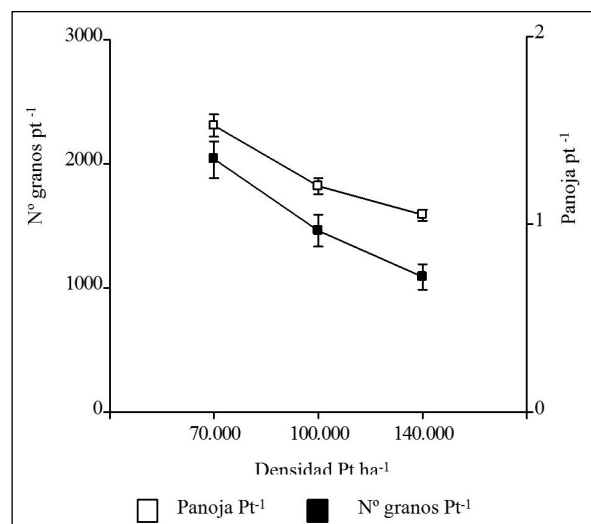


Figura 53: Número de panojas por planta y número de granos por planta en función de la densidad de plantas ha⁻¹ en el cultivo de sorgo.

plantas logradas ha⁻¹ ($p=0.59$) (Figura 52). No se encontraron diferencias en el número de granos m⁻² para las densidades evaluadas ($p=0,1165$).

Los resultados muestran una elevada estabilidad del rendimiento de grano del cultivo de sorgo frente a reducciones del 50% en el stand de plantas.

En coincidencia con Berteau et al. 2010 y Díaz et al., 2010, ante disminuciones en el stand de plantas, el cultivo generó más panojas por planta ($p<0,0001$) e incrementó el número de granos por planta (Figura 53).

Se observaron diferencias entre híbridos en el incremento del peso de los granos ante disminu-

ciones en la densidad ($p<0,0066$) (Figura 54). Resultados similares fueron obtenidos por Berteau y Ortiz (2010).

El rendimiento en todos los sitios estuvo condicionado por el número de granos por metro cuadrado ($R^2= 0.82$, $p<0.0001$) (Figura 55). Este comportamiento es similar al observado en girasol y maíz.

4. CONCLUSIONES

El cultivo de sorgo presentó similar comportamiento del rendimiento en grano con cambios en la densidad de plantas en diferentes campañas,

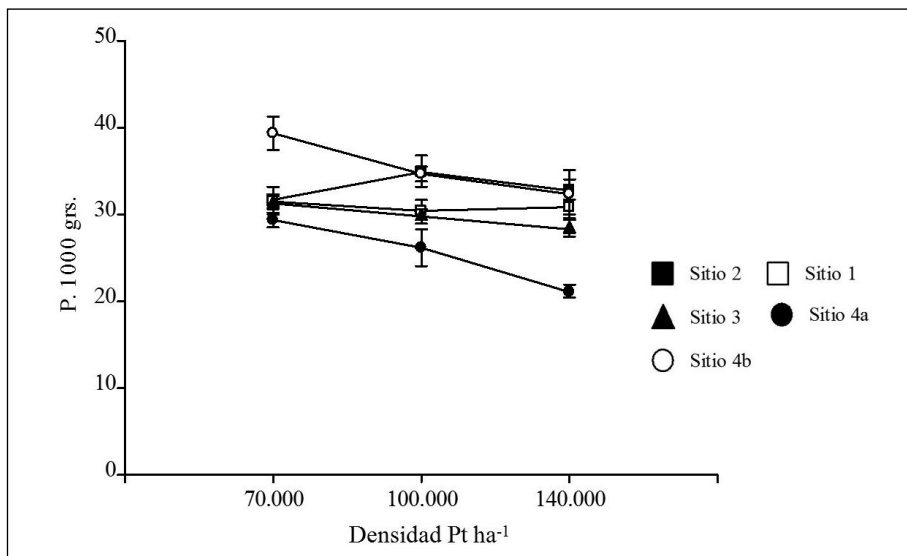


Figura 54: Peso de 1000 granos del cultivo de sorgo en función de la densidad de plantas ha^{-1} en diferentes híbridos del cultivo de sorgo (Sitio1:VDH 206, Sitio 2:VDH 206, Sitio 3: Fronterizo, Sitio 4a: VDH 314, Sitio 4b: VDH 114).

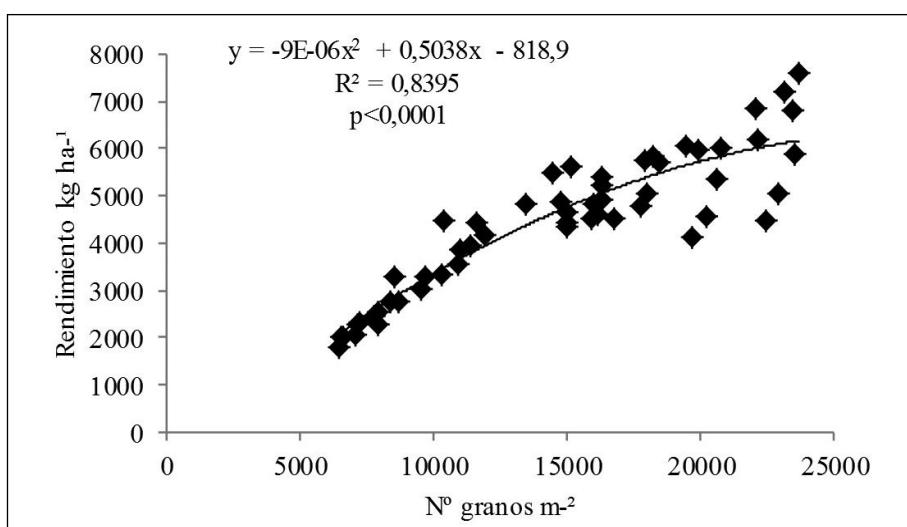


Figura 55: Rendimiento en grano en función del número de granos m^{-2} para el cultivo de sorgo.

cultivares y sitios.

Para las condiciones de déficit hídrico de las experiencias, en el rango de 70.000 a 140.000 plantas ha^{-1} no se observaron diferencias en los rendimientos máximos en los sitios evaluados. La densidad óptima fue de 70.000 plantas logradas ha^{-1} . La estrategia de compensación en el rendimiento del cultivo de sorgo frente a cambios en la densidad de plantas se logró mediante cambios en el número de granos y de panojas por planta. En tanto que no se observaron modificaciones significativas en el número de granos por m^2 y, en algunos casos, se observaron diferencias en el peso de 1000 granos asociadas al cultivar.

Densidades de 70.000 plantas logradas ha^{-1} si bien alcanzaron los máximos rendimientos para sitios con potenciales menores a 6.000 $kg ha^{-1}$,

incrementaron la competencia de malezas con el cultivo y requirieron repasos en el control de las mismas en post-emergencia. Por tal motivo, los productores deben considerar un incremento de densidad a nivel de lotes en producción respecto de este umbral de manera de adelantar el momento de máxima interceptación de radiación y mejorar la competencia del cultivo hacia las malezas. El incremento debería ser de mayor magnitud en lotes con mayores problemas de malezas. Por otro lado, con bajas densidades se observa mayor heterogeneidad temporal en la maduración de los granos ubicados en distintas panojas de la misma planta que podría generar inconvenientes en la trilla.

Estudios futuros deberían analizar los cambios en densidad asociados a cultivos de sorgo de diferentes ciclos, porte y condiciones hídricas.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Aguirrezábal, L.A.N., Orioli, G.A, Hernández, L.F., Miravé, J.P., Pereyra, V.R. 1996. Girasol: Aspectos fisiológicos que determinan el rendimiento. Balcarce E.E.A.- Facultad de Ciencias Agrarias - UNMdP, ISBN 950-985371-2. 127 p.
- Alvarez D., Firpo R, Qhillehauquy V., Quiroz F. 2006. Red nacional de evaluación de cultivares de girasol, información de la región centro ciclos 2004/05 y 2005/06. INTA-ASAGIR. 42 pp. Acceso 18/11/2011: http://www.asagir.org.ar/Publica-ciones/cuadernillo10_centro_INT.pdf
- Andrade, F.H. y Sadras, V.O., 2000. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. 3: 68-70, 4: 107-118.
- Andrade, F., Cirilo, A., Uhart, S., Otegui, M. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Editorial La Barrosa-EEA Balcarce, CERBAS, INTA-FCA, UNMP (Edt.). Dekalb Press. Buenos Aires. 292 pp.
- Begg, J., Turner, N.C. 1976. Crop water deficits. *Adv. Agron.* 28: 161-217
- Berry, J., Bjorkman, O. 1980. *Annu. Rev. Plant Phys.* 31: 491-543.
- Berteza, D., Ortiz, D. 2010. Efecto de la densidad de siembra sobre procesos de compensación y rendimiento en genotipos de sorgo granífero. IX Congreso Nacional de maíz. Simposio Nacional de sorgo. Rosario 2010. pp 397-398.
- Cárcova, J.; Borrás, L.; Otegui, M.E. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en maíz. En: Producción de Granos: Bases funcionales para su manejo. Satorre, E. y col. (Eds.) Facultad de Agronomía. UBA. pp 135-157.
- Chimenti, C.A., A.J. Hall. 2001. Grain number responses to temperature during floret differentiation in sunflower. *Field Crop Research.* 72: 177-184
- Commuri, P.D., Jones, R.J. 2001. *Crop Science.* 41: 1122-1130.
- Dardanelli, J.L. y Bachmeier, O.A. 1993. Profundidad efectiva de raíces y límite inferior de agua útil determinado en campo para diferentes cereales y oleaginosos. XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Trabajos y Comunicaciones Resumidos. pp 7-8.
- Dardanelli, J.L., Bachmeier, O.A., Sereno, R., Gil, R. 1997. Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam Haplustol. *Field Crops Research* 54: 29-38.
- Di Rienzo, J.A., Balzarini, M., Gonzalez, L., Casanoves, F., Tablada, M., Robledo, C.W. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Díaz, M.G, Kuttel, W., López, R. 2010. Rendimiento y componentes numéricos de híbridos de sorgo granífero en el centro oeste de la Provincia de Entre Ríos. IX Congreso Nacional de maíz. Simposio Nacional de sorgo. Rosario 2010. pp 417-419.
- Díaz, M.G., López, R., Blanzaco, E., Valentinuz, O., Ishigaki, A. y R. Picotti. 2007. Manejo del cultivo de sorgo granífero: Prácticas para mejorar el rendimiento de cultivares comerciales. INTA EEA Paraná. Actualización técnica Maíz, Girasol y Sorgo. Serie Extensión N° 44: 24-31.
- Gaines, M.S., K.J. Vofgt, J.L. Hamrick y J. Caldwell. 1974. Reproductive strategies and growth patterns in sunflowers (*Helianthus*). *Am. Nat.* 108: 889-894.
- Gambín, B. y Batlla, D. 2011. Determinación del rendimiento. En Producción de sorgo granífero. AACREA. 70 pp.
- Gardner, W.R. y H.R. Gardner. 1993. Principles of water management under drought conditions. *Agric. Water Manag.* 7: 143-155
- Hernández, L.F. y Orioli, G.A., 1992. Incidencia del número de frutos cosechables en la determinación del potencial de rendimiento del cultivo de girasol. *Proceder Agrotecnológico.* 4:56-63
- Herrero, M.P. y R.R. Johnson. 1980. High temperature stress and pollen viability of maize. *Crop. Sci.* 46:870-878.
- Kiniry, J.R., C.D. Wood, D.A. Spanel y A.J. Bockholt. 1990. Seed weight response to decreased seed number in maize. *Agron. J.* 54: 98-102.
- Kramer, P.J. 1993. Water relations of plant. Academic Press. 480 pp. In: Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. 2000. Cap. N° 7. Pags 173-206.
- Littell, R.C., Milliken, G.A., Stroup, W., Wolfinger, R.D., Schoberenger, O. 2006. SAS System for Mixed Models 2nd ed. SAS Institute Inc.
- Maddoni, G.A. 2010. Caracterización de los escenarios hídricos y térmicos en las regiones maiceras argentinas. IX Congreso Nacional de maíz. Simposio Nacional de sorgo. Rosario 2010. pp 25-27
- Ortiz, Diego. 2010. Bases ecofisiológicas para la producción de sorgo granífero. IX Congreso Nacional de maíz. Simposio Nacional de sorgo. Rosario 2010. pp 390-391.
- Otegui, M.E. 1992. Incidencia de una sequía en antesis en el cultivo de maíz. Consumo de agua, producción de materia seca y determinación de rendimiento. Tesis Magister Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, Bs. As, Argentina. pp 93.
- Otegui, M.E. 1995. Prolificacy and grain yield components in modern Argentinian maize hybrids. *Maydica* 40: 371-376
- Otegui, María E. 2010. Estrés hídrico y golpe de calor en maíz: Análisis ecofisiológico de su incidencia en la productividad del cultivo. IX Congreso Nacional de maíz. Simposio Nacional de sorgo. Rosario 2010. pp 28-30
- Pandey, R.K., J.W. Maranville y M.M. Chetima. 2000. Deficit

irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment II. Shoot growth, nitrogen uptake and water extraction. *Agricultural Water Management* 46: 15-27

- Passiura, J.B. 1994. The yield of crops in relation to drought. pp 343-359. En : K.J. Boote, J.M. Bennett, T.R. Sinclair y G.M. Paulsen (Ed). *Physiology and determination of crop yield*. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA. En: *Fertilidad física de los suelos*. M.A. Taboada y F.G. Micucci. pp 11-26
- Pereyra, V. R., C. Feoli y H. Sarlangue. 2001. Girasol en Siembra Directa. Cuadernillo Informativo N° 1. ASAGIR, 24 pp.
- Portela S.I., A.E. Andriulo, M.C. Sasal y J. Delpiaz. 2008. Intercambio de agua y nitrógeno entre el suelo y la napa freática en un agroecosistema de la pampa ondulada. XXI Congreso Argentino del Suelo. Potrero de los Funes - San Luis.
- Prasad, P.V.V., S. R. Pisipati, R. N. Mutava and M. R. Tuinstra. 2008. Sensitivity of Grain Sorghum to High Temperature Stress during Reproductive Development. *Crop Science* Vol. 48 No. 5, pp 1911-1917
- Quiroga A., R. Fernández, I. Frasier, D. Funaro. 2008. Aspectos del manejo del agua. En *El cultivo de girasol en la región semiárida pampeana*. Ed INTA. 3: 27-38. www.inta.gov.ar/anguil/info/pdfs/publicaciones/publi72.pdf
- R Development Core Team 2011. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>
- Ritchie, S.W., J.J. Hanway. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Ames, Iowa. Special Report N° 48.
- Robertson, M.J., Fukai, S., Ludlow, M.M. and Hammer, G.L., 1993a. Water extraction by grain sorghum in a sub-humid environment. I. Analysis of the water extraction pattern. *Field Crops Res.*, 33: 81-97.
- Robertson, M.J., Fukai, S., Ludlow, M.M. and Hammer, G.L., 1993b. Water extraction by grain sorghum in a sub-humid environment. II. Extraction in relation to root growth. *Field Crops Res.*, 33: 99-112.
- Rondanini D., Savin R., Hall A.J. (2003) Dynamics of fruit growth and oil quality of sunflower (*Helianthus annuus* L.) exposed to brief intervals of high temperature during grain filling. *Field Crops Research* 83: 79-90.
- Saks, M., A. Quiroga, I. Frasier, R. Fernández y P. Zalba.

2010. Contribución de las napas al rendimiento de maíz en Molisoles de la Planicie Medanosas. I Congreso internacional de Hidrología de Llanuras. Azul, Bs. As., Argentina. 6 pp.

- Saks, M., Fernández, R., Gili, A. y A. Quiroga. 2012. Efecto de la fertilización nitrogenada en distintos genotipos de maíz en la región semiárida pampeana. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina.
- Sarlangue T, Andrade F., Calviño P., and L. C. Purcell 2007. Why do maize hybrids respond differently to variations in plant density? *Agronomy Journal* 99: 984-991.
- Sarquis, J.L. 1998. Yield response of two cycles of selection from a semiprolific early maize population to plant density, sucrose infusion and pollination control. *Field Crops Res.* 55: 109-116
- Schneiter, A.A., y J.F. Miller 1981. Description of sunflower growth stages. *Crop. Science*. 21: 901-903.
- Sepaskhah, A.R., Kanooni, A. y Ghasemi, M.M. 2003. Water table contributions to corn and sorghum water use. *Agricultural Water Management* 58, 67-69
- Tollenaar, M. y T.B. Daynard. 1978. Dry weight, soluble sugar content and starch content of maize during the early post-silking period. *Can J. Plant Sci.* 58
- Trucillo, V. y D. Ortiz. 2011. Criterios para la elección de híbridos, fecha de siembra, densidad y distanciamiento entre hileras. AACREA. 70 pp.
- Tokatlidis, I.S., Has, V., Melidis, V., Has, I., Mylonas, I., Evgenidis, G., Copandean, A., Ninou, E. y V. A. Fasoula. 2011. Maize hybrids less dependent on high plant densities improve resources-use efficiency in rainfed and irrigated conditions. *Field Crop Research* 120: 345-351.
- Vanderlip, R.L. 1993. Description of sunflower growth stages. Illinois. State University of Science and Technology
- Villalobos, F.J, V.O. Sadras, A. Soriano y E. Fereres. 1994. Planting density effects on dry matter partitioning and productivity of sunflower hybrids. *Field Crops Res.* 36: 1-11
- Wade, L., and A. Douglas. 1990. Effect of plant density on grain yield and yield stability of sorghum hybrids in maturity. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 30 (2) 257-264.
- Wahid, A., S. Gelani, M. Ashraf y M.R. Foolad. 2007. Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany* 61:199-223.
- Weaver, J.E., 1926. Root development of field crops. McGraw Hill, New York.

ANEXO

GIRASOL			
Año	2008/09		
Sitios	L2 B2	L1 B1	L3 B3
Hibrido	DK 3820 (c. corto)	DK 4200 (intermedio-largo)	CF 31 (intermedio-largo)
Antecesor	Pastura	Maiz	Maiz
Barbecho (unid./ha)	Ultramax (1,6 lt) Sulfato de Amonio (1 kg) Sulfentrazone (150 cc) Fluorocloridona (400 cc)	Ultramax (1,6lt) Sulfato de Amonio (1 kg) Sulfentrazone (150 cc) Fluorocloridona (400 cc)	Ultramax (1,6 lt) Sulfato de Amonio (1 kg) Sulfentrazone (150 cc) Fluorocloridona (400 cc)
Fecha de siembra	29/11/2008	01/12/2008	02/11/2008
Fertilización a la siembra	Sin fertilización	Nitrodoble (25 kg/ha)	Nitrocomplex (35 Kg/ha)
Pulverización (unid./ha)	Ultramax (1,6 lt) Sulfato de Amonio (1 kg) Metolacloro (1 lt)	Ultramax (1,6 lt) Sulfato de Amonio (1 kg) Metolacloro (1 lt)	Ultramax (1,6 lt) Sulfato de Amonio (1 kg) Metolacloro (1 lt)
	Fluorloridona (200 cc) Gamacialotrina (30 cc)	Fluorloridona (200 cc) Gamacialotrina (30 cc)	Fluorloridona (200 cc) Gamacialotrina (30 cc)
	Pantera (2,5 lt)	Pantera (2,5 lt)	Pantera (2 lt)
Fecha prom. Floración	02/02/2009	04/02/2009	11/01/2009
Fecha cosecha	11/03/2009	30/03/2009	27/02/2009

GIRASOL			
Año	2009/10		
Sitios	L4 B4	L5 B5	L6 B6
Hibrido	DK 4200 (intermedio-largo)	DK 4050 (intermedio)	DK 3810 (intermedio- corto)
Antecesor	Sorgo	Sorgo	Maiz
Barbecho (unid./ha)	R UP Full II (2 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) Sulfentrazone (200 cc)	R UP Full II (2 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) Sulfentrazone (200 cc)	R UP Full II (2 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) Sulfentrazone (200 cc) Fluorocloridona (300 cc)
Fecha de siembra	20/11/2009	20/11/2009	23/11/2009
Fertilización a la siembra	Nitrocomplex (40 Kg/ha)	Nitrocomplex (40 Kg/ha)	Nitrocomplex (40 Kg/ha)
Pulverización (unid./ha)	R UP Full II (1,8 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) Metolacloro (1 lt)	R UP Full II (1,8 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) Metolacloro (1 lt)	R UP Full II (1,8 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) Metolacloro (1 lt)
	Fluorloridona (600 cc) Lamdacialotrina (100 cc)	Fluorloridona (600 cc) Lamdacialotrina (100 cc)	Fluorloridona (400 cc) Lamdacialotrina (100 cc)
	Pantera (2,5 lt)	Pantera (2,5 lt)	Pantera (2,5 lt)
Fecha prom. Floración	24/01/2010	24/01/2010	27/01/2010
Fecha cosecha	16/03/2010	16/03/2010	18/03/2010

GIRASOL				
Año	2010/11			
Sitios	L7 B7	L10 B10	L9 B9	L8 B8
Hibrido	AO DK 3945 (intermedio largo)	AO DK 3945 (intermedio largo)	AO DK 3945 (intermedio largo)	AO DK 3945 (intermedio largo)
Antecesor	Maiz	Maiz	Maiz	Maiz
Barbecho (unid./ha)	Ultramax (1,6 lt) Sulfato de Amonio (1 kg) Sulfentrazone (150 cc) Flurocloridona (400 cc)	Ultramax (1,6lt) Sulfato de Amonio (1 kg) Sulfentrazone (150 cc) Flurocloridona (400 cc)	Ultramax (1,6 lt) Sulfato de Amonio (1 kg) Sulfentrazone (150 cc) Flurocloridona (400 cc)	Ultramax (1,6 lt) Sulfato de Amonio (1 kg) Sulfentrazone (150 cc) Flurocloridona (400 cc)
Fecha de siembra	01/11/2010	01/11/2010	15/11/2010	26/10/2010
Fertilización a la siembra	Nitrocomplex (40 Kg/ha)	Nitrocomplex (40 Kg/ha)	Nitrocomplex (40 Kg/ha)	Nitrocomplex (35 Kg/ha)
Pulverizacion (unid./ha)	Ultramax (1,6 lt) Sulfato de Amonio (1 kg) Metolacloro (1 lt)	Ultramax (1,6 lt) Sulfato de Amonio (1 kg) Metolacloro (1 lt)	Ultramax (1,6 lt) Sulfato de Amonio (1 kg) Metolacloro (1 lt)	Ultramax (1,6 lt) Sulfato de Amonio (1 kg) Metolacloro (1 lt)
	Fluorloridona (200 cc) Gamacialotrina (30 cc)	Fluorloridona (200 cc) Gamacialotrina (30 cc)	Fluorloridona (200 cc) Gamacialotrina (30 cc)	Fluorloridona (200 cc) Gamacialotrina (30 cc)
	Pantera (2,5 lt)	Pantera (2,5 lt)	Pantera (2 lt)	Pantera (2 lt)
Fecha prom. Floración	10/01/2011	10/01/2011	22/01/2011	07/01/2011
Fecha cosecha	03/03/2011	28/02/2011	10/03/2011	02/03/2011

MAIZ TEMPRANO		
Año	2009/10	2009/10
Sitios	L1 B1	L2 B2
Hibrido	DK 190 (c. Intermedio)	DK 700 (c. Intermedio)
Antecesor	Soja	Cebada -Soja 2°
Barbecho (unid./ha)	R UP Full II (1,3 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) 2,4 D Amina (500 cc/ha) Atrazina (1,4 kg/ha)	Sulfosato (1,3 lt/ha) Atrazina (1,5 lt/ha)
Fecha de siembra	06/10/2009	04/10/2009
Fertilización a la siembra	Nitrocomplex (50 kg/ha) UAN 100 lt/ha	Nitrocomplex (55 kg/ha) UAN 70 lt/ha
Pulverizacion (unid./ha)	Ultramax (1,4 kg/ha) Sulfato de Amonio (1 kg)	Atrazina (0,75 lt/ha) Glifosato (2 lt/ha)
	Metalocloro (1lt/ha)	Acetacloro (1 lt/ha)
	Cipermetrinatrina (20 cc/ha)	Mustang (80 cc/ha)
Fecha prom. Floración	30/12/2009	28/12/2009
Fecha cosecha	03/03/2010	03/03/2010

MAIZ TEMPRANO						
2010/11						
Año	L3 B3	L4 B4	L6 B6	L5 B5	L7 B7	L8B8
Híbrido	DK 190 (intermedio)	DK 700 (c. Intermedio)	DK 190 (intermedio)	DK 190 (intermedio)	DK 190 (intermedio)	DK 190 (intermedio)
Antecesor	Soja	Girasol	Girasol	Pastura	Girasol	Girasol
Barbecho (unid./ha)	R UP Full II (1,3 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) 2,4 D Amína (500 cc/ha) Atrazina (1,4 kg/ha)	Sulfosato (1,3 lt/ha) Atrazina (1,5 lt/ha)	R UP Full II (2 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) 2,4 D Amína (600 cc/ha) Dicamba (140 cc/ha)	R UP Full II (2 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) 2,4 D Amína (600 cc/ha) Dicamba (140 cc/ha)	R UP Full II (2 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) 2,4 D Amína (600 cc/ha) Dicamba (140 cc/ha)	R UP Full II (2 lt/ha) Sulfato de Am onio (1 kg) 2,4 D Amína (600 cc/ha) Dicamba (140 cc/ha)
Fecha de siembra	02/10/2010	09/10/2010	10/10/2010	10/10/2010	10/10/2010	08/10/2010
Fertilización a la siembra	Nitrocomple (50 kg/ha) UAN 100 lt/ha	Nitrocomple (55 kg/ha) UAN 70 lt/ha	Nitrocomple (50 kg/ha) UAN 100 lt/ha	Nitrocomple (50 kg/ha) UAN 100 lt/ha	Nitrocomple (50 kg/ha) UAN 100 lt/ha	Nitrocomple (50 kg/ha) UAN 100 lt/ha
Pulverización (unid./ha)	Ultramax (1,4 kg/ha) Sulfato de Amonio (1 kg)	Atrazina (0,75 lt/ha) Glifosato (2 lt/ha)	Ultramax (1,4 kg/ha) Sulfato de Amonio (1 kg)	Ultramax (1,4 kg/ha) Sulfato de Amonio (1 kg)	Ultramax (1,4 kg/ha) Sulfato de Amonio (1 kg)	Ultramax (1,4 kg/ha) Sulfato de Amonio (1 kg)
	Metolcloro (1lt/ha)	Acetacoloro (1 lt/ha)	Metolcloro (1lt/ha)	Metolcloro (1lt/ha)	Metolcloro (1lt/ha)	Metolcloro (1lt/ha)
Fecha prom. Floración	Cipermetrinatrina (20 cc/ha)	Mustang (80 cc/ha)	Cipermetrinatrina (20 cc/ha)	Cipermetrinatrina (20 cc/ha)	Cipermetrinatrina (20 cc/ha)	Cipermetrinatrina (20 cc/ha)
Fecha cosecha	26/12/2010	28/12/2011	29/12/2010	29/12/2010	29/12/2010	29/12/2010
	23/03/2011	18/03/2011	22/03/2011	25/03/2011	31/03/2011	28/03/2011

MAIZ TARDIO	
Año	2008/09
Sitios	L1 B1
Hibrido	DK 682 (c. Intermedio -corto)
Antecesor	Pastura
Barbecho (unid./ha)	Ultramax (1,6 lt) Sulfato de Amonio (1 kg) 2,4 D Amina (600 cc/ha) Dicamba (140 cc/ha)
Fecha de siembra	15/12/2008
Fertilización a la siembra	Nitrodoble (25 kg/ha)
Pulverizacion (unid./ha)	Atrazina (3 lt/ha)
	Metalocloro (1,5 lt/ha) Gamacialotrina (30 cc/ha)
Fecha prom. Floración	13/02/2009
Fecha cosecha	07/05/2009

MAIZ TARDIO			
Año	2009/10		
Sitios	L3 B3	L4 B4	L2 B2
Hibrido	LT 624 (intermedio)	LT 624 (intermedio)	DK 190 (intermedio)
Antecesor	Girasol	Girasol	Soja
Barbecho (unid./ha)	R UP Full II (2 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) 2,4 D Amina (600 cc/ha) Dicamba (140 cc/ha)	R UP Full II (2 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) 2,4 D Amina (600 cc/ha) Dicamba (140 cc/ha)	R UP Full II (2 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) 2,4 D Amina (600 cc/ha) Dicamba (140 cc/ha)
Fecha de siembra	10/12/2009	10/12/2009	10/12/2009
Fertilización a la siembra	Nitrocomplex (50 Kg/ha)	Nitrocomplex (50 Kg/ha)	Nitrocomplex (50 Kg/ha)
Pulverizacion (unid./ha)	R UP Full II (1,8 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) Metolacloro (1 lt)	R UP Full II (1,8 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) Metolacloro (1 lt)	R UP Full II (1,8 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) Metolacloro (1 lt)
	Atrazina (1,5 kg/ha) Lambdacialotrina (100 cc)	Atrazina (1,5 kg/ha) Lambdacialotrina (100 cc)	Atrazina (1,5 kg/ha) Lambdacialotrina (100 cc)
Fecha prom. Floración	08/02/2010	08/02/2010	08/02/2010
Fecha cosecha	14/05/2010	20/05/2010	12/05/2010

MAIZ TARDIO			
Año	2010/11		
Sitios	L5 B5	L6 B6	L7 B7
Hibrido	DK 190 (intermedio)	DK 700 (c. Intermedio)	DK 190 (intermedio)
Antecesor	Soja	Soja	Pastura
Barbecho (unid./ha)	R UP Full II (2 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) 2,4 D Amina (600 cc/ha) Dicamba (140 cc/ha)	R UP Full II (2 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) 2,4 D Amina (600 cc/ha) Dicamba (140 cc/ha)	R UP Full II (2 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) 2,4 D Amina (600 cc/ha) Dicamba (140 cc/ha)
Fecha de siembra	28/11/2010	28/11/2010	03/12/2010
Fertilización a la siembra	Nitrocomplex (50 Kg/ha)	Nitrocomplex (50 Kg/ha)	Nitrocomplex (50 Kg/ha)
Pulverización (unid./ha)	R UP Full II (1,8 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) Metolacloro (1 lt)	R UP Full II (1,8 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) Metolacloro (1 lt)	R UP Full II (1,8 lt/ha) Sulfato de Amonio (1 kg) Metolacloro (1 lt)
	Fluorloridona (600 cc) Lamdacialotrina (100 cc)	Fluorloridona (600 cc) Lamdacialotrina (100 cc)	Fluorloridona (400 cc) Lamdacialotrina (100 cc)
Fecha prom. Floración	27/01/2011	27/01/2011	01/02/2011
Fecha cosecha	18/05/2011	18/05/2011	09/06/2011

SORGO				
Año	2008/09	2009/10	2010/11	
Sitios	1 y 2	3	4a	4b
Hibrido	VDH 206 (c. Intermedio-corto) Tratada c/ Concep	Fronterizo (DP intermedio)	VDH 314 (c. Intermedio - largo) Tratada c/ Concep	VDH 114 (c. corto) Tratada c/ Concep
Antecesor	Pastura	Pastura	Soja	Soja
Barbecho (unid./ha)	Ultramax (1,7 lt) Sulfato de Amonio (1 kg) 2,4 D Amina (600 cc/ha) Dicamba (140 cc/ha)	Ultramax (1,6 lt) Sulfato de Amonio (1 kg) 2,4 D Amina (600 cc/ha) Dicamba (140 cc/ha)	Ultramax (1,3 lt) Sulfato de Amonio (1 kg) 2,4 D Amina (500 cc/ha) Dicamba (120 cc/ha)	Ultramax (1,3 lt) Sulfato de Amonio (1 kg) 2,4 D Amina (500 cc/ha) Dicamba (120 cc/ha)
Fecha de siembra	10/12/2008	20/11/2009	03/12/2010	03/12/2010
Fertilización a la siembra	Nitrodoble (25 kg/ha)	Nitrodoble (25 kg/ha)	Urea (104 Kg/ha) Arrancador (70 Kg/ha)	Urea (104 Kg/ha) Arrancador (70 Kg/ha)
Pulverización (unid./ha)	Atrazina (2 lt/ha)	Atrazina (3 lt/ha)	Atrazina (3 lt/ha)	Atrazina (3 lt/ha)
	Metalocloro (1,5 lt/ha)	Metalocloro (1,5 lt/ha)	Metalocloro (1,5 lt/ha)	Metalocloro (1,5 lt/ha)
Fecha prom. Floración	12/03/2009	01/03/2010	01/03/2011	18/02/2011
Fecha cosecha	28/04/2009	16/04/2010	18/04/2011	18/04/2011

Daniel E. Martínez

Daniel Martínez & Asoc. Consultora Agropecuaria, Gral. Pico, La Pampa

Agronomía por ambientes en la práctica

INTRODUCCIÓN

Sabemos que las diferencias productivas que se manifiestan en distintos ambientes son por causas de origen edáfico, climático, de manejo previo y del cultivo. Estos últimos años hemos incorporado varias herramientas tecnológicas que nos proveen información para profundizar los conocimientos sobre las variables que definen el resultado productivo de los ambientes. Sin embargo, la disponibilidad de dicha información no se puede transformar directamente en resultados positivos si no va acompañada de un trabajo de análisis profundo y teniendo en cuenta las incertidumbres que nos plantean gran parte de las variables que se vinculan. Con la investigación que se realiza por parte del INTA (Estación Experimental Anguil y Agencia General Pico), en conjunto con la actividad privada, avanzamos en el conocimiento de los parámetros ambientales, su vínculo con la genética disponible y fundamentalmente con todo el arte que implica la agronomía.

EXPERIENCIA LOCAL

Nuestra zona se caracteriza por presentar una gran heterogeneidad que genera grandes diferencias productivas en pequeñas distancias, eso lo pudimos verificar con datos reales georreferenciados cuando ingresaron las primeras cosechadoras equipadas con monitores hace ya una década. A partir de esa circunstancia surgió la necesidad de avanzar en el conocimiento del origen de esas diferencias que tienen un importante impacto productivo y económico.

Se conformó un grupo de trabajo a través del convenio con la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Pampa (dirigido por la

Ing. Soledad Mieza) que contempló el uso e interpretación de imágenes satelitales históricas y actuales, que fueron relacionadas con aspectos climáticos y de manejo de los cultivos en el tiempo.

La estrecha relación entre la topografía, textura y materia orgánica con la capacidad de retención de agua (CRA) nos llevó a incorporar el DGPS (sistema de posicionamiento global diferencial) para realizar las altimetrías que permiten obtener modelos de curvas de nivel, vectores de pendiente, y poder establecer límites precisos entre mesoambientes. Con los datos del DGPS y las imágenes se comenzaron a establecer los lugares homogéneos geo-referenciados donde se efectuaron los análisis de suelo de parámetros estables y dinámicos, el seguimiento del agua útil, la determinación de la profundidad efectiva y otras variables necesarias para caracterizar los ambientes.

Coincidió que se comenzó a trabajar cuando se produjo un cambio climático importante para nuestra región pasando de un período húmedo hasta el año 2004 hacia uno más seco que lleva ya más de 8 años. Siendo el agua el insumo determinante para la producción, cobró suma importancia conocer su disponibilidad en el suelo, su dinámica, calidad y manejo. La correlación demostrada entre el agua disponible en el suelo, las etapas fenológicas y el rendimiento de los cultivos, llevó a realizar un continuo muestreo de agua útil en distintas profundidades de acuerdo a la capacidad radicular de los mismos. El barreno es sin dudas una de las herramientas imprescindibles para la caracterización ambiental.

La limitante más importante desde el punto de vista de CRA es la profundidad del perfil. Mediante muestreos geo-referenciados se elaboraron mapas de profundidad efectiva para determinar planteos con rotaciones adecuadas a la oferta hídrica y

determinar su factibilidad productiva.

Si bien la disponibilidad de imágenes satelitales y mapas de rendimiento nos posibilitan desarrollar nuestro trabajo de ambientación, no debemos minimizar el trabajo de comprobación a campo, muestreos de suelos, seguimiento del perfil hídrico, y prácticas de manejo, porque la gran variabilidad climática de las campañas puede inducirnos a error al caracterizar un determinado ambiente. Como ejemplo: al cabo de varios años, ambientes predeterminados de alta productividad, como bajos de alto potencial, ante situaciones climáticas extremas se comportan en forma inversa (anegamientos por lluvias intensas y continuas con la incidencia de anoxia en el cultivo, heladas que se asientan por topografía, salinización post inundación, etc.)

También sumar información de varios años nos permitió ajustar los límites de los ambientes y corroborar lo dinámico de las respuestas productivas, de acuerdo a las condiciones no solo climáticas sino también de las prácticas agronómicas desarrolladas. Ejemplo: Mapas de rendimiento obtenidos de un mismo lote con diferentes respuestas en rendimiento en el mismo ambiente entre distintas campañas, en las cuales se intervino en el manejo de la rotación, eficiencia del barbecho, densidad de siembra, fertilización variable, fecha de siembra de acuerdo al agua útil disponible y elección de la genética (largo de ciclo,

compensación ante cambios en densidades, resistencia a enfermedades y plagas animales, respuesta a la fertilidad, etc.).

El análisis de los primeros mapas de rendimiento generados a partir de siembras con densidad fija mostraban áreas dentro de los lotes que presentaban bajos rendimientos, inferiores al rendimiento de indiferencia. Estas áreas dentro del lote eran subsidiadas por sectores de mayor potencial que superaban ampliamente el rendimiento de indiferencia. La intervención con prácticas de manejo como las mencionadas anteriormente mejoró los resultados productivos de los ambientes extremos de bajo potencial, que en muchos casos superaron los rendimientos de indiferencia, y evitamos subsidiar unos sitios por otros. Esto es importante porque cuando evaluamos económicamente el manejo por ambientes no sólo tenemos en cuenta el posible ahorro de insumos (semillas y fertilizantes) sino también la respuesta diferencial asociada al manejo variable que se puede obtener en cada ambiente de acuerdo a la oferta de recursos. Como ejemplo del cambio de manejo vemos cómo se va logrando estabilidad que se manifiesta con la disminución de la dispersión de los datos de los histogramas de rendimientos obtenidos, y cómo se logra disminuir la superficie por debajo del rendimiento de indiferencia económica (Figura 1a y b).

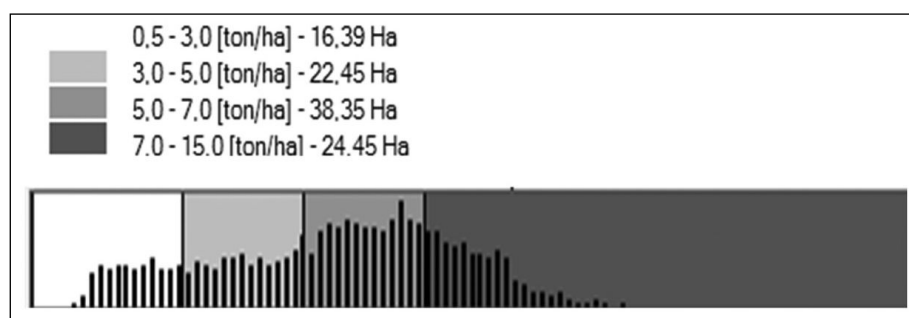


Figura 1a: Histograma de mapa de rendimiento de maíz tardío en el lote 29 con siembra a densidad fija en la campaña 2007/08.

Fuente: elaboración propia en base a software SMS.

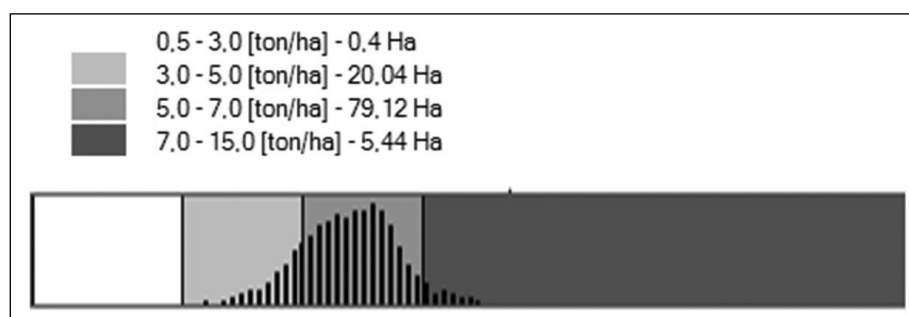


Figura 1b: Histograma de mapa de rendimiento de maíz tardío en el lote 29 con siembra de densidad variable durante la campaña 2011/12.

Fuente: elaboración propia en base a software Pampa GIS.

CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL

Una vez determinadas las zonas homogéneas, se realizan muestreos dirigidos geo-referenciados y con un número de submuestras que garanticen obtener resultados con el mínimo error. Se determinan en laboratorio parámetros como materia orgánica (MO), textura, nitrógeno, CRA, fósforo, Ph, cationes, capacidad de intercambio catiónico, etc. Gracias a los trabajos realizados por el Ing. A. Quiroga y su grupo de suelos del INTA Anguil, utilizamos el índice de fertilidad que vincula la textura con la materia orgánica y nos permite inferir el nivel de mineralización potencial del suelo. La MO joven o lábil la utilizamos no sólo para categorizar el potencial del suelo sino también con fines prácticos para ajustar el balance de nitrógeno con la fertilización. La siembra directa incorporada hace más de 10 campañas nos permitió mejorar los indicadores de calidad de suelo físicos, químicos y biológicos. Con el incremento de los residuos en superficie aumentamos la proporción de MO joven y disminuimos la pérdida de agua por evaporación. Con la experiencia de estas campañas y la información generada en los ensayos con el INTA, el conocimiento de la CRA y la oferta nutricional por ambientes tratamos de optimizar la eficiencia de uso del agua.

Es así que empleamos densidad y fertilización variable en base a lo experimentado tanto en parcelas como en franjas que incluyen distintos ambientes. En maíz utilizamos densidades que van desde 35.000 a 70.000 plantas por hectárea en siembras tempranas como tardías. En girasol densidades de 30.000 a 55.000 plantas por hectárea. En sorgo variamos entre 80.000 y 180.000 plantas por hectárea. En soja evaluamos densidades pero fundamentalmente distanciamiento entre hileras de acuerdo a la fecha de siembra. Es imprescindible agudizar la calidad de siembra y el control de malezas.

Con respecto a la nutrición, el fósforo es un elemento clave para la productividad que corregimos también por zonas. Generalmente tomamos como base 15 ppm, más lo que potencialmente pueda extraer el cultivo de la campaña. No solo se busca la eficiencia ambiental, sino también en muchos casos implica un ahorro económico importante como insumo.

Al evaluar con análisis por ambientes vimos

que las lomas de textura arenosa y baja CRA disponían de niveles altos de Fósforo en contraposición con bajos de alto potencial que sufrieron alta extracción al cabo de tantas campañas y no haber sido repuesto. Una forma de aplicar este nutriente es al voleo con anticipación, ya que fertilizaciones de altas dosis en la línea de siembra complican el muestreo futuro y la calidad de los datos obtenidos. Hemos tenido resultados interesantes al aumentar la disponibilidad con la corrección del pH cuando presentó valores menores a 6, con aplicación de Ca, Mg y otros elementos.

En caso del Nitrógeno, conociendo el potencial de mineralización y realizando análisis de nitratos a la siembra y en etapas vegetativas tempranas (V4-V6), analizamos el balance para un potencial rendimiento en base a la CRA y corregimos con fertilización.

CLIMA

Contar con la estadística histórica y los datos que se registran a diario de las estaciones meteorológicas nos permiten analizar el impacto de las variables climáticas en los cultivos. Sabemos la importancia que tienen las precipitaciones, la temperatura, el viento, la humedad relativa y demás parámetros para conformar el ambiente productivo. Como comentábamos antes, estamos transitando un período más seco. De tener una media anual de 1000 mm pasamos a 600 mm. Al margen de alternar ciclos niño/niña que benefician en forma diferencial a los distintos cultivos y del déficit hídrico considerado normal para la época, se presentaron estos últimos 3 años valores extremos de altas temperaturas y baja humedad prolongados en el tiempo (stress térmico) en los meses de diciembre y enero que ocasionaron pérdidas importantes de potencial cuando coincidieron con las etapas críticas de los cultivos. Estas anomalías tuvieron distinto impacto en los ambientes de acuerdo a las prácticas de manejo implementadas para mitigarlas; fechas tardías en maíz, presencia de napa y su aporte, ajuste de densidades por CRA, densidad y fecha de siembra en girasol, grupo de madurez, distanciamiento entre hileras y fecha de siembra en soja, etc.

Otro cambio que surge del análisis de la estadística climática de estos últimos años es la disminución de las precipitaciones que se acentuó

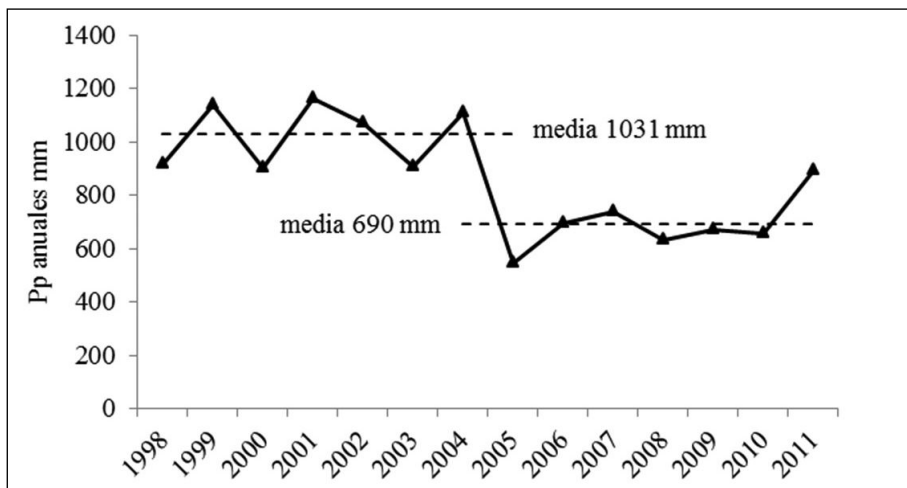


Figura 2: Precipitaciones anuales en Dorila durante el período 1998-2011.

en la falta de lluvias otoñales con la consecuente falta de reposición de agua útil en el perfil (Figura 2). Esto condujo a que se llegue a la época de siembra temprana de primavera sin el porcentaje de agua útil necesario para el desarrollo normal esperado de los cultivos de primera. Asimismo, la probabilidad de que las lluvias primaverales compensen el déficit también es menor. En base a estas condiciones, solo en los ambientes con aporte de napa freática segura se utilizan las siembras de primera para el caso del maíz o en suelos con condiciones edáficas de alta CRA y que superen el 75% de agua útil a la siembra y previendo una temporada normal o superior a lo normal en precipitaciones (Niño). Es fundamental tener en cuenta la disponibilidad de agua útil en el perfil para determinar la fecha de siembra y la respuesta a la fertilización para todos los cultivos. Ensayos realizados por el INTA en nuestra zona confirman la correlación de esa información con los rendimientos logrados.

Del uso intensivo del barreno para muestrear sistemáticamente los sitios específicos a distintas profundidades, surgió la necesidad de investigar el consumo de agua por parte de las raíces de los distintos cultivos, es así que se evalúa la disponibilidad hídrica en los perfiles de acuerdo a sus requerimientos y su consumo a lo largo del ciclo. De esos seguimientos surgieron características de los suelos que no se manifestaban en épocas de mayores precipitaciones y perfiles en capacidad de campo. Encontramos capas de concreciones de calcio, que sin ser planchas continuas de tosca, impiden el crecimiento radicular en períodos de sequía. También en situaciones normales

de consumo de agua del cultivo, impiden el ascenso capilar de reposición desde de capas inferiores saturadas o de la napa si estuviera presente. Condiciones de precipitaciones abundantes generan acumulación hídrica excesiva y en muchos casos provocan condiciones de anoxia o de salinización con la consecuente pérdida de productividad.

Cuando la superficie con aporte de napa freática lo justifica, se establece una red de freatómetros ubicados estratégicamente que nos permiten obtener datos de comportamiento y calidad para tomar decisiones en cuanto a rotación y manejo.

La secuencia de imágenes satelitales y los mapas de rendimiento nos permitieron analizar la influencia de los cambios edáficos producidos con respecto a la salinización, no solo en las borduras de las zonas deprimidas, sino que también de acuerdo a la condición hídrica de la temporada encontramos ambientes que manifiestan depresión productiva por influencia de la napa salina y deterioro físico-químico del suelo. Ese comportamiento se manifiesta en forma diferencial en los distintos cultivos y se expresa en mayor magnitud durante los períodos críticos de los mismos. El estudio de dichos ambientes mediante el análisis de parámetros como materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, porcentaje de sodio intercambiable, y dinámica de la napa salina, determinan la potencialidad productiva de los mismos. Hoy contamos con técnicas de recuperación y mantenimiento de estos ambientes, como el manejo de la cobertura, implantación de pasturas perennes como agropiro o grama rodhes y la corrección con yeso, que

posibilitan generar producción donde antes no era factible.

La delimitación de áreas de manejo también permite el ajuste de otras prácticas agronómicas. La efectividad y residualidad de muchos herbicidas utilizados en los distintos cultivos dependen de algunos parámetros como el porcentaje de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico. Delimitar ambientes y conocer los niveles de dichos parámetros, nos permite ajustar las dosis para lograr eficiencia en el control de las malezas, evitar efectos fitotóxicos para el cultivo y no dejar residuos en el suelo por períodos prolongados. Se ha observado también una correlación de la presencia de determinadas malezas con las características de los ambientes. Un ejemplo concreto es la incidencia de la textura y materia orgánica con elevados niveles de infestación de pata de gallo y roseta, que coinciden preferentemente con lomas arenosas y de baja fertilidad. La delimitación de esas áreas permite efectuar aplicaciones dirigidas para controlar y disminuir el banco de semillas de dichas malezas.

Mediante las imágenes aéreas de alta resolución y las multispectrales podemos identificar la presencia de determinadas malezas en los barbechos y durante el desarrollo de los cultivos. Podemos efectuar un seguimiento temporal de las mismas, y en algunas ocasiones correlacionarlas con parámetros ambientales. Las imágenes y luego los mapas de rendimiento permiten cuantificar las pérdidas que las malezas ocasionan debido a errores y/o deficientes condiciones de aplicación.

MAQUINARIA

En la actualidad disponemos de equipamiento tecnológico en la maquinaria de siembra, pulveri-

zación, fertilización y cosecha que registra la información obtenida durante los procesos. Los monitores permiten visualizar en tiempo real la ejecución de las labores y generan mapas que posteriormente son cargados y analizados en programas específicos. Las sembradoras cuentan con sistemas variables de densidad y fertilización que reciben la prescripción elaborada para cada ambiente y registran la aplicación real en base a los sensores ubicados en los tubos de descarga. En el mercado existen diversas opciones de equipos variables, electrónico-mecánicos, electrónico-hidráulicos, eléctricos, etc. Generalmente se elige el sistema de acuerdo al tractor disponible y su equipamiento.

Para analizar el costo de incorporar la tecnología de insumos variables se pueden calcular las hectáreas necesarias para amortizar un equipo. Como ejemplo, un equipo electrónico-hidráulico para 12 surcos tiene un costo aproximado de U\$S 10.000. En base al margen ambiental que se describe para maíz se necesitan entre 400 y 800 hectáreas de siembra para obtener un ingreso adicional que permita cubrir el costo del equipo, de acuerdo a la heterogeneidad que justifique su implementación (Tablas 1 y 2).

Los mismos monitores de siembra pueden ser utilizados para aplicación variable de fertilizantes al voleo o en bandas de acuerdo a las prescripciones de dosificación por ambientes. El caso concreto es el fósforo aplicado en zonas donde el nivel del nutriente no alcanza para cubrir los requerimientos del cultivo. Este es un nutriente fundamental para el crecimiento radicular y por ende, asociado a la extracción de agua del suelo. Esta práctica permite amortizar los equipos y se efectúa en épocas de mano de obra ociosa.

Las cosechadoras con monitores no sólo ela-

Lote 132 ha	Dosis Variable			Dosis fija
Superficie (%)	23	26	51	100
Superficie (ha)	31	35	66	132
Insumo	Ambiente 1	Ambiente 2	Ambiente 3	Ambiente único
Semillas (unidades/ha)	45000	58000	68000	65000
Nitrógeno (kg/ha)	0	42	92	72
Diferencial con dosis fija semillas	-20000	-7000	3000	---
Diferencial con dosis fija nitrógeno	-72	-30	20	---

Tabla 1: Insumos por ambiente en dosis variable y fija de semillas y fertilizantes en el cultivo de maíz.

Tabla 2: Margen ambiental entre dosis variable y fija de semillas y fertilizante en el cultivo de maíz.

Lote 132 ha	Dosis Variable			Dosis fija
Superficie (%)	23	26	51	100
Superficie (ha)	31	35	66	132
Insumo	Ambiente 1	Ambiente 2	Ambiente 3	Ambiente único
Semillas (U\$/ha)	90	116	136	130
Nitrógeno (U\$/ha)	0	57	125	98
Mapa de prescripción (U\$/ha)	2	2	2	---
Subtotal Egresos (U\$)	2792	6057	17228	30096
Total Egresos (U\$)	26007			30096
Diferencia Variable - Fija (U\$)	4019			
Diferencia Variable - Fija (U\$/ha)	30,45			

boran los mapas de rendimiento, también registran velocidad de avance, humedad del grano y otros parámetros que se grafican como mapas. Estos datos permiten evaluar la calidad del trabajo. Es necesario realizar el filtrado de los datos en bruto que se generan en los monitores para eliminar los errores que ocurren durante el proceso de cosecha. Entre éstos se cuentan las paradas de descarga en las monovolvas, cuando se cortan menor número de hileras que están cargadas en la configuración, cuando ocurren sobrepasadas y los arranques de las cabeceras. También se corrigen diferencias ocasionadas por la falta de calibración para que los datos de rendimiento sean los reales.

Un nuevo aporte tecnológico es la incorporación de las imágenes aéreas multiespectrales de alta resolución que complementan y reemplazan a las satelitales. Poseen mayor calidad y detalle, y se puede programar el vuelo el día y la hora que mejor conviene desde el punto de vista técnico. Ejemplo: Momentos adecuados para obtener NDVI (índice de vegetación diferencial normalizado ó índice verde), límites de ambientes más precisos, zonas anegadas o sin piso, monitoreo de malezas, etc. En la campaña 2011/12 se tomaron imágenes aéreas multiespectrales en distintas etapas fenológicas del cultivo de maíz de ensayos en franjas de fertilización nitrogenada con distintas dosis. Este estudio busca analizar el uso de imágenes como soporte a la toma de decisiones de fertilización por ambiente.

SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO (GIS)

Toda la información geo-referenciada generada en el tiempo requirió el desarrollo de un programa de computación que permitiera organizarla en capas, visualizarla y compararla dinámicamente. El PampaGis creado en conjunto con TECRO Ingeniería, posibilitó, en forma simple y organizada, analizar planos de establecimiento, altimetrías, sitios de muestreos de suelo, imágenes, mapas de rendimiento, prescripciones de siembra, mapas de siembra real, mapas de fertilización, mapas de pulverización y cualquier otro dato geo-referenciado. La información se puede cargar por capas en las computadoras directamente y ahora también se pueden bajar de la web para agilizar la toma de decisiones.

CONCLUSIÓN

Cuando hablamos de manejo por ambientes nos referimos a obtener la mayor productividad por áreas homogéneas. Por otro lado, la difusión del término agricultura de precisión la relacionamos con el avance tecnológico en cuanto a la maquinaria y software.

La aplicación de manejo por ambientes no es una práctica aislada. Es importante previamente plantearnos que debemos mejorar todos los procesos involucrados. Explicamos las diferencias productivas no sólo por la oferta ambiental sino también por el eficiente uso de la tecnología. El

control de las labores como una correcta pulverización, donde el control de malezas depende de la regulación de la pulverizadora y la condición climática de la aplicación. La siembra con adecuada dosificación, profundidad, velocidad, etc. La adecuada aplicación aérea. La cosecha sin pérdidas importantes por regulación, velocidad, condiciones climáticas, etc.

El equipamiento disponible hoy de monitores nos informa en tiempo real y graba los procesos para analizarlos con posterioridad permitiendo

cuantificarlos productiva y económicamente. Debemos pensar que tenemos que disponer de la maquinaria adecuada para enfrentar estos sistemas de producción con el personal comprometido y capacitado.

Es importante destacar que las herramientas tecnológicas al servicio de la agricultura por ambientes superan ampliamente a la generación de la información agronómica real para la toma de decisiones.

Anexo color

Figuras pertenecientes al **Capítulo 02**

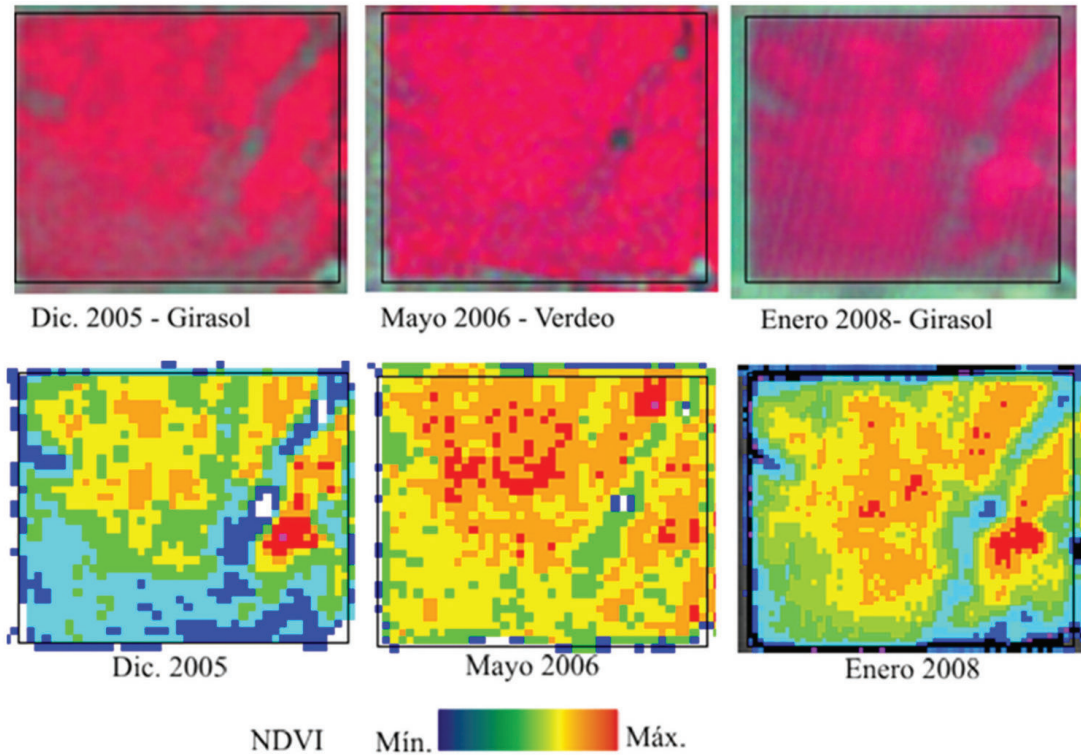


Figura 1: Serie temporal de Imágenes Landsat (2005-06) y CBERS (2008) en falso color compuesto estándar y NDVI asociados. Los valores absolutos máximos y mínimos de NDVI difieren entre imágenes, pero para esta aplicación no se pretende comparar valores entre imágenes sino diferencias intralote. Puede observarse la consistencia de los patrones espaciales para los distintos cultivos y años.

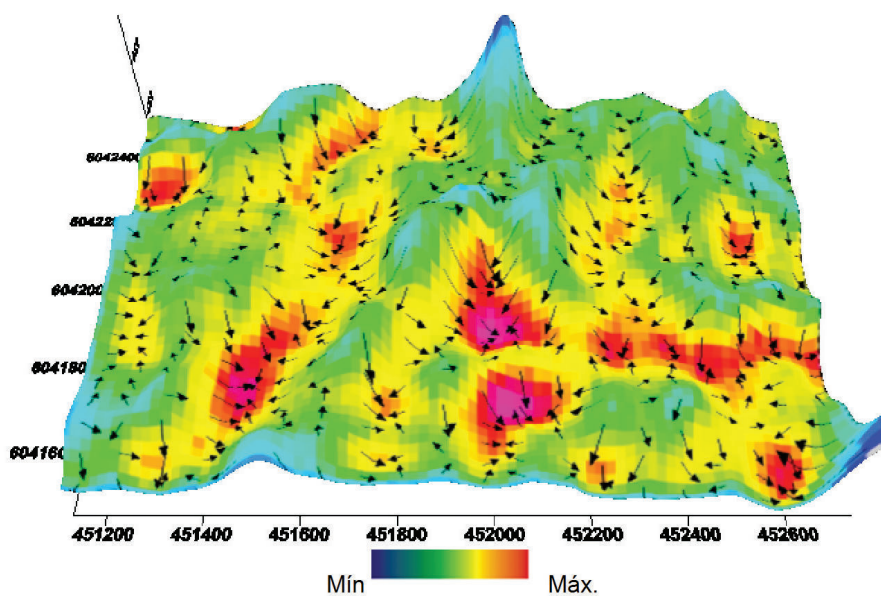


Figura 2: Modelo Digital de elevación, superpuesto con mapa temático de NDVI a partir de una imagen CBERS (20 de Enero de 2008) para un lote de girasol de 165 ha. La diferencia máxima entre cotas es de 6m.

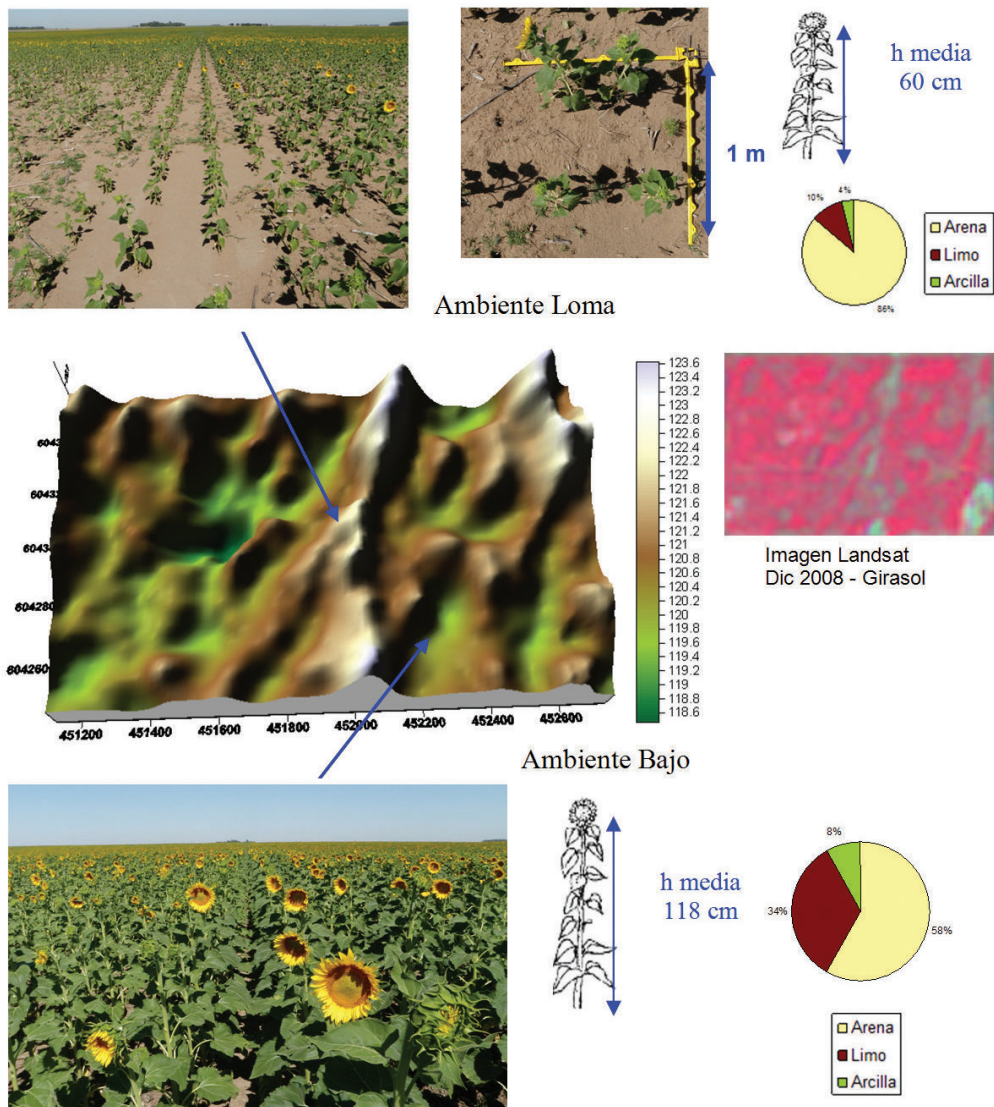


Figura 3: En esta figura se muestran las diferencias en el cultivo para una misma fecha (5 de enero de 2012) para dos de los ambientes de un lote y la correlación con la topografía del mismo. La topografía del lote da lugar a patrones consistentes en el tiempo que se pueden observar en las imágenes. En este caso la imagen no pertenece a la misma campaña pero sí al mismo cultivo. Se muestran además resultados del análisis de suelo y altura promedio de las plantas en esa fecha para cada zona

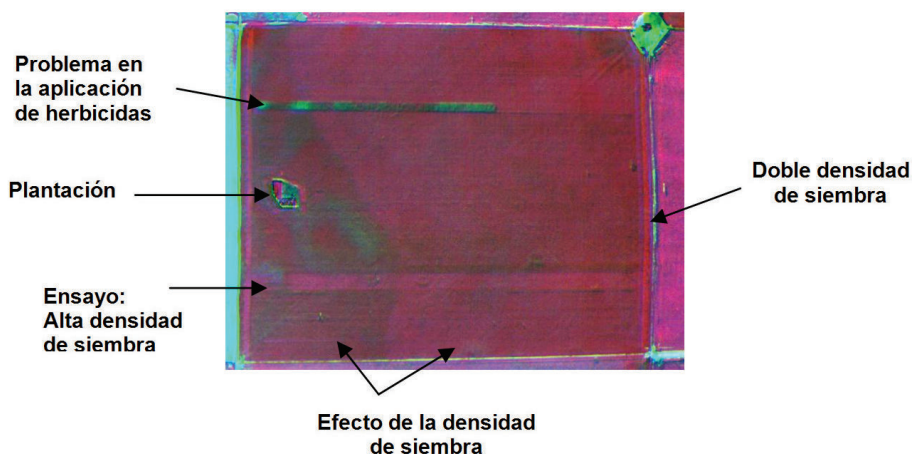


Figura 4: Imagen Aérea multiespectral en Falso Color compuesto Standard (125 ha). Cultivo Girasol. Fecha: 5 de Enero de 2012. Se indican problemáticas y situaciones particulares observadas.

La región semiárida pampeana se caracteriza por una importante variabilidad en la productividad de los cultivos asociada en gran medida a las diferencias en las condiciones meteorológicas y en las características edáficas a nivel de grandes planicies. Asimismo, se observan significativas variaciones a nivel sitio específico entre ambientes y años en una escala inferior al lote o potrero. El desarrollo de las tecnologías de la información y comunicaciones aporta herramientas de gran utilidad para la georeferenciación de áreas homogéneas de manejo y el ordenamiento y análisis de la información, pero requiere de una interpretación agronómica que adecúe la estrategia de manejo a la potencialidad de cada sitio.

Esta publicación aporta elementos de análisis para la identificación y jerarquización de los factores que determinan la productividad de los principales ambientes de la región semiárida pampeana. Relaciona diversas fuentes de datos georeferenciados para la caracterización de ambientes a través de sistemas de información geográficos y propone criterios agronómicos de manejo en los cultivos de girasol, maíz y sorgo adaptados a la región semiárida pampeana. Las ventajas y dificultades de la aplicación práctica de este conjunto de innovaciones es presentada desde la mirada del mismo usuario.

El presente documento permite conocer avances en el estado de la práctica de la agricultura por ambientes en la región semiárida pampeana enmarcados en el contexto de una vertiginosa evolución tecnológica.



Ministerio de Agricultura,
Ganadería y Pesca
Presidencia de la Nación

EEA Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas"
Ruta 5 Km 580 - CC 11 - Anguil (6326) - La Pampa
TE: 02954 - 495057